



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Au/p-CuO/n-Si/Ag YAPILARIN SICAKLIK BAĞIMLI
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İBRAHİM TUTUŞ

Ağustos 2017

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Au/p-CuO/n-Si/Ag YAPILARIN SICAKLIK BAĞIMLI
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İBRAHİM TUTUŞ

Yüksek Lisans Tezi

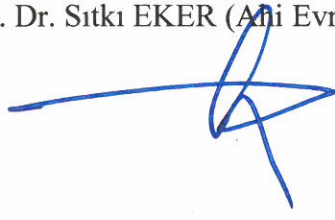
Danışman

Doç. Dr. Funda AKSOY AKGÜL

Ağustos 2017

İbrahim TUTUŞ tarafından Doç. Dr. Funda AKSOY AKGÜL danışmanlığında hazırlanan “**Au/p-CuO/n-Si/Ag Yapıların Sıcaklık Bağımlı Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Sıtkı EKER (Anı Evran Üniversitesi)



Üye : Doç. Dr. Funda AKSOY AKGÜL (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)



Üye : Doç. Dr. Güvenç AKGÜL (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



İbrahim TUTUŞ

ÖZET

Au/p-CuO/n-Si/Ag YAPILARIN SICAKLIK BAĞIMLI ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

TUTUŞ, İbrahim

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Funda AKSOY AKGÜL

Ağustos 2017, 85 sayfa

Solüsyon-bazlı işlemler, aygıt uygulamaları için malzeme sentezlenmesinde üretim maliyetini indirmek için kullanılır. Bu çalışmada, p/n heteroeklemlili yapılar oluşturmak için p-tipi küprik oksit ince filmleri uygun maliyetli kimyasal depolama metodu ile n-tipi (100)-yönelimli kristal silisyum üzerine büyütüldü. Elde edilen yapıların sıcaklık bağımlı akım-gerilim (I - V) karakteristikleri, karanlık ortamda 220-360 K sıcaklık aralığında incelendi. İdealite faktörü (n), doyum akımı (I_0) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) gibi temel diyot parametreleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlendi. Elektriksel ölçümler yapıların oda sıcaklığında iyi tanımlı doğrultucu davranış sergilediğini ve ± 2 V gerilim değerlerinde $\sim 10^2$ doğrultma oranına ve $n = 2,06$ değerinde küçük idealite faktörüne sahip olduğunu gösterdi. Elde edilen n , I_0 and Φ_B değerleri sırasıyla 3,02 – 1,79, $2,06 \times 10^{-9}$ – $6,21 \times 10^{-8}$ A ve 0,62 – 0,9 eV aralığında bulundu.

Anahtar Sözcükler: Küprik oksit, silisyum, metal oksit ince filmi, kimyasal depolama yöntemi, p/n heteroeklemi, sıcaklık bağımlı I - V

SUMMARY

INVESTIGATION OF TEMPERATURE DEPENDENT ELECTRICAL PROPERTIES OF Au/p-CuO/n-Si/Ag STRUCTURES

TUTUŞ, İbrahim

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Funda AKSOY AKGÜL

August 2017, 85 pages

Solution-based processes are used to synthesize materials for device applications to reduce material production and device fabrication costs. In this work, p-type cupric oxide thin films were deposited onto n-type (100)-oriented crystalline silicon wafer through cost-effective chemical bath deposition method in order to construct p/n heterojunction structures. Temperature dependent current-voltage (I - V) characteristics of the fabricated structures were investigated in the range of 220-360 K under dark conditions. Important diode parameters such as ideality factor (n), dark saturation current (I_0) and barrier height (Φ_B) were evaluated as a function temperature. Electrical measurements revealed that the structures have a well-defined rectifying behavior with a good rectification ratio of $\sim 10^2$ at ± 2 V and a relatively small ideality factor of $n = 2,06$ at room temperature. The estimated values of the n , I_0 and Φ_B were found to be between 3,02 – 1,79, $2,06 \times 10^{-9}$ – $6,2 \times 10^{-8}$ A and 0,62 – 0,9 eV, respectively.

Keywords: Kupric oxide, silicon, metal oxide thin film, chemical bath deposition, p/n heterojunction, temperature dependent I - V

ÖN SÖZ

Bilgi ve iletişim teknolojisinde önemli etkileri olan yüksek hızlı transistörler ve yarıiletken lazerler gibi birçok yeni nesil mikroelektronik ve enerji dönüşüm aygıtlarının temel yapıtaşları olan yarıiletken heteroeklemler, hem fonksiyonel olarak hem de ara bağlantı elemanları olarak önemli işlevler üstlenirler. Bu yüksek lisans çalışmasında, p-tipi küprik oksit ince filmi kimyasal depolama yöntemi ile n-tipi kristal silisyum üzerine kaplanarak p/n heteroeklemlili diyotların üretimi yapıldı ve elde edilen yapıların akım-gerilim (I - V) karakteristikleri ve akım iletim mekanizmaları sıcaklığa bağlı olarak incelendi. Küprik oksit/Silisyum heteroeklemlili diyot yapılarındaki elektriksel özelliklerin daha iyi anlaşılması, gelecekte bu yapıları içeren ideal elektriksel karakteristiklere sahip uzun ömürlü diyotların, transistörlerin ve fotovoltaiik hücrelerin üretimini mümkün kılacaktır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında çalışmalarıma yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Funda AKSOY AKGÜL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil tüm öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen babam Zeki Abdil TUTUŞ'a, annem Zehra TUTUŞ'a, kardeşlerime ve sonsuz desteğinden, sabrından ve anlayışından dolayı hayat arkadaşım Hacer TUTUŞ'a ithaf ediyorum.

Bu çalışmaya FEB 2014/26-BAGEP numaralı proje ile finansal destek sağlayan Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne ve çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
BÖLÜM III TEORİK BİLGİLER	18
3.1 Yarıiletkenler	18
3.2 Yarıiletken p/n Eklemleri	23
3.3 Yarıiletken p/n Heteroeklemlerde Enerji Bant Yapısı	28
3.4 Ani Anizotip Eklemlerde İletim Mekanizmaları	30
3.5 Yarıiletken Materyalleri Analiz Yöntemleri	32
3.5.1 Yapısal analiz.....	32
3.5.1.1 X-ışını kırınımı (XRD) tekniği	33
3.5.2 Optik analiz.....	36
3.5.2.1 Optik soğurma.....	36
3.5.3 Elektriksel analiz.....	39
3.5.3.1 Elektriksel iletkenlik	39
3.5.3.2 Hall etkisi ve mobilite	39
3.5.4 Morfolojik analiz	41
3.5.4.1 Taramalı elektron mikroskopisi (SEM)	41
3.5.4.2 Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM)	43
BÖLÜM IV DENEYSEL TEKNİKLER.....	46
4.1 Küprik Oksit İnce Filmler	46
4.1.1 Kimyasal depolama yöntemi	46
4.1.2 Cam alttabanların temizlenmesi.....	47
4.1.3 İnce filmlerin üretimi	47
4.1.4 İnce filmlerin tavlama	49

4.1.5 İnce filmlerin karakterizasyonu	49
4.1.5.1 Yapısal özellikler	49
4.1.5.2 Morfolojik özellikler	49
4.1.5.3 Optik özellikler	49
4.1.5.4 Elektriksel özellikler	49
4.2 Au/p-CuO/n-Si/Ag Heteroeklemlı Yapılar	50
4.2.1 Silisyum altıtabanların temizlenmesi	51
4.2.2 Heteroeklemlı yapıların üretimi	51
4.2.3 Heteroeklemlı yapıların analizi	52
4.2.3.1 Elektriksel özellikler	52
BÖLÜM V BULGULAR VE TARTIŞMA	54
5.1 Küprik Oksit İnce Filmlerinin Fiziksel Özellikleri	54
5.1.1 Yapısal özellikler	54
5.1.2 Morfolojik özellikler	57
5.1.3 Optik özellikler	60
5.1.4 Elektriksel özellikler	61
5.2 Au/p-CuO/n-Si/Ag Yapıların Elektriksel Özellikleri	62
5.2.1 Oda sıcaklığındaki <i>I-V</i> karakteristikleri	62
5.2.2. Sıcaklığa bağılı <i>I-V</i> karakteristikleri	68
BÖLÜM VI SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR	77
ÖZ GEÇMİŞ	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Küprik oksitin kristalografik ve fiziksel özellikleri.....	4
Çizelge 3.1. Kristal sistemleri.....	34
Çizelge 4.1. Küprik oksit ince filmlerinin üretiminde kullanılan sol-jel çözeltisinin hazırlanma aşamaları	48
Çizelge 4.2. Küprik oksit ince filmlerinin üretim aşamaları	48
Çizelge 5.1. Yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filmlerinin yapısal özellikleri	57
Çizelge 5.2. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemli bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) diyot parametreleri	65
Çizelge 5.3. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemli bir yapının çeşitli sıcaklık değerlerindeki diyot parametreleri	69
Çizelge 5.4. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemli bir yapının çeşitli sıcaklıklardaki parazitik direnç değerleri	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Küprik oksitin ve küproz oksitin optik soğurma katsayılarının bir karşılaştırması	3
Şekil 1.2. Küprik oksitin monoklinik kristal yapısı	3
Şekil 1.3. Küprik oksitin dört birim hücreli kristal yapısı	4
Şekil 3.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenler için direnç ve iletkenlik değerleri	19
Şekil 3.2. Silisyumun iki boyutlu kristal örgüsünün şematik gösterimi (düşük sıcaklıkta)	19
Şekil 3.3. Katkısız bir yarıiletkenin $T=0$ K (a) ve $T>0$ K (b) sıcaklıklarındaki enerji bant diyagramı	20
Şekil 3.4. n-katkılı silisyumun şematik gösterimi (a) ve $T>0$ K'daki enerji bantları (b)	21
Şekil 3.5. p-katkılı silisyumun şematik gösterimi (a) ve $T>0$ K'daki enerji bantları (b)	22
Şekil 3.6. p/n eklemine oluşum süreci	25
Şekil 3.7. İleri kutuplamadaki (a) ve ters kutuplamadaki (b) p/n eklemi ve potansiyel bariyeri	27
Şekil 3.8. Termal dengedeki enerji bant yapısının şematik gösterimi. (a) Ani p/n heteroeklem oluşmadan önce, (b) Ani p/n heteroeklem oluşuktan sonra	30
Şekil 3.9. Donnelly ve Milnes tarafından önerilen iki mekanizma grubunun şematik gösterimi	31
Şekil 3.10. Bragg Kırınım Yasası'nın şematik tasviri	34
Şekil 3.11. Bir X-ışını difraktometresinin geometrik düzeni	35
Şekil 3.12. Materyallerin ışıkla etkileşme biçimleri	36
Şekil 3.13. Yarıiletken materyallerdeki soğurma süreçleri	37
Şekil 3.14. Doğrudan (a) ve dolaylı (b) geçişler	37
Şekil 3.15. Bir taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi	42
Şekil 3.16. Bir atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi	44
Şekil 3.17. AFM problemleri	45
Şekil 4.1. Hall-etkisi ölçümünde kullanılan dört-nokta Van der Pauw geometrisi	50
Şekil 4.2. Üretilen bir Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili yapının şematik gösterimi	52
Şekil 4.3. Sıcaklık bağımlı $I-V$ ölçümleri için kullanılan düzeneğin şematik görünümü	53

Şekil 5.1. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprik oksit ince filminin XRD deseni	54
Şekil 5.2. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin XRD deseni	55
Şekil 5.3. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprik oksit ince filminin SEM resmi	58
Şekil 5.4. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin SEM resmi	58
Şekil 5.5. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprik oksit ince filminin AFM resmi	59
Şekil 5.6. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin AFM resmi	59
Şekil 5.7. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprik oksit ince filminin optik geçirgenlik (T) ve yansımaya (R) spektrumları	60
Şekil 5.8. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin optik geçirgenlik (T) ve yansımaya (R) spektrumları	60
Şekil 5.9. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) I - V karakteristiği	62
Şekil 5.10. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının termal dengede şematik enerji bant diyagramı	63
Şekil 5.11. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) yarı logaritmik I - V karakteristiği	65
Şekil 5.12. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) R_j - V karakteristiği	66
Şekil 5.13. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) çift logaritmik I - V karakteristiği	68
Şekil 5.14. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının 220 K - 360 K arasında değişen çeşitli sıcaklıklardaki yarı logaritmik I - V karakteristiği	68
Şekil 5.15. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının idealite faktörü n 'nin sıcaklığa bağlı değişimi	70
Şekil 5.16. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının bariyer yüksekliği Φ_B 'nin sıcaklığa bağlı değişimi	70
Şekil 5.17. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının 220-360 K sıcaklık aralığında bariyer yüksekliğinin idealite faktörüne karşı değişimi	72

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
A	Alan
Al	Alüminyum
As	Arsenik
A^*	Etkin Richardson sabiti
α	Soğurma katsayısı
$AgNO_3$	Gümüş nitrat
B	Manyetik alan
Bi	Bizmut
CuO	Küprik oksit
Cu_2O	Küproz oksit
D	Difüzyon sabiti
ΔE_c	İletkenlik bandındaki süreksizlik
ΔE_v	Valans bandındaki süreksizlik
ϵ	Dielektrik sabiti
E_a	Alıcı seviyesi
E_C	İletkenlik bandının en alt seviyesi
E_d	Donör seviyesi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_v	Valans bandının en üst seviyesi
eV	Elektron volt
P	Fosfor
HF	Hidroflorik asit
H_2O_2	Hidrojen peroksit
HNO_3	Nitrik asit
$h\nu$	Foton enerjisi
I	Akım
In	İndiyum

I_0	Doyum akımı
k	Boltzman sabiti
$k\Omega$	Kiloohm
n	Diyot idealite faktörü
k_B	Boltzman sabiti
m^*	Etkin kütle
$M\Omega$	Megaohm
Li	Lityum
N_a	Alıcı kirlilik yoğunluğu
N_d	Verici kirlilik yoğunluğu
N_i	Saf taşıyıcı yoğunluğu
nm	Nanometre
μ	Mobilite
μm	Mikrometre
ϕ	İş fonksiyonu
Φ_B	Bariyer yüksekliği
χ	Elektron ilgisi
λ	Dalgaboyu
σ	Öziletkenlik
q	Elektron yükü
R	Optik geçirgenlik yüzdesi
R_H	Hall katsayısı
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Şönt direnci
Si	Silisyum
SnO_2	Kalay Oksit
T	Optik yansımaya yüzdesi
τ	Yaşam ömrü
TiO_2	Titanyum dioksit
X	Geçiş katsayısı
V_D	Yerleşik (built-in) voltaj
v_d	Sürüklenme hızı
V_0	Bariyer potansiyeli

V_H	Hall voltajı
ZnO	Çinko oksit

Kısaltmalar	Açıklama
CRT	Cathode Ray Tube
EDXA	Energy Dispersive X-ray Analysis
EDS	Energy-dispersive X-ray Spectrometry
FESEM	Field Emmission Scanning Electron Microscopy
FWHM	Full Widths at Half Maximum
ITO	Indium Tin Oxide
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
LED	Light Emitting Diode
NIR	Near Infrared
SEM	Scanning Electron Microscopy
SCLC	Space-Charge-Limited Current
SILAR	Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction
TEM	Transmission Electron Microscopy
HRTEM	High Resolution Transmission Electron Microscopy
UV	Ultraviolet
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-ray Diffraction
VIS	Visible

BÖLÜM I

GİRİŞ

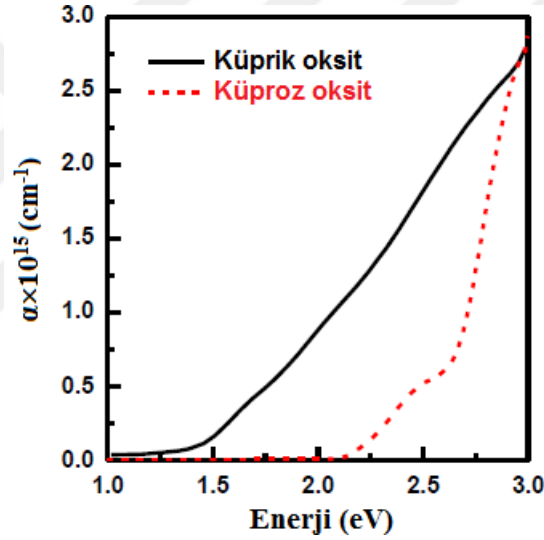
Heteroeklem, kristal durumdaki benzer olmayan iki materyal arasında oluşan ve kristal yapının arayüzey boyunca sürekli olduğu bir eklemdir. Yarıiletken p/n heteroeklemler yapılar, ilk olarak Preston tarafından 1950 yılında tasarlandı (Preston, 1950). Daha sonra Gubanov n/n, p/p ve p/n yapılarından oluşan heteroeklemlerin analizini yaptı (Gubanov, 1951). Shockley ise tasarladığı bir devre aygıtında, bir p/n eklemının geçiş bölgesinde yasak bant aralığının büyüklüğündeki değişimi kullandı (Shockley, 1951). Kroemer 1957 yılında yaptığı çalışmada, transistörlerdeki enjeksiyon verimini artırmak için geniş bant aralıklı emiter olarak heteroeklem kullanımını önerdi (Kroemer, 1957).

1950'li yılların sonuna doğru yarıiletken materyallerin üretilmesi ve saflaştırılması ile ilgili malzeme teknolojisinde meydana gelen gelişmeler, heteroeklemler ile ilgili deneysel çalışmaların yapılabilmesine olanak sağladı. O zamanlardan bugüne kadar çok sayıda bilimsel çalışmaya konu olan yarıiletken heteroeklemler, yüksek hız ve optoelektronik alanındaki bilimsel çalışmalara konu oldu ve bu çalışmalar 2000 yılında Dr. Zhores Alferov ve Dr. Herbert Kroemer'e Fizik alanında Nobel Ödülü'nü kazandırdı. Günümüzde bilgi ve iletişim teknolojisinde önemli etkileri olan yüksek hızlı transistörler ve yarıiletken lazerler gibi birçok yeni nesil mikroelettronik ve enerji dönüşüm aygıtlarının temel yapıtaşı olan yarıiletken heteroeklemler, hem fonksiyonel olarak hem de ara bağlantı elemanları olarak önemli işlevler üstlenirler. Aynı zamanda ışık yayan diyotlar (LED), fotodedektörler, güneş pilleri ve bunun gibi birçok önemli uygulamada yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (Sze, 1981).

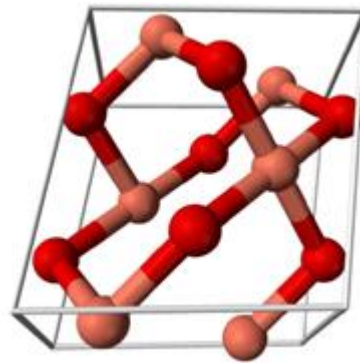
Yüksek performansa sahip düşük maliyetli aygıtların geliştirilmesinde potansiyel optoelektronik uygulaması olan, ucuz ve insan sağlığı için zararsız materyallere gereksinim duyulmaktadır. Bu materyallerden oksit yarıiletkenler, sahip oldukları mükemmel elektronik ve optik özelliklerinden dolayı optoelektronik uygulamalar için potansiyel bir aday olarak öne çıkarlar (Xiang vd., 2011; Scheer vd., 2012). Oksit yarıiletkenler yüksek optik geçirgenlikleri, kimyasal ve termal kararlılıkları ve düşük sıcaklıklarda üretilebilmeleri nedeniyle bilim dünyasında en çok ilgiyi çeken malzemeler arasındadır. Son zamanlarda geliştirilen oksit-tabanlı geçirgen elektronik aygıtlara örnek olarak morötesi (UV) algılayıcılar, yarı-geçirgen güneş hücreleri ve ince film transistörler

verilebilir. Farklı metal oksit yarıiletkenler arasında çok az sayıda p-tipi yarıiletken mevcuttur. Bakır oksit, kristal yapısındaki bakır boşluklarından dolayı doğal bir p-tipi yarıiletkenidir ve doğada bol miktarda bulunmaktadır (Zhang vd., 2013; Musselman vd., 2012). p-tipi iletkenliği, esas olarak yapısındaki fazla oksijenden veya bakır boşluklarından kaynaklanır. İyon örgüsündeki bakır boşlukları ana kirlilik merkezleri olup yapıda alıcı merkezleri oluştururlar. Kristal yapıdaki pozitif yük (katyon) eksikliğinin miktarı, taşıyıcı yoğunluğunu önemli derecede etkiler ve valans bandının üstünde yer alan boşluk durumlarını oluştururlar. Bakır oksit bileşik yarıiletkenleri, optik ve elektronik özellikleri yalıtkandan metalik iletkene ayarlanabilen nadir materyallerden biridir. Yasak bant enerjileri 2,1 eV'den, güneş hücresi uygulamalarında maksimum verimliliğin elde edildiği güneş spektrumunun tam ortasına denk gelen kızılötesi bölgesindeki 1,4 eV'ye değişir. Bakır oksit bileşiklerinin birbirinden belirgin şekilde farklı olan üç fazı vardır. İnce film üretim teknolojiler kullanılarak elde edilebilen bu fazlar Cu_2O , Cu_4O_3 ve CuO 'dur ve her bir fazdaki bakır atomunun oksidasyon durumu birbirinden farklıdır. Küproz oksit (bakır-I oksit) ve küprik oksit (bakır-II oksit) olarak isimlendirilen Cu_2O ve CuO fazları, farklı kristal ve fiziksel özelliklere sahip kararlı iki formdur (Meyer vd., 2012). Küproz oksit, maliyeti düşük güneş hücrelerinde soğurucu tabaka olarak yaygın şekilde çalışılmaktadır (Shao vd., 2012; Xiang vd., 2011; Musselman vd., 2012; Ghadimkhani vd., 2013); fakat geniş optik bant aralığı (~2,1 eV), tek-eklemli güneş hücrelerinde yüksek dönüşüm verimliliği elde etmek için uygun değildir. Diğer taraftan küprik oksit, soğurucu malzeme olarak güneş hücresi uygulamaları için ideal olan ~1,5 eV'lik doğrudan bant aralığı değerine sahiptir (Abdel ve Roushdy, 2009). Sahip olduğu dar bant aralığı değeri, yakın-kızılötesi (NIR) bölgesindeki foton algılama ve optik anahtar uygulamaları için küprik oksiti mükemmel bir potansiyel seçenek haline getirmektedir. Solar spektrumun büyük bir kısmını oluşturan görünür ve NIR bölgesinde yüksek soğurma katsayısına ve bunun yanında büyük yeniden birleşme yaşam ömrüne ve difüzyon uzunluğuna sahip olması, küprik oksiti güneş hücresi uygulamaları için uygun bir aday yapmaktadır. Küproz oksitin ve küprik oksitin optik soğurma katsayılarının bir karşılaştırması Şekil 1.1'de verilmektedir (Meyer vd., 2012). Şekilde görüldüğü gibi, küprik oksit tüm spektral bölgede daha yüksek optik soğurma göstermektedir. Küprik oksit, aynı zamanda düşük termal yayıcılığa sahiptir ve oksijen fazlalığının olduğu ortamda çok daha kararlı bir yapı sergilemektedir. Doğada tenorit olarak adlandırılan bir mineral biçiminde bulunan küprik oksitin birim hücresinde dört tane CuO molekülü vardır (Şekil 1.2); ilkel hücresinde ise iki adet CuO

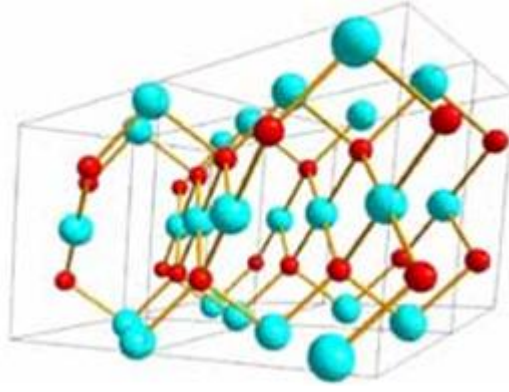
birimi bulunmaktadır. Monoklinik simetriye sahiptir ve yapısındaki boşluk iletiminden sorumlu alıcılar olan bakır boşluklarından dolayı p-tipi iletkenlik göstermektedir. Küprik oksit bile i ine ait bazı özellikler  izelge 1.1’de listelenmiştir. Kahverengi veya siyaha yakın oldukça koyu bir renge sahip parlak bir katıdır. Küprik oksit, güneş ı ı ının soğurulması için ideal olan uygun yasak bant aralığı, yüksek optik soğurma katsayısı ve zehirli olmaması sebebiyle büyük ölçekli uygulamalar için de gelecek vaat etmektedir. Yüksek kalitede tek fazlı küprik oksitin üretimi, bu malzemeden yapılmış düşük maliyetli aygıtların üretiminde temel bir adımdır. Ancak, bakırın ve oksijenin elementel dağılımını ve bakır oksit içindeki kusur durumlarını ve p/n eklemelinin arayüzey kalitesini kontrol etmek oldukça zor olduğundan uzun yıllar boyunca CuO-tabanlı aygıtlar geli tirilememi tir.



Şekil 1.1. Küprik oksitin ve k proz oksitin optik soğurma katsayılarının bir karşılaştırması (Meyer vd., 2012)



Şekil 1.2. CuO’nun monoklinik kristal yapısı (Liao, 2007)



Şekil 1.3. Küprik oksitin dört birim hücreli kristal yapısı (Meyer vd., 2012)

Çizelge 1.1. Küprik oksitin kristalografik ve fiziksel özellikleri

Uzay grubu	C2/c
Örgü tipi	Monoklinik
Birim hücre	$a = 4,6837 \text{ Å}$ $b = 3,4226 \text{ Å}$ $c = 5,1288 \text{ Å}$ $\beta = 99,54^\circ$
Hücre hacmi	81,08 Å ³
Formül ağırlığı	79,57
Yoğunluk	6,515 g cm ⁻³
Uzaklıklar	Cu-O 1,96 Å O-O 2,62 Å Cu-Cu 2,90 Å
Erime noktası	1201 °C
Kırılma indisi	2,5-2,8
Dielektrik sabiti	18,1
Elektron etkin kütlesi	0,4-0,95
Boşluk etkin kütlesi	7,9
Elektron ilgisi	4,07 eV
Hall mobilitesi	0,1 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
Yasak bant aralığı	~1,5 eV
İletim tipi	p

Doğada bol miktarda bulunması ve diğer toksik elementlere göre çok daha az zararsız olması, küprik oksiti diğer alternatif organik veya inorganik yarıiletkenlerden daha çekici hale getirmektedir. Küprik oksit ince filmlerini üretmek için çeşitli teknikler kullanılmıştır. Bu teknikler arasında reaktif buharlaştırma (Balamurugan vd., 2001),

kimyasal depolama (Johan vd., 2011; Serin vd., 2005), termal oksidasyon (Jayatissa vd., 2009; Figueiredo vd., 2008; Papadimitropoulos vd., 2006), kimyasal buhar depolama (Maruyama vd., 1998) ve sol-jel (Akgul vd., 2014; Mridha vd., 2006; Ray vd., 2001) sayılabilir. Küprik oksit ince filmlerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde, üretim metodu ve üretim şartları önemli rol oynamaktadır. Bu metotlardan sol-jel düşük maliyeti, basitliği, kontrol edilebilme ve endüstriyel boyutta uygulanabilirlik özellikleri sebebiyle en yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntemin kullanılması ile atmosferik şartlarda geniş yüzeylere ince film kaplamak mümkün olmaktadır.

Kristal silisyum-tabanlı heteroeklemler, son zamanlarda üretilen ve umut verici sonuçlar elde edilen yapılardır. Bu eklem yapılarında, yarıiletken silisyum organik veya inorganik tamamlayıcı bir film tabakası ile kaplanır ve böylece p/n heteroeklemi oluşturulur. Optoelektronik uygulamalarda en baskın teknolojiye sahip ve aynı zamanda en kararlı malzeme olan kristal silisyumun soğurma katsayısı oldukça düşük olduğundan, aygıt uygulamalarında yoğun miktarda materyal kullanımı gerekmektedir. Bu durum, üretim maliyetini düşürmede karşılaşılan en büyük problemdir. Ancak soğurma katsayısı yüksek malzemeler ile silisyumun birlikte kullanımı, optoelektronik aygıtların daha ucuza üretimini mümkün kılar. Küprik oksit yarıiletkeninin elektron ilgisinin silisyumun elektron ilgisine çok yakın bir değerde olması, p-tipi bakır oksit/n-tipi silisyum heteroeklemlili yapıların aygıt uygulamaları için uygun bir aday olmasını sağlar. Öte yandan optoelektronik ve fotovoltaiik aygıtların üretiminde kullanılan geleneksel yöntemlerin yüksek maliyetli vakum sistemlerine ihtiyaç duyulan karmaşık ve uzun süre gerektiren yöntemler olduğu göz önüne alındığında, basit ve ucuz metotlarla bu tür aygıtların üretilmesi hem bilimsel hem de ekonomik açıdan daha da önem kazanmaktadır. Bu bağlamda küprik oksit, vakum sistemi gerektirmeyen çözelti bazlı üretim teknikleri ile uygun maliyette geniş yüzey alanlı heteroeklemlerin üretimine imkân sağlar.

Bu tez çalışmasında, p-tipi küprik oksit ince filmleri (100) yönelime sahip 1-10 Ω .cm öz dirençli fosfor (P) katkılı n-tipi silisyum kristal parçaları üzerine kimyasal depolama yöntemi ile kaplanarak p/n heteroeklemlili yapılar üretildi. Elde edilen bu yapıların akım-gerilim (I - V) karakteristikleri 220-360 K arasında değişen sıcaklıklarda incelendi. p/n heteroeklemlili yapıların diyot özelliğini belirleyen doğrultma oranı, idealite faktörü,

doyum akımı ve bariyer yüksekliği gibi parametreler farklı sıcaklık değerleri için belirlendi.

Tez alışması altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde tez konusu ile ilgili kısa bir giriş yapıldıktan sonra ikinci bölümde küprik oksit ince filmlerinin üretim yöntemleri ve bu filmlerin kullanıldığı heteroeklemlı yapılar ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar özetlendi. nc bölümde yarıiletkenler, yarıiletken p/n heteroeklemlı yapıların teorisi ve yarıiletken materyalleri analiz yöntemleri hakkında kuramsal bilgiler sunuldu. Dördüncü bölümde küprik oksit/silisyum p/n heteroeklemlı yapıların üretiminde ve analizinde kullanılan deneysel ölçüm sistemleri ile ilgili bilgilere yer verildikten sonra, beşinci bölümde ölçümlerden elde edilen bulgular tartışıldı. Son bölümde ise tez çalışmasında ulaşılan sonuçlarla ilgili yorumlar yapıldı.

BÖLÜM II

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bir ince film, kalınlığı birkaç nanometreden (tek katman) birkaç mikrometreye değişen bir materyal tabakasıdır. İnce filmlerin uygulamaları arasında yarıiletken elektronik aygıtlar, optik kaplamalar, manyetik kayıt sistemleri ve algılama sistemleri sayılabilir. Üretim yöntemine ve üretim esnasında kullanılan ortam değişkenlerine bağlı olarak ince filmlerin özellikleri değişebilir. Farklı yöntemler uygulanarak çeşitli işlemler sonucunda hacimsel materyallerin sahip olmadığı yeni özellikler, bu materyallerin ince filmlerinde oluşturulabilir.

Yarı iletken ince filmler yüksek hızlı transistörler, güneş pilleri, sensörler, bilgi depolama aygıtları ve bunun gibi çok çeşitli modern teknolojilerin geliştirilmesinde temel olmuştur. Özellikle son zamanlardaki teknolojik uygulamalar, yarıiletken ince film alanında yapılan araştırmaların yoğunluk kazanmasını sağlamıştır. Yarıiletken ince filmlerin temel özellikleri bilinmeden ve bu filmlerin elektrot, diğer yarıiletkenler ve yalıtkan malzemeler gibi aygıt bileşenleri ile oluşturdukları arayüzeyler anlaşılmadan, günümüzdeki teknolojik gelişmenin gerçekleşmesi mümkün olmazdı. Ayrıca, farklı üretim işlemlerinin temelini kavramak, daha kaliteli ince film elde etmek için büyük önem taşımaktadır. Üretim yönteminin düşük maliyetli olması, çoğu zaman yarıiletken aygıtların geliştirilmesinde dikkate alınması gereken önemli bir faktör olmuştur. Bu anlamda, ucuz yöntemlerle üretilen geniş alanlı amorf ve polikristal yarıiletken ince filmler birçok ilginç amaç için uygun özellikler sergilemişlerdir. Güneş pilleri, fotodetektörler, kimyasal sensörler, fotokatalizörler vb. cihazlarda polikristal ince filmler kullanılmıştır.

Küprik oksit (CuO) sahip olduğu mükemmel elektronik, kimyasal ve optik özellikleri nedeniyle teknolojik açıdan önemli bir materyal olarak kabul edilmektedir. Valans bandındaki boşluklardan dolayı p-tipi bir yarıiletken olan küprik oksit doğadaki bolluğu, kimyasal kararlılığı, toksik olmaması ve özellikle de düşük üretim maliyeti sebebiyle geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bilhassa, 1,2-1,5 eV arasında değişen doğrudan bant aralığı enerjisi ve yaklaşık % 18 civarındaki teorik dönüşüm verimliliği ile güneş hücresi uygulamaları için umut verici bir malzeme olarak düşünülmektedir. Küprik oksit ince filmlerinin ayrıca foto-elektro-kimyasal hücreler (Panah vd., 2015), fotokatalizörler (Jin vd., 2007) ve lityum iyon pilleri (Fu vd., 2007), katalizörler (Avgouropoulos vd., 2002),

alan emisyon cihazları (Chen vd., 2005), gaz sensörleri (Vasiliev vd., 1998), fotovoltaiik cihazlar (Panah vd., 2015) ve süper iletkenler (Dai vd., 2000) gibi alanlarda da uygulamaları bulunmaktadır. Bu filmlerin kullanıldığı üstün performansa sahip elektronik ve fotovoltaiik aygıtlar üretmek için, yüksek kalitede küprik oksit ince filmlerinin geliştirilmesi son derece önemlidir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, kullanım amaçlarına uygun olarak yarıiletken küprik oksit ince filmlerinin üretimi için birçok teknik kullanılmıştır. Bu tekniklerden bazıları oldukça yüksek maliyet gerektirmektedir. Bazı düşük maliyetli üretim tekniklerinde ise, vakum ortamına ihtiyaç duyulmamakta ve kolayca ince film üretimi yapılabilmektedir.

Sultana ve arkadaşları (Sultana vd., 2017), p-tipi küprik oksit (CuO) ince filmini silisyum (n-Si) alttaban üzerine kimyasal depolama (CBD) tekniği ile büyüttüler ve film kalınlığında 60 nm'den 178 nm'ye mükemmel bir kontrol sağladılar. Elde edilen filmlerin stokiyometrik bileşiminin ve yapısal özelliklerinin büyüme zamanına büyük oranda bağlı olduğunu gözlemlediler. Filmlerin yapısal kalitesini, optik özelliklerini ve kimyasal bileşimini SEM, elipsometre ve XRD ölçümleri ile detaylı olarak incelediler. Ayrıca, üretilen filmlerin elementel bileşimini ve filmlerdeki Cu ve O atomlarının oksidasyon durumlarını XPS ölçümleri ile belirlediler. 110 nm kalınlıktaki ince filmin kristal kalitesi, kırılma indisi, dielektrik sabiti, yasak bant aralığı ve optik özellikler açısından en iyi performansı sergilediğini gözlemlediler.

Ramya ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Ramya vd., 2015), CuO ince filmleri farklı pH değerlerindeki çözeltiler kullanılarak kimyasal depolama tekniği ile cam alttanlar üzerine büyütüldü. Sentezlenen filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri çözeltilerin pH değerlerinin fonksiyonu olarak çalışıldı. Filmlerin yapısını, morfolojisini, optik ve elektriksel özelliklerini incelemek için sırasıyla X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskopisi, UV-VIS spektrometresi ve Hall etkisi ölçümleri kullanıldı. Tüm filmler, (111) düzlemi boyunca yönelim ile birlikte ortorombik yapı sergilediler. Kristalit boyutu, RMS mikrozorlanma, dislokasyon yoğunluğu ve istif bozukluğu (stacking fault) olasılığı gibi mikroyapısal parametreleri belirlemek için X-ışını kırınım çizgilerinin analizi yapıldı. Morfolojik çalışmalar, film yüzeyinin düzgün olduğunu ortaya koydu ve ortalama parçacık büyüklüğünün, çözeltilerin artan pH değeri ile birlikte arttığı bulundu. Bant aralığı, kırılma indisi, sönüm katsayısı, gerçek ve sanal dielektrik katsayıları ve optik iletkenlik gibi parametreler, optik soğurma ölçümlerinden belirlendi. 11,0 pH değerindeki

çözelti kullanılarak üretilen CuO ince filmi için taşıyıcı yoğunluğu ve yük taşıyıcı mobilitesi, Hall ölçümleri vasıtasıyla hesaplandı ve sırasıyla $7,43 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ve $11,84 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ olarak bulundu.

Yapılan bir çalışmada, CuO ince filmleri SiO₂ alttabanlar üzerine Cu'nun termal oksidasyonu ile büyütüldü (Hoa vd., 2010) ve oksidasyon sıcaklıklarının filmlerin kristalinitesi ve morfolojisi üzerine etkileri XRD, XPS ve SEM teknikleri ile incelendi. CuO'nun elektrik ve hidrojen algılama özellikleri elektrik direnç ölçümleri ile çalışıldı. Ayrıca, taşıyıcı gazların CuO'nun gaz tepkisi üzerindeki etkisi de araştırıldı. Elde edilen sonuçlar, 300-800°C arasındaki sıcaklıklarda Cu'nun monoklinik küprik oksit fazına oksitlendiğini gösterdi. p-tipi yarıiletken CuO ince filminin elektrik direnci, hidrojene maruz kaldığında artış sergiledi. 400 °C'de oksitlenen CuO ince filmi, diğer sıcaklıklarda elde edilen filmlere göre en yüksek tepkiyi gösterdi ve algılama tepkisi 250 °C çalışma sıcaklığında % 6 H₂ için 3,72 olarak ölçüldü.

Katkılanmamış küprik oksit ince filmleri kimyasal püskürtme tekniği ile Muhibbullah ve arkadaşları tarafından elde edildi (Muhibbullah vd., 2003). Bu çalışmada üretilen örneklerin çoğu, polikristal ve p-tipi yarıiletken özellik gösterdi. Kalınlığı 340-620 nm arasında değişen örneklerin termal gücü (thermopower), 300-450 K sıcaklık aralığında ölçüldü ve termal gerilimlerin film kalınlığı ile değiştiği gözlemlendi. Oda sıcaklığındaki elektrik iletkenliğini veya Hall mobilitesini sınırlayabilen baskın yük saçılma mekanizması, örgü fonon saçılması ile ilişkilendirildi.

Dahrul ve arkadaşları, kimyasal solüsyon depolama (CSD) yöntemini kullanarak bakır oksit (CuO) ince filmlerini ürettirler ve farklı kalınlıklardaki filmlerin kristal yapısını ve optik özelliklerini belirlediler (Dahrul ve Alatas, 2016). İnce filmlerin kristal yapısını X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize ettiler. 350°C, 450°C ve 550°C'de tavlama filmlerin optik özelliklerini, VIS-NIR spektrometresi ile çalıştılar ve ince filmlerin görünür bölgede soğurucu olduklarını gösterdiler. CuO ince filmlerinin yasak bant aralığı enerjilerinin, artan tavlama sıcaklığı ile 2,05 eV'den 1,89 eV'ye azaldığını rapor ettiler.

Biyomedikal, kimyasal, ilaç ve gıda endüstrilerinde, düşük sıcaklıklarda yüksek duyarlılıkta ve seçicilikte çalışabilen alkol sensörlerine yoğun şekilde ihtiyaç duyulmaktadır. Dhas ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, CuO ince filmleri

0,1, 0,2 ve 0,3 molar konsantrasyonlarda hazırlanmış bakır klorür çözeltileri kullanılarak 300 °C alttaban sıcaklığında ve 0,4 kg cm⁻² hava basıncında önceden temizlenmiş cam alttabanlar üzerine püskürtme tekniği ile büyütüldü (Dhas vd., 2014). Üretilen filmlerin X-ışını kırınım desenleri, 35-54 nm arasında değişen doku boyutuna sahip monoklinik yapıda ince filmlerin oluştuğunu ortaya koydu. İnce filmlerin mikrozorlanma ve dislokasyon yoğunluğu değerlerinde, artan molarite ile bir azalma gözlemlendi. Filmlerin yüzey morfolojisi ve elementel bileşimi SEM ve EDAX teknikleri aracılığı ile incelendi. Artan yoğunluk değerleri için ince filmlerin yapısında bakır fazlalığı tespit edildi. Elektriksel ölçümler sonucunda 0,3 M yoğunlukta üretilen ince filmin en yüksek iletkenliğe ve en düşük aktivasyon enerjisine sahip olduğu tespit edildi. Etanol gaz algılama ölçümleri sonucunda, 100 ve 200 ppm etanol buharı için 0,3 M’da hazırlanan filmin diğer filmlere göre en yüksek gaz algılama özelliğine sahip olduğu gözlemlendi.

Dhanasekaran ve arkadaşları, polikristal kükürt oksit (CuO) ince filmlerini bir bazik çözelti banyosu kullanarak katodik elektrodepolama metodu ile büyüttüler (Dhanasekaran vd., 2012). İnce filmleri, iletken kalay oksit kaplı cam alttabanlar üzerine farklı banyo sıcaklıklarında elektroliz ile kapladılar. Banyo sıcaklığının bakır oksit ince filmlerinin morfolojik, optik ve yapısal özellikleri üzerindeki etkilerini rapor ettiler. X-ışını kırınımı çalışmaları, düşük banyo sıcaklıklarında üretilen filmlerin monoklinik ve kübik fazların karışımından oluştuğunu ortaya koydu. 75 °C’de üretilen film ise, kübik yapıya sahip olup (111) düzlemi boyunca yönelim gösterdi. Tüm kırınım pikleri için doku katsayısı (texture coefficient) değerleri hesaplandı ve filmlerin oldukça dokulu bir yapıya sahip olduğu ($T_c > 1$) gözlemlendi. Yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü, taramalı elektron mikroskopu ve atomik alan mikroskopu kullanılarak belirlendi ve filmlerin piramit şeklinde dokulardan oluştuğu ortaya kondu. Enerji yayınlı X-ışını analizi, elde edilen CuO filmlerinin hemen hemen stokiyometrik kompozisyonda oluştuğunu gösterdi. CuO ince filmlerinin kırıcılık indisi, kompleks dielektrik sabiti ve sönüm katsayısı gibi optik sabitleri de çalışmada rapor edildi.

Bir başka çalışmada (Mohd vd., 2011), 0,45 µm kalınlıktaki bakır oksit ince filmleri mikroskop camlarının 70 °C’deki 1 M NaOH ve oda sıcaklığındaki bakır kompleksi çözeltilerine 20 s süresince daldırılması suretiyle kimyasal olarak üretildi. Üretilen bakır oksit filmlerine daha sonra 200-400 °C arasında değişen sıcaklıklarda açık hava ortamında tavlama işlemi uygulandı ve örneklerden bir tanesi referans olarak kullanılmak

amacıyla tavlانmadı. Oluşan ince film yapıları XRD yöntemiyle incelendi. Elde edilen kırınım desenleri, referans örneğin ve 200 °C’de tavlanan filmlerin küprit yapısında Cu₂O fazına sahip olduğunu, diğer taraftan 300 °C’de tavlanan filmlerin ise tenorit (CuO) ve küprit (Cu₂O) fazlarının bir karışımından oluştuğunu ortaya koydu. Tavlama sıcaklığı 400 °C olduğunda ise, ince filmler tamamen tenorit yapıdaki CuO fazına dönüştü. Bu çalışma, bakır oksit yapısındaki iki fazın miktarının oksidasyon sıcaklığı ile değiştiğini gösterdi. İnce filmlerin UV-VIS geçirgenlik spektrumları, XRD sonuçları ile uyumlu bulundu ve filmlerin optik bant aralığında 2,40 eV’den 1,73 eV değerine bir kayma gözlemlendi.

Çok ince soğurucu tabakaya sahip güneş hücreleri ile ilgili bir çalışmada, Shabu ve arkadaşları (Shabu vd., 2015) püskürtme yöntemi ile 350 °C sabit alttaban sıcaklığında ve farklı yoğunluklarda prekürsor kullanarak hazırlanan CuO soğurucu tabakaların yapısal, yüzeysel, optik ve elektriksel özelliklerini incelediler. Sonuçların işaret ettiği monoklinik örgü ve Cu-O salınım modları, üretilen filmlerin yapısında tenörit fazdaki CuO oluşumunu ortaya koydu. Filmlerin yüzeyindeki Cu^{2+} fazı içeren dokuların düzgün dağılımı, elde edilen CuO filmlerinin enerji soğurucu tabaka olarak uygunluğunu gösterdi. Seçili bölgelerdeki optik soğurma, optik bant aralığı ve düşük şiddetteki fotoluminesans pikleri ise CuO filmlerinin kolay yük taşıma özelliğini ve ışık tutma kapasitesini gösterdi.

Bakır oksit ince filmleri, Shrividhya ve arkadaşları tarafından (Shrividhya vd., 2014) cam alttabanların değişik molar yoğunluklarda bakır sülfat tuzu içeren çözeltiler içine çift-daldırma yöntemiyle daldırılması ile büyütüldü. Yapısal çalışmalar, üretilen filmlerin monoklinik yapıda ve polikristal özellikte olduğunu ortaya çıkardı. Bakır sülfat tuzunun molar yoğunluğundaki değişimler, filmlerin mikroyapısal özellikleri üzerinde dikkate değer etkiler oluşturdu. XPS ve EDS spektrumları, film yapısında Cu ve O atomlarının varlığını doğruladı. Mikro Raman ölçümleri, CuO fazına ait iki adet Ag ve Bg aktif mod piklerini gösterdi. İnce filmler, görünür bölgede yüksek soğurma sergilediler. Yasak bant aralığı değeri 1,3 eV olarak hesaplandı ve bu değer üretilen filmlerin güneş hücrelerinde yarıiletken tandem soğurucu olarak kullanımı için uygun bir materyal olma potansiyelini ortaya çıkardı.

Figueiredo ve arkadaşları (Figueiredo vd., 2008), önce metalik bakır (Cu) elementini cam alttabanlar üzerine buharlaştırdılar ve daha sonra elde ettikleri filmlere 100-450 °C

arasında değişen farklı sıcaklıklarda termal oksitleme işlemi uyguladılar. Elde edilen filmlerin XRD ölçümleri, oksitleme işlemi uygulanmayan filmlerin sadece Cu fazı içerdiğini gösterdi. 100 °C’de ısıtılan filmlerde Cu₂O ve Cu fazlarının bir karışımı gözlemlendi. 200-300 °C arasındaki sıcaklıklarda ısıtılan filmlerde ise, sadece kübik Cu₂O fazı rapor edildi. 350-450 °C sıcaklıklarda yapılan termal oksitleme işlemi sonucunda, elde edilen ince filmler tek fazda monoklinik CuO yapısında oluştular.

CuO/Cu₂O kompozit ince filmleri hidrotermal yöntem ile Zhao ve arkadaşları (Zhao vd., 2014) tarafından sentezlendi ve üretilen filmlerin XRD, SEM ve XPS analizleri yapıldı. Sonuçlar, film üretiminde kullanılan çözelti yoğunluğuna bağlı olarak ince filmlerin Cu₂O veya CuO fazlarını içerdiklerini gösterdi. SEM ölçümlerinden, 0,5 mol/L yoğunluktaki çözeltinin kullanıldığı filmlerin yüzeyinde yaprağa benzer CuO parçacıklarının oluştuğu belirlendi. 0,6-0,8 mol/L yoğunluk değerleri için üretilen filmlerin yüzeylerinde ise, oktahedral yapıda Cu₂O parçacıklarının olduğu rapor edildi.

CuO ince filmleri, düşük maliyetli SILAR metodu ile düşük sıcaklıklarda Ravichandran ve arkadaşları tarafından sentezlendi (Ravichandran vd., 2015). Büyütölen filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri üzerine daldırma zamanının etkileri, X-ışını kırınımı, alan yayınlı taramalı elektron mikroskobu, UV-VIS-NIR spektrometresi ve Hall ölçümleri vasıtasıyla incelendi. Çalışmada, filmlerin daldırma zamanına bağlı olarak farklı nanoyapılara sahip olduğu rapor edildi. Artan daldırma zamanına bağlı olarak, kristalit boyutunda bir artma gözlemlendi ve 30 s daldırma zamanı için elde edilen ince filmin kristalit boyutu 19 nm olarak hesaplandı. CuO filmlerinin optik bant aralığı enerjisi, daldırma zamanına ve tavlama sıcaklığına bağlı olarak 1,8-1,6 eV arasında belirlendi. Hall etkisi ölçümleri, filmlerin p-tipi iletkenliğe sahip olduklarını gösterdi.

Mageshwari ve arkadaşları (Mageshwari vd., 2016), yaptıkları çalışmada bir grafen geçirgen elektrodun kullanıldığı CuO-ITO heteroeklemlı diyotun elektriksel özelliklerini akım gerilim karakteristikleri yardımıyla incelediler. Bu çalışmada, CuO ince filmleri ITO alttabanlar üzerine sol-jel spin kaplama metodu ile kaplandı ve daha sonra filmler 500 °C’de tavlandı. Filmlerin X-ışını kırınım deseni, polikristal doğaya sahip olduklarını ve monoklinik kristal yapısında oluştuklarını gösterdi. FESEM görüntüleri, film yüzeylerinin düzenli ve sıkı paketli parçacıklardan oluştuğunu ortaya koydu. CuO ince

filmlerinin optik bant aralığı, UV-VIS soğurma spektrumu vasıtasıyla belirlendi ve 2,5 eV olarak hesaplandı. CuO-ITO heteroeklemlerinin *I-V* karakteristikleri, üretilen yapıların doğrultucu davranış sergilediklerini ve yapıya grafen eklendikten sonra elektriksel özelliklerin iyileştiğini gösterdi. Bariyer yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi elektronik parametreler *I-V* ölçümlerinden belirlendi ve mümkün olan akım iletim mekanizması bu çalışmada tartışıldı.

Chen ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada (Chen vd., 2014), CuO-SnO₂ nanoparçacıklarını üretmek için basit hidrotermal metot kullanıldı. Çalışmada CuO miktarı, % 5 mol, % 10 mol ve % 15 mol olarak seçildi. Örneklerin mikroyapısı ve yüzey morfolojisi XRD, FESEM, TEM ve HRTEM yöntemleri ile karakterize edildi. Sistematik bir karşılaştırma, CuO-SnO₂ yapısının CO gazına karşı gelişmiş gaz algılama performansına sahip olduğunu ortaya koydu. Bu özellik, CuO ve SnO₂ nanoparçacıklarından oluşan p/n heteroeklemlerinin etkin biçimde oluşumu ile ilişkilendirildi.

p-tipi bakır oksit (CuO) ve n-tipi silisyumdan oluşan p-CuO/n-Si heteroeklemlili güneş hücreleri, geleneksel saçırma ve hızlı termal tavlama teknikleri kullanılarak Panah ve arkadaşları tarafından üretildi (Panah vd., 2015). 300 °C'de 1 dakika süresince tavlanan güneş hücresinin açık-devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (J_{sc}) ve akım yoğunluğu gibi fotovoltajik parametreleri sırasıyla 380 mV, 1,2 mA/cm² ve 2,9 mA/cm² olarak belirlendi. Tavlama süresi artırıldığında, eklem bölgesinde oluşan arayüzeyin kalitesi bozulduğundan dolayı akım yoğunluğunda bir artma ve V_{oc} değerinde ise bir azalma gözlemlendi. Yapıda yer alan CuO filmindeki faz dönüşümünü kontrol ederek ve bazı arayüzey işlemlerini kullanarak V_{oc} , J_{sc} ve fotoakım yoğunluğu değerlerinde iyileşme görüldü ve bu değerler sırasıyla 509 mV, 4 mA/cm² ve ~12mA/cm² olarak ölçüldü. Çalışmada V_{oc} değerinde gözlenen iyileşmenin, esas olarak yapıdaki CuO filminin kristal kalitesi ile p-CuO ve n-Si alttaban arasındaki arayüzey özelliklerinden kaynaklandığı rapor edildi. Fotoakım yoğunluğundaki iyileşmenin ise taşıyıcıların yeniden birleşme oranındaki azalmadan dolayı olduğu fotovoltaj spektroskopisi ölçümlerinin analizi sonucunda ortaya kondu.

Yoon ve arkadaşları, n-tipi silisyum elektrot üzerine kaplanan bakır oksit ince filminin fotoelektrokimyasal özelliklerini ince filmin üretim sıcaklığına bağlı olarak incelediler ve

değişen sıcaklığın, ince filmin yüzey morfolojisi ile film yapısındaki oksijen ve bakır oranı üzerinde etkisinin olduğunu rapor ettiler (Yoon vd., 2000). 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda elde edilen filmlerdeki temel faz CuO olarak bulundu; diğer taraftan sıcaklık artırıldığında Cu₂O fazının miktarında artış gözlemlendi. n-silisyum fotoelektrodu, bakır oksit/n-silisyum heteroeklemi oluşturulduğunda gelişmiş fotoakım-potansiyel (*I-V*) özellikleri gösterdi. Özellikle, CuO fazının Cu₂O'dan daha fazla miktarda olduğu elektrot, çok daha iyi fotoelektrokimyasal dönüşüm verimliliği sergiledi. Bu sonuç, bakır oksit filminin elektriksel iletkenliği ve optik geçirgenliği ile açıklandı.

Sameer ve Hiba tarafından yapılan bir çalışmada, p-CuO/n-Si heteroeklemi yüksek vakum termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak silisyum üzerine bakırın 300 °C sıcaklıkta büyütülmesi sonucunda elde edildi (Sameer ve Hiba, 2016). İnce filmlerin yüzey morfolojisi ve geçirgenlik spektrumu ile ilgili optik özellikleri incelendi. CuO filmlerinin XRD analizi sonucunda 35,54 ve 38,70° açı değerlerinde (111̄) ve (111) kırınım pikleri gözlemlendi. Filmler, 350-850 nm dalgaboyu arasında yüksek miktarda geçirgenlik gösterdiler ve bant aralığı 1,54 eV bulundu. Ortalama doku boyutu AFM analizinden elde edildi ve 14,70 nm olarak belirlendi. Üretilen yapının kısa-devre akımı, açık-devre gerilimi, dolum faktörü ve verimliliği sırasıyla 1,4 mA, 1 mV, % 40 ve % 4,9 olarak ölçüldü. Elde edilen sonuçlar, p-CuO/n-Si yapısının güneş hücresi olarak kullanılabileceğini gösterdi.

CuO nano-tozu kimyasal depolama metodu ile sentezlendi ve bu toz p-CuO/n-Si heteroeklemlili diyotlar üretmek için n-Si alttaban üzerine VLS tekniği uygulanarak ultra-ince kalınlıkta (20 nm) büyütüldü (Sultana vd., 2016). Filmin kristal yapısı ve bileşimi XRD ve EDAX çalışmalarıyla belirlendi. CuO/Si ekleminin fotovoltajik ve doğrultucu uygulamalar için geliştirilmesi amacıyla yönelik sitokiyometrik bir filmin büyütülmesinin mümkün olduğu bu çalışmada gösterildi. ±2 V değerinde doğrultma oranı $\sim 2 \times 10^4$ ve bariyer yüksekliği 0,58 V bulundu. Optik anahtar ölçümleri sonucunda, artma ve azalma zamanları 3,02 s ve 3,8 s ölçüldü ve bu değerlerin fotodedektör uygulamaları için umut vaat ettiği gözlemlendi. 1,02 mW/cm² giriş gücü için açık-devre gerilimi, kısa-devre akım yoğunluğu, dolum faktörü ve verimlilik sırasıyla 70 mV, 0.16 mA/cm², % 24,3 ve % 0,27 olarak hesaplandı.

2009 yılında Bao ve arkadaşları, p-tipi CuO nanotel çekirdeğinden ve n-tipi C60

kabuğundan oluşan bir organik/inorganik hibrit heteroeklemini ilk defa ürettirler ve yapının elektriksel iletim özelliklerini incelediler (Bao vd., 2009). Kabuk-kabuk kontaklı aygıtların omik davranış gösterdiğini, diğer taraftan çekirdek-kabuk kontaklı aygıtların ise bir p/n eklemi oluşturduğunu ve doğrultma davranışı gösterdiklerini rapor ettiler. Çeşitli sıcaklıklarda ölçülen logaritmik akım-gerilim eğrileri, elektrik iletiminde tünellemenin kritik bir rol oynadığını ortaya koydu. Işık altında, çekirdek-kabuk yapısından oluşan CuO/C60 eklemelerinin fotovoltaiik etkileri gözlemlendi.

Oku ve arkadaşları bakır oksit (CuO_x) ince filmlerini spin kaplama ve elektrokaplama metotları ile ürettirler ve filmlerin mikroyapılarını ve fotovoltaiik özelliklerini incelediler (Oku vd., 2011). Çalışmada, $\text{Cu}_2\text{O}/\text{C60}$ ve $\text{CuO}/\text{C60}$ heteroeklemlili ince film güneş hücreleri F-katkılı SnO_2 ve In-katkılı SnO_2 alttaban üzerine iki farklı yöntemle üretildi ve elde edilen yapılar karakterize edildi. Üretilen güneş hücrelerinden spin kaplama tekniğı ile oluşturulan $\text{CuO}/\text{C60}$ heteroeklemlili yapı en yüksek verimliliğı gösterdi ve bu değeri % 0,0023 olarak ölçüldü.

Lim ve arkadaşları, 2012 yılında CuO nanokristallerini üretmek için basit termal (alcoholothermal) yöntemi kullandılar ve nanokristallerin kloroform ve metanol karışımı içinde karışabilir olduğunu buldular (Lim vd., 2012). PCBM (phenyl-C61-butyrilic acid methyl ester) ve CuO nanokristallerini bir araya getirerek çift katmanlı güneş hücresi ürettirler ve bu hücrelerin dönüşüm verimliliğini % 0,04 olarak ölçtüler.

Nanotel temelli p-CuO/n-ZnO heteroeklemlili hücreler Wang ve arkadaşları tarafından 2011 yılında üretildi (Wang vd., 2011). Güneş hücresi yapısındaki CuO nanotelleri termal oksidasyon tekniğı ile ve ZnO tabakası da solüsyon bazlı metotla elde edildi ve yapıların fotovoltaiik ve optoelektronik özellikleri detaylı olarak incelendi. En iyi performansla sahip aygıtın verimliliğı % 0,1 ölçüldü.

Saçtırmalı kaplama yöntemi vasıtasıyla üretilen p-CuO/n-ZnO heteroeklemlili güneş hücreleri ile ilgili bir çalışma, Dimopoulos ve arkadaşları tarafından 2013 yılında yapıldı (Dimopoulos vd., 2013). Bu çalışmada, soğurucu CuO tabakasının kalınlığının elde edilen güneş pillerinin güç dönüşüm verimliliğı üzerindeki etkisi araştırıldı. Güneş hücresi yapısındaki CuO filminin kalınlığı optimize edildi ve en yüksek dönüşüm verimliliğı 500 nm soğurucu kalınlık değeri için % 0,08 olarak elde edildi. Çalışmada,

CuO-tabanlı güneş hücrelerinin performansını düşüren temel faktörlerden bir tanesinin kısa taşıyıcı yaşam ömrünün neden olduğu sınırlı taşıyıcı toplama verimliliği olduğu bulundu.

GaO ve arkadaşları, saçtırmalı kaplama yöntemiyle farklı O₂ ve Ar gaz akış oranlarında CuO filmi ürettir ve elde ettikleri filmlerin elektriksel ve yapısal özellikleri üzerinde bu gazların akış oranlarının önemli derecede etkisinin olduğunu rapor ettiler (Gao vd., 2012). Ayrıca O₂ ve Ar gazlarının akış oranlarını artırdıklarında, CuO ince filmlerinin taşıyıcı yoğunluğundaki azalmadan dolayı direnç ve mobilite değerlerinde bir artış gözlediler. Araştırmacılar, bu çalışmalarında p-CuO/n-Si heteroeklemli güneş hücrelerinin de üretimini gerçekleştirdiler ve gazların akış oranını ayarlayarak % 0,41'lik bir dönüşüm verimliliği değeri elde ettiler.

p-CuO/n-Si heteroeklemli güneş hücresi ile ilgili bir diğer çalışma, Visalaski ve arkadaşları tarafından gerçekleştirildi (Visalaski vd., 2015). Bu çalışmada, heteroeklemler SILAR depolama tekniği ile üretildi ve tuz çözeltisinin CuO filmi ve güneş hücresi üzerindeki fotovoltaiik etkisi incelendi. Hazırlanan numunelerin kristal kalitesi ve verimliliği üzerinde bakır sülfat yoğunluğunun önemli derecede etkisinin olduğu gözlemlendi. Çözeltideki bakır tuzu yoğunluğunun kontrol edilmesi ile ince film örneklerin yasak bant aralıklarının da kademeli olarak değiştirilebileceği yine bu çalışmada rapor edildi. Artan çözelti yoğunluğu ile birlikte üretilen güneş hücresi aygıtlarının çalışma performansında önemli bir artış gözlemlendi. En iyi hücre parametreleri 0,15 M yoğunluk değerinde hazırlanan aygıtlar için elde edildi ve bu aygıtların V_{oc} ve I_{sc} değerleri sırasıyla 0,27 V ve 0,76 mA ölçüldü.

Nanoyapılı p-CuO ve n-ZnO ince filmlerinin büyütülmesi için çözelti bazlı basit bir yaklaşım Prabhu ve arkadaşları tarafından önerildi (Prabhu vd., 2017). Çalışmada, tavlama sıcaklığının CuO ve ZnO ince filmlerinin fiziksel özellikleri üzerine etkisi incelendi. Çözelti bazlı büyütülen CuO ve ZnO filmlerinin yapısal özellikleri ve faz saflığı XRD ve Raman ölçümleri ile belirlendi. İnce filmlerin elektriksel ve optik özellikleri de bu çalışmada araştırıldı. Görünür spektral bölgede CuO ve ZnO ince filmlerinin ortalama optik geçirgenliği sırasıyla % 80 ve % 95 civarında bulundu. FESEM tekniği ile analiz edilen yüzeylerin morfolojik ölçümleri, ince filmlerin çok pürüzsüz yüzeylere sahip olduğunu gösterdi. p-CuO ve n-ZnO filmleri kullanılarak üretilen ve ITO

n-ZnO/p-CuO/Au yapısına sahip p-n heteroeklemleri doğrultma davranışı sergilediler ve bu yapılar için idealite faktörü 3,15 olarak rapor edildi.



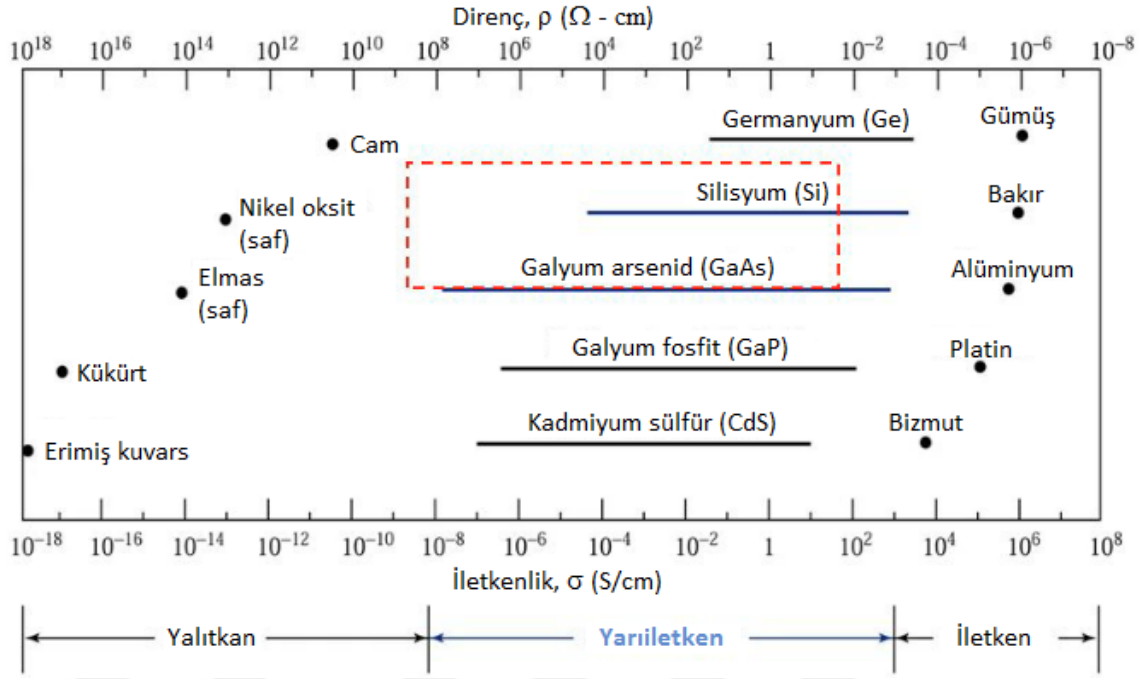
BÖLÜM III

TEORİK BİLGİLER

3.1 Yarıiletkenler

Materyaller, valans bandı ile iletim bandı arasındaki enerji boşluğuna göre sınıflandırılabilir. Valans bandı, valans elektronlarından oluşan banttır; iletkenlik bandı ise boştur. Bu iki bant arasındaki enerji boşluğu, yasak enerji aralığı olarak isimlendirilir. Eğer bir elektron valans bandından iletkenlik bandına atarsa, iletim gerçekleşmiş olur. Valans ve iletkenlik bantları arasındaki yasak enerji aralığının geniş olması, bir elektronun valans bandından iletkenlik bandına kaydırılması için gerekli enerjiyi artırır. İletkenlerde bu enerji aralığı yoktur. Yani iletkenlik bandı ve valans bandı ya kısmen doludur ya da birbiriyle çakışır. Böylece, bir elektron valans bandından atlamak için minimum miktarda enerjiye ihtiyaç duyar. İletken malzemelerin tipik örnekleri arasında gümüş, bakır ve alüminyum sayılabilir. Yalıtkanlarda, yasak enerji aralığı oldukça geniştir. Bir elektronu valans bandından iletkenlik bandına uyarmak için önemli miktarda enerji gerektiğinden, yalıtkanlar zayıf elektrik iletkenidirler. Mika ve seramik yalıtım malzemeleri arasında iyi bilinen örneklerdir. Diğer yandan, yarıiletkenler ise iletken ve yalıtkanlar arasındaki değerlerde yasak enerji aralığına sahiptir. Bu boşluk genellikle birkaç eV civarında olduğundan, bir elektronu valans bandından iletkenlik bandına geçirmek için iletkenlerden daha fazla yalıtkanlardan ise daha az enerjiye ihtiyaç duyulur. Düşük sıcaklıklarda, bir yarıiletken kristalin iletkenlik bandındaki elektron sayısı çok azdır; ancak sıcaklık arttıkça daha fazla elektron valans bandından iletkenlik bandına geçmek için yeterli miktarda enerji alır. Bundan dolayı yarıiletkenler düşük sıcaklıklarda elektriği iletmezler, ancak sıcaklık arttıkça iletkenlikleri artar. Yarıiletkenlerin en tipik örnekleri silisyum ve germanyumdur.

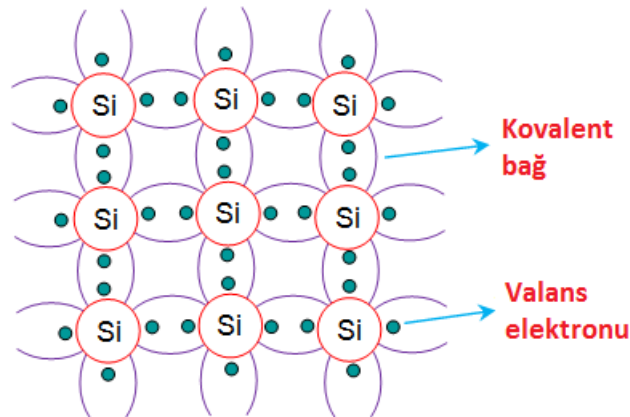
Elektron akışının kontrol edilebilmesi sebebiyle birçok elektronik devrede yaygın şekilde kullanılan yarıiletkenler, akımı kısmen ileten materyallerdir. Bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliği, hemen hemen hiç iletkenliği olmayan bir yalıtkan ile tamamen iletken olan bir iletken arasındadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenler için direnç ve iletkenlik değerleri

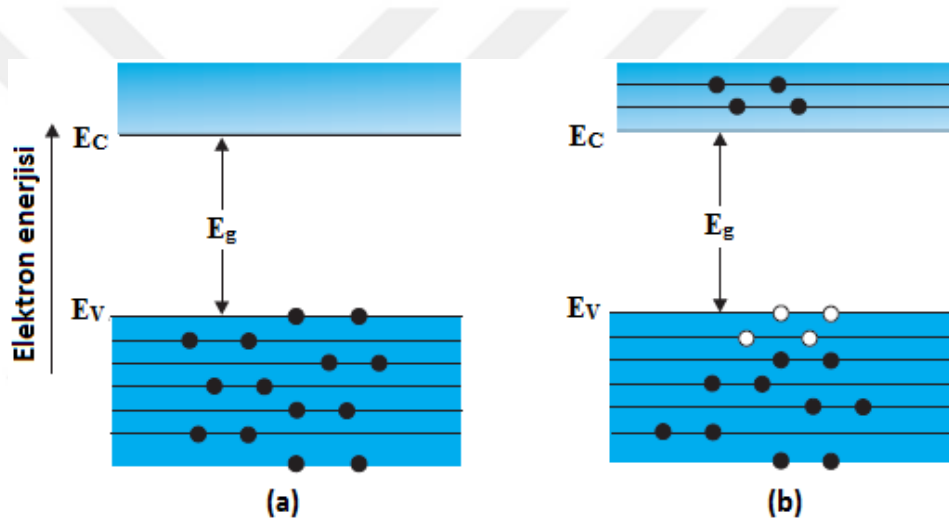
Kimyasal olarak saf olan yani safsızlık (kirlilik) içermeyen yarıiletkenlere, has (özgün) veya katkısız yarıiletken denir. En yaygın olanları, periyodik tablonun dördüncü grubuna ait silisyum ve germanyumdur. Atomik numaraları sırasıyla 14 ve 32 olan silisyum ve germanyumun her ikisinin en dış yörüngesinde yani değerlik kabuğunda dört elektron vardır. Bu elektronlara değerlik elektronları (veya valans elektronları) denir ve yarıiletkenlerin iletkenlik özelliklerinden sorumludurlar.

Şekil 3.2'de, silisyum kristalinin iki boyutlu örgüsü şematik olarak verilmiştir. Burada bir Si atomunun her valans elektronunun, komşu Si atomlarının valans elektronlarıyla çiftleşerek kovalent bağ oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. Silisyumun iki boyutlu kristal örgüsünün şematik gösterimi (düşük sıcaklıkta)

Kovalent bağ oluşumundan ve elektron çiftlenmesinden sonra, katkısız yarıiletken serbest yük taşıyıcılarından yoksun bırakılır. Dolayısıyla 0 K sıcaklıkta iletkenlik bandı boşken değerlik bandı elektronlarla doludur (Şekil 3.3 (a)). Bu aşamada, değerlik bandındaki hiçbir elektron yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığını geçecek kadar enerji kazanmaz. Böylece katkısız yarıiletkenler 0 K'de yalıtıkandılar. Bununla birlikte, oda sıcaklığındaki termal enerji kovalent bağların bir kısmının kopmasına ve serbest elektronların üretilmesine neden olabilir. Üretilen elektronlar uyarılarak enerji bariyerini geçip valans bandından iletkenlik bandına hareket ederler ve uyarılan her elektron valans bandında bir boşluk bırakır (Şekil 3.3 (b)). Bu şekilde üretilen elektronlar ve boşluklar, özgün yük taşıyıcıları olarak adlandırılır ve katkısız yarıiletken malzemenin iletkenlik özelliklerinden sorumludurlar.



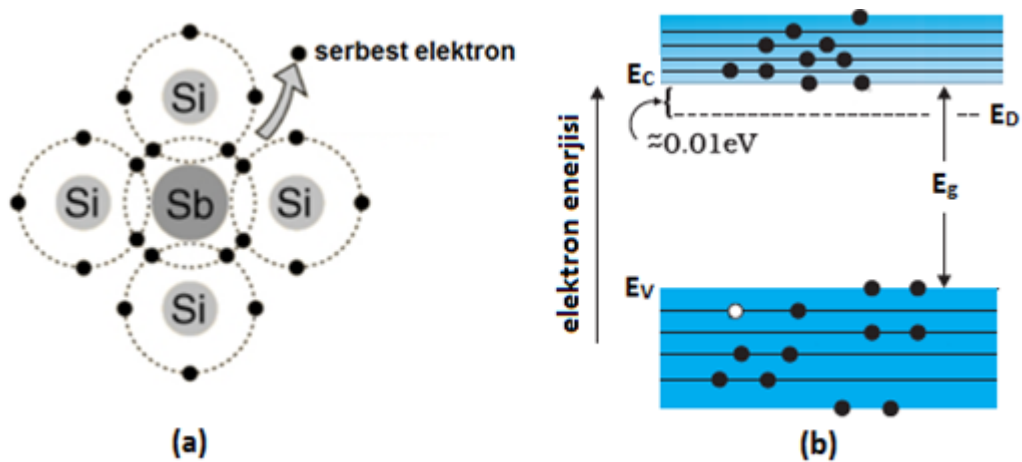
Şekil 3.3. Katkısız bir yarıiletkenin T=0 K (a) ve T>0 K (b) sıcaklıklarındaki enerji bant diyagramı

Katkısız yarıiletkenler, oda sıcaklığında iletken olabilmelerine rağmen bu iletkenlik oldukça düşüktür ve sadece birkaç yük taşıyıcısı kadardır. Ancak, sıcaklık arttıkça daha fazla sayıda kovalent bağ kopar ve bu da daha fazla serbest elektron anlamına gelir. Sonuç olarak daha çok sayıda elektron valans bandından iletkenlik bandına geçer. İletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğu arttıkça, katkısız yarıiletkenin iletkenliği de artar. Bununla birlikte, katkısız yarıiletkendeki elektron sayısı her zaman boşluk sayısına eşittir.

Katkısız bir yarıiletkene elektrik alan uygulandığında, elektron-boşluk çiftleri bu alanın etkisi altında sürüklenir. Bu durumda, boşluklar elektrik alan yönünde hareket ederken, elektronlar uygulanan alanın tersi yönde hareket eder. Bu durum, elektronların ve

boşlukların hareket ettiği yönün birbirine zıt olduğu anlamına gelir. Elektronların ve boşlukların birbirine zıt yöndeki hareketi sonucunda, yarıiletken boyunca bir toplam akım oluşur.

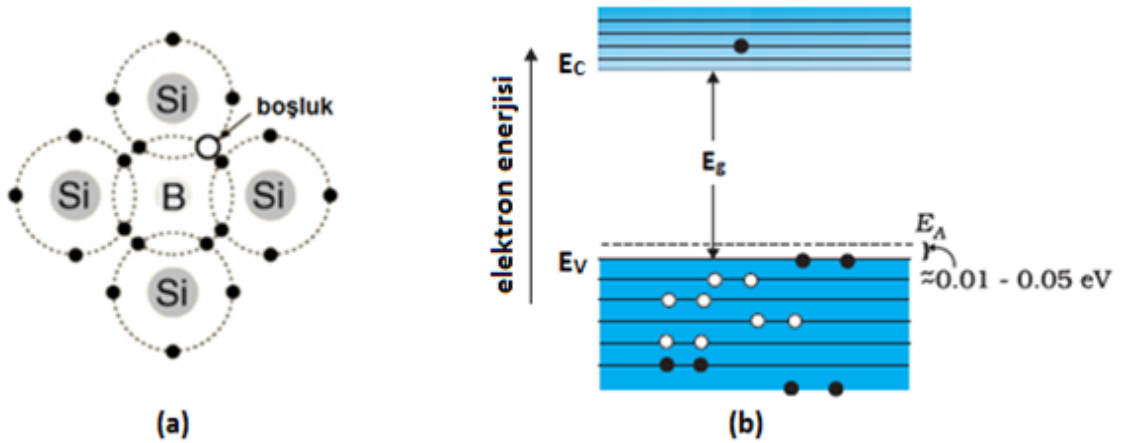
Saf haldeki yarıiletkenler, katkısız yarıiletkenler olarak adlandırılır. Öte yandan kasıtlı olarak eklenen yabancı maddelere (kirliliklere) sahip olan yarıiletkenlere katkılı yarıiletken denir. Belirli koşullar altında, saf yarıiletken malzemeye iletkenliğini arttırmak amacıyla küçük miktarda saf kirlilik ekleme işlemi katkılama olarak bilinir. Katkılama işleminde yarıiletkene ilave edilecek kirlilik atomlarının seçimi, malzemedeki boşluk veya elektron gibi serbest yük taşıyıcılarının sayısını artıracak şekilde yapılır. Silisyum veya germanyum gibi saf haldeki yarıiletkenler, periyodik tablonun dördüncü grubuna ait oldukları için dört değerliklidir, yani değerlik kabuğunda dört elektrona sahiptirler. Eğer bu yarıiletkenlerden birinin elektron sayısını arttırması gerekiyorsa, fosfor (P), arsenik (As), antimon (Sb), bismut (Bi) ve lityum (Li) gibi periyodik tablonun beşinci grubundaki elementlerin az bir miktarı ile katkılanmaları gerekir. Böyle bir durumda, bu elementlerin en dış kabuğundaki beş elektron silisyumun (veya germanyumun) dört elektronu ile kovalent bağ yapar; geriye kalan bir elektron ise ana atoma çok gevşek bağlanarak çok az miktarda termal enerji ile hareketli yük taşıyıcısı olarak serbest hale geçebilir (Şekil 3.4 (a)). Silisyum kristaline eklenen antimon atomu, verici (donör) olarak isimlendirilir. Oluşan yeni örgü, n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Boşta kalan elektronun uyarılması, elektronun mevcut enerji durumundan yani donör seviyesinden (E_D) iletkenlik bandına geçmesine neden olur (Şekil 3.4 (b)). Bu elektronlar, termal enerjiyle kovalent bağların kopması sonucu oluşan diğer serbest elektronlarla birlikte yarıiletken malzemedeki iletim sürecine aktif olarak katkıda bulunur.



Şekil 3.4. n-katkılı silisyumun şematik gösterimi (a) ve $T > 0$ K'daki enerji bantları (b)

n-tipi malzemelerdeki toplam elektron sayısı, termal olarak üretilen elektronlar ile donör atomlar tarafından verilen elektronların toplamıdır. Bu yarıiletkenlerde çoğunluk akım taşıyıcıları, kristal yapıda serbest kalan fazla elektronlardır. Ancak, katkılama işleminde valans seviyelerindeki enerji dağılımının dengesizliği nedeniyle çok az miktarda boşluk oluşur ve bu boşluklar azınlık akım taşıyıcılarıdır.

p-tipi yarıiletkende ise, saf haldeki bir silisyum veya germanyum kristaline indiyum (In), galyum (Ga), alüminyum (Al) veya boron (B) gibi periyodik tablonun üçüncü grubunda bulunan bir elementin az bir miktarı eklendiğinde, bu elementlerin en dış kabuğundaki üç elektron silisyumun (veya germanyumun) üç elektronu ile kovalent bağ yapacak şekilde etkileşir ve hareketli yük taşıyıcısı olarak bir boşluk serbest bırakılır (Şekil 3.5 (a)). Bir başka ifadeyle, yapıda üç tane tamamlanmış kovalent bağ ve tek elektrona sahip bir tane tamamlanmamış kovalent bağ vardır. Yeni silisyum yapısında, bağdaki eksik kalan ikinci elektron için bir boşluk vardır ve yapı bu elektron eksikliği sebebiyle dış ortamdan elektron almaya meyillidir. Bu şekilde oluşturulmuş boşluk sayısı, yarıiletken içerisine eklenen katkı atomlarının sayısına eşittir. Bu boşlukların her biri, bir elektronu kolayca kabul edebilen ve Şekil 3.5 (b)'de gösterilen alıcı (E_A) enerji seviyesinde bulunan boş bir alanı ifade eder.



Şekil 3.5. p-katkılı silisyumun şematik gösterimi (a) ve $T>0$ K'daki enerji bantları (b)

Silisyum kristaline eklenen boron gibi katkı atomlarına alıcı (akseptör) denir. Bu tip materyaller, p-tipi yarıiletken olarak isimlendirilir. p-tipi yarı iletken kristaldeki alıcı atomlarına bağlı olarak üretilen boşluklara ek olarak, termal olarak üretilen elektron-boşluk çiftleri de olacaktır. Termal olarak üretilen elektron-boşluk çiftleri, oda

sıcaklığında termal uyarımlara bağılı olarak kovalent bağı parçalanması nedeniyle üretilen elektron-boşluk çiftlerini ifade eder. Termal olarak üretilen bu elektronlar, p-tipi yarıiletken kristaldeki serbest elektronlara katkıda bulunurlar. Bir p-tipi yarıiletkendeki toplam boşluk sayısı, termal uyarımdan dolayı üretilen boşluklar ile katkılama sonucu alıcı atomlardan kaynaklanan boşlukların toplamıdır. Serbest elektronlar ise sadece ısısal uyarımdan kaynaklanırlar. Bu nedenle, p-tipi bir yarıiletkendeki serbest elektron sayısı, içindeki boşluk sayısından çok daha küçüktür. Bu nedenle bir p-tipi yarıiletkende boşluklar çoğunluk taşıyıcıları, elektronlar ise azınlık taşıyıcıları olarak adlandırılır.

3.2 Yarıiletken p/n Eklemleri

Bir p/n heteroeklemi, p-tipi ve n-tipi iki yarıiletken malzemenin kontak durumuna getirilmesi ile oluşturulur. Heteroeklemin p-tipi bölgesi ile n-tipi bölgesi aynı cins yarıiletken materyal ise, bu tür eklemlere homoeklem denir. Homoeklemlerin üretimi kolay ve maliyeti düşük olmasına rağmen, bu tür eklemleri kullanarak yüksek çalışma performanslı devre elemanları elde edilemez. p-tipi ve n-tipi iki farklı yarıiletken materyalden oluşan eklem, heteroeklem olarak isimlendirilir. Homoeklemlerle karşılaştırıldığında, heteroeklemlerin üretimi çok daha zordur. Buna karşın, bu tür eklemler ile çok daha verimli ve hızlı elektronik ve optoelektronik devre elemanları üretmek mümkündür.

p/n eklemleri optik dedektörler, güneş hücreleri, LED diyotlar, lazer diyotlar, bipolar transistörler ve alan etkili transistörler gibi birçok modern elektronik aygıt uygulaması için önemlidir. Bir p/n ekleminin temel özelliği, pozitif gerilimlerde iletimde olması, negatif gerilimlerde ise yük akışının engellenmesidir. Bu özelliklerinden dolayı doğrultucu, örnekleme devresi, demodülatör, mantık kapısı gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilirler.

p/n eklemleri hem modern elektronik uygulamalarında hem de diğer yarıiletken aygıtları anlamada büyük öneme sahiptir. p/n eklemlerinin akım-gerilim karakteristiklerinin ana teorisi, Shockley (Shockley, 1949; Shockley, 1950) tarafından geliştirildi. Bu teori daha sonra Sah, Noyce, Shockley ve Moll tarafından daha da ileriye götürüldü (Sah vd., 1957; Moll, 1958).

Bir heteroeklem, genel olarak farklı iki materyal arasındaki arayüzey olarak tanımlanır. Heteroeklemler, arayüzey civarında bir malzemeden diğerine geçiş uzunluklarına göre ani ve kademeli olarak da sınıflandırılabilir. Örneğin, ani heteroeklemlerde geçişler atomik uzunluklarda ($\leq 1\mu\text{m}$) gerçekleşirken, kademeli heteroeklemlerde difüzyon uzunluğunun birkaç katı uzunluklarda geçişler meydana gelir. Heteroeklemler ile ilgili bir başka sınıflandırmada ise, eklem her iki tarafında bulunan materyallerin iletkenlik cinsi dikkate alınır. Eğer iki yarıiletken aynı tipte iletkenliğe sahipse, bu tür eklemlere izotip heteroeklem denir. Farklı cinsten iletkenliğe sahip iki yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile oluşan heteroeklemler ise, anizotip heteroeklem olarak adlandırılır. İlk izotip ve anizotip heteroeklemler, 1960 yılında Anderson tarafından üretildi (Anderson, 1960). Anderson, 1962 yılında iki yarıiletken arasında oluşan arayüzey civarındaki enerji bantlarının yapısı için oldukça detaylı bir modeli de geliştirdi (Anderson, 1962). Farklı tip heteroeklemler için daha sonraki yıllarda çeşitli modeller geliştirildi ve bu modellerin geçerliliği deneysel çalışmalar ile doğrulandı. Bu çalışmalar sonucunda, ani heteroeklemler için geliştirilmiş modellerin birçok heteroeklem yapısı için de iyi bir yaklaşım olduğu ortaya kondu.

Heteroeklemlerin arayüzey özellikleri, eklem yapısında kullanılan yarıiletken malzemelerin cinsine ve üretimde kullanılan yöntemlere göre büyük farklılıklar gösterir. Anizotip heteroeklemler için geliştirilen modeller, homoelemler için geliştirilen geleneksel modelin daha kapsamlı hali olarak düşünülebilir. Eklem davranışının net bir şekilde anlaşılması, diğer yarıiletken aygıtların çalışmasını analiz etmek için önemlidir.

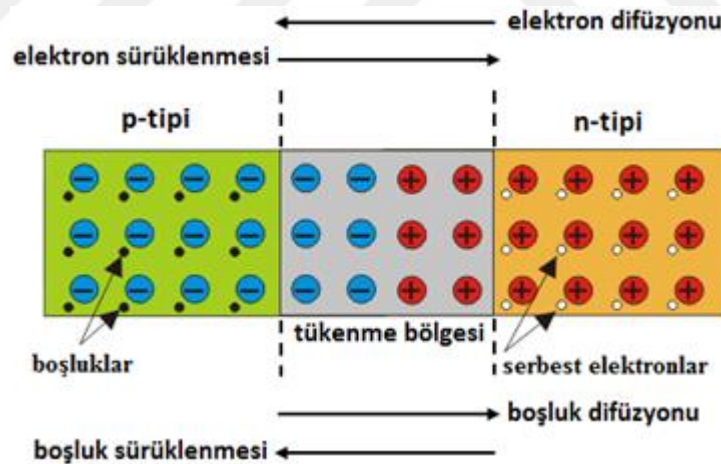
Bir p/n eklemının oluşumu sırasında iki önemli süreç vardır: difüzyon ve sürüklenme. Bir n-tipi yarıiletkende, boşluk yoğunluğuna kıyasla elektron yoğunluğu daha fazladır. Benzer şekilde, bir p-tipi yarıiletkende ise, boşluk yoğunluğu elektron yoğunluğunun üzerindedir. p/n eklemının oluşması sırasında yapının p ve n kısımlarındaki yoğunluk gradiyentinden dolayı, boşluklar p-tarafından n-tarafına ($p \rightarrow n$) ve elektronlar ise n-tarafından p-tarafına ($n \rightarrow p$) yayılırlar. Yük taşıyıcılarının bu hareketi, eklem boyunca bir difüzyon akımı meydana getirir.

Eğer bir elektron $n \rightarrow p$ hareket ederse, yapının n-tarafında iyonize olmuş bir verici bırakır. Pozitif yüklü iyonize olmuş bu verici, kendisini çevreleyen atomlara bağlı olduğu için

hareketsizdir. Elektronlar $n \rightarrow p$ yayılmaya devam ederken, eklem n- tarafında pozitif bir yük tabakası (veya pozitif uzay-yük bölgesi) oluşur. Benzer şekilde bir boşluk yoğunluk gradiyenti nedeniyle $p \rightarrow n$ difüz ettiğinde, arkasında hareketsiz olan iyonize olmuş negatif yüklü bir alıcı bırakır. Boşluklar yayılmaya devam ederken, eklem p- tarafında negatif bir yük tabakası (veya negatif uzay-yük bölgesi) oluşur. Başlangıçta eklem bir yanından diğer yanına elektronların ve boşlukların karşılıklı hareketi sonucunda, arayüzeyde serbest yükler bitmiştir. Eklem her iki tarafındaki bu uzay-yük bölgesi, tükenme bölgesi (depletion region) olarak bilinir (Şekil 3.6) ve bu bölgenin genişliği aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} V_0 \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de ϵ yarıiletkenin geçirgenliğini, q elementel yükü, V_0 eklem potansiyelini, N_A alıcı kirlilik yoğunluğunu ve N_D ise verici kirlilik yoğunluğunu ifade eder.



Şekil 3.6. p/n eklemine oluşum süreci

Tükenme bölgesinde çok az sayıda yük bulunduğundan bu bölge yaklaşık olarak yalıtkandır, yani direnci yüksektir. Tükenme bölgesinin kalınlığı mikrometrenin onda biri büyüklüğündedir. Eklem n- tarafındaki pozitif uzay-yük bölgesi ve p- tarafındaki negatif uzay-yük bölgesi sebebiyle, bu bölgede pozitif yükten negatif yüke doğru bir elektrik alan oluşur. Bu alanın etkisiyle, bir elektron eklem p- tarafından n- tarafına ve bir boşluk ise eklem n- tarafından p- tarafına hareket eder. Yük taşıyıcılarının elektrik alandan dolayı

bu hareketine sürüklenme adı verilir. Böylece, difüzyon akımının tersi yönde bir sürüklenme akımı başlar (Şekil 3.6).

Başlangıçta difüzyon akımı büyük, sürüklenme akımı küçüktür. Difüzyon süreci devam ederken uzay-yük bölgeleri eklem her iki tarafında da uzandıkça, tükenme bölgesinde oluşan elektrik alanın şiddeti artmaya ve dolayısıyla sürüklenme akımı da artmaya başlar. Bu süreç, difüzyon akımı sürüklenme akımına eşit olana kadar devam eder ve böylece bir p/n eklemi oluşmuş olur. p/n eklemindeki yarıiletken materyallerin Fermi Enerjisi seviyeleri her yerde sabit olduğunda eklem dengede olduğu söylenir. Yarıiletkenler termal dengede olduğunda toplam yük akışı sıfırdır. Bunun anlamı, p/n ekleminin her bölgesinde yük akışı sıfırdır. Bu sebeple elektron ve boşluk akışı sıfır olmak zorundadır. Bu durum ancak sürüklenme akımının difüzyon akımına eşit olması ile mümkün olur. Yani eklem bölgesindeki elektrik alanının oluşturduğu akım, p ve n bölgelerindeki yük gradientinden kaynaklanan akım ile dengelenir ve bu sebeple dengedeki bir p/n ekleminde net akım yoktur.

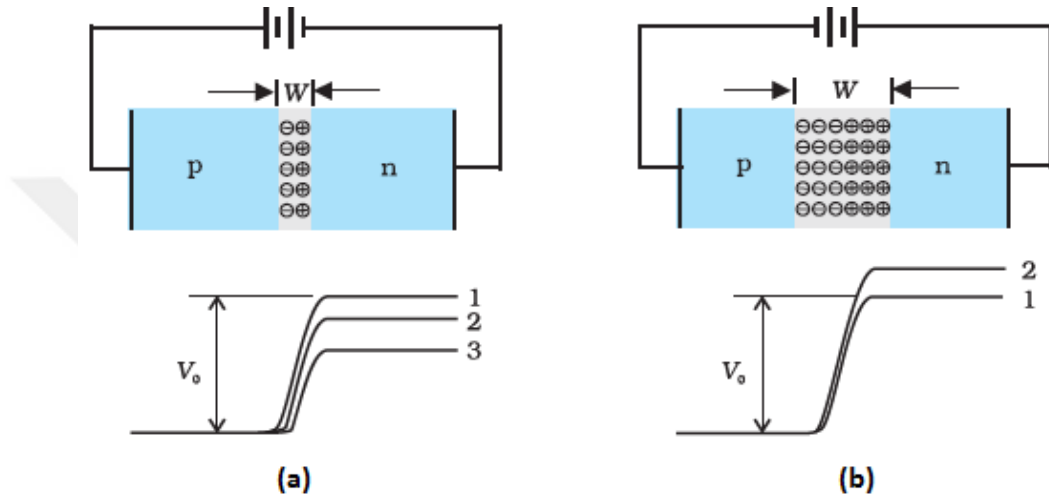
n-bölgesindeki elektron kaybı ve p-bölgesindeki elektron kazancı, iki bölgenin birleştiği eklemde bir potansiyel farkı oluşturur. Bu potansiyelin polaritesi, denge şartını sağlayacak şekilde taşıyıcıların daha fazla akışına ters yöndedir. Elektronların p-bölgesinden n-bölgesine hareketini engelleyen bu potansiyel genellikle bariyer potansiyeli olarak adlandırılır ve şu şekilde ifade edilir:

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (3.2)$$

Burada k Boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık, q elementel yük, N_a n-tipi bölgedeki verici yoğunluğu, N_d p-tipi bölgedeki alıcı yoğunluğu ve n_i ise saf taşıyıcı sayısıdır.

Bir dış V voltajı, bir p/n heteroeklemi üzerine eklem p-tarafı pilin pozitif ucuna ve n-tarafı ise eksi ucuna bağlanacak şekilde uygulandığında, eklem ileri (pozitif) yönde kutuplandığı söylenir (Şekil 3.7). Uygulanan voltaj çoğunlukla tükenme bölgesi boyuncadır; eklem p-tarafından n- tarafına olan voltaj düşmesi önemsizdir. Bunun nedeni, hiçbir yük barındırmayan tükenme bölgesinin direncidir ki bu direnç eklem n ve p-tarafındaki dirence kıyasla çok büyüktür. İleri kutuplama durumunda uygulanan

voltajın yönü, eklem bölgesinin V_0 potansiyelinin tersi yöndedir. Bu durumda bariyer yüksekliği azaldığından tükenme tabakasının genişliği de azalır. Pozitif gerilim altında, etkin bariyer yüksekliği $(V_0 - V)$ 'dir. Eğer uygulanan gerilim küçükse, bariyer potansiyeli denge değerinin biraz altına düşer ve sadece materyaldeki çok az sayıda taşıyıcı yeterli enerjiye sahip olup eklemın diğer tarafına geçer. Bu durumda oluşan akım küçüktür. Eğer dışarıdan uygulanan voltaj değeri önemli ölçüde artırılırsa, bariyer yüksekliği azalır ve daha fazla sayıda taşıyıcı gerekli enerjiye sahip olur. Böylece akım değeri de artar.



Şekil 3.7. İleri kutuplamadaki (a) ve ters kutuplamadaki (b) p/n eklemi ve potansiyel bariyeri

Pozitif beslemede uygulanan voltaj nedeniyle eklemın n-tarafındaki elektronlar, tükenme bölgesini geçerek eklemın azınlık sayıda oldukları p-tarafına giderler. Benzer şekilde, p-tarafındaki boşluklar eklemi geçerek azınlık sayıda oldukları n-tarafına ulaşırlar. Pozitif kutuplama altındaki bu süreç azınlık taşıyıcı enjeksiyonu olarak bilinir. Eklemın her iki tarafındaki sınırda bulunan azınlık taşıyıcıların yoğunluğu, eklemden uzak bölgelerdeki yoğunluklar ile karşılaştırıldığında önemli miktarda artar. Bu yoğunluk farkı nedeniyle, p-tarafındaki enjekte edilen elektronlar bu bölgenin eklem sınırından diğer ucuna doğru yayılırlar. Benzer şekilde, n-tarafına enjekte edilmiş boşluklar, eklem sınırından n-bölgesinin diğer ucuna hareket ederler. Eklemın her iki tarafındaki yüklü taşıyıcıların bu hareketi sonucunda bir akım meydana gelir. Toplam pozitif besleme akımı, boşlukların difüzyon akımı ile elektronların difüzyon akımının toplamı olup büyüklüğü genellikle mA düzeyindedir.

Bir p/n eklemının n-tarafına pozitif ve p-tarafına negatif bir dış voltaj (V) uygulandığında

eklemin ters kutuplandığı söylenir. Uygulanan voltaj yoğunlukla tükenme bölgesine etkir ve yönü bariyer potansiyelinin yönü ile aynıdır. Bu nedenle, ters besleme altında bariyer yüksekliği artar ve eklemin elektrik alanındaki değişimden dolayı tükenme bölgesi genişler. Ters gerilim altında etkin bariyer yüksekliği ($V_0 + V$) olur (Şekil 3.7 (b)). Bu durum, elektronların $n \rightarrow p$ hareketini ve boşlukların ise $p \rightarrow n$ hareketini önler. Böylece, difüzyon akımı eklemin pozitif besleme durumundaki akımına kıyasla çok azalır. Eklemin elektrik alan yönü, p-tarafındaki elektronları ve n-tarafındaki boşlukları ekleme yaklaştırıp bu yüklerin yoğunlukta olduğu eklemin diğer tarafına süpürecek yöndedir. Yüklerin bu sürüklenmesi akım meydana getirir. Sürüklenme akımı birkaç μA düzeyindedir. Bu değer oldukça düşüktür, çünkü sürüklenme akımı taşıyıcıların azınlık sayıda oldukları bölgeden yoğunluk sayıda oldukları bölgeye hareketinden kaynaklanmaktadır. Pozitif beslemede de sürüklenme akımı oluşur; fakat değeri enjekte edilmiş yüklerin oluşturduğu akım ile karşılaştırıldığında ihmal edilecek kadar küçüktür.

Ters akım, uygulanan voltaja çok fazla bağlı değildir. Küçük bir voltaj değeri bile azınlık taşıyıcılarını eklemin bir tarafından diğer tarafına sürüklemek için yeterlidir. Akım, uygulanan voltajın büyüklüğü ile sınırlı değildir, ancak eklemin her iki tarafındaki azınlık taşıyıcılarının yoğunluğu akım değerini sınırlar.

Ters beslemedeki akım, uygulanan dış voltajın belirli bir kritik değerine kadar voltajdan bağımsızdır. Bu kritik değere kırılma voltajı denir. Ekleme uygulanan dış voltaj kırılma voltajına eşit büyüklükte olduğunda, ters akım keskin bir şekilde artar. Bu durumda voltajdaki küçük bir artış bile akımın çok miktarda yükselmesine sebep olur. Bu durumda p/n eklemi fazla ısınmadan dolayı zarar görür. Benzer bir durum ileri kutuplamada uygulanan dış voltajın yüksek olması halinde de meydana gelir.

3.3 Yarıiletken p/n Heteroeklemlerde Enerji Bant Yapısı

Bir p/n heteroekleminin arayüzeyindeki enerji bant yapısı, heteroeklemin akım iletim mekanizmasını anlamada büyük rol oynar. Herhangi bir heteroeklemin enerji bant yapısı, arayüzey durumlarının var olmadığı durumda heteroeklemi oluşturan iki yarıiletken malzemenin elektron ilgisine (χ), enerji bant aralığına (E_g) ve iş fonksiyonuna (ϕ) bağlıdır. Bu üç parametreden elektron ilgisi ve bant aralığı, p/n heteroekleminde kullanılan p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin temel özelliklerine bağlıdır ve katkılama oranı

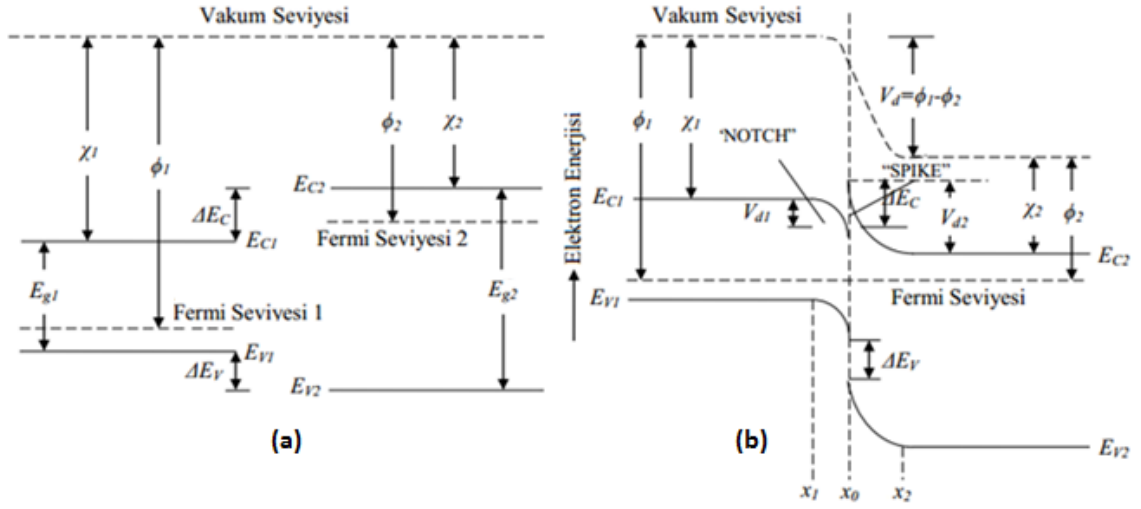
ile değişmez. Diğer taraftan, iş fonksiyonu katkılama oranına bağlı bir parametredir. Birçok heteroeklem için arayüzey yakınındaki enerji bant yapılarının düzenlenişi Anderson, Oldham ve Milnes ve Van Ruyven tarafından 1962 yılında önerildi (Anderson, 1962). Anderson'un önerdiği modelde, arayüzey durumları ihmal edilirken, Oldham ve Milnes modelinde enerji bant yapısı üzerine arayüzey durumlarının etkileri de dâhil edildi. Van Ruyven'in modeli, çeşitli anizotip ve izotip heteroeklemlerin mümkün bant yapısını arayüzey etkilerinin olduğu ve olmadığı durumlar için teorik olarak sunar. Ancak, Anderson'un enerji bant modelinin birçok heteroeklem yapısı için oldukça iyi bir yaklaşım olduğu çalışmalarda gözlenmiştir.

Birbirinden farklı bant aralıklarına (E_{g1}, E_{g2}), iş fonksiyonlarına (ϕ_1, ϕ_2) ve elektron ilgilerine (χ_1, χ_2) sahip iki yarıiletken materyal bir heteroeklem oluşturmak üzere kontak durumuna getirildiğinde, yarıiletkenlerin Fermi Enerjisi seviyeleri denge durumunda aynı hizaya gelir ve enerji bantlarında bir süreksizlik oluşur. İletkenlik bandındaki süreksizlik (ΔE_c) ile valans bandındaki süreksizlik (ΔE_v), yarıiletkenlerin sahip olduğu farklı bant aralıklarından kaynaklanmaktadır. Anderson modeline göre, ideal durumda iletkenlik ve valans bandındaki bu süreksizlikler aşağıdaki eşitliklerle verilir:

$$\Delta E_c = q(\chi_2 - \chi_1) \quad (3.3)$$

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c = (E_{g1} - E_{g2}) - q(\chi_2 - \chi_1) \quad (3.4)$$

Anderson modeline göre enerji bant yapısının oluşumu Şekil 3.8'de şematik olarak görülmektedir. Birbirinden yalıtılmış farklı iki yarıiletkenin eklem oluşturmadan önceki bant yapıları Şekil 3.8 (a)'da, termal denge durumunda bir ani p/n heteroekleminin enerji bant yapısı ise Şekil 3.8 (b)'de tasvir edilmiştir.

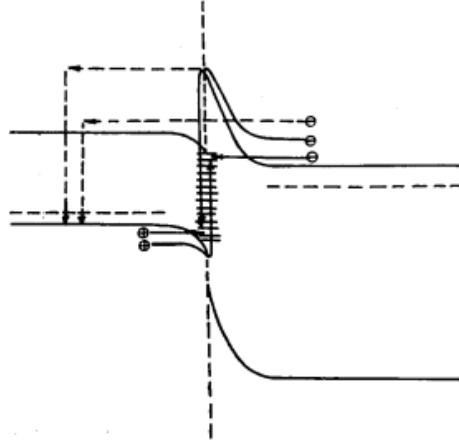


Şekil 3.8. Termal dengedeki enerji bant yapısının şematik gösterimi. (a) Ani p/n heteroeklem oluşmadan önce, (b) Ani p/n heteroeklem oluşuktan sonra (Kaya, 2016)

3.4 Ani Anizotip Eklemlerde İletim Mekanizmaları

Ani anizotip eklemlerdeki yük taşıyıcılarının iletim mekanizmalarını açıklamak için difüzyon modeli, emisyon modeli, emisyon-yeniden birleşme modeli, tünelleme modeli ve tünelleme-yeniden birleşme modeli gibi modeller geliştirilmiştir (Kaya, 2016). Bu modellerin hiçbiri, deneysel gözlemlerle tam bir uyum sağlamamıştır. Genel olarak akımın uygulanan voltaja bağlı değişimi, bu modellerde varsayılandan çok daha farklıdır. Bu nedenle Donnelly ve Milnes, akım iletim mekanizmalarının tümünü bir araya getirip p/n heteroeklemlerindeki akım iletiminin iki farklı mekanizma ile eşzamanlı olarak gerçekleştiğini önermiştir (Şekil 3.9).

İlk mekanizma, bant aralığı dar olan p-tipi bir materyale azınlık taşıyıcılarının enjeksiyonu ve materyal içinde yeniden-birleşmesidir. İkinci mekanizmada ise, termal emisyonla veya tünelleme ile potansiyel bariyerinin üzerinden veya içinden geçen elektronların ve boşlukların heteroeklemin arayüzeyinde yeniden-birleşmesi söz konusudur. Donnelly ve Milnes ile diğer bilim insanlarının gözlemleri, yük iletiminin ilk grup mekanizma ile gerçekleşme olasılığını ortadan kaldırmıştır. Deneysel gözlemlere göre, herhangi bir anizotip heteroeklemin verilen bir voltaj aralığında deneysel olarak gözlenen akım-gerilim özellikleri, genellikle ikinci grup mekanizma ile açıklanabilir.



Şekil 3.9. Donnelly ve Milnes tarafından önerilen iki mekanizma grubunun şematik gösterimi (grup 1-kesikli çizgi ile ve grup 2-düz çizgi ile gösterilmiştir.) (Kaya, 2016)

Anderson, ileri kutuplamadaki akımları termal akımlar ve termal olmayan akımlar olarak sınıflandırmıştır (Anderson, 1971). Termal akımlarda, akım taşıyıcılarının ekleminden geçmek için bariyeri geçmeleri zorunludur ve bu akımlar aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$I = A \exp\left(-\frac{qV_0}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) \quad (3.5)$$

Burada V_{B0} dış gerilimin olmadığı durumdaki bariyer yüksekliğini, η bariyerin uygulanan voltaj ile değişiminin ölçüsünü ve A ise modele bağlı katsayıyı gösterir. η , termal akımlar için baskın mekanizma tipinin bir göstergesidir.

Akım taşıyıcıları, arayüzeydeki süresiz potansiyel bariyerinden tünelleme ile de geçebilir. Eğer tünelleme yüksek enerji değerlerinde baskın ise, tünelleme akımları doğal olarak termal akımdır. Ancak, tünelleme süresizlik bariyerinin tabanında baskınsa, bu durumda akım taşıyıcıları için geçecek bir potansiyel bariyerinden söz edilemez ve akım termal olmayan akımdır. Termal olmayan akımlar fazlalık akımları olarak da bilinir. Bir p/n heteroeklemindeki termal olmayan ileri yöndeki akımın genel biçimi Denklem (3.6) ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$I = \frac{I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]}{(1 + I_s/I_d)} \quad (3.6)$$

Burada,

$$I_s = aqN_{D1} \left(\frac{D_{n1}}{\tau_{n1}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

$$I_d = \frac{1}{2} aqX_m N_{D2} \bar{v}_{xe2} \exp \left[-\frac{q}{kT} (V_F + V) \right] \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklemlerde a eklem alanını, D_{n1} ile τ_{n1} p-tipi yarıiletkendeki elektronlar için difüzyon sabitini ve yaşam ömrünü, N_{D1} p-tipi materyal için denge durumunda alıcıların yoğunluğunu, N_{D2} n-tipi yarıiletken için denge durumunda vericilerin yoğunluğunu, V uygulanan dış voltajı, $\bar{v}_{xe2} = (2kT/\pi m_n^*)^{1/2}$ n-tipi materyalde etkin kütlesi m^* olan elektronların ortalama hızlarının x-bileşenini ve V_F ise n-tipi materyal tarafındaki bariyeri ifade eder.

Anderson, ters yöndeki akımları da termal akımlar ve termal olmayan akımlar olarak sınıflandırmıştır. Geçiş bölgesinde üretilen taşıyıcılar, bu bölgedeki elektrik alanının etkisiyle hemen uzaklaştırılırlar ve akıma katkıda bulunurlar. Geçiş bölgesi dışında üretilen taşıyıcılar ise, yeniden-birleşmeye uğramadan önce yüksek alan bölgesine sürüklenerek akıma katkı sağlarlar. Burada yine termal olmayan akımlar baskın tünelleme akımlarıdır.

3.5 Yarıiletken Materyalleri Analiz Yöntemleri

3.5.1 Yapısal analiz

Üç-boyutlu uzayda düzenli şekilde atom dizilimine sahip olan malzemelerde görülen yapı kristal yapıdır. Katı materyallerin kristal yapıları, yapıda bulunan atom gruplarının veya moleküllerin materyale özgü olan bir geometrik düzende bir araya gelmesiyle meydana gelir ve bu yapılar X-ışını kırınımı, nötron kırınımı, elektron kırınımı ve elektron mikroskopisi gibi farklı teknikler ile incelenebilir. Bu teknikleri kullanarak incelenen materyalin örgü parametrelerini hesaplamak, yapısında oluşan fazları ve kristalinite durumlarını (kristal, polikristal ve amorf) belirlemek, kusurlarını ve yapı içinde var olan stresi saptamak mümkündür.

3.5.1.1 X-ışını kırınımı (XRD) tekniği

Kırınım yöntemleri, kimyasal bileşikleri kristal yapılarından teşhis eder. Bu, aynı kompozisyona sahip farklı bileşiklerin veya fazların da tanımlanabileceği anlamına gelir. X-ışını kırınım yöntemleri, malzemelerin kristal yapılarını belirlemede kullanılan en etkili yöntemlerdir. Kristal yapı ve yapı içerisindeki atomların dizilişleri ilk olarak 1912 yılında Max Van Lave tarafından X-ışını kırınımı desenleri kullanılarak incelenmiş ve bu yöntem o zamandan günümüze kadar malzeme karakterizasyonu için en yaygın şekilde kullanılan ve kullanılan teknik olmuştur.

X-ışınları 0,01-10 nm arasında değişen kısa dalgaboyuna sahip yüksek enerjili elektromanyetik dalgalarıdır. 1895 yılında Wilhelm Roentgen'in Würzburg Üniversitesi'nde düşük basınçlı gazlardaki elektrik deşarjını incelerken, gaz deşarj borusundan birkaç metre uzaktaki siyah kartonun arkasında bir flüoresan ekranın parladığını fark etmesiyle keşfedilmiş ve bilinmeyen doğasından dolayı X-ışınları olarak adlandırılmıştır. Tipik X-ışını dalgaboyu ~0,1 nm olup bu değer kristal katıların atomik uzaklıkları ile aynı mertebededir.

X-ışınları katı bir kristal ile soğurma, saçılma, yansıma ve geçirme gibi çeşitli şekillerde etkileştiğinde bu materyalin yapısal parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir. X-ışınları düzenli yapıya sahip kristal fazdaki bir madde ile etkileştiğinde, bir kırınım deseni oluşur. Bu desen, ait olduğu malzemeye has bir parmak izi olarak düşünülebilir ve malzemenin yapısı hakkında önemli bilgiler içerir. X-ışınları kristal bir madde ile etkileştiğinde, belirli yönelimlerde yapıcı girişim meydana gelir ve bunun sonucunda X-ışını kırınım desenleri oluşur. Yapıcı girişim, bir materyalin yapısındaki periyodik olarak dizilmiş paralel düzlemlerden yansıyan X-ışınlarının birbirini güçlendirmesi durumudur. Paralel düzlemlerin yönelimi ve aralarındaki uzaklıklar h , k ve l indisleri ile gösterilir. Bir (hkl) düzlemi, h kesitindeki birim hücrenin a -ekseniyle, k kesitindeki b -ekseniyle ve l kesitindeki c -ekseniyle kesişmesi ile oluşan düzlemi temsil eder. Bir birim hücre, üç-boyutta tekrar edildiğinde tüm kristal yapıyı oluşturabilen en küçük hacimli hücre olarak tanımlanır. Birim hücrenin gösteriminde a , b ve c eksenleri ile α , β ve γ açıları kullanılır. Farklı şekillere sahip çok çeşitli birim hücreler olabilir. Fakat üç-boyutlu uzayda en küçük hacim elemanı ile tamamen doldurulma gerekliliği vardır. Bu kısıtlama altında, bilinen 7 adet kristal sistemini oluşturan 7 tane birim hücre tanımlanır (Çizelge 3.1).

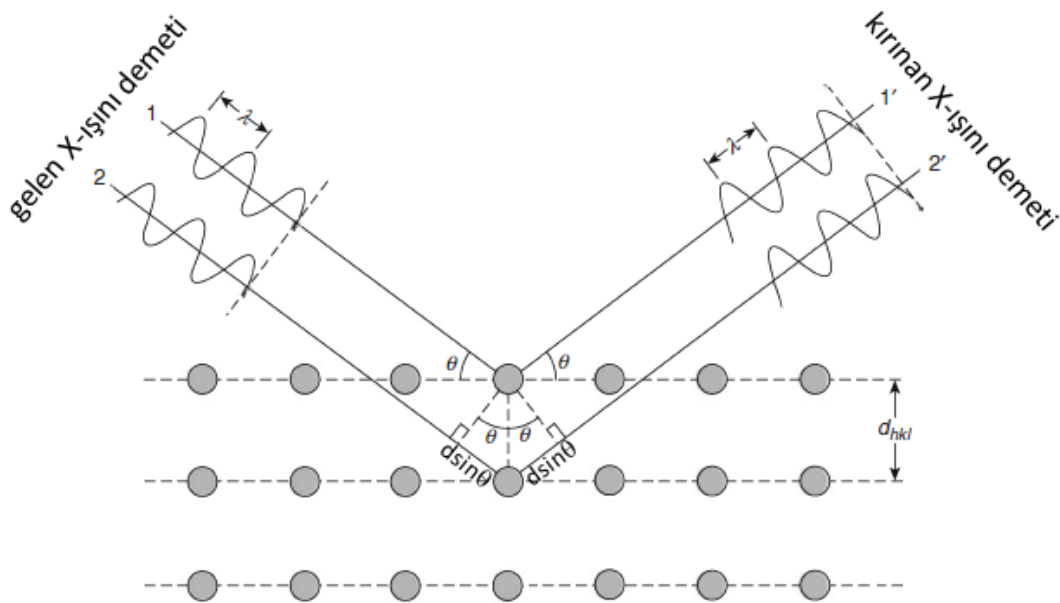
Çizelge 3.1. Kristal sistemleri

Kristal Sistemi	Eksen uzunlukları	Açılar
Kübik	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorombik	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Trigonal	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Hegzagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Monoklinik	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$
Triklirik	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

Kristal bir materyal üzerine X-ışınları düştüğünde kırınım deseni oluşması için gelen ışın ile yansıtıcı düzlem arasındaki açının, kırınan ışınla yansıtıcı düzlem arasındaki açıya eşit olması gerekir. Bir diğer koşul ise, gelen dalganın ve düzlemlerden yansıyan dalganın aynı fazda olması ve yol uzunlukları farkının dalgaboyunun tam katı olmasıdır. Bu şartlar, Bragg Kırınım Yasası olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.9)$$

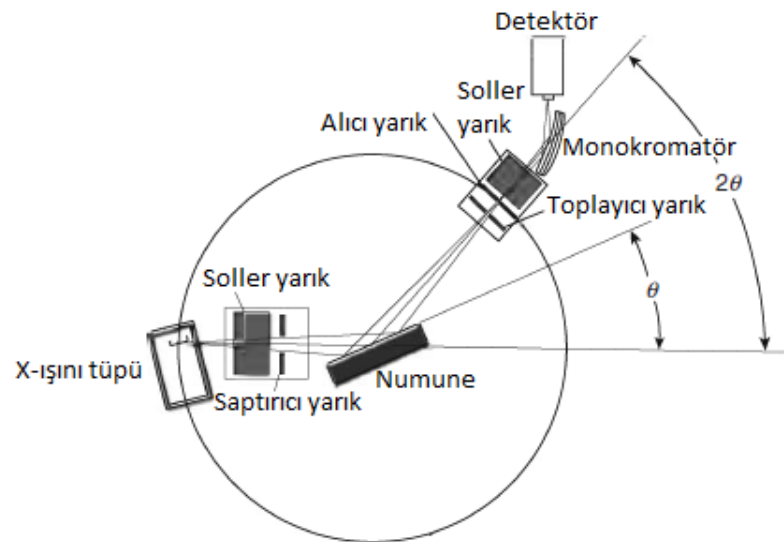
Burada n , λ , d ve θ sırasıyla kırınımın derecesini, gelen X-ışının dalgaboyunu, paralel düzlemler arasındaki mesafeyi ve Bragg açısını gösterir. Bragg Kırınım Yasası'nın şematik tasviri Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10. Bragg Kırınım Yasası'nın şematik tasviri

X-ışını kırınım tekniği, başlangıçta toz numunelerin kristal yapısının incelenmesinde kullanıldığından, bu yönteme çoğu zaman X-ışını toz kırınımı denir. Ancak, toz dışındaki polikristal katılar da bu teknikle incelenebilir. Toz kırınımı yönteminde değişken parametre açı değeridir. X-ışını kırınımında kullanılan alet, X-ışını difraktometresi olarak adlandırılır. Difraktometrede, polikristal örnekleri incelemek için tek dalgaboyundaki bir X-ışını demeti kullanılır. X-ışını demetinin geniş açısı sürekli olarak değiştirilerek, gelen ve kırınan ışınlar arasındaki açıya karşı kırınım şiddeti kaydedilir. Kaydedilen desen, bilinen kristal halindeki maddelerin kırınım spektrumunu içeren bir veri tabanı ile karşılaştırılarak, incelenen malzemenin kristal yapısı ve kalitesi hakkında analiz yapılır. X-ışını kırınım deseninde gözlenen piklerin şiddeti, genişliği, şekli ve oluştuğu açı değeri değerlendirilerek materyalin kristal yapısı hakkında önemli bilgiler elde edilebilir. Faz tespiti, pik konumlarına karşılık gelen 2θ açı değerlerinin ve düzlemler-arası mesafenin literatürde var olan standart JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) dosyaları ile karşılaştırılmasıyla yapılır. Materyalin yapısındaki gerilme miktarı ise, kırınım piklerinin oluştuğu açı değerlerindeki kayma miktarından belirlenir. Materyal içindeki kristalitlerin doku boyutlarını belirlemek için, kırınım piklerinin yarı şiddetteki genişliklerinin ölçümü yapılır.

Bir difraktometrenin temel fonksiyonu, malzemelerin X-ışını kırınımını tespit etmek ve kırınım şiddetini, kırınım açısı (2θ)'ya bağlı olarak kaydetmektir. Şekil 3.11, bir X-ışını difraktometresinde bulunan X-ışını kaynağının, numunenin ve detektörün geometrik düzenini göstermektedir.

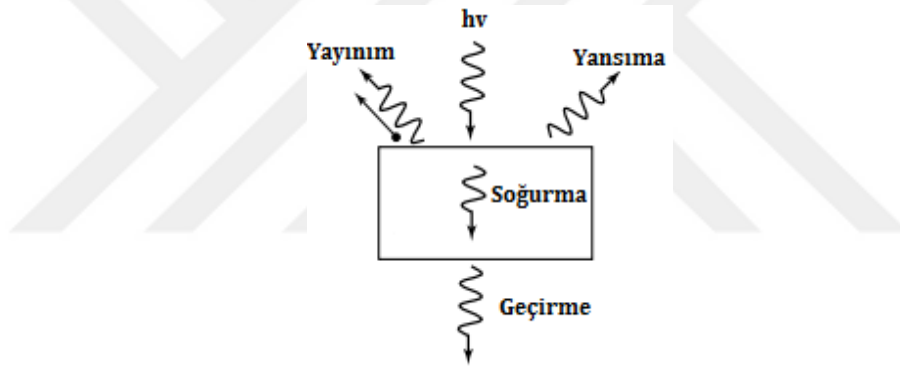


Şekil 3.11. Bir X-ışını difraktometresinin geometrik düzeni

Difraktometrede bir X-ışını tüpünde üretilen X-ışını radyasyonu, ışın demetlerini paralel duruma getirmek için özel bir yarıktan geçer ve daha sonra örneğe çarpar. X-ışınları numune tarafından kırınmaya uğrattılır ve kırınan ışın demeti alıcı yarıklarda yakınsak biçime getirildikten sonra detektöre ulaşır.

3.5.2 Optik analiz

Yarıiletken materyaller, ışık ile çeşitli şekillerde etkileşirler ve bunun sonucunda soğurma, geçirme, yansıma ve saçılma gibi farklı olaylar meydana gelir (Şekil 3.12). Gelen ışık ile materyal arasındaki etkileşmeden kaynaklanan sinyaller ölçülerek materyalin optik özellikleri hakkında bilgiler elde edilebilir. Yarıiletkenlerin optik özelliklerinin belirlenmesi için tasarlanmış çok sayıda optik aygıt mevcuttur. Optik analiz teknikleri, temassız ve tahribatsız tekniklerdir.

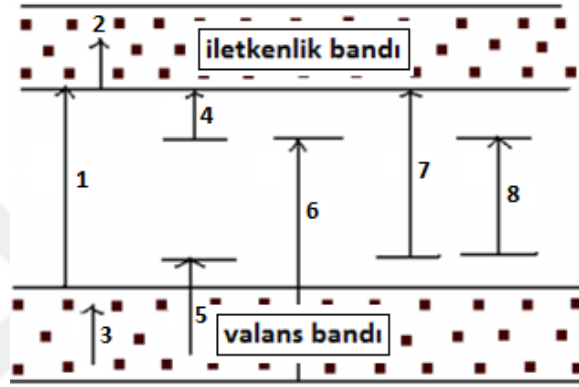


Şekil 3.12. Materyallerin ışıkla etkileşme biçimleri

3.5.2.1 Optik soğurma

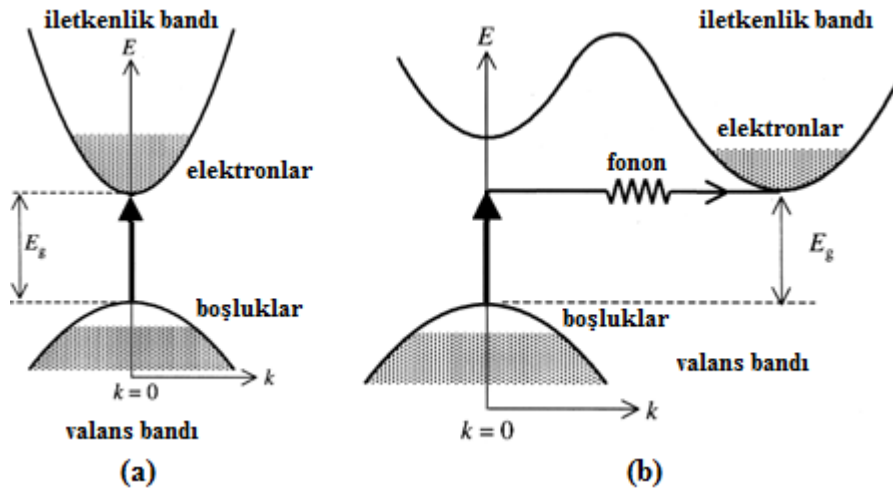
Yarıiletken materyallerin bant yapılarını belirlemede en çok tercih edilen ölçüm tekniklerinden bir tanesi optik geçirgenlik ve yansıma veya soğurma tekniğidir. Soğurma mekanizması, elektronların fotonlar ile düşük enerji seviyesinden daha yüksek enerji seviyelerine uyarılmasıdır. Bu süreçte, toplam soğurma katsayısına katkıda bulunan banttandır (1), iletkenlik bandı içinde (2), valans bandı içinde (3), vericiden iletkenlik bandına (4), alıcıdan valans bandına (5), valans bandından vericiye (6), alıcıdan iletkenlik bandına (7) ve vericiden alıcıya (8) geçişler gibi çoklu mekanizmalar gerçekleşebilir (Şekil 3.13). Materyal ile etkileşen fotonun enerjisi, hangi soğurma mekanizmasının gerçekleşeceğini belirleyen temel parametredir. Temel soğurma olarak adlandırılan

durum, materyalin yasak bant aralığının gelen fotonun enerjisinden küçük olması durumudur ve bu durumda yarıiletkendeki elektronlar valans bandından iletkenlik bandındaki boş durumlara uyarılırlar. Böyle bir elektron geçişi sonucunda, yasak bant aralığına yakın değerdeki foton enerjileri için soğurma katsayısında bir artış olur. Fakat foton enerjisi bant aralığından daha küçük bir değerde ise, eksitonların soğurması veya kirlilik ya da kusur durumları (alıcı veya verici) ile bant durumları (iletkenlik veya valans) arasında geçişler meydana gelir. Böylece, düşük enerjilerde iletkenlik bandının ya da valans bandının içinde meydana gelen geçişlerden dolayı sürekli bir soğurma olur.



Şekil 3.13. Yarıiletken materyallerdeki soğurma süreçleri

Banttın banda geçişlerdeki soğurma, iletkenlik bandının en alt noktasının ve valans bandının en üst noktasının Brillouin bölgesindeki konumlarına bağlı olarak doğrudan ve dolaylı soğurma olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Doğrudan ve dolaylı geçişler süresince momentum ve enerji korunur. Bu iki geçiş, Şekil 3.14'te tasvir edilmiştir.



Şekil 3.14. Doğrudan (a) ve dolaylı (b) geçişler

Doğrudan bant yapısına sahip yarıiletkenlerde, iletkenlik bandının en alt noktası ile valans bandının en üst noktası aynı momentum dalga vektörü değerine sahiptir ve bu tür yarıiletkenlerdeki geçiş, doğrudan geçiş olarak adlandırılır. Dolaylı bant yapısına sahip yarıiletkenlerde ise, iletkenlik bandının en alt noktası ile valans bandının en üst noktası farklı momentum dalga vektörü değerine sahiptir ve bu tür yarıiletkenlerdeki geçiş, dolaylı geçiş olarak isimlendirilir. Dolaylı geçişte, momentum korunumu bir fonon oluşumu ile sağlanır. Dolaylı bant aralığına sahip materyallerdeki geçişler için fonon oluşumu gerekliliği, geçiş olasılığını azalttığı için bu yarıiletkenlerde doğrudan bant aralıklı materyallere göre çok daha zayıf soğurma gerçekleşir.

Yarıiletken materyallerin dalgaboyuna bağlı optik soğurma katsayısı (α), yansımaya ve geçirme deneylerinden elde edilen spektrumların Denklem (3.10)'da verilen eşitlikte kullanılmasıyla yine dalgaboyuna bağlı olarak elde edilir (Schroder, 2006):

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right) \quad (3.10)$$

Burada R materyalin optik geçirgenlik yüzdesi ve T ise yansımaya yüzdesidir.

Yansımanın 1'den çok küçük olduğu bir durumda ($R \ll 1$) soğurma katsayısı şu biçime indirgenir:

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.11)$$

Soğurma katsayısı, parabolik bantlar arasındaki geçişler için Denklem (3.12) ile de verilebilir:

$$\alpha(h\nu) = C(h\nu - E_g)^n \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'de $h\nu$ foton enerjisini, C foton enerjisinden bağımsız ve değeri $\sim 10^4$ olan karakteristik bir sabiti, E_g yarıiletken malzemenin yasak bant aralığını ve n ise doğrudan ve dolaylı bant yapısına sahip yarıiletkenlerdeki izinli ve yasak elektronik geçişler için sırasıyla 0,5, 1,5, 2 veya 3 olan bir değeri gösterir (Yacobi, 2002).

3.5.3 Elektriksel analiz

3.5.3.1 Elektriksel iletkenlik

Elektriksel iletkenlik, bir materyalin elektrik akımını ne derecede ilettiğinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Elektriksel iletkenlik, dört-nokta prob ve Van der Pauw metodu gibi çeşitli yöntemler kullanılarak ölçülebilir.

Yarıiletken materyallerin iletkenliği aygıt uygulamaları için oldukça önemlidir. Eğer bir aygıt yapısında kullanılan yarıiletken bir materyalin direnci yüksekse, bu durum aygıtın seri direncini ve diğer başka parametrelerini olumsuz yönde etkileyerek aygıtın çalışma performansını düşürür. Bir yarıiletkende hem elektronlardan hem de boşluklardan akıma katkı geldiğinden, materyalin iletkenliği (σ) aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\sigma = q(n\mu_e + p\mu_p) \quad (3.13)$$

Burada n serbest elektron yoğunluğu, p serbest boşluk yoğunluğu ve μ ise mobilitayı gösterir ve mobilita birim elektrik alan başına düşen sürüklenme hızı olarak tanımlanır ($\mu = v_d / E$, v_d sürüklenme hızı ve E uygulanan elektrik alan). Bir yarıiletken materyalin iletkenliği (dolayısı ile öz direnci), taşıyıcı yoğunluğu ve mobilita değerleri ölçülerek belirlenir.

3.5.3.2 Hall etkisi ve mobilita

Taşıyıcı mobilitesi aygıt performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Düşük elektrik alanlarda, taşıyıcı hızı mobilita ile orantılıdır. Büyük mobiliteli aygıtlarda, taşıyıcılar aygıt boyunca hareket etmek için daha az süreye ihtiyaç duyduğundan aygıtın frekans tepkisi daha yüksek olur. Ayrıca mobilitesi büyük aygıtlar, kapasitörleri daha hızlı şarj eden daha yüksek akımlara sahiptir ve bu da daha yüksek bir frekans tepkisi ile sonuçlanır.

Kullanımda olan çeşitli mobilita tanımları vardır. Temel mobilita, temel kavramlardan hesaplanan mikroskobik mobilitedir ve taşıyıcıların kendi bulunduğu banttaki mobilitasını ifade eder. İletkenlik mobilitesi, bir yarıiletken materyalin iletkenlik veya

direncinden elde edilen mobilitedir. Hall mobilitesi ise, Hall etkisi deneyinden bulunur ve iletkenlik mobilitelerinden sadece Hall faktörü çarpanı kadar farklıdır.

Hall etkisi, Hall tarafından 1879 yılında manyetik alanda akım taşıyan bir iletkeni etkileyen kuvvetin doğasını araştırdığı sırada keşfedildi. Hall etkisi ölçümü, yarıiletkenlerin taşıyıcı tipini, serbest taşıyıcı yoğunluğunu ve mobilitelerini belirlemede kullanılan en güçlü elektriksel analiz tekniklerinden bir tanesidir. Hall etkisi deney sisteminde, akımın dışarıdan uygulanan bir manyetik alana dik olarak aktığı bir iletken materyal vardır. İletkendeki hareketli taşıyıcılara etkiyen Lorentz kuvveti etkisiyle, hem akıma hem de uygulanan dış manyetik alana dik yönde bir elektrik alan meydana gelir. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler için sırasıyla negatif ve pozitif olan Hall katsayısı (R_H) aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$R_H = \frac{d V_H}{B I} \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'te B dışarıdan uygulanan manyetik alanı, I materyalden geçen akımı, d materyalin genişliğini ve V_H ise ölçülen Hall voltajını gösterir. p-tipi ve n-tipi yarıiletken materyallerin boşluk yoğunluğu (p) ve elektron yoğunluğu (n), Denklem (3.14) ile verilen Hall katsayısından bulunabilir.

$$p = \frac{1}{q R_H} \quad (3.15)$$

$$n = -\frac{1}{q R_H} \quad (3.16)$$

Eğer yarıiletken materyalin iletkenlik değeri biliniyorsa, bu değer aşağıdaki denklemde kullanılarak Hall mobilitesi (μ_H) elde edilebilir:

$$\mu_H = \sigma |R_H| \quad (3.17)$$

Yarıiletkenlerin serbest taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı cinsi ve mobilitesi, materyalin iletkenlik ve Hall etkisi ölçümlerinden elde edilen sonuçların bir araya getirilmesi ile elde

edilebilir.

3.5.4 Morfolojik analiz

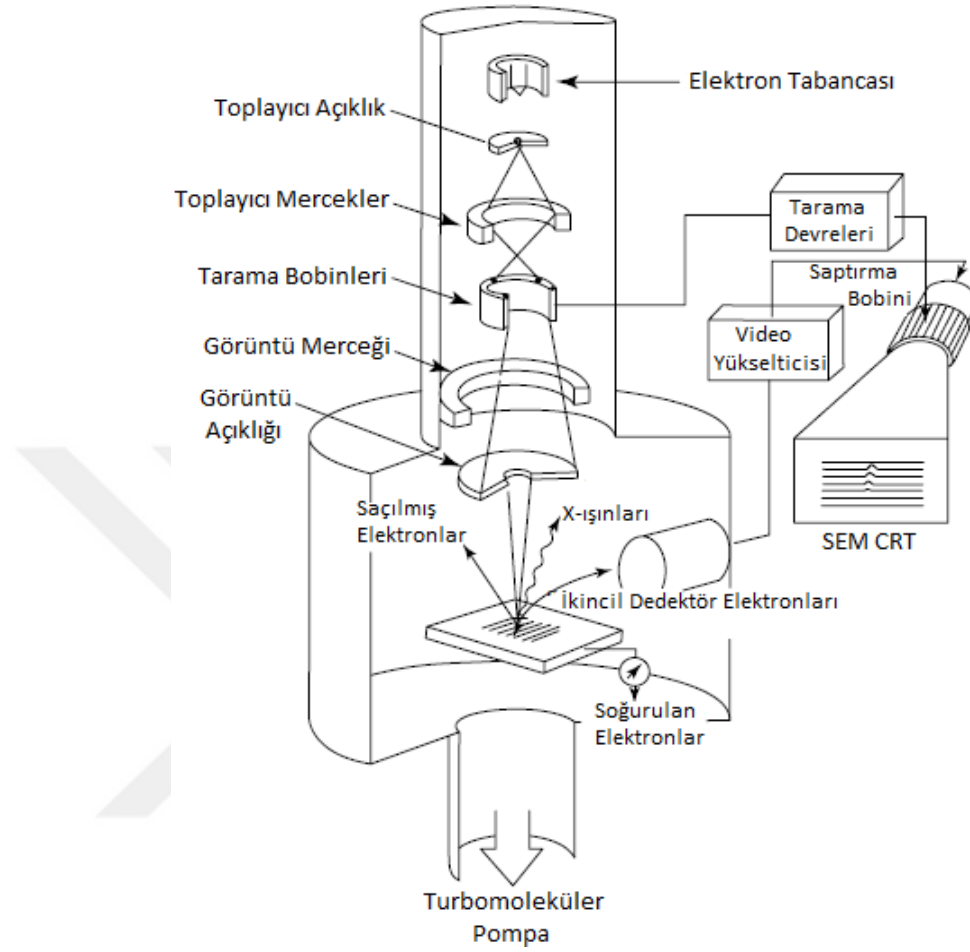
Yarıiletken materyal yüzeylerinin morfolojik analizinde mikroskobik tekniklerden faydalanılır. Yaygın şekilde kullanılan mikroskobik teknikler arasında optik mikroskopi, elektron mikroskobisi, taramalı prob mikroskobisi sayılabilir. Optik mikroskopi diğer tekniklere nazaran numune incelemede çok yönlülük, numune hazırlama kolaylığı, vakum gereksinimi duyulmaması ve örneklerin yüklenme problemlerinin olmaması gibi önemli avantajlara sahiptir. Elektron mikroskobisinde, bir numunenin büyütülmüş bir görüntüsünü oluşturmak için bir elektron demeti kullanılır. Taramalı prob mikroskobisinde ise, materyallerin incelenmesi için diğer tekniklerde kullanılan foton, elektron veya iyon demeti yerine mekanik olarak tarama yapabilen problemlerden yararlanır. Böylece mekanik olarak hareket eden iyi bir prob ile incelenen numune arasındaki etkileşme sonucunda yüksek kalitede atomik ölçekli iki veya üç-boyutlu yüzey görüntüleri elde edilebilir.

3.5.4.1 Taramalı elektron mikroskobisi (SEM)

Temel olarak üç ana elektron mikroskopi tekniği vardır. Bunlar: tarama, iletim ve emisyon. Tarama ve iletim elektron mikroskobisinde, numuneye gelen bir elektron demeti görüntü üretirken, alan emisyon mikroskobisinde numunenin kendisi elektron kaynağıdır.

Elektron mikroskopi teknikleri arasında yaygın olarak kullanılanlardan biri de taramalı elektron mikroskobisi (SEM)'dir. SEM tekniği katı materyallerin ve aygıtların kompozisyonel, yapısal, fiziksel ve kusur durumları ile ilgili çok önemli bilgiler veren güçlü bir deneysel araçtır. Tipik bir SEM sistemi elektron demeti oluşturmak için bir elektron tabancasından, bir lens sisteminden, tarama bobinlerinden, elektron demeti ile numune arasında etkileşmeyi sağlamak için bir örnek odacığından, bu etkileşmeden kaynaklanan sinyalleri toplamak için çeşitli tiplerde detektörlerden ve elde edilen görüntüyü izleyebilmek için bir katot ışınlı görüntüleme tüpünden (CRT) oluşur (Şekil 3.15). Elektron enerjisi çoğu örnekte tipik olarak 10-30 keV aralığındadır. Fakat yalıtkan numuneler için enerji birkaç yüz eV kadar düşük olabilir. Elektron mikroskobisinde daha

büyük oranda büyütme mümkündür; çünkü elektron dalga boyları foton dalga boylarından çok daha küçük olup alan derinliği çok daha yüksektir.



Şekil 3.15. Bir taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi

Bir numune ıvmeleştirilmiş yüksek hızlı elektronlar ile bombardıman edildiğinde, bu elektronlar numunenin elektronları ve çekirdeği ile etkileşir. Bu etkileşme sonucunda, numuneye çarpan (saçılan) elektronların hareket yönü değişir ve enerjilerini kaybederler. Saçılma hem elastik hem de inelastik olabilir ve bunun sonucunda numunenin atomlarındaki çekirdek tarafından geri-saçılmış elektronlar, ikincil elektronlar, elektron-boşluk çiftleri, Auger elektronları ve X-ışınları gibi farklı sinyallerin oluşmasına yol açar. Elektron ve örnek etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan ikincil elektronlar, geri saçılmış elektronlar ve karakteristik X-ışınları, örneğin yüzey morfolojisi ve kompozisyonu hakkında bilgi verir. Aynı zamanda elementel analiz için imkân sağlar.

Bir SEM cihazı, bir EDXA (Energy Dispersive X-ray Analysis) bileşeni içerebilir. Bu bileşen, elektron numune etkileşmesi süresince yayınlanan X-ışınlarını ölçerek

materyalin mikro ve nano ölçekte kimyasal kompozisyonu hakkında bilgi verir. Yayınlanan X-ışınlarının kaynağı, bombardıman yapan elektronların hızlarındaki değişimdir. Uyarılan örnekten yayınlanan karakteristik X-ışınlarının enerjisi ölçülerek, örneğin bombardıman yapılan bölgedeki elementlerin ne olduğu ve göreceli şiddetleri ölçülerek de materyalde bulunan bu elementlerin atomik oranı belirlenebilir. Sonuç olarak, incelenen numunenin tüm yüzeyi taranarak bu numunenin yüzeyinin elementel haritasını çıkarmak mümkündür.

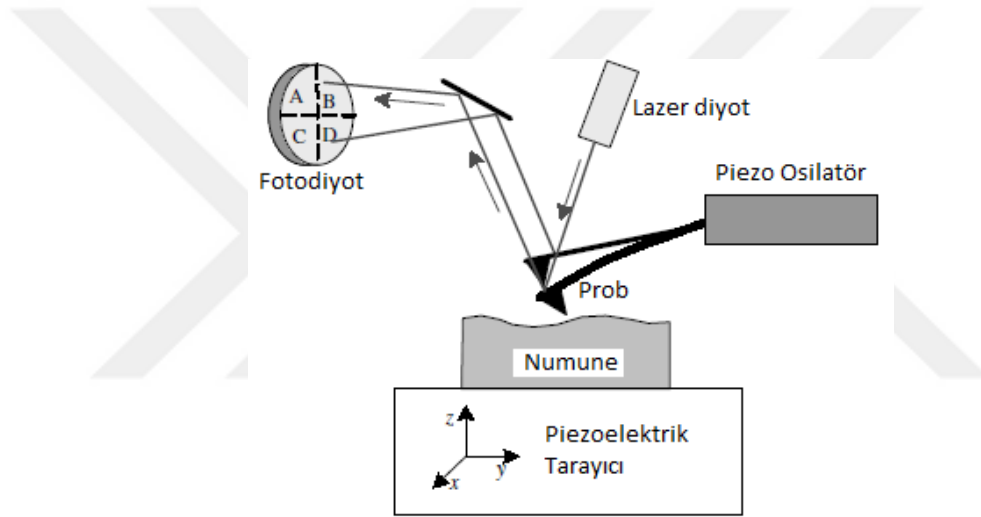
3.5.4.2 Atomik kuvvet mikroskobisi (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu, çok yüksek çözünürlüklü bir taramalı kuvvet mikroskobudur. Elde edilen çözünürlük birkaç nanometre ölçeğinde olup bu değer optik tekniklerden en az 1000 kat daha fazladır. Atomik kuvvet mikroskobu, nano boyutta görüntüleme, ölçme ve malzeme işleme konusunda en gelişmiş araçlardan biridir.

Atomik kuvvet mikroskopu ilk olarak yalıtkan numunelerin yüzeyini incelemek için 1986'da piyasaya sürüldü. Aynı yıl Binning ve arkadaşları tarafından bu konuda rapor edilen ilk çalışmada, tek atomları çözebilecek nitelikte olduğuna dair açık bir ima vardı (Binning vd., 1986). Ancak, AFM ile atomik çözünürlük için kesin kanıt 1993 yılına kadar ortaya çıkmadı. Aradan geçen yıllar içerisinde bu teknik yüzey bilimi, elektrokimya biyolojisi ve biyokimya alanlarında yeni anlayışlar sağlayan bir araç haline geldi. Atomik kuvvet mikroskobu, bir prob ile incelenen numune arasındaki kuvveti ölçme prensibine göre çalışır. Bu kuvvet numunenin niteliğine, prob ile numune arasındaki mesafeye, prob geometrisine ve numunenin yüzey kirliliğine bağlıdır. AFM, hem yalıtkan numuneler hem de iletken numuneler için uygun bir tekniktir.

Şekil 3.16'da bir atomik kuvvet mikroskobu şematik olarak gösterilmektedir. Aygıt, ucunda atomik boyutlara kadar sivriltilmiş keskin uçlu bir algılayıcı probtan (cantilever) oluşur. Bu prob genellikle silisyum, silisyum oksit veya silisyum nitrit malzemelerinden yapılır ve çoğu zaman 100 µm uzunluğunda, 20 µm genişliğinde ve 0,1 µm kalınlığındadır. Bu boyutlar dışında diğer boyutlar da kullanılabilir. Dikey yöndeki hassasiyet, algılayıcı prob uzunluğuna bağlıdır. Topografik görüntüleme için keskin uç, numuneyle sürekli veya aralıklı olarak temasa sokulur ve numune yüzeyi boyunca taranır. Dizayna bağlı olarak, piezoelektrik tarayıcılar probun altındaki numuneyi veya

numunenin üzerindeki probu hareket ettirir. Numunenin hareketi daha basittir; çünkü bu durumda aygıttaki optik algılama sistemi hareket etmeye ihtiyaç duymaz. Keskin uçlu probun hareketi çeşitli yöntemlerle algılanabilir. Örneğin, bir optik lazer interferometrenin bir aynası ile prob hareketi takip edilebilir. Ya da prob sapması, prob ile bir referans elektrot arasındaki kapasitans değişimiyle algılanabilir. Yaygın olarak kullanılan bir teknikte, probtan yansıyan ışık iki-segmentli veya dört-segmentli bir konuma duyarlı fotodiyot ile algılanır (Şekil 3.16). Probun hareketi sonucunda, yansıyan ışık fotodiyotun farklı bölümlerine çarpar. Dikey hareket, $z = (A + C) - (B + D)$ ile ve yatay hareket ise $x = (A + B) - (C + D)$ tarafından saptanır. Bir geribildirim düzenlemesi aracılığıyla numune yüksekliğini değiştirmek suretiyle prob sapmasına eşdeğer olan sinyali sabit tutmak, numune yüzeyindeki yükseklik değişimini verir.

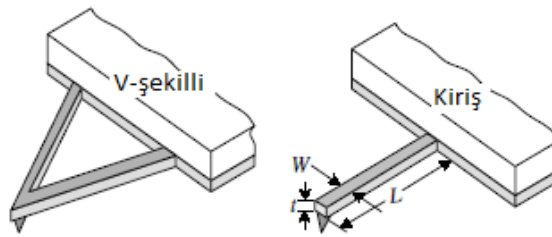


Şekil 3.16. Bir atomik kuvvet mikroskobunun şematik gösterimi

Keskin uca sahip problar çeşitli şekillerde olabilir. Şekil 3.17’de yaygın kullanılan iki şekil görülmektedir. Kiriş probu için rezonans frekansı $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ olarak verilir. Burada, k yay sabiti ve m ise probun kütlesidir. Tipik rezonans frekansları 50-500 kHz aralığındadır.

Atomik kuvvet mikroskopları çeşitli modlarda çalışabilir. Kontak modunda, prob ucu yüzey boyunca sürüklenir ve elde edilen görüntü, numune yüzeyinin topografik bir haritasıdır. Bu teknik birçok örnek için çok başarılı iken bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, prob ucunun sürüklenme hareketi, uç ve yüzey arasındaki çekici kuvvetler ile birlikte hem numuneye hem de proba zarar verebilir. Bu durumda, numune yüzeyinden

toplanan verilerde istenmeyen bazı hatalar oluşur. Kontaklız modda, yüzey ve yüzeyin üzerinde tutulan prob ucu arasındaki çekici Van der Waals kuvvetleri algılanır. Ancak, bu kuvvetler kontak modu kuvvetlerinden çok daha zayıftır ve bu küçük kuvvetleri algılamak için ac algılama yöntemleri kullanılır. Bu nedenle kontaklız mod, kontak modundan daha düşük çözünürlük sağlar. Üçüncü mod olan vurma modu ile görüntülemeye, yüksek çözünürlük sağlamak için probun ucu dönüşümlü olarak yüzeyle temas getirilir ve sonra yüzey boyunca sürüklenmeden probun ucu kaldırılır. Bunun için, prob düzeneği çevresel şartlarda bir piezoelektrik kristal osilatör vasıtasıyla probun rezonans frekansında veya rezonans frekansına yakın değerlerde titreşim hareketi yapar. Piezo hareketi, uç, yüzeyle temas etmediğinde probun titreşimini sağlar. Titreşen uç yüzeye doğru hafifçe dokunana kadar hareket ettirilir. Tarama sırasında dikey titreşen uç, genellikle 50-500 kHz frekansında yüzeye dönüşümlü olarak temas eder ve kaldırılır. Titreşim hareketi yapan prob aralıklı olarak yüzeyle temas ettiğinde, keskin ucun neden olduğu enerji kaybı daha sonra yüzey özelliklerini tanımlamak ve ölçmek için kullanılan salınım genliğini azaltır. Probun ucu yüzeydeki bir çıkıntı üzerinden geçtiğinde, probun salınması için daha az mesafe olduğundan salınım azalır. Tersine, probun ucu bir çöküntü üzerinden geçtiğinde ise probun salınması için daha fazla yer vardır ve genlik artarak maksimum serbest hava genliğine yaklaşır. Keskin ucun salınım genliği ölçülür ve cihazın geri besleme döngüsü numune üzerinde kuvvet ve genlik değerini sabit tutmak için uç-numune mesafesini ayarlar. Vurma modu ile görüntüleme tekniği yumuşak, yapışkan veya kırılğan numuneler için oldukça iyi sonuçlar verir ve bu tür numunelerin yüzeylerinin yüksek çözünürlüklü topografik görüntülemesine olanak tanır.



Şekil 3.17. AFM problemleri

BÖLÜM IV

DENEYSEL TEKNİKLER

4.1 Küprik Oksit İnce Filmler

Bu bölümde, küprik oksit ince filmlerinin üretim aşamaları ve elde edilen filmlerin karakterizasyonunda kullanılan deneysel teknikler sunuldu.

4.1.1 Kimyasal depolama yöntemi

Optoelektronik ve mikroelektronik alanında kullanılan heteroeklemler, çoğunlukla buharlaştırma ve saçtırma gibi vakum ortamı gerektiren tekniklerle üretilirler. Ancak, bu teknikler düşük maliyet ve geniş alanlı yüzeylere üretim gibi beklentileri karşılamakta yetersizdir. Bu anlamda çözelti bazlı işlemlerle heteroeklem üretimi oldukça önem kazanır.

Kimyasal depolama, ince film ve nanomateryal üretmek için kullanılan en ucuz yöntemlerden bir tanesidir ve bu yöntemle oldukça basit işlemlerle kararlı, düzenli ve sert filmler üretilir. Büyüme zamanı, çözeltinin sıcaklığı ve bileşimi, alttaban olarak kullanılan materyalin kimyasal doğası ve yüzey özellikleri ve bunun gibi üretim şartları, ince filmlerin kalitesini belirleyen etkenler arasındadır. Pahalı teçhizatlara gereksinim duyulmayan bu teknikte, büyük alana sahip yüzeylere kaplama yapmak da mümkündür. Kimyasal depolama yönteminin en büyük avantajı, sadece çözeltiyi içinde tutacak bir kaba ve ince filmi üzerinde büyütecek bir alttabana ihtiyaç duymasıdır. Yöntemin tek dezavantajı ise her film üretiminden sonra, film kaplamasında kullanılan çözeltinin israf edilmesidir.

Bu tezde, p-tipi küprik oksit ince filmlerinin üretimi kimyasal depolama metodu ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan alet ve malzemelerin basit ve ucuz olması, elde edilen filmlerin kalınlığının alttaban yüzeyinin hemen hemen her yerinde yaklaşık olarak aynı olması ve saf bir kaplama elde edilmesi bu yöntemin seçilmesindeki nedenler arasındadır.

4.1.2 Cam alttabanların temizlenmesi

Küprik oksit ince filmleri soda-lime silikat cam alttabanlar üzerine büyütülmeden önce, alttabanlara aşağıdaki sıra ile temizlik işlemi uygulandı:

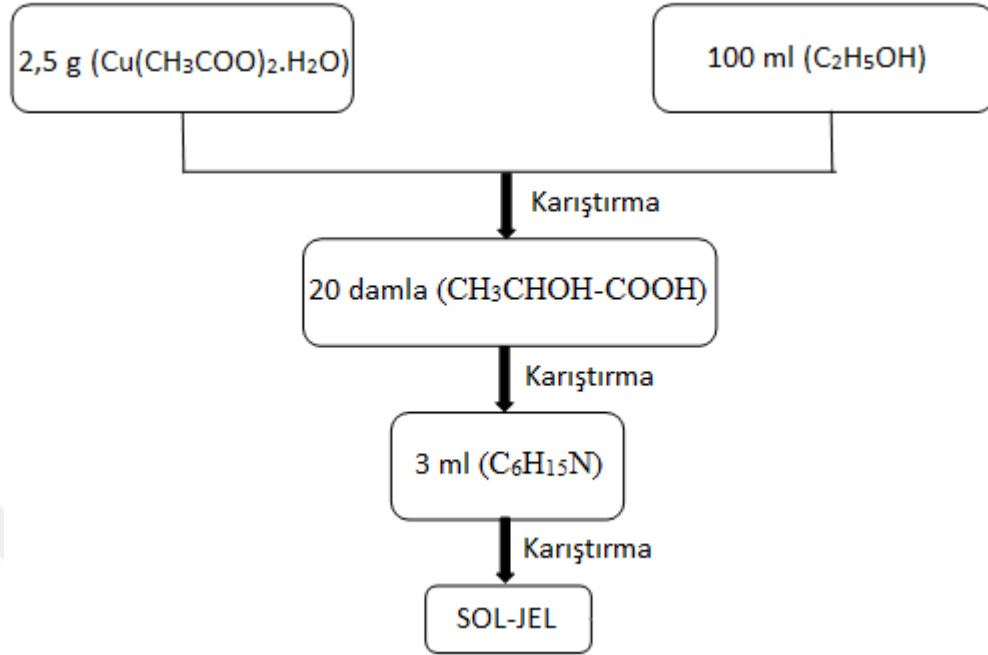
1. Aseton ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
2. Saf su ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
3. Deterjanlı su ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
4. Saf su ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
5. Seyreltilmiş hidrojen peroksit ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
6. Saf su ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama
7. Azot gazı ile kurutma

Yukarıdaki işlemler sırasıyla yapıldıktan sonra, silikat cam alttabanların yüzey temizliği tamamlandı ve alttabanlar ince film üretimi için hazır duruma getirildi.

4.1.3 İnce filmlerin üretimi

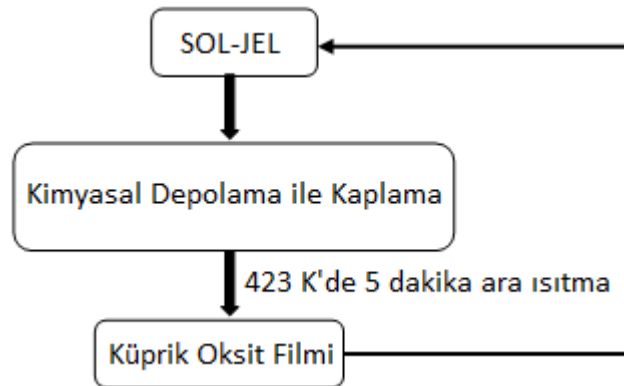
Küprik oksit ince filmlerinin üretiminde, bakır kaynağı olarak yüksek saflıktaki (% 99,9) bakır asetat ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) tozu kullanıldı. Çizelge 4.1’de ince film üretimindeki çözelti hazırlama aşamaları görülmektedir. İlk olarak, ince film üretiminde kullanılan sol-jel çözeltisi hazırlandı. Bunun için 2,5 g bakır asetat tozu 100 ml etil alkol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) içerisine eklenerek manyetik karıştırıcı yardımı ile 323 K sıcaklıkta çözünmesi sağlandı. Toz tamamen çözüldükten sonra, karışıma 20 damla laktik asit ($\text{CH}_3\text{CHOH-COOH}$) ilave edildi ve manyetik karıştırıcı ile karıştırma işlemine devam edildi. Çözelti karışırken viskozitesini artırmak için içerisine 3 ml trietilamin ($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}$) eklendi. Toplam 2 saat süreyle karıştırılan çözelti, oda sıcaklığında birkaç gün beklemeye alındı. Böylece, küprik oksit ince filmlerinin üretiminde kullanılan sol-jel çözeltisi kullanıma hazır hale geldi.

Çizelge 4.1. Küprik oksit ince filmlerinin üretiminde kullanılan sol-jel çözeltisinin hazırlanma aşamaları



Küprik oksit ince filmlerini üretmek için, önceden temizlenen soda-lime silikat cam alttabanlar hazırlanan sol-jel çözeltisi içerisine dik şekilde daldırıldı ve 20 saniye süresince çözeltide bekletildi. Dik daldırmanın nedeni, cam alttaban üzerinde parçacıkların düzensiz olarak çökerek film kalitesinin bozulmasını önlemektir. Daha sonra, alttabanlar çözeltiden dışarı alındı ve film tabakasının yüzeye daha iyi yapışması için önceden ısıtılmış 423 K sıcaklıktaki fırında 5 dakika ısıtılma işlemi yapıldı. İstenilen kalınlıkta küprik oksit ince filmlerini elde etmek için daldırma ve ara ısıtma işlemleri ardışık olarak tekrar edildi (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Küprik oksit ince filmlerinin üretim aşamaları



4.1.4 İnce filmlerin tavllanması

Cam alttabanlara küprik oksit ince filmi istenilen kalınlıkta kaplandıktan sonra, üretilen örnekler atmosferek ortamda 873 K sıcaklıkta 20 dakika tavlama işlemi uygulandı.

4.1.5 İnce filmlerin karakterizasyonu

4.1.5.1 Yapısal özellikler

Küprik oksit ince filmlerinin yapısal analizi, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi kullanılarak yapıldı. Ölçümlerde ortalama dalgaboyu 1,54059 Å olan CuK α radyasyonu ile desteklenmiş Rigaku Miniflex model XRD sistemi kullanıldı ve ölçümler dakikada 2 derece tarama hızında alındı.

4.1.5.2 Morfolojik özellikler

Küprik oksit ince filmlerinin morfolojik analizi, taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve atomik alan mikroskopisi (AFM) ile yapıldı. SEM ölçümlerinde, 10 kV'de çalışan EDAX birimi ile desteklenmiş Nova NanoSEM 430 model alan yayınlı taramalı elektron mikroskobu, AFM ölçümlerinde ise Veeco MultiMode V model sistem kullanıldı.

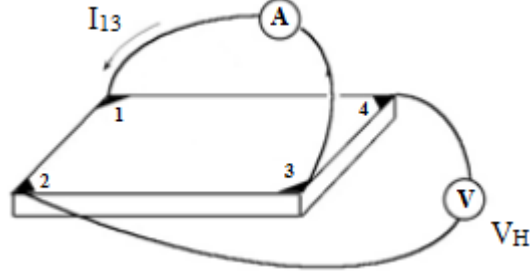
4.1.5.3 Optik özellikler

Küprik oksit ince filmlerinin optik analizi, 1 inçlik açıklıklara sahip 8 inç yarıçapında Newport Oriel 70679NS model toplama küresinden, Newport, Oriel 70356 model bir monokromatörden ve 100 W gücünde bir halojen lambadan oluşan özel olarak dizayn edilmiş bir optik sistem yardımıyla yapıldı. Bu sistem kullanılarak ince film örneklerin dalgaboyuna bağılı optik geçirgenlik (T) ve optik yansıma (R) ölçümleri alındı. Örnekler, geçirgenlik ölçümü için toplayıcı kürenin ön tarafına ve yansıma ölçümü için de toplayıcı kürenin arka tarafına yerleştirildi.

4.1.5.4 Elektriksel özellikler

Küprik oksit ince filmlerinin elektriksel özellikleri, Hall-etkisi ölçümleri ile incelendi.

Ölçümlerden elde edilen sonuçlar analiz edilerek örneklerin iletkenlik tipi, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi belirlendi. Hall-etkisi ölçümünde, geleneksel dört-nokta dc Van der Pauw geometrisi kullanıldı. Bunun için, ince filmler kare biçimli cam alttabanlara büyütüldü ve elde edilen filmlerin dört köşesine termal buharlaştırma sisteminde altın (Au) kontaklar atıldı. Hall-etkisi ölçümleri çapraz kontaklardan alındı (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Hall-etkisi ölçümünde kullanılan dört-nokta Van der Pauw geometrisi (Kaya, 2016)

Küprük oksit ince film örneklerin ve örneklerdeki elektriksel kontakların biçiminden kaynaklanan ölçüm hataları ile probalar arasındaki sıcaklık gradientinden kaynaklanan termoelektrik voltaj, Hall-etkisi ölçümlerinde Van der Pauw metodunun kullanılması ile ortadan kaldırıldı. Bu metot, direnci genellikle 10^3 - 10^9 ohm aralığında olan örneklerin ölçümlerinde kullanılır. Daha düşük dirençli ince film örneklerin akım-gerilim (I - V) ölçümleri ise, birbirine paralel kontaklardan yapılır.

Küprük oksit ince filmlerin Hall-etkisi ölçümlerinde, Keithley 220 model programlanabilir akım kaynağı kullanıldı. Kontaklardaki voltaj düşmesi, Keithley 619 model multimetre ile ölçüldü. Ölçümler sırasında ihtiyaç duyulan manyetik alan, Walker Magnion Model FFD-4D elektromagnet vasıtasıyla sağlandı. Bu elektromagnet, yaklaşık 0,9 T büyüklüğünde manyetik alan oluşturdu.

4.2 Au/p-CuO/n-Si/Ag Heteroeklemlı Yapılar

Bu bölümde, küprük oksit/silisyum p-n heteroeklemlı yapıların üretim aşamaları ve üretilen yapıların özelliklerini incelemek için kullanılan deneysel teknikler sunuldu.

4.2.1 Silisyum alttabanların temizlenmesi

Heteroeklemlı yapıda, direnci 1-10 Ω .cm aralığında olan (100) yönelime sahip Fosfor (P) ile katkılanmış bir tarafı parlak n-tipi silisyum tek kristali kullanıldı. Heteroeklemlı yapıların üretim aşamasından önce, kristal silisyum dilimi bir elmas uçlu kesici yardımı ile istenilen büyüklükte parçalara bölündü ve tüm parçalara aşağıdaki sıra ile temizlik işlemi uygulandı.

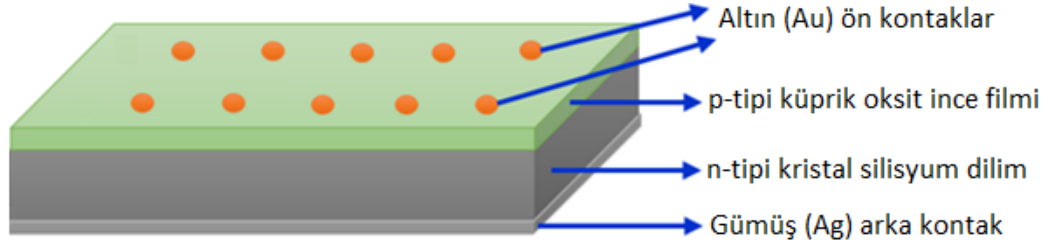
1. Aseton ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
2. 2-propanol ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
3. Saf su ile ultrasonik banyoda 15 dakika yıkama,
4. 3:1 oranında hazırlanan sülfürik asit (H_2SO_4 , % 95-97) ve hidrojen peroksit (H_2O_2 , % 35) karışımında 1 saat bekletme (metal ve organik kalıntıların temizlenmesi için),
5. Seyreltik hidroflorik asit (HF, % 38-40) çözeltisinde 5 dakika bekletme (oksit tabakasının temizlenmesi için),
6. Azot gazı ile kurutma

4.2.2 Heteroeklemlı yapıların üretimi

Temizlik işlemi tamamlanan n-tipi silisyum parçalarının parlak yüzüne, kimyasal depolama yöntemi ile p-tipi küprik oksit ince filmi kaplandı. Bir defa kaplama işleminden sonra, filmin yüzeye daha iyi tutunması için silisyum alttabanlara atmosferik ortamda 423 K'de 5 dakika ara ısıtma işlemi yapıldı. 7 defa tekrar edilen kaplama ve ara ısıtma işlemlerinden sonra, üretilen yapılara yine atmosferik ortamda 873 K'de 20 dakika tavlama işlemi uygulandı. Bu işlemin amacı, heteroeklemlı yapının p-kismini oluşturan küprik oksit ince filminin fiziksel özelliklerini iyileştirmektir (Kaya, 2016).

p-n heteroeklemlı yapıların üretim aşamasının son basamağı, metal kontaklama işlemidir. Diyot yapımında alttaban olarak kullanılan n-tipi kristal silisyum parçalarının ön yüzüne 1 mm çapında noktasal desenlere sahip bir maske kullanılarak altın (Au) kontaklar atıldı. Heteroeklemlı yapıların arka yüzüne ise gümüş (Ag) film tabakası kaplandı. Kontaklama işlemi, vakum ortamında termal buharlaştırma yöntemi ile yapıldı. Üretimin en son adımında ise, üretilen yapılar 453 K'de 10 dakika ısıtma işlemine tabi tutuldu. Böylece kontak malzemelerin yüzeye daha iyi yapışması ve omik kontak özelliği göstermeleri sağlandı.

Şekil 4.2’de, üretilen bir Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı yapı şematik olarak gösterilmektedir.



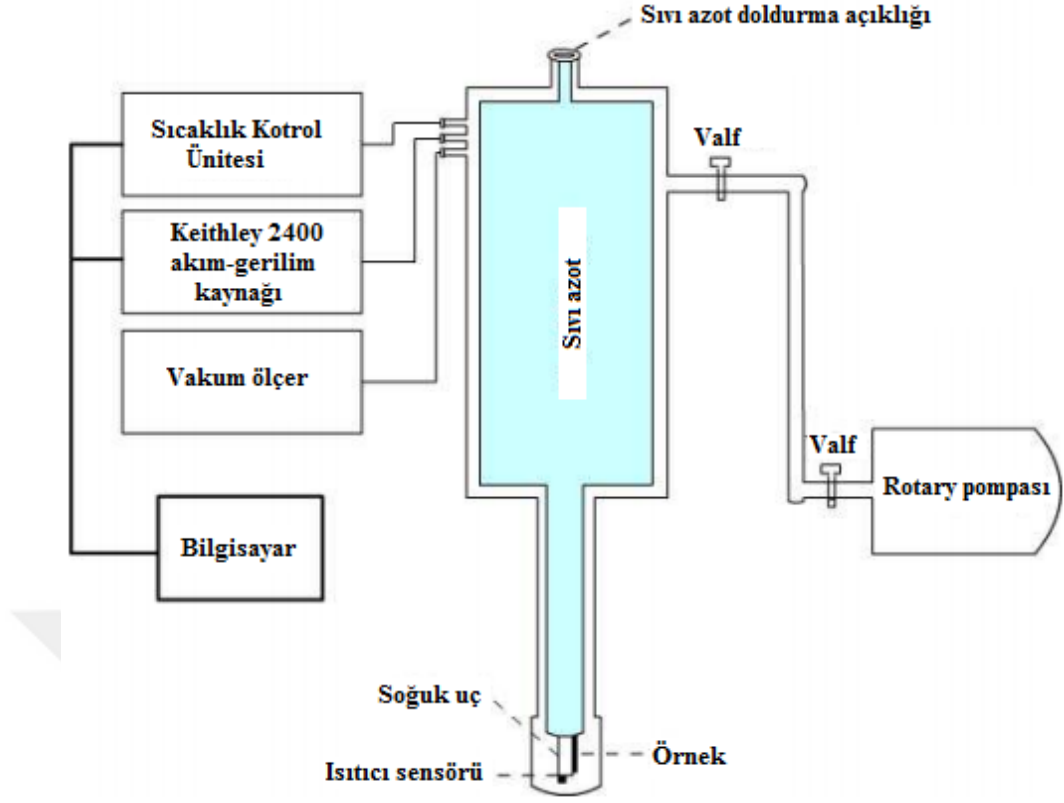
Şekil 4.2. Üretilen bir Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı yapının şematik gösterimi

4.2.3 Heteroeklemlı yapıların analizi

4.2.3.1 Elektriksel özellikler

Au/p-CuO/n-Si/Ag yapısından oluşan heteroeklemlı örneklerin doğrultucu özellikleri ve diyot karakteristikleri, 200 K ile 360 K arasında değişen sıcaklık değerlerinde akım-gerilim (I - V) ölçümleri yapılarak incelendi. Sıcaklığa bağlı elektriksel ölçümlerde kullanılan sistemin şematik görünümü Şekil 4.3’te görülmektedir.

Üretilen heteroeklemlı yapıların ön ve arka kontaklarına sabit değerde bir akım uygulandı ve voltaj düşmesi Labview PC programı ile kontrol edilen Keithley 2400 model bir akım-gerilim kaynağı ile ölçüldü. Ölçümlerde, Janis-VPF model sıvı azot kriyostat sistemi kullanıldı. Tüm ölçümler kriyostat sistemi içinde $\sim 10^{-1}$ Pa basıncındaki vakum ortamında yapıldı. Kriyostat sistemindeki vakum, bir Ulvac Rotary pompası ile sağlandı. Kriyostatın soğuk ucuna bağlı örneklerin sıcaklığı, kriyostatın bu bölgesine bağlı bir GaAlAs diyot sensörü ile ölçüldü. Sıcaklık, bilgisayar kontrollü bir LakeShore 331 model sıcaklık kontrol ünitesi yardımıyla gözlendi. Tüm ölçümler karanlık ortamda yapıldı ve elde edilen veriler analiz edilerek üretilen yapıların doğrultma oranı, idealite faktörü, engel yüksekliği ve doyum akımı gibi diyot özelliğini belirleyen parametreler farklı sıcaklık değerleri için hesaplandı.



Şekil 4.3. Sıcaklık bağımlı I - V ölçümleri için kullanılan düzeneğin şematik görünümü (Kaya, 2016)

BÖLÜM V

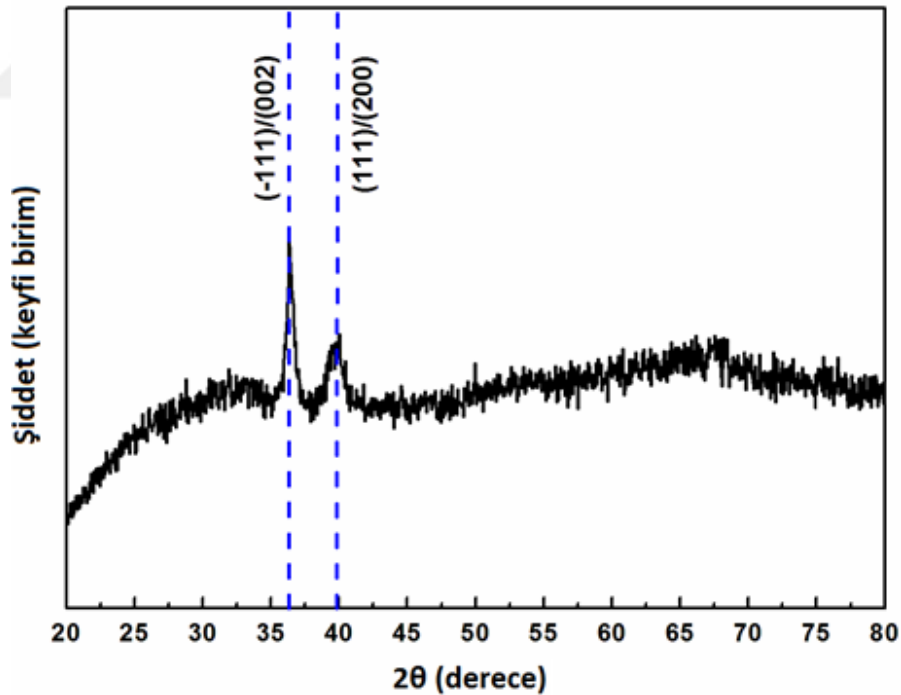
BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Küprik Oksit İnce Filmlerinin Fiziksel Özellikleri

Bu bölümde, p-n heteroeklem yapısında kullanılan küprik oksit ince filmlerinin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel ölçümlerinden elde edilen sonuçlar sunuldu.

5.1.1 Yapısal özellikler

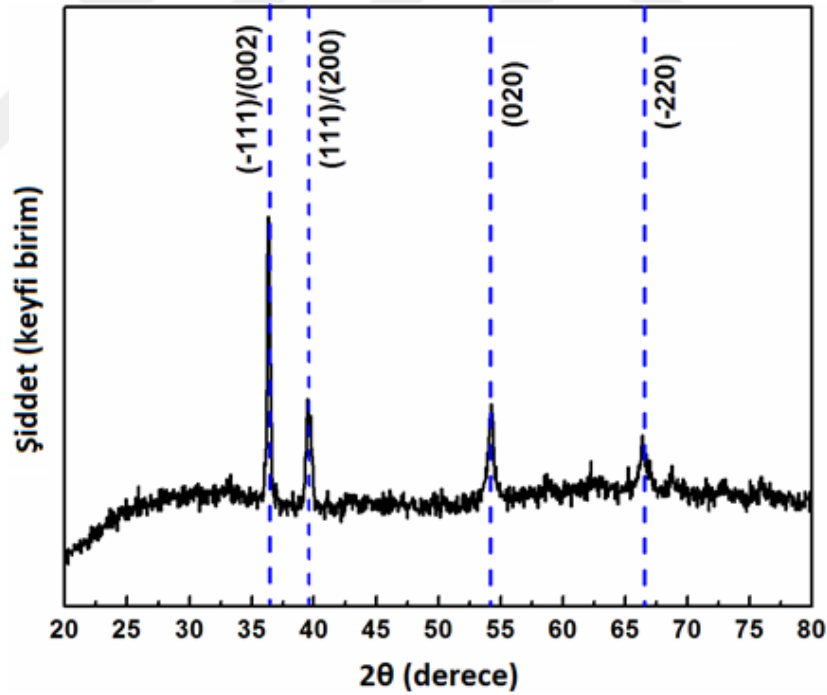
Küprik oksit ince filmlerinin yapısal özellikleri, XRD ölçümünden elde edilen sonuçlar analiz edilerek incelendi. Şekil 5.1’de yeni üretilmiş ve üretimden sonra herhangi bir tavlama işlemi uygulanmamış ince film örneğinin XRD deseni görülmektedir. Ölçüm yapılan örnek, kaplama ve 423 K’de 5 dakika ara ısıtma işlemlerinin 7 defa tekrar edilmesi sonucunda elde edilen örnektir.



Şekil 5.1. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprik oksit ince filminin XRD deseni

7 kez tekrarlanan kaplama ve ara ısıtma işlemleri sonucunda ~350 nm kalınlığa sahip ince filmler elde edildi. Şekil 5.1’de, yeni üretilen örneğin polikristal yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Tavlanmamış bu örneğin XRD deseninde $2\theta = 36,5^\circ$ ve $39,6^\circ$

civarında birbirinden kolayca ayırt edilebilir iki Bragg kırınım piki göze çarpmaktadır. Bu kırınım pikleri, küprik oksit fazının (-111)/(002) ve (111)/(200) Bragg yansımalarına aittir (JCPDS kart no. 45-0937). Şekil 5.2’de, atmosferik ortamda 873 K sıcaklıkta 20 dakika tavlama işlemi uygulanan küprik oksit ince filmine ait XRD deseni görülmektedir. Şekilde gözlenen tüm kırınım pikleri, tenorit fazdaki küprik oksitin (-111/002), (111/200), (020) ve (-220) Bragg yansımalarına aittir (Akgul vd., 2014; Kaya, 2016). Yeni üretilen örnek ile karşılaştırıldığında, 873 K’de tavlanan örneğin Bragg piklerinin şiddetinde artış göze çarpmakta olup pikler darlaşarak daha keskin bir hale gelmiştir. Böylece, ince filme uygulanan ısıtılma işleminin ince filmin kristalinitesini iyileştirdiği sonucuna ulaşılır. Ayrıca, tavlama işlemi sonucunda küprik oksit fazına ait yeni kırınım pikleri de ((020) ve (-220) pikleri) ortaya çıkmıştır. Ölçüm sınırları içerisinde, üretilen ince filmlerde herhangi bir ikincil fazın oluşmadığı veya filmlerin yapısına herhangi bir kirliliğin dahil olmadığı da XRD ölçümleri ile ortaya konmuştur. Bu sonuç, üretilen ince filmlerin tek fazda oluştuğunun açık bir göstergesidir.



Şekil 5.2. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin XRD deseni

X-ışını çizgi profili analizi, kristalit boyutu ve mikrozorlanma (etkin örgü zorlanması) gibi yapısal parametreleri belirlemek için kullanılan basit ve güçlü bir tekniktir. Mevcut yöntemler arasında Williamson-Hall analizi, XRD piklerinin genişliğinin 2θ 'nın bir fonksiyonu olarak ele alındığı ve böylece pik genişlemesi üzerinde hem genişlik hem de

gerilmeden kaynaklı etkilerin ortadan kalktığı basitleştirilmiş bir yöntemdir. Bu tez çalışmasında, küprik oksit ince filmlerinin ortalama kristalit boyutu, mikrozorlanma ve dislokasyon yoğunluğu parametrelerinin hesaplanmasında Williamson-Hall yöntemi kullanıldı. Yapısal parametreler, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görülen XRD desenlerindeki kırınım piklerinin yarı şiddet genişlikleri ile (Full-width at half-maximum, FWHM) belirlendi. FWHM, örgü zorlanmasından ve kristalit boyutundan gelen katkıların lineer bir kombinasyonu şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Williamson vd., 1953):

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} + \varepsilon \sin \theta \quad (5.1)$$

Denklem (5.1)’de β kırınım pikinin radyan biriminde ölçülen FWHM değerine, θ kırınım açısına, λ ölçümde kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyuna (1,54059 Å), D kristalit boyutuna ve ε ise etkin örgü zorlanmasına karşılık gelir. Yeni üretilen ve 873 K sıcaklığında tavlanan küprik oksit ince film örneklerin her birinin XRD deseninde görülen tüm pikler için $\beta \cos \theta / \lambda$ değerine karşı $\sin \theta / \lambda$ değeri grafiksel olarak çizildi ve elde edilen verilere lineer fit yapılması sonucunda, bu örneklerin kristalit boyutu ve mikrozorlanma parametreleri hesaplandı. Fit edilen lineer doğrunun eğimi, örneklerin kristal yapısındaki zorlanmanın büyüklüğünü verdi. Diğer taraftan, fit doğrusunun $\beta \cos \theta / \lambda$ ekseninde kestiği noktanın ters değeri ise ortalama kristalit boyutunu verdi.

Dislokasyon yoğunluğu, bir kristalin birim hacmi başına düşen dislokasyon çizgi uzunluğu olarak tanımlanır ve kristalit boyutundan hesaplanabilir (Williamson vd., 1956):

$$\delta = \frac{n}{D^2} \quad (5.2)$$

Burada D kristalit boyutunu ve n ise dislokasyon yoğunluğu minimum olduğunda 1 olan bir faktörü ifade eder.

Küprik oksit ince film örneklerin yapısal parametreleri (kristalit boyutu, mikrozorlanma ve dislokasyon yoğunluğu) Williamson-Hall yöntemi kullanılarak belirlendi. Çizelge 5.1’de, yeni üretilen ve 873 K sıcaklığında tavlanan küprik oksit ince film örnekler için

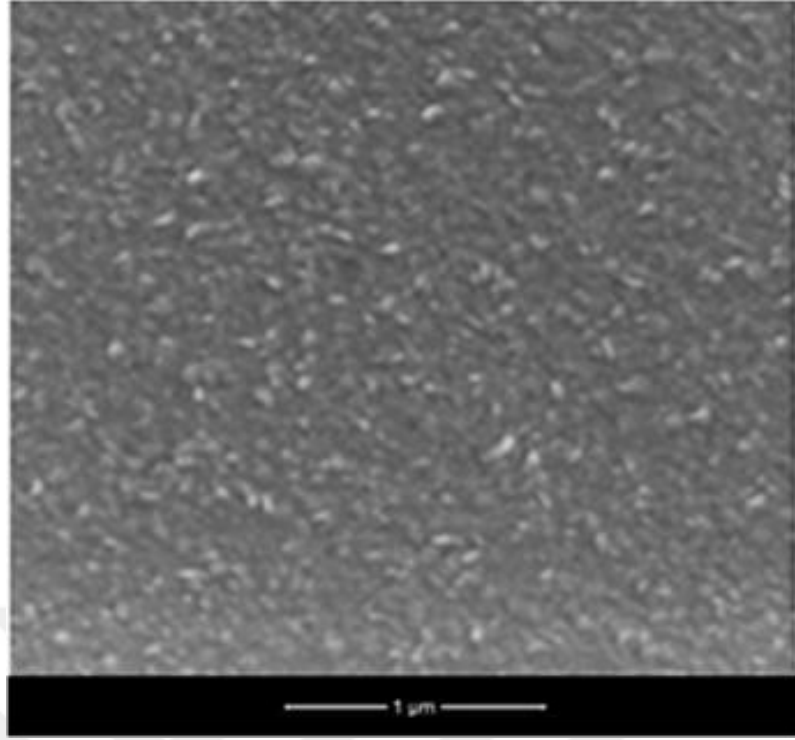
elde edilen yapısal parametreler görülmektedir. Üretilen ince filme 873 K sıcaklıkta uygulanan ısıtma işlemi, küprik oksit filminin yapısal özellikleri üzerinde doğrudan etkisinin olduğu açıktır. Yeni üretilen tavlama işlemi yapılmamış örneğin kristalit boyutu 283 Å, dislokasyon yoğunluğu $1,25 \times 10^{15}$ lines/m² ve mikrozorlanması ise $8,5 \times 10^{-3}$ lin⁻² m⁻⁴ olarak hesaplandı. 873 K’de tavlama işlemi yapılmamış küprik oksit ince filminin ortalama kristalit boyutu ise 574 Å olarak belirlendi ve ısıtma işlemi sonucunda kayda değer bir artış olduğu görüldü. Bu da, tavlama işlemi ile ince filmin yapısına sağlanan termal enerjinin daha büyük boyutta küprik oksit kristallerinin oluşumunu sağladığının bir göstergesidir. Böylece, ince film 873 K sıcaklıkta oldukça yüksek derecede kristalin duruma geçti. Diğer taraftan, örneklerin mikrozorlanma ve dislokasyon yoğunluğunun tavlama ile azaldığı da Çizelge 5.1’de görülmektedir.

Çizelge 5.1. Yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlama işlemi yapılmamış küprik oksit ince filmlerinin yapısal özellikleri

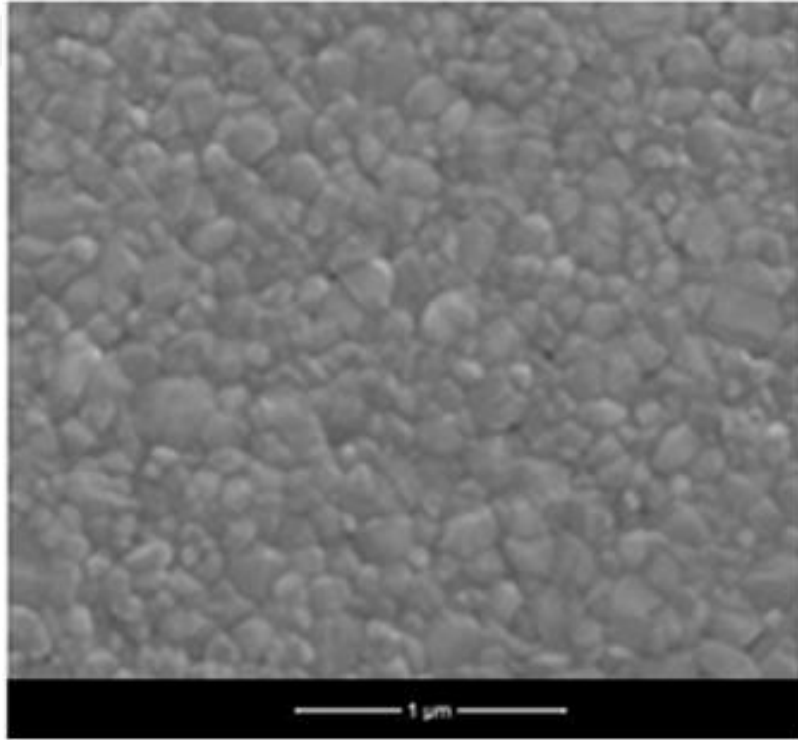
Tavlama sıcaklığı (K)	Kristalit boyutu (Å)	Dislokasyon yoğunluğu (10^{15} lines/m ²)	Mikrozorlanma (10^{-3} lin ⁻² m ⁻⁴)
–	283	1,25	8,5
873	574	0,36	4,8

5.1.2 Morfolojik özellikler

Küprik oksit ince film örneklerin yüzey morfolojisi SEM tekniği ile belirlendi. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4, sırasıyla yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K’de tavlama işlemi yapılmamış küprik oksit ince filmlerin SEM resimlerini göstermektedir. Her iki örneğin cam alttabanlara iyi şekilde yapıştıkları ve yüzeylerinde herhangi bir çatlak, delik veya boşluk oluşumunun bulunmadığı şekilden görülmektedir. Yeni üretilen örneğin yüzeyinde şekil ve boyut olarak hayli düzenli dağılmış sıkı-paketli nanoboyutlu doku oluşumu vardır. Diğer taraftan, tavlama işlemi ile ince filmin yüzey morfolojisinin değiştiği ve küprik oksit kristalitlerinin bir araya gelip toplanarak daha büyük boyutlu dokular oluşturduğu açıktır. Bu sonuç, XRD analizinden elde edilen sonuçlar ile de uyumludur.



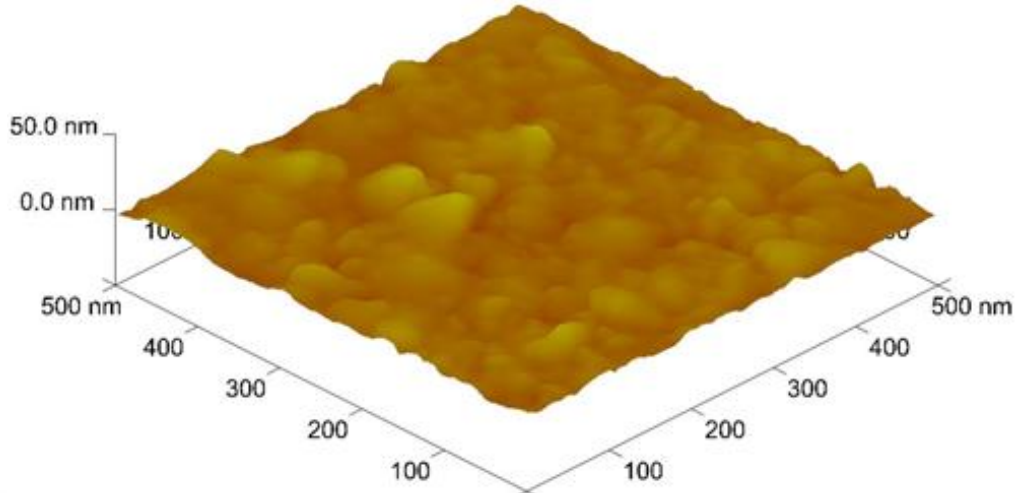
Şekil 5.3. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprik oksit ince filminin SEM resmi



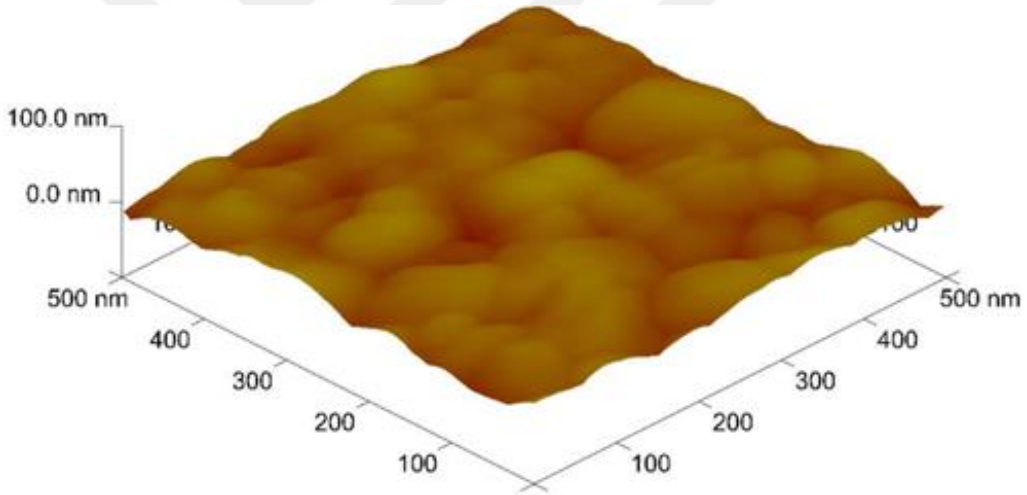
Şekil 5.4. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin SEM resmi

Küprik oksit ince film örneklerin yüzey pürüzlülüğü, AFM tekniği ile incelendi. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6, sırasıyla yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik

oksit ince filmlerinin AFM görüntüleridir.



Şekil 5.5. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprük oksit ince filminin AFM resmi

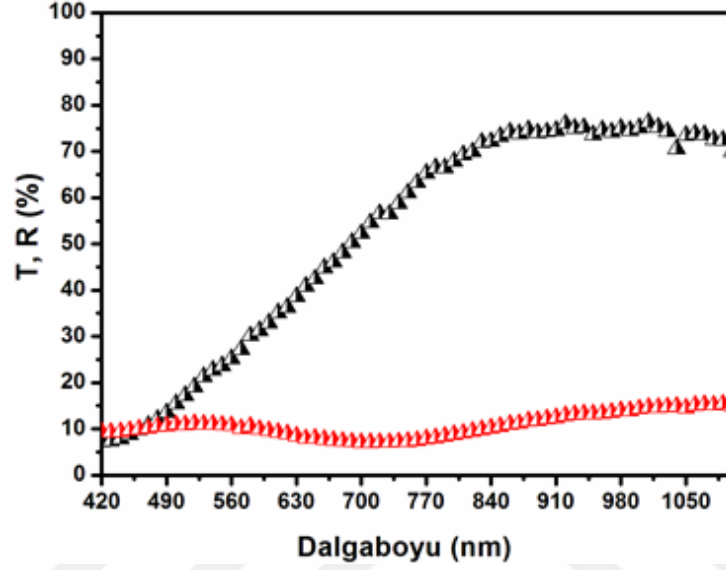


Şekil 5.6. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprük oksit ince filminin AFM resmi

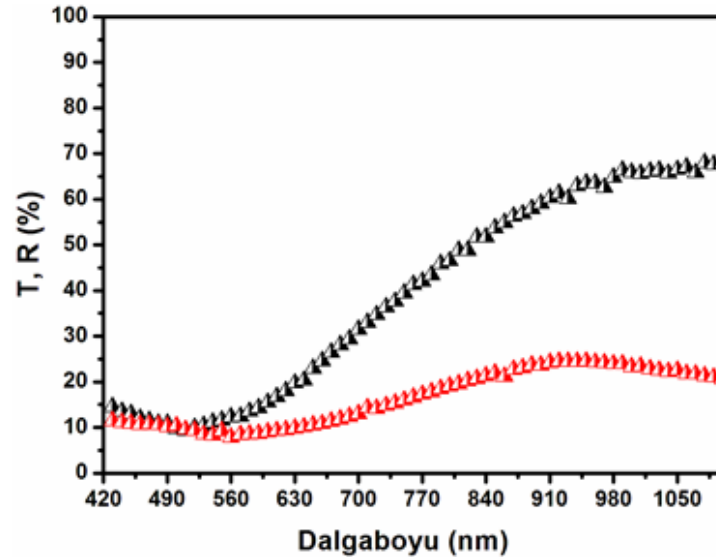
İnce filmlerin yüzeylerinin homojen dağılımlı düzgün dokular ile tamamen kaplandığı Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da göze çarpmaktadır. Örneklerin yüzey pürüzlülükleri yeni üretilen ince film için $23 \text{ \AA}$ ve 873 K'de tavlanan film için $70 \text{ \AA}$ olarak ölçüldü. Bu sonuçlar, ince film yüzeyinin filme uygulanan ısı işlemin etkisiyle daha pürüzlü hale geldiğini ortaya koymaktadır. Fakat yine de tavlanan örneğin halen oldukça düzgün bir yüzeye sahip olduğu söylenebilir. Sonuç olarak, XRD ölçümlerinin analiz edilmesi sonucunda tavlanan örneğin kristalit boyutunda gözlenen artışa paralel olarak ince filmin yüzey pürüzlülüğünün de arttığı açıktır.

5.1.3 Optik özellikler

Küprik oksit ince film örneklerinin optik özellikleri, yansımaya (R) ve geçirgenlik (T) ölçümleri yapılarak incelendi. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8, sırasıyla yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik (T) ve optik yansımaya (R) eğrileridir.



Şekil 5.7. Yeni üretilen (tavlanmamış) küprik oksit ince filminin optik geçirgenlik (T) ve yansımaya (R) spektrumları



Şekil 5.8. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin optik geçirgenlik (T) ve yansımaya (R) spektrumları

İnce filmlerin, spektrumun görünür bölgesinde (400-700 nm) oldukça soğurucu özellikte olduğu ancak yakın-kızılötesi bölgede (700-1100 nm) ise geçirgen oldukları gözlemlendi. Optik geçirgenlik, 850-900 nm dalga boyundan daha küçük dalga boyu değerlerinde keskin bir biçimde azaldı.

Deneysel olarak ölçülen optik yansıma ve geçirme spektrumları, ince film örneklerin soğurma katsayısı (α) ve yasak bant aralığı (E_g) değerlerini hesaplamak için kullanıldı. Dalga boyuna bağlı soğurma katsayılarını belirlemek için Denklem (3.10)'dan, yasak bant aralığı değerlerini belirlemek için Denklem (3.11)'de verilen Tauc eşitliğinden yararlanıldı (Tauc, 1972). Küprik oksit doğrudan (direk) bant aralıklı bir yarıiletken olduğundan, bu tez çalışmasında üretilen ince film örneklerin E_g değerleri izinli doğrudan geçişler için $n=0,5$ alınarak hesaplandı. Yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi sırasıyla 1,85 ve 1,5 eV olarak belirlendi. Bu sonuçların literatürde verilen değerler ile uyumlu olduğu gözlemlendi (Ramya ve vd., 2015). Tavlanan örneğin bant aralığında bir azalma göze çarpmaktadır. Kristalinite, doku büyüklüğü ve iç-stres, yarıiletkenler materyallerin yasak bant aralığını etkileyen etkenlerden bazılarıdır. Bu tez çalışmasındaki XRD ve SEM analizlerinden elde edilen sonuçlar, 873 K'de tavlanan ince filmin kristal yapısında bir iyileşme ve kristalit boyutunda bir artış olduğunu gösterdi. Böylece, küprik oksit ince filminin yasak bant aralığını değiştiren faktörler arasında kristallenmenin ve doku büyüklüğünün olduğu açıkça söylenebilir. Diğer taraftan, ince filmlerin kalınlığı arttıkça kristal yapısındaki iç-stresin azalma eğilimi gösterdiği bir çalışmada rapor edildi (Park ve vd., 2011). Ancak, tez çalışmasında elde edilen küprik oksit ince filmlerin kalınlığında tavlama öncesi ve sonrası kayda değer bir değişiklik gözlenmediğinden, ince filmin bant aralığı değerinde gözlenen azalma ısıtma işlemiyle iyileşen kristal yapı ve artan doku büyüklüğü ile ilişkilendirilebilir.

5.1.4 Elektriksel özellikler

Yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince film örneklerin taşıyıcı tipi, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite gibi elektriksel özellikleri, geleneksel dört-nokta dc Van der Pauw geometrisinin kullanıldığı Hall-etkisi ölçümleri sonucunda belirlendi. Ölçümlerden elde edilen verilerin analizi sonucunda, ince filmlerin p-tipi yarıiletken özellik gösterdiği gözlemlendi. Yeni üretilen ince filmin mobilitesi $1,6 \text{ cm}^2/\text{V.s}$

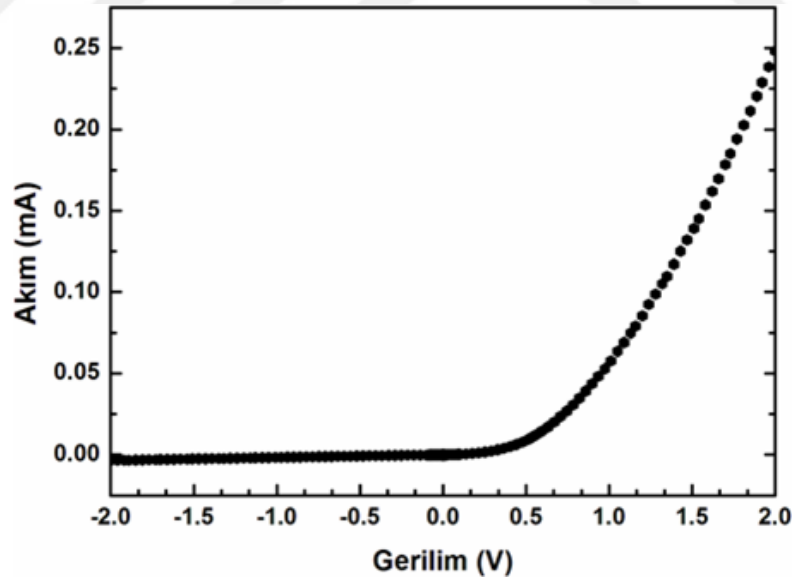
ve taşıyıcı yoğunluğu $8,7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ olarak hesaplandı. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin mobilitesi ise $30,7 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve taşıyıcı yoğunluğu $59,2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ olarak belirlendi. Hall-etkisi ölçümlerinden elde edilen bu sonuçlar, ince filme uygulanan ısıl işlemin etkisi ile filmin kristal yapısının iyileştiğini göstermektedir.

5.2 Au/p-CuO/n-Si/Ag Yapıların Elektriksel Özellikleri

Bu bölümde, küprik oksit/silisyum p-n heteroeklemlı yapıların oda sıcaklığında ve diğer sıcaklıklarda (220-360 K) yapılan I - V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar sunuldu.

5.2.1 Oda sıcaklığındaki I - V karakteristikleri

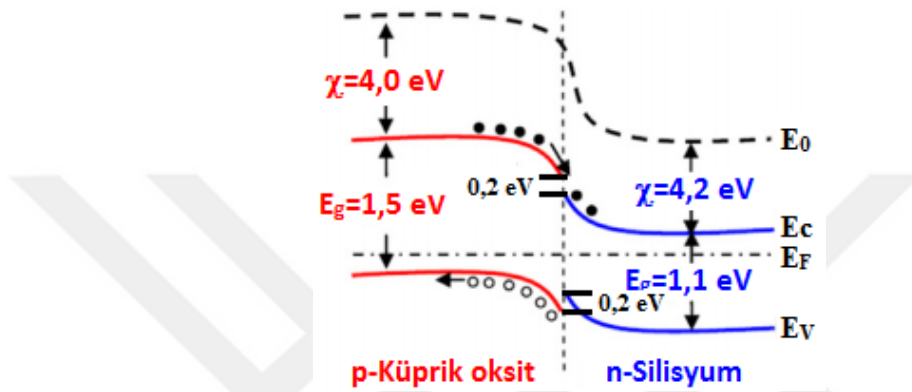
Şekil 5.9'da bir heteroeklemlı yapının oda sıcaklığındaki (300 K) I - V grafiği görülmektedir. Örneğin oda sıcaklığında sergilediği doğrultma davranışı, bu yapının tipik bir p-n eklem diyot karakteristiğine sahip olduğunu ortaya koyar. $\pm 2 \text{ V}$ gerilim değerlerindeki doğrultma oranı (I_F/I_R) $2,2 \times 10^2$ olarak bulundu.



Şekil 5.9. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) I - V karakteristiği

Üretilen heteroeklemlı yapıların şematik enerji bant diyagramı Şekil 5.10'da görülmektedir. Küprik oksit filminin ve silisyum kristalinin birbirinden farklı elektron ilgileri ve optik bant genişlikleri nedeniyle, eklem bölgesinin arayüzeyinde valans bandı

süreksizliği (ΔE_v) ve iletkenlik bandı süreksizliği (ΔE_c) oluşur. p-tipi küprik oksitin optik ölçümlerden elde edilen yasak bant aralığı 1,5 eV ve elektron ilgisi 4,0 eV'dir. Kristal silisyumun yasak bant aralığı ve elektron ilgisi ise sırasıyla 1,1 eV ve 4,2 eV'dir (Akgul vd., 2014). Küprik oksit ve silisyuma ait bu değerler Anderson modeli için verilen Denklem (3.3) ve (3.4)'te kullanıldı, bu tez çalışmasında incelenen heteroeklemin arayüzeyindeki enerji bant süreksizlikleri arayüzey etkileri ihmal edilerek $\Delta E_c = 0,2$ eV ve $\Delta E_v = 0,2$ eV olarak bulundu.



Şekil 5.10. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlili bir yapının termal dengede şematik enerji bant diyagramı

Bir p-n ekleminin akımı çoğu zaman gerilimin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki biçimde yazılır (Schroder, 2006):

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

Denklem (5.2)'de I_0 doyum akımını, n idealite faktörünü, V uygulanan gerilimi, q elektron yükünü, k Boltzman sabitini ve T ise K biriminde mutlak sıcaklığı ifade eder. V gerilimi, uzay-yük bölgesindeki voltaj olup eklemin p ile n nötral bölgelerindeki voltaj düşmesini içermez. Eğer I_0 ve n diyot parametrelerinin her ikisi de sabit ise, $V > nkT/q$ için $\ln(I)$ 'nin V 'ye karşı grafiği lineer bir doğru olur.

Denklem (5.2)'deki gerilim, herhangi bir direnç etkisini içermez. Ancak, I_0 ve n değerleri genellikle heteroeklemlili yapının I - V bölgesi içinde değişir. Eğer seri direnç (R_s) aygıtın davranışına katkıda bulunuyorsa, bu durumda gerilim $V - IR_s$ olur. Burada V , diyotun ölçülen voltajıdır; bu voltaj diyotun alttabanından, kontaklarından ve diğer seri direnç

bileşenlerinden kaynaklanan tüm direnç katkılarını içerir. Bu durumda heteroeklemlı diyotun akım-gerilim ilişkisi (Schroder, 2006),

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (5.3)$$

ile verilir. $kT/q \ll V$ ve $IR_s \ll V$ için $\ln(I)$ 'nın V 'ye karşı grafiği lineer bir doğru olur. Denklem (5.3)'te yer alan -1 ifadesi nedeniyle, diyotun ölçülen akımı düşük akım değerleri için artık düz bir doğru değildir. Büyük akım değerlerinde ise seri direnç etkisinden dolayı diyotun ölçülen akımı yine bir doğru olmaz. Bir diyot için $\ln(I)$ - V eğrisinin lineer bir doğruya karşılık gelen kısmının $V=0$ 'da kestiği akım değeri, doyum akımını (I_0) verir. Bu lineer doğrunun eğiminden ise, diyotun belirli bir sıcaklık değerindeki idealite faktörü (n) aşağıdaki denklem yardımı ile bulunur:

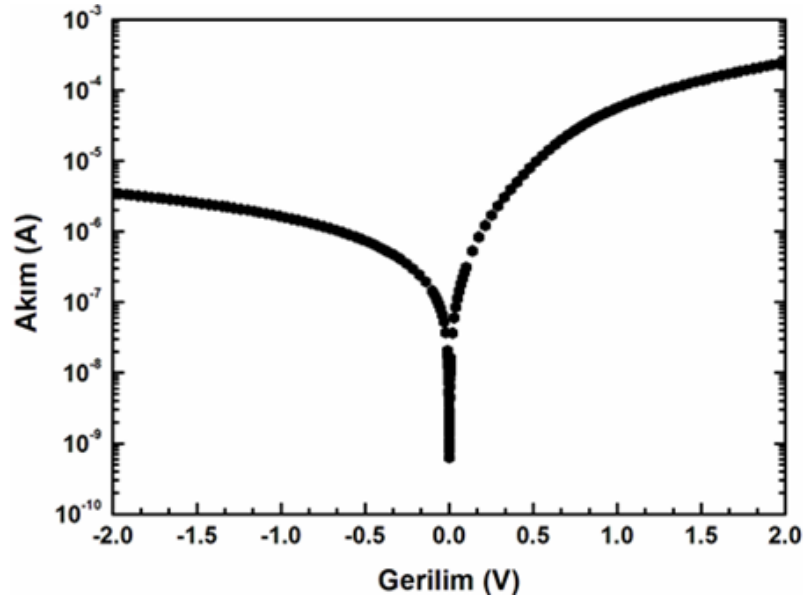
$$n = \frac{q}{kT} \left[\frac{dV}{d(\ln I)} \right] \quad (5.4)$$

Denklem (5.3)'teki doyum akımının (veya ters doyum akımı) sıcaklığa bağlı ifadesi aşağıdaki gibi verilir (Schroder, 2006):

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_B}{kT} \right) \quad (5.5)$$

Burada A diyotun kontak alanı, A^* etkin Richardson sabiti ve Φ_B ise bariyer yüksekliğidir.

Üretilen heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığında ölçülen $\log(I)$ - V eğrisi Şekil 5.11'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi pozitif gerilim bölgesinin başlangıç kısmındaki küçük bir bölgede logaritmik eğri lineer olarak değişse de, yeterince büyük gerilim değerlerinde seri direncin etkisi baskındır ve artık lineer değildir.



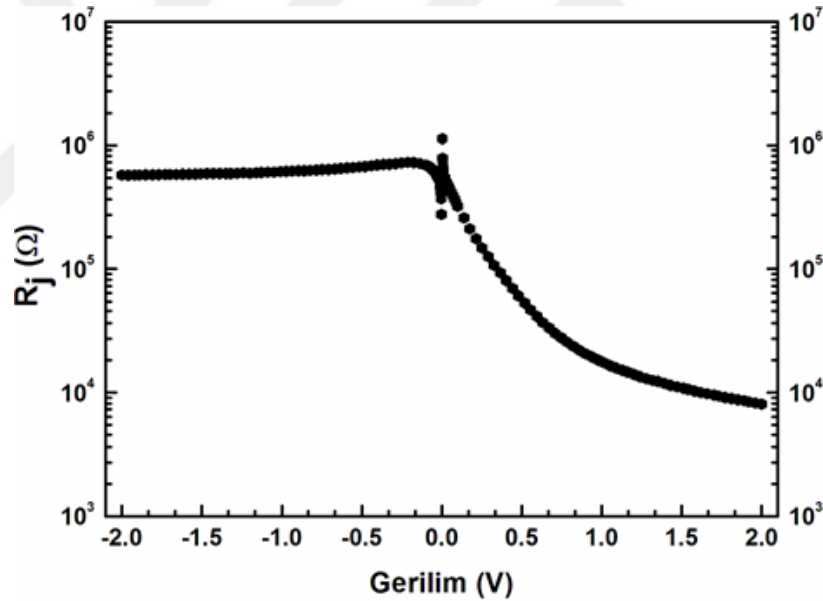
Şekil 5.11. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) yarı logaritmik I - V karakteristiği

Şekil 5.11'deki $\log(I)$ - V eğrisinin düşük gerilim bölgesindeki lineer kısım (0,05-0,1 V) kullanılarak, üretilen p-n heteroeklemlı yapının idealite faktörü, doyum akımı ve bariyer yüksekliği gibi diyot özelliğini belirleyen parametreler oda sıcaklığı için hesaplandı. Çizelge 5.2'de, hesaplanan diyot parametreleri yer almaktadır. Bariyer yüksekliğinin hesaplanmasında diyot kontak alanı $A=31,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ ve etkin Richardson sabiti ise n-tipi silisyum alttaban için $A^* = 112 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ olarak alındı (Schroder, 2006). Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı yapının 300 K sıcaklığında ölçülen $\log(I)$ - V eğrisi kullanılarak idealite faktörü 2,06, doyum akımı $2,11 \times 10^{-8} \text{ A}$ ve bariyer yüksekliği ise 0,83 eV olarak belirlendi. Diyot idealite faktörünün 1 değerinden büyük olması, üretilen heteroeklemlı yapının ideal bir diyot davranışına sahip olmadığının açık göstergesidir. İdeal bir diyottan sapma durumu, heteroeklem yapısında kullanılan kristal silisyum diliminin yüzeyinde olabilecek doğal oksit tabakasından, p-n eklem bölgesinde olabilecek arayüzey veya tuzak durumlarından ve seri direnç etkisinden kaynaklanabilir. Sonuç olarak, akım iletiminde ara-yüzey yeniden birleşmesi baskındır.

Çizelge 5.2. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) diyot parametreleri

Doğrultma oranı	İdealite faktörü, n	Doyum akımı, I_0 (A)	Bariyer yüksekliği, Φ_B (eV)
$2,2 \times 10^2$	2,06	$2,11 \times 10^{-8}$	0,83

Yarıiletken aygıtlar ve devrelerin çalışma performansını belirleyen hız ve güç, genellikle yapılarındaki seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) etkisi ile düşer. Seri direnç yarıiletkenin kendi materyal direncine, diyot yapısının kontak direncine ve diyottaki eklem yapısı gibi diğer geometrik faktörlere bağlıdır. Aygıt performansının yüksek olması için, seri direncin mümkün olduğu kadar düşük, metalik kontaklardan ve yüzeyin homojen olmamasından kaynaklanan ve eklemde akım kaybına neden olan sızıntı akımlarının azaltılması için de şönt direncinin mümkün olduğu kadar büyük olması gerekir. Şekil 5.11’de, gerilim ekseninin pozitif ve negatif bölgelerinde ($> 0,4$ V) seri direncin etkisiyle $\log(I)$ -V eğrisinin lineerlikten saptığı ve büküldüğü göze çarpmaktadır. Bu tez çalışmasında üretilen Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı yapıların seri ve şönt dirençleri, eklem direncinin ($R_j = \partial V / \partial I$) uygulanan dış gerilime karşı değişim grafiği kullanılarak belirlendi. Şekil 5.12’de üretilen heteroeklemlı yapıların oda sıcaklığındaki R_j -V eğrisi görülmektedir.



Şekil 5.12. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) R_j -V karakteristiği

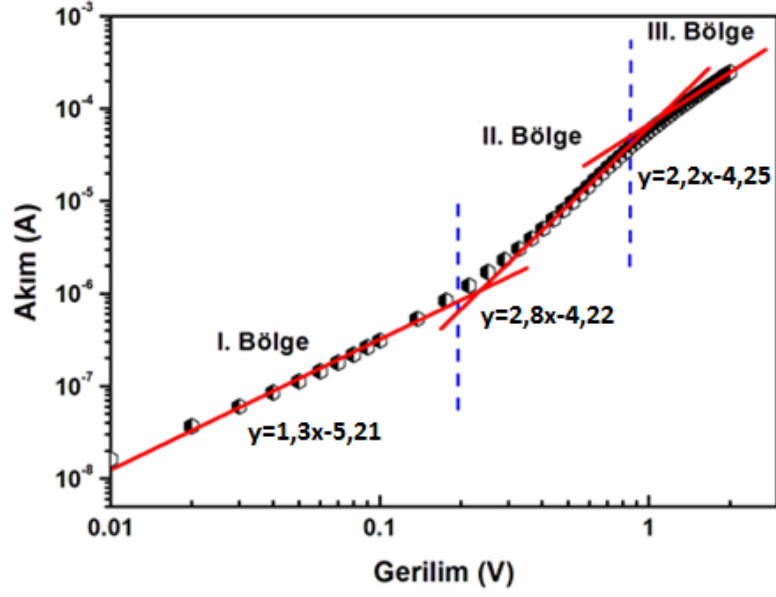
Şekilde görüldüğü gibi, parazitik direnç eğrisi pozitif voltaj bölgesinde azalarak bir minimum değere yaklaşmaktadır. Diyot yapısının ileri besleme yönündeki bu minimum direnç değeri, R_s seri direnç değerine karşılık gelir ve oda sıcaklığında bu değer 8,18 kΩ’dur. Parazitik direnç eğrisi, negatif voltaj bölgesinde ise artarak bir maksimum değere doğru yaklaşmakta olup bu değer ise diyotun R_{sh} şönt direnci değerini gösterir. Üretilen heteroeklemlı yapının oda sıcaklığındaki şönt direnci 0,57 MΩ’dur. Seri direnç değerinin

büyük olması, üretilen yapıların diyot davranışını ideallikten uzaklaştırarak heteroeklemlı yapının performansının düşmesine neden olmuştur.

Bu tez çalışmasında üretilen Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığındaki akım iletim mekanizmasını incelemek için, yapının I - V karakteristiği çift logaritmik skalada çizildi (Şekil 5.13). Şekilde görülen $\log I$ - $\log V$ eğrisi, uygulanan dış gerilime $I \propto V^m$ biçimine sahip üstel şekilde uyan birbirinden bağımsız üç farklı akım bölgesinden oluşmaktadır. Şekil 5.13'te, bu bölgeler düşük gerilim bölgesi (I. bölge), orta gerilim bölgesi (II. bölge) ve yüksek gerilim bölgesi (III. bölge) olarak gösterildi. Akımın gerilime üstel bağımlılığını ifade eden $I \propto V^m$ denklemindeki m , her bir bölgenin doğrusal kısmının eğim değeridir ve enjeksiyon seviyesiyle ve tuzak merkezlerinin dağılımıyla ilişkili olarak değişen bir parametredir. Şekil 5.13'te görülen I. bölge, $V < 0,2$ Volt gerilim değerlerinin olduğu bölgeye karşılık gelir ve bu bölge için eğim 1,3'tür. Bu bölgedeki m değerinin 1 değerine yakın olması, akımın doğrudan dışarıdan uygulanan gerilim ile orantılı olarak değiştiğinin bir göstergesidir. Bu sebeple I. bölgedeki akım iletim mekanizmasının omik karaktere sahip olduğu ortaya çıkar.

Uygulanan dış gerilim değeri arttıkça, m değerinde bir artış görüldü. $\log I$ - $\log V$ eğrisinin II. Bölgesi, 0,2 V-1,0 V gerilim aralığına karşılık gelir ve bu bölge için eğim 2,8'dir. m eğiminin 2 değerinden büyük olması, bu bölge için ileri beslemedeki akımın eksponansiyel tuzak dağılımlı SCLC (space-charge limited current) mekanizması ile uyumlu olduğunu gösterir. Orta gerilim bölgesi için, diyot yapısındaki eklemın tükenme bölgesindeki tuzak durumları da akıma katkıda bulunabilir. Yani bu bölgede hem enjekte edilen serbest taşıyıcıların hareketi daha baskındır; hem de tuzak seviyeleri etkindir ve serbest taşıyıcılar bu tuzaklar tarafından yakalanırlar.

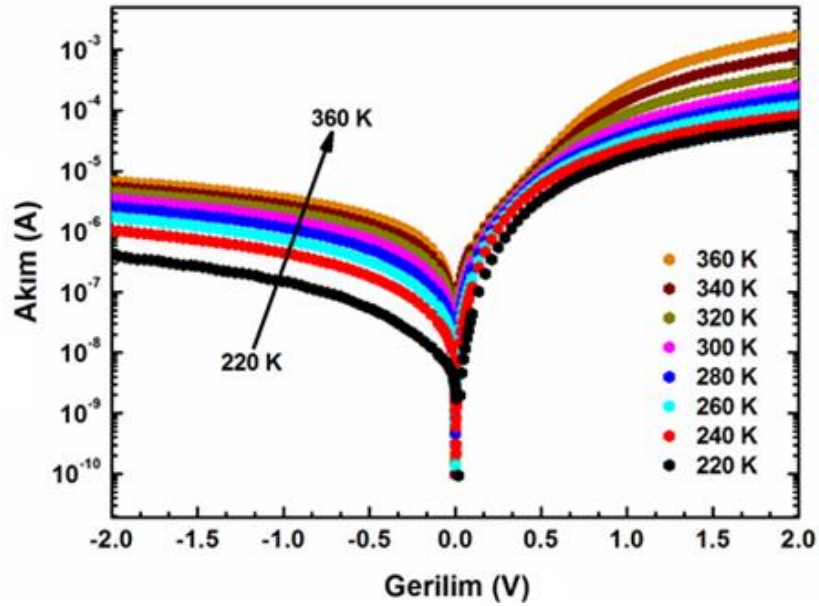
Yüksek gerilim bölgesi olan III. bölgede ($V > 1,0$ V), tuzak seviyelerinden akıma artık bir katkı gelmemektedir. Bu bölge için eğim değeri(m), orta gerilim bölgesindeki değer ile karşılaştırıldığında azalarak 2,2 değerine düşmüştür. III. bölgedeki akım iletim mekanizması, tuzaklardan bağımsız SCLC mekanizmasıdır.



Şekil 5.13. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığındaki (300 K) çift logaritmik I - V karakteristiğı

5.2.2. Sıcaklığa bağılı I - V karakteristikleri

Üretilen Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının 220 K-360 K arasında ve 20 K adımlarla değışen sıcaklık değıerleri için ölçülen $\log I$ - V karakteristikleri Şekil 5.14'te görölmektedir. Her bir sıcaklık değıeri için heteroeklemlı yapının doğırultma davranışı sergilediğı açıktır.



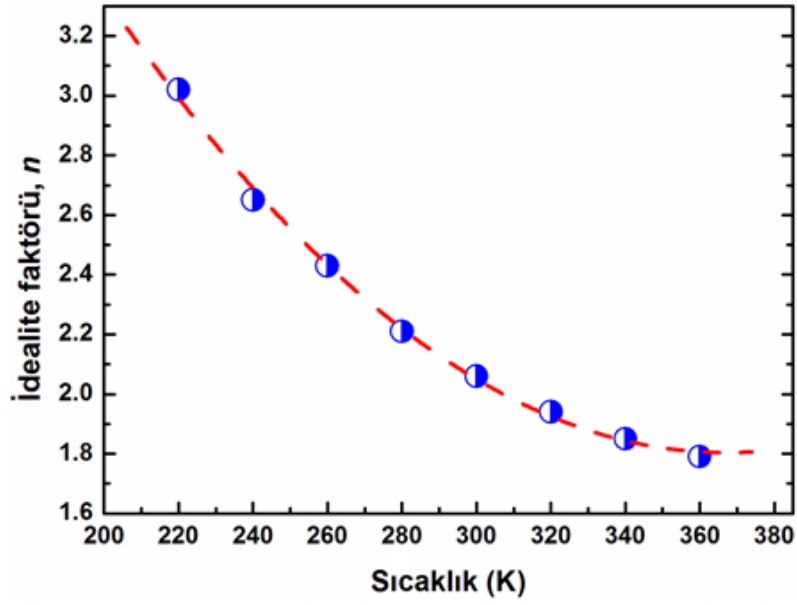
Şekil 5.14. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının 220 K - 360 K arasında değışen çeşitli sıcaklıklardaki yarı logaritmik I - V karakteristiğı

Şekil 5.14'teki $\log I$ - V eğrilerinin 0,05 V-0,1 V aralığındaki lineer bölgeleri göz önüne alınarak üretilen heteroeklemlı bir yapı için diyot parametreleri belirlendi. Farklı sıcaklık değerleri için hesaplanan idealite faktörü, doyum akımı ve bariyer yüksekliği Çizelge 5.3'te görülmektedir. 220 K sıcaklığı için bulunan n ve Φ_B değeri sırasıyla 3,02 ve 0,62 eV iken, bu değerler 360 K sıcaklığında 1,79 ve 0,9 eV olarak hesaplandı. Çizelge 5.3'te görüldüğü gibi, sıcaklık arttığında diyot idealite faktöründe bir azalma ve bariyer yüksekliğinde ise bir artış meydana geldi.

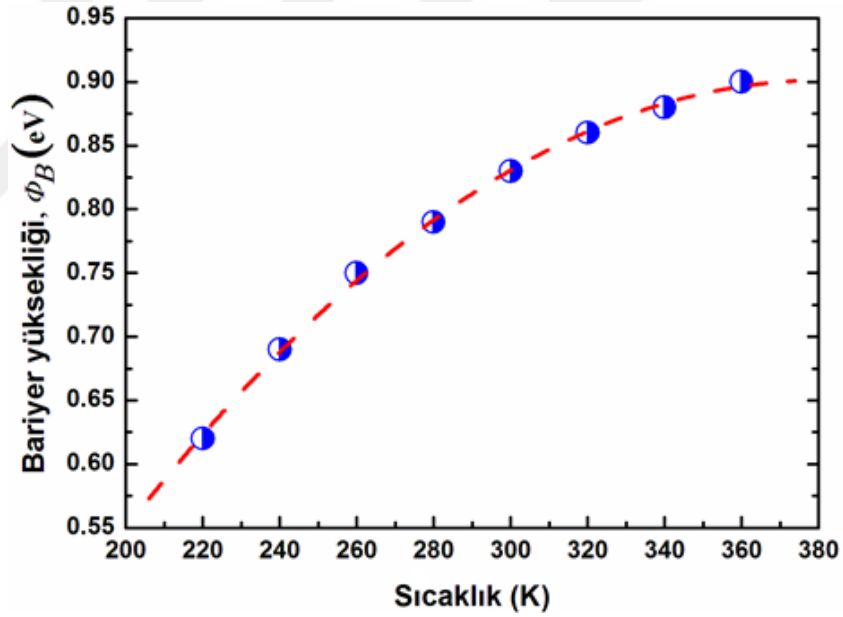
Çizelge 5.3. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının çeşitli sıcaklık değerlerindeki diyot parametreleri

Sıcaklık (K)	Doğrultma oranı	İdealite faktörü, n	Doyum akımı, I_0 (A)	Bariyer yüksekliği, Φ_B (eV)
220	$1,2 \times 10^3$	3,02	$2,06 \times 10^{-9}$	0,62
240	$1,1 \times 10^3$	2,65	$2,72 \times 10^{-9}$	0,69
260	$7,8 \times 10^2$	2,43	$5,61 \times 10^{-9}$	0,75
280	$4,9 \times 10^2$	2,21	$8,87 \times 10^{-9}$	0,79
300	$2,2 \times 10^2$	2,06	$2,11 \times 10^{-8}$	0,83
320	$1,8 \times 10^2$	1,94	$2,32 \times 10^{-8}$	0,86
340	$1,1 \times 10^2$	1,85	$3,48 \times 10^{-8}$	0,88
360	$0,8 \times 10^2$	1,79	$6,21 \times 10^{-8}$	0,9

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16, bu tez çalışmasında üretilen Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapı için bulunan idealite faktörü ve bariyer yüksekliği değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi, üretilen heteroeklemlı yapının hem n değeri hem de Φ_B değeri sıcaklığa güçlü şekilde bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda, elektronlar düşük seviyeli bariyerleri aşıp akıma katkıda bulunurlar. Sıcaklık arttıkça, daha fazla elektron daha yüksek bariyerleri geçecek miktarda enerjiye sahip olur.



Şekil 5.15. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının idealite faktörü n 'nin sıcaklığa bağılı değışımı



Şekil 5.16. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının bariyer yüksekliğı ϕ_B 'nin sıcaklığa bağılı değışımı

Şekil 5.14'ün yüksek pozitif ve negatif gerilim bölgelerinde (> 0.4 V) seri direnç etkisiyle farklı sıcaklık değıerleri için ölçülen $\log(I)$ - V eğırilerinin tümünün lineerlikten uzaklaştığı ve büküldüğü görölmektedir. Bu tez çalışmasında üretilen Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının parazitik seri ve şönt direnci değıerleri, Ohm Yasası ($R_j = \partial V / \partial I$) kullanılarak belirlendi. Çizelge 5.4'te farklı sıcaklıklar için hesaplanan değıerler

görülmektedir.

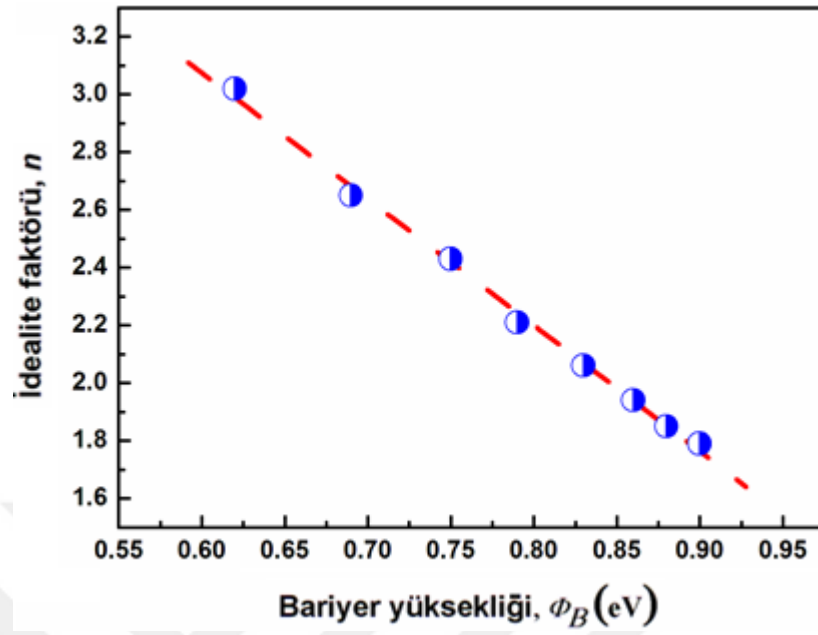
Çizelge 5.4. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının çeşitli sıcaklıklardaki parazitik direnç değerleri

Sıcaklık (K)	Seri direnç, R_s (k Ω)	Şönt direnci, R_{sh} (M Ω)
220	33,94	5,03
240	24,12	1,92
260	16,81	1,18
280	11,59	0,79
300	8,18	0,57
320	4,7	0,45
340	2,35	0,38
360	1,19	0,3

Heteroeklemlı yapının 360 K sıcaklığı için belirlenen R_s ve R_{sh} değerleri ise sırasıyla 1,19 k Ω ve 0,3 M Ω iken, 220 K sıcaklığında belirlenen değerler ise sırasıyla 33,94 k Ω ve 5,03 M Ω 'dur. Sıcaklık arttıkça, hem seri direnç değerinde hem de şönt direnci değerinde bir azalma göze çarpmaktadır. Sıcaklığın artması bağların kırılmasına ya da serbest yük taşıyıcı yoğunluğunun artmasına neden olur ve böylece seri direnç azalır. Düşük sıcaklıklarda şönt direncinin yüksek olması, üretilen heteroeklemlı yapının doğrultma oranını da artırmaktadır (Çizelge 5.3).

Şekil 5.17, üretilen Au/p-CuO/n-Si/Ag yapısının 220 K ile 360 K arasında değişen sıcaklıklarda hesaplanan bariyer yüksekliği değerlerine karşı idealite faktörü değerlerinin değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi, her iki diyot parametresi arasında doğrusal bir değişim vardır. Bariyer yüksekliği ϕ_B ile idealite faktörü n arasındaki bu lineer ilişki, farklı sıcaklıklarda belirlenen bariyer yüksekliğinin homojen olmamasından kaynaklanabilir. Ayrıca artan bariyer yüksekliğine karşı idealite faktörünün azalması, heteroeklemlı yapının çalışma mekanizmasının saf termoiyonik yayılım (TE) teorisinden saptığının da bir göstergesi olabilir. Termoiyonik yayıma göre, elektronlar bir bariyer boyunca yayılır. Düşük sıcaklıklarda, elektronlar düşük enerjilere sahip olurlar ve düşük bariyerleri geçerler. Bunun sonucunda yapının idealite faktörü büyük olur. Aksine, yüksek sıcaklıklarda ise elektronlar yüksek bariyeri aşmak için önemli miktarda enerji kazanırlar ve bu durum daha yüksek sıcaklıklarda daha düşük idealite faktörüne neden

olur.



Şekil 5.17. Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının 220-360 K sıcaklık aralığında bariyer yüksekliğinin idealite faktörüne karşı değişimi

BÖLÜM VI

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında p-n heteroeklem yapısında kullanılan küprik oksit ince filmlerinin fiziksel özellikleri incelendi. Tez çalışmasının ikinci aşamasında ise, p-tipi küprik oksit ince filmi n-tipi kristal silisyum üzerine kimyasal depolama yöntemi ile kaplandı ve bu şekilde üretilen küprik oksit/silisyum p-n heteroeklemli yapıların akım-gerilim (*I-V*) karakteristikleri sıcaklığa bağlı olarak incelendi.

p-tipi küprik oksit ince filmleri, silikat cam alttabanlar üzerine kimyasal depolama yöntemi ile kaplandı. Daha sonra, üretilen filmlere 873 K sıcaklığında tavlama işlemi uygulandı. Yeni üretilen (tavlanmamış) ve tavlanan örneklerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri XRD, SEM, AFM, optik yansıma ve geçirme ile Hall-etkisi ölçümleri vasıtasıyla incelendi.

Yeni üretilen ve 873 K'de tavlanan ince filmlerin XRD desenleri, örneklerin polikristal yapıya sahip olduğunu ortaya koydu. Her iki örnek, sadece küprik oksit fazına ait kırınım pikleri sergiledi ve bu pikler tavlamanın etkisiyle keskinleşerek çok daha şiddetli hale geldi. XRD verilerinin analizi sonucunda, üretilen filmlerin tek fazda oluştuğu ve filmlerin kristal yapısında herhangi bir ikincil fazın veya kirliliğin bulunmadığı görüldü. İnce film örneklerin X-ışını çizgi profili analizi, Williamson-Hall yöntemi kullanılarak yapıldı ve filmlerin ortalama kristalit boyutu, mikrozorlanma ve dislokasyon yoğunluğu parametreleri hesaplandı. Yeni üretilen tavlanmamış örneğin kristalit boyutu 283 Å, dislokasyon yoğunluğu $1,25 \times 10^{15}$ lines/m² ve mikrozorlanması ise $8,5 \times 10^{-3}$ lin⁻² m⁻⁴ olarak hesaplandı. 873 K'de tavlanan küprik oksit ince filminin ortalama kristalit boyutu ise 574 Å olarak belirlendi ve ısıtılma işlemi sonucunda kayda değer bir artış olduğu görüldü. Bu da, tavlama işlemi ile ince filmin yapısına sağlanan termal enerjinin daha büyük boyutta küprik oksit kristallerinin oluşumunu sağladığını gösterdi. Böylece, ince film 873 K sıcaklıkta oldukça yüksek derecede kristalin duruma geçti. Diğer taraftan, örneklerin mikrozorlanma ve dislokasyon yoğunluğu değerlerinde tavlama ile azalma eğilimi gözlemlendi.

Küprik oksit ince film örneklerin yüzey morfolojisi SEM tekniği ile belirlendi. Yeni üretilen ve 873 K'de tavlanan ince filmlerin SEM resimleri, her iki örneğin cam

alttabanlara iyi şekilde yapıştıklarını ve yüzeylerinde herhangi bir çatlak, delik veya boşluk oluşumunun bulunmadığını ortaya koydu. Yeni üretilen örneğin yüzeyinde şekil ve boyut olarak hayli düzenli dağılmış sıkı-paketli nanoboyutlu doku oluşumu gözlemlendi. Diğer taraftan, tavlama işlemi ile ince filmin yüzey morfolojisinin değiştiği ve XRD analizinden elde edilen sonuçların da işaret ettiği gibi küprik oksit kristalitlerinin bir araya gelip topaklanarak daha büyük boyutlu dokular oluşturduğu görüldü.

Küprik oksit ince filmlerin yüzey pürüzlülüğü AFM tekniği ile incelendi ve filmlerin AFM görüntülerinin analizi sonucunda, yüzeylerinin homojen dağılımlı düzgün dokular ile tamamen kaplandığı ve hem yeni üretilen hem de 873 K'de tavlanan örneğin oldukça düzgün yüzeylere sahip olduğu görüldü. Örneklerin yüzey pürüzlülükleri, yeni üretilen ince film için 23 Å ve 873 K'de tavlanan film için 70 Å olarak ölçüldü. Bu sonuçlar, ince film yüzeyinin filme uygulanan ısı işlemi etkisiyle daha pürüzlü hale geldiğini ortaya koydu. XRD ölçümlerinin analiz edilmesi sonucunda, tavlanan örneğin kristalit boyutunda gözlenen artışa paralel olarak ince filmin yüzey pürüzlülüğünün de arttığı sonucuna ulaşıldı.

Küprik oksit ince film örneklerinin optik özellikleri, dalga boyuna bağlı yansıma (R) ve geçirgenlik (T) ölçümleri ile incelendi. Yeni üretilen ve 873 K'de tavlanan ince filmlerin, spektrumun görünür bölgesinde (400-700 nm) oldukça soğurucu özellikte olduğu, ancak yakın-kızılötesi bölgede (700-1100 nm) ise geçirgen oldukları görüldü. Optik geçirgenlik, 850-900 nm dalga boyundan daha küçük dalga boyu değerlerinde keskin bir biçimde azaldı. Yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filmlerinin optik bant aralığı enerjisi sırasıyla 1,85 ve 1,5 eV olarak belirlendi. Bu sonuçların literatürde verilen değerler ile uyumlu olduğu gözlemlendi.

Yeni üretilen (tavlanmamış) ve 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince film örneklerinin taşıyıcı tipi, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite gibi elektriksel özellikleri, geleneksel dört-nokta dc Van der Pauw geometrisinin kullanıldığı Hall-etkisi ölçümleri sonucunda belirlendi. Ölçümlerden elde edilen verilerin analizi sonucunda, ince filmlerin p-tipi yarıiletken özellik gösterdiği gözlemlendi. Yeni üretilen ince filmin mobilitesi $1,6 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve taşıyıcı yoğunluğu $8,7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ olarak hesaplandı. 873 K sıcaklıkta tavlanan küprik oksit ince filminin mobilitesi ise $30,7 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ve taşıyıcı yoğunluğu $59,2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ olarak belirlendi. Hall-etkisi ölçümlerinden elde edilen bu sonuçlar, ince filme uygulanan ısı

işlemin etkisi ile filmin kristal yapısının iyileştiğini gösterdi.

Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığında (300 K) ölçülen I - V grafiğı, yapının doğırltma davranışı sergilediğini ve tipik bir p-n eklem diyot karakteristiğine sahip olduğunu ortaya koydu. Oda sıcaklığında ± 2 V gerilim değerlerindeki doğırltma oranı $2,2 \times 10^2$ olarak bulundu. $\log(I)$ - V eğrisi kullanılarak oda sıcaklığındaki idealite faktörü 2,06, doyum akımı $2,11 \times 10^{-8}$ A ve bariyer yüksekliğı ise 0,83 eV olarak belirlendi. Heteroeklemlı yapıların seri ve şönt dirençleri, eklem direncinin uygulanan dış gerilime karşı değışim grafiğı kullanılarak belirlendi. Heteroeklemlı yapının oda sıcaklığındaki seri direnç değeri 8,18 k Ω ve şönt direnci değeri ise 0,57 M Ω olarak hesaplandı.

Bu tez çalışmasında üretilen Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının oda sıcaklığındaki akım iletim mekanizması, yapının I - V karakteristiğinin çift logaritmik skalada çizilmesi ile incelendi. Düşük gerilim bölgesinde, omik karaktere sahip akım iletim mekanizması görüldü. Orta gerilim bölgesi için ileri beslemedeki akımın ekspanansiyel tuzak dağılımlı SCLC mekanizması ile uyumlu olduğu ve yüksek gerilim bölgesinde ise tuzaklardan bağımsız SCLC mekanizmasının baskın olduğu sonucuna ulaşıldı.

Au/p-CuO/n-Si/Ag heteroeklemlı bir yapının 220 K-360 K arasında ve 20 K adımlarla değışen sıcaklık değerleri için ölçülen $\log I$ - V karakteristikleri, her bir sıcaklık değeri için heteroeklemlı yapının doğırltma davranışı sergilediğini ortaya koydu. Farklı sıcaklıklar için elde edilen idealite faktörü, doyum akımı ve bariyer yüksekliğı gibi diyot özelliğini belirleyen parametrelerin sıcaklıkla değıştiğı, sıcaklık arttığında idealite faktöründe bir azalmanın ve bariyer yüksekliğinde ise bir artışın olduğu gözlemlendi. 220 K sıcaklığı için bulunan idealite faktörü ve bariyer yüksekliğı sırasıyla 3,02 ve 0,62 eV iken bu değerler 360 K sıcaklığında 1,79 ve 0,9 eV olarak hesaplandı. Heteroeklemlı yapının 220 K sıcaklığındaki seri ve şönt direnci değerleri sırasıyla 33,94 k Ω ve 5,03 M Ω iken, 360 K sıcaklığındaki seri ve şönt dirençleri sırasıyla 1,19 k Ω ve 0,3 M Ω olarak belirlendi. Sıcaklık arttıkça, hem seri dirençte hem de şönt direncinde bir azalma göze çarptı.

Bu tez çalışmasından ulaşılan sonuçlar göz önüne alındığında, üretilen p Au/p-CuO/n-

Si/Ag heteroeklemlı yapıların diyot özellikleri üzerinde seri direncin etkisinin ihmal edilemeyecek kadar büyük olduğu söylenebilir. Dolayısı ile bu tür yapıların çalışma performansını artırmadaki en önemli adımlardan biri, yapıdaki seri direnci mümkün olduğunca azaltmaktır. Seri direnç, hem heteroeklem yapısında yer alan yarıiletken materyallerin kendi özelliklerinden hem de yapıdaki metalik kontaklardan kaynaklanabilir. Bu sebeple, kimyasal depolama yöntemi ile üretilen ve heteroeklem yapısının p kısmını oluşturan küprik oksit ince filmlerinin fiziksel özelliklerinin daha da iyileştirilmesi ve farklı materyallerden oluşan değişik geometrilere sahip metalik kontakların yapıya eklenmesi ile seri direnç etkisinin azaltılması mümkündür. Ayrıca, heteroeklem yapısında kullanılan ve yapının n kısmını oluşturan kristal silisyumun temizlenme işleminin optimizasyonu ile yüzeyde oluşan ve diyotun eklem bölgesinde yeniden birleşme seviyesi oluşturan arayüzey durumlarının azaltılması sonucunda yapıların *I-V* karakteristikleri iyileştirilebilir. Heteroeklem yapısındaki p-tipi ve n-tipi yarıiletken materyallerin arasına ince bir pasivasyon tabakasının eklenmesi, eklem bölgesindeki örgü uyumsuzluklarını ve arayüzey durumlarını azaltılarak yapının çalışma performansı daha da artırılabilir.

KAYNAKLAR

Abdel, R.M. and Roushdy, N., “Determination of the optical band gap for amorphous and nanocrystalline copper oxide thin films prepared by SILAR technique”, ***Journal of Physics D: Applied Physics*** 42, 15413-15419, 2009.

Akgul, F.A., Akgul, G., Yildirim, N., Unalan, H.E. and Turan, R., “Influence of thermal annealing on microstructural, morphological, optical properties and surface electronic structure of copper oxide thin films”, ***Materials Chemistry and Physics*** 147, 987-995, 2014.

Akgul, G., Akgul, F.A., Mulazimoglu, E., Unalan, H.E. and Turan, R., “Fabrication and characterization of copper oxide-silicon nanowire heterojunction photodiodes”, ***J. Phys. D: Appl. Phys.*** 47, 065106-1–065106-7, 2014.

Anderson, R.L., “Germanium-gallium arsenide heterojunctions”, ***IBM J. Res. Dev.*** 4, 283-287, 1960.

Anderson, R.L., “Experiments on Ge-GaAs heterojunctions”, ***Solid State Electron.*** 5, 341-344, 1962.

Anderson, R.L., ***Proc. Int. Conf. on the Phys. Chem. of Semicond. Heterofunctions*** II, 55, 1971.

Avgouropoulos, G., Ioannides, T., Papadopoulou, C., Batista, J., Hocevar, S. and Matralis, K., “A comparative study of Pt/-Al₂O₃, Au/-Fe₂O₃ and CuO-CeO₂ catalysts for the selective oxidation of carbon monoxide in excess hydrogen”, ***Catal. Today*** 75, 157-167, 2002.

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.

Bao, Q., Ming Li, C., Liao, L., Yang, H., Wang, W., Ke, C., Song, Q., Bao, H., Yu, T., Loh, K.P. and Guo, J., “Electrical transport and photovoltaic effects of core-shell CuO/C₆₀ nanowire heterostructure”, ***Nanotechnology*** 20, 065203-8, 2009.

Binnig, G., Quate, C.F. and Gerber, Ch., “Atomic force microscope,” **Phys. Rev. Lett.** 56, 930-933, 1986.

Cao, L., Fan, P., Vasudev, A.P., White, J.S., Yu, Z., Cai, W., Schuller, J.A., Fan, S. and Brongersma, M.L., “Semiconductor nanowire optical antenna solar absorbers”, **Nano Letters** 10, 439-445, 2010.

Chen, J., Huang, N.Y., Deng, S.Z., She, J.C., Xu, N.S., Zhang, W.X., Wen, X.G. and Yang, S.H., “Effects of light illumination on field emission from CuO nanobelt arrays”, **Appl. Phys. Lett.** 86, 157-159, 2005.

Chen, W.G., Li, Q.Z., Gan, H.L. and Zeng, W., “Study of CuO–SnO₂ heterojunction nanostructures for enhanced CO gas sensing properties”, **Advances in Applied Ceramics** 113, 139-146, 2014.

Dahrul, M. and Alatas, Husin,” Preparation and optical properties study of CuO thin film as applied solar cell on LAPAN-IPB Satellite”, **Procedia Environmental Sciences** 33, 661-667, 2016.

Dai, P.C., Mook, H.A., Aeppli, G., Hayden, S.M. and Dogan, F., “Resonance as a measure of pairing correlations in the high-T_c superconductor YBa₂Cu₃O_{6.6}”, **Nature** 406, 965-968, 2000.

Dhanasekaran, V., Mahalingam, T., Chandramohan, R., Rhee, J.-K. and Chu, J.P., “Electrochemical deposition and characterization of cupric oxide thin films”, **Thin Solid Films** 520, 6608-6613, 2012.

Dhas C.R., Alexander, D., Christy, A.J., Jeyadheepan, K., Raj, A.M.E. and Raja, C.S., “Preparation and characterization of CuO thin films prepared by spray pyrolysis technique for ethanol gas sensing application”, **Asian Journal of Applied Sciences** 7, 671-684, 2014.

Dimopoulos, T., Peic', A., Müllner, P., Neuschitzer, M., Resel, R., Abermann, S., Postl, M., List, E.J.W., Yakunin, S., Heiss, W. and Bruckl, H., “Photovoltaic properties of thin film heterojunctions with cupric oxide absorber”, **Journal of Renewable and Sustainable Energy** 5, 011205-11, 2013.

Dolega U., **Z. Naturf.** 18a, 653, 1963.

Figueiredo, V., Elangovan, E., Gonçalves, G., Barquinha, P., Pereira, L., Franco, N., Alves, E., Martins, R. and Fortunato, E., “Effect of post-annealing on the properties of copper oxide thin films obtained from the oxidation of evaporated metallic copper”, **Appl. Surf. Sci.** 254, 3949-3954, 2008.

Fu, L.J., Gao, J., Zhang, T., Cao, Q., Yang, L.C., Wu, Y.P. and Holze, R., “Effect of Cu₂O coating on graphite as anode material of lithium ion battery in PC-based electrolyte”, **J. Power Sources** 171, 904-907, 2007.

Gao, F., Liu, X.-J., Zhang, J.-S., Song, M.-Z. and Li, N., “Photovoltaic properties of the p-CuO/n-Si heterojunction prepared through reactive magnetron sputtering”, **Journal of Applied Physics** 111, 084507-4, 2012.

Ghadimkhani, G., Tacconi, N.R., Chanmanee, W., Janakya, C. and Rajeshwar, K., “Efficient solar photoelectrosynthesis of methanol from carbon dioxide using hybrid CuO–Cu₂O semiconductor nanorod arrays”, **Chem. Commun.** 49, 1297-1299, 2013.

Hoa, N.D., An, S.Y., Dung, N.Q., Quy, N.V. and Kim, D., “Synthesis of p-type semiconducting cupric oxide thin films and their application to hydrogen detection”, **Sensors and Actuators B** 146, 239-244, 2010.

Jayatissa, A.H., Guo, K. and Jayasuriya, A.C., “Fabrication of cuprous and cupric oxide thin films by heat treatment”, **Appl. Surf. Sci.** 255, 9474-9479, 2009.

Jin, Z., Zhang, X., Li, Y., Li, S. and Lu, G., “Apparent quantum efficiency for stable hydrogen generation over eosin-sensitized CuO/TiO₂ photocatalyst under visible light irradiation”, **Catal. Commun.** 8, 1267-1273, 2007.

Johan, M.R., Mohd-Suan, M.S., Hawari, N.L. and Ching, H.A., “Annealing effects on the properties of copper oxide thin films prepared by chemical deposition”, **Int. J. Electrochem. Sci.** 6, 6094-6099, 2011.

Kaya, M., p-tipi bakir oksit ince film/n-tipi silisyum nanotel heteroeklemlı diyotların üretimi ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Niğde, s. 47-73, 2016.

- Kroemer, H., "Theory of a Wide-Gap Emitter for Transistors", **Proc. IRE** **45**, 1535, 1957.
- Liao K.-T., Fabrication and characterization of ZnO/CuO core-shell nanowire arrays, Ms Thesis, **University of Connecticut**, Connecticut, s. 10, 2010.
- Lim, Y.F., Choi, J.J. and Hanrath, T., "Facile Synthesis of Colloidal CuO Nanocrystals for Light-Harvesting Applications", **Journal of Nanomaterials** 2012, 393160-6, 2012.
- Mageshwari, K, Han, S. and Park, J., "Fabrication and characterization of a CuO/ITO heterojunction with a graphene transparent electrode", **Semicond. Sci. Technol.** **31**, 055004-8, 2016.
- Maruyama, T., "Copper oxide thin films prepared by chemical vapor deposition from copper dipivaloylmethanate", **Sol. Energ. Mat. Sol. C** **56**, 85-92, 1998.
- Meyer, B.K., Polity, A., Reppin, D., Becker, M., Hering, P., Klar, P.J., Sander, T., Reindl, C., Benz, J., Eickhoff, M., Heiliger, C., Heinemann, M., Blasing, J., Krost, A., Shokovets, S., Müller, C. and Ronning, C., "Binary copper oxide semiconductors: From materials towards devices", **Phys. Status Solidi B** **249**, 1487-1509, 2012.
- Mohd, R.J., Mohd, S.M.S., Nor, L.H. and Hee A.C., "Annealing effects on the properties of Copper Oxide thin films prepared by chemical deposition", **Int. J. Electrochem. Sci.** **6**, 6094-6104, 2011.
- Moll, J.L., "The evolution of the theory of the current-voltage characteristics of p-n junctions," **Proc. IRE** **46**, 1076-1082, 1958.
- Mridha, S. and Basak, D., "Investigation of a p-CuO/n-ZnO thin film heterojunction for H₂ gas-sensor applications", **Semicond. Sci. Technol.** **21**, 928-932, 2006.
- Muhibbullah, M., Hakim, M.O. and Choudhury, M.G.M., "Studies on Seebeck effect in spray deposited CuO thin film on glass substrate", **Thin Solid Films** **423**, 103-107, 2003.
- Musselman, K.P., Marin, A., Schmidt-Mende, L. and MacManus-Driscoll, J.L., "Incompatible length scales nanostructured Cu₂O solar cells", **Advanced Functional Materials** **22**, 2202-2208, 2012.
- Oku, T., Motoyoshi, R., Fujimoto, K., Akiyama, T., Jeyadevan, B. and Cuya J.,

“Structures and photovoltaic properties of copper oxides/fullerene solar cells”, **Journal of Physics and Chemistry of Solids** 72, 1206-1211, 2011.

Panah, S.M., Dalapati, G.K., Radhakrishnan, K., Kumar, A., Tan, H.R., Kumar, E.N., Vijila, C., Tan, C.C. and Chi, D., “p-CuO/n-Si heterojunction solar cells with high open circuit voltage and photocurrent through interfacial engineering”, **Prog. Photovolt.: Res. Appl.** 23, 637-645, 2015.

Papadimitropoulos, G., Vourdas, N., Vamvakas, V.E. and Davazoglou, D., “Optical and structural properties of copper oxide thin films grown by oxidation of metal layers”, **Thin Solid Films** 515, 2428-2432, 2006.

Park, J.Y., Kwon, T.H., Koh, S.W. and Kang, Y.C., “Annealing temperature dependence of on the physicochemical properties of copper oxide thin films”, **Bulletin of Korean Chemical Society** 32, 1331-0335, 2011.

Prabhu, R.R., Saritha, A.C., Shijeesh, M.R. and Jayaraj, M.K.,” Fabrication of p-CuO/n-ZnO heterojunction diode via sol-gel spin coating technique”, **Materials Science and Engineering B** 220, 82-90, 2017.

Preston, J.S., “Constitution and mechanism of the selenium rectifier photocell”, **Proc. Roy. Soc. A** 202, 449-466, 1950.

Ramya, V., Neyvasagam, K., Chandramohan, R., Valanarasu, S. and Benial A.M.F., “Studies on chemical bath deposited CuO thin films for solar cells application”, **J Mater Sci: Mater Electron** 26, 8489-8496, 2015.

Ravichandran, A.T., Dhanabalan, K., Valanarasu, S., Vasuhi, A. and Kathalingam, A., “Role of immersion time on the properties of SILAR deposited CuO thin films”, **J Mater Sci: Mater Electron.** 26, 921-926, 2015.

Ray, S.C., “Preparation of copper oxide thin film by the sol-gel-like dip technique and study of their structural and optical properties”, **Sol. Energy Mater. Sol. Cells** 68, 307-312, 2001.

Sah, C.T., Noyce, R.N. and Shockley, W., “Carrier generation and recombination in p-n junction and p-n junction characteristics”, **Proc. IRE** 45, 1228-1243, 1957.

Sameer, A.M. and Hiba, M.A., “Fabrication and characterization of p-CuO/n-Si heterojunction for solar cell applications”, ***Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*** 3, 5053-5055, 2016.

Serin, N. Serin, T., Horzum, Ş. and Çelik, Y., “Annealing effects on the properties of copper oxide thin films prepared by chemical deposition”, ***Semicond. Sci. Technol.*** 20, 398-401, 2005.

Scheer, R., Messmann-Vera, L., Klenk, R. and Schock, H-W., “On the role of non-doped ZnO in CIGSe solar cells”, ***Progress in Photovoltaics: Research and Applications*** 20, 619-624, 2012.

Schroder, D.K., Semiconductor Material and Device Characterization, ***John Wiley & Sons***, New Jersey, 2006.

Shabu, R., Moses Ezhil Raj, A., Sanjeeviraja, C. and Ravidhas C., “Assessment of CuO thin films for its suitability as window absorbing layer in solar cell fabrications”, ***Materials Research Bulletin*** 68, 1-8, 2015.

Shao, F., Sun, J., Gao, L., Luo, J., Liu, Y. and Yang, S., “High efficiency semiconductor-liquid junction solar cells based on Cu/Cu₂O”, ***Advanced Functional Materials*** 22, 3907-3913, 2012.

Shockley, W., “The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors”, ***Bell Syst. Tech. J.*** 28, 435-489, 1949.

Shockley, W., Electrons and Holes in Semiconductors, ***D. Van Nostrand Company***, New Jersey, 1950.

Shockley, W., Circuit Element using Semiconductive Material”, US Patent, No: 2569347 dated 25.09.1951, 1951.

Shrividhya, T., Ravi, G., Hayakawa, Y. and Mahalingam, T., “Determination of structural and optical parameters of CuO thin films prepared by double dip technique”, ***J Mater Sci: Mater Electron*** 25, 3885-3894, 2014.

Sultana, J., Das, A., Das, A., Saha, N.R., Karmakar, A. and Chattopadhyay, S., “Characterization of nano-powder grown ultra-thin film p-CuO/n-Si hetero-junctions by

employing vapour-liquid-solid method for photovoltaic applications”, *Thin Solid Films* 612, 331-336, 2016.

Sultana, J., Paul, S., Karmakar, A., Yi, R., Dalapati, G.K. and Chattopadhyay, S., “Chemical bath deposited (CBD) CuO thin films on n-silicon substrate for electronic and optical applications: Impact of growth time”, *Applied Surface Science* 418, 380-387, 2017.

Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, *John Wiley and Sons*, New York, 1981.

Tauc, T.J., Optical Properties of Solids, *North-Holland*, Amsterdam, 1972.

Xiang, C., Kimball, G.M., Ronald, L.G., Bruce, S.B., Harry, A.A. and Nathan, S.L., “820 mV open-circuit voltages from Cu₂O/CH₃CN junctions”, *Energy & Environmental Science* 4, 1311-1318, 2011.

Wang, P., Zhao, X., and Li, B., “ZnO-coated CuO nanowire arrays: fabrications, optoelectronic properties, and photovoltaic applications”, *Optics Express* 19, 11271-11279, 2011.

Williamson, G.K. and Hall W.H., “X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram”, *Acta Metall.* 1, 22-31, 1953.

Williamson, G.B. and Smallman R.C., “Dislocation densities in some annealed and cold-worked metals from measurements on the X-ray debye-scherrer spectrum”, *Philos. Mag.* 1, 34-46, 1956.

Vasiliev, R.B., Rumyanteva, M.N., Yakovlev, N.V. and Gaskov, A.M., “CuO/SnO₂ thin film heterostructures as chemical sensors to H₂S”, *Sens. Actuators B* 50, 186-193, 1998.

Visalakshi, S., Kannan, R., Valanarasu, S., Kim, H.S., Kathalingam, A. and Chandramohan, R., “Effect of bath concentration on the growth and photovoltaic response of SILAR-deposited CuO thin films”, *Appl. Phys. A* 120, 1105-1111, 2015.

Yacobi, B.G., Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles, *Kluwer Academic/Plenum Publishers*, London, 2002.

Yoon, K.H., Choi, W.J. and Kang, D.H.,” Photoelectrochemical properties of copper

oxide thin films coated on an n-Si substrate”, *Thin Solid Films* 372, 250-256, 2000.

Zhang, L., McMillon, L. and McNatt, J., “Gas-dependent bandgap and electrical conductivity of Cu₂O thin film”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 108, 230-234, 2013.

Zhao, M., Shang, F., Song, Y., Wang, F., Zhou, Z., Lv, J., Zi, Z., Wei, Y., Chen, X., Gang, H., Zhang, M., Song, X. and Sun, Z., “Effect of solution concentration on surface morphology, chemical composition and photoresponse of CuO/Cu₂O composite thin films grown by hydrothermal synthesis”, *J Mater Sci: Mater. Electron.* 25, 4877-4882, 2014.



ÖZ GEÇMİŞ

İbrahim Tutuş 26.07.1982 tarihinde Mersin Erdemli’de doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Mersin/Erdemli’de tamamladı. 2001 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü’nden Haziran 2006’da mezun oldu. 2012-2013 eğitim-öğretim yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2015 yılından bu yana Şanlıurfa’da Fizik öğretmeni olarak görevine devam etmektedir.



