

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**OKSİJEN BASINCININ D.C. MAGNETRON SPUTTERING TEKNİĞİYLE
BÜYÜTÜLEN CuO FİMLERİN OPTİKSEL VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Hakan OT

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2015**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Hakan OT tarafından hazırlanan “**Oksijen Basıncının D.C. Magnetron Sputtering Tekniğiyle Büyütölen CuO Filmlerin Optiksel ve Elektriksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi**” adlı tez çalışması 27/01/2015 tarihinde aşğıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Necmi SERİN
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. İlker DİNÇER
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Necmi SERİN
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

27/01/2015

Hakan OT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OKSİJEN BASINCININ D.C. MAGNETRON SPUTTERING TEKNİĞİYLE BÜYÜTÜLEN CuO FİMLERİN OPTİKSEL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Hakan OT

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmi SERİN

Bu çalışmada; cam alt tabakalar üzerinde, yarıiletken fiziği araştırma laboratuvarında bulunan ve ev yapımı olan D.C. Manyetik Saçtırma cihazı kullanılarak, manyetik saçtırma tekniğiyle, dört saat saçtırma süresinde, 150 °C alt tabaka sıcaklığında, CuO ince filmleri büyütülmüş ve bu filmlerin elektriksel ve optiksel özellikleri incelenmiştir.

Oksijen basıncı, D.C. Manyetik saçtırma cihazında doğrudan ölçülemediğinden, oksijen basıncı etkisi akış hızı ile açıklanmıştır. Bakır (II) oksit ince filmlerin büyütülme işlemi; 0, 20, 35, 50, 70, 105 ve 140 sccm (dakika başına akan standart santimetreküp) miktarlarındaki oksijen gazı akış hızlarında gerçekleşmiştir.

Bakır (II) oksit filmler için elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla değişimi ölçülerek, CuO filmlerin aktivasyon enerjileri; düşük sıcaklık bölgesinde (100K-300K) 0.043-0.078 eV aralığında, yüksek sıcaklık bölgesinde (300K-400K) 0.145-0.202 eV aralığında bulunmuştur. Filmlerin elektriksel iletkenlik mekanizmaları; düşük sıcaklık bölgesinde (100K-300K) değişebilir aralıklı Mott hoplama modeliyle açıklanmıştır ve Mott parametreleri belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık bölgesinde (300K-400K) elektriksel iletkenlik mekanizması ise termiyonik emisyon modeliyle açıklanmıştır. Optiksel ölçümler sonrasında CuO filmlerin indirek bant aralığı hesabına göre optiksel enerji aralığı 0.85-1.8 eV, direk bant aralığı hesabına göre ise 2.04-2.27 eV aralığında bulunmuştur.

Ocak 2015, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bakır oksit, oksijen, saçtırma, D.C. Manyetik Saçtırma, ince film, büyütme, akış hızı

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF THE OXYGEN PRESSURE ON THE OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF CuO FILMS GROWN BY D.C. MAGNETRON SPUTTERING TECHNIQUE

Hakan OT

Ankara University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Necmi SERİN

In this study, it was grown CuO thin films on glass substrates at 150 °C along four hours with magnetron sputtering technique in semiconductor physics research laboratory, used home-made D.C. Magnetron sputtering device and it was studied electrical and optical properties of this films.

Oxygen pressure couldn't be measured directly at D.C. Magnetron Sputtering device, so oxygen pressure effect on films were explained with flow rate. CuO thin film deposition processes were performed at 0, 20, 35, 50, 70, 105, 140 sccm (standart cubic centimeters per minute) flow rate.

The activation energy of the CuO films were found from the electrical conductivity-temperature measurements as in the range of 0.043-0.078 eV at low temperature (100K-300K), 0.145-0.202 eV at high temperature (300K-400K). The electrical conductivity mechanism of films were explained by means of Mott VRH model at low temperature (100K-300K) and appointed Mott parameters. The electrical conductivity mechanism of films were explained by means of termionic emission model at high temperature (300K-400K). Energy band gap of CuO films were determined as in the range of 0.85-1.8 eV at indirect energy band gap, as in the range of 2.04-2.27 eV at direct energy band gap.

January 2015, 62 pages

Key Words: Copper Oxide, sputtering, oxygen, D.C. Magnetron Sputtering, thin film, growth, flow rate

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı yönlendiren, tezimin deney ve araştırma evrelerinde; bilgilerini, yardımlarını ve önerilerini esirgemeyerek gelişmeye katkıda bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Necmi SERİN'e (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü) çok teşekkür ederim. Çalışmam boyunca özellikle deneysel hesaplamalarda bana yardımcı olan, bilgilerini ve önerilerini esirgemeyen sayın Prof. Dr. S. Tülay SERİN (Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü) hocama sonsuz teşekkür ederim. Şirin UZUN ÇAM arkadaşına deneysel hesaplamalar ve ölçümler konusundaki yardımlarından dolayı, Emrah ÇAM arkadaşına da D.C. Magnetron Sputtering cihazının kullanımı hakkında verdiği bilgilerden dolayı, Arş. Gör. Sibel GÜRAKAR'a da bilgi ve birikimlerini paylaşımından dolayı teşekkür ederim.

Annem Fatma OT'a, babam Kaplan OT'a, kardeşim Erhan OT'a, ablam Handan AKSU'ya, ablamın oğlu yeğenim Baran Ahmet AKSU'ya, kardeşimin yeni doğan kızı yeğenim Meyra OT'a, annesi Seda GÖKÇE OT'a, hayatımda oldukları, beni daima destekledikleri ve mutlu ettikleri için çok teşekkür ederim.

Hakan OT
Ankara, Ocak 2015

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1 Yarıiletkenler ve Genel Özellikleri.....	3
2.2 Yarıiletkenlerde Bant Yapısı.....	3
2.3 Katkısız Yarıiletkenler.....	4
2.4 Katkılı Yarıiletkenler.....	4
2.4.1 p-tipi yarıiletkenler.....	5
2.4.2 n-tipi yarıiletkenler.....	5
2.5 Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik.....	6
2.5.1 Termiyonik emisyon modeli.....	10
2.5.2 En yakın komşuya hoplama (NNH) modeli.....	12
2.5.3 Değişebilir aralıklı hoplama (VRH).....	12
2.5.4 Yarıiletkenlerde aktivasyon enerjisi.....	14
2.6 Yarıiletkenlerde Optiksel Özellikler.....	14
2.6.1 Yarıiletkenlerde soğurma olayları.....	15
2.6.2 Temel soğurma olayı.....	15
2.6.2.1 Direk bant geçişi.....	17
2.6.2.2 İndirek bant geçişi.....	19
2.7 Saçtırma (Sputtering) Yöntemi.....	21
2.7.1 Doğru akım (D.C.) diyot saçtırma yöntemi.....	22
2.7.2 Radyo frekansı (RF) saçtırma yöntemi.....	23
2.7.3 Triyot saçtırma yöntemi.....	24
2.7.4 İyon ışınli saçtırma.....	25
2.7.5 Manyetik alanda saçtırma yöntemi.....	25
2.8 Bakır (II) Oksit (CuO) ve Özellikleri.....	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM	28
3.1 Alt Tabakaların Temizlenmesi.....	28
3.2 CuO Filmlerin Kaplanması.....	28
3.3 Elektriksel Ölçümler İçin Numunelerin Hazırlanması.....	29
3.4 Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	30
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	33
4.1 CuO İnce Filmlerin Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi.....	33
4.2 CuO İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi.....	40
5. SONUÇ	54
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	62

SİMGELER DİZİNİ

A	Kesit alanı
cm	Santimetre
Cu	Bakır
CuO	Bakır (II) oksit
c	Işık hızı
d	Filmin kalınlığı
e	Elektron yükü
E	Elektrik alan
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_B	Engel yüksekliği
E_C	İletkenlik bandı seviyesi
E_F	Fermi enerjisi seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_i	İlk enerji durumu
E_p	Fonon enerjisi
E_V	Değerlik bandı seviyesi
eV	Elektron volt
F	Kuvvet
g	Gram
h	Planck sabiti
Hz	Hertz
I	Akım
J	Akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
K	Kelvin
l	Film uzunluğu
L	Grain (tanecik) büyüklüğü
m^*	Etkin kütle
M	Mega
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
mbar	Milibar
N_d	Verici (donör) yoğunluğu
$N(E_F)$	Fermi seviyesinde lokalize durum yoğunluğu
nm	Nanometre
Pa	Pascal
R	Direnç
t	Zaman
T	Sıcaklık
T_0	Karakteristik Mott sıcaklığı
v	Hız
v_s	Sürüklenme hızı
v_0	İlk hız
V	Gerilim

w	Filmin genişliği
Å	Angstrom
°C	Santigrad derece
μ	Mobilite
ρ	Öz direnç
σ	Öz iletkenlik
σ ₀ '	Sıcaklıktan bağımsız üstel faktör
α	Soğurma katsayısı
Ω	Ohm
%	Yüzde
χ	Elektron ilgisi

Kısaltmalar

a.c	Alternatif akım
D.C.	Doğru akım
M.Ö.	Milattan önce
NNH	En yakın komşular arası sıçrama
R.F.	Radyo frekansı
scem	Dakika başına akan standart santimetre küp miktarı
UV-VIS	Ultraviyole-görünür spektroskopisi
VRH	Değişebilir aralıklı sıçrama

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Metal, yalıtkan ve yarıiletken enerji bant diyagramları	4
Şekil 2.2 p-tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu	5
Şekil 2.3 n-tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu	6
Şekil 2.4 n-tipi yarıiletken için akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi	10
Şekil 2.5 Kristal filmin yapısı	11
Şekil 2.6 Üst ve alt bantlardaki enerji durumları	16
Şekil 2.7 Bir yarıiletkende temel soğurma spektrumu	17
Şekil 2.8 Parabolik bir bant yapısında doğrudan geçiş	18
Şekil 2.9 Bir yarıiletkende indirek bant geçişi	19
Şekil 2.10 Saçtırma işlemi	21
Şekil 2.11 D.C. boşalması	22
Şekil 2.12 Doğru Akım (D.C.) saçtırma yöntemi	23
Şekil 2.13 RF saçtırma sisteminin şematik gösterimi	23
Şekil 2.14 Triyot saçtırma sistemi.....	24
Şekil 2.15 İyon ışınli saçtırma sistemi	25
Şekil 2.16 Manyetik saçtırma.....	26
Şekil 2.17 CuO bileşiğinin: a. birim hücresi, b. kristal yapısı	27
Şekil 3.1 Camların ultrasonik banyoda yıkanması.....	28
Şekil 3.2 İki nokta yöntemiyle elektriksel ölçüm için hazırlanan numune	30
Şekil 3.3 Ev yapımı D.C. magnetron sputtering cihazı,.....	31
Şekil 3.4 Akım-sıcaklık ölçüm cihazları,.....	32
Şekil 3.5 Schimadzu UV-3600 cihazı	32
Şekil 4.1 Değişik oksijen akış hızlarında hazırlanmış CuO filmlerinin 300-2500 nm dalga boyu aralığında UV-VIS spektrumları	33

Şekil 4.2 Farklı oksijen akış hızında hazırlanan CuO filmlerin direk bant aralığını bulmak için faydalanılan $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği.....	35
Şekil 4.3 Farklı oksijen akış hızında hazırlanan CuO filmlerin indirek bant aralığını bulmak için faydalanılan $(\alpha hv)^{1/2} - hv$ grafiği	36
Şekil 4.4 $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiklerinin en iyi fitleri ve grafiklerin denklemleri	37
Şekil 4.5 $(\alpha hv)^{1/2} - h$ grafiklerinin en iyi fitleri ve grafiklerin denklemleri	38
Şekil 4.6 CuO filmlerin E_g enerji bant değerlerinin oksijen akış hızı ile değişimi.....	39
Şekil 4.7 CuO filmlerin 130K-400K sıcaklık aralığında iletkenlik-sıcaklık grafiği.....	40
Şekil 4.8 CuO filmlerin $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği	41
Şekil 4.9 D2 numunesinin 180K-280K'de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	44
Şekil 4.10 D2 numunesinin 310K-390K'de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği.....	44
Şekil 4.11 H7 numunesinin 150K-290K'de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	45
Şekil 4.12 H7 numunesinin 300K-400K'de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği.....	45
Şekil 4.13 H5 numunesinin 190K-260K'de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	46
Şekil 4.14 H5 numunesinin 300K-400K'de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği.....	46
Şekil 4.15 H6 numunesinin 140K-270K'de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	47
Şekil 4.16 H6 numunesinin 300K-390K'de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği.....	47

Şekil 4.17 D7 numunesinin 140K-250K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş ln $\sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	48
Şekil 4.18 D7 numunesinin 300K-390K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş ln $\sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	48
Şekil 4.19 H4 numunesinin 190K-250K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş ln $\sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	49
Şekil 4.20 H4 numunesinin 300K-350K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş ln $\sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği.....	49
Şekil 4.21 H3 numunesinin 190K-250K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş ln $\sigma T^{1/2} - T^{-1/4}$ grafiği.....	50
Şekil 4.22 H3 numunesinin 300K-360K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş ln $\sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği.....	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Kaplanan filmlerin parametreleri	29
Çizelge 3.2 Elektriksel ölçüm için hazırlanan numunelerin boyutları	30
Çizelge 4.1 CuO filmlerin kalınlıkları	34
Çizelge 4.2 Farklı oksijen akış hızlarında hazırlanmış CuO filmlerin E_g enerji bant değerleri.....	39
Çizelge 4.3 CuO filmlerin en iyi fit sıcaklık aralıkları.....	42
Çizelge 4.4 CuO filmlerin düşük ve yüksek sıcaklık aktivasyon enerjileri	43
Çizelge 4.5 CuO filmlerin akım iletim mekanizmaları	51
Çizelge 4.6 Mott parametreleri; $N(E_F)$, T_0 , T , σ_0'	53
Çizelge 4.7 Mott parametreleri; R , W , αR	53

1. GİRİŞ

İnce film teknolojisi, yeni bir bilim alanı sayılabilir, fakat aynı zamanda en eski sanat dallarından biridir. İnsanların ince filmlerle ilgilenmeleri metal devrine kadar dayanır. Altın kaplamanın en azından dört bin yıldır süregeldiği düşünülürse bu teknolojinin tarihinin ne kadar derin olduğu anlaşılabilir. Günümüzde, birçok bilim adamı, çok kapsamlı nadir nano teknoloji laboratuvarlarında, büyük uğraşlar vererek nano boyutlarda film yapıları elde etmeye çalışıyor. Eski Mısır'da (M.Ö.1567-1320) ise süsleme sanatında görülen 0.3 µm kalınlıkta (insan saçı telinin çapı ortalama 75 µm'dir) kaplamalar elde edilmiştir. Bu da ince film teknolojisi alanında kat edilen mesafenin aslında çok eskilere dayandığının göstergesidir.

Birçok alanda farklı özellikleri araştırılan ince filmler, filmi oluşturan maddelerin doğası gereği ya da kullanılacakları alana göre farklı boyutlarda olabilir. Fakat genel olarak ince filmler; 1µm'den daha küçük boyutlu yapılardır denilebilir. Değişik pek çok materyalden ince film elde etmek mümkündür. Bu çalışmada bakır (II) oksit (CuO) kullanılmıştır.

Bakır (II) oksit (CuO) siyah ve siyahla kahverengi arasında oldukça koyu renklidir. Molekül ağırlığı 79.45 g/mol, yoğunluğu 6.3 g.cm⁻³, bant aralığı 1.3-1.8 eV arasındadır. İndirek bant geçişlidir. CuO p-tipi yarıiletkenidir. Monoklinik kristal yapıya sahiptir. Birim hücreinde 2 atom bulunur. Örgü sabitleri; a = 4.684 Å, b = 4.425 Å, c = 5.129 Å ve β = 99°'dir (Balamurgan ve Metha 2001).

Bakır oksit (CuO) ucuz, zehirli olmayan, kolay yöntemlerle üretilebilen, hetero eklem güneş pillerinde, elektro-kromik devre elemanlarında, oksijen ve nem sensörlerinde kullanılan ve her geçen gün önemi artan bir malzemedir. Ayrıca son yıllarda organik kirlenmenin önlenmesi için önemli bir kullanıma adaydır. Bu nedenle de bakır oksit ince filmler, opto elektronik, güneş pilleri, aygıt fiziği, entegre devre uygulamalarında büyük önem kazanmıştır. Ayrıca süper iletken ince film uygulamalarında ve araştırmalarında önemli bir yer tutmaktadır.

Çeşitli ince film üretim teknikleri vardır. Bunlardan bazıları; sol-jel büyütme, kimyasal banyo, elektron bombardımanı buharlaştırma, lazer buharlaştırma, diyot saçtırma, iyon demeti saçtırma, manyetik saçtırmadır. Bunlar içerisinde D. C. manyetik (magnetron) saçtırma (sputtering) yöntemi kaliteli filmler büyütülmesinde özel öneme sahiptir (Sönmezoğlu vd. 2012).

D.C. manyetik (magnetron) saçtırma (sputtering) yönteminde, iyonlaşmış argon atomlarını hızlandırmak için kullanılan elektrik alana dik doğrultuda bir de manyetik alan uygulanır ve bu alan sayesinde hedef üzerinde iyon konsantrasyonu artırılmış olur. Manyetik alanın etkisi hedeften kopan elektronların yüzey etrafında dolanmasına sebep olur. Dolanan bu elektronlar yüzey üzerinde yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturarak D.C. manyetik saçtırma sürecini başlatır. Bu saçtırma tekniğinin en önemli avantajı, yüksek yoğunluklu saçtırma işlemlerinin bu yoğun plazma ortamının yardımıyla gerçekleştirilebilmesidir.

Bu çalışma dört kısımdan oluşmuştur. İlk kısımda; yarıiletkenlerin genel özellikleri, yarıiletkenlerin bant yapısı, yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliği açıklayan modeller, yarıiletkenlerde aktivasyon enerjisi, yarıiletkenlerin optiksel özelliklerinin yanı sıra saçtırma yöntemleri ve çeşitleri, bakır (II) oksitin yapısal özellikleri gibi konuların kuramsal temellerinden bahsedilmiştir.

İkinci kısımda bu çalışmada uygulanan yöntemler ve çalışmada kullanılan materyallerden bahsedilmiştir. Doğru akım (D.C.) manyetik (magnetron) saçtırma (sputtering) cihazı ile filmlerin büyütülmesi ve büyütülen filmlerin elektriksel ve optiksel ölçümlerinin yapılması ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Üçüncü kısımda ise elektriksel ve optiksel ölçümlerden elde edilen veriler ve bu verilerden yararlanılarak elde edilen grafikler ve çizelgeler gösterilmiştir.

Dördüncü ve son kısımda ise bu çalışmadan elde edilen sonuçlara, bu sonuçların literatürle karşılaştırılmalarına yer verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yarıiletkenler ve Genel Özellikleri

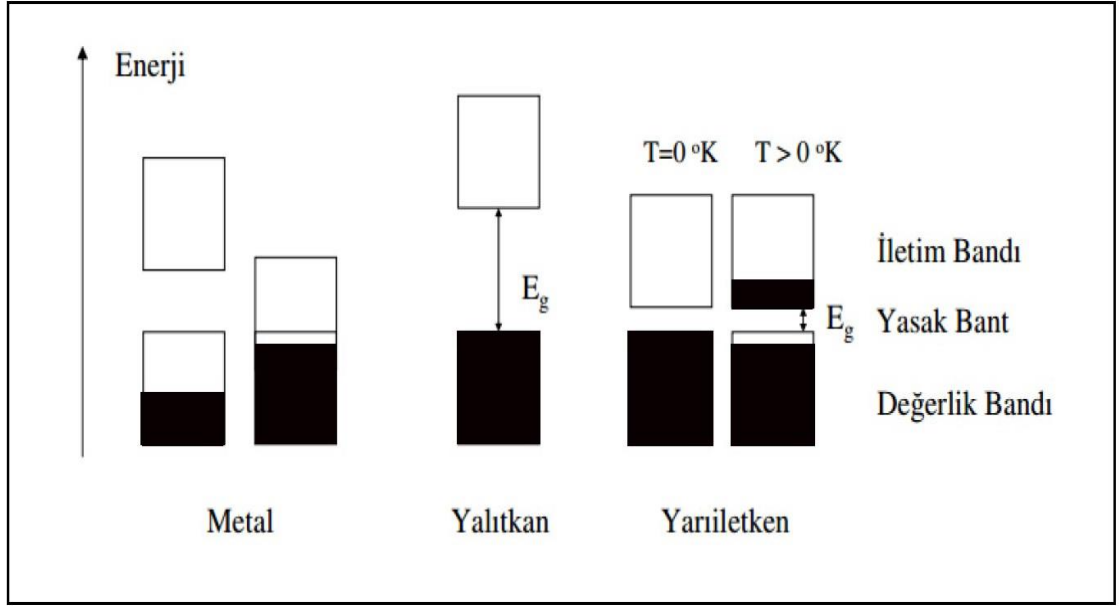
Malzemeler elektrik iletimlerine göre üç grupta incelenir; özdirençleri çok yüksek olan malzemelere ($10^{12}\Omega.cm$) yalıtkan, özdirençleri çok düşük olan malzemelere ($10^{-6}\Omega.cm$) metal ve özdirençleri metal ve yalıtkan arasında olan malzemelere ($10^6 - 10^{-3}\Omega.cm$) yarıiletken denir. Yarıiletkenlerin özdirençleri; sıcaklık, optiksel uyarılma ve içerisine yerleştirilen katkı maddesi ile değiştirilebilir, sıcaklığın yükselmesiyle özdirençlerinin azalması yarıiletkenleri metallere ayıran bir özelliktir.

Safılık derecesi yüksek bir yarıiletkende mutlak sıfır sıcaklığında iletkenlik bandı tamamen boş olup, değerlik bandından E_g (yasak bant) kadar bir enerji ile ayrılmıştır.

Günümüz teknolojisinde merkezi bir rol oynayan yarıiletkenler, diyot, transistör ve tümleşik devreler gibi devre bileşenlerinin yanı sıra anahtar, fotovoltajik pil, detektör, termistör gibi aygıtların yapımında kullanılır.

2.2 Yarıiletkenlerde Bant Yapısı

Kuantum teorisine göre izole edilmiş atomda elektronların enerjisi kesikli olarak değişebilir. Pauli ilkesine göre atomun her enerji düzeyine en çok iki ters yönelmiş spinli elektronlar yerleşebilir. Yarıiletken malzeme oluştuğunda yani atomlar birbirine çok yaklaştığında (yaklaşık 10^{-8} cm), komşu atomların kuvvetli elektrik alan etkisiyle değerlik elektronlarının enerji düzeyi banda ayrılır. Değerlik elektronlarından oluşmuş banda değerlik bandı denir. Atomlardaki değerlik elektronlarının uyarılma düzeylerinden oluşan banda da iletim bandı denir. İletim ve değerlik bantlarının arasında yasak bant bulunur. Yasak bant genişliği, yarıiletkenlerin kimyasal bağ türü ve atomların türü ile belirlenir. Farklı yarıiletkenlerin yasak bant genişliği 0,1 eV'tan 5 eV'a kadar değişebilir (Kittel 2014).



Şekil 2.1 Metal, yalıtkan ve yarıiletken enerji bant diyagramları (Ceylan 2013)

2.3 Katkısız Yarıiletkenler

Mutlak sıfırda yüksek saflıktaki yarıiletkenlerde, iletkenlik bandı boş olup değerlik bandından yasak enerji aralığı ile ayrılmıştır. Yarıiletken bu sıcaklıkta tam bir yalıtkan gibi davranır. Sıcaklık 0 K'den itibaren yükseldiğinde elektronların ısı enerjileri artar ve bu enerji yasak enerji değerine ulaştığında elektronlar değerlik bandından iletim bandına geçer. Bu şekilde yer değiştiren elektronlar geride boşluklar bırakır. Boşluk elektronun yüküyle zıt işaretli fakat aynı değerdedir. Değerlik bandında oluşan bu boşluklar, aynı banttaki başka elektronlar tarafından doldurulur ve yer değiştiren elektronlar yeni boşluklar oluşturur. Böylelikle boşluklar hareket etmiş olur. Elektron ve boşluklar bu şekilde serbest taşıyıcı gibi davranarak elektriksel iletkenliğe katkı sağlarlar.

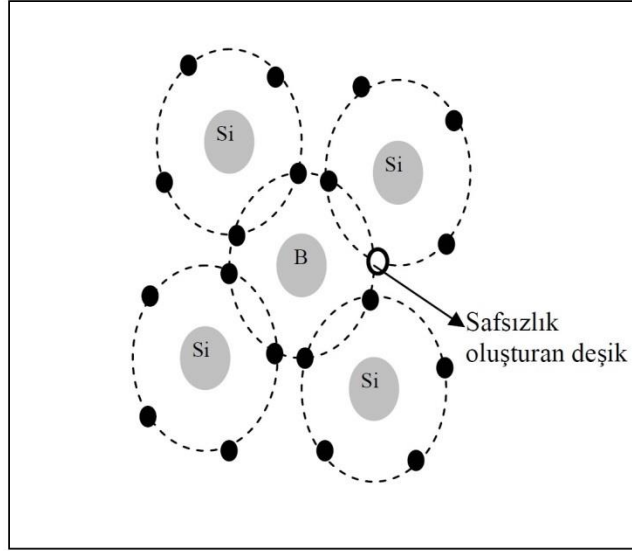
2.4 Katkılı Yarıiletkenler

Bir yarıiletkende yük taşıyıcılarının sayısı uygun safsızlıkların kristal örgüsü içine konulmasıyla artırılabilir. Bu katkılama işlemi kristalin elektron veya deşik açısından baskın olması sağlanabilir. Katkılı yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluklarının

sayısı eşit değildir. Katkılı yarıiletkenler p-tipi ve n-tipi yarıiletken olmak üzere ikiye ayrılırlar.

2.4.1 p-tipi yarıiletkenler

Grup III atomları, örneğin bor (B), kristali oluşturan dört değerlik elektronuna sahip silisyum (Si) atomları ile kovalent bağ yapmak için kristalden bir elektron alır. Kristalden elektron aldığı için bu tür atomlara alıcı (acceptor) atomlar denir. Her alıcı atom kristalden bir elektron aldığı için kristalde (+) yüklü boşlukların yoğunluğu artmış olur. Bu tür katkılanmış yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken denir ve bu yarıiletkenlerde iletim boşlukları olur (Kittel 2014).

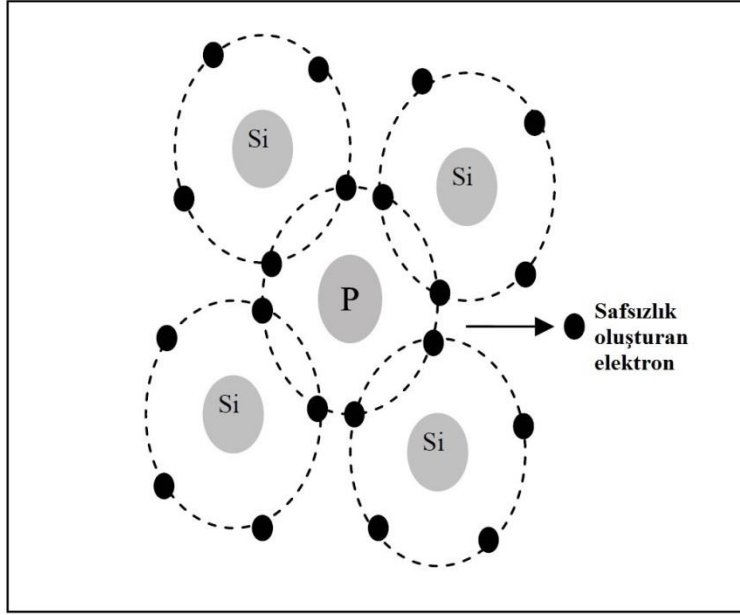


Şekil 2.2 p-tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu (Hasançebi 2006)

2.4.2 n-tipi yarıiletkenler

Katkısız silisyum (Si) kristali içerisine fosfor (P) gibi V. grup elementi kristalin içerisine katkılanırsa, kristal örgüsü bu durumdan etkilenir. V. Grup atomu beş değerlik elektronundan dördünü kovalent bağda kullanır, beşinci elektron ise zayıf bağlı olduğu için kolayca iyonlaşır. Dolayısıyla bu elektron kristal içerisinde serbestçe dolaşır.

Böylece silisyum kristali içerisinde elektron eksikliği olmaksızın her katkı atomu için bir serbest elektron ortaya çıkar. Kristal içerisinde (-) yük yoğunluğu fazladır ve bu tip katkılanmış yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken denir. Her katkı atomu kristale bir elektron verdiği için katkı atomlarına verici (donör) atomları denir (Kittel 2014).



Şekil 2.3 n-tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu (Hasançebi 2006)

2.5 Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik

Bir katının iki ucu arasına gerilim uygulandığı zaman katı içerisindeki serbest yük taşıyıcıları elektriksel alana zıt yönde belli bir hızda hareket etmeye başlarlar. Hareket halindeki taşıyıcılar örgü atomları ya da yapı kusurları ile çarpışarak hareket yönlerini değiştirebilirler.

Bir \vec{E} elektrik alanı uygulandığında üzerine $-q\vec{E}$ kuvveti etki eden yük taşıyıcısının hareket denklemi,

$$m^* \frac{d\vec{v}}{dt} = -q\vec{E} \quad (2.1)$$

şeklindedir. Bu diferansiyel denklem çözüldüğünde,

$$\vec{v} = \frac{q}{m^*} \vec{E}t + \vec{v}_0 \quad (2.2)$$

denklemini elde edilir. Burada \vec{v}_0 parçacığın ilk hızıdır ve sıfır olarak kabul edilebilir. Parçacığın $t = 2\tau$ süre sonra bir çarpışma yaptığı varsayılırsa, denklem 2.2,

$$\vec{v} = \frac{q}{m^*} \vec{E}2\tau \quad (2.3)$$

ifadesine dönüşür. İlk ve son hızın toplamının yarısı olarak tanımlanan ortalama hız, denklem 2.4 ile verilir ve ortalama hız, parçacıkların sürüklenme hızıdır.

$$\vec{v}_s = \frac{q}{m^*} \vec{E}\tau \quad (2.4)$$

Belirli bir geometriye sahip malzemenin direnci,

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.5)$$

denkleminde verilir. Burada ρ öz direnç, l malzemenin uzunluğu, A malzemenin kesit alanıdır. Denklem 2.5, Ohm yasasında yerine konulursa,

$$\frac{V}{l} = \rho \frac{I}{A} \quad (2.6)$$

denklemini elde edilir. Eşitliğin sol tarafı elektrik alanını, sağ tarafın kesirli kısmı ise akım yoğunluğunu gösterir ve bu eşitlik,

$$\vec{E} = \vec{J}\rho \quad (2.7)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Öz direncin tersi iletkenliktir ve denklem 2.7 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\vec{J} = \vec{E}\sigma \quad (2.8)$$

\vec{J} , akım yoğunluğudur ve aynı zamanda,

$$\vec{J} = Nq\vec{v}_s \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. Sürüklenme hızı ifadesi bu denklemde yerine konulursa,

$$\vec{J} = \frac{Nq^2\vec{E}\tau}{m^*} \quad (2.10)$$

denklemini bulunur. Burada bulunan ifade denklem 2.8'de yerine konulursa,

$$\sigma = \frac{Nq^2\tau}{m^*} \quad (2.11)$$

denklemini elde edilir. Buradaki $q\tau/m^*$ ifadesine mobilite denir ve μ simgesiyle gösterilir.

Dolayısıyla iletkenlik,

$$\sigma = Nq\mu \quad (2.12)$$

şeklindedir (Neamen 2003).

Kristal yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik mobilite ile ilişkilidir. Mobilite yarıiletkenin cinsine, saflığına ve sıcaklığa bağlıdır.

Yarıiletken ince filmlerde üç önemli saçılma mekanizması vardır ve bu saçılma mekanizmaları mobilitayı etkilemektedir. Örgü saçılması atomların termal hareketleriyle ilgilidir ve sıcaklığa bağımlılığı,

$$\mu \propto T^{-3/2} \quad (2.13)$$

şeklindedir. Burada μ mobilitedir. Sıcaklık düştükçe örgü titreşimleri azalacak ve mobilite de artacaktır. Diğer bir saçılma mekanizması ise iyonize safsızlık saçılmasıdır. İyonize safsızlık saçılmasının sıcaklığa bağımlılığı ise,

$$\mu \propto T^{3/2} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Bir de grain sınırı saçılması vardır ve sıcaklıkla bağımlılığı,

$$\mu_G = \mu_0 T^{-1/2} \exp\left(\frac{-\phi_B}{kT}\right) \quad (2.15)$$

şeklindedir. Burada μ_0 üstel faktör sabiti, k Boltzmann sabiti ve ϕ_B grain sınırı bariyerinin yüksekliğidir (Natsume ve Sakata 2002).

Bu çalışmada elektriksel iletkenlik için üç akım iletim mekanizması modeli incelenmiştir. Bunlar; termiyonik emisyon modeli, yakın komşuya hoplama modeli (NNH) ve değişebilir aralıklı hoplama modeli olan VRH'dir.

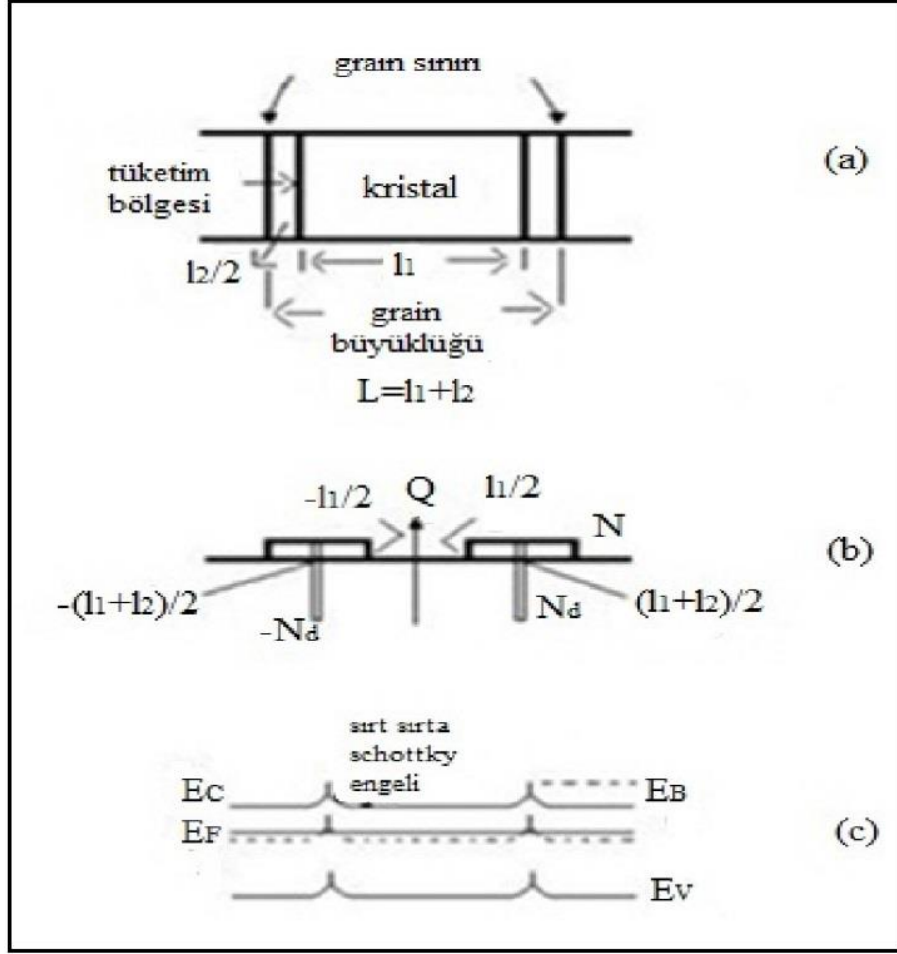


Şekil 2.4 n-tipi yarıiletken için akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi,

1 numarada elektronun termal aktiviteyle iletim bandına geçişi (Termiyonik emisyon), 2 numara da elektronun safsızlık bandında yakınındaki komşuya hoptaması (NNH), 3 numara da ise elektronun safsızlık bandında değişebilir aralıklı hoptaması (VRH) gösterilmiştir

2.5.1 Termiyonik emisyon modeli

Şekil 2.5'te kristal bir filmin yapısı verilmiştir. Şekil 2.5.a filmin kristal yapısını, şekil 2.5.b grain ve grain sınırı içerisindeki yük dağılımını, şekil 2.5.c ise enerji bant diyagramını gösterir.



Şekil 2.5 Kristal filmin yapısı (Uzun 2012)

Şekil 2.5'te, E_F ; Fermi enerji düzeyini, E_B ; engel yüksekliğini, l_1 ; kristalin boyunu, $l_2/2$; tüketim bölgesinin genişliğini, N_d ; verici yoğunluğunu, N ; grain sınırındaki boşluğun durum yoğunluğunu gösterir.

Şekil 2.5.c'de, E_B engel yüksekliğini geçmek için yeterli enerjiye sahip olan elektronlar engelin üzerinden atlayarak diğer moleküle geçer ve bu şekilde elektriksel iletkenliğin sağlandığını açıklayan model, termiyonik emisyon modelidir (Sze ve Ng 2007).

Bu modelde elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_{th} = \left(\frac{Lq^2n}{\sqrt{2m^*kT}} \right) \exp\left(\frac{-E_B}{kT} \right) \quad (2.16)$$

ile ifade edilir (Kojima vd. 1988). Burada E_B ; engel enerjisini, L ; grain büyüklüğünü, q ; elektron yükünü, m^* ; etkin kütle temsil eder.

Eğer yarı iletken yüksek sıcaklıkta ya da düşük katkılama bölgesinde ise o zaman elektronlar grain sınırı engeli üzerinden termiyonik emisyonla iletilir. Eğer yarı iletken düşük sıcaklık ya da yüksek katkılama bölgesinde ise o zaman elektronlar grain sınırındaki engel boyunca ısıl alan emisyonuyla iletilir.

2.5.2 En yakın komşuya hoplama (NNH) modeli

Bu modelde bir elektron yeterli enerjiye sahip olmadığında ve bazı sıcaklık değerlerinde, en yakın komşuya aradaki potansiyel engeli aşarak hopladığı ve bu şekilde elektriksel iletkenliğin gerçekleştiği kabul edilir.

N-tipi yarıiletkenlerde, düşük sıcaklıklarda, serbest elektronların çoğu, donörler tarafından yeniden yakalanır ve elektronların enerjisi iletim bandına zıplamaya yetmez. Bu durumda elektriksel iletim mekanizmasına asıl katkı, elektronların safsızlık bandındaki donörlerden, en yakındaki boş duruma hoptanmasından oluşur ve bu modelde elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_{NNH} = \sigma_1 \exp\left(\frac{-\gamma}{a N_d^{1/3}}\right) \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (2.17)$$

şeklindedir (Serin vd. 2010). Burada N_d ; verici yoğunluğudur.

2.5.3 Değişebilir aralıklı hoplama (VRH)

Sıcaklık çok küçük olduğunda, komşu safsızlıklar arasındaki tipiksel öz direnç daha uzaktaki safsızlıkların arasındakinden daha büyük olur. Bu uzak safsızlıkların enerji seviyeleri, Fermi seviyesinde çok yaklaşır ve hoptama mekanizması NNH hoptanmasından VRH hoptanmasına değişir (Yıldız 2008).

Lokalize seviyeler arasındaki bu hoplama, hem seviyeler arasındaki mesafeye hem de seviyeler arasındaki enerji farkına bağlıdır. Bu yüzden bir elektron için, enerjik olarak uygun olduğu zaman daha yakın komşu yerine daha uzak yere, hoplama durumları olabilir. Elektronların hoplama mesafesi değişebileceğinden, hoplama iletkenliğin bu formuna VRH iletkenlik denir (Yıldız 2008).

VRH iletkenliğinde, bir elektron bir lokalize seviyeden dalga fonksiyonlarının üst üste binme olduğu başka bir seviyeye atlar. Öz enerjileri arasındaki fark, fonon yayılmasına karşılık gelir. VRH sürecinde iletkenliğin (σ) sıcaklığa bağlılığının genel formu,

$$\sigma_{VRH} = \sigma_0 \exp \left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^s \right] \quad (2.18)$$

ile verilir. Burada σ_0 , ya sıcaklıktan bağımsızdır ya da sıcaklığa çok az bağımlıdır. T_0 ; karakteristik hoplama sıcaklığıdır, s ; $0 < s < 1$ arasında değer alan bir sabittir. Burada σ_0 ,

$$\sigma_0(T) = \sigma_0 T^{-2s} \quad (2.19)$$

bağıntısıyla verilir ve Fermi seviyesi etrafındaki durum yoğunluğunun sabit olması durumunda, $s=1/4$ 'tür. Bu nedenle bu teoriye Mott'un VRH (Mott-VRH) modeli denir ki buna göre iletkenlik,

$$\sigma_{VRH,Mott} = \sigma_{0,Mott} T^{-1/2} \exp\left(\frac{T_{0,Mott}}{T}\right)^{1/4} \quad (2.20)$$

bağıntısıyla gösterilir (Serin vd. 2010).

Daha düşük sıcaklıklarda ve $s=1/2$ olduğunda Fermi seviyesinde bir boşluğun olduğundan söz edilir ve bunu da göz önünde bulunduran teori de Efros-Shklovskii VRH modeli olarak tanımlanır. Bu modele göre elektriksel iletkenlik ise,

$$\sigma_{VRH,ES} = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp\left(\frac{T_{0,ES}}{T}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

şeklinde ifade edilir (Serin vd. 2010).

2.5.4 Yarıiletkenlerde aktivasyon enerjisi

Aktivasyon enerjisi; n-tipi bir yarı iletkende elektronları verici (donör) seviyesinden iletkenlik bandına uyararak ya da p-tipi bir yarı iletkende deşikleri alıcı (acceptor) seviyesinden değerlik bandına uyararak için gerekli enerjidir.

Elektriksel iletkenlik sıcaklığın fonksiyonu olarak,

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (2.22)$$

şeklinde ifade edilir. Burada E_a ; aktivasyon enerjisi, k ; Boltzmann sabiti, T ; mutlak sıcaklığı ifade eder.

Denklemin logaritması alındığında,

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_a}{kT} \quad (2.23)$$

elde edilir. $\ln \sigma - 1/T$ grafiğinin eğimi $\frac{E_a}{k}$ yı verir.

2.6 Yarıiletkenlerde Optiksel Özellikler

Bir yarı iletken üzerine foton gönderildiğinde, atomların elektronları ile fotonların etkileşmesi sonucu soğurma, geçirgenlik, yansıma, kırılma gibi bazı optik olaylar meydana gelir. Değerlik bandında bulunan elektronlar iletkenlik bandına ısıl olarak

uyarılabilirdi gibi optik yollarla da uyarılabilir. Temel şart gönderilen fotonun enerjisinin en az yarı iletkenin yasak enerjisine eşit olmasıdır.

2.6.1 Yarıiletkenlerde soğurma olayları

Soğurma, elektromanyetik dalga ile malzemedeki yüklerin etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji kaybı olarak bilinir. Kalınlığı x olan bir yarıiletkene gelen ışın şiddeti I_0 ile malzemeyi geçen ışın şiddeti I arasındaki eşitlik,

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2.24)$$

Beer-Lambert bağıntısı ile verilir. Burada α soğurma katsayısıdır ve gelen elektromanyetik dalganın; dalga boyuna, malzemenin yoğunluğuna ve yasak enerji bant aralığına bağlıdır.

2.6.2 Temel soğurma olayı

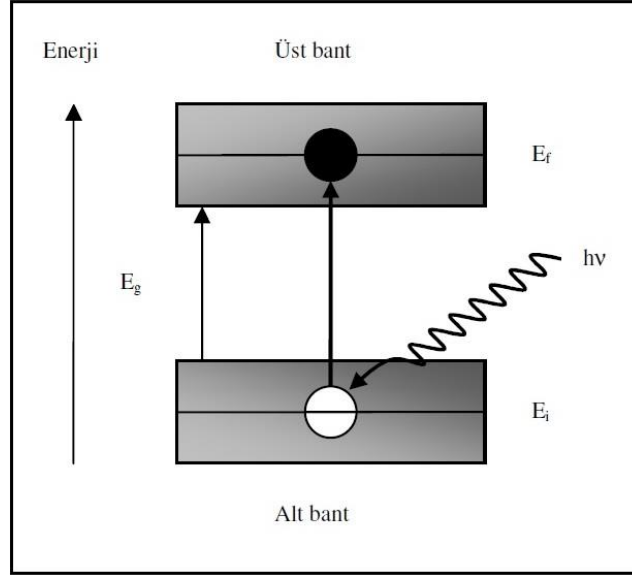
Banttan banda geçişi temsil eden temel soğurma olayı, değerlik bandındaki bir elektronun numuneye gelen ışıktan bir foton soğurarak iletkenlik bandında geçmesi olarak adlandırılabilir (Şekil 2.6). Bunun için fotonun enerjisinin yasak enerji aralığına eşit ya da daha büyük olması gerekir. Gelen fotonun frekansı ν ise, enerjisi $h\nu$ olmak üzere,

$$h\nu \geq E_g \quad (2.25)$$

yazılabilir. E_g yarıiletkenin yasak enerji aralığını, h Planck sabitini temsil eder. Gelen fotonun dalga boyunu λ_g ile gösterir, ışık hızını da c ile ifade edersek,

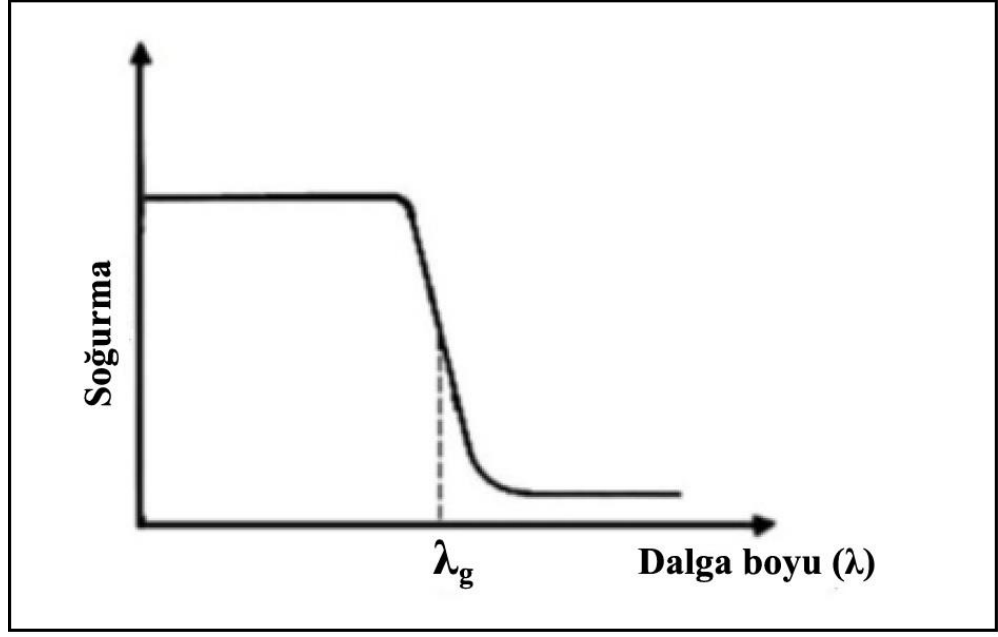
$$\lambda_g \leq hc / E_g \quad (2.26)$$

olmalıdır.



Şekil 2.6 Üst ve alt bantlardaki enerji durumları (Kılınç 2006)

Yüksek dalga boylu ışınlar, yasak enerji aralığını geçmek için yeterli enerjiyi sağlayamayacaklarından yarıiletkenler bu ışınlar için saydamdır. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi λ_g değerinden büyük dalga boylu ışınlarda yani düşük enerjili ışınlarda yarı iletken soğurma yapmamışken, gelen ışının dalga boyu λ_g değerine ulaştığında soğurması keskin bir şekilde artmış ve belli bir değere ulaştıktan sonra sabit kalmıştır. Kısaca, yarı iletken materyal λ_g dalga boyundan küçük dalga boylarında kuvvetli bir soğurucu, büyük dalga boylarında hemen hemen geçirgen özellik gösterir. Bu iki bölgeyi ayıran sınır temel soğurma sınırı olarak adlandırılır.



Şekil 2.7 Bir yarıiletkenin temel soğurma spektrumu (Uzun 2012)

Temel soğurma bölgesinde, direkt ve indirekt bant geçişi olmak üzere iki çeşit bant geçişi gözlenir.

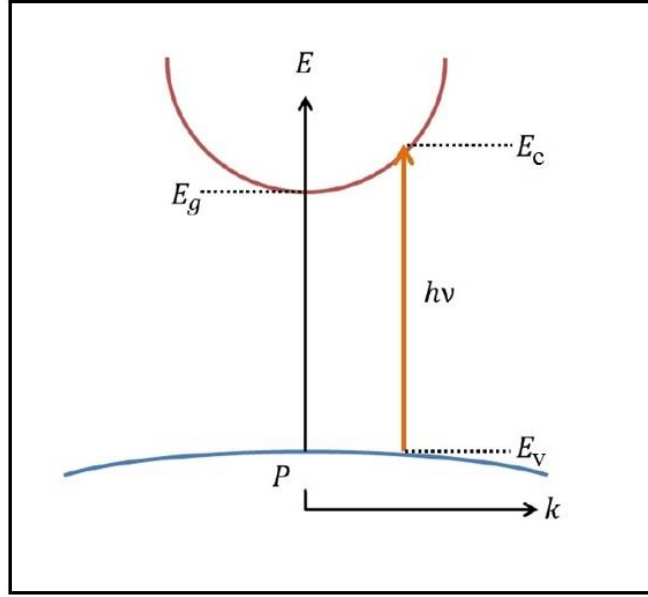
2.6.2.1 Direkt bant geçişi

İletkenlik bandının minimumu ile değerlik bandının maksimumu enerji momentum uzayında aynı k değerinde ise meydana gelecek olan geçiş direkt bant geçişi olarak adlandırılır. ZnS, GaAs, CdS, CdSe, InSb gibi yarı iletken malzemeler direkt bant yapısına sahiptirler.

İki doğrudan enerji çukuru arasında soğurma geçişleri düşünülürse (Şekil 2.8) toplam momentum korunumlu olduğundan dolayı geçişler izinli olmalıdır. E_v 'deki her başlangıç E_c 'deki son durumla birleştirilir ve kısaca,

$$E_c = h\nu - |E_v| \quad (2.27)$$

şeklinde verilir.



Şekil 2.8 Parabolik bir bant yapısında doğrudan geçiş (Koç 2012)

Parabolik bantlarda,

$$E_c - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.28)$$

$$E_v = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (2.29)$$

ile verilir. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesi, m_h^* holün (değişin) etkin kütlesini göstermektedir.

Denklem 2.27-2.28'de bulunan ifadeleri, denklem 2.29'da yerine yazarsak,

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2.(1/m_e^* + 1/m_h^*)} \quad (2.30)$$

bağıntısı elde edilir. Direk geçişlerde eksiton oluşumu veya elektron-hol(deşik) etkileşimi dikkate alınmazsa soğurma kat sayısı α , gelen foton enerjisine,

$$\alpha(h\nu) = A^*(h\nu - E_g)^n \quad (2.31)$$

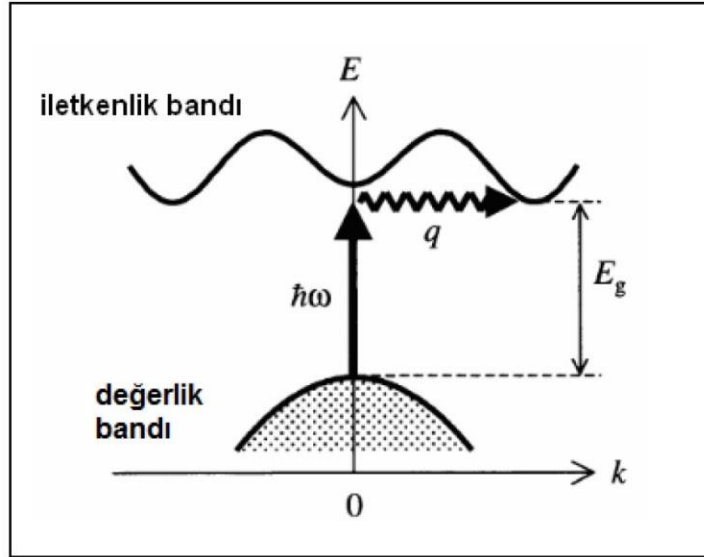
ifadesiyle bağlıdır. Burada A^* sabiti,

$$A^* \approx q^2 \frac{\left(2 \frac{m_h^* m_e^*}{m_h^* + m_e^*}\right)}{nch^2 m_e^*} \quad (2.32)$$

ile ifade edilir. Burada n değeri bir sabittir ve direk geçişler için 1/2, yasaklı direkt geçişler için 3/2 değerini alır (Zhang 2014).

2.6.2.2 İndirek bant geçişi

İndirek bant yapılı yarıiletkenlerde değerlik bandının üst sınırı ile iletkenlik bandının alt sınırı, enerji-momentum uzayında aynı k değerinde olamaz. Bu geçişte değerlik bandındaki bir elektronun iletkenlik bandına geçebilmesi için, bir fononun soğurulması ya da salınması gerekir. İndirek bant geçişinde momentum korunur fakat enerji korunmaz.



Şekil 2.9 Bir yarıiletkeninde indirek bant geçişi (Fox 2001)

İndirek geçişlerde momentum korunumu için bir fononun emisyonu veya soğurulması gereklidir. Bu iki geçiş,

$$h\nu = E_f - E_i + E_p \text{ (Fononun emisyon durumu)} \quad (2.33)$$

$$h\nu = E_f - E_i - E_p \text{ (Fononun soğurulması durumu)} \quad (2.34)$$

ile verilir. Burada E_p fononun enerjisini, E_i ilk durum enerji seviyesini, E_f fermi enerjisini, E_g ise yasak enerji aralığını göstermektedir. Fonon soğurmalı geçiş için katsayı (α_s),

$$\alpha_s(h\nu) = A \frac{(h\nu - E_g + E_p)^n}{\exp\left(\frac{E_p}{kT}\right) - 1} \quad (2.35)$$

ile verilir. Fonon emisyonlu geçiş için soğurma katsayısı $h\nu > (E_g + E_p)$ koşulu için,

$$\alpha_e(h\nu) = A \frac{(h\nu - E_g - E_p)^n}{1 - \exp\left(\frac{-E_p}{kT}\right)} \quad (2.36)$$

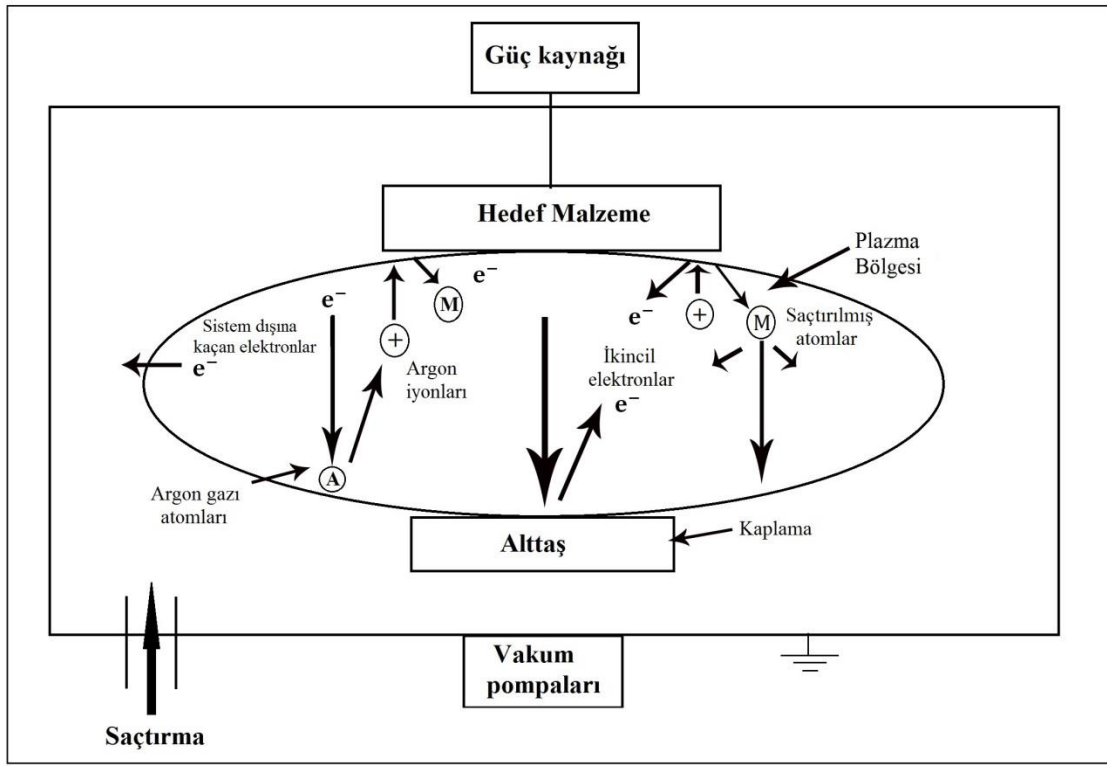
ile verilir. Hem fonon emisyonu hem de fonon soğurması olduğu zaman α ile $h\nu$ arasındaki bağıntı,

$$\alpha h\nu \approx A \frac{(h\nu - E_g + E_p)^n}{\exp\left(\frac{E_p}{kT}\right) - 1} + A \frac{(h\nu - E_g - E_p)^n}{1 - \exp\left(\frac{-E_p}{kT}\right)} \quad (2.37)$$

denklemleri ile gösterilir. Burada n , indirekt bant geçişli bir yarıiletken için 2 (izinli geçiş) veya 3 (yasaklı geçiş) değerlerini alabilen bir sabittir.

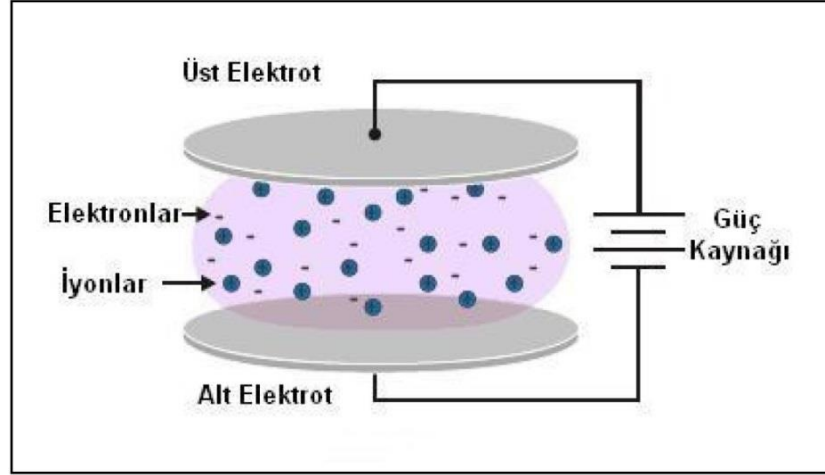
2.7 Saçtırma (Sputtering) Yöntemi

Saçtırma yöntemi, bir hedef malzemenin yüzey atomlarının iyonize olmuş gaz atomları tarafından kaldırılarak, kopartılması ve kopartılan atomların istenilen taban malzeme üzerine taşınarak biriktirilmesidir. Bu sistemin en büyük avantajı düşük sıcaklıkta biriktirme işlemine uygun olmasıdır. Bu işlemle hemen hemen her türlü alttaşa biriktirme işlemi yapılabilir. Şekil 2.10'da hedef malzemedan bir molekülün kopması ve alttaş yüzeyine yerleşmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Saçtırma işlemi

Saçtırma ile kaplama ilk kez 1852 yılında Grove tarafından D.C. (doğru akım) gaz parlama deşarj (glow discharge) tüpünde gözlemlenmiştir. Şekil 2.11'de gösterilen ve anot ve katottan oluşan bir sistem vakuma alındıktan sonra ortama argon gibi bir soy gaz gönderildiğinde iki elektrot arası bir plazma oluşur. Uygun bir gerilimde parlama boşalması oluşur. Bu, plazma olarak tanımlanır (Wasa vd. 2012).

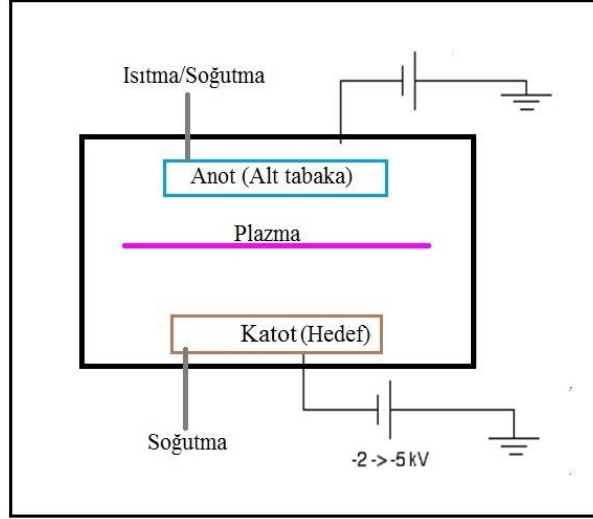


Şekil 2.11 D.C. boşalması (Çam 2012)

Saçtırma yöntemleri farklı şekillerde uygulanmaktadır. Bunlar doğru akım (D.C.) ve radyo frekanslı (RF) saçtırma, triyot saçtırma, iyon ışınli saçtırma ve manyetik alanda saçtırmadır.

2.7.1 Doğru akım (D.C.) diyot saçtırma yöntemi

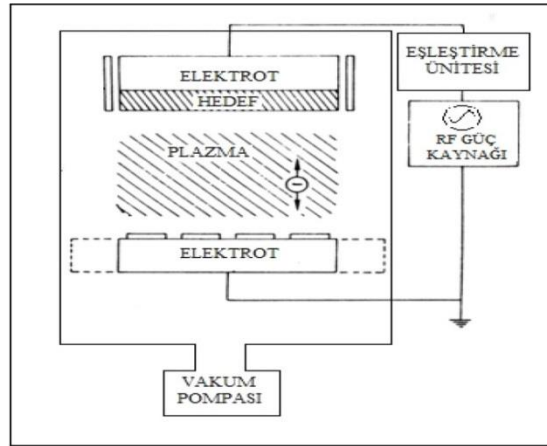
D.C. saçtırma sistemi bir çift düzlemsel elektrottan meydana gelir. Şekil 2.12'deki elektrotların bir tanesi soğuk katot ve diğeri anottur. Hedef malzeme (kaplama malzemesi) katoda yerleştirilir. Kaplanacak malzeme ise anoda yerleştirilir. Katodun arka yüzeyi malzemenin zarar görmemesi için su soğutmalı olarak dizayn edilir. Anot ise kaplanacak malzeme koşullarına göre ısıtmalı olabilir. Saçtırma odacığına (chamber) yeterli miktarda argon gazı verildiğinde ve elektrotlar arasına D.C. gerilimi uygulandığında bir plazma oluşur. Argon iyonları katoda doğru hızlandırılır ve hedef malzemeyi saçtırlar. Bu işlemin sonunda anottaki alt tabaka (substrate) yüzeyine ince film kaplanır (Sarkar 2013).



Şekil 2.12 Doğru Akım (D.C.) saçırma yöntemi (Çam 2012)

2.7.2 Radyo frekansı (RF) saçırma yöntemi

RF saçırma tekniğinde hedef ile alttaş elektrotlar arasında alternatif bir voltaj uygulanır. Elektrotlar akımın frekansına bağlı olarak katot-anot dönüşümüne uğrarlar. Böylece hedefin iyonlar tarafından bombardıman edilmesi yarım periyot aralığında gerçekleştirilirken, diğer yarım periyotta ise herhangi bir yük birikmesi gerçekleşmez. RF saçırma sisteminin frekansı 13.56 MHz'dir. RF saçırma tekniği ile ise yalıtkan malzemenin ince filmlerini oluşturmak mümkündür (Wasa vd. 2012). Tipik RF saçırma sisteminin şekli şematik olarak şekil 2.13'de gösterilmiştir.

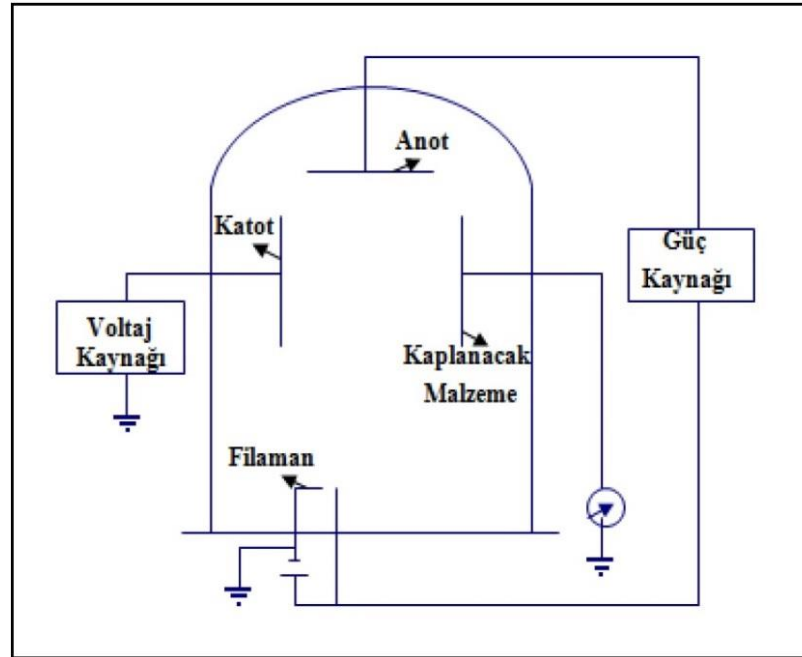


Şekil 2.13 RF saçırma sisteminin şematik gösterimi (Nebi 2013)

2.7.3 Triyot saçtırma yöntemi

Düşük basınçlarda iyonlaşmayı arttırmak ve parlama deşarjını sürdürmek için diyot sistemine ilave olarak ısıtıcı ve pozitif potansiyelli bir elektrot bulunmaktadır. Isıtıcı ve elektrot, gaz iyonizasyon derecesini arttırarak sıçratma verimini yükseltmektedir. Katodun karşısına yerleştirilen birincil anot, plazmanın oluşmasını sağlayan gaz iyonizasyonu potansiyeline yakın bir potansiyele sahiptir. Bu şartlar altında düşük basınç değerlerinde dahi homojen bir plazma elde etme imkanı sunmaktadır.

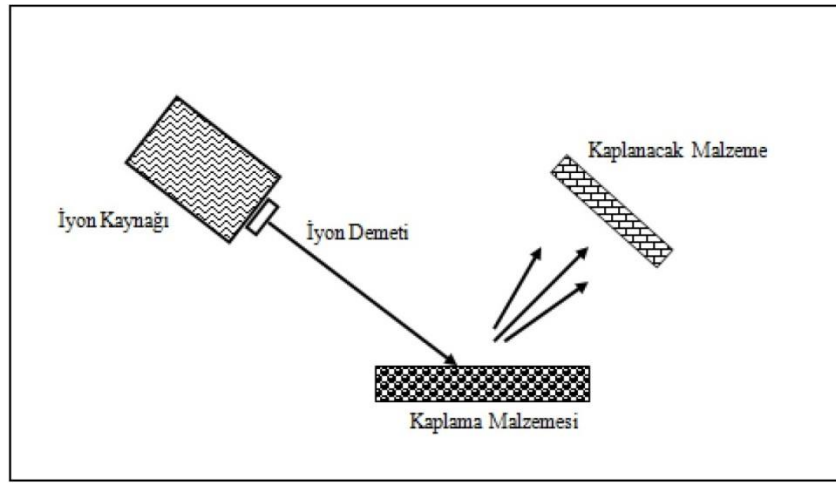
En çok kullanılan triyot sistemi şekil 2.14’de görülen sıcak katot triyot (hot cathode triode) sistemidir. Sıcak katot termioyonik emisyon süresince elektron yaymaktadır ve bu elektronlar parlama deşarjı sisteminin içine atılmaktadır. Bu durumda iyonizasyon etkinliği artmaktadır. Böylece parlama deşarjı daha düşük basınçlarda ($6.6 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ Pa / $5 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ torr) ve daha düşük voltaj (50-100V) uygulanarak oluşmaktadır. Bu nedenle triyot saçtırma ile biriktirme hızı (bir kaç yüz nm/dak) diyot saçtırma ile biriktirme hızına göre daha yüksektir. Triyot saçtırma yönteminin temel dezavantajı reaktif gaz varlığında filamanların ömrünün kısılmasıdır.



Şekil 2.14 Triyot saçtırma sistemi (Sönmezoğlu vd. 2012)

2.7.4 İyon ışınli saçtırma

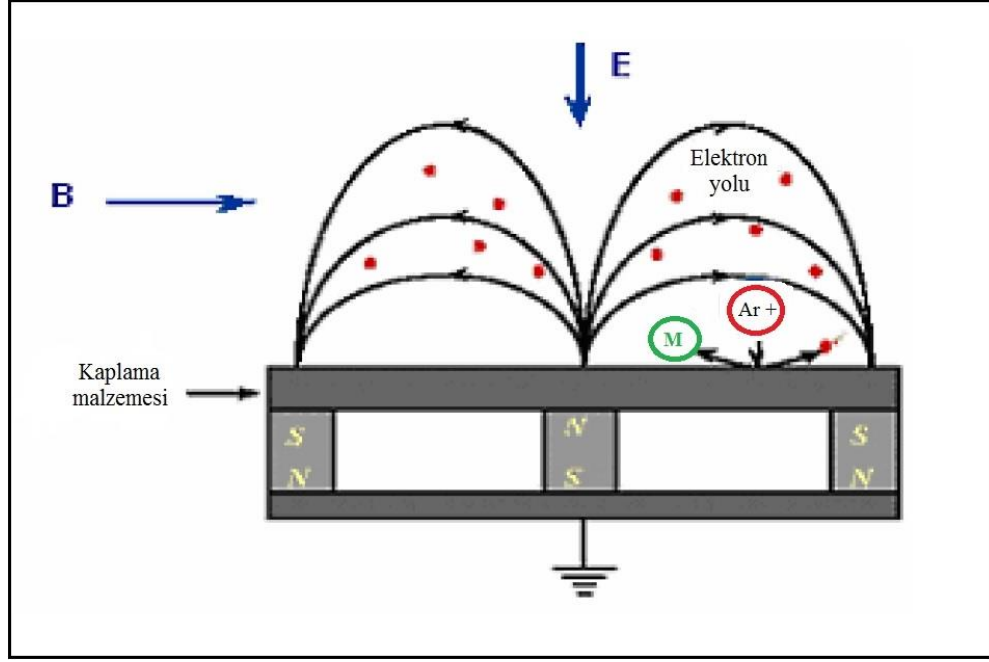
Parlama boşalması sırasında gaz basıncı yüksektir. Bu durum, gaz moleküllerinin saçılan parçacıkları ışınlamasına ve büyütülen filmlerin içine gaz moleküllerinin de girmesine neden olur. İyon ışınli saçtırma sisteminde; iyonlar, iyon kaynağında üretilir. Bu sistemde, kaplama malzemesi, iyon kaynağından ayrılmış, ayrı bir saçtırma odacığında iyon ışınıyla bombardıman edilir (Wasa vd. 2012). Şekil 2.15’de iyon ışınli saçtırmaya bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 2.15 İyon ışınli saçtırma sistemi (Sönmezoğlu vd. 2012)

2.7.5 Manyetik alanda saçtırma yöntemi

Hedef malzeme, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Mıknatısın bir kutbu kaplama malzemesinin merkez eksenine, ikinci kutbu kaplama malzemesinin kenarlarına yerleştirilmiştir. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların kaplama malzemesinin üzerinde birbirine dik olmasını sağlamaktadır. Plazmadaki elektronlar $E \times B$ yönünde hareket ederler. Başka bir deyişle, elektronların hareketi hem elektrik alana (E) hem de manyetik alana (B) dik yöndedir (Sarkar 2013).



Şekil 2.16 Manyetik saçtırma (Bayraktaroğlu 2007)

Bu yöntemin fiziksel açıklaması,

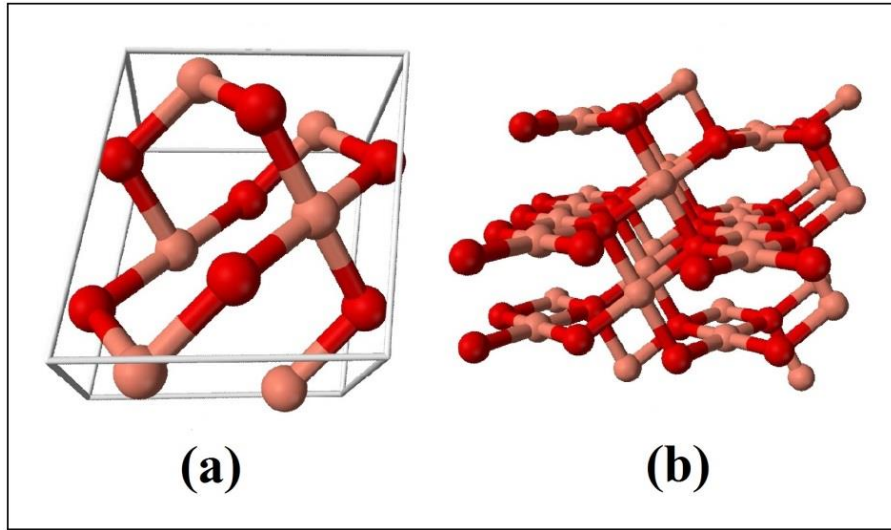
$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.38)$$

Lorentz bağıntısıyla yapılır. Burada; \vec{F} kuvvet, \vec{V} hız, e elektronun yükü, \vec{v} elektronun sürüklenme hızı, \vec{E} elektrik alan, \vec{B} manyetik alandır.

Manyetik alanda saçtırma sistemlerinin en iyi bilinen elemanı “magnetron” dur. Magnetron ifadesi ilk olarak radar sistemlerinde mikro dalga üreten vakum tüplerini tanımlamada kullanılmıştır. Günümüzde halen magnetron söz konusu amaçla kullanılmakla birlikte, mekanizmanın katodun saçtırılması için de son derece verimli bir sistem olduğunun anlaşılması üzerine saçtırma sistemlerine uygulanmıştır. Bugün kullanılan saçtırma sistemlerinin %95’i magnetron teknolojisine sahiptir.

2.8 Bakır (II) Oksit (CuO) ve Özellikleri

Bakır II oksit (CuO), yasak bant aralığı 1.21-1.51 eV olan, yapısında Cu boşluklarının bulunması nedeniyle p-tipi bir yarıiletken olup siyah ya da kahverengi ile siyah arasında oldukça koyu bir renge sahip parlak bir katıdır. Elektron ilgisi (χ) 4.07 eV'tur. Molekül ağırlığı 79.45, yoğunluğu 6.3 g/cm³'tür. Erime sıcaklığı 1336 °C'dir. Oksit yarıiletken sınıfındadır. Monoklinik kristal yapıya ($a_1 \neq a_2 \neq a_3, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$) sahip birim hücrelerinde iki atom bulundurmaktadır. Örgü parametreleri $a=4.6837 \text{ \AA}$, $b=3.4226 \text{ \AA}$, $c=5.1288 \text{ \AA}$ ve $\beta = 99.54^\circ$ 'dir (Balamurgan ve Metha 2001).



Şekil 2.17 CuO bileşiğinin: a. birim hücresi, b. kristal yapısı (Bayansal 2009)

P-tipi yarı iletken olan CuO, katalizörler, gaz sensörleri ve fotovoltaik hücreler için önemli işlevsel bir malzemedir. Elektronik ve manyetik özelliklerinden ötürü CuO yüksek sıcaklık süper iletken malzemelerinin temel bileşenlerinden biridir ve bu nedenle oldukça ilgi çekmektedir. Yapılan çalışmalarda CuO'nin kristalin boyutu çok küçük nano boyutlara ulaştıkça bilinenin aksine çok farklı manyetik özellikler gösterdiği belirtilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Alt Tabakaların Temizlenmesi

Kaplama yapılacak yüzey lam yani mikroskop camı olarak belirlendi. Camlar ilk olarak deterjanla temizlenerek su ile durulandı ve üzerindeki olası lekelerden arındırıldı daha sonra hava kompresörü ile kurutuldu. Temizlenen camlar içerisinde etil alkol olan bir behere yerleştirildi ve ultrasonik banyo yardımıyla 15 dakika şekil 3.1'deki gibi yıkandı. Daha sonra yıkanan camlar kurutuldu ve 18 M Ω ' luk deiyonize suda ultrasonik banyo yardımıyla tekrar 15 dakika yıkandı ve kompresörle hava verilerek kurutuldu.



Şekil 3.1 Camların ultrasonik banyoda yıkanması

3.2 CuO Filmlerin Kaplanması

Kaplama işlemi için dört tane cam, ev yapımı D.C. magnetron sputtering cihazının merkezine yerleştirilmiş ve katotta bulunan % 99.9 saflıktaki CuO hedef malzemesiyle, 150 °C'de, dört saatlik saçılma sürelerinde oksijen gazı kullanılmadan ve farklı oksijen gazı akış hızlarında CuO ince filmler kaplanmıştır. Ayrıca kaplamalar için aynı olan bazı parametreler de şunlardır; cihaz gerilimi 1500 V, vakumu 1.6×10^{-4} mbar ve anot-katot mesafesi 2.2 cm'dir. Çizelge 3.1'de kaplanan filmler ve kullanılan parametreler verilmiştir.

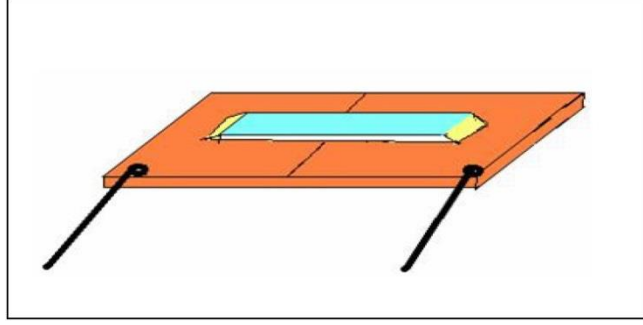
Çizelge 3.1 Kaplanan filmlerin parametreleri

Numune Adı	Gerilim (V)	Alt tabaka sıcaklığı (°C)	Vakum (mbar)	Anot-Katot mesafesi (cm)	Argon akış hızı (sccm)	Oksijen akış hızı (sccm)
D2	1500	150	$1,6 \times 10^{-4}$	2.2	70	0
H7	1500	150	$1,6 \times 10^{-4}$	2.2	70	20
H5	1500	150	$1,6 \times 10^{-4}$	2.2	70	35
H6	1500	150	$1,6 \times 10^{-4}$	2.2	70	50
D7	1500	150	$1,6 \times 10^{-4}$	2.2	70	70
H4	1500	150	$1,6 \times 10^{-4}$	2.2	70	105
H3	1500	150	$1,6 \times 10^{-4}$	2.2	70	140

Sccm, bir akış hızı (flow rate) birimi olmakla birlikte açılımı dakika başına standart santimetreküptür. Buradaki standart, 1 atm basınç ve 0 °C'dir. Akış hızı gaz basıncı ile doğru orantılıdır ve bazı parametreler bilindiği takdirde 1 sccm'nin karşılık geldiği basınç değerleri de hesaplanabilir (Goebel ve Katz 2008). Bu çalışmada bazı parametreler bilinmediği için 1 sccm'ye karşılık gelen basınç değeri yazılamamıştır.

3.3 Elektriksel Ölçümler İçin Numunelerin Hazırlanması

Bakır oksit (CuO) kaplanan filmler, elektriksel ölçümler almak için belirli boyutlarda elmas yardımıyla kesildi, kesilen parçalar bakır fiber plakanın üzerine yerleştirildi, bakır fiber plakalarda elektriksel iletimin olmaması için ortasından eye yardımıyla oyuldu. Bakır fiber plaka üzerine yapıştırılan camların uçlarına gümüş pasta sürüldü ve bakır fiber plaka ile camın arasındaki iletim sağlandı. Bu şekilde numune hazırlanmasına iki nokta yöntemi adı verilir. Bu şekilde hazırlanmış bir numune şekil 3.2'de gösterilmiştir.



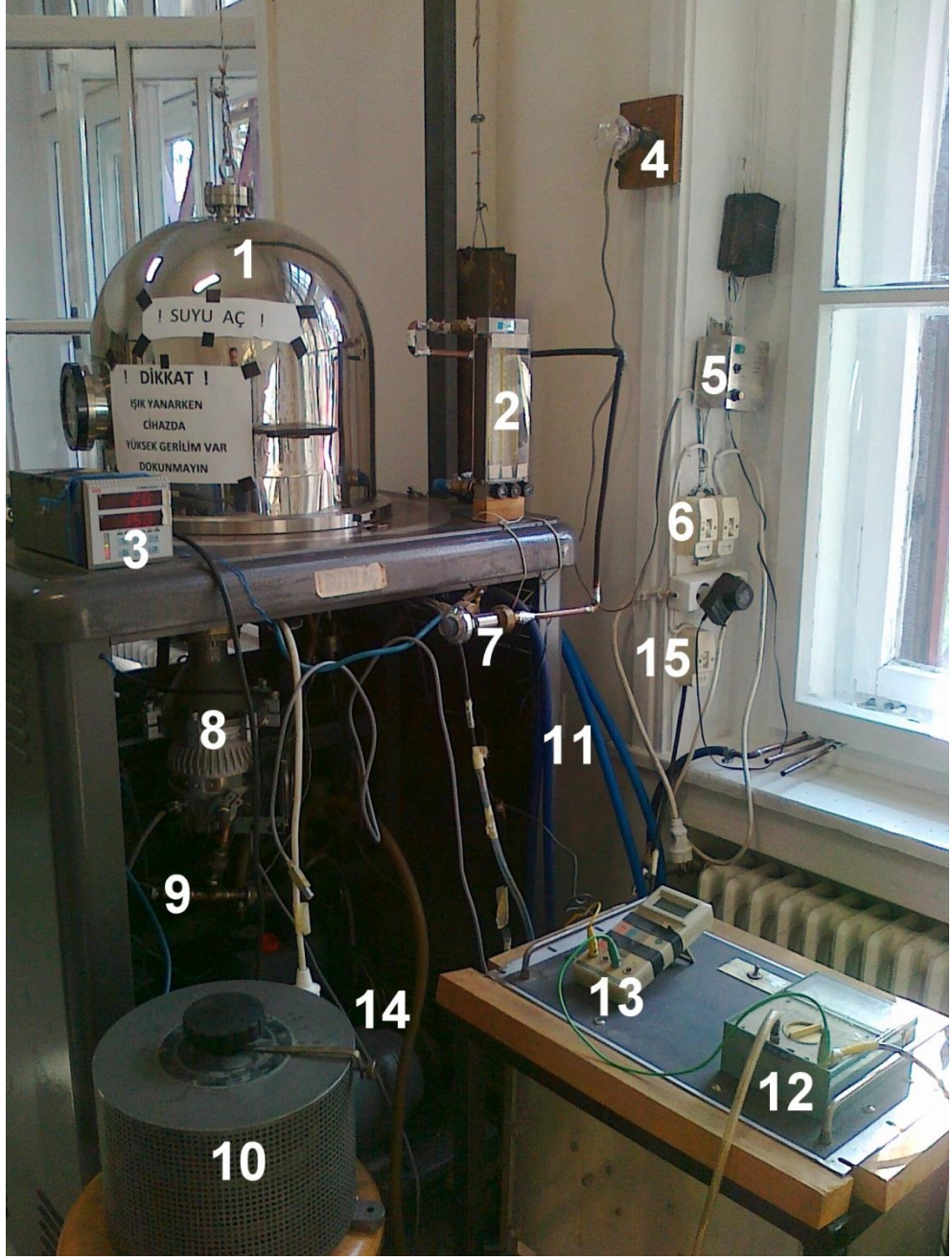
Şekil 3.2 İki nokta yöntemiyle elektriksel ölçüm için hazırlanan numune

Çizelge 3.2 Elektriksel ölçüm için hazırlanan numunelerin boyutları

Numune adı	Boy (cm)	Genişlik (cm)
D2	2.5	0.60
H7	2.5	0.75
H5	2.5	0.75
H6	2.5	0.75
D7	2.5	0.80
H4	2.5	0.60
H3	2.5	0.75

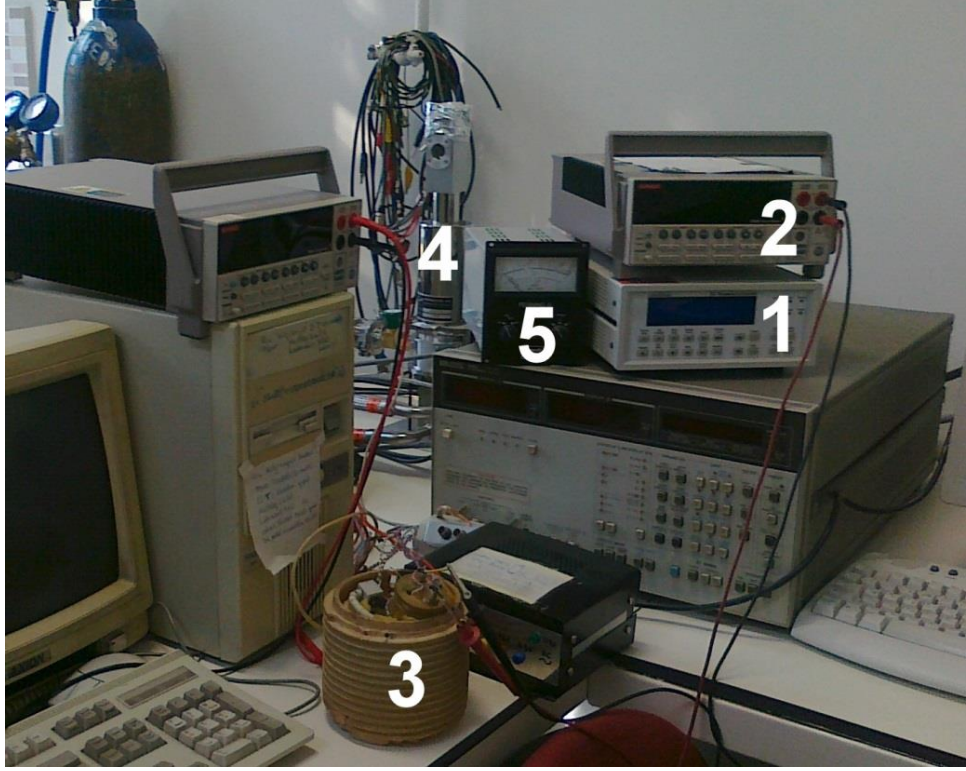
3.4 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Bakır oksit (CuO) ince filmlerinin elde edilmesi için kullanılan ev yapımı sputtering cihazı şekil 3.3'te gösterilmiştir. Camların ultrasonik temizlenmesinde Bransonik 12 ultrason temizleme cihazı, 18 M Ω 'luk deiyonize su elde etmek için Human Zener Power cihazı kullanılmıştır. Elde edilen filmlerin elektriksel parametrelerini belirlemek için akım-sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı cihazlar ise; bilgisayar kontrollü Keithley 2420 akım-gerilim kaynağı, kapalı devre Janes CCS-350S kriyostatu, LakeShore 330 sıcaklık kontrolörü cihazıdır. Bu cihazlarda şekil 3.4'te gösterilmiştir. Filmlerin optiksel parametrelerini belirlemek için ise Shimadzu UV-3600 cihazı kullanılmıştır, bu cihaz da şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Ev yapımı D.C. magnetron sputtering cihazı,

1. Kaplama odacığı (chamber), 2. Gaz akış deneticisi, 3. Alt tabaka sıcaklık deneticisi, 4. Cihaz emniyet lambası, 5. Su alarm cihazı, 6. Alarm ve cihaz emniyet lambası açma/kapama anahtarları, 7. Gaz akışı ince ayar vanası (needle valve), 8. Moleküler pompa, 9. Atmosfer vanası, 10. Değişken transformatör (varyak), 11. Gaz hortumları, 12. Voltmetre, 13. Ampermetre, 14. Rotary (mekanik) pompa, 15. D.C. gerilim kaynağı açma/kapama anahtarı



Şekil 3.4 Akım-sıcaklık ölçüm cihazları,

1. LakeShore 330 sıcaklık kontrolörü, 2. Bilgisayar kontrollü Keithley 2420 akım-gerilim kaynağı, 3. Karanlık kapalı kutu, 4. Kapalı devre Janes CCS-350S kriyostat, 5. Penning 8 vakum ölçüm cihazı

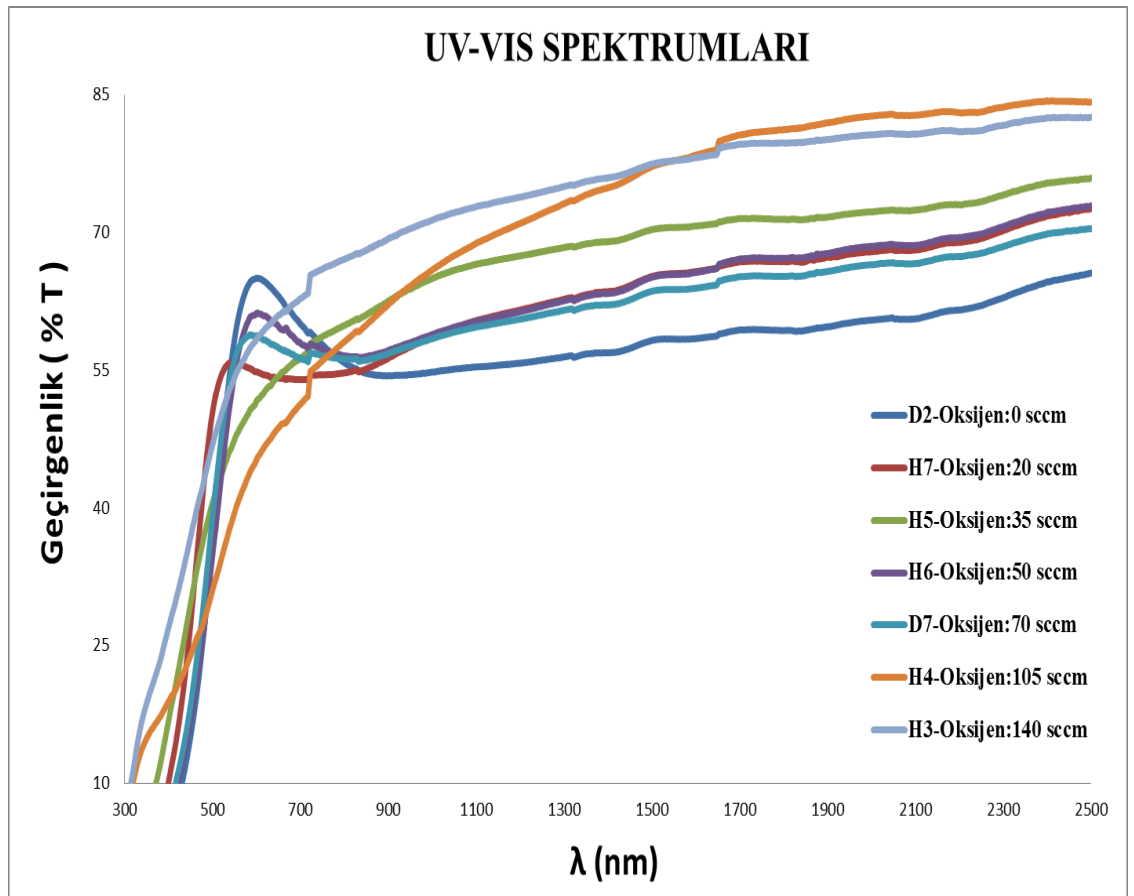


Şekil 3.5 Schimadzu UV-3600 cihazı

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 CuO İnce Filmlerin Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi

Oksijen akış hızları değiştirilerek elde edilen CuO filmler UV-VIS spektrumları, Shimadzu UV-3600 cihazı yardımıyla 300-2500 nm dalga boyu aralığında ölçülmüştür. Şekil 4.1’de değişik oksijen akış hızlarında hazırlanmış yedi numunenin UV-VIS spektrumları gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Değişik oksijen akış hızlarında hazırlanmış CuO filmlerinin 300-2500 nm dalga boyu aralığında UV-VIS spektrumları

CuO filmlerin yasak enerji bant aralıklarını bulurken,

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad (4.1)$$

bağıntısı kullanılır. Burada sırasıyla, I_0 gelen ışığın şiddeti, I geçen ışığın şiddeti, t filmin kalınlığı, α soğurma katsayısıdır. Denklem 4.1'deki soğurma katsayısı α eşitlikte yalnız bırakılırsa,

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (4.2)$$

elde edilir. Soğurma katsayısı α , denklem 4.2'den ve UV-VIS spektrumlarından elde edilen veriler ile bulunur. Filmlerin kalınlıkları çizelge 4.1'de verilmiştir.

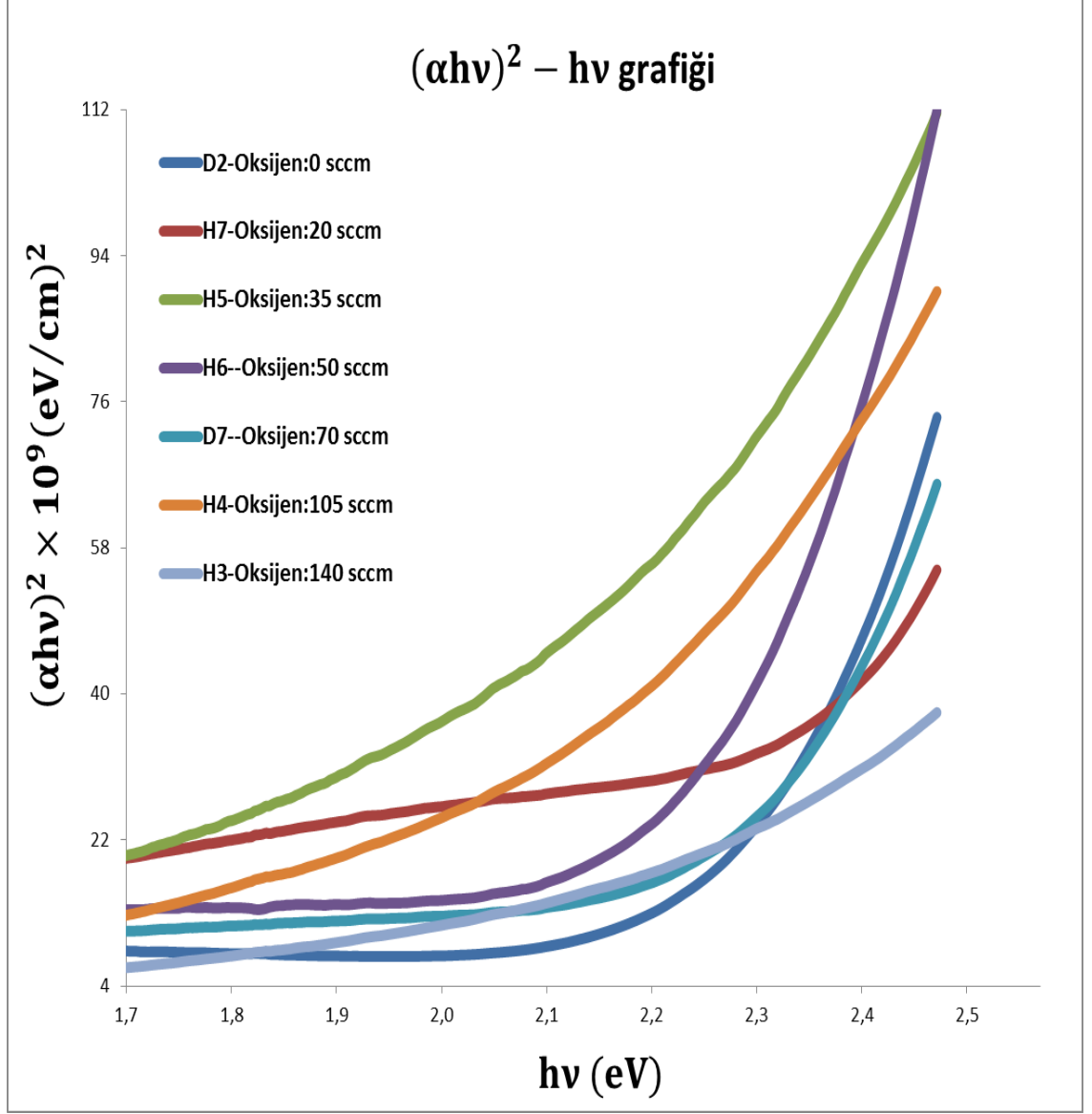
Çizelge 4.1 CuO filmlerin kalınlıkları

Numunenin Adı	Filmin kalınlığı (nm)
D2	100
H7	76
H5	69
H6	83
D7	97
H4	100
H3	100

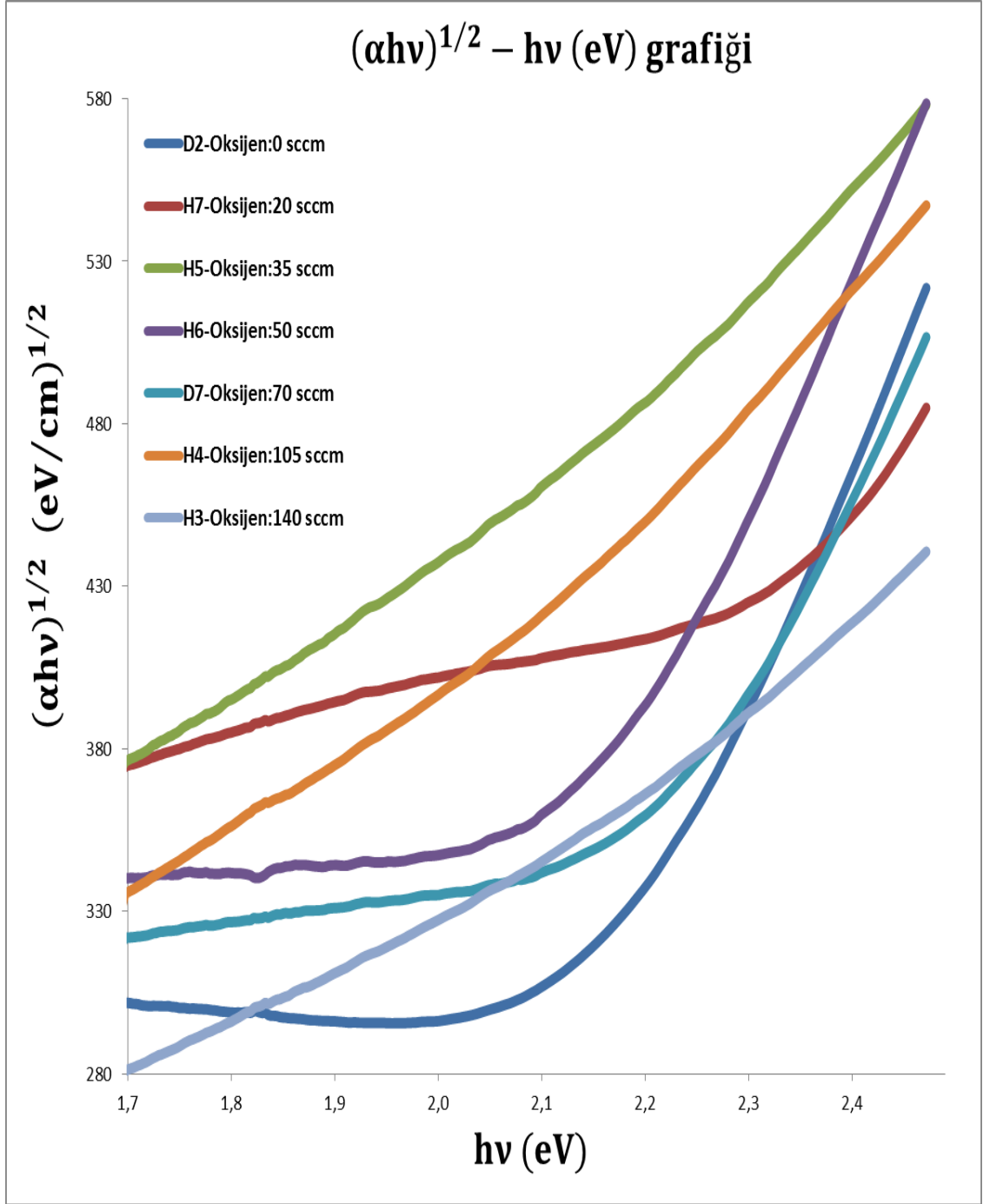
$$\alpha (hv) = A^*(hv - E_g)^n \quad (4.3)$$

bağıntısından yararlanılarak direk ve indirek enerji bant aralıkları bulunabilir. Direk enerji bant aralığını bulabilmek için $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği, indirek enerji bant aralığını bulabilmek için $(\alpha hv)^{1/2} - hv$ grafiği çizilmiş ve şekil 4.2-4.3'te gösterilmiştir. Elde edilen eğrilerin çizgisel kısmının hv eksenini kestiği noktadaki değerlerden filmlerin direk ve indirek bant aralıkları bulunabilir. Bunun için eğriler fit edilmiştir ve eğrilerin en iyi fitleri belirlenmiştir. En iyi fit şu şekilde belirlenir; çizilen grafiğe eğim çizgisi eklenir ve bu eğim çizgisi grafikteki noktalara ne kadar yakınsa o kadar iyi fite sahiptir, diğer bir deyişle grafik üzerinde bulunan R^2 değeri 1'e ne kadar yakın ise fit o kadar iyidir. En iyi fitler belirlendikten sonra grafiklerin denklemlerinden, faydalanılarak

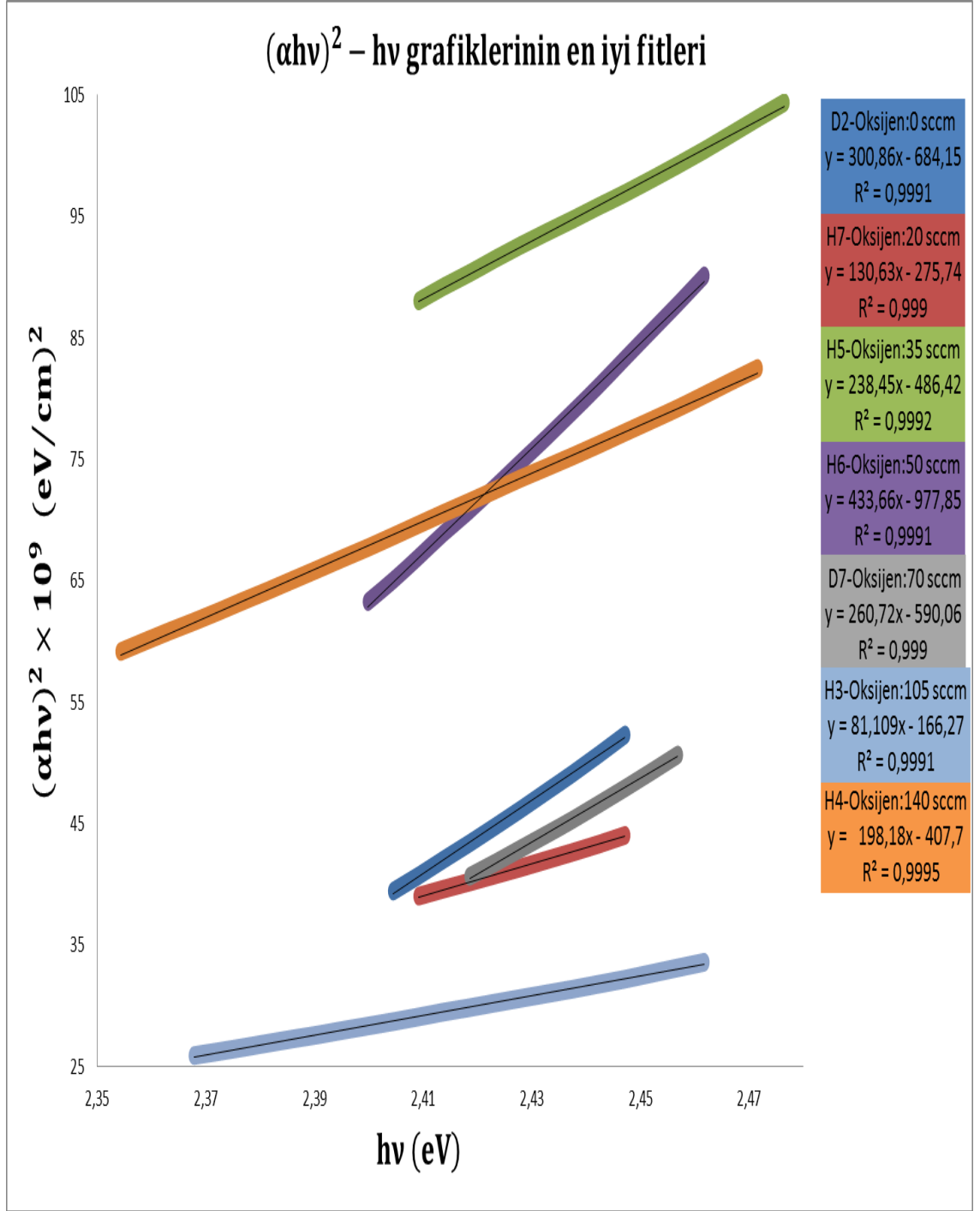
grafiklerin $h\nu$ eksenini kestikleri noktalar bulunmuştur. Şekil 4.4-4.5'te bunlar gösterilmiştir.



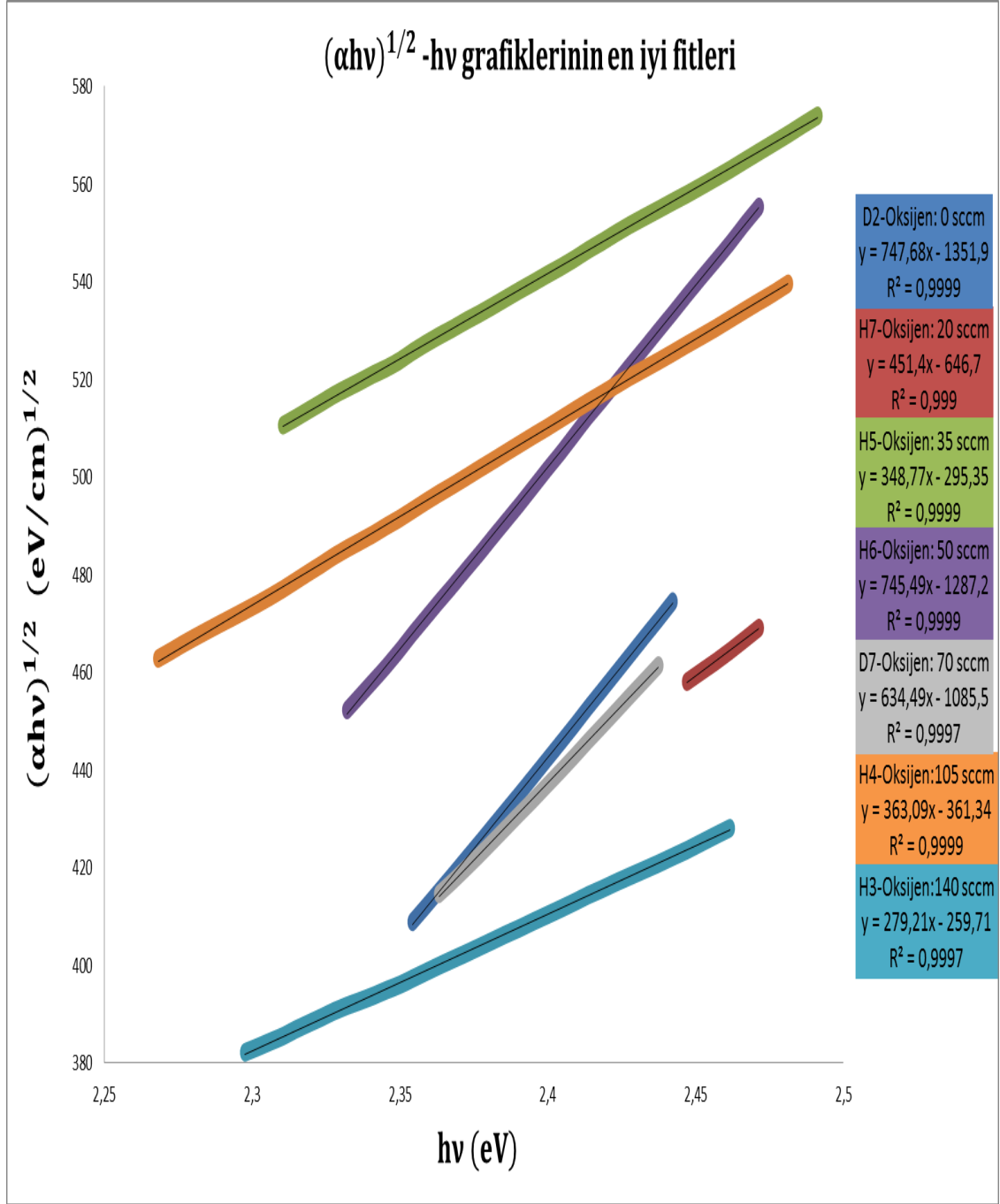
Şekil 4.2 Farklı oksijen akış hızında hazırlanan CuO filmlerin direk bant aralığını bulmak için faydalanılan $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiği



Şekil 4.3 Farklı oksijen akış hızında hazırlanan CuO filmlerin indirek bant aralığını bulmak için faydalanılan $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği



Şekil 4.4 $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiklerinin en iyi fitleri ve grafiklerin denklemleri

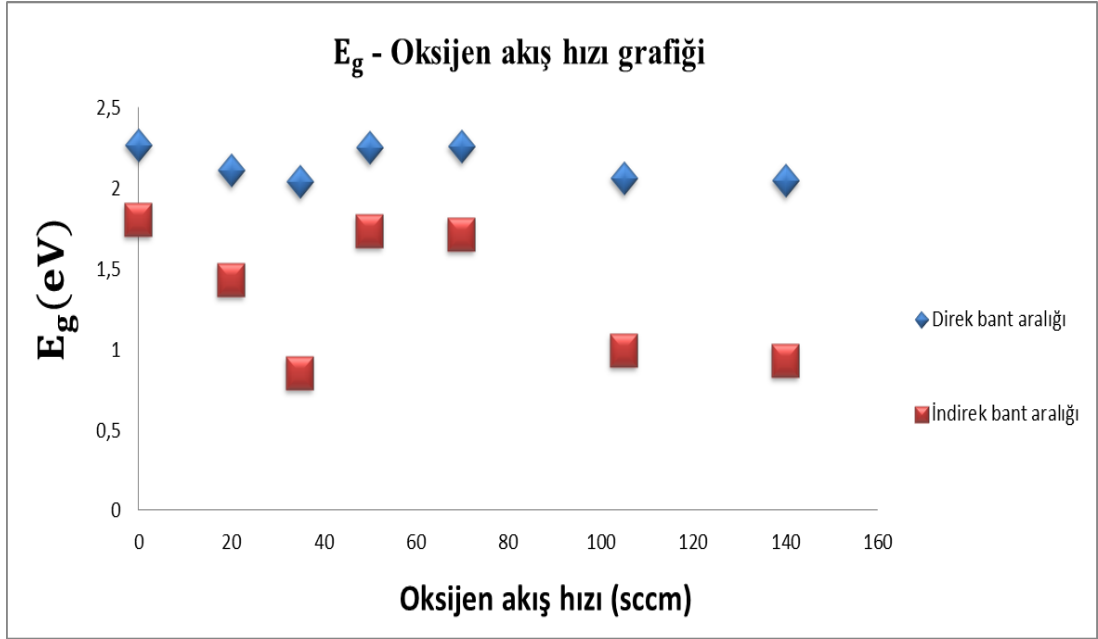


Şekil 4.5 $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiklerinin en iyi fitleri ve grafiklerin denklemleri

Şekil 4.4-4.5'teki eğrilerin denklemlerinde, y'nin yerine sıfır konular ve bu şekilde bulunan x değeri, grafiğin x eksenini yani $h\nu$ eksenini kestiği noktadır. Bulunan bu değerler E_g enerji bant aralığı değerleridir ve bunlar çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Farklı oksijen akış hızlarında hazırlanmış CuO filmlerin E_g enerji bant değerleri

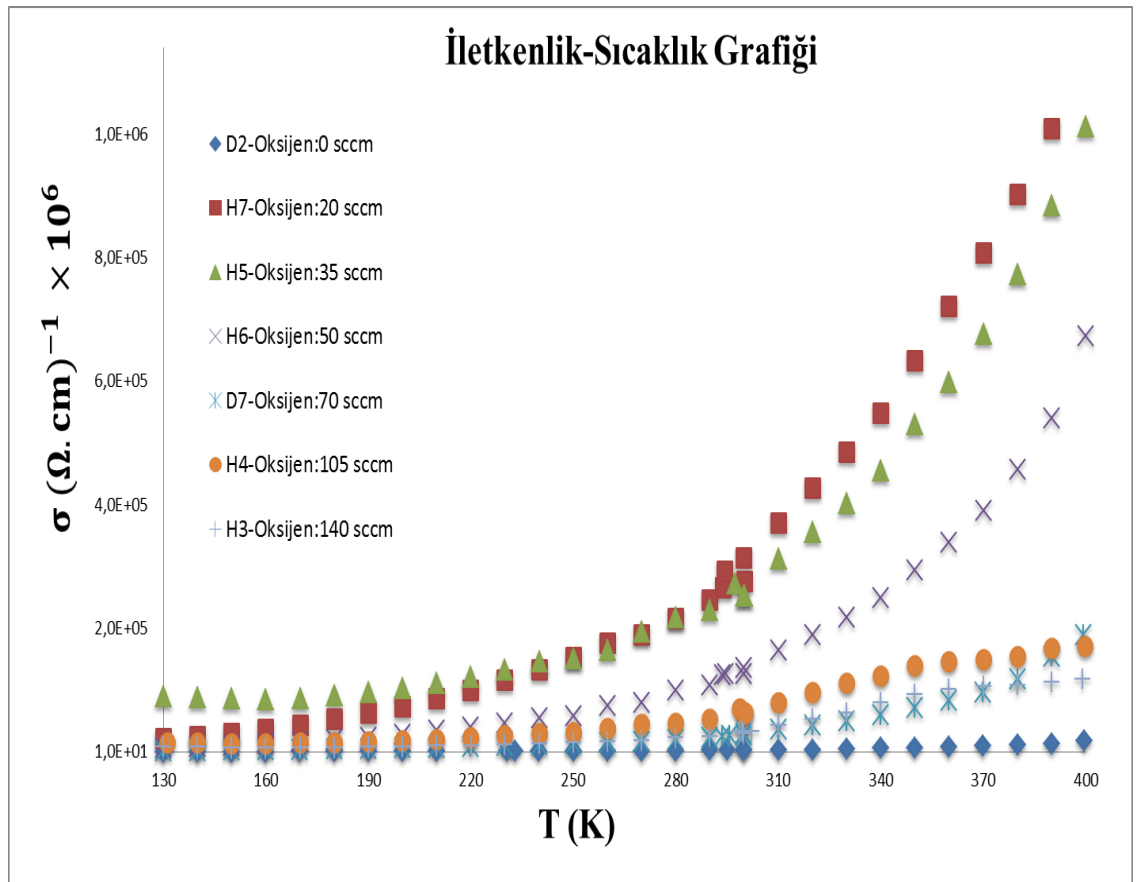
Numune adı	Oksijen akış hızı (sccm)	Direk E_g enerji bant aralığı (eV)	İndirek E_g enerji bant aralığı (eV)
D2	0	2.27	1.80
H7	20	2.11	1.43
H5	35	2.04	0.85
H6	50	2.25	1.73
D7	70	2.26	1.71
H4	105	2.06	0.99
H3	140	2.05	0.93



Şekil 4.6 CuO filmlerin E_g enerji bant değerlerinin oksijen akış hızı ile değişimi

4.2 CuO İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

Bakır oksit (CuO) filmlerin, kaplandıktan sonra düşük (100K-300K) sıcaklık bölgesinde Cryostat cihazı aracılığıyla ve yüksek sıcaklık bölgesinde (300K-400K) karanlık kutu içerisinde elektriksel özellikleri incelendi. Her iki sıcaklık bölgesi içinde sabit D.C. gerilim (20V) altında ölçümler alındı ve akım sıcaklık değişimlerinden yararlanılarak elektriksel özellikleri tespit edildi. Şekil 4.7’de elektriksel ölçümler sonucu elde edilen iletkenlik-sıcaklık değişim grafiğine göre, iletkenlik sıcaklıkla üstel bir şekilde artmıştır.



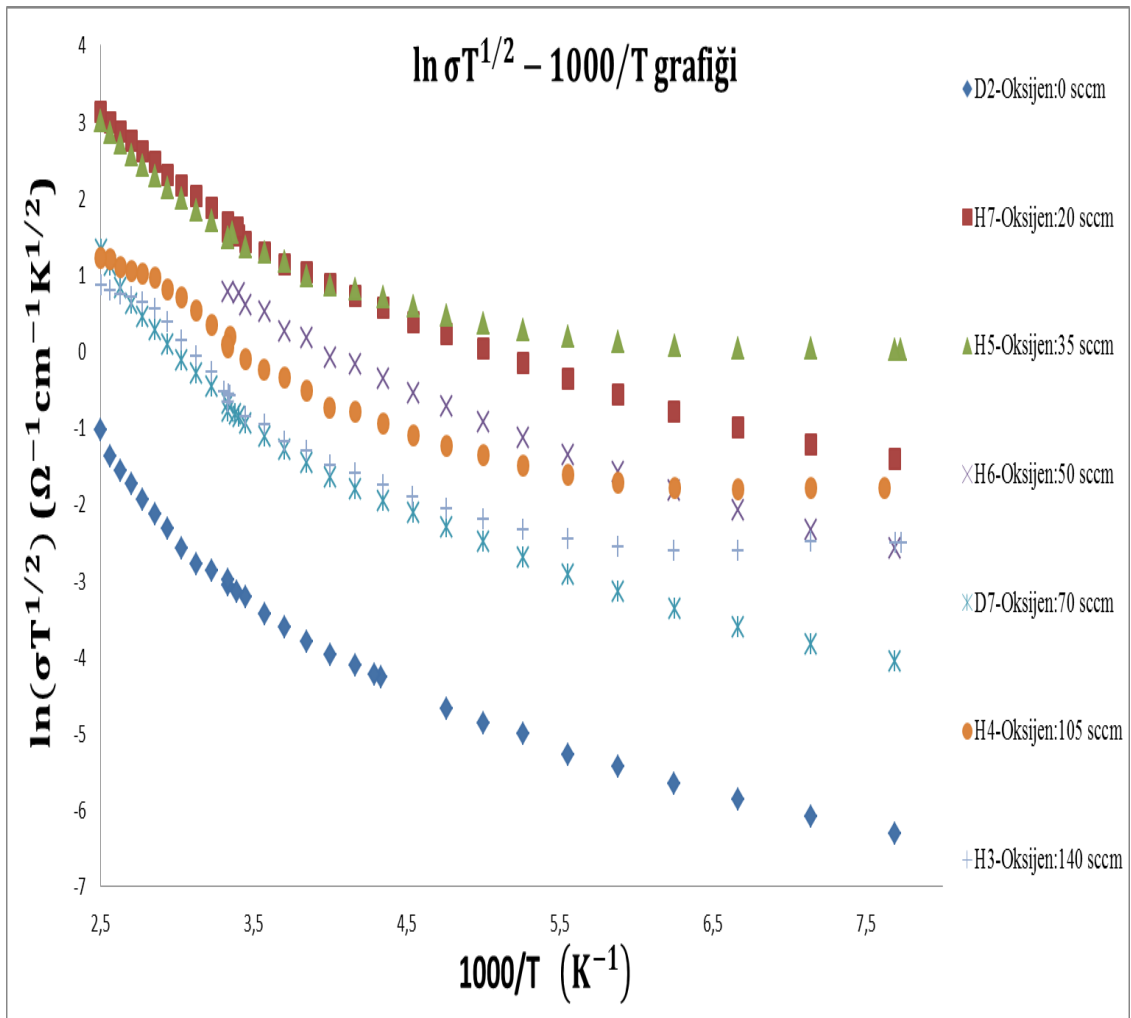
Şekil 4.7 CuO filmlerin 130K-400K sıcaklık aralığında iletkenlik-sıcaklık grafiği

Filmlerin elektriksel iletkenlikleri,

$$\sigma = \frac{IL}{Vwd} \quad (4.4)$$

bağıntısından bulunmuştur. Burada I akım, L numunenin boyu, V gerilim, w numunenin genişliği, d filmin kalınlığıdır.

Numunelerin elektriksel ölçümlerinden elde edilen iletkenlik (σ) değerlerinden ve denklem 2.16 bağıntısından yararlanılarak $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği çizilmiştir (Şekil 4.8) ve bu grafikten yararlanılarak, CuO filmlerin en iyi fit verdiği sıcaklık aralıkları belirlenmiştir. Bu şekilde belirlenen sıcaklık aralıklarına göre de, CuO filmlerin düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerinde aktivasyon enerjileri bulunmuştur.



Şekil 4.8 CuO filmlerin $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiği

Şekil 4.8'deki $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiğinden yararlanılarak CuO ince filmlerin en iyi fit olduğu sıcaklık aralıkları belirlendi ve bu aralıklar çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 CuO filmlerin en iyi fit sıcaklık aralıkları

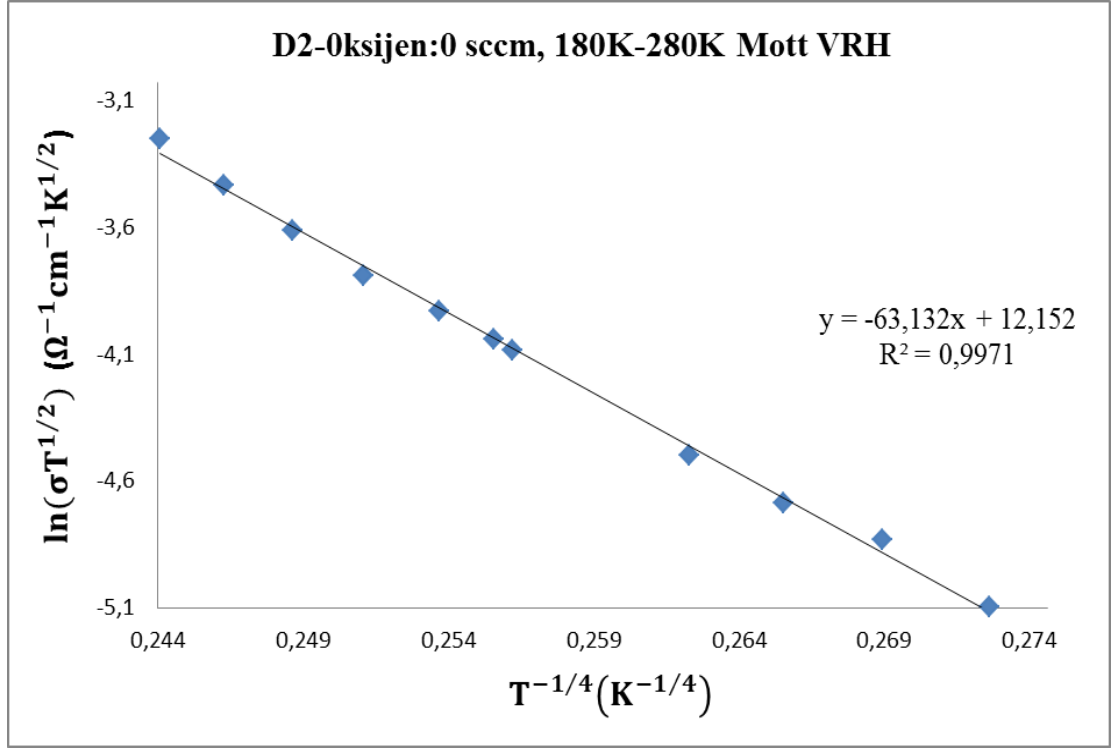
Numune Adı	Düşük sıcaklık aralığı (K)	Yüksek sıcaklık aralığı (K)
D2	180-280	310-390
H7	150-290	300-400
H5	190-260	300-400
H6	140-270	300-390
D7	140-250	300-390
H4	190-250	300-350
H3	190-250	300-360

CuO filmlerin aktivasyon enerjileri; çizelge 4.3'de belirtilen sıcaklık aralıklarında, denklem 2.23'den yararlanılarak $E_a = m \frac{k}{q}$ formülü yardımıyla hesaplanmış ve çizelge 4.4'te belirtilmiştir. Burada; k Boltzmann sabiti, q elektrik yükü ve m grafiğin eğimini verir.

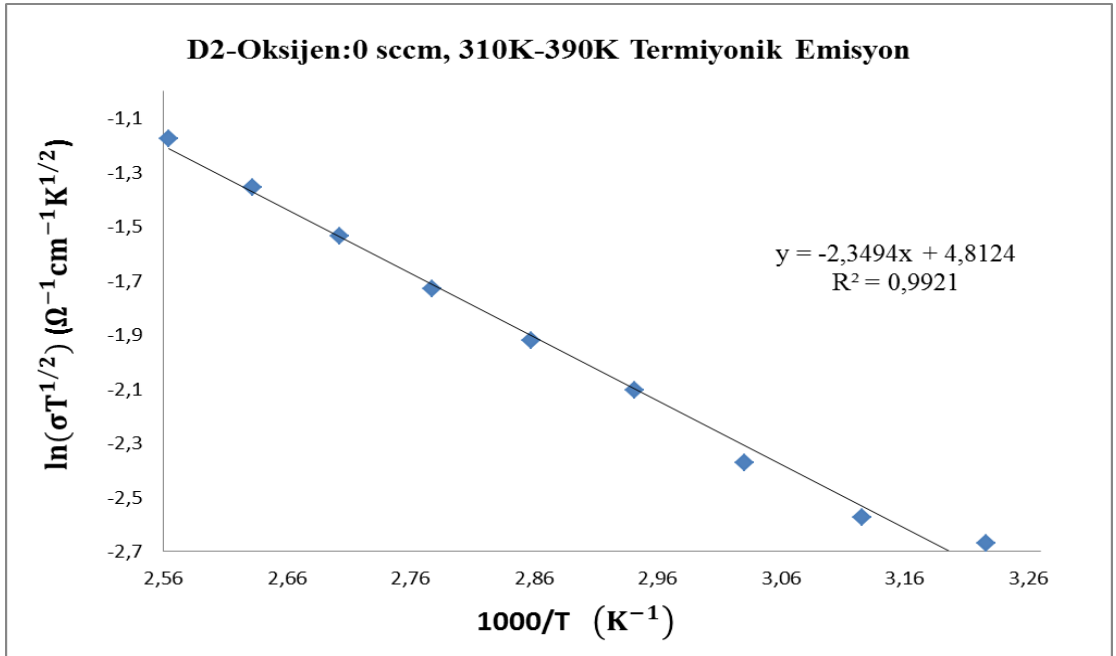
Çizelge 4.4 CuO filmlerin düşük ve yüksek sıcaklık aktivasyon enerjileri

Numune Adı	Oksijen akış hızı (sccm)	Düşük sıcaklık aktivasyon enerjisi E_a (eV)	Yüksek sıcaklık aktivasyon enerjisi E_a (eV)
D2	0	0.078	0.202
H7	20	0.066	0.145
H5	35	0.043	0.154
H6	50	0.066	0.162
D7	70	0.061	0.192
H4	105	0.054	0.155
H3	140	0.060	0.194

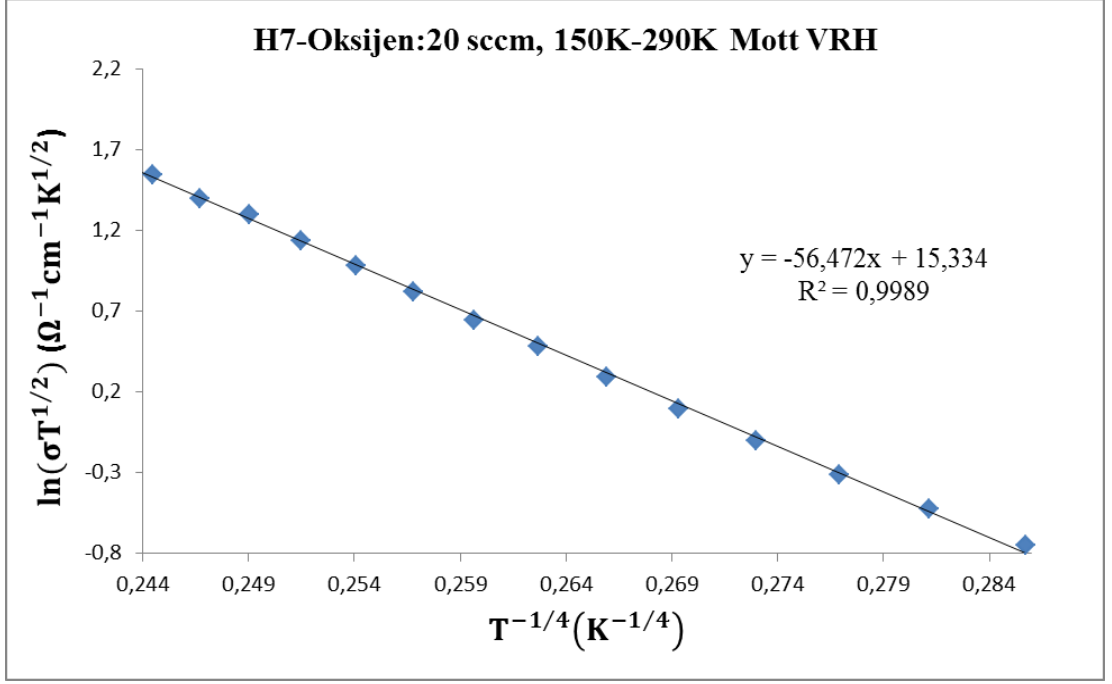
Kaplanan bakır (II) oksit (CuO) filmlerin akım iletim mekanizmalarının belirlenmesi için ikinci bölümden faydalanılmıştır. Kaplanan filmlerin, ikinci bölümde bahsedilen akım iletim mekanizmaları ile uyumlu olup olmadığına deneysel verilerden elde edilen grafikler yardımıyla bakıldı. Düşük sıcaklık bölgesinde (100K-300K) Mott VRH akım iletim mekanizması için $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafikleri çizildi ve en iyi fit durumuna göre mekanizmanın geçerli olduğu sıcaklık aralıkları belirlendi. Yüksek sıcaklık bölgesinde (300K-400K) ise termiyonik emisyon modeli incelendi, bu mekanizma için $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafikleri çizildi ve en iyi fit durumuna göre mekanizmanın geçerli olduğu sıcaklık aralıkları belirlendi. Belirlenen sıcaklık aralıkları ve geçerli akım iletim mekanizmaları çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Çizilen grafikler, şekil 4.9-4.22’de gösterilmiştir.



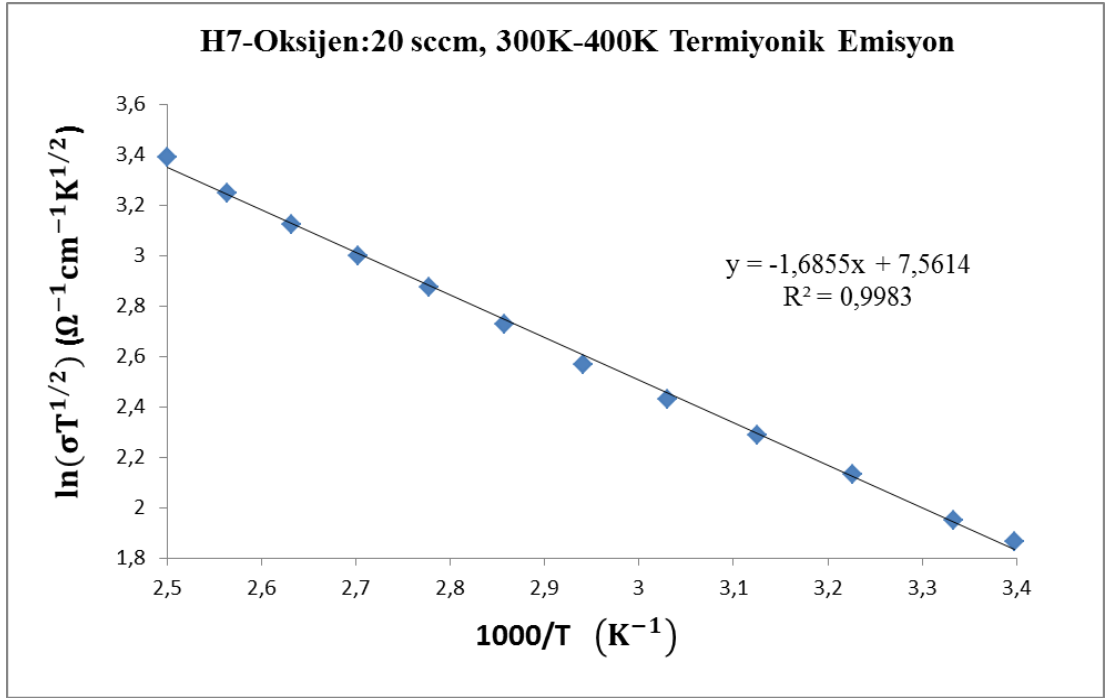
Şekil 4.9 D2 numunesinin 180K-280K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği



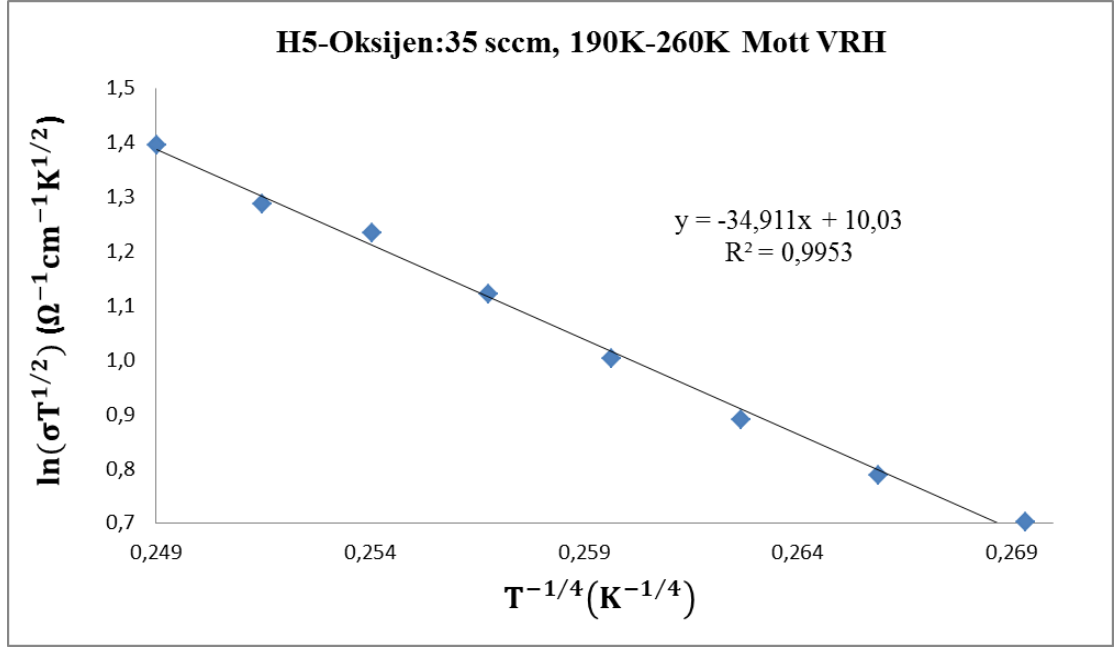
Şekil 4.10 D2 numunesinin 310K-390K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafiği



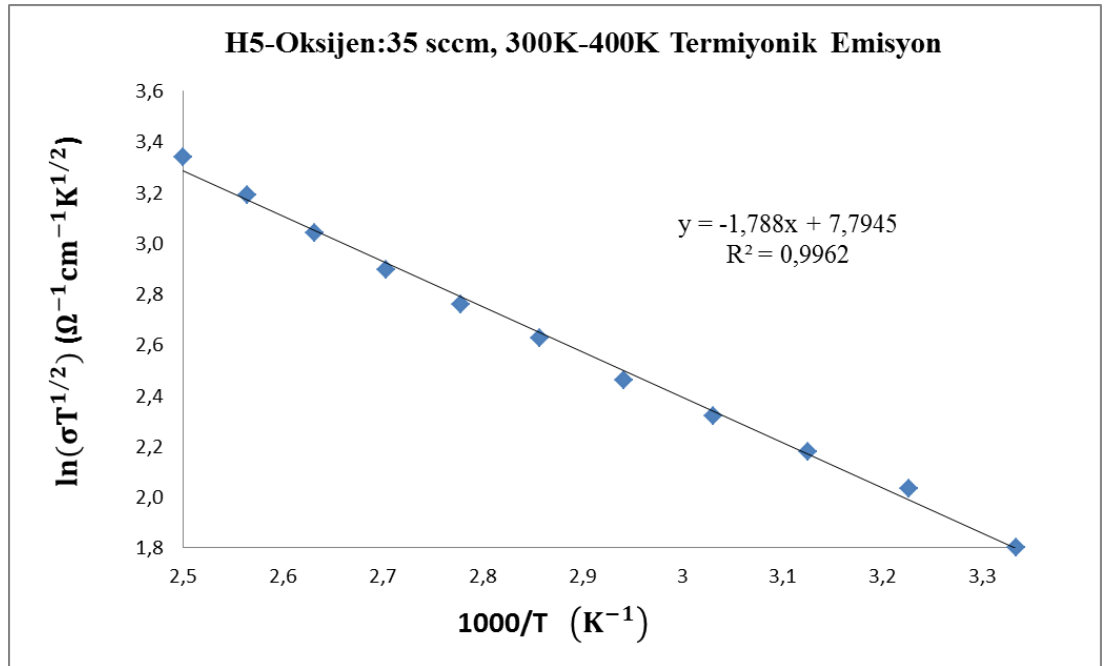
Şekil 4.11 H7 numunesinin 150K-290K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği



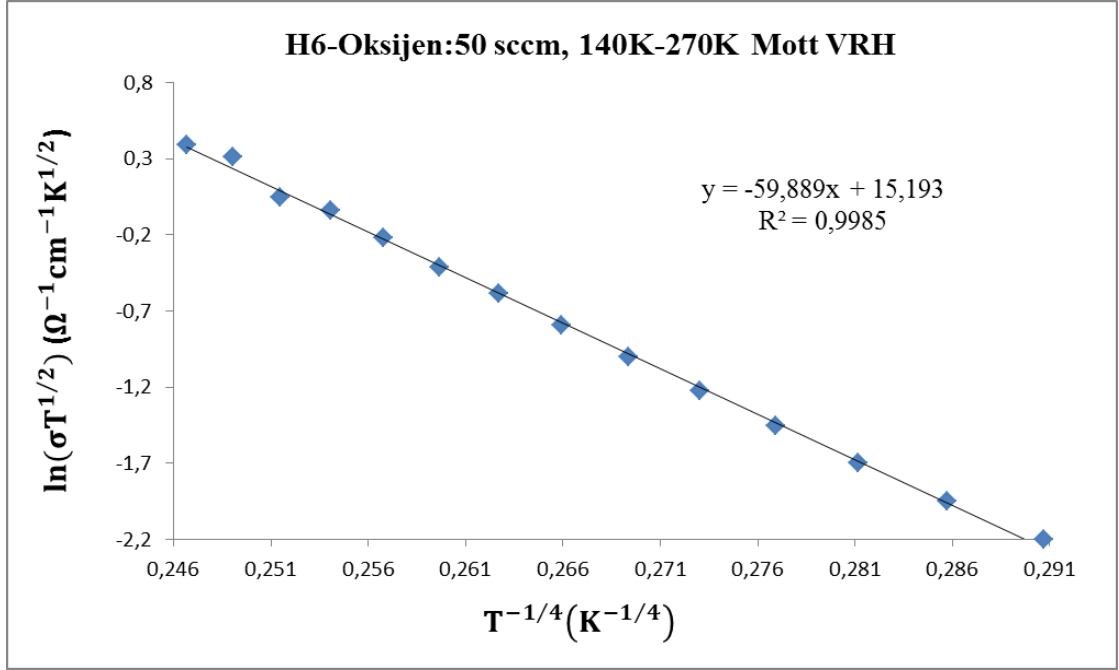
Şekil 4.12 H7 numunesinin 300K-400K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafiği



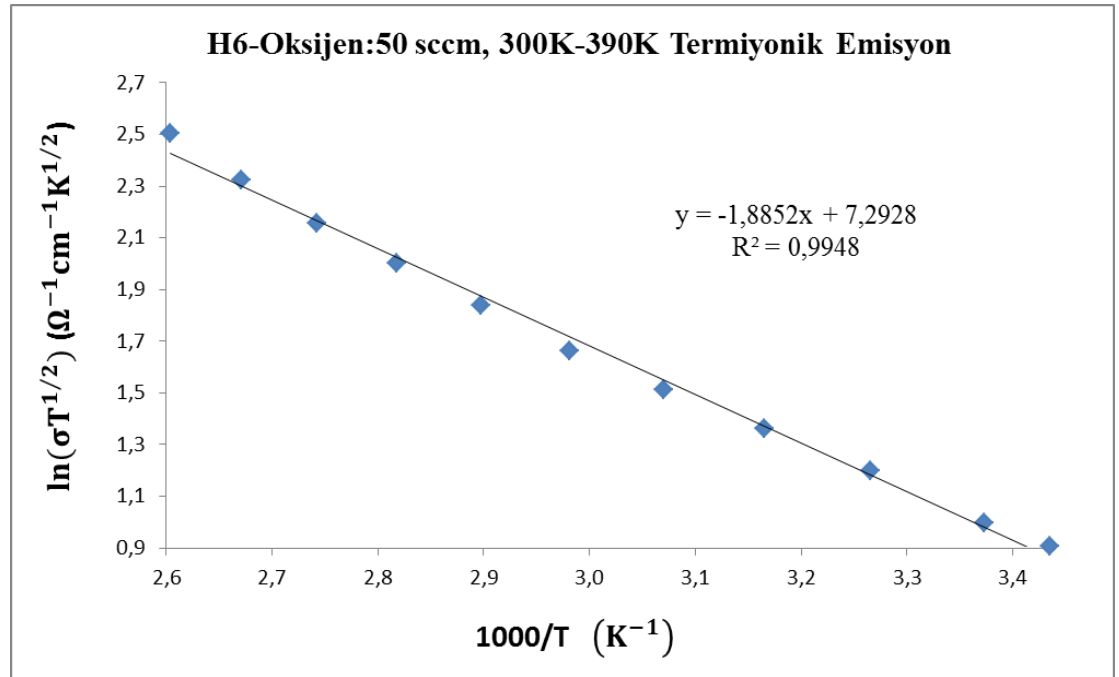
Şekil 4.13 H5 numunesinin 190K-260K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği



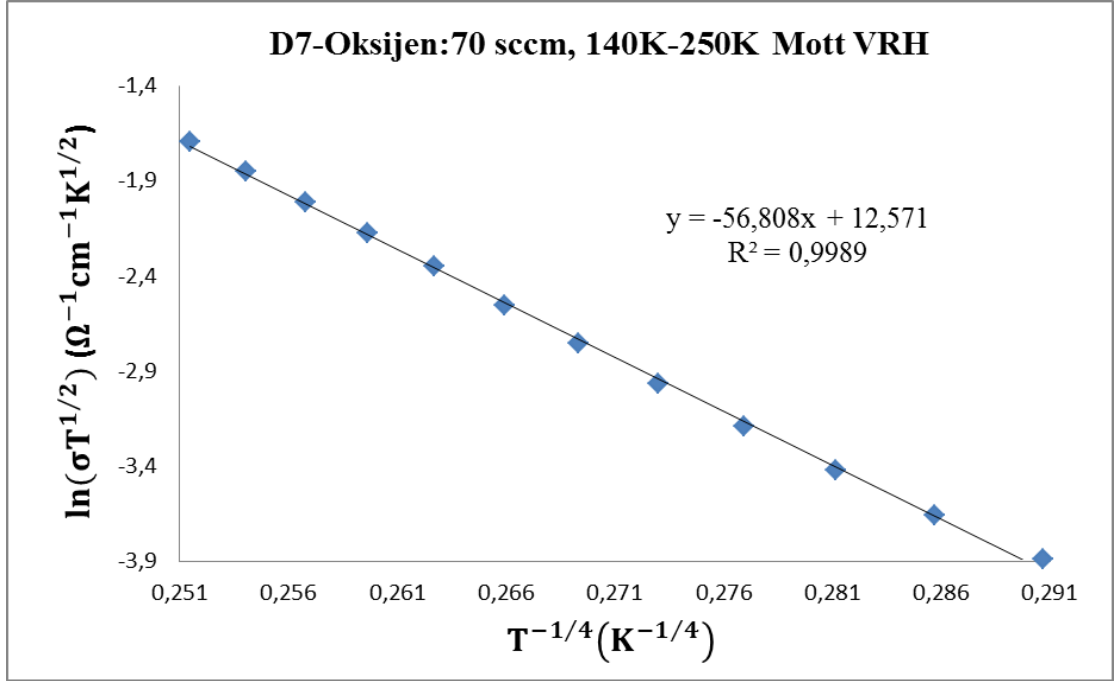
Şekil 4.14 H5 numunesinin 300K-400K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafiği



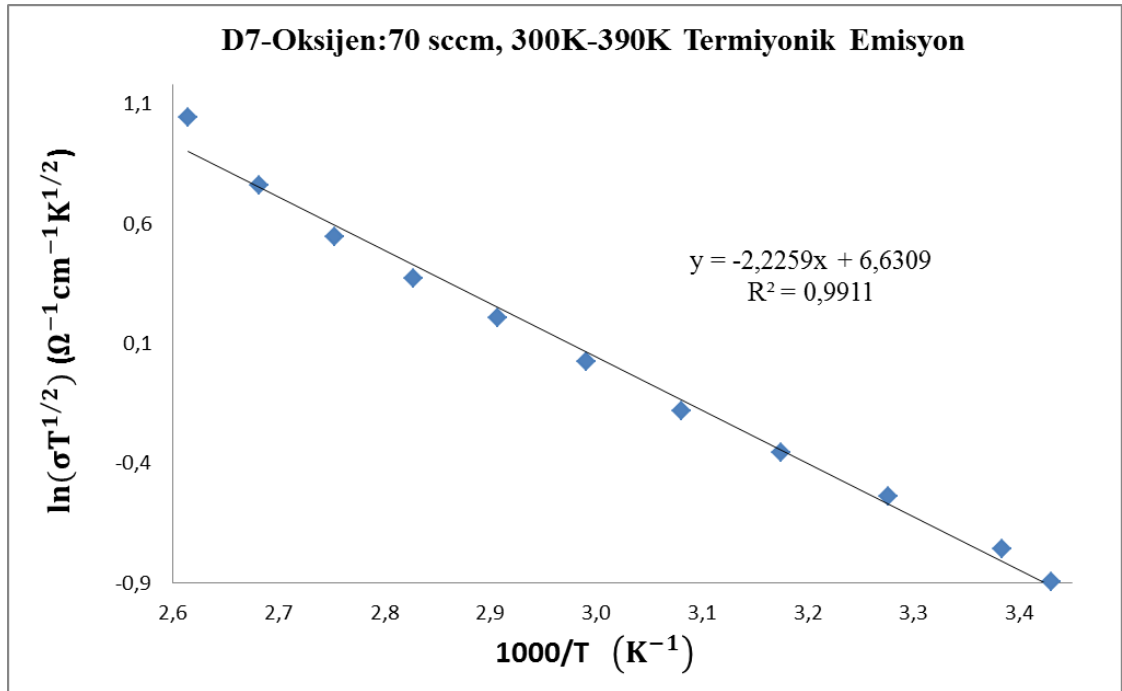
Şekil 4.15 H6 numunesinin 140K-270K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği



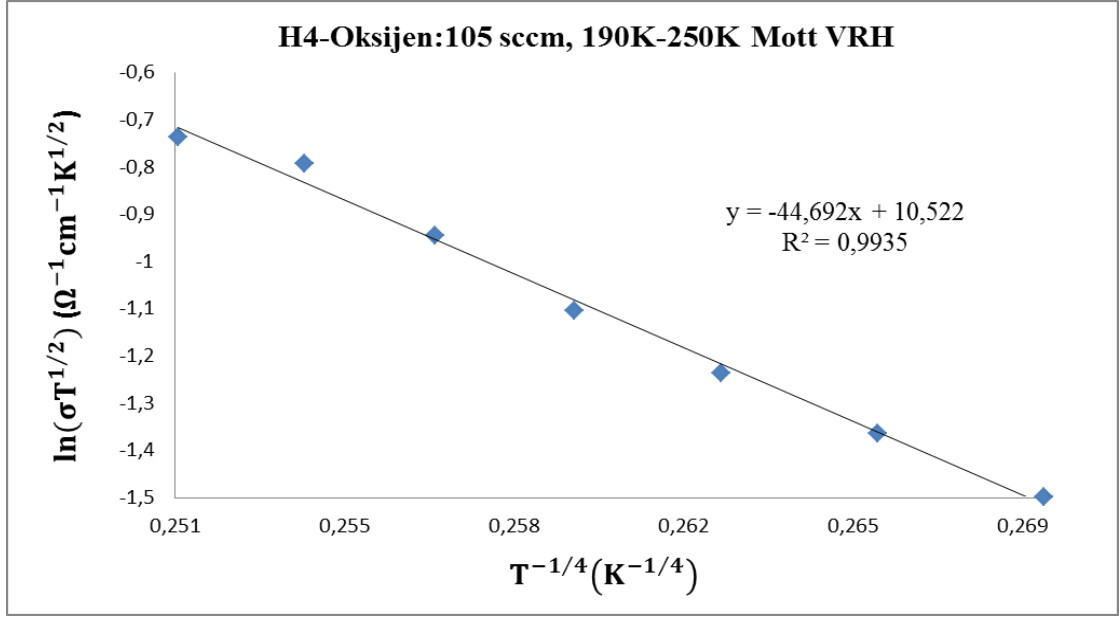
Şekil 4.16 H6 numunesinin 300K-390K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafiği



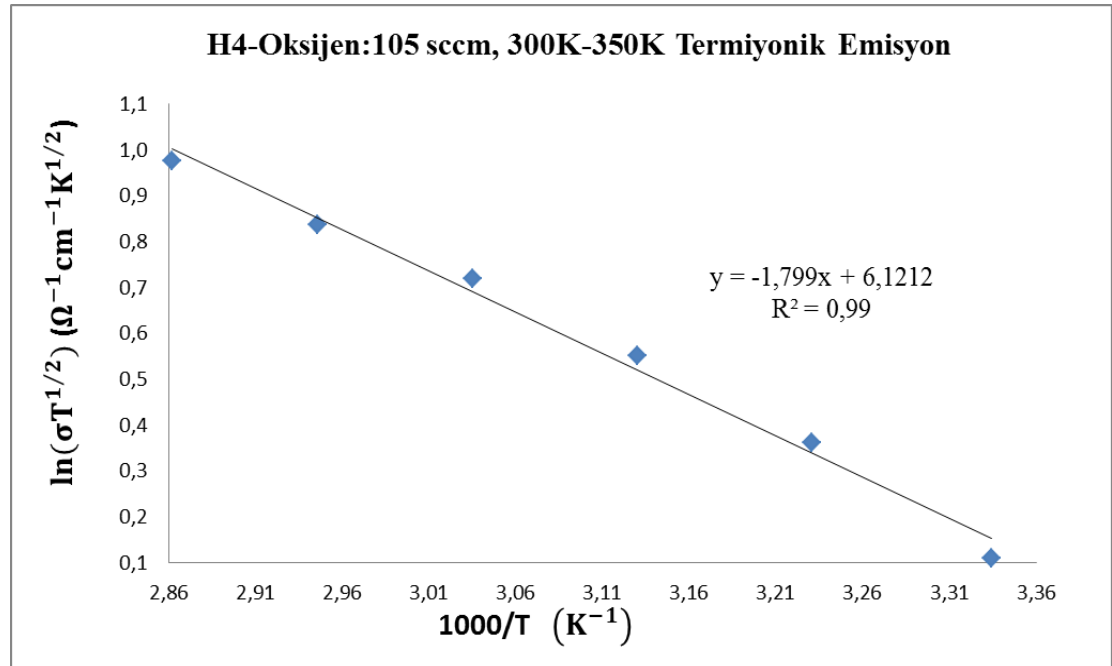
Şekil 4.17 D7 numunesinin 140K-250K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği



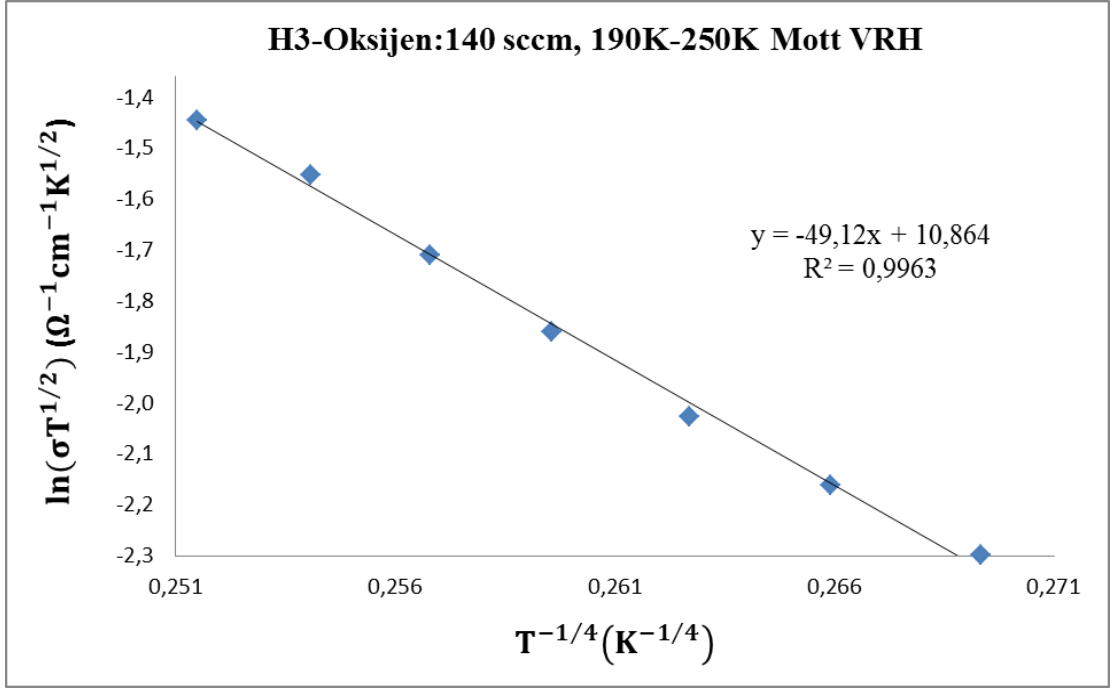
Şekil 4.18 D7 numunesinin 300K-390K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafiği



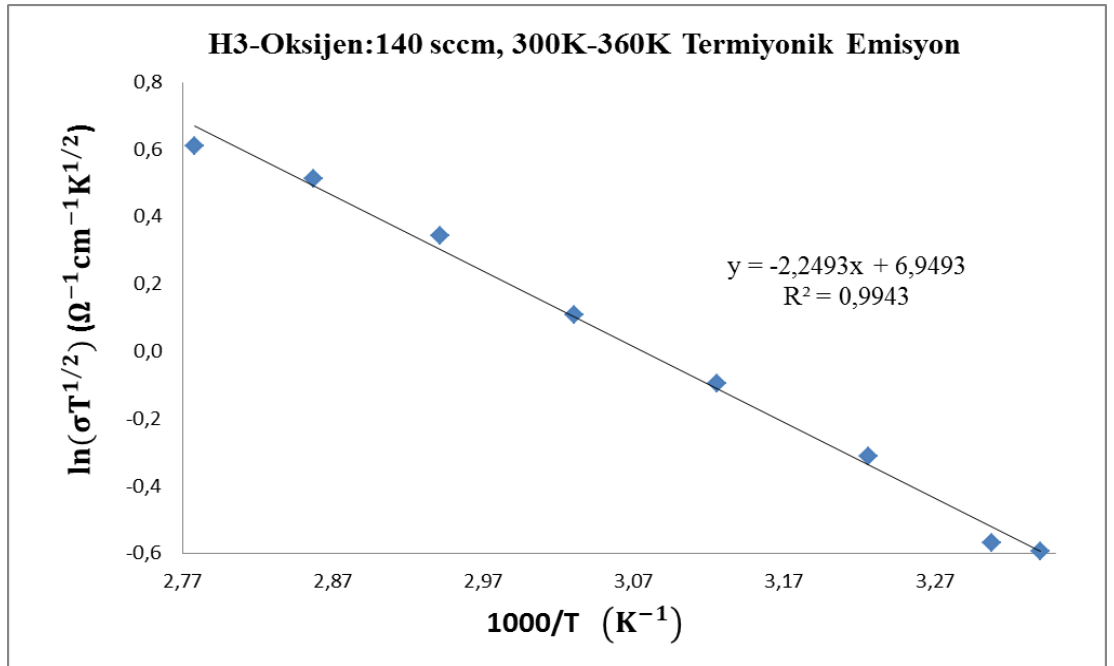
Şekil 4.19 H4 numunesinin 190K-250K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği



Şekil 4.20 H4 numunesinin 300K-350K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafiği



Şekil 4.21 H3 numunesinin 190K-250K’de Mott VRH modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiği



Şekil 4.22 H3 numunesinin 300K-360K’de Termiyonik Emisyon modeli için fit edilmiş $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$ grafiği

Çizelge 4.5 CuO filmlerin akım iletim mekanizmaları

Numune Adı	Sıcaklık Aralığı (K)	Akım-İletim mekanizması
D2	180-280	Mott VRH
	310-390	Termiyonik Emisyon
H7	150-290	Mott VRH
	300-400	Termiyonik Emisyon
H5	190-260	Mott VRH
	300-400	Termiyonik Emisyon
H6	140-270	Mott VRH
	300-390	Termiyonik Emisyon
D7	140-250	Mott VRH
	300-390	Termiyonik Emisyon
H4	190-250	Mott VRH
	300-350	Termiyonik Emisyon
H3	190-250	Mott VRH
	300-360	Termiyonik Emisyon

Değişik oksijen akış hızlarında elde edilen CuO filmlerin elektriksel iletkenliği, düşük sıcaklık bölgesinde (100K-300K) Mott VRH akım iletim mekanizması ile açıklandığı için Mott parametreleri hesaplanmıştır.

Mott parametreleri şunlardır; $N(E_F)$ fermi seviyesinde lokalize durum yoğunluğu, α^{-1} lokalizasyon boyu, R hoplama mesafesi, W hoplama enerjisi, σ'_0 sıcaklıktan bağımsız üstel faktördür ve Mott VRH için çizilen $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiğinin doğrusal denklemindeki sabit sayıdır, T_0 karakteristik sıcaklık sabitidir. Mott VRH parametreleri denklem 4.5'den faydalanılarak bulunur.

$$T_{0,Mott} = \frac{\lambda\alpha^3}{k_B N(E_F)} \quad (4.5)$$

denklemlerle ifade edilir. Burada λ boyutsuz bir nicelik olup değeri yaklaşık olarak 18'dir, k_B Boltzman sabitidir. Bu denklemlerden yararlanılarak $N(E_F)$,

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^3}{kT_{0,Mott}} \quad (4.6)$$

bulunur. $T_{0,Mott}$, $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiğinin eğimi, α ise CuO'in Bohr yarıçapı olan 0.167 nm olarak alındı ve bu değerler denklem 4.6'da yerlerine konularak $N(E_F)$ değerleri bulundu.

Ortalama hoplama uzaklığı R,

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha k_B T N(E_F)} \right]^{1/4} \quad (4.7)$$

ifade edilir. Buradaki; T değeri ölçülen sıcaklık aralıklarının içerisinde alınan bir sıcaklık değeridir. Hoplama enerjisi W ise,

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (4.8)$$

ifade edilir (Yıldız vd. 2014). Denklem 4.5-4.8'den ve Mott VRH için çizilen $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafiklerden yararlanılarak hesaplanan Mott parametreleri çizelge 4.6-4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 Mott parametreleri; $N(E_F)$, T_0 , T , σ'_0

Numune Adı	Sıcaklık Aralığı (K)	T (K)	T_0 (K)	σ'_0 ($K^{1/2} \cdot cm$) ⁻¹	$N(E_F)$ ($eV^{-1} \cdot cm^{-3}$)
D2	180-280	230	15885401	189472.7	2.82×10^{21}
H7	150-290	220	10170275	4565323.8	4.41×10^{21}
H5	190-260	225	1485420	22697.3	3.02×10^{22}
H6	140-270	205	12864362	3964934.9	3.49×10^{21}
D7	140-250	195	10414490	288081.9	4.31×10^{21}
H4	190-250	220	3989506	37123.3	1.12×10^{22}
H3	190-250	220	5821480	52260.7	7.70×10^{21}

Çizelge 4.7 Mott parametreleri; R , W , αR

Numune Adı	Sıcaklık Aralığı (K)	R (nm)	W (meV)	αR
D2	180-280	1.02	80.46	6.09
H7	150-290	0.92	69.61	5.51
H5	190-260	0.65	43.76	3.38
H6	140-270	0.99	70.01	5.95
D7	140-250	0.95	63.96	5.71
H4	190-250	0.73	55.09	4.36
H3	190-250	0.80	60.54	4.79

Mott ve Davis'e göre; αR değerlerinin 1'den büyük, W hoplama enerjisinin de, $k_B T$ (25.85 meV)'den büyük olması gerekir (Chandle vd. 2011). Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi değerler bu teoriye uygundur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada D.C. manyetik (magnetron) saçtırma (sputtering) tekniğiyle dört saatlik saçtırma sürelerinde farklı oksijen gazı akış hızlarında cam alt tabakalar üzerinde CuO (Bakır II Oksit) ince filmler büyütülmüş, bu şekilde akış hızlarından yola çıkarak oksijen gaz basıncının filmler üzerindeki etkisi, elektriksel ve optiksel ölçümler yapılarak incelenmiştir. Üçüncü bölümde belirtildiği üzere akış hızı ve basınç arasında doğru orantı vardır yani akış hızındaki değişimler aynı doğrultuda gaz basıncını da değiştirir.

CuO filmlerin optiksel ölçümleri, Shimadzu UV-3600 cihazı yardımıyla 300-2500 nm dalga boyu arasında yapılmıştır. Bu ölçümlerle elde edilen UV-VIS spektrumları yardımıyla numunelerin geçirgenlikleri ve bant aralıkları tespit edilmiştir.

Şekil 4.1 incelendiğinde, 2500 nm dalga boyunda en düşük geçirgenliğin oksijen gazı kullanılmayan ve bu yüzden akış hızı 0 sccm olarak belirtilen D2 numunesinde olduğu görülmüştür, bu da oksijen gazı basıncıyla geçirgenliğin arttığı anlamına gelmektedir. Ancak geçirgenlik, oksijen basıncının artmasıyla doğru orantılı bir artış göstermemektedir. Örnek olarak; 2500 nm’de oksijen basıncı (105 sccm) daha düşük olan H4 numunesinin geçirgenliğinin, oksijen basıncı (140 sccm) daha yüksek olan H3 numunesinin geçirgenliğinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

UV-VIS spektrumları kullanılarak filmlerin soğurma katsayıları bulunmuş ve bundan yararlanılarak direk bant aralığını bulabilmek için şekil 4.2’de $(\alpha hv)^2 - hv$ grafiği, indirek bant aralığını bulabilmek için de şekil 4.3’de $(\alpha hv)^{1/2} - hv$ grafiği çizilmiştir. Bu grafikler fit edilmiş ve şekil 4.4-4.5’te gösterilmiştir. Fit edilen eğrilerin denklemlerinden yararlanılarak, filmlerin direk ve indirek bant aralıkları bulunmuştur ve çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde, değişik oksijen basınçlarında elde edilen CuO filmlerin direk bant aralığının 2.04-2.27 eV arasında değiştiği, indirek bant aralığının da 0.85-1.8 eV arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bulunan değerlerin; direk bant aralığını 2.12 eV olarak bulan (Yang vd. 2009), indirek bant aralığını 1.2-1.7 eV bulan (Shanid ve Khadar 2008) yayınlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

CuO filmlerin elektriksel iletkenlikleri, düşük sıcaklık (100K-300K) ve yüksek sıcaklıkta (300K-400K) bilgisayar kontrollü düzenekler aracılığıyla hesaplanmıştır. Düşük sıcaklık (100K-300K) bölgesi için, Cryostat cihazında düşük basınçta (10^{-4} torr) vakuma alınan numuneler 100K'e kadar soğutulmuş ve sıcaklık 300K'e çıkana kadar, akımın sıcaklıkla değişim ölçümleri alınmıştır. Yüksek sıcaklık bölgesinde ise karanlık kutuda 300K oda sıcaklığında bulunan numuneler 400K'e kadar ısıtılmış ve akımın sıcaklıkla değişim ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden ve denklem 4.4'den faydalanılarak öz iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Elektriksel iletkenlik, şekil 4.7'de görüldüğü gibi oksijen basıncıyla değişmiştir ve en iyi iletkenliğe sahip olan numune oksijen basıncı 20 sccm olan H7 numunesi olduğu gözlemlenmiştir. Oksijen basıncına sahip olmayan (0 sccm) D2 numunesinin ise en düşük iletkenliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Akış hızı artarken 35 sccm'ye kadar iletkenliğin arttığı, akış hızı daha da artınca iletkenliğin azaldığı görülmüştür ayrıca akım-sıcaklık ölçümlerinden yararlanılarak CuO filmlerin aktivasyon enerjileri bulunmuştur. Aktivasyon enerjilerini bulabilmek için $\ln \sigma T^{1/2} - 1000/T$ grafiğinin eğiminden yararlanılmıştır. Aktivasyon enerjileri; düşük sıcaklık bölgesinde (100K-300K) 0.043-0.078 eV aralığında, yüksek sıcaklık bölgesinde (300K-400K) ise 0.145-0.202 eV, aralığında bulunmuştur. Bu sonuçların; düşük sıcaklık bölgesi için aktivasyon enerjisini 0.046 eV olarak bulan (Yun ve Koh 2012), yüksek sıcaklık bölgesi için aktivasyon enerjisini 0.15 eV olarak bulan (Serin vd. 2005) yayınlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Farklı oksijen basınçlarında büyütülen CuO ince filmlerin elektriksel iletkenlik mekanizmalarını anlamak için elektriksel ölçümlerden faydalanılmış, düşük sıcaklık bölgesinde (100K-300K) filmlerin elektriksel iletkenliği Mott VRH akım iletim mekanizması ile açıklanmıştır. Mott VRH akım iletim mekanizması için çizilen $\ln(\sigma T^{1/2}) - T^{-1/4}$ grafikleri fit edilerek mekanizmanın geçerli olduğu sıcaklık aralıkları belirlenmiştir ve çizelge 4.5'te gösterilmiştir, ayrıca filmlerin Mott parametreleri hesaplanmış, bulunan sonuçlar çizelge 4.6-4.7'de gösterilmiştir ve sonuçların literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Chandle vd. 2011). Yüksek sıcaklık bölgesinde (300K-400K) filmlerin elektriksel iletkenliği termiyonik emisyon modeli ile açıklanmıştır. Termiyonik emisyon modeli için çizilen $\ln(\sigma T^{1/2}) - 1000/T$,

grafikleri fit edilerek modelin geçerli olduğu sıcaklık aralıkları belirlenmiştir ve çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Tüm bu verilerden yola çıkarak şu söylenilebilir: D.C. magnetron sputtering cihazının kaplama odacığı kısmına belirli akış hızlarında verilen oksijen gazı, sputtering işlemine olumlu bir katkı vermiştir. Oksijen gazı basıncına sahip olan tüm filmlerin elektriksel ve optiksel özellikleri, oksijen gazı basıncı olmayan (0 sccm) filmde daha iyidir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir: Oksijen gazının, parlama boşalması sırasında gaz basıncını yükseltmesiyle birlikte, oksijen gazı molekülleri saçılan parçacıkları ışınlar ve büyütülen filmlerin içine oksijen gazı molekülleri girer. Bu şekilde oksijen atomları katkı atomu gibi davranır, p-tipi yarıiletken olan CuO filmlerin alıcı (akseptör) yoğunluğunu arttırabilir ve bu da filmlerin daha iyi elektriksel ve optiksel özelliğe sahip olmasını sağlar. Oksijen gaz basıncı belirli bir değerde en iyi sonucu vermiştir, bunun nedenini de şöyle açıklayabiliriz: Oksijen atomları, CuO filmlerin içerisindeki boşluklara girerek katkı atomu gibi davranır, filmlerin yapısında belirli miktarda boşluklar vardır ve bu miktardan fazlası filmlerin yapısına giremediğinden filmlerin elektriksel ve optiksel özelliklerine katkıda bulunamaz. Elde edilen verilerden yararlanılarak, bütün filmler içinde oksijen gaz basıncı 35 sccm olan H5 numunesinin, en kaliteli olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Balamurgan, B. and Metha, B. R. 2001. Optical and Structural Properties nanocrystalline Copper Oxide Thin Films Prepared by Activated Reactive Evaporation Thin Solid Films, 396, 90-96.
- Bayansal, F., Çetinkara, H.A., Kahraman, S., Çakmak, H.M. and Güder, H.S. 2008. Nano Structured CuO films prepared by simple solution methods: Plate-like, needle-like and network-like architectures. *Ceramics International*, 38, 1859-1866.
- Bayansal, F. 2009. Katkılı-katkısız bakır oksit ince filmlerin gaz algılama özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 91, Tokat.
- Bayraktaroğlu, D. 2007. Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle polimer malzemelerin sic ile kaplanması. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, 71, İstanbul.
- Boucher, R. 2005. The structural and optical property dependence of disordered copper oxide on oxygen content. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 66, 906-910.
- Ceylan, H. M. 2013. CuGaSe₂ ince filmlerin yapısal elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 63, Denizli.
- Chandle, N., Mehta, N. and Kumar, A. 2011. Estimation of Mott parameters in amorphous Se₈₀Te₂₀ and Se₈₀Te₁₀M₁₀ alloys. *Vacuum*, 86, 480-482.
- Chen, A., Yang, G., Long, H., Li, F., Li, Y. and Lu, P. 2009. Nonlinear optical properties of laser deposited CuO thin films. *Thin Solid Films*, 517, 4277-4280.
- Chu, C., Lu, H., Lo, C., Lai, C. and Wang, Y. 2009. Physical properties of copper oxide thin films prepared by d.c. reactive magnetron sputtering under different oxygen partial pressures. *Physica B*, 404, 4831-4834.
- Çam, E. 2012. D.C.Magnetron sputtering yöntemiyle bakır oksit filmlerin büyütülmesi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 35, Ankara.
- Çoşkun, M. 2011 DC manyetik alan sıçratma tekniği ile üretilen Co₉₀Fe₁₀ nano filmlerin yapısal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 56 Kilis.

- Danışman, M. 2011. Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle üretilen Ni-Cr alaşımlarının gerinim ölçerlerde kullanımı ve uygulanması. Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 132, İstanbul.
- Depla, D., Mahieu S. and Gryse, R. 2009. Magnetron sputter deposition: Linking discharge voltage with target properties. Thin Solid Films, 517, 2825-2839.
- Fox, M. 2001. Optical Properties of Solids. Oxford University.
- Gençer, Ö. 2009. Bakır ve bakır oksit nanopartiküllerinin ultrasonik sprey piroliz (usp) yöntemi ile üretimi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, İstanbul.
- Goebel, D. M. and Katz, I. 2008. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. John Wiley & Sons, 508, New York.
- Gökçe-Polat, E. 2009. Sol-gel yöntemi ile bakır ve kalay katkılı ZnO ince filmlerin üretilmesi, optik ve mikroyapısal karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 64, Gebze.
- Gölcür, D. 2012. CdInTe ince filmlerinin elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 102, Rize.
- Gürakar, S. 2009. Antimon katkılı kalay oksit/bakır oksit metal diyotların elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 81, Ankara.
- Hasançebi, Ö. 2006. Sol-gel yöntemiyle hazırlanan bakır oksit ince filmlerin elektriksel, yapısal ve optiksel özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 55, Ankara.
- Irmak, S. 2006. Flor katkılı CdO yarıiletken bileşiğinin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi. Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 92, Eskişehir.
- Kars-Durukan, İ. 2013. Al:ZnO ince filmlerinin büyütülmesi ve biyo-sensör özelliklerinin incelenmesi. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 107, Ankara.
- Kılınç, T. 2006. $Zn_{1-x}Fe_xS$ ince filmlerin fiziksel özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 46, Kahramanmaraş.

- Kittel, C. 2014. Katı Hal Fiziğine Giriş. Palme yayınevi, 680, Ankara.
- Koç, M. 2012. Sol-jel yöntemiyle elde edilen alimünyum, antimon ve bakır katkılı nano tanecikli TiO₂ ince filmlerinin optiksel, yapısal ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 86, Konya.
- Kojima, M., Kato, H. and Imai, A. 1988. Electronic Conduction of Tin Oxide Thin Films Prepared by Chemical Vapor Deposition. Journal of Applied Physics, 64, 1902.
- Kose, S., Atay, F., Bilgin, V. and Akyuz, I. 2008. Some physical properties of copper oxide films: The effect of substrate temperature. Materials Chemistry and Physics, 111, 351-358.
- Natsume, Y. and Sakata, H. 2002. Electrical and optical properties of zinc oxide films post- annealed in H₂ after fabrication by sol-gel process. Materials Chemistry and Physics, 78, 170-176.
- Neamen, D. A. 2003. Semiconductor Physics and Devices. McGraw-Hill, 729, New York.
- Nebi, M. 2013. Reaktif RF saçırma yöntemi ile TiN ince filmlerinin üretilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 81, Eskişehir.
- Nolan, M. 2008. Defects in Cu₂O, CuAlO₂ and SrCu₂O₂ transparent conducting oxides. Thin Solid Films, 516, 8130-8135.
- Öztürk, A. 2008. Katkısız SiO₂-TiO₂ ince filmlerin elde edilmesi ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 46, Kocaeli.
- Özyurt-Kuş, F. 2010. Bakır oksit/çinko oksit heteroeklem yapılarının elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 101, Ankara.
- Pakma, O. 2008. Metal/TiO₂/C-Si/metal yapılarında yüzey şartlarının elektriksel Belirtenler üzerinde etkisi. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 40, Ankara.
- Rastkar, A.R., Niknam, A.R. and Shokri, B. 2009. Characterization of copper oxide nanolayers deposited by direct current magnetron sputtering Thin Solid Films, 517, 5464-5467.

- Reddy, A., Park, H., Reddy, V., Reddy, K.V.S., Sarma, N.S., Kaleemulla, S., Uthanna, S. and Reddy, P. 2008. Effect of sputtering power on the physical properties of dc magnetron sputtered copper oxide thin films. *Materials Chemistry and Physics*, 110, 397-401.
- Sarkar, J. 2013. *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*. Engineering Consultant at Praxair, 608, New York.
- Serin, N., Serin, T., Horzum, Ş. and Çelik, Y. 2005. Annealing effects on the properties of Copper oxide thin films prepared by chemical deposition. *Semiconductor Science and Technology*, 20, 398-401.
- Serin, T., Yıldız, A., Serin, N., Yıldırım, N., Ozyurt, F and Kasap, M., 2010. *J. Electron Mater*, 39, 1152.
- Serin, T., Yıldız, A., Horzum Şahin, Ş. and Serin, N. 2011. Extraction of important electrical parameters of CuO. *Physica B*, 406, 575-578.
- Shanid, M. and Khadar, A. 2008. Evolution of nanostructure, phase transition and band gap tailoring in oxidized Cu thin films. *Thin Solid Films*, 516, 6245-6252.
- Singh, I. and Bedi, R.K. 2011. Studies and correlation among the structural, electrical and gas response properties of aerosol spray deposited self assembled nanocrystalline CuO. *Applied Surface Science*, 257, 7592-7599.
- Soylu, M. 2006. Atmalı katodik vakum ark depolama sistemiyle üretilen ZnO'nun elektriksel iletkenliği ve ısı ileme değişimi. Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 115, Adana.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akın, S. 2012. İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 389-401.
- Sze, S.M. and Ng, K.K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, 815, New Jersey.
- Şendil, Ö. 2010. ZnO ince filmlerinin kimyasal püskürtme tekniği ile üretilmesi ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 50, Kütahya.
- Şirin, M. 2012. ZnO ince film örneklerinde optik ve xrf parametrelerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Rize Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 58, Rize.
- Uzun, Ş. 2012. Sol-gel yöntemiyle büyütülen indiyum katkılı çinko oksit filmlerinin elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 72, Ankara.

- Yıldırım, N. 2009. Bakır oksit/Titanyum dioksit heteroeklem yapıların elektriksel ve optiksel özelliklerinin incelenmesi. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, Ankara.
- Yıldız, A. 2008. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ yarıiletkenin elektron iletim özellikleri. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 139, Ankara.
- Yıldız, A., Horzum, Ş., Serin, T. and Serin, N. 2014. Hopping conduction in In-doped CuO thin films. *Applied Surface Science*, 318, 105-107.
- Yun, S. and Koh, J. 2012. The ac conductivity and complex impedance of CuO-doped $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})\text{TiO}_3$ ceramic. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73, 568-572.
- Zhang, Q., Zhang, K., Xu, D., Yang, G., Huang, H., Nie, F., Liu, C. and Yang, S. 2014. CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties and applications. *Progress in Materials Science*, 60, 208-337.
- Zhu, H., Zhang, J., Li, C., Pan, F., Wang, T. and Huang, B. 2009. Cu_2O thin films deposited by reactive direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 517, 5700-5704.
- Wasa, K., Kanno, I. and Kotera, H. 2012. *Handbook of Sputter Deposition Technology*, Elsevier, 660, Massachusetts.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan OT

Doğum Yeri : Mamak

Doğum Tarihi : 20/02/1985

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Türközü Şehit Nuri Pamir (Y.D.A.L) (1999-2003)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü
(2005-2010)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (Eylül 2011-Ocak 2015)

Uluslararası Kongre Sunum

Serin, T., Gürakar, S., Ot, H., Yıldız, A. and Serin, N. 2014. The Effect of Oxygen Flow Rate on the Electrical Properties of CuO Films Coated By DC Magnetron Sputtering Technique, 10th International Conference on Physics of Advanced Materials, 22-28 September 2014. Alexandru Ioan Cuza University of Iași, Iași/ ROMANIA.