

**P TİPİ SİLİSYUM TABANLI ALTLIK ÜZERİNE CuO  
MADDESİNİN KAPLANARAK ELDE EDİLEN YAPILARIN  
AKIM İLETİM MEKANİZMALARI**

**Mehmet Faruk KARABAT**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. İsmail ARSEL**

**2014**

**Her hakkı saklıdır**

T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ-BATMAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**P TİPİ SİLİSYUM TABANLI ALTLIK ÜZERİNE CuO  
MADDESİNİN KAPLANARAK ELDE EDİLEN  
YAPILARIN AKIM İLETİM MEKANİZMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mehmet Faruk KARABAT**

**Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İsmail ARSEL**

**Temmuz 2014**

T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

P TİPİ SİLİSYUM TABANLI ALTLIK ÜZERİNE CuO  
MADDESİNİN KAPLANARAK ELDE EDİLEN YAPILARIN AKIM  
İLETİM MEKANİZMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Faruk KARABAT

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 11.07.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr.  
İsmail ARSEL  
Jüri Başkanı

Doç. Dr.  
Ömer GÜLLÜ  
Üye

Yrd. Doç. Dr.  
Beşir DAĞ  
Üye

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç. Dr. İbrahim Y. ERDOĞAN  
Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Yrd. Doç. Dr. İsmail ARSEL rehberliğinde gerçekleştiği için kendisine yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ömer GÜLLÜ'ye teşekkür ederim.

Bu çalışmayı hazırlamamda, bilgi birikimini benimle paylaşan gerek laboratuvar becerisi kazanmamda gerekse fiziksel işlemleri yorumlamam konusunda bana tecrübelerini aktaran ve zamanını ayıran değerli hocam Sayın Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK'a (Dicle Üniversitesi) teşekkür ederim.

Çalışmalarıma yorum ve önerileriyle destek veren Sayın Dr. Cihat ÖZAYDIN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana moral ve motive noktasında yardımcı olan yüksek lisans arkadaşlarım Mesut TURMUŞ ve Filiz ASLAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca Batman ve Bingöl Üniversitesi Fizik Bölümü hocalarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu tez Batman Üniversitesi "2010 BKV 1285" nolu DPT projesi kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

**Mehmet Faruk KARABAT**  
**Bingöl 2014**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	v
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	5
3. KURAMSAL TEMELLER .....	15
3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar .....	15
3.1.1. Metal n-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar .....	15
3.1.2. Metal n-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar .....	18
3.1.3. Metal p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar .....	19
3.1.4. Metal p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar .....	21
3.1.5. Metal/p-Tipi Yarıiletken-Metal Yapısı .....	22
3.1.6. Shcottky Diyotlarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi.....	23
3.1.7. Shcottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkileri .....	27
3.1.8. Düz Beslem I-V Karakteristikleri .....	29
3.1.9. Norde Fonksiyonları Yardımıyla Diyot Karekteristiği .....	30
3.2. CuO Filmlerin Fiziksel Özellikleri.....	35
3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) .....	36
3.4. Sol jel yöntemi .....	38

3.4.1. Döndürme yöntemi ile film kaplama(Spin coating).....	40
4. MATERYAL VE YÖNTEM .....	43
4.1. CuO Çözeltisinin Hazırlanması.....	43
4.2. Deneyde Kullanılan Materyallerin Özellikleri.....	43
4.2.1. Silisyum.....	43
4.2.2. Alüminyum .....	44
4.3. Silisyum Alt Tabakanın Hazırlanması .....	45
4.4. Omik Kontak Atılması .....	46
4.5. CuO Film Kaplanması.....	48
4.6. Schottky Diyot Elde Edilmesi .....	48
5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	50
5.1. Schottky Kontaklarda Akım-Gerilim Ölçümleri.....	50
5.2. Norde Fonksiyonları Yardımı İle Engel Yüksekliği ve Seri Direnç Değerlerinin Bulunması.....	52
5.3. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun optik özelliklerinin belirlenmesi.....	54
5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları.....	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	59
KAYNAKLAR .....	61
ÖZGEÇMİŞ .....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$C-V$	: Kapasite-gerilim
$I-V$	: Akım-gerilim
$UV-VIS-NIR$	: Morötesi-görünür-yakın kırmızı ötesi
$C_2H_5OH$	: Etanol
$CH_3CHOHCH_3$	: İzopropanol
$(CH_3COO)_2Cu.H_2O$	: Bakır (II) asetat
$CH_3CHOH-COOH$	: Laktik asit
$CuO$	: Bakır (II) oksit
$Cu_2O$	: Bakır I oksit
$SEM$	: Taramalı elektron mikroskobu
$MS$	: Metal/yarıiletken
$MIS$	: Metal/yalıtkan/yarıiletken
$PVD$	: Fiziksel buhar biriktirme
$A^*$	: Diyotun etkin alanı
$A$	: Richardson sabiti
$AC$	: Alternatif akım
$AMI.5$	: Hava kitlesi 1.5
$C$	: Kapasite
$DC$	: Doğru akım
$E_c$	: İletkenlik bandının tabanı
$E_f$	: Fermi enerji seviyesi
$E_g$	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
$E_v$	: Değerlik bandının tavanı
$E_g$	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
$E_v$	: Değerlik bandının tavanı

$eV$	: Elektron volt
$\epsilon_s$	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$\Phi_b$	: Schottky engel yüksekliği
$\Phi_m$	: Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_s$	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\chi$	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
$h$	: Planck sabiti
$I-V$	: Akım–gerilim
$I$	: Ters beslem doyma akımı
$I_{sc}$	: Kısa devre akımı
$J$	: Akım yoğunluğu
$K$	: Boltzmann sabiti
$m_n^*$	: Elektron etkisi kütlesi
$N$	: İdealite faktörü
$N_a$	: Alıcı konsantrasyonu
$N_c$	: Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu
$N_d$	: Verici konsantrasyonu
$e$	: Elektronun yükü
$PV$	: Fotovoltaik
$R_d$	: Diyot direnci
$R_p$	: Paralel direnç
$R_s$	: Seri direnç
$T$	: Mutlak sıcaklık
$V_d$	: Difüzyon potansiyeli
$V_n$	: Yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark
$V_o$	: Açık devre gerilimi



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 3.1. Metal-yarıiletken doğrultucu kontakğın enerji-bant diyagramı (a) Kontakdan önce, metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı (b) Kontakdan sonra termal dengedeki enerji-bant diyagramı, (c) $V < 0$ olması halinde enerji-bant diyagramı, (d) $V > 0$ olması halinde enerji-bant diyagramı .....	17
Şekil 3.2. $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/n tipi yarıiletken omik kontakğa ait enerji bant diyagramı a) kontakdan önce b) kontakdan sonra c) düz belsem altında d) ters beslem altında .....	18
Şekil 3.3. Metal/ P–tipi yarıiletken doğrultucu kontakğın (a) kontakdan önce ve (b) kontakdan sonra ve termal dengede enerji bant diyagramı .....	20
Şekil 3.4. Metal/P–tipi yarıiletken doğrultucu kontakğın (c) $V \neq 0$ olması durumunda enerji bant diyagramı .....	21
Şekil 3.5. Metal/P-tipi yarıiletken omik kontakğın enerji-bant diyagramı: a) kontakdan önce b) kontakdan sonra ısısıl dengede ve c) $V > 0$ durumunda .....	22
Şekil 3.6. P <sup>+</sup> P M yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji bant diyagramı. ....	23
Şekil 3.7. Bir metal yüzeyi ile vakum arasında enerji bant diyagramı .....	28
Şekil 3.8. SEM cihazının genel bileşenleri (Polat 2009) .....	37
Şekil 3.9. Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM).....	38
Şekil 3.10. Döndürme yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi.....	40
Şekil 4.1. Omik kontak işleminin gerçekleştiği cihaz.....	47
Şekil 4.2. Tavlama için kullanılan fırın.....	47
Şekil 4.3. Al/CuO/p-Si/Al diyotun şematik gösterimi .....	48
Şekil 4.4. Keithley 2400 sourcemeter ve güneş simülatörü .....	49
Şekil 5.1. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun simülatör altında ve karanlıkta lnI-V grafikleri ..	51
Şekil 5.2. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun F(V)-V grafiği .....	53
Şekil 5.3. CuO ince filmlerin soğurma spektrumu.....	55
Şekil 5.4. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun $(Ahv)^2 - hv$ grafiği .....	56

Şekil 5.5. Döndürerek Kaplama yöntemi ile üretilen CuO ince filminin 40000x boyutundaki (yan kesit) SEM görüntüsü.....	57
Şekil 5.6. Döndürerek Kaplama yöntemi ile üretilen CuO ince filminin 15000x boyutundaki (yüzey) SEM görüntüsü .....	57
Şekil 5.7. Döndürerek Kaplama yöntemi ile üretilen CuO ince filminin 8000x boyutundaki (yüzey) SEM görüntüsü .....	58

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri .....	44
Tablo 4.2. Alüminyumun oda sıcaklığındaki bazı fiziksel özellikleri .....	45
Tablo 5.1. 40-100 mW/cm <sup>2</sup> altında Al/CuO/p-Si/Al diyotunun duyarlılık, Voc ve Isc değerleri .....	52

# P TİPİ SİLİSYUM TABANLI ALTLIK ÜZERİNE CuO MADDESİNİN KAPLANARAK ELDE EDİLEN YAPILARIN AKIM İLETİM MEKANİZMALARI

## ÖZET

Bu çalışmada, (100) yönelimine sahip, önceden parlatılmış  $\rho=1-10 \Omega\text{cm}$  öz dirençli, p-tipi Si (Silisyum) kristali kullanılmıştır. Metal yarıiletken arasına yerleştirilen CuO nano yapılu ince filmleri büyütme için sol-jel döndürme tekniği olan spin coating metodu kullanılmıştır ve bir Al/CuO/p-Si/Al diyot yapısı üretilmiştir. Metal-yarıiletken arasına yerleştirilen ince metal-oksit filmin diyot karakteristikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen filmlerin, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır.

Diyot yapısını oluşturabilmek amacıyla, yapının omik ve doğrultucu kısmı, termal buharlaştırma metodu kullanılarak  $5 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında ve %99,99 saflığında alüminyum metali kullanıldı. Üretilen Al/CuO/p-Si/Al diyot yapısının geleneksel I-V, Norde fonksiyonları kullanılarak; idealite faktörü (n), engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) ve seri direnç ( $R_s$ ) değerleri hesaplandı. Ayrıca CuO filmlerin optiksel özellikleri UV-VIS spektroskopisi yardımı ile incelenmiş ve buradan optiksel enerji bant aralığının 2,08 eV olduğu tayin edilmiştir. Yapılan hesaplamalardan sonra üretilen diyotun doğrultucu diyot olduğu ve fotodiyot özellik gösterdiği görüldü.

**Anahtar Kelimeler:** Schottky, CuO ince filmler, Sol-jel döndürerek kaplama, SEM, I-V, UV-Vis-NIR

# **THE CURRENCY TRANSITION MECHANISMS OF STRUCTURES OBTAINED BY COVERING CuO MATERIAL ON AN P TYPE SILICON BASED GRAUND**

## **ABSTRACT**

In this study, a type-p Si (Silicon) crystal of orientation [100], having a resistivity of  $\rho = 1-10 \Omega\text{cm}$ , and polished beforehand, has been used in order to grow a nano-thin film of CuO inserted between a metal and a semiconductor. Spin coating method which is a sol-gel rotating technique has been used and an Al/CuO/p-Si/Al diode has been produced. The effect on the diode characteristics of the thin-film metal oxide inserted between metal-semiconductor has been investigated. Images of the films thus acquired, has been obtained by the Scanning Electron Microscopy (SEM).

To obtain the above mention diode and its ohmic and forward side by the fundamental evaporation technic,  $5 \times 10^{-6}$  Torr pressure and 99.99% pure aluminium metal was used. Employing the Norde function, the I-V characteristics of the diode, the value of the ideality factor (n), barrier height ( $\Phi_B$ ) and serial resistance ( $R_s$ ) were calculated. Furthermore the optical properties of the CuO films have been investigated by means of UV-VIS spectroscopy an from it the optical energy band interval was determined to be 2.08 eV. After the calculations it was found that the diode produced was forward side and showed the photodiode mode.

**Keywords:** Schottky, Sol-Gel Spin Coating Deposition, SEM, I-V, UV-Vis-NIR, CuO thin films

## 1. GİRİŞ

Yarıiletken teknolojisi katıhal fiziğinin en önemli ilgi alanlarından biridir. Son yıllarda metal- yarıiletken (MS) ve metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kontaklar ile metal-oksit-yarıiletken yapılar (MOS), yarıiletken teknolojisinde ve optoelektronikte yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Metal–yarıiletken (MS) Schottky diyotlarda metal ile yarıiletken arasına doğal ya da yapay olarak arayüzey tabakası oluşturulabilir. Metal-yarıiletken kontaklar üzerinde ilk defa engelin oluşumu için bir model geliştiren Schottky olduğu için metal-yarıiletken kontaklara Schottky diyot denilmektedir. Oluşturulan bu metal-yarıiletken (MS) diyotların çalışma prensibini anlamak ve geliştirmek için, elektriksel iletkenlik ve diğer karakteristiklerinin belirlenmesi konularında birçok çalışma yapılmıştır. Bu özelliklerin bilinmesi kullanım alanlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Diyotlar ve transistörler ilk keşfedildiklerinde çok büyük boyutlardaydı. fakat günümüzde nano teknolojinin ilerlemesi sayesinde artık sadece bir entegre devresinde milyonlarca diyot ve transistör bulunmaktadır.

Bu konuda literatür kısaca şu şekilde özetlenebilir;

Metal-yarıiletken kontak diyotlarla ilgili ilk çalışma 1874 yılında Braun tarafından yapılmıştır. Bu çalışmasında Braun, toplam direncin uygulanan voltajın polaritesine ve yüzey şartlarına bağımlı olduğunu göstermiştir. Ancak farklı biçimlerde nokta-kontakt doğrultucuların pratik uygulamaları 1904 yılının başlarında yapılmıştır.

1906 yılında Pickard yarıiletken kullanarak yaptığı bir nokta kontak dedektörü için patent almıştır (Pickard, 1906). Daha sonra Pierce, değişik yarıiletkenler üzerine püskürtme yöntemiyle metal kontaklar yapmak suretiyle ürettiği diyotların elektriksel karakteristiklerini yayımlamıştır (Pierce 1907).

1931' de Wilson, yarıiletkenlerin iletim teorisini katıların band teorisine dayanarak formülize etti. Daha sonra bu teoriyi metal-yarıiletken kontaklara uyguladı. 1931 yılında metal-yarıiletken kontağın doğrultma mekanizmasının anlaşılması Schottky, Störmer ve Waibel sayesinde olmuştur. Schottky 1938'de, daha sonra literatüre Schottky engeli olarak girecek olan durumu, metal-yarıiletken yapıdaki potansiyel engelin, kimyasal bir tabaka olmadığını, sadece yarıiletken içerisindeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklandığını illeri sürmüştür.

1938'de Mott, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle bir potansiyel engelin ortaya çıktığını ve engel bölgesinin yük fazlalığından yoksun olduğunu varsaymıştır (Mott 1938).

1940'ta Schottky ve Bethe, metal-vakum iletkenlik ile metal- yarıiletken diyotlardaki iletkenlikler arasında benzerlik olduğunu ortaya koymuştur.

1942'de Bethe, bu durumun metal-yarıiletken doğrultuculara uygulanabileceğini göstermiştir (Bethe 1942).

1966 yılında, Schotky'nin difüzyon teorisi ve Bethe'nin termoiyonik teorisi, termoiyonik emisyon-difüzyon modeli olarak tek bir modelde birleştirildi (Crowell ve Sze). 1971'de Card ve Rhoderick, arayüzey oksit tabakalı Si-Au kontaklarda arayüzey hal yoğunluğunu ve arayüzey tabakasının  $I-V$  karakteristiklerinin idealite faktörüne yönelik etkilerini belirlemişlerdir (Card ve Rhoderick). Metal-yarıiletken Schottky kontakları en önemli özellikleri, kontakların karakteristikleridir. Bundan dolayı Schottky engel diyotlarının  $I-V$  karakteristikleri, engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi parametreleriyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Petsch ve ark. 1990).

Schottky, Schottky engelini silisyum transistörlerle birleştirerek, Schottky engel kaplı metal-yarıiletken alan transistörü bulmuştur. Daha sonra metal-yarıiletken yapıların karakteristikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmüş ve bu yapılar sıcaklığın tayininde kullanılmışlardır (Chandra and Parsad 1986).

İdeal olmayan Schottky kontaklarda, metal ile yarıiletken arası her zaman ideal şartlarda oluşmaz. Bundan dolayı idealite faktörü ortaya çıkar. İdeal akım-gerilim karakteristiklerinde değişikliklerin ortaya çıkmasının nedeni seri dirençtir (Çetinkara 2002).

Literatür incelendiğinde metal-yarıiletken kontaklar elektronik ve optoelektronik teknolojisinde aygıtların yapımında önemli bir rol oynadığı ortaya çıkmaktadır. Çoklu eklem diyotlar, ışık yayan diyotlar (LEDs), lazer diyotları (LDs), UV fotodedektörler ve Schottky diyotlarını önemli metal yarıiletken kontaklar arasında olduğunu düşünürsek, araştırmaların nedenlerinin çok geniş uygulama alanlarına sahip olmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz.

Bu nedenle metal-yarıiletken kontakların ara yüzeylerindeki davranışlarının araştırılması önemli bir yer tutuyor. Bu tezin amacı CuO maddesini kullanarak daha iyi özelliklere sahip bir diyot elde etmektir. İlk bakır oksit tabaka doğrultucular 1920'lerde ortaya çıkmıştır (Grondahl, 1926-1933). Bakır (II) oksit CuO, optiksel özellikleri dikkate alındığında güneş pili üretiminde soğurucu tabaka olarak kullanılmaya uygundur (Oral vd. 2004).

Bakır (II) oksit (CuO), p-tipi bir yarıiletken malzemedir. Kahverengi veya siyaha yakın oldukça koyu bir renge sahip parlak bir katıdır. Molekül ağırlığı 79,45 g/mol ve yoğunluğu 6,3 g/cm<sup>3</sup>'tür. Direk enerji bant aralığına sahiptir ve enerji aralığının değeri 1,3 ile 2,4 eV arasındadır (Abdel Rafea and Roushyd 2009).

CuO dar bir bant aralığına sahip olması nedeni ile, spektrumun görünür bölgesinde yüksek soğurum yapabilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla güneş pillerinde aktif tabaka olarak kullanılmaya iyi bir adaydır. Bunun dışında gaz sensörü olarak da kullanımı oldukça yaygındır (Mangamma ve ark. 1998, Dandeneau ve ark. 2009).

Bakır (II) oksit (CuO), zehirli olmayan, doğada bol miktarda bulunabilen ve üretim maliyeti düşük, kahverengi veya siyaha yakın oldukça koyu bir renge sahip parlak bir katıdır ve p-tipi bir yarıiletken malzemedir. CuO ince film heteroeklem güneş pillerinde, elektronikte ve sensör uygulamalarında kullanılmaktadır (Zhang ve ark. 2009).



Bu çalışmada CuO nano yapılı ince filmleri büyötmek için sol-jel döndürme tekniği olan spin coating metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada CuO için ana malzeme olarak bakır asetat ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) solüsyonu hazırlanmış ve altlık olarak da p-silisyum ile cam alt tabakalar kullanılarak ince film kaplanmıştır. P-silisyuma önce Termal Buharlaştırma Cihazında, Al (alüminyum) azot atmosferinde 3 dakikada ve  $570^\circ\text{C}$  de tavlandıktan sonra omik kontak atılmıştır. Daha sonra CuO çözeltisi ile döndürerek kaplama yapılmıştır. Bir sonraki işlemdede ise yine Termal Buharlaştırma Cihazında, elde edilmiş olan yapının üzerine Al buharlaştırılarak Al/CuO/p-Si/Al diyotu üretilmiştir. Diyot yapısını oluşturmak için Termal Buharlaştırma Cihazında Al (Alüminyum)  $2 \times 10^{-6}$  torr basınçta buharlaştırılmıştır.

Üretilen Al/CuO/p-Si/Al yapısının oda sıcaklığında *I-V* ölçümleri alınmış, filmlerin optik özellikleri UV-VIS spektroskopisi yardımı ile incelenmiş ve Norde fonksiyonları kullanılarak Schottky diyotu için temel parametreler olan engel yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç gibi parametrelerle diyot belirteci olan bazı parametreler belirlenmiştir.

Yapılan ölçümler sonucunda Al/CuO/p-Si/Al yapısı, diyot özelliğini göstermiştir. Daha sonra diyotun morfolojik özelliklerini araştırmak için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Sze ve ark. (1964), metal-yarıiletken doğrultucu kontakların teorik olarak izahını yaparak, metal-yarıiletken kontaklarda imaj kuvvetten dolayı engel alçalmasını gösterdiler.

Ziel (1968), metal-yarıiletken yapıların karakteristiklerini sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçtü. Bu yapıları sıcaklığın tayininde kullandı.

Rhoderick ve Card (1971), düz beslem  $I-V$  karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörünün sayısal değerine bağlı olarak, metal ve yarıiletkenle dengede olan arayüzey durumlarını teorik ve deneysel olarak göstermişlerdir.

Deneuille ve Chakraverty (1972), Card ve Rhoderic'in çalışmalarını genişleterek hem ara yüzey tabakasının kalınlığını hem de ara yüzey hallerinin enerji dağılımını doğru ve ters beslem  $I-V$  karakteristiklerinden elde etti.

Card ve Rhoderick (1973), arayüzey oksit tabakalı Si-Al kontaklarda arayüzey hal yoğunluğunun belirlenmesi ve arayüzey hal yoğunluğunun doğru beslem akım-voltaj ( $I-V$ ) karakteristiklerinin idealite faktörü üzerine etkilerini analiz etti.

Varma ve ark. (1977), metal-yarıiletken kontaklar üzerinde arayüzey kirliliklerinin etkisini araştırmışlar ve arayüzey kirliliklerinin metal ile yarıiletken arasındaki yapışmanın mekanik şiddetini azalttığını bildirmişlerdir

Rideout (1978), metal- yarıiletken doğrultucuları detektör olarak kullanmıştır.

Norde (1979), ideal bir Schottky diyotun seri direncinin hesaplanması için minimum bir noktadan geçen gerilime bağlı bir  $F(V)$  fonksiyonu tanımlamış ve fonksiyonun

Minimum noktası yardımıyla seri direnç ve engel yüksekliğinin bulunmasını sağlayan bir metot geliştirmiştir.

Bethe (1942), Richardson'un metal-vakum sistemi için, 1942 yılında bulduğu termoiyonik emisyon teorisinin metal-yarıiletken yapılara da uygulanabileceğini gösterdi.

Sze (1981), p-n eklem yapıları için birçok metot geliştirdi ve metal-yarıiletken kontakları, bu eklem yapılarında akım iletimi için omik kontak olarak düşünülmesini sağladı.

Willson (1983), metal-yarıiletken diyotlar için kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirdi ve doğrultma teorisi için ters polariteyi açıkladı.

Evans ve ark. (1985), doğru beslem Schottky diyotlarındaki uzay yükü bölgesi kapasitesindeki fazlalıkları, düşük frekans kapasitesi olarak gözlediler ve bu artık kapasiteyi azınlık taşıyıcılarına ve değişik yüzey hallerine atfettiler.

Chandra ve Parsad, (1986), Metal-yarıiletken alan etkili transistörü bulmuştur. Sonraları metal-yarıiletken yapıların karakteristikleri, sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüş ve bu yapılar sıcaklığın tayininde kullanmıştır.

Cheung ve Cheung (1986), akım yoğunluğunun lineer fonksiyonları yardımıyla çizilen grafiklerden hem ideal hem de ideal olmayan durumda diyot parametrelerinin elde edilmesini sağlayan farklı bir metot ileri sürdü.

Wu ve ark. (1989), n- tipi yarıiletkenden yapılan Schottky diyotların, yüzey yükü ve arayüzeyde düşen voltajı göz önünde bulundurarak, arayüzey teorisini geliştirdiler. Pozitif uzay yükü artışının potansiyel engelini düşürdüğünü ve arayüzey tabakasında düşen voltajın doğru beslem  $I-V$  karakteristiklerinin, idealite faktörünü arttırdığını buldular.

Çakır (1990), bu çalışmada cam taşıyıcılar üzerine  $1 \times 10^{-6}$  torrluk vakumda ısısal buharlaştırma ile yaklaşık 1500 Å ve 2000 Å kalınlığında altın ve aynı yöntemle bunlar

üzerine değişik kalınlıklarda CuO filmlerini kaplayarak iki katlı film sistemleri hazırlamış ve elipsometrik parametreler kullanarak altın taşıyıcı ve CuO-Au iki katlı filmlere eşdeğer tek katlı filmlerin  $n$ ,  $k$  optik sabitleri ve  $R$  yansıtma katsayılarını hesaplayıp grafiklerle göstermiştir.

Daw ve Chattopadhyay (1991), N- tipi ve p-tipi yarıiletkenlerle yapılan MIS tünel diyotlarının, engel yüksekliğinin tuzak yoğunluğuna bağlı değişimini incelediler ve engel yüksekliğinin safsızlığa kuvvetlice bağlı olduğunu gözlemlədiler.

Türüt ve ark. (1992), arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız Schottky diyotlarında arayüzey tabakası, arayüzey halleri ve arayüzeydeki sabit yükleri dikkate alarak,  $I-V$  ve  $C-V$  karakteristiklerini inceleyip engel yüksekliği, idealite faktörü ve arayüzey durum yoğunluklarını belirlemişlerdir.

Yılmaz (1992), bu çalışmasında iki katlı film sistemleri olan CuO/Au, CuO/Ag, In/Al ve Ag/Cu'lara ait elipsometrik parametrelerden yararlanarak ve  $k$  değerlerinin kullanılan ışığın dalgaboyu ve film kalınlığıyla değişimlerini incelemiştir. Isısal buharlaştırma yöntemiyle alt taşıyıcılar olan Ag, Al, Au ve Cu kalın filmler cam üzerine hazırlanarak, bunların üzerine yine aynı yöntemle CuO, Ag ve in ince filmleri kaplamıştır. Sonuçları BASIC programıyla hesaplayarak, çizelge ve grafiklerle göstermiştir.

Chattopodhyay ve RayChaudhuri (1993), seri direncin etkisini dikkate alarak Schottky diyotların doğru beslem  $C-V$  karakteristiklerinin frekansa bağılılığını incelediler.  $C-V$  karakteristiklerinde gözlenen kapasite piki seri direnç etkisine atfedildi. Ayrıca, yüksek frekanslarda seri direncin daha etkin olduğu teorik olarak bu çalışmalarda belirtilmiştir.

Türüt ve ark. (1996), ideal diyotlar için  $C-V$  karakteristiğinin değişimini inceleyerek yük alışı- verişinin nelere bağlı olduğunu açıklamışlardır.

Nathan ve arkadaşları (1996), bu çalışmada Schottky engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sıcaklığa bağlı olarak değişimini incelemişlerdir. Sonuç olarak idealite faktörünün azaldığını ve  $I-V$  engel yüksekliğinin sıcaklıkla arttığını tespit etmişlerdir.

Tarcan (1997), bu çalışmasında doğrudan kimyasal oksidasyon tekniklerini kullanarak bir bakır numune üzerine, bir güneş seçici kaplama hazırlamıştır. Optimize edilen yüzeylerin, 0,92'lik yüksek yutuculuğa (a) ve 0,23'lük düşük kızıl ötesi yayıcılığa (s) sahip olduğunu tespit etmiştir. Seçici yüzeyin ömrünü arttırmak için ise, bir Polymethylmetacrylate (PMMA) tabaka siyah karbon ile karıştırarak yüzeyi spin on teknolojisi ile kaplamıştır. yapılan yaşlandırma testi ile yüzeylerin ömrünün 30 yıldan fazla olduğu sonucuna varmıştır.

Dökme (2002), arayüzey tabakasına sahip Al/p-Si ve Au/n-Si Schottky diyotlar için 150-375 K sıcaklık aralığında akım-voltaj ( $I-V$ ) ve kapasitans-voltaj ( $C-V$ ) karakteristikleri ölçerek Orta beslem (0,1-0,6) bölgesinde yarılogaritmik  $I-V$  eğrileri lineer bulmuştur. Lineer voltaj bölgesinde bu eğrilerin sıfır beslem voltajına ekstrapote edilmesiyle elde edilen  $I$  doyum akım yoğunluğundan potansiyel engel yüksekliği değerleri, deşikler için tünel parametresi bir alınarak her sıcaklık için hesaplamıştır. Lineer bölgeden hesaplanan idealite faktörü değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak 3,37-1,50 arasında değişimi Al/p-Si diyotun özellikle düşük sıcaklıklarda termoiyonik alan mekanizmasına uyduğunu göstermiştir. Ayrıca idealite faktörünün yüksek değerlerde çıkması arayüzey durumlarının yüksek mertebedeki yoğunluğuna atfedilmiştir.  $C-V$  ölçümlerinden, kapasitans değerlerinin Schottky engel yüksekliği ve arayüzey durumları nedeniyle uygulanan voltaja ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini gözlemlemiş ve  $C-V$  ölçümlerinden hesaplanan arayüzey durum yoğunlukları  $I-V$  ölçümlerinden hesaplanan arayüzey durum yoğunlukları ile oldukça uyumlu bulmuştur.

Menşur (2002), bu çalışmasında (CuO) filmleri mikroskop cam altlıklar üzerinde sol-jel yöntemi ile elde etmiştir. Spin kaplama metodunu kullanarak 30 dakika boyunca 600°C'de uygulanan ısı işlem sonrası filmlerin tamamıyla kristalleştiğini gözlemiştir. 10 katlı filmlerin örgü parametrelerini  $a= 4,71 \text{ \AA}$ ,  $b= 3,43 \text{ \AA}$ ,  $c=5,14 \text{ \AA}$  ve  $d = 99^\circ,62'$  olarak hesaplamıştır.

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

Oral ve ark. (2004), çalışmalarında altlık malzeme olarak standart bir mikroskop camı kullanarak Sol-Jel döndürme kaplama tekniği ile  $\text{Cu}_2\text{O}$  filmlerini büyütmüşlerdir. Ürettikleri filmlerin geçirgenliği, yansıtma gibi optiksel özelliklerini incelemişlerdir.  $\text{Cu}_2\text{O}$ 'ların tanecik boyutlarının yaklaşık olarak 150 nm olduğunu bildirmişlerdir. UV-Vis., karakterizasyonunu kullanarak optiksel bant genişliğini 1,60 eV ve 1,75 eV arasında bulduklarını rapor etmişlerdir.

Zhanga ve ark. (2004), bu çalışmasında  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}/\text{ITO}$  p-i-n heteroeklemini elektrokimyasal biriktirme yöntemi ile oluşturular. p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{i-ZnO}/\text{n-ITO}$  heteroekleminin elektriksel özelliklerini akım-gerilim ölçümlerini kullanarak araştırdılar.

Horzum (2005), bu çalışmasında kimyasal kaplama yöntemi ile hazırlanmış olduğu  $\text{Cu}_2\text{O}$  ince filmlerini farklı sıcaklıklarda (200-350 °C) hava ortamında 1 saat tavlama ve tavlamanın yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerini incelemiştir. Ölçüm sonuçlarından, 300 ve 350 °C sıcaklıklarda tavlamalarda  $\text{Cu}_2\text{O}$  ince filmin  $\text{CuO}$ 'ya dönüştüğünü gözlemiştir.

Kambur (2005), doğal yalıtkan arayüzey tabakaya ( $\text{SiO}_2$ ) sahip Al/p-Si Schottky diyotların akım-gerilim ( $I-V$ ) karakteristiklerini oda sıcaklığında incelemiştir. Yapılan ölçümler sonucunda ilave (excess) kapasitans değerlerinin artan frekansla azaldığını gözlemiştir, bu durumu artan frekansla arayüzey durum yoğunluklarının azalmasına bağlamıştır.

Chaabouni ve ark. (2006), bu çalışmasında n- $\text{ZnO}/\text{p-Si}$  heteroeklem elde etmek için p-Si yüzeylere RF magnetron saçırma yöntemi ile ZnO filmler biriktirdiler. 25, 100, 200, 300 ve 400 °C sıcaklıklarında farklı altaşlar kullanarak eklem elektriksel özelliklerini akım-gerilim ( $I-V$ ) ve kapasite-gerilim ( $C-V$ ) ölçümleri ile belirlediler. Yüksek yüzey sıcaklıklarında büyütülen filmler, yansıma kayıplarını minimuma indirdiği için Si tabanlı optoelektronik cihazlarda yansıma önleyici olarak kullanılması gerektiği sonucuna varmışlar.

Engin (2006), bu çalışmasında p-tipi saydam iletken oksitlerden biri olan bakır oksit filmleri ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile  $250 \pm 5$  °C taban sıcaklığında ve farklı

Zn katkı oranlarında elde etmiştir. Üretilen filmlerin elektrik, optik ve yapısal özelliklerini inceleyerek bakır oksit filmlerinin kalınlıklarının 0,48-0,36 Åm arasında değiştiği ve bakır oksit içine katılan Zn katkı oranı arttıkça kalınlıklarının azaldığını belirlemiştir.

Tataroğlu ve Altındal (2006), MIS diyotların karakteristiklerinin diyotun kalınlığına bağlı olarak nasıl değiştiğini ve idealite faktörü ile engel yüksekliğinin kalınlığına bağlı olup olmadığını incelediler.

Kenanoğlu (2006), etil alkolde Quercetin çözülerek hazırlanan  $8,27 \times 10^{-6}$  M'lık çözeltilerden p-Si üzerine damlatılarak ve çözücünün buharlaştırılması ile p-Si/ Quercetin/Al Schottky engel diyotu oluşturmuştur. Yapılan ölçümlerden yapının doğrultucu özellik gösterdiğini tespit etmiş, Cheung fonksiyonlarını kullanarak diyotun seri direncini 3,24MW ve engel yüksekliğini 0,82eV olarak hesaplamıştır. Arayüzey durum yoğunluklarını ölçerek, ara durum yoğunluğunun üstel bir şekilde band ortasından valans bandın tepesine doğru arttığını gözlemlemiştir.

Ocak (2006), iki farklı Al/metil kırmızısı/p-Si Schottky engel diyotlarını oluşturdu. Oluşturulan diyotların özelliklerini belirledikten sonra, derişik çözelti ile hazırlanan Al/metil kırmızısı/p-Si yapının doğrultuculuğunun daha fazla olduğu ve ideale daha yakın olduğu ve bu diyot için her iki yöntemle elde edilen değerlerin birbirlerini doğruladığını görmüştür. Ayrıca her iki diyotun yüksek (5MHz) ve düşük frekans (100kHz) kapasiteleri kullanılarak organik bileşik ile inorganik yarıiletken arayüzeylerindeki konuşlanmış arayüzey durum yoğunluklarının enerji dağılımlarını hesaplamıştır.

Yakuphanoğlu (2008), Al/p-Si/DB<sub>6</sub>MEH diyot yapısını oluşturarak akım gerilim (*I-V*) ve kapasitans gerilim (*C-V*) teknikleri ile elektriksel karakteristik özelliklerini incelemiştir. Elde ettiği bu yapının, ideal bir Schottky yapıya göre daha çok metal-yalıtkan-organik tabaka yarıiletken bir yapı olduğunu ve idealite faktörünün değerini 1,92 olarak tespit etmiştir.

Bayansal (2009), CuO, Cu<sub>2</sub>O, Zn ve Cd Sn ince filmleri Kimyasal Banyo Depolama yöntemi kullanarak üretmiş ve üretilen bu filmlerin su ve toluen buharlarını algılamaları

test etmiştir. Gaz ölçümlerinin yapılabilmesi için filmler İnter-Dijital Dönüştürücüler Spin Kaplama ve Kimyasal Aşındırma yöntemlerinin beraber kullanımı ile hazırlamıştır.

Gupta ve ark. (2009), Au/Cu<sub>2</sub>O/p-Si diyot yapısını oluşturmuşlardır. Cu<sub>2</sub>O'yu Radyo Frekans saçtırma tekniği ile oluşturmuşlardır. Schottky kontak mekanizmasında iyi bir lineer bölge oluşturabilmek için en iyi metalin Au (Altın) olduğunu bildirmişlerdir. Schottky diyot yapıya ait yarı logaritmik akım voltaj grafiğinin lineerlikten sapmasının, ara yüzeysel durumlarla ilgili olduğunu ayrıca Au ile p-Si arasında bulunan Cu<sub>2</sub>O'nun homojen olmayan kalınlığından dolayı sebep olabileceğini rapor etmişlerdir.

Gürakar (2009), bu çalışmasında Antimon katkılı kalay oksit/Bakır oksit/Metal yapılarının optiksel, elektriksel ve yapısal özelliklerinin incelemiştir. Antimon katkılı kalay oksit (ATO) ince filmler püskürtme yöntemiyle ve bakır oksit (Cu<sub>2</sub>O) ince filmler kimyasal kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. Filmlerin optiksel ölçümlerini yapmış ve yasak enerji bant aralıklarını belirlemiştir. İki nokta yöntemi kullanılarak, filmlerin aktivasyon enerjilerini hesaplamıştır.

Ocak (2009), Metal-yarıiletken (MS) yapı arasına farklı özelliklere sahip organik/inorganik ince/kalın film tabakaları yerleştirerek yapılan çalışmalarda, engel (bariyer) yükseklikleri ve ara yüzey durumları kontrol altına alınması amaçlanmıştır. Metal yarıiletken (MS) kontakların bariyer yüksekliği, organik ince/kalın film ile yarıiletken arasına bir dipol tabaka konulmasıyla diyot yapıların veriminin ve performansının artırılmasını amaçlamıştır.

Yıldırım (2009), bu çalışmasında sol-jel yöntemini kullanarak CuO/TiO<sub>2</sub>/ATO heteroeklem yapıların elektriksel ve optiksel özellikleri incelemiştir. İncelenen filmlerden cam alt tabakalar üzerine CuO/TiO<sub>2</sub>/ATO heteroeklem yapılarını elde etmiş ve yapıların akım-gerilim (*I-V*) belirtkenlerinin diyot özelliğini gösterdiğini tespit etmiştir.

Erdoğan ve ark. (2010), CuO solüsyonunu hazırlamak için kimyasal bir yöntem kullandılar. Bu yöntemde göre 0,05M NaOH ve 0,1M Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Aldrich %99,999 saflıkta) solüsyonlarını kullanarak CuO çözeltisini elde ettiler. P-Si kristal altlık üzerine döndürerek kaplama (Spin Coating) yöntemini kullanarak CuO filmini kapladılar. Elde



edilen film yapısının optik ve kristalografik analizlerini yaparak yapı hakkında ileri düzey bilgi edindiklerini rapor etmişlerdir. Yapılan hesaplamalara göre CuO filmler için enerji aralığını 2,64 eV olarak bulmuşlardır. Elde ettikleri CuO/p-Si altlık üzerine yaklaşık  $10^{-5}$  Torr basınç altında Au metalini buharlaştırarak Schottky diyot yapısını üretmişlerdir. Daha sonra bu yapıya ait bazı elektriksel parametreleri geleneksel *I-V* metodu ile Cheung&Cheung ve Norde fonksiyonlarını kullanarak hesapladıklarını rapor etmişlerdir. Sonuç olarak idealite faktörünü 2,39 ve engel yüksekliğini de 0,64 olarak bulmuşlardır.

Bayram (2010), yaptığı bu çalışmada (100) yönelimli, 280 kalınlığında, bor (B) katkılı p tipi Si kullanılarak termal buharlaştırma metodu ile Al/p-Si diyot hazırlamıştır. Hazırladığı diyotun 296-380 K sıcaklık aralığında farklı sıcaklıklar için akım gerilim (*I-V*) ölçümlerini yapmış ve bu ölçümleri kullanarak, farklı yöntemlerle Schottky diyotun idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç parametrelerini hesaplamıştır.

Kılıçoğlu ve ark. (2010), çalışmalarında n-Si kristal altlık kullanarak Cu(II) kompleks/n-Si yapısını elde etmiş ve bu yapının omik kısmını AuSb ile Schottky kontak kısmını ise Au kullanarak yapmışlar. Elde edilen yapının doğrultucu karakteristik gösterdiğini tespit etmiş ve yapıya ait elektriksel parametreleri olan idealite faktörü ve engel yüksekliğini akım-gerilim tekniğini kullanarak hesaplamışlardır. İdealite faktörü değerinin 1'den farklı olmasının sebebini, ara yüzey olarak eklenen Cu (II) kompleks yapıdan ve diyotun seri direnç etkisinden kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir.

Özen (2010), bakır oksitli süper iletkenlerin özelliklerini inceleyerek kritik sıcaklıktaki süper iletkenlerin temel elektronik yapıları, süper iletken kompozisyon (bileşim) bölgelerinin yanı sıra komşu yarı iletken ve metalik bölgelerdeki çeşitli gözlemlere dayanarak geliştiğini gösterdi. Yaptığı çalışmanın özellikle yüksek kritik sıcaklık süper iletkenliğinin, yarı dolu ve yüksek seviye taşıyıcı bir yarı iletken içinde bir enerji dopinginin tetiklemeyle, metale geçişle kendini gösterdiğini vurgulamıştır.

Kuş (2010), bu çalışmasında sol-jel daldırma tekniğini kullanarak p-CuO/i-ZnO/n-ATO yapıların arayüzey durumlarının elektriksel özelliklerine etkisini incelemiştir. Filmlerin optik bant aralıkları CuO, ZnO ve ATO filmler için sırasıyla 1,56-1,7 eV, 3,2-3,3 eV ve 3,9 eV ve aktivasyon enerjileri de 158 meV, 308-423 ve 0,81 meV bulunmuştur.

Çetinkaya (2011), bu çalışmasında Al/ZnO/p-Si/Al ve Au/CuO/p-Si/Al diyot yapıları arasına yerleştirilen iki farklı ince metal-oksit filmin diyot karakteristikleri üzerine etkisi araştırmıştır. Bunun için olan Sol-Jel Spin Coating (döndürme kaplama) yöntemleri ve Kimyasal Banyo depolama (CBD) yöntemlerini kullanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda üretilen yapılarının karakteristik parametrelerinden idealite faktörleri ve engel yüksekliğinin birbirleriyle uyum içerisindeyken seri direnç değerlerinin beklendiği gibi birbirinden bağımsız olduğunu tespit etmiştir.

Çam (2012), bu çalışmasında D.C magnetron tekniğini kullanarak CuO ince filmleri büyütmüş ve bu işlemi 75, 100, 125, 150, 200°C alt tabaka sıcaklıklarında gerçekleştirmiştir. CuO ince filmlerin enerji bant aralığını 1,85 ve 2,5 eV olarak bulmuştur.

Demirci (2012), bu çalışmasında CuO yarıiletken cam altlıklar üzerine döndürerek kaplama yöntemini kullanmış ve farklı sıcaklıkta tavlanan filmlerin x-ışını kırınım desenlerinden polikristal tenorit yapıda oldukları saptamıştır. CuO filmlerin kalınlık değerlerini elipsometre yardımı ile 0,65 nm olarak belirlemiş ve absorpsiyon spektrumu ölçümlerinden filmlerin direkt bant aralığına sahip ve yasak enerji aralıklarının 1,62 eV ile 1,69 eV arasında değiştiğini belirlemiştir.

Oral (2012), sol jel spin kaplama yöntemi ve ısı buharlaştırma yöntemi ile omik kontaklı n-tipi ve p-tipi silisyum altaşlar üzerine organik (CuPc, C<sub>60</sub>) ve inorganik (ZnO, CdO) filmlerini üretmiş ve bu filmler ile çoklu eklem diyotları oluşturmuştur. Elde edilen inorganik filmlerin XRD desenlerinden, polikristal yapıya sahip olduklarını belirlemiş ve bazı yapısal parametreleri (tanecik boyutu, örgü sabiti ve yapılanma katsayısı) hesaplanmıştır. Filmlerin FESEM görüntülerini incelemiş ve tüm filmlerin altaş yüzeyini tamamen kapladığını tespit etmiştir. Sonra diyotların sıcaklığa bağlı *I-V* değişimleri ölçerek diyotların akım-iletim mekanizmalarını tayin etmiştir.

Aydın (2013), Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si Schottky diyotunun elektriksel özellikleri oda sıcaklığında araştırmış ve Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si Schottky diyotunun temel elektriksel parametrelerini

bulmuştur. Hem TE teoreminden hem de Cheung metodundan elde edilen elektriksel parametrelerin birbiri ile yakın uyum sergilediği gözlemlenmiştir.

### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

İki farklı madde birbirleriyle temas ettirildiğinde, her iki maddenin Fermi enerji seviyeleri eşit oluncaya kadar yük alış-verişi olur. Termal denge sonunda Fermi düzeyleri eşit seviyeye gelinceye kadar yük alış-verişi devam eder. Oluşan yeni yük dağılımı nedeniyle kontak bölgesinde bir dipol tabakası meydana gelir. Dipol tabakası iki metal arasında kontağın her iki tarafındaki yüzey yüklerinden oluşur. Oluşan bu kontak elektronlarının her iki yönde serbestçe hareket etmeleri nedeniyle omik kontak olarak adlandırılır (Rhoderick and Williams 1988).

Genel anlamda kontak iki maddenin en az dirençle (idealde sıfır) birbirine temas etmesi olayıdır. İdeal bir kontak elde etmek için temas eden maddelerin yüzeylerinin temiz, pürüzsüz ve parlak olması gerekir. Metal-yarıiletken kontaklarda iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (deşikler ve elektronlar) bir yönden diğer yöne daha kolay iletiliyorsa bu tür kontakta doğrultucu kontak denir. Yani doğru beslem altında akım çok iyi iletilirken, ters beslem altında hemen hemen hiç iletilmemektedir.

Metal-yarıiletken kontakta türünün doğrultucu veya omik olması, seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları ile yarıiletkenin türüne (p veya n tipi) bağlıdır. Metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$  ve yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$  olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için  $\Phi_s < \Phi_m$  olması halinde ise doğrultucu kontak ve  $\Phi_s > \Phi_m$  olması halinde omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise  $\Phi_s < \Phi_m$  olması halinde omik kontak ve  $\Phi_s > \Phi_m$  olması halinde de doğrultucu kontak oluşur.

##### 3.1.1. Metal n-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Doğrultucu kontaklar akım taşıyıcılarını (hol ve elektron) bir doğrultuda diğerine göre daha kolay geçiren kontaklardır. Metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$ , yarıiletkenin iş fonksiyon

$\Phi_s$  olmak üzere  $\Phi_m > \Phi_s$  olması durumunda metal-n tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Eğer bir metal ile bir yarıiletken kontak oluşturacaksa bu durumda meydana gelecek olan yapı doğrultucu kontak olabilir. Bu Schottky kontak olarak bilinir. Schottky kontak, akımın bir doğrultuda, diğer doğrultudan daha kolay aktığı kontak türüdür. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolayca hareket ederken kontak bölgesinde oluşan potansiyel engeli nedeniyle ters yöndeki geçişleri zorlaştırır. Bu durum her iki maddenin elektronik enerji-bant diyagramı ile yakından ilişkilidir (Ziel 1968).

Bu olayı açıklamak için bir metal ve bir n-tipi yarıiletkeni dikkate alalım. Oda sıcaklığında yarıiletken içindeki bütün donörler iyonize olmuş olsunlar. Metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$ , yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_s$ , yarıiletkenin elektron ilgisi  $\chi_s$  ve  $\Phi_m > \Phi_s$  olsun. Şekil 3.1(a)'da görüldüğü gibi ve kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukarıdadır.

Kontaktın sonradan yarıiletken yüzeyden metale elektronlar geçerken, geride iyonize olmuş donörler bırakırlar. Yük alışverişi tamamlandıktan sonra her iki tarafın Fermi seviyeleri aynı hizaya gelir. Yani yarıiletkenin enerji seviyeleri Şekil 3.1'de görüldüğü gibi ( $\Phi_m - \Phi_s$ ) kadar alçalmıştır. Sonuç olarak, kontakta oluşan dipol tabakası nedeniyle eklem üzerinde bir potansiyel engeli meydana gelir. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği ( $\Phi_m - \Phi_s$ ) ve metal tarafındaki yüksekliği ise  $\Phi_m - \chi_s$  kadardır.

Burada  $\chi_s$  yarıiletkenin elektron yakınlığıdır. Yarıiletkenin elektron yakınlığı, iletkenlik bandı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkına eşittir.

Termal uyarımlarla potansiyel engelini aşmaya yetecek enerjiye ulaşan elektronlar, metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metale geçerler. Denge durumunda bu, eşit ve zıt  $I_0$  akımlarına sebep olacaktır.

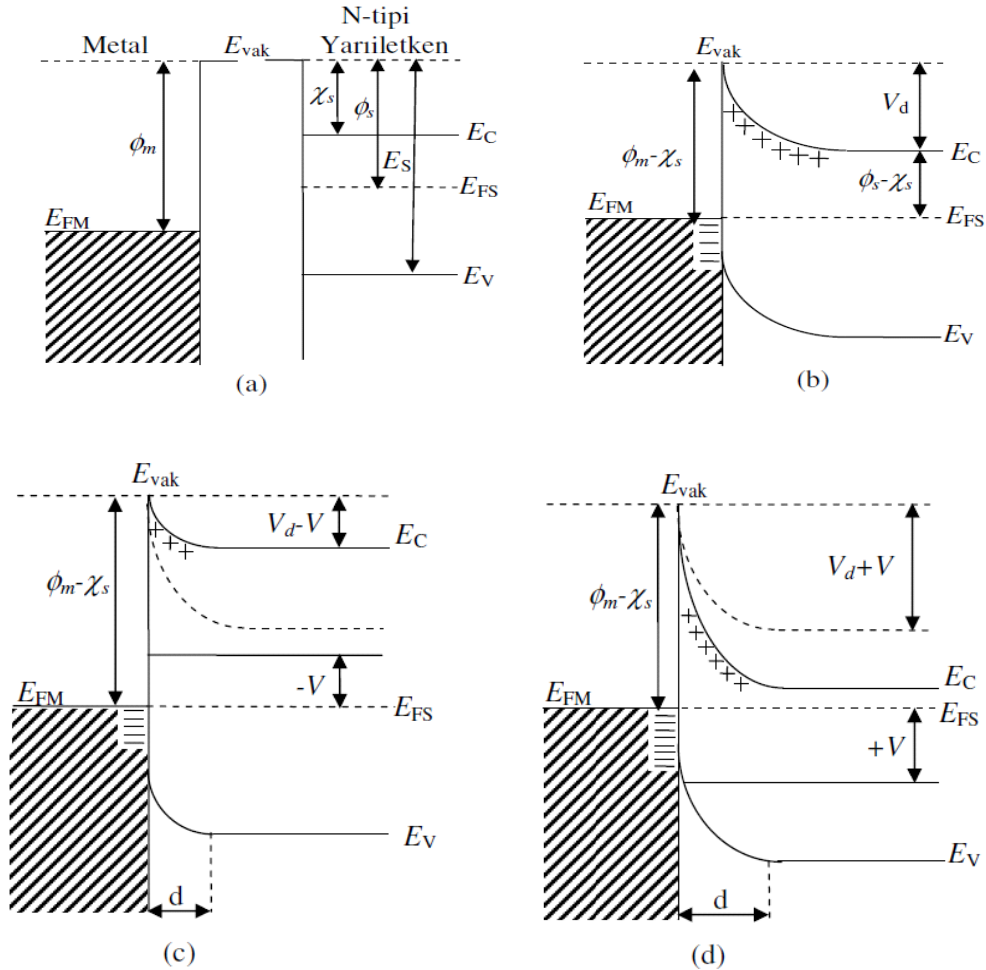
Yarıiletkene bir  $-V$  gerilimi uygulanırsa, metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel değişmeyeceğinden, bu elektronların oluşturacağı akım da değişmeyecektir. Ancak, yarıiletkenin enerji seviyeleri  $eV$  kadar yükselecektir. Bundan dolayı, yarıiletkenden metale geçecek elektronlar için engel yüksekliği ( $eV$ ) kadar azalır. Dolayısıyla, metalden yarıiletkene akan akım  $\exp(eV / kT)$  çarpanı kadar artmış olur.

Sonuç olarak oluşan net akım,

$$I = I_0 \left( \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (3.1)$$

olur, bu akım pozitiftir.  $V \gg kT/e$  beslem durumuna doğru belsem denir. Yarıiletken tarafına  $+V$  gerilimi uygulanırsa iletkenlik bandı  $eV$  kadar alçalır ve yarıiletken tarafındaki engel yüksekliği  $eV$  kadar artar. Oluşan net akım  $-I_0$  değerine yaklaşır. Bu beslem durumuna  $V \ll -kT/e$  olduğu için ters beslem denir.

Buradan çıkarılan sonuç yarıiletken tarafındaki potansiyel engelin yüksekliği uygulanan voltaja bağlı olarak değişir. Metal tarafındaki engel yüksekliği ise voltajdan bağımsızdır.



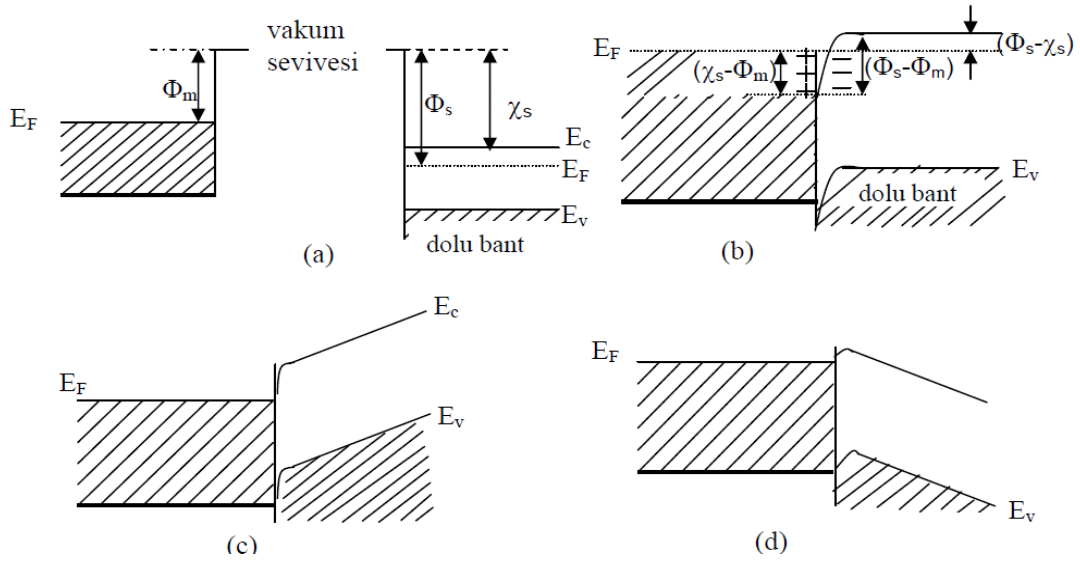
Şekil 3.1. Metal-yarıiletken doğrultucu kontakın enerji-bant diyagramı (a) Kontak öncesi, metal ve yarıiletkenin enerji-bant diyagramı, (b) Kontak sonrası termal dengedeki enerji-bant diyagramı, (c)  $V < 0$  olması halinde enerji-bant diyagramı, (d)  $V > 0$  olması halinde enerji-bant diyagramı

### 3.1.2. Metal n-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Metal/n-tipi yarıiletken kontak oluşumu için  $\Phi_m < \Phi_s$  şartı sağlanırsa omik kontak oluşur (Brillson 1983; Neamen 1992).

Metal n-tipi yarıiletken kontaklarda, yarıiletkenin iş fonksiyonu  $\Phi_m$ , metalin iş fonksiyonu  $\Phi_m$  ve şayet  $\Phi_m < \Phi_s$  ise meydana gelecek olan kontak türü omik kontak türüdür. Şekil 3.2 a'da kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı gösterilmiştir. Şekil 3.2.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar aşağıdadır. Kontakta sonra bir yük değişimi gerçekleşir. Elektronlar metalden, yarıiletken kısmına kontağın metal kısmında bir pozitif yüzey yükü bırakarak akarlar ve kontağın yarıiletken kısmında bir negatif yüzey yüküne neden olurlar. Yük alışverişi tamamlandıktan sonra yarıiletken gövdedeki Fermi seviyesi ( $\Phi_s - \Phi_m$ ) kadar yükselir.

Bir  $V$  potansiyeli uygulanırsa, bu potansiyel farkı kontak bölgesinde değil yarıiletken boyunca dağılacaktır. Metal kısmına pozitif bir gerilim ( $+V$ ) ve yarıiletken kısmına negatif bir gerilim ( $-V$ ) uygulanırsa yarıiletkenden metale doğru akan elektronlar için bir engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolayca hareket ederler.



Şekil 3.2.  $\Phi_m < \Phi_s$  durumu için metal/n tipi yarıiletken omik kontak için enerji bant diyagramı a) kontakta önce b) kontakta sonra c) düz beslem altında d) ters beslem altında

### 3.1.3. Metal p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Bir metal ile bir yarıiletken ile kontak haline getirildiğinde her iki madde arasında yüklerin yeniden dağılımı gerçekleşir. Her iki maddenin Fermi seviyeleri aynı düzeye gelinceye kadar yük alışverişi devam eder. Eğer bir metal yarıiletken kontakta yük taşıyıcılar (holler) bir doğrultudan diğer doğrultuya göre daha kolay geçebiliyorsa bu bir doğrultucu kontakdır. Doğrultucu kontakta bir doğrultudaki akım diğer doğrultuya göre daha kolay geçer. Burada  $\Phi_m$  metalin iş fonksiyonu ve  $\Phi_s$  yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, doğrultucu kontak olması durumunda  $\Phi_s > \Phi_m$  şartı sağlanmış demektir.

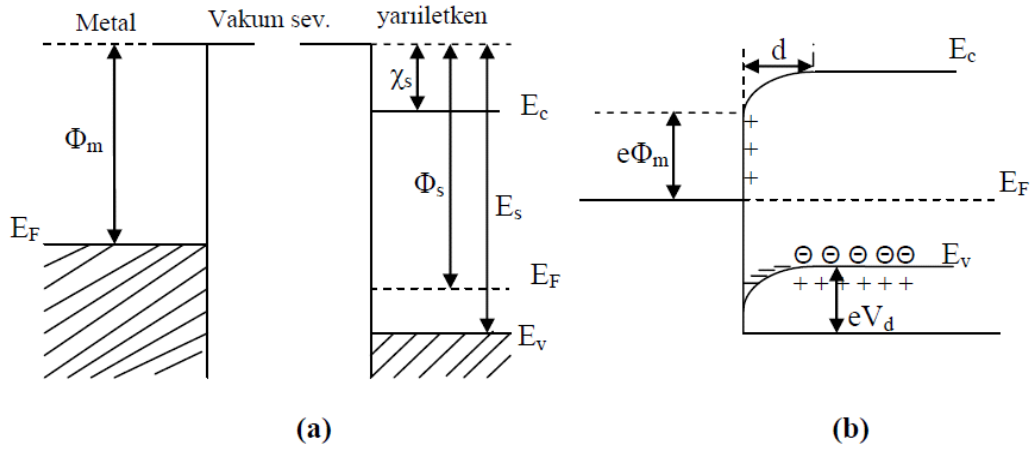
Kontak yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_s - \Phi_m$  kadar aşağıdadır. Kontakta sonra, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metalden yarıiletkene elektron akışı meydana gelir. Bundan dolayı yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler  $d$  kalınlığındaki bir uzay yük tabakası içerisinde dağılırlar. Yarı iletken kısmındaki enerji seviyeleri ( $\Phi_s - \Phi_m$ ) kadar yükseldiğinden, yarıiletken kısmındakideşikler için yüzey engeli,

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \text{ olur.} \quad (3.2)$$

Burada  $V_{dif}$  difüzyon potansiyelidir. Kontakın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği ise;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \text{ olur.} \quad (3.3)$$



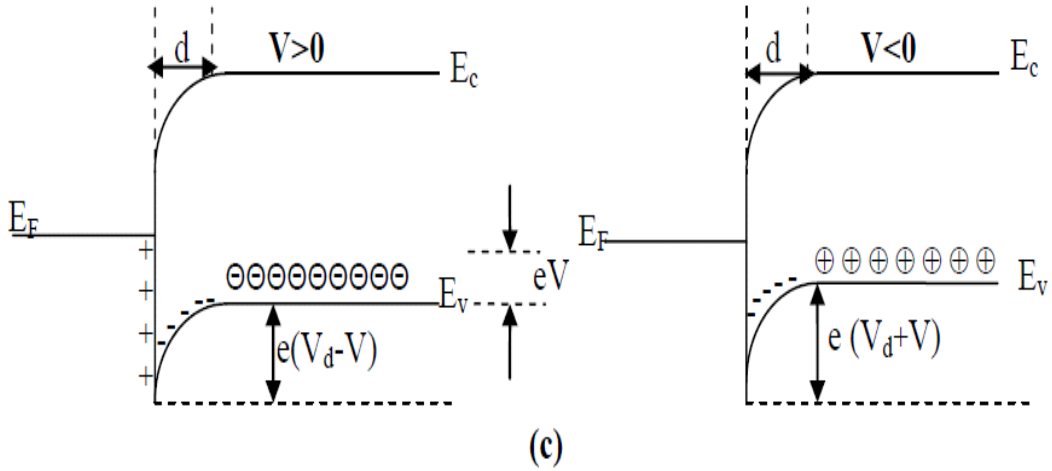


Şekil 3.3. Metal/ P-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın (a) kontakta önce ve (b) kontakta sonra ve termal dengede enerji bant diyagramı

Termal uyarımlardan dolayı yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşıp metalin içine geçecek kadar enerji kazanırlar ve aynı şekilde metalin içinde termal olarak oluşan bazı hollerde yarıiletkenin içine potansiyel engelini aşıp geçecek kadar enerji kazanırlar. Böylece termal dengede kontakta, engelden geçen eşit ve zıt yönlü iki  $I_0$  akımı oluşur. Ancak yarıiletkene bir  $V$  gerilimi uygulanırsa, metalden yarıiletkene doğru akan boşluk akımı değişmez ve yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü  $eV$  kadar düşeceğinden yarıiletkenden metale geçen boşluklar için engel yüksekliği  $eV$  kadar azalır. Bunun sonucu olarak yarıiletkenden metale doğru akan akım  $\exp(kT/eV)$  çarpanı kadar azalır. Yarıiletkenden metale doğru olan akım pozitif kabul edilirse bu durumda oluşan karakteristik akım ifadesi,

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

Burada  $I_0$  doyma akımıdır. Bu bir doğrultucu kontaktaır.

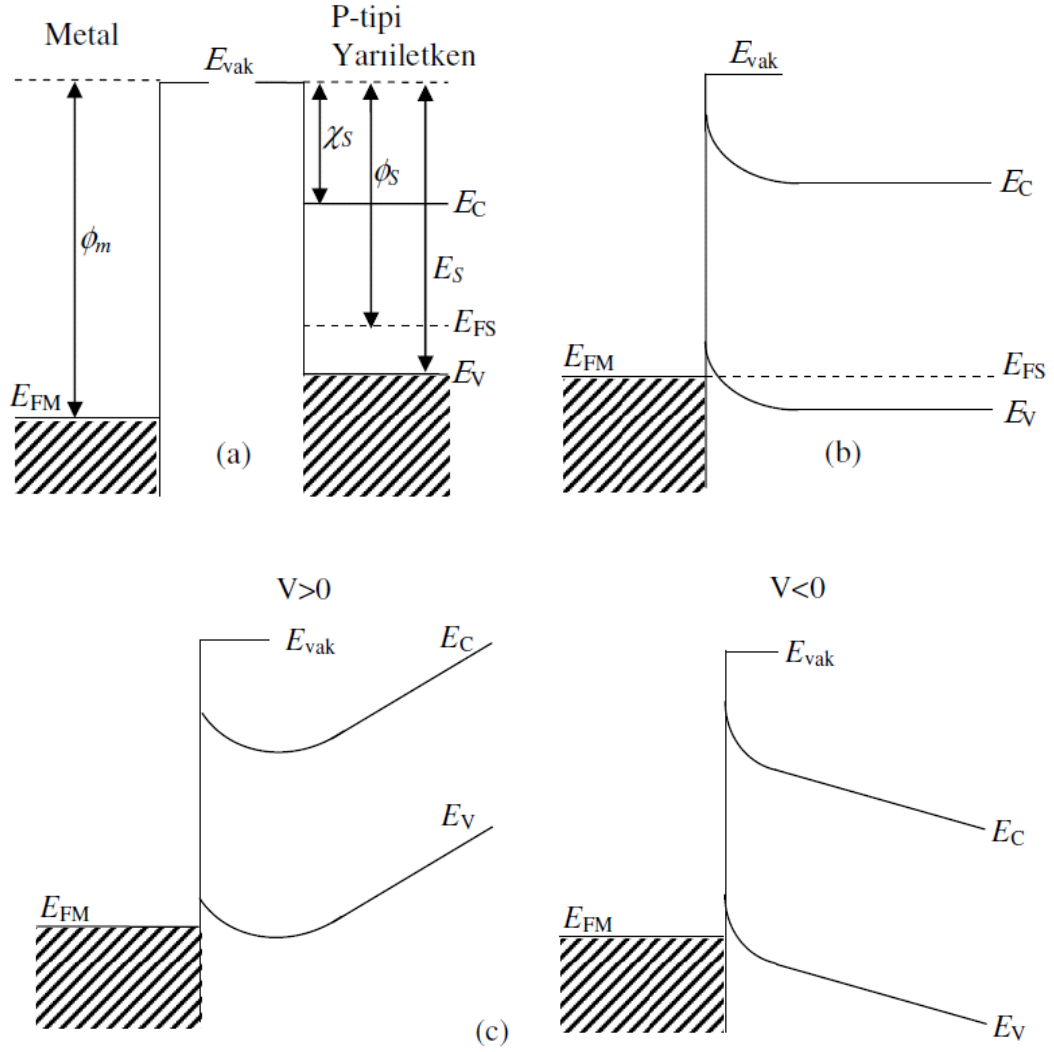


Şekil 3.4. Metal/P-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın (c)  $V \neq 0$  olması durumunda enerji bant diyagramı

### 3.1.4. Metal p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir kontak şeklidir. Bu durum metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu ( $\Phi_m > \Phi_s$ ) durumda gerçekleşir. Şekil 3.5 a'da görüldüğü gibi kontakta önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar yukarıdadır. Kontakta sonra, bir yük alışverişi meydana gelecektir. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü bırakarak metal tarafına akacaklar ve metal tarafında bir negatif yüzey yüküne neden olacaklardır. Bundan dolayı yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 3.5 b'de görüldüğü gibi  $\Phi_m - \Phi_s$  kadar aşağı düşer. Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla p-tipi olur. Ayrıca yapıya  $V$  voltajı uygulandığında, bu potansiyel farkı tüm yarıiletken bölge boyunca dağılır ve elektronlar herhangi bir zorlukla karşılaşmadan engeli geçebilirler.

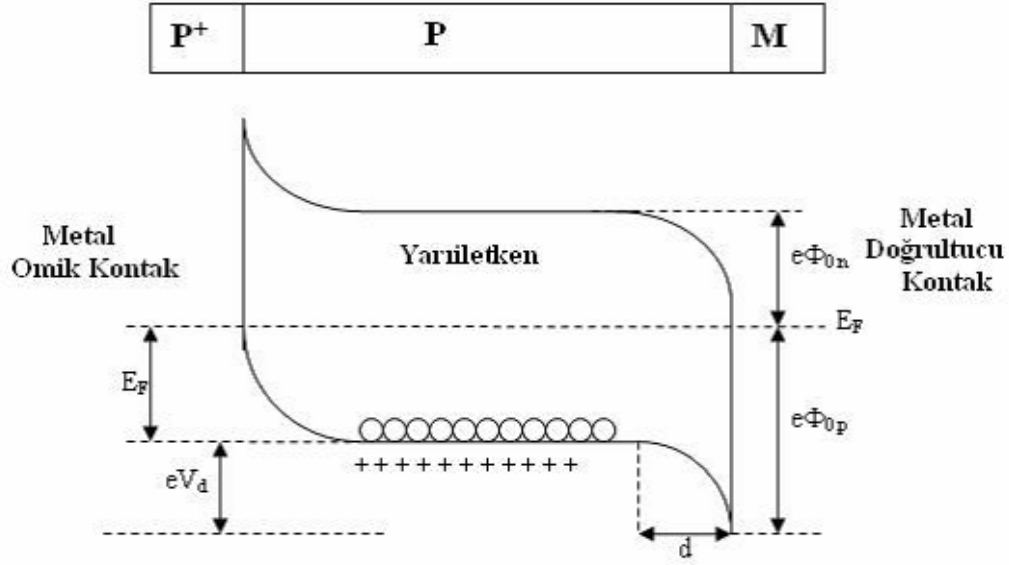
Doğru beslem durumunda, elektronlar, metalden yarıiletkene doğru kolayca hareket edebilirler ve yarıiletken tarafındaki boşluklarda metale doğru rahatlıkla akabilir. Metal tarafına geçen holler, yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralize olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan boşluklar da kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Bu şekilde hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkenden metale doğru kolaylıkla akım geçebilen kontaklar, omik kontaklar olarak bilinir.



Şekil 3.5. Metal/P-tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diyagramı: a) kontakdan önce b) kontakdan sonra ısısal dengede ve c)  $V > 0$  durumunda

### 3.1.5. Metal/p-Tipi Yarıiletken-Metal Yapısı

P-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine deşik (hol) bakımından çok zengin  $P^+$ P omik kontağı ile diğer yüzeyine PM doğrultucu kontak uygulamasıyla meydana gelen yapı Metal/p-tipi yarıiletken/metal ( $P^+$ PM) yapısıdır. Şekil 3.6'da metal/p-tipi yarıiletken/metal ( $P^+$ PM) diyot yapısının termal dengede enerji bant diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.6. P<sup>+</sup>PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji bant diyagramı

$V > 0$  olacak şekilde P<sup>+</sup> omik kontak tarafına bir gerilim uygulandığında, yapı doğru belsemde olur.  $V < 0$  olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı ters belsemde olur. P<sup>+</sup> PM yapısı, diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Bu yapı yarıiletken diyot olarak adlandırılır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi boşluklar için engel yüksekliği;

$$e\Phi_{p0} = eV_d + E_f \quad (3.5)$$

denklemleri ile bulunur.

### 3.1.6. Schottky Diyotlarda Termoyonik Emisyonla Akım İletimi

Termal enerjileri nedeniyle sıcak bir yüzeyden taşıyıcıların salınması olayı termoyonik emisyon olarak kabul edilir. Metal-yarıiletken kontaklarda termoyonik emisyon teorisi, taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletken metale veya metalden yarıiletkenine geçmesidir. Orta derecede katkılanmış bir yarıiletken için bu süreç taşıyıcı iletimine önemli oranda katkıda bulunur. Metal/yarıiletken kontakta bir gerilim uygulandığında metal ve yarıiletkendeki Fermi seviyeleri artık aynı hizada olmayacak ve termal olarak uyarılmış elektronlar engelin diğer tarafına geçeceklerdir. Yarıiletken tarafındaki elektronlar için engel yüksekliği, uygulanan gerilime göre değişir. Doğru belsem altında elektronlar için engel yüksekliği azalacak ve bu sayede

yarıiletkenden metale doğru olan akım artacaktır. Ters beslem durumunda ise engel artacak ve yarıiletkenden metale doğru olan akım azalacaktır. Metaldeki elektronların göreceği potansiyel engel uygulanan gerilimle önemli oranda değişmez, dolayısıyla metalden yarıiletkene doğru olan akım hemen hemen aynı kalır (Rhoderick 1988).

Termoiyonik emisyon, metal/*n*-tipi yarıiletken yapılarda çoğunluk taşıyıcıları olan elektronlar, metal/*p*-tipi yarıiletken yapılarda ise çoğunluk taşıyıcıları olan boşluklar tarafından sağlanır. Bu teoriye göre kontağın potansiyel engeli  $kT$  ısısal enerjiden büyük ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarını ise çok küçük olarak kabul eder.

Termoiyonik emisyon teorisi şu varsayımlara dayanmaktadır;

1-Potansiyel engelinin yüksekliği,  $kT/e$  termal enerjisinden çok büyük bir değere sahiptir.

2-Eklem bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının olmadığı düşünülür. Bu da taşıyıcıların ortalama serbest yollarının eklem bölgesinin kalınlığından daha fazla olduğunu ifade eder.

3-Engelde görüntü yükünün etkisi ihmal edilmekte ve engelde oluşan akımlar engel yüksekliğine çok fazla bağlı olmamaktadır.

Bu varsayımlar doğrultusunda yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu  $J_{s \rightarrow m}$  potansiyel engelini geçmeye yetecek kadar enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve bunların hızları ile ifade edilir;

$$J_{y \rightarrow m} = \int_{E_F + q\Phi_B}^{\infty} e v_x dn \quad (3.6)$$

Şeklinde olur. Burada  $v_x$ ,  $xy$  yönelimindeki taşıyıcı hızı ve  $E_F + e\Phi_B$  metale termoiyonik emisyon için gerekli olan minimum enerjidir.  $J_{y \rightarrow m}$  denklemde de görüldüğü gibi potansiyel engelini geçebilmek için yeterli termal enerjiye sahip elektronların konsantrasyonuna ve bu elektronların hızlarına bağlıdır. Küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu  $d_n$ ,

$$dn = N(E)f(E)d(E) = \left[ \frac{4\pi(2m^*)^{3/2}}{h^3} \right] \sqrt{E - E_c} \exp \left[ \frac{-(E - E_c + eV_n)}{kT} \right] dE \quad (3.7)$$

Şeklinde verilir. Bu denklemde  $N(E)$  ve  $f(E)$  sırasıyla bu bantlardaki durumların yoğunluğu ve Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur,  $eV_n = E_c - E_f$  ve  $m^*$  elektronun etkin kütesidir. İletim bandındaki elektronların tüm enerjilerinin kinetik enerji olduğu varsayımından yola çıkarak

$$E - E_c = \frac{1}{2} m^* v^2 \quad (3.8)$$

yazılabilir. Eşitlik 3.8 kullanılarak  $dE$  ve  $\sqrt{E - E_c}$  elde edilir.

$$dE = m^* v dv \quad (3.9)$$

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m^*}{2}} \quad (3.10)$$

3.8, 3.9 ve 3.10 eşitlikleri 3.7'de yerine konulursa

$$dn = 2 \left( \frac{m^3}{h} \right) \exp \left( \frac{-eV_n}{kT} \right) \exp \left( \frac{-m^* v^2}{2kT} \right) 4\pi v^2 dv \quad (3.11)$$

elde edilir. Bu eşitlik bütün yönlerde birim hacim başına hızları  $v$ - $(v+dv)$  arasında değişen elektronların sayısıdır. Eşitlik 3.11, eşitlik 3.6 yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$J_{y \rightarrow m} = \left( \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left( \frac{-eV_n}{kT} \right) \exp \left( \frac{-m^* v_{ox}^2}{2kT} \right) \quad (3.12)$$

elde edilir. Burada  $v_{ox}$ ,  $x$  yönünde engeli aşmak için gerekli eşik hız değeridir ve

$$\frac{1}{2} m^* v_{ox}^2 = e(V_d - V) \quad (3.13)$$

olur. 3.13 eşitliği 3.12 yerine konulursa,

$$J_{y \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.14)$$

elde edilir. Burada  $A^*$  Richardson sabitidir ve

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilir. Metal yarıiletken doğru belsemde iken engel yüksekliği azalacağından akım yoğunluğu uygulanan voltajla exponansiyonel olarak artacaktır. Metalden yarıiletkene giden elektronlar için engel yüksekliği uygulanan voltajla değişmediğinden akım uygulanan voltajdan bağımsızdır. Böylece Termal denge durumunda, yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunlukları eşit olur ve toplam akım yoğunluğu ifadesi  $J_n = J_{y \rightarrow m} + J_{m \rightarrow y}$  iki akım yoğunluğunun toplamı olur. Burada metalden yarıiletkene toplam akım yoğunluğu,

$$J_{m \rightarrow y} = -A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.16)$$

dir ve toplam akım yoğunluğu ise 3.16 ve 3.14 eşitlikleri kullanılarak,

$$J_n = A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

elde edilir. Burada,  $J_o$  ifadesi sızıntı akımı olarak da bilinen doyma akım yoğunluğudur ve

$$J_o = A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilir. Sonuç olarak doyma akım yoğunluğu,

$$J_n = J_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.19)$$

şeklinde yazılır.

### 3.1.7. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkileri

Engel yüksekliğini tüketim tabakasındaki elektrik alana bağlayan etkilerden biri imaj kuvvet engel alçalmasıdır. Bu olaya Schottky etkisi yada Schottky engel alçalması denir. Bu etki arayüzey oksit tabakanın varlığına bağlı değildir. Yani bir tabaka mevcut değilken meydana gelir. Bir elektron metalden bir  $x$  uzaklığında ise metal yüzeyinde bir pozitif yük indüklenmektedir. Elektron ve indüklenmiş pozitif yük arasındaki çekim kuvveti elektrona  $-x$  uzaklıkta yerleşmiş bir pozitif yük arasındaki kuvvete eşit olacaktır. Bu pozitif yük imaj yükü ve aradaki çekim kuvveti de imaj kuvveti olarak tarif edilir. İmaj yükü ile Coulomb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etkiyen imaj kuvveti aşağıdaki gibidir.

$$F_x = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_o(2x)^2} = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_o x^2} \quad (3.20)$$

Burada  $\epsilon_o$  boş uzayın dielektrik sabitidir. Elektron negatif bir potansiyel enerjiye sahip olduğu için bu potansiyel enerji engel yüksekliğine eklenir. Bir dış  $E$  elektrik alanı uygulandığında toplam potansiyel enerji  $PE$ , uzaklığın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki toplam olarak verilir.

$$PE = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_o x} + eEx \quad (3.21)$$

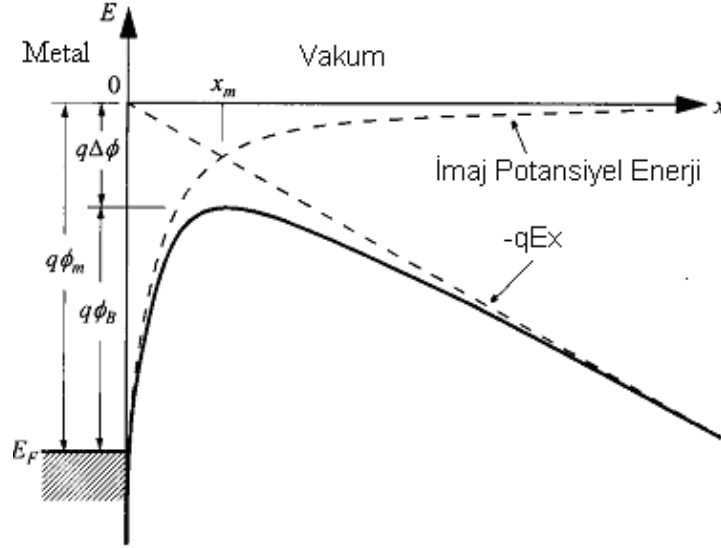
Schottky engel düşmesi  $\Delta_\phi$  ve bu düşmenin gerçekleştiği uzaklık  $x_m$   $dPE(x)/dx = 0$  şartında

$$x_m = \sqrt{\frac{e^2}{16\pi\epsilon_o E}} \quad (3.22)$$



$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} = 2Ex_m \quad (3.23)$$

Schottky engel düşmesi yüksek alanlarda oldukça azalır ve buna paralel olarak akım iletim mekanizmaları da değişir.



Şekil 3.7. Bir metal yüzeyi ile vakum arasında enerji bant diyagramı

Elektrik alan arayüzeydeki max bir alanla ( $E_{max}$ ) boşluğun dielektrik sabiti  $\epsilon_0$  ise yarıiletkenin dielektrik sabiti  $\epsilon_s$  metal yarıiletken kontaklar için yer değiştirirse,

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE_{max}}{4\pi\epsilon_s}} \quad (3.24)$$

elde edilir. Burada  $\epsilon_s$  değeri yarıiletkenin durgun dielektrik sabitinden farklıdır. Emisyon süreci boyunca elektronun metal/yarıiletken arayüzeyindeki max engeli geçiş süresi dielektrik gevşeme zamanından daha kısa ise yarıiletken ortası yeterli polarizasyon zamanına sahip olamaz ve durgun permitiviteden daha küçük bir permitivite beklenir.  $S_i$  için bilinen permitivite değerleri durgun permitivite değerleri ile aynıdır.

### 3.1.8. Düz Beslem I-V Karakteristikleri

Metal yarıiletken kontak yapısının doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristikleri yardımı ile Schottky diyot parametrelerinin hesaplanmasında Cheung tarafından farklı bir model öne sürüldü. Termiyonik emisyon teorisinde bulunan  $J$  akım yoğunluğu, diyotun  $A^*$  alanıyla çarpılırsa, diyottan geçen toplam akım.

$$I_n = AJ_n = AR_n^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV_F}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.25)$$

olarak verilir. Bu ifade de  $eV_a \gg kT$  olduğundan,  $1$  ihmal edilebilir. Pratikte uygulanan voltajın tümü arınma bölgesine düşmediğinden ideal durumdan sapmalar olacaktır. Bu durumu ifade edebilmek için birimsiz bir sabit olan  $n$  idealite faktörünün de hesaba katılmasıyla elde edilen akım denklemi,

$$I_n = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV_0}{kT}\right) \right] \quad (3.26)$$

şekline dönüşür. Burada  $V_0$  Schottky yapı bölgesine düşen voltajdır. Bu durumda  $V_0$  yerine  $V_0 = V - IR_s$  yazılabilir dolayısıyla akım denklemi,

$$I_n = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (3.27)$$

Şeklinde yazılıp her iki tarafın  $\ln$ 'i alınırsa,

$$\ln I = \ln AA^* T^2 \left( -\frac{e\phi_{Bn}}{kT} \right) + \left( \frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right) \quad (3.28)$$

$$\ln \frac{I}{AA^* T^2} + \frac{e\phi_{Bn}}{kT} = \frac{e(V - IR_s)}{nkT} \quad (3.29)$$

$$\frac{eV}{nkT} = \ln \frac{I}{AA^* T^2} + \frac{e\phi_{Bn}}{kT} + \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.30)$$

Elde edilir. Bu denklemden  $V$  yalnız bırakılırsa,

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I_n}{AR_n^*T^2}\right) + n\phi_{Bn} + IR_s \quad (3.31)$$

olur. Bu denklemin de  $\ln I$  'ya göre diferansiyeli alınır,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (3.32)$$

olur. (3.32) denkleminde  $dV / d(\ln I)$  teriminin  $I$  'ya karşı grafiği bir doğru olacaktır. Bu doğrunun eğimi seri direnci ( $R_s$ ) ve  $I = 0$  için düşey eksenini kestiği noktanın  $kT/e$  'ye oranı ise idealite faktörünü ( $n$ ) verecektir. (3.31) denkleminde son iki terim yalnız bırakılıp, denklem yeniden düzenlenirse,

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I_n}{AR_n^*T^2}\right) \quad (3.33)$$

olur. Burada  $H(I)$  fonksiyonu,

$$H(I) = n\phi_{Bn} + IR_s \quad (3.34)$$

şeklinde yazılabilir. Bu son denklemin  $H(I)-I$  grafiği çizilirse yine bir doğru verecektir.

Bu doğrunun eğimi notral bölge direnci ( $R_s$ ) ve  $I=0$  değerini, doğrunun  $H(I)$  eksenini kestiği noktada ise  $e\Phi_{Bn}$  engel yüksekliği bulunur.

### 3.1.9. Norde Fonksiyonları Yardımıyla Diyot Karakteristiği

Norde fonksiyonu  $n=1$  durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini tanımlayan,  $F(V)$  fonksiyonudur. Bu yöntem  $R_s$  ve  $\Phi_b$  'nin sıcaklıkla değişmediği durumlarda uygulandığı için sadece bir sıcaklıkta  $I-V$  eğrisine ihtiyaç vardır (Norde 1979).

Sato ve Yasamura, Norde tarafından sunulan yöntemi geliştirerek idealite faktörünün 1'den büyük olduğu durumlarda da ( $1 < n < 2$ )  $n$ ,  $R_s$  ve  $\Phi_b$  değerinin hesaplanabileceğini göstermişlerdir. Bu yöntem  $R_s$  ve  $\Phi_b$ 'nin sıcaklığı değiştiği durumlarda da uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklıktaki  $I-V$  eğrisine ihtiyaç vardır. Benzer yöntem Mc Lean tarafından da belirtilmiştir (Sato and Yasamura 1985).

Termoionik emisyon teorisi sadece diyotun düz beslem  $I-V$  karakteristiğinin lineer bölgesinde kullanılır. Yüksek seri direnç nedeniyle lineer bölge  $kT/e \ll V \ll IR_s$  aralığıyla sınırlanır ve daralma gösterir. Bu durumda  $\ln(I)-V$  grafiğinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alır ve bu bölgede doyma akımı  $I_0$  ve engel yüksekliği  $\Phi_b$  değeri güvenilir olarak hesaplanamaz ve  $n$ ,  $R_s$  ve  $\Phi_b$  değeri hesaplamak için daha güvenilir metotlar mevcuttur. Aşağıdaki fonksiyon ilk olarak Norde tarafından sunulmuştur.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \left(\frac{kT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (3.35)$$

Diyot için seri direnç  $R_s$ , akım denklemi (3.25) ile verilmişti.  $Vd > kT/e$  kabul edersek denklem (3.25) ve (3.35)'ten,

$$F(V) = \Phi_b + IR_s - \frac{1}{2}V \quad (3.36)$$

yazılabilir. İdeal durum için  $R_s=0$ ,  $F(V)$  düz bir çizgiyi verir ve eğimi 0,5'dir.  $F(V)$  eksenini kestiği nokta  $\Phi_b$ 'yi verir. Yani sadece bir direnç için elde edersek,

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{RAA^*T^2}\right) \quad (3.37)$$

denklemleri ile ifade edilebilir.

Yüksek gerilimler için eğim = +0,5 ile düz bir çizgiye yaklaşacaktır. İdeal durum için  $F(V)$  düşük akım değerleri ve yaklaşık  $F_R(V)$  büyük akım değerleri arasındadır. Bazı yerlerde iki  $F(V)$  doğrusu minimuma sahip olur.

Denklemler 3.36'nın diferansiyeli alınırsa,

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left( \frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (3.38)$$

olur ve buradan da,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[ 1 + R_s \left( \frac{dI}{dV_d} \right) \right]^{-1} \quad (3.39)$$

ve

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{d}{dV_d} [I_s \exp(\beta V_d)] = \beta I \quad (3.40)$$

ise

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\beta R I}{1 + \beta R I} - \frac{1}{2} \quad (3.41)$$

olur.

Burada  $dF/dV=0$  yerine yazılırsa  $F(V)$ 'nin minimum değerinde  $I_o$  akımı elde edilecek

$$I_o = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{qR} \quad (3.42)$$

Denklemler 3.35 kullanılarak uyum gerilimi  $V_o$

$$V_o = I_o R_s + V_d(I_o) = \frac{1}{\beta} + \ln \left( \frac{I}{A A^{**} T^2} \right) \quad (3.43)$$

yazılır ve  $F(V)$ 'nin minimum değerinden

$$F(V_o) = \frac{V_o}{2} - \frac{1}{\beta} \left( \frac{I_o}{AA^{**}T^2} \right) \quad (3.44)$$

$I_o$ ,  $V_o$  ve  $F(V_o)$ 'ın ölçülen değerleri denklem 3.42 ve 3.44' de kullanılarak

$$R_s = \frac{kT}{qI_o} \quad (3.45)$$

$$\Phi_b = F(V_o) + \frac{V_o}{2} - \frac{kT}{q} \quad (3.46)$$

elde edilir.

Norde'nin kullandığı bu metot ideal durumlar ve seri direncin küçük olduğu durumlar için geçerli olup Bohlin ideal olmayan durumlar için genelleştirilmiş Norde metodunu kullanarak seri direnç ve n değerlerinin hesaplanabileceğini göstermiştir (Bohlin 1986).

Denklem (3.25) ile daha önce verilen akım gerilim karakteristiğini göz önüne alırsak seri bir  $F(V)$  fonksiyonu yazılabilir,

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \left[ \ln \left( \frac{I}{AA^{**}T^2} \right) \right] \quad (3.47)$$

Burada  $\gamma$ ,  $n$ 'den büyük keyfi bir sabittir. Denklem 3.44 ile 3.47 birleştirilirse;

$$F(V, \gamma) = \left( \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V + \Phi_b + \frac{IR_s}{n} \quad (3.48)$$

elde edilir. İdeal bir diyot için seri direnç sıfır  $F(V, \gamma)$  fonksiyonu düz bir doğru, eğimi  $(n - \gamma)/\gamma n$  olacaktır. Diğer bir deyişle sadece bir direnç varsa fonksiyon

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left[ \ln \left( \frac{V}{R_s AA^{**}T^2} \right) \right] \quad (3.49)$$

olacaktır.

Bu fonksiyon gerilimin büyük değerleri için  $I/\gamma$  eğimi ile düz çizgiye yaklaşacaktır.  $\Gamma$  sabitinden büyük olduğu sürece fonksiyon minimuma sahip olacaktır.

Denklem 3.48'nin gerilime bağlı diferansiyeli alınırsa,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} + \frac{R_s}{n} \left( \frac{dI}{dV} \right) \quad (3.50)$$

buradan,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\beta I}{n} - \beta R_s \left( \frac{dI}{dV} \right) / n \quad (3.51)$$

böylece,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\frac{\beta I}{n}}{1 + \frac{\beta R_s I}{n}} \quad (3.52)$$

denklem 3.50 ve 3.52 birleştirilirse,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{(n - \gamma + \beta R_s I)}{[\gamma(n + \beta R_s I)]} \quad (3.53)$$

olur.

$dF/dV=0$  minimum değerinde,

$$I_o = \frac{\gamma - n}{\beta R_s} \quad (3.54)$$

denklem 3.47 ve 3.54 kullanılarak,

$$F(V_o, \gamma) = \left( \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n} \right) V_o + \Phi_b + \frac{\gamma - n}{\beta n} \quad (3.55)$$

Burada  $I_0$  ve  $V_0$  değerleri minimumda benzeşirler ve sonuç olarak;

$$\Phi_b = F(V_0, \gamma) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma}\right) V_0 + \frac{\gamma - n}{\beta n} \quad (3.56)$$

ve

$$R = \frac{\gamma - n}{\beta n} \quad (3.57)$$

elde edilir.

### 3.2. CuO Filmlerin Fiziksel zellikleri

Bakır oksit, p-tipi iletkenlik gösteren saydam iletken oksitlerin en önemlilerinden biridir. Bakır oksit filmleri I-VI. grup bileşiği olup, CuO (tenorite) ve Cu<sub>2</sub>O (cuprite) olmak üzere iki genel bileşik halinde oluşur (Morales et. al. 2004).

Bakır oksit (Cu<sub>2</sub>O) kubik kristal sistemine sahiptir ve örgü sabitleri a=b=c=4,2696 Å dur. Bakır iki oksit bileşiği (CuO) monoklinik kristal sisitemine sahiptir ve örgü sabitleri a=4,685 Å, b=3,428 Å, c=5,132 Å ve β=99,42°' dir (Borzi et. al. 2000).

CuO yüksek güneş ısınını soğurma ve ısı kaybetme özelliklerine sahip olduğu için güneş soğurucusu olarak da kullanılır. Optiksel zellikleri dikkate alındığında CuO güneş pili üretiminde kullanılmaya çok uygun bir malzemedir. Ayrıca Bakır oksit filmleri fotoelektrokimyasal özellikleri, güneş termal dönüşüm performansları, düşük maliyetleri, zehirsiz olmaları, bakırın doğada bol miktarda bulunması ve üretim kolay olmasından dolayı güneş pilleri gibi fotovoltaiik aygıtların üretilmesinde, elektrot olarak Li pillerinde, diyotlarda ve transistorlerde kullanılmaktadır (Chaudhary et.al. 2003; Morales et. al. 2004; Morales et. al. 2004).

Direk bant geçişli p-tipi yarıiletkenler olan Cu<sub>2</sub>O ve CuO filmleri sırasıyla 2,1-2,6 eV ve 1,7-2,1 eV'luk yasak enerji bant aralığına sahiptir. (Thobor and Pierson 2003; Ray 2000; Liu et. al. 2005).



### 3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM)

SEM (Scanning Electron Microscope) yüksek çözünürlükte resimler elde edilmesini sağlayan ve numuneleri görüntülemek için ışık yerine elektronları kullanan bir mikroskoptur. Bu şekilde materyallerin birçok özelliği yüksek büyütme oranı ile analiz edilebilir. Yüksek büyütme oranı, derinlemesine odaklanma, yüksek çözünürlük ve kolay gözlemlenebilir olması SEM'i birçok araştırma dalında sıkça kullanılan bir araç yapar.

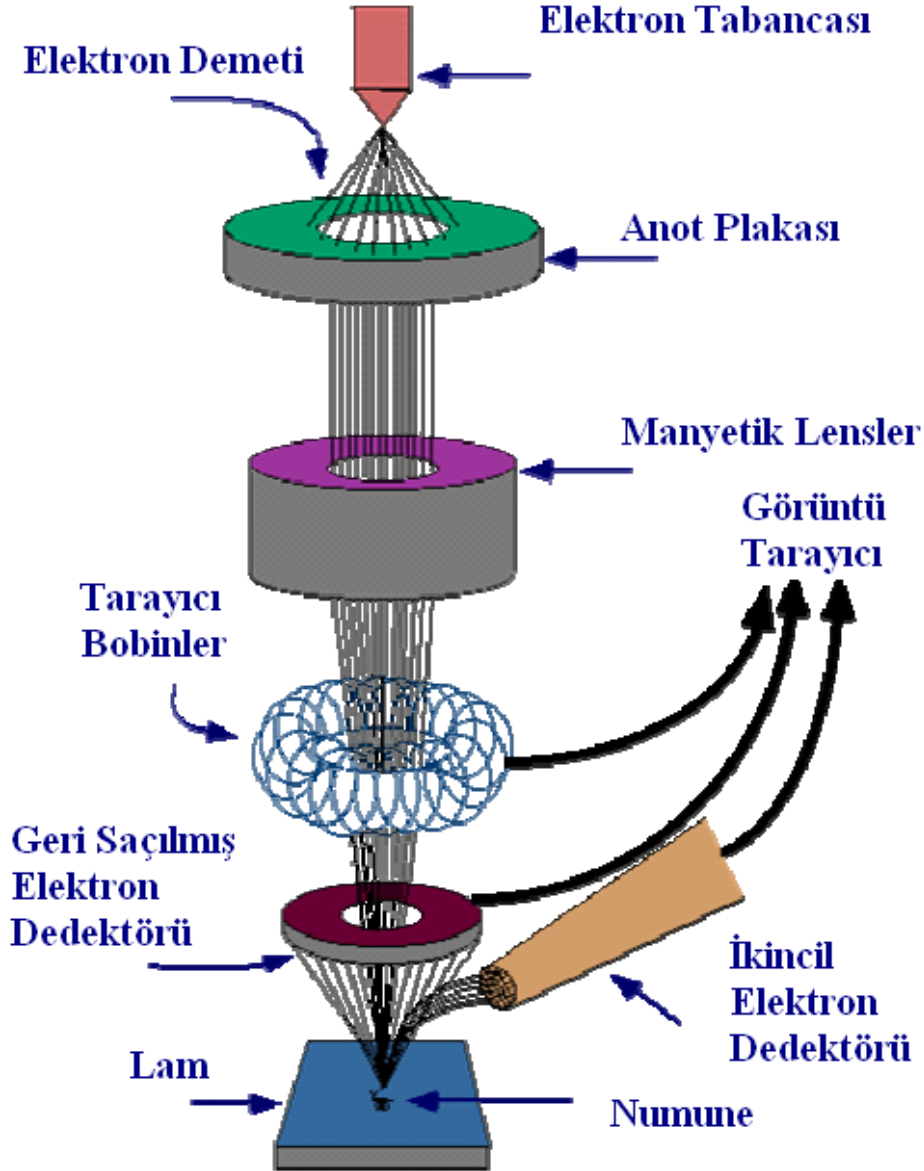
Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü şu şekilde elde edilir;

Yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması ve bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılması sonucu görüntü elde edilir.

Yüksek enerjili demet elektronları ile numune atomlarının dış yörünge elektronları inelastik girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektron (seconder electrons) olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır. Ayrıca numune atomları ile elektron demeti arasında inelastik girişimler sonucu numunede karakteristik X ışınları ve sürekli ışımalar da meydana gelmektedir. Karakteristik ışımalar, dalga boyu veya enerji dağılımlı X-ışını analitik sistemlerde değerlendirildiğinde, numunenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi vermektedir.

Numune üzerine odaklanan elektron demeti, numune atomları ile ayrıca elastik girişimlerde de bulunabilir. Bu girişimlerde demet elektronları, numune atomlarının çekirdeğinin çekim kuvveti ile saptırılarak numune yüzeyinden geri saçılmaktadır. Bu elektronlar geri saçılmış (back scattered) elektronlar olarak tanımlanır. Geri saçılmış

elektron miktarı, numunenin atom numarasıyla orantılıdır. Bu nedenle geri saçılmış elektron görüntüsü özellikle çok fazlı sistemlerde atom numarası farkına dayanan kontrast içerir. Geri saçılmış elektronlar, ikincil elektronlara göre numune yüzeyinin daha derin bölgesinden geldiği için görüntünün ayırım gücü düşük olmaktadır (istanbul.edu.tr).

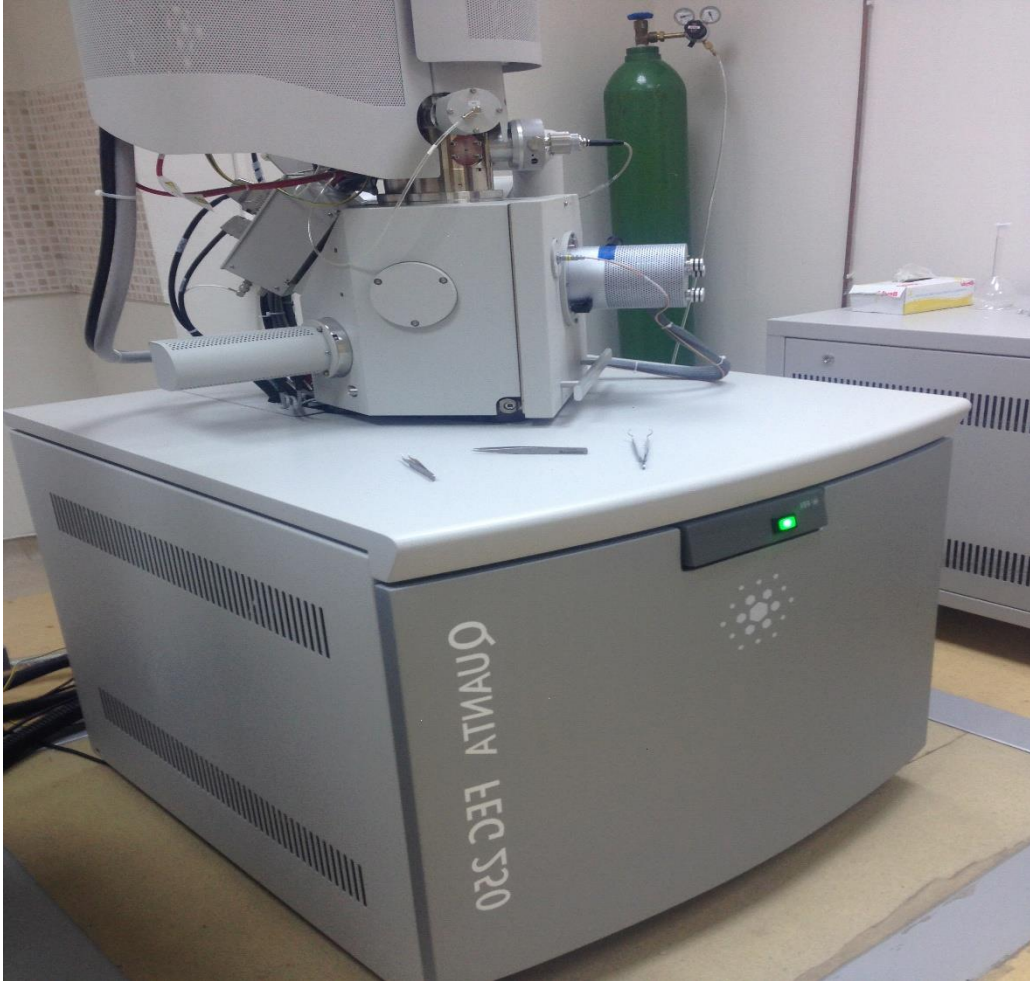


Şekil 3.8. SEM cihazının genel bileşenleri (Polat 2009)

SEM’de birçok nedenden dolayı çalışmalar vakum ortamında yapılmalıdır. Eğer ortam vakumlu değilse elektron demetinin yüksek kararsızlığından dolayı, elektron demeti üretilemez veya kalıcı olması sağlanamaz. Ortamda bulunan gazlar elektron kaynağı ile etkileşime girerek yanmasına neden olabilir veya elektron demeti bu gazların

iyonlaşmasına neden olarak rastgele yüklerin oluşmasına neden olabilirler. Elektron demetinin örneğe ulaşması zorlaşır.

Ortamdaki gaz veya mikroskobun kendinden kaynaklanabilecek moleküller örnek ile bileşikler oluşturarak örneğin safsızlığını etkileyebilirler. Bu ışık şiddetinin azalmasına veya görüntüde belirsizliklerin oluşmasına neden olacaktır (Klesel 2005). Şekil 3.9'da SEM cihazının resmi görülmektedir.



Şekil 3.9. Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM)

### 3.4. Sol Jel Yöntemi

Sol-Jel tekniği ince film üretim tekniklerinden biridir. Genelde Sol-Jel tekniği bir çözeltinin sıvı fazından (Sol) katı fazına (Jel) geçişini içermektedir.

Sol, katı taneciklerin sıvı içerisindeki kararlı bir süspansiyonudur. Solün içerisinde yer alan tanecikler 500 nm ve altında bir büyüklüğü sahip ve gözle görülemeyecek kadar küçük parçacıklardır. Bu parçacıkların üzerine etki eden kuvvetler Van der Waals kuvvetleri ile elektriksel kuvvetlerdir.

Jel ise molekülün çözelti içerisinde genişleyerek makro boyuta ulaşmış halidir. Katı ve sıvı faz arasında, devamlılığı olan bir ara fazdır. Sol-jel yöntemi, kelime anlamıyla solüsyon-jelleşme (solution-gelation) kelimelerinin kısaltılışı olarak kullanılmaktadır. İlk olarak 1840'larda keşfedilmiştir. 1930'lardan itibaren ise yaygın olarak çalışılmaya başlanmıştır.

Bu teknikte ilk olarak metal organik bileşiklerin alkol bazlı çözeltiler içerisinde çözünmesiyle oluşan başlangıç (procuser) çözeltisi olarak tanımlanan çözeltinin hidrolize olmasıdır. Daha sonra polimerleşme sonucunda oluşan çözelti dehidrolize olmaktadır. Elde edilen çözelti kaplanmak istenen altlık malzeme üzerine filtre edilerek damlatılır ve döndürme kaplama, daldırma ya da sprey yöntemlerinden biriyle kaplanır (Sheppard 1992).

Sol-jel kaplama yapımında pek çok metot kullanılmaktadır. Bunların en önemlileri şunlardır:

Daldırılarak Kaplama Tekniği (Dip coating)

Döndürülerek Kaplama Tekniği (Spin coating)

Püskürtme Kaplama Tekniği (Spray coating)

Bu yöntemlerden herhangi biriyle elde edilen kaplamalar amorf yapıya sahip olacağından dolayı, 500 ile 800 °C sıcaklık aralığında tavlanarak kristalleşir ve yoğunlaştırılır. Böylece homojen filmler elde edilebilir. Bu yöntem, ekonomik olması, düzgün kaplama yüzeyi elde edilmesi, homojen ve film kalınlığının kontrol edilebilmesi gibi avantajlara sahiptir. Kaplama sürecini etkileyen diğer faktörleri ise; sıcaklık, nem ve çözeltinin tazeliğidir (Sorar 2008).

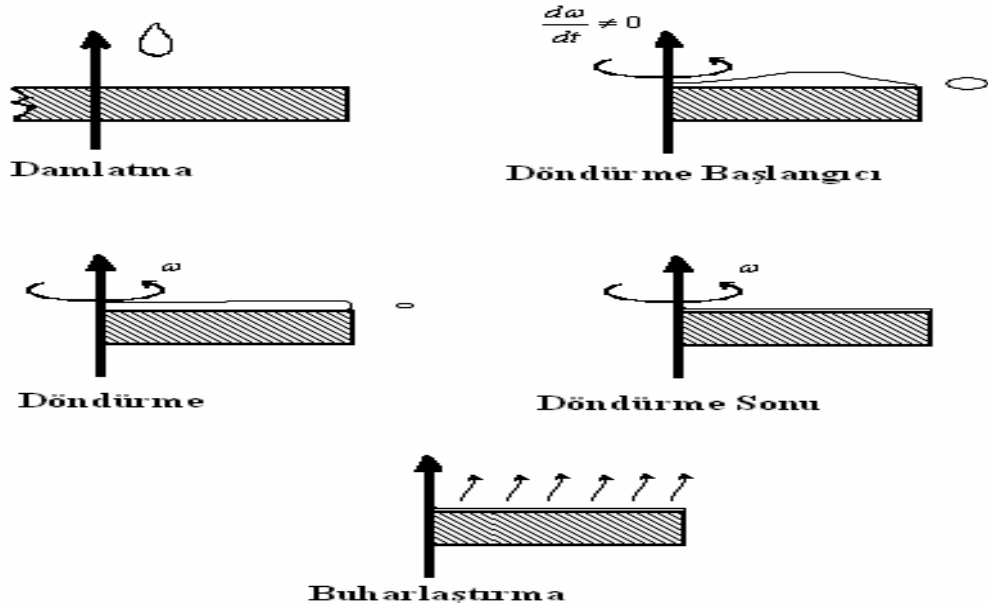
### 3.4.1. Döndürme Yöntemi İle Film Kaplama (Spin Coating)

Döndürerek kaplama metodu uzun yıllardır ince film üretiminde kullanılmaktadır. Bu kaplama metodu ile nanometre mertebelerinden mikron mertebelerine kadar değişen kalınlıklarda filmler elde etmek mümkündür. Tipik olarak döndürerek kaplama işlemi bir çözelti damlasının kaplanacak altlığın üzerine damlatılması ve daha sonra altlığın yüksek dönme hızlarında döndürülmesine dayanır.

Bu yöntem sert yüzeyler veya hafif pürüzlü taşıyıcılar üzerinde ince filmler oluşturmak için kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde taşıyıcılar, çok yüksek dönme hızında, örneğin 1500-4000 devir/dakika hızla döndürülürler.

Döndürme yöntemi ile film kaplama işlemi 5 aşamaya ayrılabilir:

1. Birikim (Damlatma)
2. Döndürme Başlangıcı
3. Döndürme
4. Döndürme sonu (Durdurma)
5. Buharlaştırma



Şekil 3.10. Döndürme yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi

Döndürülerek film kaplama işlemleri şu şekilde oluşur;

Düz taşıyıcının kaplanacak kısmı yere paralel olacak şekilde kaplama cihazına yerleştirilir. Daha düzgün bir yayılım için sol taşıyıcının merkezine damlatılır. Yüksek viskozitelerde veya büyük altlıklarda yüksek dönme hızlarında taşıyıcının tamamen kaplanması için daha fazla sol damlatılmalıdır. Döndürme işlemi başladıktan sonra merkezci kuvvetten dolayı sol taşıyıcı üzerinden dışarıya doğru yayılır. Bu yüzden dış ortamı korumak için dış ortamla kaplama alanı arasına bir bariyer yerleştirilmelidir. Yüzeyi terk eden sıvı miktarı film incelidikçe azalır. Çünkü film incelidikçe akışkanlığa karşı direnç büyür. Çözelti taşıyıcı yüzeyine ince film olarak homojen bir şekilde yayılır. Kaplama sırasında ve sonrasında bir miktar çözücü buharlaşır. Bu yöntemde buharlaşma oranı oldukça düzenlidir. Kaplama süreci bittiğinde elde edilen film ıslak bir film, havada veya ısı ile işleme kurutulmalıdır.

Kaplama işlemi süresince çözeltinin alttaş üzerine dökülmesi, altlığın hızlandırılması, sabit hızda film tabakasının inceltmesi ve yine sabit hızda buharlaşma basamakları gerçekleşmektedir (Luurtsema 1997).

Spin ile kaplama tekniğinde birçok parametre film özelliğini etkilemektedir. Bu parametreler açısal hız, kaplama süresi, altlığın ivmesi, kuruma hızı ve çözelti reolojisidir (Gürbüz 2007).

Dönme esnasında fazla solün de uzaklaşmasıyla filmin kalınlığı azalır. Film kalınlığı azaldıkça yüzeyde bulunan sıvının taşınma oranı yavaşlar. Bunun nedeni, film kalınlığı azaldıkça akışkanlığa karşı direncin büyümesidir. Diğer yandan, uçucu olmayan maddelerin konsantrasyonunun büyümesi akışkanlığa karşı direncin artmasına sebep olur (Özbey 2004).

Film kalınlığının düzgün olmasını sağlayan iki kuvvet vardır bunlar merkezci kuvvet ve buna ters yönde sürtünme kuvvetidir.

Döndürme sonunda oluşan film kalınlığı şu ifade ile verilir:

$$h(t) = \frac{h_{(0)}}{\sqrt{1 + \frac{4\rho\omega^2 h_0^2 t}{3\eta}}} \quad (3.58)$$

Buradaki  $h(t)$  ;  $\rho$  yoğunluğundaki, viskozitesi  $\eta$  olan ve  $\omega$  açısal hızıyla döndürülen Filmin  $t$  süre sonraki kalınlığıdır.

Döndürerek film kaplama metodunun avantajları:

- 1-Vakumda buharlaştırma ve sıçratarak kaplama cihazlarına göre cihazları çok daha ucuzdur.
- 2-Büyük taşıyıcılar bile az bir miktar sol ile kaplanabilir. Sol kaybı az olur.
- 3-Çok hızlı bir tekniktir, zamandan kazanç sağlar.
- 4-Çok katmanlı uygulamalar için idealdir.
- 5-Ticari ekipmanlarının bütün türlerini edinmek mümkündür.

Döndürerek film kaplama metodunun dezavantajları ise;

- 1-Sadece simetrik taşıyıcılar için verimli bir metottur.
- 2-Temiz tutulması kolay değildir.
- 3-Ancak düz numuneler kaplamak için kullanılabilir.
- 4-Büyük taşıyıcıları homojen kaplaması zordur.
- 5-Çözücünün hızlı buharlaşması durumunda homojen kaplamalar elde edilemez, geç buharlaşan çözücü ise malzemeyi çözmeyebilir

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. CuO Çözeltisinin Hazırlanması

CuO ince filmler de sol-jel döndürme tekniğiyle büyütülmüştür. Bakır kaynağı olarak bakır (II) asetat monohidrat ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{H}_2\text{O}$ ) kullanılmıştır. Gerekli çözelti aşağıdaki gibi hazırlandı.

İlk önce 100 ml etil alkol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , Merck) içinde 2,5 gr bakır (II) asetat ( $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{H}_2\text{O}$ ) yaklaşık 50 °C’de karıştırılarak çözülmesi sağlandı. Çözöldükten sonra 20 damla laktik asit ( $\text{CH}_3\text{CHOH-COOH}$ ) damlatıldı. Daha sonra 1 ml laktik asit eklenip biraz soğuyuncaya kadar karıştırılmaya devam edildi. Soğuyan çözelti manyetik karıştırıcıda 2 saat karıştırıldı. Manyetik karıştırıcıda karışan çözeltiye çözünürlüğü arttırmak için 3 ml triethylamin ( $\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}$ ) eklendi. Hazırlanan çözelti 1 gün dinlendirildi.

### 4.2. Deneyde Kullanılan Materyallerin Özellikleri

#### 4.2.1. Silisyum

Yerkabuğunun yaklaşık %25,7’si Si elementinden oluşur. Oksijenden sonra bileşikleri halinde en fazla bulunan elementtir. Silisyumun saf ve amorf silisyum olmak üzere iki tane allotropu vardır. Kristal silisyum saydam olmayan koyu gri renkli, parlak, sert ve kırılma olup örgü yapısı elmas yapıdadır. Amorf silisyum ise koyu kahve renkli olup tane büyüklüğü nedeni ile kristal silisyumdan ayırt edilebilir ve kolay reaksiyon verir. Aşağıdaki tablo 4.1’de Saf bir silisyum kristalinin oda sıcaklığındaki (300 K) bazı temel fiziksel özellikleri de verilmiştir.



Tablo 4.1 Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri

Özellikler	Si
Atom yoğunluğu	$5,0 \times 10^{22}$ (Atom/cm <sup>3</sup> )
Atom ağırlığı	28,09
Kırılma alanı	$3 \times 10^5$ (V/cm)
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluğu	2,328 (g/cm <sup>3</sup> )
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu	$2,8 \times 10^{19}$ (cm <sup>-3</sup> )
Valans bandındaki durumların yoğunluğu	$1,04 \times 10^{19}$ (cm <sup>-3</sup> )
Saf taşıyıcı yoğunluğu n	$1,45 \times 10^{10}$ (cm <sup>-3</sup> )
Saf özdirenci	$2,3 \times 10^5$ (cm)
Örgü sabiti	5,43095 (Å)
Elektronların etkin kütlesi	$m_l^* = 0,98$ , $m_t^* = 0,19$
Deşiklerin etkin kütlesi	$m_{lh}^* = 0,16$ , $m_{hh}^* = 0,49$
Elektron yakınlığı	4,05 (eV)
Yasak enerji aralığı	1,12 (eV)
Mobilitesi elektron – hole	1,450-500 (cm <sup>-2</sup> /V.s)
Erime sıcaklığı	1414 (°C)
Termal iletkenliği	1,56 (W/cm.K)
Kaynama noktası	2900(°C)
Molar hacmi	12,06 (ml/ mol)
Mineral Sertliği	6,5

#### 4.2.2. Alüminyum

Bu çalışmada omik ve doğrultucu kontaklar için %99,99 saflıkta alüminyum kullanılmıştır. Alüminyum hafif bir metaldir ve doğada serbest halde bulunmaz.

$Al_2O_3 \cdot 2H_2O$  (boksit) mineralinden elde edilir. Aşağıdaki çizelgede alüminyum elementine ait özellikler verilmiştir.

Tablo 4. 2. Alüminyumun oda sıcaklığındaki bazı fiziksel özellikleri

Özellikler	Al
Yoğunluk	2,7 (g/cm <sup>3</sup> )
Erime noktası	≈660 (°C)
Kaynama noktası	2519 (°C)
Termal iletkenliği	237 (W/cm.K)
Mineral sertliği	2,75
Elektriksel iletkenliği	$3,77 \times 10^5$ ( $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ )

### 4.3. Silisyum Alt Tabakanın Hazırlanması

Bu çalışmada, [100] doğrultusuna sahip,  $\rho = 1-10 \Omega \text{cm}$  öz dirençli, önceden parlatılmış p-tipi Si (Silisyum) kristali kullanılmıştır.

Kristal ve cam alt tabaka temizleme işlemleri şu şekilde yapıldı:

- Asetonda ultrasonik bandyoda 10 dakika yıkandı.
- Metanolde ultrasonik bandyoda 10 dakika yıkandı.
- Deiyonize suda ultrasonik bandyoda 10 dakika yıkandı.
- RCA-1 ( $H_2O:H_2O_2:NH_3: 6:1:1$ )'de 50-60 °C'de 10 dakika yıkandı.
- Seyreltilmiş HF ( $H_2O:HF:10:1$ ) ile 30 saniye yıkandı.
- RCA-2 ( $H_2O:H_2O_2:HCl: 6:1:1$ )'de 50-60 °C de 10 dakika yıkandı.
- Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- Seyreltilmiş HF ( $H_2O:HF:10:1$ ) ile 30 saniye yıkandı.
- 15-20 dakika, akan deiyonize su içerisinde kaldı.
- Azot gazı ( $N_2$ ) ile kurutuldu

Kristale omik kontak yapılırken buharlaştırma işleminden hemen sonra numune tavlanaacağı için, tavlama sırasında numunenin içine yerleştirildiği quartz pota da aseton

ve metanol ile ayrı ayrı 5'er dakika ultrasonik banyo kullanılarak yıkanmıştır. Yine buharlaştırmada kullanılan metaller de 5'er dakika aseton ve metanolle ultrasonik olarak yıkandıktan sonra %10'luk seyreltilmiş HCl ile yıkanmış ve azot gazı ile kurutulmuştur.

#### 4.4. Omik Kontak Atılması

Bu çalışmada alttaş olarak bir tarafı mat diğer tarafı parlak *p*-Si kristali kullanılmıştır. Elde edilecek filmin homojen ve düzgün olabilmesi, elektriksel, optik ve morfolojik özelliklerinin iyi olması için kaplanacak olan alttaşların temiz olması gereklidir. Ayrıca omik kontakların yapılacağı bu yüzeyler, meydana gelebilecek ara yüzey hal oluşumunu minimuma indirmek için organik kirlilerden, ağır metal kirliliklerinden ve oksit tabakasından arınmış olmalıdır. Çünkü diyotun performansı ve deneysel ölçüm sonuçları çok büyük ölçüde yüzey temizliğine bağlıdır.

İlk önce kullandığımız yarıiletkenin bir tarafına omik kontak yapılması gerekir. Buharlaştırmada kullandığımız ısıtıcı seyreltilmiş HCl (%10) ile ve sonra deiyonize su ile iyice yıkandıktan sonra kurutulularak vakum cihazındaki yerine yerleştirildi ve oksitlenme için yakıldı. Numunelerin omik tarafına buharlaştırılacak olan metal, kimyasal olarak 5'er dakika aseton ve metanolle ultrasonik olarak ve daha sonra seyreltilmiş %10'luk HCl ile temizlendi. Yarıiletkenin omik kontak yapılacak tarafı önceden çalıştırılarak işlem yapılmaya hazır hale getirilen vakum sistemi içine uygun şekilde yerleştirildi. Vakum içindeki basınç, yaklaşık olarak  $10^{-6}$  torr değerine düşüncü kimyasal temizliği yapılmış ve ısıtıcı üzerine yerleştirilmiş olan %99,99 saflıktaki alüminyum metali buharlaştırıldı. Kısa bir süre sonra vakum cihazına hava verildi, numune vakum cihazından çıkartılarak kimyasal olarak temizlenmiş quartz pota içine yerleştirilerek, önceden tavlama işlemi için hazır hale getirilen fırına yerleştirilip  $570^{\circ}\text{C}$ 'de ve 3 dakika tavlandı. Böylece omik kontak işlemi tamamlanmış oldu. Aşağıdaki şekilde omik kontak işleminde kullandığımız cihaz görülmektedir.



Şekil 4.1. Omik kontak işleminin gerçekleştiği cihaz



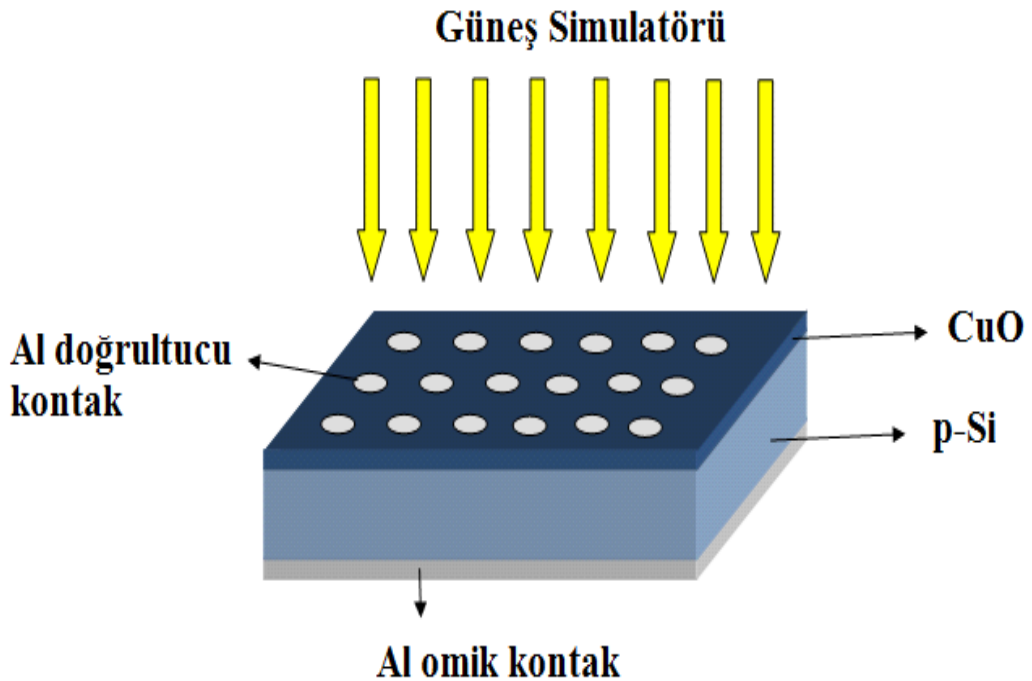
Şekil 4.2. Tavlama için kullanılan fırın

#### 4.5. CuO Film Kaplanması

Spin coating tekniği ile CuO filmlerini oluşturabilmek için daha önceden omik kontak yapılmış p-Si kristal altlık olarak kullanıldı. Daha önceden hazırlanmış olan çözeltiden bir mikro pipet yardımı ile yaklaşık 2,5  $\mu\text{l}$ 'den daha az olacak şekilde altlık üzerine damlatıldı. Sonra, 3000 devir/dakika hız ile 30 saniye döndürüldükten sonra 120 °C'de 5 dakika kurutuldu. Bu işlemler 6 kez tekrar edildikten sonra 500 °C'de 30 dakika tavlanaarak istenmeyen tüm uçucu kimyasalların çözeltiden ayrılması ve oksitlenmenin gerçekleştirilmesi sağlandı.

#### 4.6. Schottky Diyot Elde Edilmesi

Gerekli elektriksel ölçümleri alabilmek için  $\sim 2000$  Å kalınlığında, 1mm çapında Al kontaklar maske yardımıyla CuO/p-Si/Al yapısı üzerine  $10^{-6}$  Torr basınç altında buharlaştırıldı. Kontakın doğrultucu özellik göstermesi oldukça önemlidir. Diyotun etkin alanı doğrultucu kontak yapılan yüzüdür. Böylece doğrultucu kontakın da oluşturulmasıyla Al/CuO/p-Si/Al şeklinde diyot elde edildi.



Şekil 4.3. Al/CuO/p-Si/Al diyotun şematik gösterimi

Diyotun akım-gerilim (I-V) ölçümleri Keithley 2400 sourcemeter cihazı ile yapıldı. Yapılan hesaplamalardan sonra Al/CuO/p-Si/Al diyotunun doğrultucu özellikte olduğu görüldü. Aşağıdaki şekilde akım-gerilim ölçümlerinin yapıldığı cihaz görülmektedir.



Şekil 4.4. Keithley 2400 sourcemeter ve güneş simülatörü

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 5.1. Schottky Kontaklarda Akım-Gerilim Ölçümleri

Bu çalışmada öncelikle Al/CuO/p-Si/Al Schottky diyotun oda sıcaklığında doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristikleri incelendi ve diyot için  $I$ - $V$  eğrileri Şekil 5.1’de verildi. Ölçümler Keithley 2400 sourcemetre kullanılarak, bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

İdeal bir Schottky diyotun doğru beslem  $I$ - $V$  karakteristiği  $V > 3kT/e$  sınırında azınlık taşıyıcı etkileri ihmal edilerek Bethe’nin termoiyonik emisyon (TE) teorisine göre,

$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Burada  $V_D$  diyot üzerine düşen gerilim,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  mutlak sıcaklıktır.  $I_o$  ise ters doyum akımı olup,

$$I_o = A^*AT^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (5.2)$$

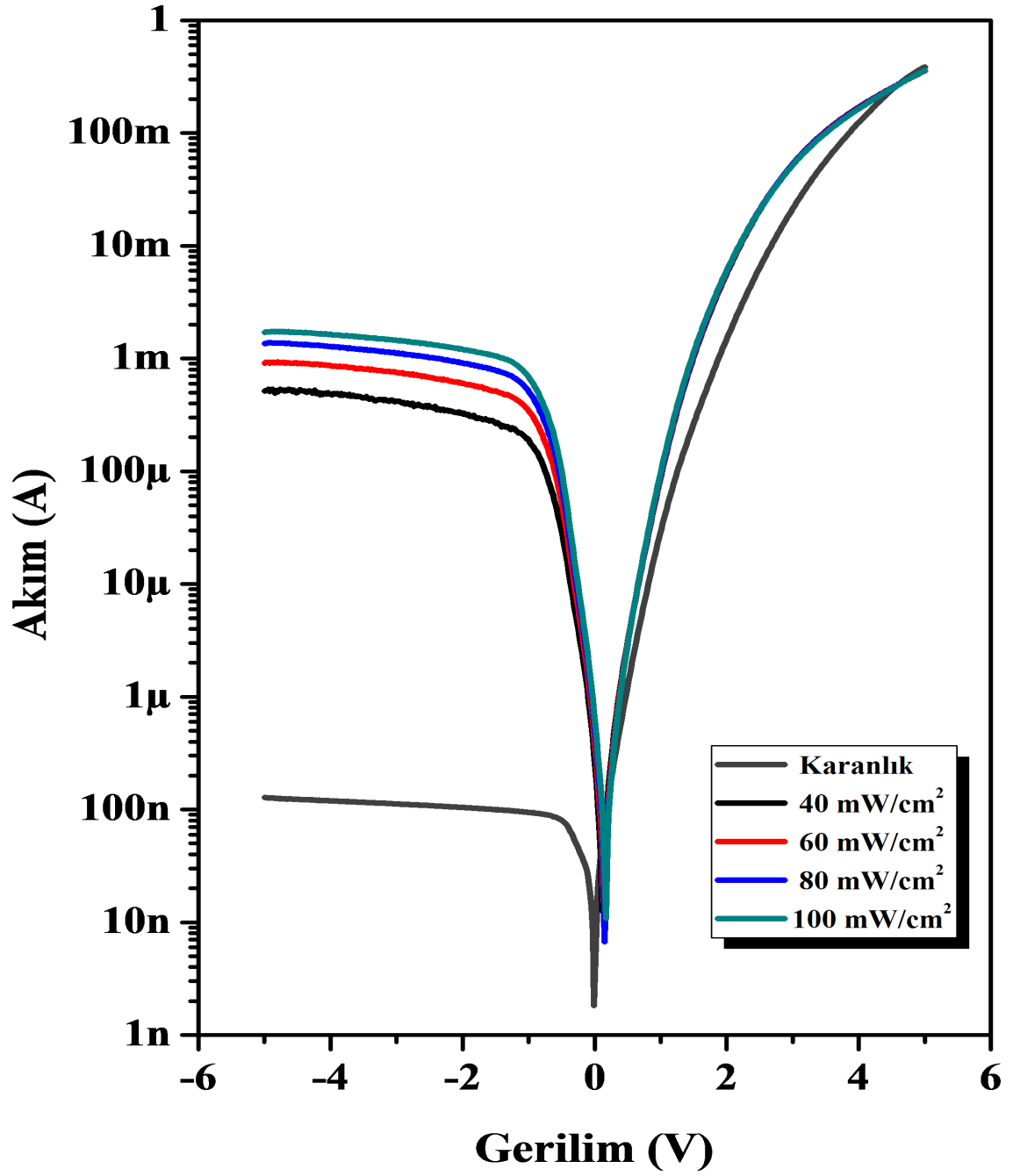
İfadesi elde edilir. Buradan  $eV \gg 3kT$  olması durumunda  $I$  ihmal edilebilir. Eşitliğin her iki tarafının logaritması ve  $V$ ’ye göre türevi alınırsa,  $n$  idealite faktörü için,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (5.3)$$

denklemini elde edilir. Bu ifadedeki  $dV / d(\ln I)$  terimi  $\ln I$ - $V$  grafiğinden belirlenir. Buna göre Al/CuO/p-Si/Al Schottky diyotun  $\ln I$ - $V$  grafiğinin lineer kesiminin eğimi denklem (5.3)’de yerine yazılarak  $n$  idealite faktörü ve düşey ekseni kestiği noktadan doyma akım yoğunluğu hesaplanabilir ve aşağıdaki denklem yardımıyla da,

$$q\phi_{B0} = kT \ln \left( \frac{A^* AT^2}{I_0} \right) \quad (5.4)$$

engel yüksekliği bulunabilir. Hesaplamalarda etkin Richardson sabiti p-tipi Si için  $32AK^{-2}cm^{-2}$  olarak alındı. Bu hesaplamalardan İdealite faktörü 3,47, engel yüksekliği ise 0,73 olarak hesaplandı.



Şekil 5.1. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun simülâtör altında ve karanlıkta lnI-V grafikleri



Al/CuO/p-Si/Al diyotunun fotoelektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için diyotun  $I$ - $V$  ölçümleri AM1.5 global filtreye sahip güneş simülatörü altında 40-100  $\text{mW}/\text{cm}^2$  şiddetindeki ışık kullanılarak gerçekleştirildi. Diyotun ışığa karşı duyarlılığının gözlemlenebilmesi için -0,5 V'da 40-100  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ışık altındaki ve karanlıktaki akım değerleri oranı hesaplanmış ve diyotun fotodiyot özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Tablo 5.1'de diyota ait bulduğumuz değerler verilmiştir.

Tablo 5.1. 40-100  $\text{mW}/\text{cm}^2$  altında Al/CuO/p-Si/Al diyotunun duyarlılık,  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$  değerleri

	Duyarlılık	$V_{oc}$ (mV)	$I_{sc}$ (nA)
40 $\text{mW}/\text{cm}^2$	4029	110	228
60 $\text{mW}/\text{cm}^2$	7112	151	346
80 $\text{mW}/\text{cm}^2$	10596	151	598
100 $\text{mW}/\text{cm}^2$	13286	171	733

## 5.2. Norde Fonksiyonları Yardımı İle Engel Yüksekliği ve Seri Direnç Değerlerinin Bulunması

Norde engel yüksekliği ile seri direncin hesaplanmasında yeni bir metot önermiştir. Bu metoda göre modifiye edilmiş Norde fonksiyonu şu şekildedir;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{e} \left( \frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (5.5)$$

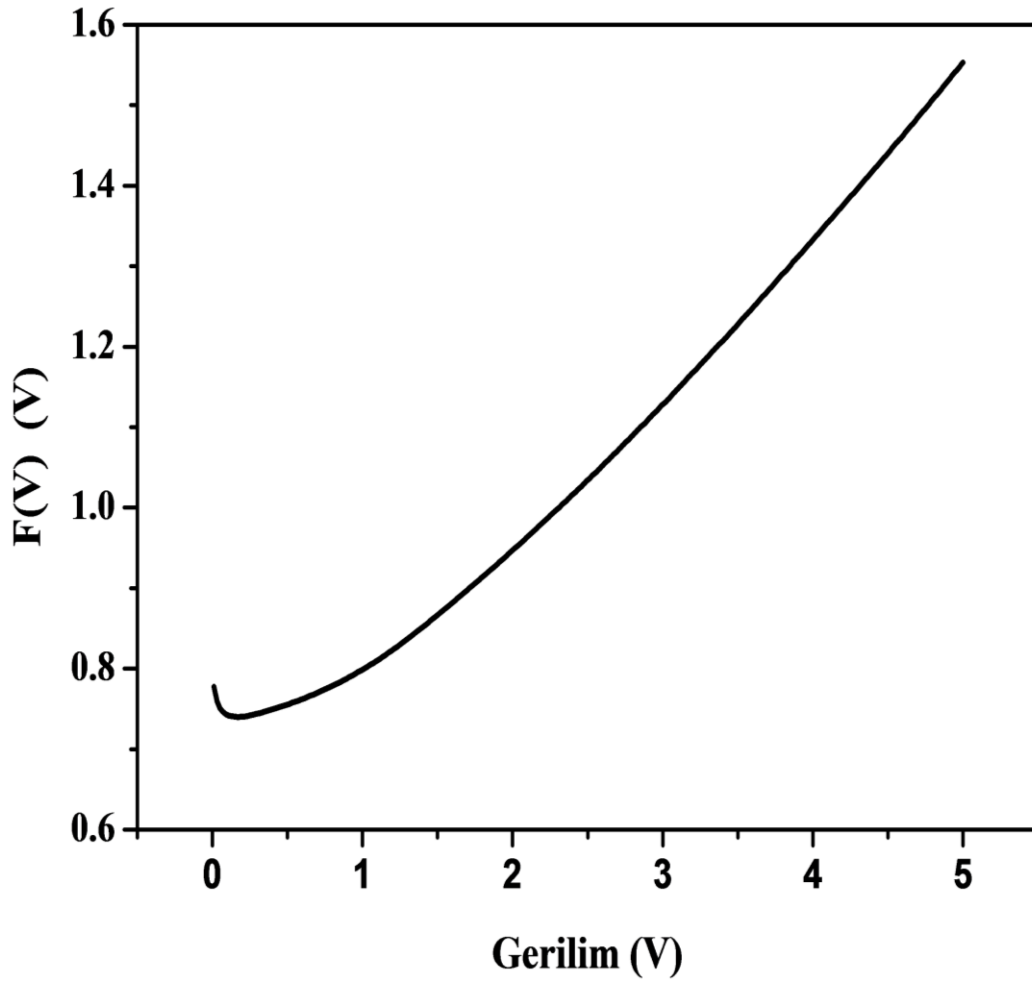
Yapmış olduğumuz çalışmada idealite faktörü 3,47 olduğu için buradaki  $\gamma$  değerini 4 olarak aldık. Çünkü  $\gamma$  ifadesi  $n$  değerinden büyük olan ilk tamsayıdır. Norde metodunda engel yüksekliği şu şekilde verilir;

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \quad (5.6)$$

Burada  $F(V_0)$  ifadesi  $F-V$  grafiğinin minimum  $F(V)$  değeridir yapılan hesaplamalara göre bu değer 0,74 olarak bulundu.  $V_0$  ise bu değere karşılık gelen gerilim değeridir ve bu değerde 0,1714 olarak hesaplandı. Bu verilerle  $\Phi_b$  engel yüksekliği 0,757 eV olarak bulundu.

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{eI} \quad (5.7)$$

Norde metodunda seri direnç değeri ise yukarıdaki formül (5.7) yardımı ile 145 k $\Omega$  olarak bulundu.



Şekil 5.1. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun  $F(V)$ - $V$  grafiği

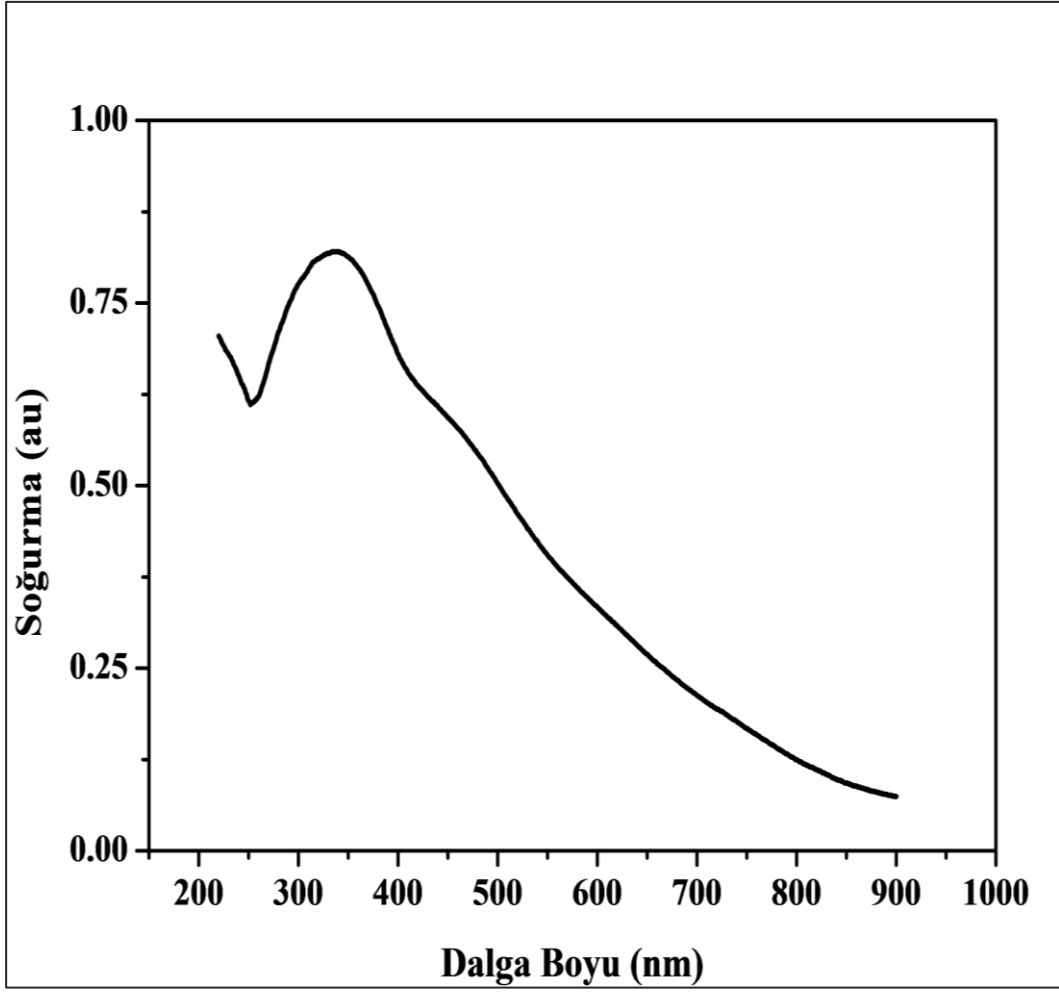
Gupta ve ark. (2009), Au/Cu<sub>2</sub>O/p-Si diyot yapısını oluşturmuşlardır. Cu<sub>2</sub>O'yu Radyo Frekans saçırma tekniği ile oluşturmuşlardır. Schottky kontak mekanizmasında iyi bir lineer bölge oluşturabilmek için en iyi metalin Au (Altın) olduğunu bildirmişlerdir. Schottky diyot yapıya ait yarılogaritmik akım voltaj grafiğinin lineerlikten sapmasının, ara yüzeysel durumlarla ilgili olduğunu ayrıca Au ile p-Si arasında bulunan Cu<sub>2</sub>O'nun homojen olmayan kalınlığından dolayı sebep olabileceğini rapor etmişlerdir.

### 5.3. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun optik özelliklerinin belirlenmesi

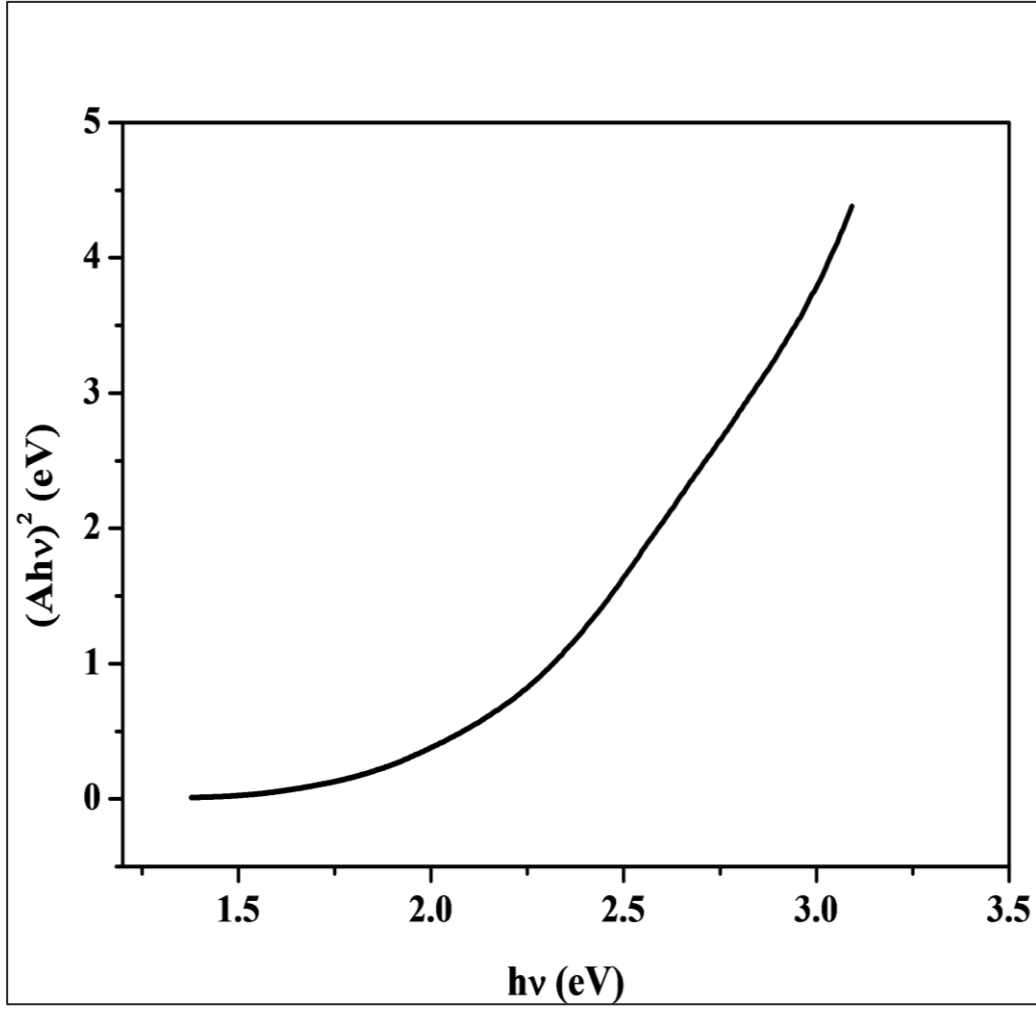
Al/CuO/p-Si/Al diyotunun optik özelliklerini tayin etmek için temizleme aşamaları yukarıda (kısım 4.3) verildiği şekilde cam alt tabakalar temizlenmiştir. Daha sonra cam alt tabakalar üzerine CuO ince filmler Spin coating tekniği ile büyütülmüştür. CuO Film Kaplanması işlemleri daha önce (kısım 4.4) anlatıldı. Al/CuO/p-Si/Al diyotun optik bant aralığı,

$$\alpha hv = B(hv - E_g)^m \quad (5.8)$$

denkleminde 2,08 eV olarak hesaplandı. Bulunan bu  $E_g$  değerinin literatüre uygun olduğu gözlemlendi. Direk bant geçişli p-tipi yarıiletkenler olan Cu<sub>2</sub>O ve CuO filmleri sırasıyla 2,1-2,6 eV ve 1,7-2,1 eV' luk yasak enerji bant aralığına sahiptir. (Thobor and Pierson, 2003; Ray, 2000; Liu et. al. 2005).



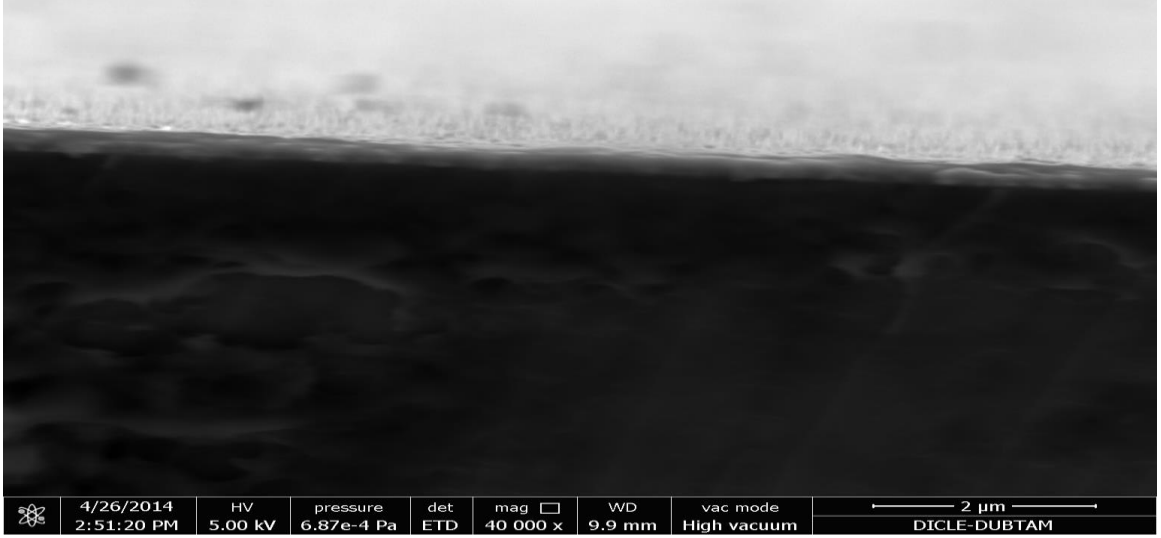
Şekil 5.2. CuO ince filmlerin soğurma spektrumu



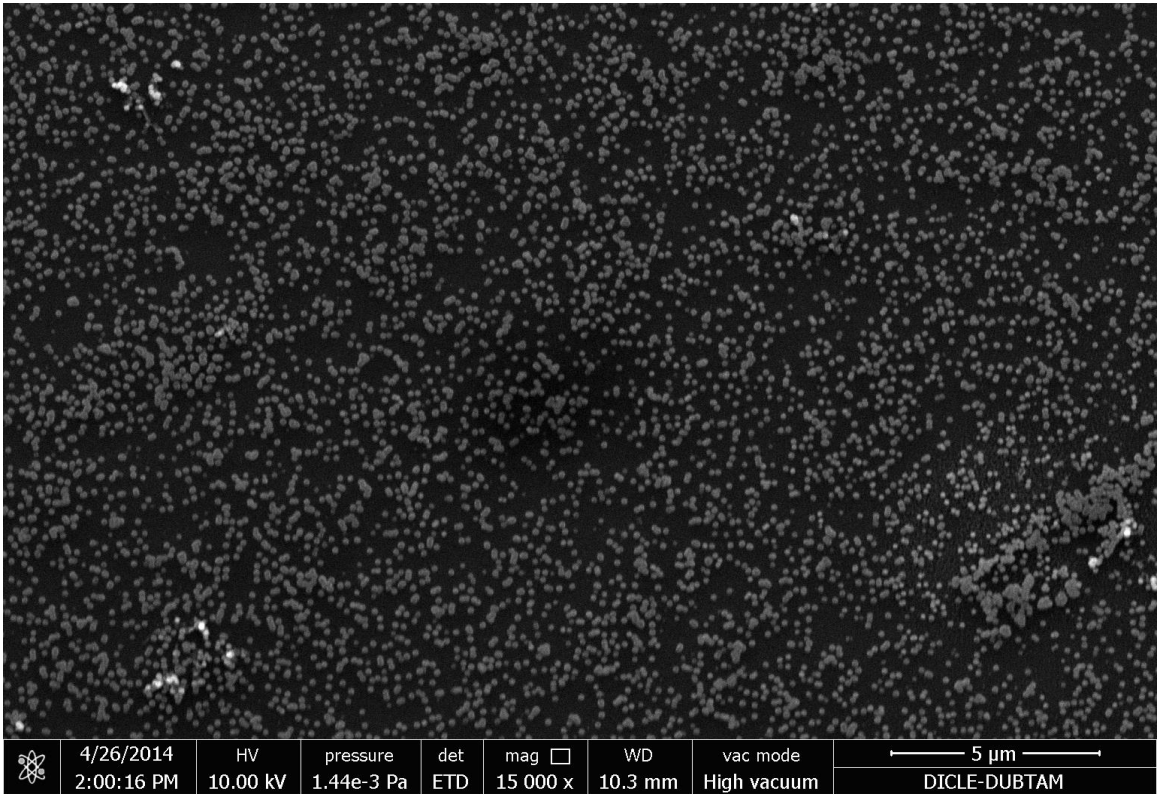
Şekil 5.3. Al/CuO/p-Si/Al diyotunun  $(Ahv)^2 - hv$  grafiği

#### 5.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Sonuçları

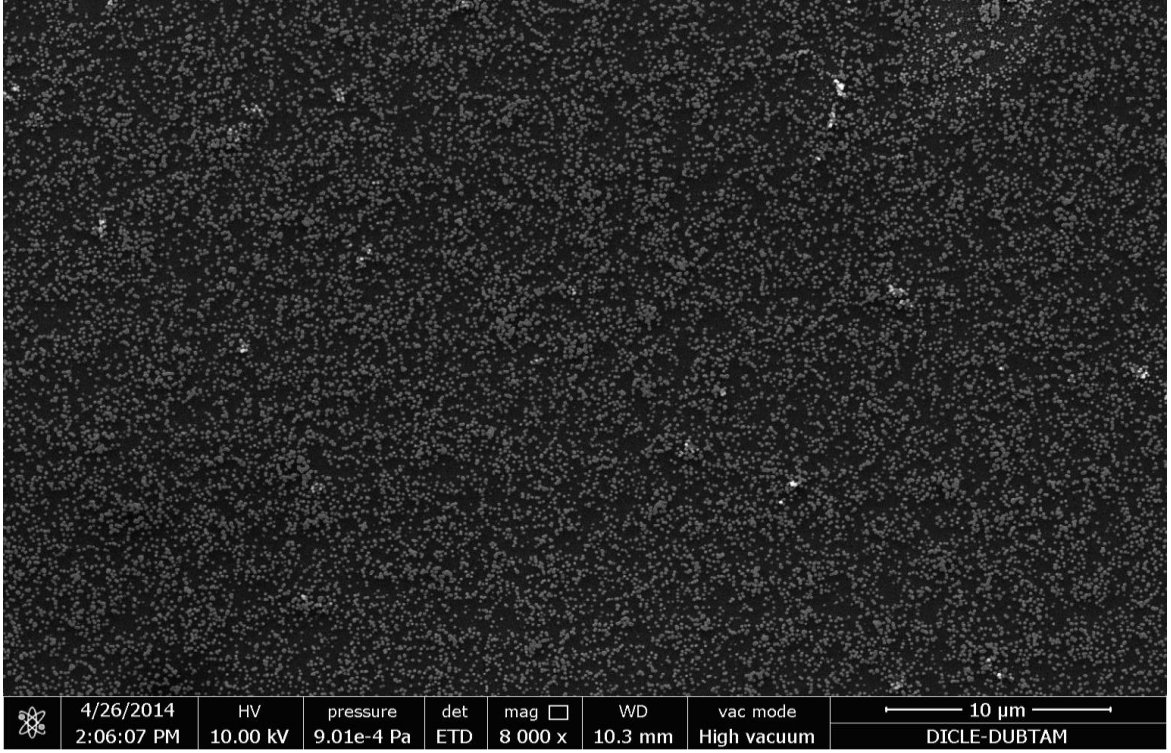
Elektron mikroskobu yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların malzeme yüzeyine çarptırılıp yansıma prensibine dayanır. Bu yansıyan elektronlar X-ışınları kullanılarak değişik analizler sonucu yüzeyin topografisi elde edilir. Numunelerin mikro yapısal özelliklerinin analizi için yüksek çözünürlüğe sahip taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Şekil 5.5’de SEM cihazının resmi görülmektedir.



Şekil 5.4. Döndürerek Kaplama yöntemi ile üretilen CuO ince filminin 40000x boyutundaki (yan kesit) SEM görüntüsü



Şekil 5.5. Döndürerek Kaplama yöntemi ile üretilen CuO ince filminin 15000x boyutundaki (yüzey) SEM görüntüsü



Şekil 5.6. Döndürerek Kaplama yöntemi ile üretilen CuO ince filminin 8000x boyutundaki (yüzey) SEM görüntüsü

Halin ve ark. (2008), çalışmalarında aynı yöntemi kullanarak n-tipi silisyum yüzey üzerine büyüttükleri  $\text{Cu}_2\text{O}$ 'ların Şekil (5.6) ve şekil (5.7)'deki benzer yapısı için, düzgün pürüzsüz bir film yüzeyi yerine adacıklar halinde kümelenmiş yapıların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu durumun yarıiletken tek kristal bir altlık üzerine büyütülen  $\text{Cu}_2\text{O}$  taneciklerinin, yüzeyde dağılımı ve şeklinden dolayı Volmer-Weber büyümesi olarak ifade edilen bir yapının oluştuğunu tayin etmişlerdir.

Şekil (5.6) ve şekil (5.7)'de görülen, elde ettiğimiz yapının Volmer-Weber büyümesinde olduğu gibi adacıklar halince kümelenen taneciklerden oluştuğunu gözlemlendi. Bu durumun tek kristal yarıiletken bir yüzeyin seçilmesi, ayrıca depo edilen filmin kimyasal potansiyeli ve filmde oluşan stres'ten dolayı kaynaklandığı söylenebilir.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada (100) yönelimine sahip, önceden parlatılmış  $\rho=1-10 \Omega\text{cm}$  öz dirençli, p-tipi Si (Silisyum) kristali kullanılmıştır.

Metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen CuO nano yapıları ince filmleri çözeltiden büyütme yöntemlerinden biri olan Sol-Jel Spin Coating (Döndürme Kaplama) yöntemi kullanıldı. Yapının omik ve doğrultucu kısmı, Termal buharlaştırma metodu kullanılarak  $5 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında ve %99,99 saflığında alüminyum metali kullanıldı. CuO/p-Si/Al yüzeyi üzerine Al (Alüminyum) metali  $5 \times 10^{-6}$  Torr basınç altında buharlaştırılarak Al/CuO/p-Si/Al Schottky diyot yapısı üretildi. Metal ile yarıiletken arasına yerleştirilen ince metal-oksit bir filmin diyot karakteristikleri üzerine etkisi araştırıldı. Üretilen filmlerin, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alındı. Diyotun seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalardan engel yüksekliği 0,757 ve seri direnç ise 145 k $\Omega$  olarak bulunmuştur. Üretilen diyot yapısının düz belsem I-V grafiklerinden, idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği ( $\Phi_B$ ) değerleri hesaplandı. Diyotun engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi parametreler termoionik emisyon teorisinden hesaplandı. Diyotun doğru belsem lnI-V grafiğinin doğrusal kısmı göz önünde bulundurularak engel yüksekliği 0,73 ve idealite faktörü 3,47 olarak bulundu.

İdealite faktörü değerinin idealden sapması metal ve yarıiletken arasındaki CuO yalıtkan tabakasına ve arayüzey durumlarının özel dağılımlarına atfedildi. Pratikte ideal bir durum için n=1 dir. Ancak uygulanan gerilimin engel yüksekliğini bir miktar etkilemesinden dolayı bu duruma literatürde hemen hemen hiç rastlanmamıştır. Hesaplanan n değerinin idealden büyük olması arayüzey durumları ve yalıtkan arayüzey (CuO) tabakanın varlığından kaynaklanmaktadır. Uygulanan voltajın bir kısmının yalıtkan tabaka üzerine düşmesi sonucu diyot üzerine düşen gerilimde bir azalma meydana gelir. Bu durum I-V karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına neden olmuştur.



Metal-yarıiletken arasında yapay ya da doğal olarak oluşturulmuş yalıtkan/oksit tabaka metal-yarıiletken yapıyı metal-yalıtkan-yarıiletken yapıya dönüştürür. Yalıtkan tabakanın kalınlığı artıkça I-V karakteristiklerinden elde edilen yapısal parametreler arayüzey tabakası ve arayüzey durumlarından büyük ölçüde etkilenir. Metal-yarıiletken ve metal-yalıtkan-yarıiletken Schottky diyotlar entegre aygıt teknolojisinde büyük bir öneme sahiptir. Bu diyotlardaki akım-iletim mekanizması yarıiletkenin üretim parametreleri, kullanılan metalin ve yarıiletkenin türü, metal-yarıiletken arayüzeyindeki yalıtkan tabaka, uygulanan sıcaklık, frekans ve voltaj gibi pek çok faktöre bağlıdır.

Ayrıca CuO filmlerin optik özellikleri UV-VIS spektroskopisi yardımı ile incelenmiş ve buradan enerji bant aralığının  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye grafiğinin lineer kısmı kullanılarak, değeri 2,08eV olduğu tayin edilmiştir. Literatürdeki yayınlarla karşılaştırıldığında bulunduğumuz bu değer daha önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Atmalı lazer kaplama metoduyla (pulsed laser deposition technique) hazırlanan CuO film için 2,12 eV enerji bant aralığı bulunmuştur (Ray 2000, Chen vd. 2008, Serin 2010 ).

Wang vd. (2002) tarafından ve Vijaya Kumar vd. (2000) tarafından yayınlanan çalışmalarda Eg değerleri sırasıyla 2,43 eV ve 2,18 eV bulunmuştur.

Bakır (II) oksit (CuO), p-tipi bir yarıiletken malzemedir. Kahverengi veya siyaha yakın oldukça koyu bir renge sahip parlak bir katıdır. Molekül ağırlığı 79,45 g/mol ve yoğunluğu 6,3 g/cm<sup>3</sup>'tür. Direk enerji bant aralığına sahiptir ve enerji aralığının değeri 1,3 ile 2,4 eV arasındadır (Abdel Rafea ve Roushyd 2009). Bizim elde ettiğimiz değer CuO ile ilgili yayınlardaki verilerle karşılaştırıldığında yakın değerler olduğu gözlenmiştir.

Yaptığımız Al/CuO/p-Si/Al Schottky diyotun fotovoltaiik parametreleri AM1.5 filtre ile filtrelenmiş güneş simülatörü altında 40, 60, 80, 100 mW/cm<sup>2</sup> ışık altında bulunduğumuz duyarlılık,  $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$  değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Yaptığımız diyot ışığa karşı duyarlı olmasından dolayı fotodiyot özelliindedir. Elde ettiğimiz Al/CuO/p-Si/Al diyotunun simülatör altında ve karanlıkta  $lnI-V$  grafikleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

## KAYNAKLAR

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

Aydın, S.B.K., Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si schottky diyotların akım-voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) karakteristikleri, Yüksek Lisans Tezi, B.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yozgat, 2013.

Balamurugan, B., and Mehta, B.R., Optical and structural properties of nanocrystalline copper oxide thin films prepared by activated reactive evaporation. *Thin Solid Films*, 396: 90-96, 2001.

Bayansal, F., Katkılı-katkısız bakır oksit ince filmlerin gaz algılama özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2009.

Bayram, H., Al/p-Si (100) Schottky engelli diyotların I-V ölçümleri, Yüksek Lisans Tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.

Braun, K.F., *Ann. Pphys. Chhem.* 153. 556, 1974.

Bethe, H.A., Theory of Boundary Layer of Crystal Rectifiers, p.12-43, Mass.Inst. Technol.Radiat.Lab.Rep, 1942.

Bethe, H.A., Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers. Mass. Ins. Techno. Radia Lab Reba. (1942) 43-12 s, 1981.

Card, H.C., and Rhoderick, E.H., “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes”, *J.Phys.D: Appl. Phys.*, 4: 1589-1601, 1971.

Card, H.C., and Rhoderick, E.H., The Effect on Interfacial Layer on Minority Carrier Injection in Forward Biased Silicon Schottky Diodes. *Solid-State Electron*, 16: 365-374, 1973.

Chandra, M.M., Parsad, M.J., Simple Interface Layer Model For The Nonideal Characteristics of The Schottky Diodes.*Phy D.App Phys.*, 19(1): 89-93, 1986.

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

Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., Frequency Dependence of Forward Capacitance Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes. *Solid-State Electron*, 36(4): 605, 1993.

Cheung, S.K., Cheung, N.W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", *Appl. Phys. Lett.*, 49(2): 85-91, 1986.

Crowell, C.R. and Sze, S.M., "Current Transport in Metal Semiconductor Barriers," *Solid State Electron.*, 9: 1035, 1966.

Çakır, M., CuO-Au film sisteminin optik özelliklerinin elipsometrik ve spektrofotometrik yöntemlerle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 1990.

Çam, E., D.C. magnetron sputtering yöntemiyle bakır oksit filmlerin büyütülmesi, Yüksek Lisans Tezi, A.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.

Çetinkara, H.A., Doğal oksitli yarıiletkenlerden yapılan Schottky diyotların farklı metotlarla incelenmesi ve karakteristik parametrelerini belirlenmesi. Doktora Tezi. K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2002.

Çetinkaya, S., Al/ZnO/p-Si ve Au/CuO/p-Si Schottky yapıların farklı metotlarla elde edilmesi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, M.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 2011.

Daw, K., and Chattopadhyay, P., Control of Barrier Height of MIS Tunnel Diodes Using Deep Level Impurities. *Solid-State Electron*, 34(2): 367-371, 1991.

Demirci, Y., Döndürerek kaplama yöntemi ile CuO yarıiletken filmlerinin elde edilmesi, optik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, A. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2012.

Deneuille, A., Chakraverty, B.K., In *Proceedings of the Symposium on Electronics Technology*, Vol. 2, 1972.

Dökme, İ., Al/p-Si ve Au/n-Si Schottky diyotlarda I-V ve C-V karakteristiklerinin geniş bir sıcaklık aralığında analizi, Doktora tezi, G.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2002.

Engin, M., CuO:Zn filmlerinin ultrasonik püskürtme tekniği ile ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, E.O.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.

Erdoğan, İ.Y., Güllü, Ö., Optical and structural properties of CuO nanofilm: Its diode application. *Journal of Alloys and Compounds* 492: 378-383, 2010.

Evans, H.L., Wu, X., Yang, E.S., Hoi, P.K., Electronic States at Slicide Silicon interfaces. *Phys. Rev Lett*, 56(2):177-180, 1985.

Grondahl, L.O., *Phys. Rev.* 27: 813, 1926.

Gupta, R.K., Ghosh K., Kahol P.K., Effect of temperature on current-voltage characteristics of Cu<sub>2</sub>O/p-Si Schottky diode. *Physica E*, 41: 876-878, 2009.

Gürakar, S., Antimon katkılı kalay oksit/bakır oksit/metal diyotların elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, A.Ü Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.

Horzum, Şeyda., Kimyasal olarak kaplanmış Cu<sub>2</sub>O ince filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, A.Ü Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.

Kambur, H., Doğal yalıtkan tabakalı Al/p-Si schottky diyotlarda elektriksel karakteristiklerin frekansa bağlı incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005.

Kenanoğlu, E., Schottky diyotlar ve bazı elektriksel parametrelerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2006.

Kılıçoğlu, T., Akkılıç, K., Ocak, Y.S., İlhan, S., Temel, H., Calculation of current-voltage characteristics of a Cu (II) complex/n-Si/AuSb Schottky diode. *Current Applied Physics* 10: 337-341, 2010.

Menşur, E., Sol-gel yöntemi ile CuO ince filmlerinin elde edilmesi ve mikroyapısal ve optik karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2002.

Mott, N.F., Note on the Contact between a Metal and an Insulator or Semiconductor, *Proc. Camb: Philos. Soc.* 3: 4- 568, 1938.

Nathan, M., Shoshani, Z., Ashklazi G., Meyler, B., and Zolotarevskf, O., On the temperature dependence of the barrier height and the ideality factor in high voltage Ni/n-GaAs Schottky diodes. *Solid-State Electron.* 39(10): 1457-1462, 1996.

Norde, H., "A modified forward I-V plot for schottky diodes with high series resistance", *J. Appl. Phys.*, 50: 5052-5056, 1979.

Ocak, Y.S., Al/metil kırmızısı/p-Si Schottky diyotların elektriksel karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2006.

Ocak, Y.S., Kulakci, M., Kılıçoğlu, T., Turan, R., Akkılıç, K., Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of a Sn/MethyleneBlue/p-Si Schottky diode", *Synthetic Metals* 159: 1603-1607, 2009.

Oral, D.D., Silisyum tabanlı organik-inorganik diyotların elektriksel karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2012.

Oral, A.Y., Menşur E., Aslan M.H., Başaran E., The preparation of copper(II) oxide thin films and the study of their microstructures and optical properties. *Materials Chemistry and Physics*, 83: 140-144, 2004.

Özen, B., Bakır oksitli bileşiklerin süper iletkenlik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Y.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 2010.

Özyurt Kuş, F., Bakır oksit/çinko oksit heteroeklem yapıların elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, A.Ü Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.

Pickard, G.W., US patent no. 836531, 1906.

Pierce, G.W., Understanding Metal and Semiconductor Structures, Phys. Rev. 25-31, 1907.

Rideout, V.L., A review of the theory, technology and applications of metalsemiconductor rectifiers Thin Solid Films, 48(3): 261-291, 1978.

Sheppard, L.M., Advances in Processing of Ferroelectric Thin Films. Ceram Bull, 71(1), 85, 1992.

Schottky, W., Störmer, R., and Waibel, F.Z., Hochfrequenztech. 37-162, 1931.

Sze, S.M., Crowel, C.R., Khang, D., Electron-optical-phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal-semiconductor structures J. Apple. Phys, 8(12): 979-990, 1964.

Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices. John-Wiley & Sons Inc., New York, 1981.

Tarcan, E., PMMA kaplı CuO seçici ve koruyucu yüzeylerin termo-optik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 1997.

Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Characterization of Current –Voltage (I-V) and capacitance voltage-frequency (C-V-f) features of Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes. 83(3): 582-588, 2006.

Tataroğlu, A., Altındal, S., Bülbül, M., Nucl Instrum Method Phys Res 568: 863-868, 2006.

Türüt, A., ve Sağlam, M., “Determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them” , Physica B, 179: 285-294, 1992.

Türüt, A., Batı, B., Kökçe, A., Sağlam, M., and Yalçın, N., The Bias-Dependence Charge of Barrier Height of Schottky Diodes under Forward Bias by including the series Resistance Effect. Phys. Scripta. 53: 118-122, 1996.

Varma, R.R., Mckinley, A., Williams, R.H. and Higginbotham, I.G., Interface State and The Nature of Metal-Silicon Contacts. J. Phys. D: Appl. Phys., 10: 171-174, 1977.

Wilson, A.H., The Theory of Electronic Semiconductors, Proc. R. SOC. Lond. Ser: A, 133-458, 1931.

Wilson, A.N., Stress and Stability in Coal Ribside and Pillars. Yay. No:831145. West Wirigina Üniv. Wirigina, 1983.

Wu, X., Yang, H.L., Interface Capacitance in Metal Semiconductor Junctions. J. Apple. Phys. 65(1): 3560-3565, 1989.

Yakuphanoglu, F., Determination of electronic properties of Al/p-Si/composite organic semiconductor (MIOS) junction barrier by current-voltage and capacitance-voltage methods. Synthetic Metals 158: 108-112, 2008.

Yıldırım, N., Bakır oksit/titanyum dioksit heteroeklem yapıların elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, A.Ü Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.

Yılmaz, A., Kalın bir taşıyıcı üzerindeki soğurucu ince filmlerin optik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 1992.

Zhanga, D.K., Liua, Y.C., Liu, Y.L., Yang, H., The electrical properties and the interfaces of Cu<sub>2</sub>O/ZnO/ITO p-i-n heterojunction. Physica B, 351: 178-183, 2004.

Zhang Junying, Chunshi Li at all., Cu<sub>2</sub>O thin Films deposited by reactive direct current magnetron sputtering. Thin Solid Films 517: 5700-5704, 2009.

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

## **ÖZGEÇMİŞ**

1977 de Mardin Derik'te doğdu. İlkokulu Derik'te ve ortaokul öğrenimini Mazıdağ'da bitirdikten sonra 1995'te Diyarbakır Namık Kemal Lisesini bitirdi. 1997 de Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği bölümünü kazandı 2002 de mezun oldu. 2012 de Batman Üniversitesi-Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.