

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Renna TAKTAKOĞLU

**ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLE ZnO İNCE FİLM ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

FİZİK ANABİLİM DALI

ADANA, 2016

**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLE ZnO İNCE FİLM ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Renna TAKTAKOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez/...../2016 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu İle Kabul Edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Hamide KAVAK
DANIŞMAN

.....
Prof.Dr. Ramazan ESEN
ÜYE

.....
Yrd. Doç.Dr. Mustafa GÜNEŞ
ÜYE

Bu tez Enstitümüz Fizik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.
Kod No:

**Prof. Dr. Mustafa GÖK
Enstitü Müdürü**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLE ZnO İNCE FİLM ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Renna TAKTAKOĞLU

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Hamide KAVAK

Yıl: 2016, Sayfa: 63

Jüri : Prof. Dr. Hamide KAVAK

: Prof.Dr. Ramazan ESEN

: Yrd. Doç.Dr. Mustafa GÜNEŞ

Oldukça ekonomik elektrokaplama yöntemi geliştirilerek ZnO nanorod yapılar üretilmiştir. Büyütme işlemi standart DC güç kaynağı, mili ampermetre ve iki elektrotlu elektrokimyasal hücre ile gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi, katodik kaplama akımı, süre, çözelti molaritesi ve sıcaklık gibi parametreler değiştirilerek ITO kaplı cam alttaban üzerine gerçekleştirilmiştir. Parametreler değiştirilerek optoelektronik uygulamalar için optimum saydam yarıiletken materyal üretilmeye çalışılmıştır. XRD yapısal karakterizasyon sonuçları, kaplama sıcaklığına ve molaritesine duyarlı polikristal ZnO nanorod yapıların c-ekseni boyunca büyüdüğünü göstermiştir. En iyi iki ZnO nanorod serisinin ortalama optik geçirgenliği sırasıyla %60 ve %42'dir. Kaplama zamanı arttıkça ZnO nanorodların optik enerji band aralık değerleri 3.24 eV değerinden 3.21 eV değerine doğru azalmıştır. Üretilen bütün nanorod yapılar $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ seviyesinde yüksek taşıyıcı konsantrasyonlu, $1-2 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ değerinde düşük dirençli ve n-tipi yarıiletkenlerdir.

AnahtarKelimeler: Ekonomik, Elektrokaplama, ZnO, Nanorod, Saydam İletken Oksit

ABSTRACT

MSc THESIS

ELECTROCHEMICALLY GROWTH OF ZnO THIN FILM AND CHARACTERIZATION

Renna TAKTAKOĞLU

**ÇUKUROVA UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS**

Supervisor : Prof. Dr. Hamide KAVAK

Year: 2016, Pages: 63

Jury : Prof. Dr. Hamide KAVAK

: Prof. Dr. Ramazan ESEN

: Asst. Prof. Dr. Mustafa GÜNEŞ

Extremely low-cost electrodeposition technique was developed to deposit ZnO nanorods. The growth process was performed using standard DC power supply, milliammeter and two-electrode electrochemical cell. The deposition was carried out on ITO coated glass substrates by changing deposition parameters such as cathodic deposition current and time, solution molarity and temperature. The parameters varied to obtain optimum transparent semiconductor material for optoelectronic applications. Structural characterizations by XRD indicate the formation of polycrystalline phase ZnO with strong c-axis orientation and were sensitive to deposition temperatures and molarity as well. Average optical transmittance for the best two ZnO nanorods series was around 60% and 42%, respectively. The optical energy band gap of the ZnO nanorods decreased from 3.24 eV to 3.21 eV as the deposition time increased. All the growth nanorods were n-type with high carrier concentration $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ and low $1\text{-}2 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}$ resistivity.

Key Words: Low-cost, Electrodeposition, ZnO, Nanorod, Transparent Conductive Oxide

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen ve bana her aşamada yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Hamide KAVAK'a, Prof. Dr. Ramazan ESEN ve tüm bölüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Yine çalışmam boyunca her an yanımda olan ve bana her konuda yardımcı olan, tecrübelerinden faydalandığım değerli arkadaşım Teoman ÖZDAL'a, benden yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Havva ÖZDAMAR ve Deniz Kadir TAKCI'ya teşekkür ederim.

Hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini eksik etmeyerek bu günlere gelmemi sağlayan canım anneme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışmam boyunca ihtiyacım olduğunda yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşim ve canım kızıma teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin desteklenmesini sağlayan Ç.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje no:FEF2013YL40) teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	X
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL VE METOD	11
3.1. Materyal	11
3.1.1. Çinko	11
3.1.2. Çinko Oksit	14
3.1.3. İndium Kalay Oksit	21
3.2. Metod	22
3.2.1. Elektrokimyasal Kaplama Yöntemi	22
3.2.2. Alttaban Temizliği	25
3.2.3. Çözelti Hazırlama.....	26
3.3. Deneyler	28
3.3.1. CV Ölçümü	28
3.3.2. ZnO Kaplama	29
3.3.3. Karakterizasyon.....	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
4.1. Yapısal Karakterizasyon	39
4.2. Yüzey ve Kalınlık Karakterizasyonu	42
4.3. Optik ve elektriksel karakterizasyon.....	45

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 3.1. Çinko metalinin fiziksel özellikleri.....	12
Çizelge 3.2. Çinko metalinin atomik özellikleri.	12
Çizelge 3.3. ZnO bileşiğinin ölçülmüş ve hesaplanmış örgü parametreleri ve c/a oranı.....	16
Çizelge 3.4. Katı ITO fiziksel parametreleri.....	22
Çizelge 3.5. Molarite ve sıcaklığa bağlı CV ölçümleri.....	28
Çizelge 3.6. Molariteye bağlı CV ölçümleri sonucu elde edilen J kaplama akım yoğunluğu değerleri.	29
Çizelge 3.7. Üretilen ZnO numunelerine ait koşulları gösteren Çizelge.	27
Çizelge 4.1. RT11-12 ve RT23-24 numune serilerinin (002) pik değerleri ve d kırılma yüzey mesafesi.	41
Çizelge 4.2. Elektriksel karakterizasyon sonuçları.	48

Şekil 2.1. (a) -0.8V, (b) -0.9V ve (c) -1.1V gerilim altında kaplanan ZnO ince filmlerin SEM görüntüsü (Mahalingama ve ark, 2005).	5
Şekil 2.2. ZnO ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı fotoluminesans özellikleri.....	6
Şekil 2.3. ZnO nanotüp yapıların SEM görüntüsü.	6
Şekil 2.4. Elde edilen hegzagonal yapılı ZnO nanorod yapıların SEM görüntüsü.....	7
Şekil 2.5. ECD hücrenin kesit şemasının gösterimi.	8
Şekil 2.6. (a) 0.1M, (b) 0.3M, (c) 1M ve (d) 3M çözelti konsantrasyonunda üretilen ZnO yapıların SEM görüntüsü.....	9
Şekil 2.7. Elde edilen ZnO nanorod yapıların taşıyıcı materyalin etkisine bağlı XRD grafiği.....	9
Şekil 2.8. ZSL ve altın tohum tabakası kaplı ITO ve Si üzerine büyütülmüş ZnO nanorod yapıların XRD grafiği.	10
Şekil 3.1. 1 cm ³ küp, kristal çinko filizi ve dallı filiz halinde çinko (en.wikipedia.org).	12
Şekil 3.2. ZnO kristal yapının küreler ile gösterimi (beyaz küreler Zn atomları) (a) kübik rocksalt, (b) kübik zinc blende ve (c) hegzagonal wurtzite yapı.....	14
Şekil 3.3. Wurtzite ZnO kristal yapının şematik gösterimi ve örgü sabitleri.	15
Şekil 3.4. Termal buharlaştırma metodu ile sentezlenmiş ZnO nanorod yapılar (Wang, 2004).....	18
Şekil3.5. ZnO nanoçubukların (a) VLS prosesi ile (b) katalizörsüz MOCVD metodu ile büyütülmesinin şematik gösterimi. VLS yöntemiyle büyütülmüş örneklerin FESEM görüntüleri (c) ve (e) ve MOCVD yöntemiyle büyütülmüş örneklerin FESEM görüntüleri(d) ve (f). (referans 28 - Telif hakkı [2001] Science 292-1897 AAAS (Park ve ark, 2004).	19
Şekil 3.6. Standart ECD kaplama düzeneği ve hücre.	23

Şekil 3.7. CV ölçümleri için kullanılan potansiyostat cihazı.	24
Şekil 3.8. Laboratuarda oluşturduğumuz katodik ECD düzeneği.	25
Şekil 3.9. Alttaban temizliğinde kullanılan ultrasonik titreştirici.....	26
Şekil 3.10. Laboratuvarımızda bulunan hassas terazi.	27
Şekil 3.11. Laboratuvarımızda bulunan ısıtıcılı manyetik karıştırıcı cihazı.....	28
Şekil 3.12. Deneylerde hazırlanan ECD hücre.	28
Şekil 3.13. ECD kaplama sistemi.	28
Şekil 3.14. Numunelerin tavlandığı fırın.	29
Şekil 3.15. Kristallik karakterizasyonlarının yapıldığı XRD cihazı.....	30
Şekil 3.16. Optik karakterizasyonların yapıldığı UV-VIS-NIR spektrofotometre cihazı.	36
Şekil 3.17. Elektriksel karakterizasyonların yapıldığı Hall ölçüm cihazı.	37
Şekil 3.18. Yüzey ve kesit karakterizasyonlarının yapıldığı FESEM cihazı.....	38
Şekil 4.1. Çözelti sıcaklığının ZnO nanorod kristallik üzerine etkisi.....	39
Şekil 4.2. Kaplama süresinin ZnO nanorod kristallik üzerine etkisi.	40
Şekil 4.3. Molaritenin kristallik üzerine etkisi.	42
Şekil 4.4. ZnO nanorod kaplama kalınlığı zaman ilişkisi.	37
Şekil 4.5. 0.05M çözeltide 5, 10, 20 ve 30 dakika süreyle kaplanan ZnO nanorod yapıların FESEM görüntüleri.....	38
Şekil 4.6. 80 °C sıcaklıkta 0,1 ve 0,05M çözeltide 30 dakika boyunca kaplanan numunelerin kesit ve yüzey FESEM görüntüleri.....	39
Şekil 4.7. 5, 10, 20 ve 30 dakika boyunca 80 °C sıcaklıkta 0.1 ve 0.05M çözeltilerde kaplanan ZnO nanorod yapıların optik geçirgenlik eğrileri.	46
Şekil 4.8. 0.1M çözeltide 80 °C sıcaklıkta 5, 10, 20 ve 30 dakika süreyle kaplanan RT9, RT10, RT11 ve RT12 için foton enerjisinin bir fonksiyonu olan $ah\nu^2$ eğrileri.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

LCD	: LikitKristal Ekran
TFT	: İnce Film Transistör Ekran
ECD	:Elektrokimyasal Kaplama
ZnO	: Çinko Oksit
Zn(NO ₃) ₂	: Çinko Nitrat
KNO ₃	: Potasyum Nitrat
SnO ₂	:Kalay Oksit
SnO ₂ :F	:Florin Katkılı Kalay Oksit
CV	: Döngüsel Voltametri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
ZnCl ₂	: Çinko Klorür
KCl	: Potasyum Klorür
PL	: Fotolüminesans
UV	: Mor Ötesi
Ag	: Gümüş
Au	: Altın
HMT	: Hexamethylenetetramine
ZnSO ₄	: Çinko Sülfat
ITO	: İndiyum Kalay Oksit
K ₂ SO ₄	: Potasyum Sülfat
XRD	: X-Işın Difraktometresi
ZSL	: ZnO Tohum Katman
Si	: Silisyum
Zn	: Çinko
Pb	: Kurşun
Fe	: Demir
HCl	: Hidrojen Klorür
HNO ₃	: Nitrik Asit
Cu:	: Bakır

NH ₃	: Amonyak
CN	: Siyanür
H ₂	: Hidrojen Gazı
O ₂	: Oksijen Gazı
Cl	: Klor
S	: Kükürt
Hg	: Civa
SO ₄	: Sülfat
PO ₄	: Fosfat
hcp	: Hegzagonal SıkıPaket
GaN	: Galyum Nitrit
ZnS	: Çinko Sülfür
GaAs	: Galyum Arsenür
LED	: Işık Yayan Diyot
OLED	: Organik LED
CVD	: Kimyasal Buhar Depolama 1-D:
MOCVD	: Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
VLS	: Buhar-Sıvı-Katı
FESEM:	: Alan Etkili SEM
PVD	: Fiziksel Buharlaştırma Metodu
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MOVPE	: Metalorganik Buhar Faz Epitaksi
Mg	: Magnezyum
Cd	: Kadmiyum
TCO	: Saydam (Transparan) İletken Oksit
PET	: Polietilen Tereftalat
IR	: Kızıl Ötesi
AgCl	: Gümüş Klorür
HgCl	: Civa Klorür
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O:	: Altı Sulu Zn(NO ₃) ₂
UV/VIS/NIR	: Ultraviyole/Görünür/Kızıl Ötesi

hkl : Kristal Örgü Sabitleri
FWHM : Yarı Maksimum Pik Genişliği

1. GİRİŞ

Her malzemenin yüzeyi çeşitli çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Bir katı cisim yüzeyi korozyon etkisiyle, mekanik aşınmayla, ışık şiddeti ve elektromanyetik etki ile bozulabilmektedir. Mekanik yüzey yapıların mikro boyuta indirgenmesiyle, mekanik, optik ve optoelektronik bileşenlerin kalıcı hacim yüzey oranı arttırılabilmektedir. Örneğin sadece düz yüzeyli bir katı cisim yüzeyinin çubuk (rod) yapılar ile pürüzlü hale getirilmesiyle yüzey alanı 10^x kat arttırılabilmektedir. Böylece temas yüzeyi arttırılan yapı ile, örneğin katı pil uygulamalarında, daha az malzeme kullanılarak daha çok temas yüzeyi elde edilebilmektedir. Kısaca modern malzeme yüzey biliminin, malzemelerin spesifik yüzey morfolojilerinin değiştirilebilmesini sağlaması sebebiyle uygulamalardaki önemi oldukça fazladır ve bu konudaki çalışmalar giderek artmaktadır.

Bununla birlikte yüzeylerde arzu edilen mekanik, optik, elektronik ya da kimyasal özellikler, genellikle yüksek mekanik dayanıklılıkla, kolay üretim metotları ve düşük maliyetli malzeme kullanılarak elde edilebildiğinden dolayı, yüzey morfolojisi üzerine yapılan çalışmalar çok daha fazla önem kazanmaktadır. Yığın halindeki yapıların yüzey morfolojik özellikleri, yüksek teknolojiye bileşen yapıları kompozit yapılardan oldukça farklıdır. Mekanik bir parça için örnek verilecek olursa, hem yüksek derecede sertliğinin olması hem de yüzeysel kırılmalarda çatlakların/dökülmelerin oluşmaması istendiğinde, bu iki özelliğin kompozit bir yapıyla sağlanabilmesi şeklinde düşünülebilir. Yani tek başına yığın bir yapı halindeki malzeme bu iki özelliği birden sağlamıyor olabilir. Bu soruna çözüm kompozit malzemelerin kullanılmasıyla elde edilir. Yani istenen yüzey özelliği, yüzeye farklı bir malzeme kaplanması yolu ile elde edilir. Örnek olarak gaz türbinlerinin yüksek sıcaklığa ve korozyona dayanıklı türbin bıçaklarının, aynı zamanda mekanik olarak da dayanıklı olması istenmektedir. Bu sorun türbin kanatlarının mekanik olarak sağlam bir malzemeden yapılması yoluyla, yani ısıya ve korozyona dayanıklı bir malzeme ile kaplanmasıyla çözülmektedir.

Bu konuda verilebilecek diğer örnekler, lazer aynaları, anti yansıtıcı kaplamalar ve benzeri diğer optik yüzey morfolojileri şeklinde ince film kaplamalar

yoluyla gerçekleştirilen uygulamalardır. Optik endüstriyel uygulamalarda ince filmler, mekanik veya optik gibi istenen özellikleri garanti eden alttabanlar üzerine kaplanmaktadır. Ayrıca optoelektronik, elektronik ve manyetik yapılar, istenen fiziksel özelliklerde ince filmlerin kaplanması yoluyla elde edildiği için, bu tür uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Arayüzey ilişkilerinin gözlemlenmesi ve yorumlanması ilk olarak R. Boyle, R. Hooke ve I. Newton tarafından 1650'li yıllarda yağ ve su temas yüzeylerinin incelenmesi yoluyla yapılmıştır. İlk kaplama tekniği M. Faraday, W. Grove ve T. A. Edison tarafından, kaplamanın kalınlığının belirlenmesi ise Arago, Fizeau, Wernicke ve Wiener tarafından 1850'li yıllarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında elektrokimyasal yolla ticari olarak altın kaplaması gerçekleştirilmiştir. Optik, elektronik ve mekanik endüstriyel kaplamalar, 1940'lı yıllarda çoğunlukla askeri uygulamalarda kullanılmak üzere gerçekleştirilmiştir. 1965'li yıllarda ince film teknolojisi, endüstriyel yarıiletken ve optik malzeme üretimini tetiklemiştir. 1990'lı yıllarda süperiletkenlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamış, 1995'li yıllarda ise atomik ve atom altı boyutlarda (elektrokimyasal uygulamalar yoluyla kuantum-nokta ve nanometre kalınlığında bakır iletken teller gibi) üretimleri mümkün kılmıştır. 2000'li yıllarda ise ince film teknolojisi sayesinde yüksek oranda düzenli iki ve üç boyutlu nanokristal materyallerin üretimi mümkün olmuştur. 2004 ve sonrası yıllarda ise yapılan çalışmalar geniş yüzeylere endüstriyel kaplamaları mümkün kılmıştır.

Büyük ölçüde korozyona ve aşınmaya karşı koruma amaçlı kaplamalardan, kesme ve delme işlemleri için sertleştirilmiş malzeme üretimine kadar mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Yine endüstriyel ve uzay teknolojileri uygulamalarında yüksek sıcaklığa dayanıklı kaplamalardan, kimyasal dayanıklılığı yüksek kaplama uygulamalarına kadar halen yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Optik uygulamalarda anti yansıtıcı, yüksek derecede yansıtıcı, istenen özellikte optik geçirgen ve optik entegreüretimi için kullanılmaktadır. Günümüzde fotodedektörler, optik filtreler, LCD ve TFT gibi görüntüleme teknolojilerinde ince film kaplamalardan faydalanılmaktadır. Elektronik uygulamalarda pasif devre elemanlarının üretiminden (direnç, kondansatör vb.) aktif devre elemanlarına (transistörler, diyotlar) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle tümleşik

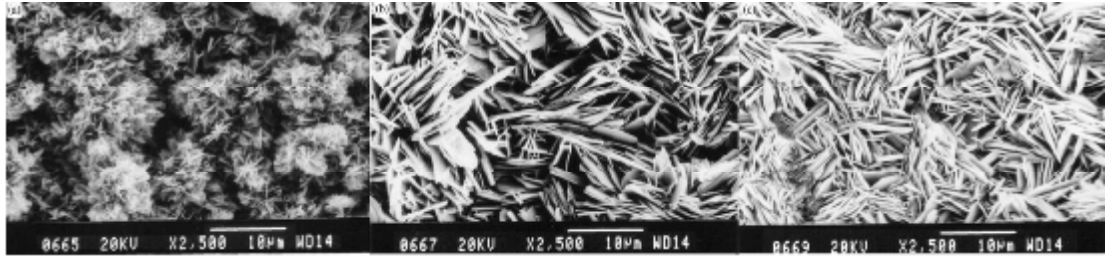
devreler olan entegre üretiminde avantajlarından dolayı ince film teknolojilerinden faydalanılmaktadır. İnce film teknolojileri sayesinde süper sert karbon, amorf silisyum, metalik camlar gibi yeni materyallerin üretimi de mümkün olmaktadır. Bu materyaller ve ince film teknolojisi sayesinde güneş pilleri ve hidrojen yakıt pilleri gibi yeni enerji kaynak teknolojilerinin geliştirilmesi mümkün olmuştur. Kısacası ince film teknolojilerinin gelişmesi yoluyla endüstriyel uygulamalardan sağlık alanında kullanılan teknolojilere kadar geniş bir alanda ilerlemeler mümkün olmuştur.

Çinko oksit ince filmler günümüzde birçok farklı yöntemlerle üretilmektedir. Bunlar arasında elektrokimyasal depolama, spin kaplama, magnetron püskürtmesi, atma lazerli biriktirme (PLD), moleküler ışın demeti ile büyütme (MBE), metalorganikkimyasal buhar biriktirme (MOCVD) ve atmalı filtreli katodik vakum ark depolamagibi birçok yöntem bulunmaktadır. Bu depolama yöntemlerinin kendi içlerinde hem avantajları hem de dezavantajları mevcuttur. Bizim çalışmamızda da çok ekonomik ve basit bir sistem ile ince film kaplama metodu çalışılmıştır. Bu sebeple kısmen de olsa ekonomik bir kaplama metodu olan elektrokimyasal kaplama (Electrochemical Deposition, ECD) metodu seçilmiştir. ECD sisteminin satın alma yerinebasit bir şekilde laboratuarda tasarlanması yoluyla ince film üretimi yapılmıştır. İnce film kaplama malzemesi olarak kullandığımız çinko oksit (Zinc Oxide, ZnO), birçok elektronik ve optoelektronik uygulamaya olanak sağlamıştır. Ancak henüz üretim teknolojilerinin kısmen de olsa pahalı olması, geniş yüzeylere uygulanabilen ZnO kaplamalar için bir sorundur. Bu amaçla, laboratuvar ortamında oluşturduğumuz basit elektrokimyasal düzenek ile literatürdepahalı teknolojilerle üretilen ZnO ince filmlerinkalitesinde kaplamalar çalışılmıştır. Bu konuda literatürde yoğun çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, önemli ölçüde ekonomiklik adına çok az sayıda çalışma bulunmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yoshida ve arkadaşları (2004), 0.1 M çinko nitrat (Zinc Nitrate, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$) ve potasyum nitrat (Potassium Nitrate, KNO_3) çözeltisi kullanarak üç elektrotlu ECD yöntemiyle, dönen bir disk elektrot kullanarak, kalay oksit (Tin Dioxide, SnO_2) kaplı cam yüzeye ZnO ince filmler büyütmüştür. Kaplama parametrelerinin ve sonuçların analizi ve literatür incelemeleri sonucunda, nitrat banyosunda kaplanan ZnO ince filmlerin ECD yöntemiyle kaplama prosesi, yüklerin nispeten yavaş transfer kinetikleri sebebiyle sınırlandırılmıştır (Yoshida ve ark, 2004).

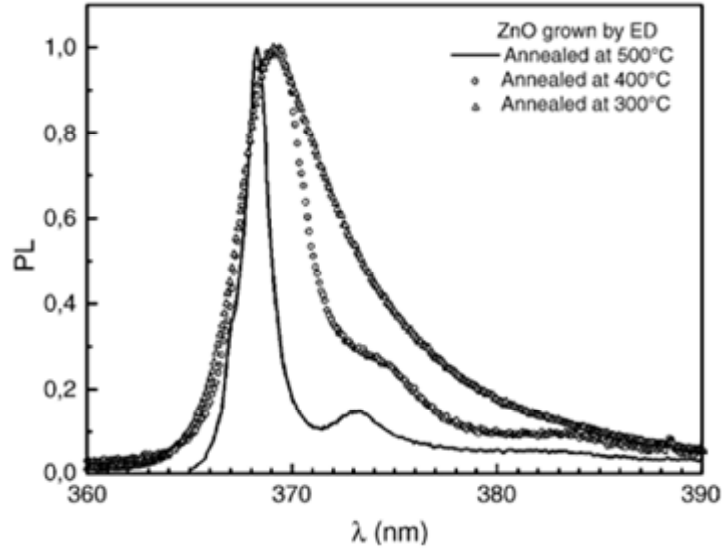
Mahalingam ve arkadaşları (2005), ECD yöntemiyle florin katkılı kalay oksit (Fluorine-doped Tin Oxide, $\text{SnO}_2:\text{F}$) üzerine, çözeltinin pH değerini kontrol ederek ZnO ince film kaplamışlardır. Kaplama, çözelti molaritesi 0.1 M ve çözelti sıcaklığı 80 °C iken, -0.8 V, -0.9 V ve -1.1V kaplama gerilimleri altında döngüsel voltametri (Cyclic Voltammetry, CV) metoduyla yapılmıştır. Şekil 2.1'deki taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy, SEM) görüntülerinden de görüldüğü gibi filmler tanecikli ve pürüzlü bir morfolojide elde edilmiştir. Elde edilen kristal yapılar (002) yönelimli ve 3.32 eV band aralık enerjilidir.



Şekil 2.1. (a) -0.8V, (b) -0.9V ve (c) -1.1V gerilim altında kaplanan ZnO ince filmlerin SEM görüntüsü (Mahalingama ve ark, 2005).

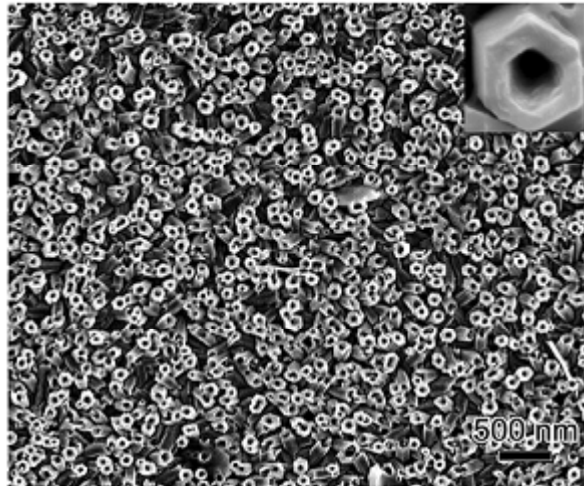
Mari ve arkadaşları (2006), SnO_2 üzerine $5 \times 10^{-3}\text{M}$ çinko klorür (Zinc Chloride, ZnCl_2) ve potasyum klorür (Potassium Chloride, KCl) çözeltisi kullanarak ECD metoduyla ZnO hegzagonal yapılar büyütmüşlerdir. Büyütülen filmlerin farklı tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak fotoluminesans (Photoluminescence, PL) özellikleri incelenerek rapor edilmiştir. Tavlama sıcaklığı 300 °C'den 500 °C'ye çıkarıldığında UV yayını daha da keskinleşerek mavi renk dalgaboyuna kayma

göstermiştir. Ayrıca 500 °C de 1 saat boyunca tavlanan ZnO yapılar yüksek kristallik özelliği göstermişlerdir(Mari ve ark, 2006).



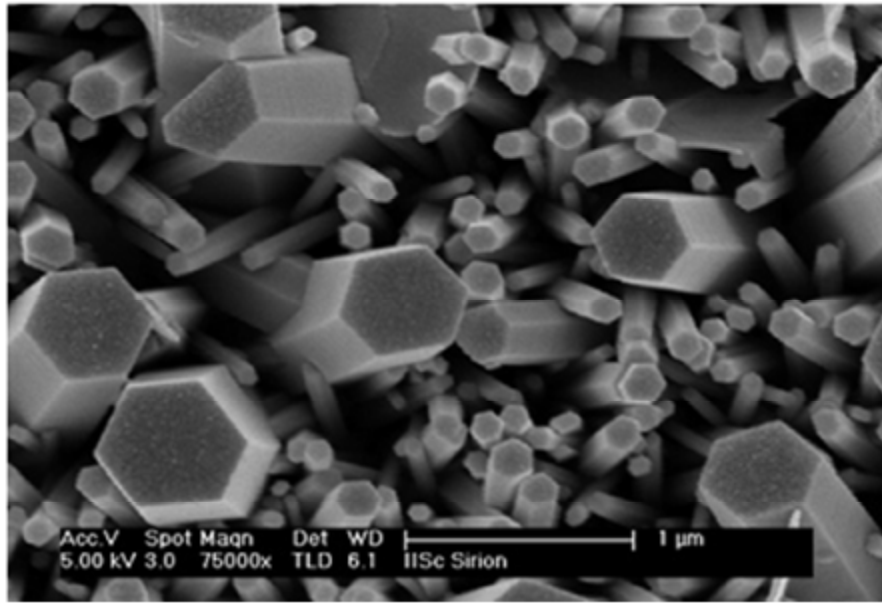
Şekil 2.2. ZnO ince filmlerin tavlama sıcaklığına bağlı fotoluminesans özellikleri.

Tang ve arkadaşları (2007), F katkılı SnO_2 üzerine ECD metoduyla ZnO nanotube yapılar büyütmüştür. Birçok polimer katkılı p-n eklem uygulamasına olanak veren ZnO nanotube yapılar, ilk defa bu çalışmada geniş yüzeylere uygulanabilmiştir. Çözelti 0.0001 M ZnCl_2 ve 0.1 M KCl ile hazırlanmıştır. Elde edilen nanotüp yapılar [0001] yönelimlidir(Tang ve ark, 2007).



Şekil 2.3. ZnO nanotüp yapıların SEM görüntüsü.

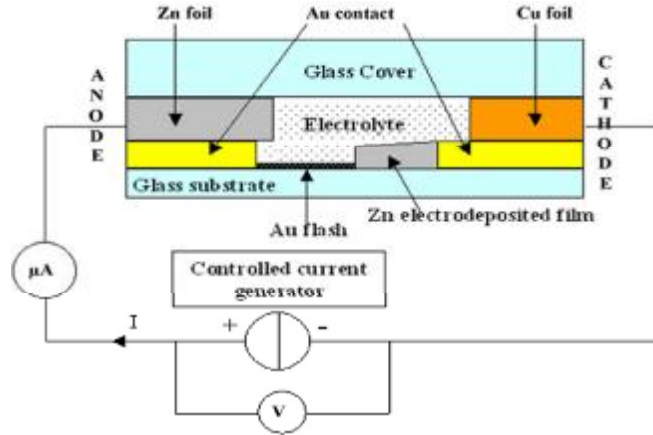
Chander ve Raychaudhurib (2008), gümüş (Silver, Ag) kaplı alttaban üzerine $Zn(NO_3)_2$ ve Hexamethylenetetramine (HMT) sulu çözeltisi kullanarak ECD metoduyla ZnO nanorod yapılar büyötmüşlerdir. Üretim süreci, önce ince bir Ag alttabanın cam altlık üzerine termal yolla kaplanması, sonra da ECD metodunun uygulanması şeklinde iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile ZnO nanorod yapılar daha geniş yüzeylere kolaylıkla kaplanabilir olmuştur. Elde edilen nanorod yapılar büyük oranda yüzeye dik, aynı yönelimli, iyi kristallikte ve yüksek mekanik dayanıklılığa sahiptir (Chanderave Raychaudhurib, 2008).



Şekil 2.4. Elde edilen hegzagonal yapılı ZnO nanorod yapıların SEM görüntüsü.

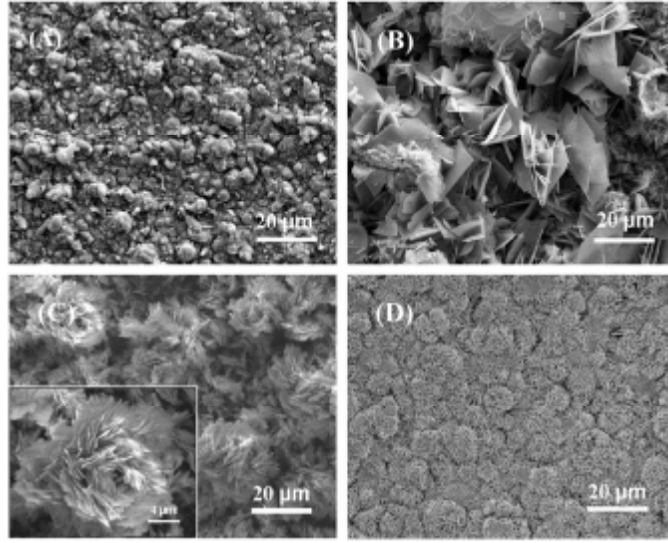
Mouet ve arkadaşları (2010), ECD tekniğini kullanarak yalıtkan cam altlık üzerine nano boyutlu ZnO ince film büyötmüşür. Elektrokimyasal hücre iki metal şerit tarafından birbirinden ayrılmış iki yalıtkan cam arasında elde edilmiştir (Şekil 2.5). Alt kısımdaki camın her iki tarafı da 100 nm altın (Golden, Au) ile kaplanmış, orta noktası ise diğer Au tabakalar arasında kısa devre yapmayacak şekilde çok ince (2nm) Au kümeler ile kaplanmıştır. İki cam arasında elde edilen 0.02 M ve pH derecesi 5 olan çinko sülfat (Zinc Sulfate, $ZnSO_4$) sulu çözeltikonsantrasyonunun ve kaplama akımının, kristallerin oluşumuna ve büyümeye etkisi incelenmiştir. 450

°C’de tavlanan polikristal yığınların boyutu 5-15 nm arasında değişmiştir(Mouetve ark, 2010).



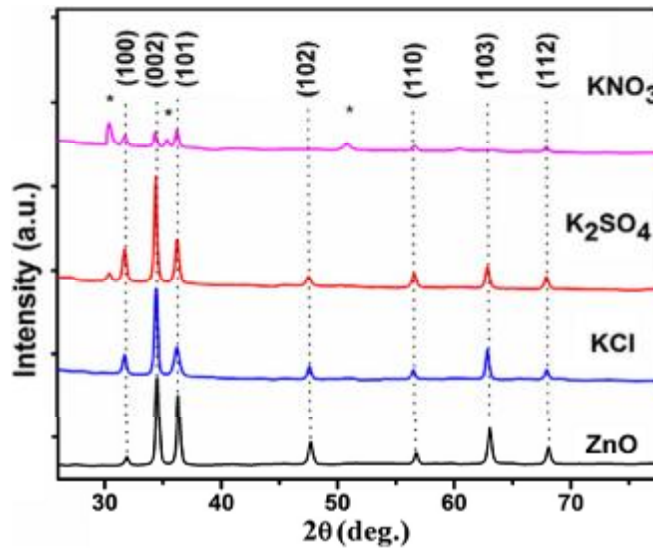
Şekil 2.5. ECD hücrenin kesit şemasının gösterimi.

Hou ve arkadaşları (2012), çeşitli molaritelerde $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ çözeltisi hazırlayarak ECD yöntemiyle, çiçek desenli ZnO nanosheet yapılar üretmiştir. Üretim iki elektrotlu ECD hücre kullanılarak ITO kaplı cam altlık üzerine gerçekleştirilmiştir. İlk üretilen ZnO yapılar nm ve μm seviyelerinde değişiklik gösteren büyüklükte tanecikler şeklinde pürüzlü yapılardır. Çözeltinin molaritesi artırıldığında yüzey morfolojisi oldukça değişmiştir. Molaritenin daha da artırılması sonucu çiçek desenli nanosheet yapılar elde edilmiştir (Şekil 2.6). Üretilen yapılar oldukça pürüzlü ve içerisinde yaklaşık 10 nm boyutunda ZnO nano partiküller bulundurmaktadır. Elde edilen ZnO yapılar n-tipi özellikli ve 3.16 eV band aralıklıdır (Hou ve ark, 2012).



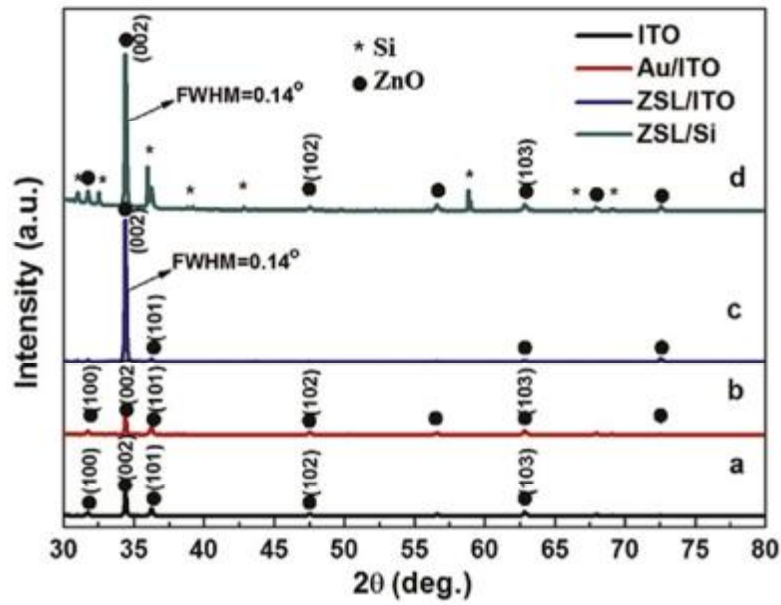
Şekil 2.6. (a) 0.1M, (b) 0.3M, (c) 1M ve (d) 3M çözelti konsantrasyonunda üretilen ZnO yapıların SEM görüntüsü.

Singh ve arkadaşları (2013), ECD yöntemiyle büyütülen ZnO nanorod yapıların, çözeltiye eklenen taşıyıcı materyalin etkisi ile değişimini incelemiştir. Kaplama, 1 mM sulu $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ çözeltisi hazırlanarak ITO üzerine ZnO büyütülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çözeltide 10 mM KCl, potasyum sülfat (Potassium Sulfate, K_2SO_4) ve KNO_3 eklentilerinin etkisini araştırarak değişik numuneler üretmişlerdir (Singh ve ark, 2013).



Şekil 2.7. Elde edilen ZnO nanorod yapıların taşıyıcı materyalin etkisine bağlı XRD grafiği.

Zhang ve arkadaşları (2014), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ çözeltisi hazırlayarak temiz ve tohum tabakası (seed layer) kaplı ITO ve silisyum (Silicon, Si) alttabanlar üzerine ZnO nanorod yapılar büyütürerek, alttabanın üretilen ZnO nanorod yapıların kristalliliği üzerine etkisini incelemişlerdir. ZSL (ZnO Seed Layer) ve Autohum tabakası kaplı ITO ve Si alttabanlardan ZSL/ITO alttabana büyütülen ZnO nanorod yapılar, tek kristal özellikli ve [0001] yönelimli oldukça iyi kristalliliğe sahip würtzite yapılardır. Elde edilen yapıların optik geçirgenliği %80 dolayında ve band aralık enerjisi 3.30 eV değerindedir (Zhang ve ark, 2014).



Şekil 2.8. ZSL ve altın tohum tabakası kaplı ITO ve Si üzerine büyütülmüş ZnO nanorod yapıların XRD grafiği.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Çinko

Çinko (Zinc, Zn), periyodik Çizelgenun IIb grubunda yer alan, erime noktası düşük, yaşam için gerekli ve çok geniş kullanım alanı olan bir geçiş metalidir. Mavimsi soluk gri renkli Zn, antik çağlardan beri bilinen ancak üretimi ve kullanılması tam anlaşılamadığından diğer metallerle karıştırılan bir elementtir. Metalin ilk tarifi, Strabos'un yazdığı Mysia adlı eserin Andriera adlı bölümünde "Sahte gümüş" olarak yapılmıştır. Bilinen en eski Zn parçası Dakya medeniyetine ait Transilvanya'daki Dortaş harebelerinde bulunan ve %87.52 Zn + %11.41 kurşun (Lead, Pb) + %1.07 demir (Iron, Fe) içeren bir cevherdir. M.Ö. 500 yıllarına ait Comeros harabelerinde Zn elementinden yapılmış iki bileziğe ve M.S. 79'da yıkılan Pompei harabelerinde ise Zn kaplı bir musluğa rastlanmıştır.

Avrupa'da ilk kez Basilluc Valentinius metalik Zn elementini tariflemeyen "Zinck" terimini kullanmıştır. Hintliler 1000-1300 yılları arasında Zn elementini ticari boyutta üretmişlerdir. A.B.D.'de ilk üretim 1835 yılında Arsenal Washington tarafından yapılmıştır. Amerikan hükümeti yapılan tesiste Belçikalı uzmanlarca eleman yetiştirilmesini, Zn metali ve alaşımlarının standartlaşmasını sağlamıştır. Zn tayininde takip edilen metot; büyük ölçüde Zn içeren malzemenin doğasına ve içerdiği Zn miktarına bağlıdır. Zn bileşenlericevherden hidrojen klorür (Hydrogen chloride, HCl) ve nitrik asit (Nitric Acid, HNO₃) gibi asitlerle ayrıştırılır ve asitte çözünmeyen artık nadiren Zn içerir (genbilim.com).



Şekil 3.1. 1 cm³ küp, kristal çinko filizi ve dallı filiz halinde çinko(en.wikipedia.org).

Çinkonun fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir (zinc.org).

Çizelge 3.1. Çinko metalinin fiziksel özellikleri.

Atomik kütle	65.409(4) g/mol
Elektron dizilimi	3d10 4s2
Kabuk başına elektron sayısı	2, 8, 18, 2
Doğada bulunma fazı	Katı
Yoğunluk	7.14 g.cm ⁻³
Erime sıcaklığı	692.68 K (419.53°C, 787.15°F)
Buharlaşma ısısı	123.6 kJ.mol ⁻¹
Isı sığası (25°C)	25.390 J.mol ⁻¹ .K ⁻¹

Çinkonun atomik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir(zinc.org).

Çizelge 3.2. Çinko metalinin atomik özellikleri.

Kristal yapı	Hegzagonal
Elektronegatiflik	1.65
İyonizasyon enerjisi	1.: 906.4 kJ.mol ⁻¹
Atomik yarıçap	135 pm
Manyetik dizilim	Diamanyetik
Elektriksel direnç (20°C)	59.0 nΩ.m
Termal iletkenlik (300 K)	116 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
CAS kayıt numarası	7440-66-6

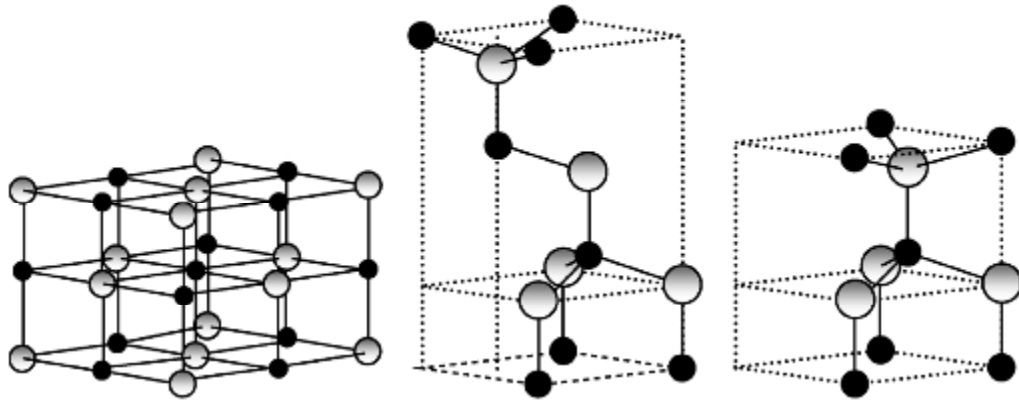
Zn metalinin bilinen en genel kullanım alanı, levhalar halinde yapıların çatı kaplamasıdır. Yaprak veya saç şeklindeki çinko, basım işlerinde ve kuru pillerin yapımında da kullanılmaktadır. Su, su buharı, organik maddeler, benzenli ve klorlu eriticiler gibi bazı ortamlardaki demir ve çelik üzerinde Zn etkin bir koruyucudur. Zn, insan vücudunda eser halinde bulunan ve yaşam açısından gerekli olan elementlerden biridir. Dünyada üretilen Zn temel olarak, demir ve çelik malzemelerinin koruyucu kaplamalarında, basınçlı dökümlerde, pirinç ve Zn levha yapımında kullanılmaktadır. Üretimin geri kalan bölümlerinde ise boya, ilaç gibi maddelerin hazırlanmasında yararlanılmaktadır. Zn kaplamalar yapı çeliği, sac, boru, kablo ve çivi gibi çeşitli çelik malzemeleri korozyona karşı korumaktadır. Ayrıca Zn alaşım dökümleri anahtar, kapı kolu, banyo malzemeleri, oyuncak ve inşaat malzemesi yapımında kullanılmaktadır. Çinko ve bakır (Copper, Cu) alaşımı olan pirinç ürünlerin sanayide ve günlük yaşamda çok geniş uygulama alanları vardır. Zn levhaların ve şeritlerin başlıca kullanım alanları ise pil sanayisi ile inşaat ve baskı uygulamalarıdır. Kuru pillerin çoğunda negatif elektrot yerine geçen pilin dış kabı Zn metalinden yapılmaktadır.

Zn, bileşiklerinde +2 değerlikli olarak bulunur ve oluşturduğu bileşiklerde genelde iyonik bağ yapmaktadır. Amonyak (Ammonia, NH_3), siyanür (Cyanide, CN) ve halojen iyonları ile kompleks bileşikler meydana getirmektedir. Mineral asitlerinde hidrojen gazı (Hydrogen, H_2) çıkışıyla çözünmektedir. Ancak HNO_3 ile işlem yapılan uygulamalarda NO_x çıkışı olmaktadır. Dolayısıyla Zn elementi özellikle toz halde çok etkili bir ingirdeyicidir. Normal sıcaklıkta havada bırakılan metalin yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluştuğundan, bu sıcaklıkta halojenlere bile dayanıklıdır. HCl gazı Zn metalini çok çabuk korozyona uğratır. Toz Zn elementinin reaksiyona girme kabiliyeti oldukça fazla ise de yanıcı değildir. Yüksek sıcaklıkta oksijen (Oxygen, O_2), klor (Chlorine, Cl) ve kükürt (Sulfur, S) gibi elementlerle şiddetle reaksiyona girer. Civa (Mercury, Hg) ile sert bir amalgam meydana getirir. Cl ve sülfat (Sulfate, SO_4) tuzları suda yüksek miktarda çözünmektedir. Buna karşılık ZnO, silikat, fosfat (Phosphate, PO_4) ve organik kompleksleri ya suda hiç çözünmezler ya da çok az çözünürler. Bileşikleri arasında ZnO bileşiğinin teknik ve

ekonomik değeri vardır. Organik bileşikler arasında Zn sabunu en önemli kullanıma sahiptir (tr.wikipedia).

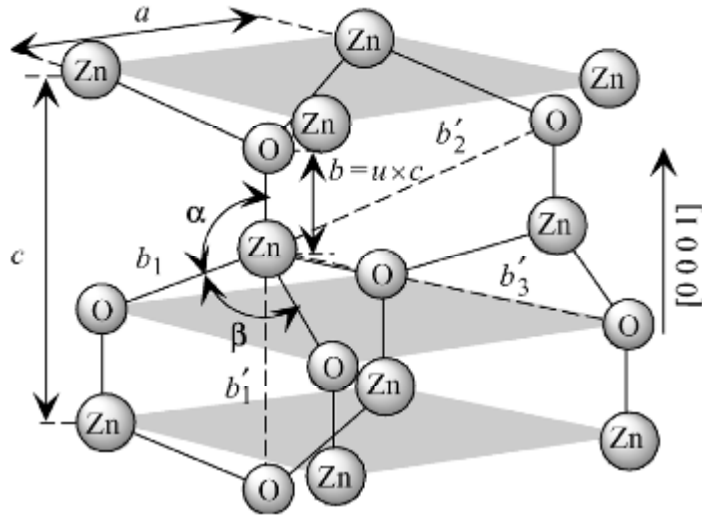
3.1.2. Çinko Oksit

ZnO, II-VI grubu yarıiletkenlerdendir. ZnO yarıiletkeninin kristal yapıları rocksalt, zinc blend, wurtzite fazı formundadır (Şekil 3.2) (Morkoç ve Özgür, 2009) (Strukturbericht).



Şekil 3.2. ZnO kristal yapısının küreler ile gösterimi (beyaz küreler Zn atomları) (a) kübik rocksalt, (b) kübik zinc blende ve (c) hegzagonal wurtzite yapı.

Bu üç fazdan doğal atmosferik şartlar altında termodinamik olarak kararlı olanı wurtzite simetrisidir. Wurtzite yapısı, $c/a = \sqrt{8/3} = 1.633$ oranlı a ve c örgü parametrelili hegzagonal birim hücre içerir. ZnO yarıiletken kristalinin şematik gösterimi ve örgü sabitleri Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Yapı, iç içe geçmiş iki hegzagonal close packed (hcp) alt hücreden oluşmaktadır.



Şekil 3.3. Wurtzite ZnO kristal yapının şematik gösterimi ve örgü sabitleri.

Her bir alt hücre, hücre başına dört atom içermekte olup, her bir grubun atomları (örneğin grup II) diğer grubun atomları (grup VI) tarafından çevrelenmiş veya bunun tam tersidir. Deneylerde gözlemlendiği üzere c/a oranı, galyum nitrit (Gallium Nitride, GaN) kristal yapıda olduğu gibi idealden küçük olmaktadır (Kisi ve Elcombe, 1989; Kogure ve Bando, 1993; Leszczynski ve ark, 1996; Leszczynski, 1999).

ZnO yapı yarı kararlı bir yapıdır ve çinko sülfür (Zinc sulfide, ZnS) ve galyum arsenid (Gallium Arsenide, GaAs) bileşiği GaAs/ZnS gibi sadece kübik alttabanlar üzerine heteroepitaxial büyütme metoduyla büyütüldüklerinde kararlı olmaktadır (Kogure ve Bando, 1993; Ashrafi ve ark, 2000). ZnO bileşiğinin örgü parametrelerinin belirlenmesi onlarca yıl sürmüştür (Braekken ve Jore, 1935; Bunn, 1935; Heller ve ark, 1950). Çizelge 3.3, wurtzite şeklinde kristalleşmiş ZnO bileşiğinin birçok grup tarafından ölçülmüş ve hesaplanmış örgü parametrelerini ve c/a oranını vermektedir.

Çizelge 3.3. ZnO bileşiğinin ölçülmüş ve hesaplanmış örgü parametreleri ve c/a oranı.

a (Å)	c (Å)	c/a	u	Reference
		1.633	0.375	İdeal
3.2496	5.2042	1.6018	0.3819	A
3.2501	5.2071	1.6021	0.3817	B
3.286	5.241	1.595	0.383	C
3.2498	5.2066	1.6021		D
3.2475	5.2075	1.6035		E
3.2497	5.206	1.602		F
		1.593	0.3856	G
		1.600	0.383	H

ZnO bileşiğinin band yapısının teorik hesaplanması işlemi, 1969 yılında ilk defa Rössler tarafından Green fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Rössler, 1969). Daha sonra gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, Rössler'in öngördüğü yığın elektronik yapının doğru olduğunu göstermiş (Langerve Vesely, 1970; Powell ve ark, 1971; Powell ve ark, 1972; Ley ve ark, 1974). ZnO, oda sıcaklığında 3.37 eV veya 375 nm geniş doğrudan band aralığına sahiptir. Dolayısıyla, genellikle lazer diyotlar ve LED (Light Emitting Diode) gibi uygulama alanları bulunmaktadır. Aynı band aralık özelliklerine sahip GaN yarıiletken (oda sıcaklığında ~3.4 eV) ile benzer optoelektronik uygulamalar için kullanılabilir. GaN yarıiletkenine kıyasla ZnO, daha yüksek bağ enerjisine sahip (~60 meV, oda sıcaklığı termal enerjinin 2.4 katı) ve bu sebeple GaN yarıiletken oda sıcaklığında daha parlak yayılım yapar (Bakin, 2007; Bakin, 2010). Tıpkı diğer yarıiletkenlerde olduğu gibi ZnO yarıiletken için de kristal yapı içerisindeki noktasal kusurlar hem elektriksel hem de termal iletkenliği etkilemektedir (Bhandari ve Rowe, 1988).

Nano yapıları yarıiletkenlerin maliyetinin çok önemli bir kısmı üretim maliyetlerinden gelmektedir. Üretilen ZnO yarıiletkenler bulk yapı, katkılı, ince film, toz ya da nanoyapılı olabilmektedir. Nanoyapılı ZnO yarıiletkenler boya ile hassaslaştırılmış güneş pilleri (Xu ve ark, 2001; Lim ve ark, 2006), sensör (Shan ve Yu 2003; Hsieh ve Wu, 2007), yarıiletken lazer (Yin ve ark, 2010), LED ve OLED (Organic Light Emitting Diode) uygulamalarında kullanılmaktadır (Fağ ve ark, 2005;

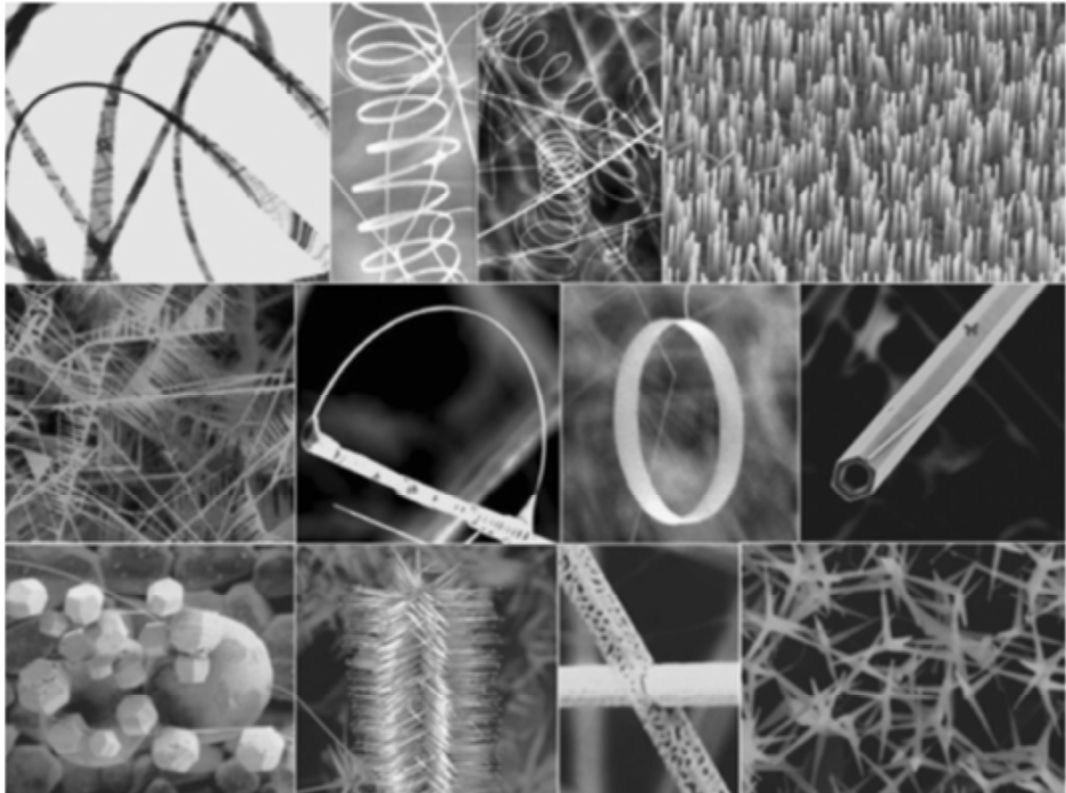
Zhang ve ark, 2009; Anta ve ark, 2012). Bu uygulamalarda kullanılan ZnO yarıiletken morfolojileri hem cihaz performansı hem de üretim kolaylığı sebebiyle birçok farklı şekilde olabilmektedir.

En genel ZnO morfolojisi, büyütme yüzeyine dik bir şekilde büyüyen nanorod şeklinde yapılardır (Afaah ve ark, 2013; Ahmad ve ark, 2013). İnce ipleşikler şeklinde büyütülen ZnOnanowire (nanotel) yapılar ise genellikle yığın yapılarda elektron ilgisi yüksek iletken hatlar olarak kullanılmaktadır (Govender ve ark, 2002; Hassan ve ark, 2013). Yine yığın yapılarda nanowire gibi kullanılan ancak elektriksel iletkenliği çok daha yüksek nanobelt (nanokayış) yapılar kullanılmaktadır (An ve Yi, 2007; Kang ve ark, 2007). Yüzey alanı artırılmış ZnOnanosheet (nanolevha) yapılar ile eklem yüzeyi artırılmış sensor uygulamaları gerçekleştirilmektedir (Yu ve ark, 2004). Bu farklı morfolojilerde üretilen ZnO nanoyapılar birçok teknikle üretilmektedir. Bu teknikler özel üretim donanımı gerektiren, yüksek enerjili ya da doğal prosesler şeklinde olabilmektedir. Güncel çalışmalarda hidrotermal sentez yöntemi ile ZnO nanoyapılar üretilmekle birlikte (Guo ve ark, 2005; Ahmad ve ark, 2013), termal buharlaştırma gibi yüksek enerji gerektiren metodlar da kullanılmaktadır (Li ve ark, 2004; An ve Yi, 2007). Yine bizim çalışmamızda kullandığımız ECD metodu ile de çeşitli ZnO nanoyapılar üretilmektedir (Yan ve ark, 2003; Greene ve ark, 2005). ECD gibi bir diğer ıslak üretim tekniği ise kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition, CVD) tekniğidir (Yan ve ark, 2003; Park ve ark, 2004).

Nanorod, nanowire, nanobelt ve nanotube gibi bir boyutlu (1-D) yarıiletken nano yapılar, son yıllarda dikkat çeken benzersiz özellikleri ve uygulanabilirlikleri ile gelecekteki elektronik ve fotonik aygıt uygulamaları için oldukça önemlidir (Appell, 2002; Samuelson, 2003). Geçtiğimiz birkaç yılda yoğun çalışmalar sonucunda çeşitli 1-D yarıiletken nano yapılar geliştirilmiştir (Yang ve Lieber 1996; Morales and Lieber 1998; Peng ve ark, 1998). 1-D yarıiletken nanoyapılar ayrıca, lazer ablasyon-katalitik büyütmesi (Yu ve ark, 1998; Duan ve Lieber 2000), oksit destekli büyütme (Zhang ve ark, 2003), şablon-kaynaklı büyütme, (Han ve ark, 1997; Wang ve ark, 2001), organik çözücü maddeler içinde büyütme (Jiang ve ark, 2000; Wang ve ark, 2003) ve metal-organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) (Yazawa ve ark, 1992)

metotlarıyla elde edilmiştir. ZnO, 3.37 eV direkt bir bant aralığı enerjisi ve 60 meV gibi büyük bir eksiton bağlanma enerjisine sahip, şeffaf ve piezoelektrik özellikleri olan bir yarıiletkenidir. Ayrıca, ZnO zehirli olmayan ve biyolojik olarak uyumlu olduğundan biyomedikal uygulamalar için kullanılabilir. 1-D ZnO nano yapı araştırmaları, boyutlarına bağlı optik ve elektriksel özellikleri ve morfolojileri ile ilişkilendirilerek yoğunlaşmıştır (Lee ve ark, 2002; Park ve ark, 2003; Keem ve ark, 2004).

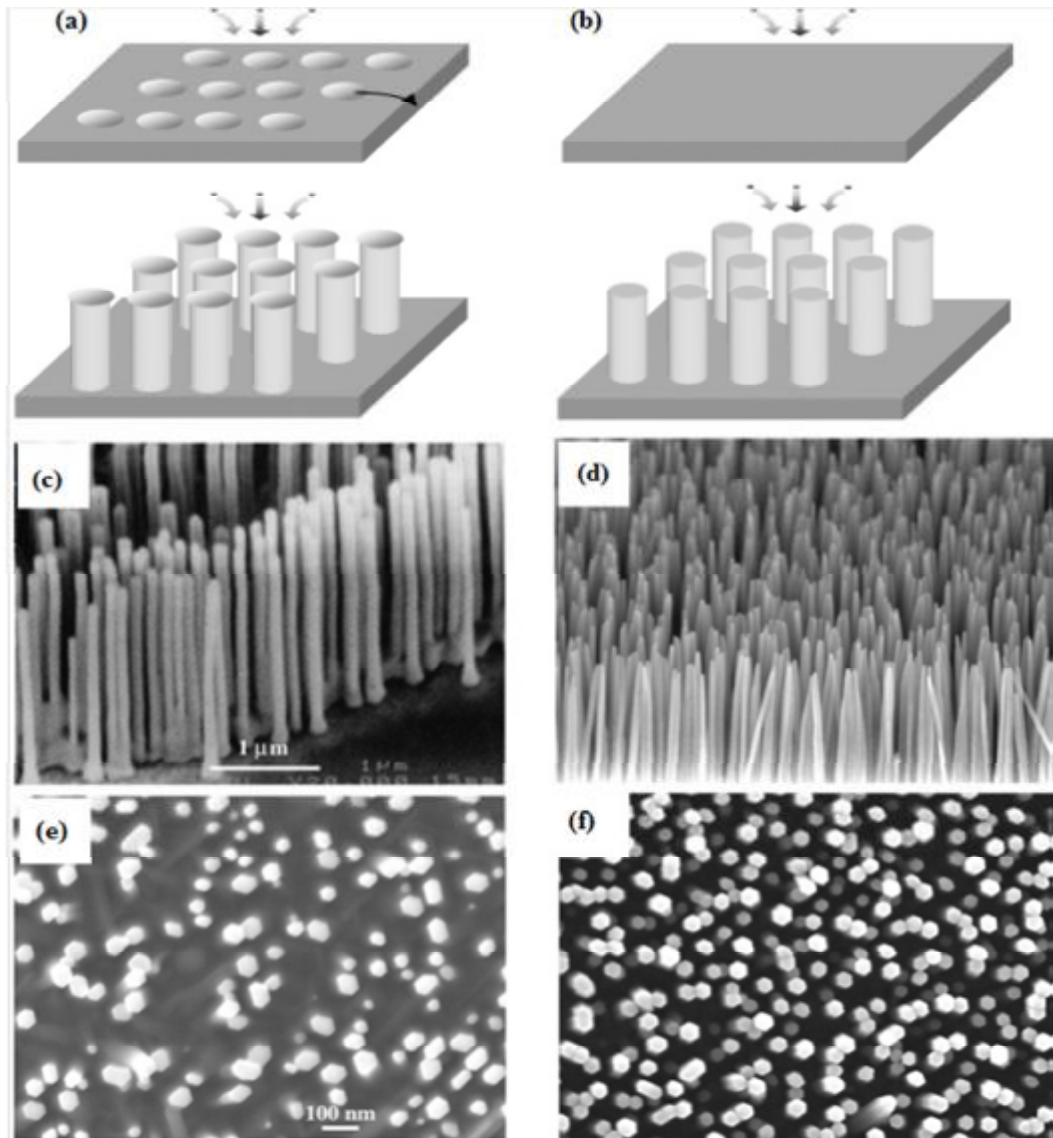
Şekil 3.4'te de görüldüğü üzere, nanodot, nanorod, nanowire, nanobelt, nanotube, nanobridge, nanonail, nanowall, nanohelix, dikişsiznanoring, mezogözenekli tek kristaller ve çok yüzlük kafesler gibi çeşitli ZnO nanoyapılar gerçekleştirilmiştir (Wang, 2004). 1-D nanoyapılar arasında ZnO nanorod ve nanowire yapılar, geniş cihaz uygulamaları ve kolay üretilmelerinden dolayı çok çalışılmıştır (Yi ve ark, 2005).



Şekil 3.4. Termal buharlaştırma metodu ile sentezlenmiş ZnO nanorod yapılar (Wang, 2004).

Buhar fazından nanorod ve nanowire gibi 1-D ZnO nanoyapıların sentezleri, muhtemelen en çok kullanılan metottur (Wagner, 1970). Yaygın olarak kullanılan yarıiletken ince film proseslerinden biri de MOCVD metodudur. Genellikle bu yöntem ZnO nanorod yapı büyütmek için kullanılır.

Yine ZnO nanorod ve nanopindizleri büyütmek için katalizörsüz MOCVD kullanılmıştır (Şekil 3.5(b)) (Park ve ark, 2002; Park ve ark, 2002).



Şekil 3.5. ZnO nanoçubukların (a) VLS prosesi ile (b) katalizörsüz MOCVD metodu ile büyütülmesinin şematik gösterimi. VLS yöntemiyle büyütülmüş örneklerin FESEM görüntüleri (c) ve (e) ve MOCVD yöntemiyle büyütülmüş örneklerin FESEM görüntüleri (d) ve (f). (referans 28 - Telif hakkı [2001] Science 292-1897 AAAS (Park ve ark, 2004)).

Üniform bir kalınlığa sahip dikey olarak hizalanmış nanorod dizileri ve uzunlukdağılımları oldukça ilgi çekmiştir. Çünkü onlar dikey nano dizelerin imalatları için son derece uygundurlar. Hizalanmış nanorod yapıların büyütülmesi, Au gibi metal katalizör kullanılarak buhar-sıvı-katı (Vapor-Liquid-Solid, VLS) büyütme prosesi ile bir katı tabaka üzerinde başarıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5(c) ve (e)) (Huang ve ark, 2001; Huang ve ark, 2001; Gao ve ark, 2003; Greene ve ark, 2003; Ng ve ark, 2003; Park ve ark, 2003; Zhang ve ark, 2003; Sun ve ark, 2004; Wang ve ark, 2004). Ark deşarjı, lazer buharlaşma, piroliz, ECD, fiziksel buharlaştırma metodu (Physical Vapour Deposition, PVD) ve CVD teknikleri ile de ZnO nanoyapılar üretilmektedir (Han ve ark, 1997; Konenkamp ve ark, 2000; Li ve ark, 2000; Kong ve ark, 2001).

1-D nanorod heteroyapılar, elektronik ve optoelektronik nanoölçekli uygulamalar için ideal fonksiyonel bileşenlerdir. Nanoölçekli heteroyapıların üretim yetenekleri birçok yeni cihaz uygulamalarını beraberinde getirmektedir. Örnek olarak mikrometre ölçekli elektronik ve fotonik aygıtlar verilebilir (Björk ve ark, 2002; Gudiksen ve ark, 2002; Lauhon ve ark, 2002) Ultra ince heteroyapılardan oluşan nanorod kuantum yapılar, duvar kalınlığının sürekli ayarlanması yoluyla ayarlanabilen spektral dalga boyları gibi öncül fiziksel özelliklerin elde edilmesi için oldukça uygun olabilmektedir. Süperörgü ince film veya kuantum üretimi için moleküler demet epitaksi (Moleküler Beam Epitaksi, MBE) ve metalorganik buhar faz epitaksi (Metalorganic Vapour Phase Epitaxy, MOVPE) gibi teknikler olmasına rağmen, nanorod heteroyapılarla ilgili atomik arayüzleri içeren yayınlanmış sadece birkaç yayıncıdır (Park ve ark, 2003; Yatsui ve ark, 2004).

ZnO band aralığı, heteroyapıları üretmek için katyon bölgesinde yer değiştirme yoluyla oluşturulabilir. ZnO bazlı alaşımların temel band aralık enerjisi, 3.37 eV değerinden ~ 4.0 eV değerine arttırılabilir ve sırasıyla magnezyum (Magnesium, Mg) ve kadmiyum (Cadmium, Cd) katkılanmasıyla ~3.0 eV değerine düşürülebilir (Park ve ark, 2001; Park ve ark, 2002; Park ve ark, 2003). Ayrıca ZnO yarıiletkenin, 3.37 eV band aralık enerjisi ve 60 meV gibi çok geniş bir bağlanma enerjisinin olması, ultraviyole/mavi emisyon cihazlar, piezoelektrik cihazlar, akustik-

optik cihazlar ve kimyasal sensörler gibi uygulamalara olanak sağlamaktadır (Huang ve ark, 2001).

3.1.3. Indium Kalay Oksit

İndiyum kalay oksit (Indium Tin Oxide, ITO), Sn katkılanmış indiyum oksit, saydam ve iletken oksit (transparent conducting oxide, TCO) materyal olarak güneş pili uygulamalarında oldukça yaygın olarak kullanılan bir kaplamadır. Dolayısıyla güneş pili için kullanılabilecek ve PET (Polyethylene Terephthalate) gibi ışık geçiren alt tabaka üzerine kaplanarak aynı zamanda elektriksel olarak oldukça iletken bir yüzey elde edilmektedir. Yüzey direnci $100 \Omega/\square$ ile $10 \Omega/\square$ arasında değişen değerlerde olan ticari ITO kaplı cam ve PET altlıklar, günümüzde yoğun olarak çalışılan OLED ve güneş pili uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak ITO yüzeyinin atmosfer ile çok çabuk tepkimeye girmesi ki bu da filmin yüzeye yakın bölgesinin kimyasal olarak kararsız olmasından kaynaklanmakta, böylece elektriksel iletkenliği ve üzerine kaplanan materyal ile oluşturacağı bağları etkilemektedir. Yakın geçmişte, ITO üzerine yapılan organik kaplamalar yoluyla bu olumsuz etkilerin bir nebze de olsa azaltıldığı çalışmalar yapılmıştır (Armstrong ve ark, 2003). ITO katmanının ışık geçirgenliği yoğun olarak görünür bölgededir ancak yüzey direncinin küçülmesiyle bu geçirgenlik %80 civarına düşmektedir. Kısaca iletkenliği sağlayan taşıyıcı yüklerin (serbest elektronlar ve oksijen boşlukları) yoğunluğunun fazla olması, ışığın soğurulmasına sebep olmaktadır. Bu ters orantılı iyileştirmeler için, idealde geçirgenliğin %80-90 arasında tutulmasıyla yüzey direnci $10-100 \Omega/\square$ arasında değişmektedir. Kaplama parametrelerine bağlı olarak (e-beam deposition) uzun dalga boylarında metaller gibi davranmaktadır ve $1 \mu\text{m}$ 'den büyük dalga boylarında yansıtıcı özellik göstermektedir. IR geçirgenliği ise yüzey direncine yani serbest elektron yoğunluğu ve oksijen boşluklarına bağlı olmaktadır. Genellikle $30 \Omega/\square$ 'den küçük yüzey direncinde %80 değerinden büyük IR geçirgenliği gözlenmiştir. ITO'nun kırılma indisi kaplama parametrelerine bağlı olmamakla birlikte az da olsa etkilenmekte ve görünür bölgede 1.95 değerindedir (Cerac, 2010).

Çizelge 3.4. Katı ITO fiziksel parametreleri

Moleküler ağırlığı	Bileşenlerin oranına bağlı
Erime noktası	~1900 °C
Rengi	Oksidasyona bağlı olarak açık yeşil, griye çalan
Kristal Yoğunluğu	~7.14 g/cc

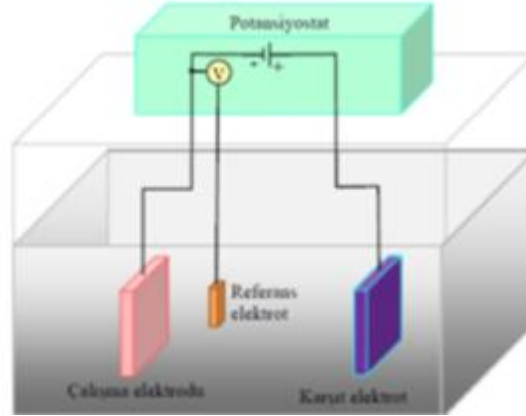
3.2. Metod

3.2.1. Elektrokimyasal Kaplama Yöntemi

Bir çözelti içerisindeki materyalin bir iletken alttaban üzerine, elektrik akımının yardımıyla kaplanması işlemidir. ECD metodunda kullanılmak üzere çözeltinin hazırlandığı hücre, referans elektrot, karşıt elektrot ve çalışma elektrotu bulunur. Referans elektrot; daldırıldığı çözeltiden etkilenmez yani sabit bir potansiyele sahiptir. Potansiyelleri, üzerinde çalışılan çözeltiye bağımlı değildir, yalnız sıcaklıkla bir miktar değişebilir. Böyle elektrotlar yardımıyla, elektrot haline getirilebilen çözeltilerde bulunan iyonların aktiviteleri veya konsantrasyonları tayin edilebilir. Referans elektrotlar, içerisindeki kimyasal çözeltiye karışmamalı, uzun ömürlü, kararlı ve dış yüzeyi dayanıklı olmalıdır. Karşılaştırma amacıyla kullanılan referans elektrot genellikle gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) veya civa/civa klorür (Hg/HgCl)'den yapılmaktadır. Çalışma elektrotu; yüzeyinde çözeltideki maddelerin indirgendiği veya yükseltgendiği elektrottur. Karşıt elektrot (yardımcı elektrot); çalışma elektrotu kadar büyük öneme sahiptir. Dış devreden gelen elektronların tekrar indirgendiği elektrolit sıvısına iletilmesini sağlayan, diğer bir deyişle hücre içerisinde akımın iletilmesini sağlayan karşıt elektrottur. Çoğunlukla iletkenlik değeri yüksek olan Au ya da Pt metallere yapılmakta ve bu elektrot çalışma elektrotu ile bir çift oluşturmaktadır (Özdemir, 2010).

Aşağıdaki şekilde standart bir ECD düzeneği sembolik olarak verilmiştir. Burada ECD işlemini yapan yani bir tür kaynak metre (sourcemeeter) gibi çalışan cihaza potansiyostat denir. Potansiyostat; referans elektrot ve çalışma elektrotu arasındaki potansiyel farkı kontrol eder. Gerilim ya da akım sensörü olan referans

elektrot yardımıyla, kullanıcının istediği sabit akım ya da gerilim sağlanarak kaplama işlemi gerçekleştirilir (Allen ve Larry, 2000; Sönmezoğlu ve ark, 2012).



Şekil 3.6. Standart ECD kaplama düzeneği ve hücre.

Kaplama sırasında çözeltiye uygulanan potansiyelin etkisiyle, çözelti içerisindeki kaplanacak materyaller iyonize edilerek ve hedef iletken yüzeye yönlendirilmektedir. Bu iyon akımı yoğunluğu, çözeltiye uygulanan potansiyel, çözelti sıcaklığı ve alttaban yüzey büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Kapanacak materyalin yüzey büyüklüğü ve morfolojisi kontrolü açısından bu yöntem oldukça avantajlıdır. Çözeltideki iyon akımının miktarını kontrol etmek için, çözeltiye uygulanan gerilim ya da iyon akım yoğunluğu kontrol edilebilir. Bu metotla yapılan kaplamalarda elde edilen ince filmin özelliklerini kontrol etmek için belirli parametreler bulunmaktadır. Çözeltinin molaritesi, çözeltinin sıcaklığı, çözeltideki iyon akımının büyüklüğü, kaplama yüzey alanının büyüklüğü, kaplama süresi ve çözeltinin pH dengesi gibi kontrol edilebilen parametreler yoluyla istenilen özellikte kaplamalar elde edilebilmektedir.

ZnO nanorod üretimini gerçekleştireceğimiz sıcaklığa ve molariteye uygun kaplama akım yoğunluklarının belirlenmesi işlemi için, Gamry Interface 1000 potansiyostat cihazı kullanılarak CV ölçümleri yapılmıştır. CV işlemi klasik üç elektrotlu ECD hücre ile gerçekleştirilmiştir.



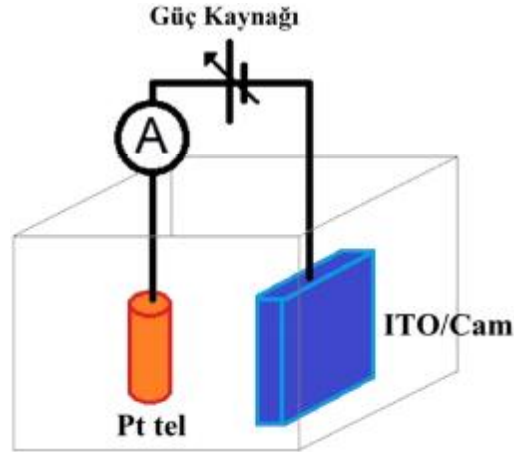
Şekil 3.7. CV ölçümleri için kullanılan potansiyostat cihazı.

ECD kaplamada ve CV işleminde karşıt elektrot olarak kullandığımız çok yüksek saflıkta 1 mm kalınlığındaki Pt tel piyasadan satın alınmıştır. Karşıt elektrot olarak Pt tel kullanmamızdaki amaç, Pt metalinin çözelti ile tepkimeye girmeyen yani çözeltide çözünmeyen yapıda olmasıdır. Böylece Pt tel çözelti içerisinde sadece potansiyel yaratmakta kullanılmıştır.

ECD kaplamada çalışma elektrotu olarak kullandığımız ITO kaplı cam altlık piyasadan satın alınmıştır (Teknoma, $R_s < 10 \text{ ohm}/\square$). Kaplamanın üzerine yapılacağı yani çalışma elektrotu olarak ITO kaplı cam seçmemizin sebebi, ITO/Cam alttabanın hem optik hem de elektriksel iletkenliğinin iyi olmasıdır. Bu özellikleri sebebiyle ITO, inorganik ve organik optoelektronik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem elektro-optik ve mekanik kararlılığı yüksek hem de kolaylıkla geniş yüzeylere uygulanabilmektedir. Ayrıca ITO hem inorganik hem de organik alttabanlar üzerine kaplanabilmekte, özellikle 900 °C gibi yüksek sıcaklıklara bile dayanabilmesi sebebiyle termal uygulamalarda da kolaylıkla kullanılabilir (Dekkers, 2007).

CV işleminden sonra elde edilen akım yoğunluklarını kullanarak ITO üzerine ZnO nanorod büyütme işlemi, laboratuarda hazırladığımız düşük maliyetli ECD sistemi ile gerçekleştirilmiştir. ZnO nanorod büyütme için laboratuvarımızda gerçekleştirdiğimiz iki elektrotlu katodik kaplama düzeneği kullanılmıştır. Kaplama düzeneği, laboratuvar tipi basit bir ayarlanabilir DC güç kaynağı ve mili ampermetre ile oluşturulmuştur. ITO/Cam alttaban güç kaynağının negatif ucuna, platin tel ise bir mili ampermetre üzerinden güç kaynağının pozitif ucuna bağlanmıştır. Elektrotlar

daha önceden hazırlanmış ECD hücreye daldırılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Laboratuarda oluşturduğumuz katodik ECD düzeneği.

3.2.2. Alttaban Temizliği

ZnO nanorod yapıların üzerine büyütüldüğü ITO/Cam alttabanlar 25x75 mm mikroskop camı boyutunda olup, kullanılmadan önce 10x25 mm boyutlarında kesilerek temizlik aşamasına geçilmiştir. Temizlik sırasında eldiven kullanılarak alttaban üzerinde yağkalıntılarının kalması engellenmiş ve asla bez vb malzemeler kullanılmamıştır. ITO/Cam alttabanın ilk temizliğinde kimyasal atık bırakmayan yani suda tam anlamıyla çözülebilen bir temizleyici kullanılmıştır. Asitli ve sert partiküller içeren aşındırıcı temizleyiciler kesinlikle kullanılmamıştır. ITO/Cam alttabanlar istenen ölçülerde kesildikten sonra Cif marka sprey ile iyice yıkanmıştır. Alttaban temizliğinde;

- ü Temizlik sırasında (pudralı vb olmayan) temiz bir eldiven kullanılmıştır,
- ü ITO/Cam malzeme, kalıntı bırakmayan Cif ile yıkanıp su ile durulanmıştır,
- ü Saf su ile sulandırılmış temizleyici içerisinde en az 10 dakika boyunca ultrasonik titreştiricide titreştirilmiştir,
- ü Saf su ile durulanıp yine saf su içerisinde en az 10 dakika boyunca titreştirilmiştir,

- ü Acetone içerisinde en az 10 dakika boyunca titreştirilmiştir,
- ü 2-propanol içerisinde en az 10 dakika boyunca titreştirilmiştir,
- ü Saf su ile durulanıp yine saf su içerisinde en az 10 dakika boyunca titreştirilmiştir,
- ü Basınçlı N₂ gazı ile yüzeydeki su ve muhtemel kalıntılar kovulmuştur,
- ü Temizliği yapılan ITO/Cam alttaban, ITO yüzeyi yukarıda kalacak şekilde kapağı kapalı temiz bir cam saklama kabında muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.9. Alttaban temizliğinde kullanılan ultrasonik titreştirici.

3.2.3. Çözelti Hazırlama

Çalışmada üretilen ZnO nanorod yapılar için kullanılan ECD çözeltisi, ultra saflaştırılmış su içerisinde çözülmüş Zn(NO₃)₂·6H₂O (Scharlau CAS: 10196-18-6) ve KNO₃ (Sigma Aldrich CAS: 7757-79-1) ile hazırlanmıştır. Hücre, 80 ml hacimli beher kullanılarak elde edilmiştir. Çözeltinin hazırlanması aşağıda belirtildiği gibi gerçekleştirilmiştir:

Zn(NO₃)₂·6H₂O kimyasalı ile hazırlayacağımız 500 ml ve 0.1M çözelti için gereken kütle;

M: 0.1M MA: 297.49 g/mol V:500 ml

$$M = n / V \Rightarrow n = M \times V = 0.1 \times 0.5 = 0.05 \text{ mol}$$

$$n = m / MA \Rightarrow m = n \times MA = 0.05 \times 297.49 = 14.8745 \text{ g}$$

Çözeltiye ekleyeceğimiz KNO₃ kimyasalının kütlesi ise;

M: 0.05M MA: 101.1 g/mol V:500 ml

$$M = n / V \Rightarrow n = M \times V = 0.05 \times 0.5 = 0.025 \text{ mol}$$

$$n = m / MA \Rightarrow m = n \times MA = 0.025 \times 101.1 = 2.5275 \text{ g}$$

500 ml ölçekli kaba önce 14.8745 g Zn(NO₃)₂·6H₂O ve 2.5275 g KNO₃ kimyasalları koyularak, 500 ml hacim ölçeğine kadar üzerlerine ultra saf su eklenir. Bu işlem bu defa 0.05 M çözelti elde etmek için tekrarlanır. Elde edilen değerler sonucunda 500 ml ölçekli temiz bir behere önce belirlenen ağırlıkta Zn(NO₃)₂·6H₂O ve KNO₃ hassas tartı ile tartılarak eklenir. Tartma işlemi laboratuvarımızda bulunan Radwag AS 60/220.R2 hassas tartı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Laboratuvarımızda bulunan hassas terazi.

Materyallerin homojen karışımını sağlamak için, karışım beheri bir manyetik çekirdek ve manyetik karıştırıcı yardımıyla 5-10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Laboratuvarımızda bulunan Dragon Lab MS-H-Pro manyetik karıştırıcı cihazı daha sonra kaplama işleminde de kullanılacaktır. Homojen karışım elde edildikten sonra 80 ml hacimli bir beher kullanılarak ECD hücre elde edilmektedir.



Şekil 3.11. Laboratuvarımızda bulunan ısıtıcılı manyetik karıştırıcı cihazı.

3.3. Deneyler

3.3.1. CV Ölçümü

Bu çalışmada, kaplanacak ZnO nanorod yapıların kaplama sıcaklığına ve molaritesine bağlı kaplama akım yoğunluğu değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada çözeltilerin iki farklı molarite (0.05 ve 0.1M) ve üç farklı sıcaklık (60,70 ve 80 °C) değerlerine bağlı kaplama akım yoğunlukları ölçülmüştür. Aşağıdaki Çizelgedamolarite ve sıcaklığa bağlı CV ölçümleri görülmektedir.

Çizelge 3.5. Molarite ve sıcaklığa bağlı CV ölçümleri.

	60 °C	70 °C	80 °C
0.1M	CV1	CV2	CV3
0.05M	CV4	CV5	CV6

Daha önce de verilen molarite ve ağırlık hesaplamalarına uygun olarak, saf suda 0.05 ve 0.1M $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve KNO_3 çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler 80 ml hacimli cam behere 60 ml olacak şekilde eklenmiş ve manyetik karıştırıcılı ısıtıcıda 60, 70 ve 80 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır.

ITO/Cam alttaban potansiyostat cihazının çalışma elektrotuna, Pt tel ise karşıt elektrotuna bağlanmıştır. Ag/AgCl referans elektrotu kullanılarak bütün elektrot

bağlantıları tamamlanmıştır. Üç elektrotun farklı sıcaklıklarda ve farklı molaritede çözeltiye daldırılması ile CV ölçümleri için hazır hale gelinmiştir.

CV ölçümleri, 1 cm² kaplama yüzey alanlı ITO/Cam alttabana 10 döngü olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylece elde edilen J akım yoğunlukları A/cm² cinsinden direkt olarak elde edilmiştir. Aşağıdaki Çizelgede CV ölçümleri için elde edilen en uygun J akım yoğunluğu değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Molariteye bağlı CV ölçümleri sonucu elde edilen J kaplama akım yoğunluğu değerleri.

	CV1	CV2	CV3	CV4	CV5	CV6
Çözelti	0.1M	0.1M	0.1M	0.05M	0.05M	0.05M
Değerleri	60 °C	70 °C	80 °C	60 °C	70 °C	80 °C
Bulunan Akım	1.4 mA/cm ²	3 mA/cm ²	2.5 mA/cm ²	0.8 mA/cm ²	1.8 mA/cm ²	3.5 mA/cm ²

3.3.2. ZnO Kaplama

Bütün kaplama deneylerinde çözelti içerisine O₂ verilerek ısıtılmıştır. Bu işlem sırasında O₂ akışı, seri küçük kabarcıklar olacak şekilde ayarlanmıştır. Çözeltiye O₂ verilmesi işlemiyle, Pt sebebiyle oluşacak H₂ gazı kabarcıklarının, kaplamanın yapılacağı ITO/Cam üzerinde birikmesi önlenmiş olmaktadır. Böylece ITO/Cam üzerinde homojen kaplamalar elde edilebilmektedir. Bu işlem bütün kaplama deneylerinde tekrarlanmıştır.

Deneyler 0.05 ve 0.1M çözeltilerin 60, 70 ve 80 °C sıcaklığa ısıtılması yoluyla 5, 10, 20 ve 30 dakika süresinde kaplanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece molaritenin, sıcaklığın ve kaplama süresinin ZnO nanorod yapılar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aşağıdaki Çizelgede her bir numunenin kaplama özelliklerini veren Çizelge görülmektedir. Bu sebeple 24 ayrı deney sonucu 24 ayrı numune elde edilerek gerekli karakterizasyonlar için üretimler tamamlanmıştır.

Çizelge 3.7. Üretilen ZnO numunelerine ait koşulları gösteren Çizelge.

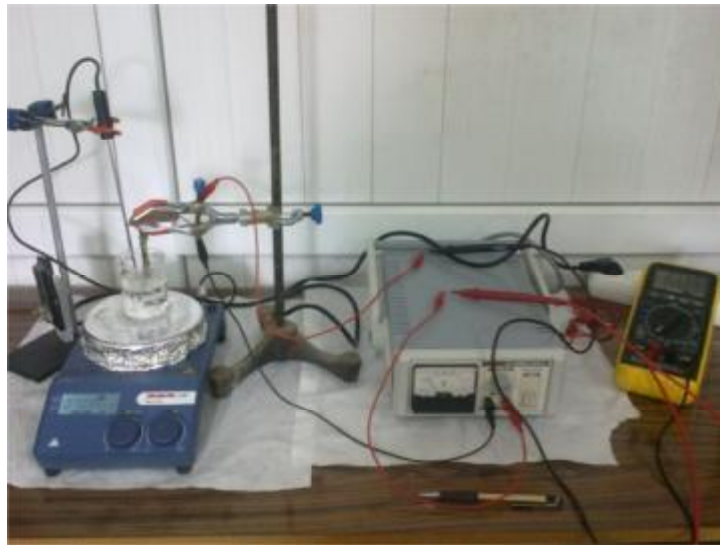
	RT1	RT2	RT3	RT4
MOLARİTE	0.1M	0.1M	0.1M	0.1M
SICAKLIK	60 ° C	60 ° C	60 ° C	60 ° C
SÜRE	5 dk	10 dk	20 dk	30 dk
AKIM	1.4 mA	1.4 mA	1.4 mA	1.4 mA
	RT5	RT6	RT7	RT8
MOLARİTE	0.1M	0.1M	0.1M	0.1M
SICAKLIK	70 ° C	70 ° C	70 ° C	70 ° C
SÜRE	5 dk	10 dk	20 dk	30 dk
AKIM	3 mA	3 mA	3 mA	3 mA
	RT9	RT10	RT11	RT12
MOLARİTE	0.1M	0.1M	0.1M	0.1M
SICAKLIK	80 ° C	80 ° C	80 ° C	80 ° C
SÜRE	5 dk	10 dk	20 dk	30 dk
AKIM	2.5 mA	2.5 mA	2.5 mA	2.5 mA
	RT13	RT14	RT15	RT16
MOLARİTE	0.05M	0.05M	0.05M	0.05M
SICAKLIK	60 ° C	60 ° C	60 ° C	60 ° C
SÜRE	5 dk	10 dk	20 dk	30 dk
AKIM	0.8 mA	0.8 mA	0.8 mA	0.8 mA
	RT17	RT18	RT19	RT20
MOLARİTE	0.05M	0.05M	0.05M	0.05M
SICAKLIK	70 ° C	70 ° C	70 ° C	70 ° C
SÜRE	5 dk	10 dk	20 dk	30 dk
AKIM	1.8 mA	1.8 mA	1.8 mA	1.8 mA
	RT21	RT22	RT23	RT24
MOLARİTE	0.05M	0.05M	0.05M	0.05M
SICAKLIK	80 ° C	80 ° C	80 ° C	80 ° C
SÜRE	5 dk	10 dk	20 dk	30 dk
AKIM	3.5 mA	3.5 mA	3.5 mA	3.5 mA

Yukarıdaki Çizelgede verilen koşullara göre hazırlanmış ECD hücre ve düzenek aşağıdaki gösterildiği şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 3.12. Deneylerde hazırlanan ECD hücre.

Şekil 3.12'de görüldüğü gibi ECD hücre manyetik karıştırıcı üzerinde bir beher içerisinde hazırlanmış, gerekli elektrot bağlantıları bir delikli plakete bağlı kısıkaçlar üzerinden sağlanmıştır. Böylece her seferinde eşit aralıklı elektrot düzeneği garanti altına alınmıştır. Kısıkaçlar elektrolite temas etmeden kullanıldığı için elektrolitin kimyasal özelliği korunmuştur. Aşağıdaki şekilde DC güç kaynağı, mili ampermetre ve ECD hücre bir arada görülmektedir.



Şekil 3.13. ECD kaplama sistemi.

İlk deneyde 60°C sıcaklıktaki 0.05M çözelti kullanılarak, 5, 10, 20 ve 30 dakika için dört defa tekrarlanması yoluyla RT1, RT2, RT3 ve RT4 kodlu numuneler elde edilmiştir. Her farklı süre için ayrı bir çözelti hazırlanıp, istenen sıcaklığa getirildikten sonra istenen süre boyunca kaplama tekrarlanmıştır. Bu işlem her farklı molarite, sıcaklık ve süre için tekrarlandığında, RT1'den RT24'e kadar 24 farklı numune elde edilmiştir.

Elde edilen her numune, kaplamanın hemen ardından saf su ile durulanarak N₂ gazı ile kurutulmuştur. Kurutma işleminin hemen ardından 30 dakika boyunca 450 °C sıcaklıkta tavlansmıştır. Tavlama işlemi kapalı bir yüksek fırın ile (Protherm) gerçekleştirilmiştir. Tavlama işlemi bittikten sonra numuneler fırından çıkarılmadan kendiliğinden oda sıcaklığına düşmesi için beklenmiştir.



Şekil 3.14. Numunelerin tavlandığı fırın.

3.3.3. Karakterizasyon

X-Işınları Kırınımı (X-Ray Diffraction-XRD), x-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılmaktadır. X-ışınları ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında bilgi veren güçlü bir yöntemdir. X-ışınlarının dalgaboyu, 1 Angstrom civarındadır. Bu da bir kristal

içindeki atomlar arası mesafe mertebesinde. Kristallerin atom dizilişlerinin incelenmesinde bu yüzden X-ışınlarına ihtiyaç duyulur. X-ışınları kırınım yöntemiyle katıların örgü parametresi ölçümleri difraktometre denilen aletle yapılmaktadır. Kırınım deseninde maksimum piklere karşılık gelen açı değerlerini kullanarak, Bragg yasası formülünden tabakalar arası mesafe (d) hesaplanabilir. Örneğin kristal yapısı ve piklerin miller indisleri belirli olması durumunda, örgü parametresi bulunur. X-ışınlarının kırınım deseninden yararlanarak Scherrer formülü kullanılarak tanecik büyüklüğü hesaplanabilir. Tanecik büyüklüğü arttıkça, elde edilen kırınım deseninde yansıyan ışınların şiddetini gösteren piklerin de daraldığı görülür. Çünkü Scherrer formülündeki B değeri, kırınım deseninde gözlenen maksimum piklerin yarı maksimumdaki genişliklerinin (FWHM de denir) radyan cinsinden değeridir. Aşağıda Scherrer formülü ile tanecik büyüklüğünün nasıl hesaplandığı görülmektedir:

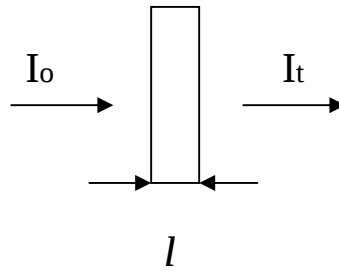
$$D = \frac{0.9\lambda}{b(\text{radyan}) \cos(\theta_B)}$$

Üretilen ZnO nanorod yapıların kristal yapı özellikleri Rigaku Miniflex (Cu K α radyasyon) XRD sistemi ile ($\lambda = 1.54059\text{\AA}$) elde edilmiştir. Her X-ışını kırınımı görüntüsü, 20° ve 70° aralığında dakikada 1° olacak şekilde aynı parametrelerde elde edilmiştir. Numuneler tavlama sonrası hemen XRD sisteme yerleştirilip ölçümleri yapılmıştır. Her ölçüm süresi yaklaşık 1 saat civarındadır. Her seferinde elde edilen piklerin yerleri XRD cihazının pik analizveritabanı tarafından da analiz ettirilmiştir. XRD görüntüsü alınan numuneler hemen optik ölçümler için kullanılmıştır.



Şekil 3.15. Kristallik karakterizasyonlarının yapıldığı XRD cihazı.

Yarıiletken üzerine düşen ışığın enerjisi, bant enerjisinden büyük ise uyarılan elektronlar iletim bandından yüksek bir enerji seviyesine çıkarıldıktan sonra enerjilerini kristale verip iletim bandından değerlik bandına geçerek ışıma yaparlar. Işığın ne kadar soğurulacağı soğurma katsayısı (α) ve kalınlığa (l) bağlıdır. I_0 gelen ışığın şiddeti, I_t geçen ışığın şiddeti olmak üzere;



$$\alpha I(x) = \frac{-dI(x)}{d(x)}$$

$$I_t = I_0 e^{-\alpha l}$$

Direkt bandaralıklı bir yarıiletken olan ZnO için α soğurma katsayısı, $h\nu$ foton enerjisi için aşağıdaki eşitliğe bağlıdır;

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2}$$

Burada E_g ZnO ince filmin optik bandaralığı, A ise sabittir. Soğurma sınırında α ;

$$\alpha = -\frac{\ln(T)}{d}$$

burada d film kalınlığıdır. Buradan soğurma katsayısının enerji ile çarpımının karesinin enerjiye karşı çizilen $(\alpha E)^2 - E$ grafiğinin teğetinin enerji eksenini kestiği nokta E_g optik enerji aralığını verir.

ZnO nanorod yapıların optik özellikleri, bilgisayar kontrollü çift ışınlı Perkin Elmer (Lambda 2S) cihazı ile UV/VIS/NIR bölgede ölçülmüştür. Üretilen ZnO nanorod filmlerin soğurma aralığı ölçümleri 380 nm ile 1100 nm aralığında ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. ZnO nanorod yapıların soğurma aralığı 380 nm değerinde artarak devam etmiştir. $(\alpha h\nu)^2 - (h\nu)$ grafiği üzerine yapılan fitler sonucunda enerji aralığı değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.16. Optik karakterizasyonların yapıldığı UV-VIS-NIR spektrofotometre cihazı.

Akım taşıyan bir iletken bir manyetik alan içerisine konulursa manyetik alanın uyguladığı kuvvetten dolayı sapan elektronlar manyetik alana ve akıma dik bir potansiyel farkı oluştururlar. Bu olaya hall etkisi denir. Hall etkisi taşıyıcı yüklerin tipi ve yoğunluğu hakkında bilgi verir.

Hall ölçümü manyetik alan varlığında gerçekleştirilir ve eğer tabaka kalınlığı biliniyorsa, tabaka taşıyıcı yoğunluğu n_s ve hacimsel taşıyıcı yoğunluğu n veya p' yi belirlemeye yarar. Hall etki sistemi, yarıiletken ve iletken malzemelerin mobilite, direnç ve taşıyıcı yoğunluklarını ölçmek için kullanılan elektriksel ölçüm metodudur. Ölçüm yapılabilmesi için malzeme omik özellikte olmalıdır. Üretilen ZnO nanorod alttabanlar kare şeklinde kesilerek köşe noktalarına kalay lehim yapılmış ve böylece omik kontaklar elde edilmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında yapılarak ZnO nanorod yapıların mobilite, direnç, taşıyıcı yoğunluğu ve yarıiletken tipi belirlenmiştir. Yarıiletkenlerin iletkenlik tipini (n-tipi veya p-tipi) bulmak için taşıyıcı yoğunluğunun işaretine bakılmıştır. Verici veya n-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti negatiftir, alıcı veya p-tipi yarıiletken için taşıyıcı yoğunluğunun işareti pozitifdir. Hall Etkisi ölçümünü yapmak için Şekil 3.17' de gösterilen bilgisayar kontrollü HMS3000 sistemi kullanılmıştır



Şekil 3.17. Elektriksel karakterizasyonların yapıldığı Hall ölçüm cihazı.

Üretilen ZnO nanorod yapıların yüzey ve kalınlık analizleri için alan etkili SEM (FESEM) ölçümleri satın alma yoluyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18). Böylece her bir numune için çeşitli yakınlık değerlerinde görüntü alınarak rod yapı ve homojen kaplama analizleri yapılmış, kaplamaların kalınlık değerlerinin belirlenmesi için ise her bir numunenin ayrıca kesit görüntüleri ve ölçümleri yapılmıştır.



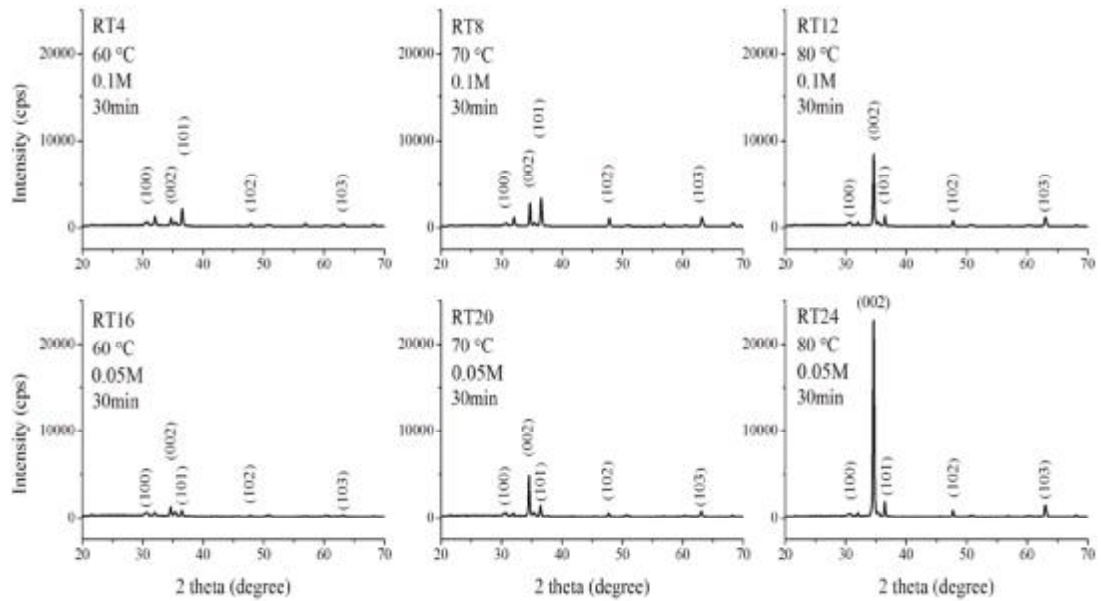
Şekil 3.18. Yüzey ve kesit karakterizasyonlarının yapıldığı FESEM cihazı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneylerden elde edilen bütün numunelerin kristallik, yüzey, kalınlık, optik ve elektriksel karakterizasyonları yapılarak fiziksel özellikleri incelenmiştir. İlk aşamada kristallik özellikleri incelenerek istenen kristallikte ZnO nanorod yapılar üretimi ve parametre ilişkisi incelenmiştir. Sonra üretilen numunelerin yüzey ve kesit FESEM görüntüleri incelenerek ZnO nanorod yapıların özellikleri ve kaplamaların homojenlikleri incelenmiştir. Daha sonra numunelerin optik karakterizasyonları incelenerek saydam iletken oksit (Transparent Conductive Oxide, TCO) özellikleri incelenmiştir. Numunelerin elektriksel özellikleri incelenerek yarıiletken tipi ve iletkenlikleri analiz edilmiştir.

4.1.Yapısal Karakterizasyon

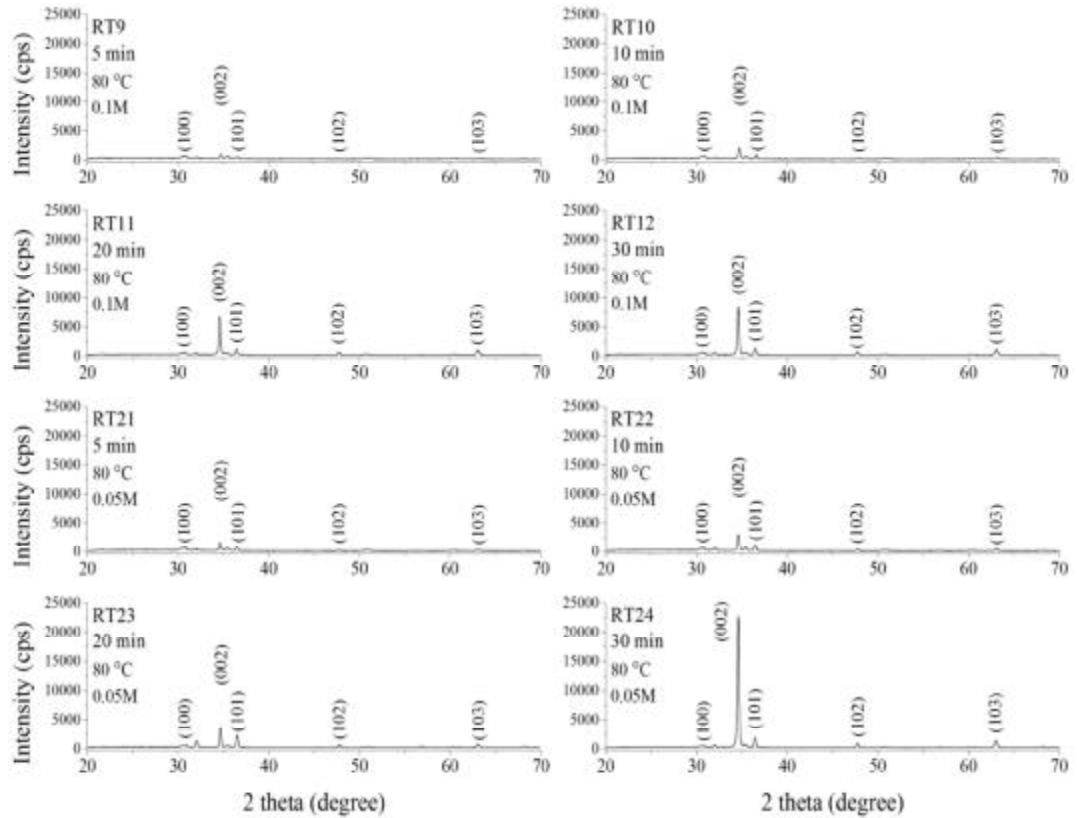
Çözeltinin sıcaklığının ve molaritesinin ZnO nanorod yapıların kristallığı üzerine analizi, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi iki farklı ZnO nanorod serisi incelenerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Çözelti sıcaklığının ZnO nanorod kristallik üzerine etkisi.

Etkin bir analiz için aynı sürede kaplanmış numuneler seçilerek XRD sonuçlarına göre analiz yapılmıştır. RT4, RT8 ve RT12'den oluşan ilk seri 0.1M çözeltide, RT16, RT20 ve RT24'den oluşan ikinci seri 0.05M çözeltide kaplanmıştır. Her iki seride de 70 ve 80 °C çözelti sıcaklığında büyütülen numunelerde (002) yönünde büyüme eğilimi görülmektedir. Ayrıca RT12 ve RT24 için (002) yönündeki büyüme diğer numunelere göre oldukça baskındır. 0.1M çözeltide kaplanan numunelerden RT12 için büyüme (002) yönündeyken, RT4 ve RT8 için büyüme (101) yönündedir. Fakat 0.05M çözeltiler için her üç numunede de büyüme (002) yönünde olmuştur. Her iki seride de (002) yönündeki büyüme sıcaklığa bağlı olarak artmaktadır ki bu sonuç literatür ile de uyusmaktadır (Zhang ve ark, 2011).

Kaplama süresinin ZnO nanorod yapıların kristallliği üzerine etkisini incelemek için, Şekil 4.2'de görüldüğü gibi 80 °C sıcaklıktaki 0.1 ve 0.05M çözeltilerde üretilen numune serileri karşılaştırılmıştır. Bu sayede kaplama süresinin kristallik üzerine etkisi kolaylıkla incelenmiştir.



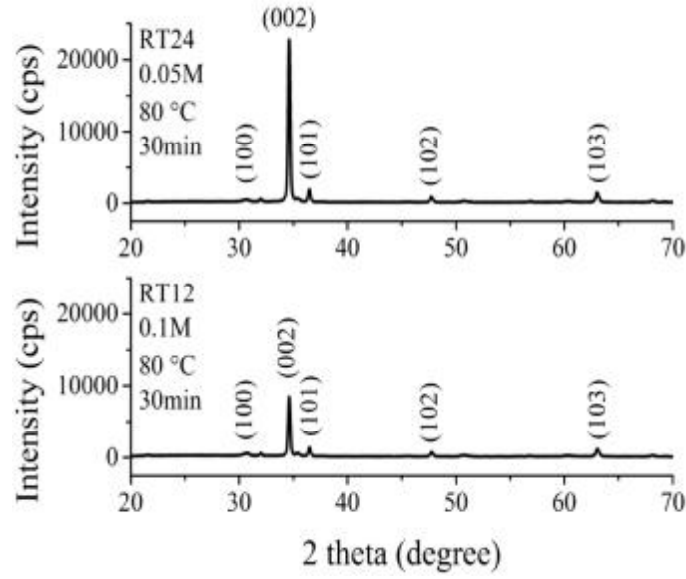
Şekil 4.2. Kaplama süresinin ZnO nanorod kristallik üzerine etkisi.

Şekilde görüldüğü gibi kaplama süresi artarken ZnO nanorod yapıların kristallliği de artmıştır. Ayrıca şekilden de görüldüğü gibi RT11-12 ve RT23-24 eğrileri için (002) pikleri, en yüksek kaplama süreleri için oldukça baskındır. Bu sonuçlara bakarak kaplama süresindeki artışa karşılık kristallliğin arttığı rahatlıkla söylenebilir. ZnO nanorod yapıların kristalit boyutları Scherrer formülü ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar ve d kırılma yüzeyleri arasındaki mesafe Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. RT11-12 ve RT23-24 numune serilerinin (002) pik değerleri ve d kırılma yüzey mesafesi.

Numune	(hkl) (002)				
	FWHM (derece)	d (nm)	2θ (derece)	Kristalitboyutu (nm)	Pik Şiddeti (cps)
RT9	0.229	0.258	34.70	36.3	945
RT10	0.218	0.258	34.73	38.2	2140
RT11	0.199	0.259	34.58	41.8	6930
RT12	0.206	0.258	34.60	40.4	8490
RT21	0.207	0.259	34.61	40.3	1630
RT22	0.200	0.259	34.61	41.6	3030
RT23	0.178	0.258	34.66	46.7	3720
RT24	0.199	0.259	34.59	41.8	22200

Sonuçlardan da görüldüğü gibi kaplama süresi arttıkça (002) yönündeki pikler ve kristalit boyutları artmıştır. Ayrıca d değerinde ve (002) pik pozisyonunda kayda değer bir değişme görülmemiştir. Kısaca Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1'deki verilere bakarak, kaplama süresinin yani ITO üzerine biriken Zn^{+} iyonlarının miktarının ZnO kristallliğini arttırdığı söylenebilir (Vernardou ve ark, 2007). Fakat kristallik ile Zn^{+} iyon yükü birikimi arasındaki ilişkinin tersine, Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi, çözelti molaritesi arttıkça kristallik azalmıştır.

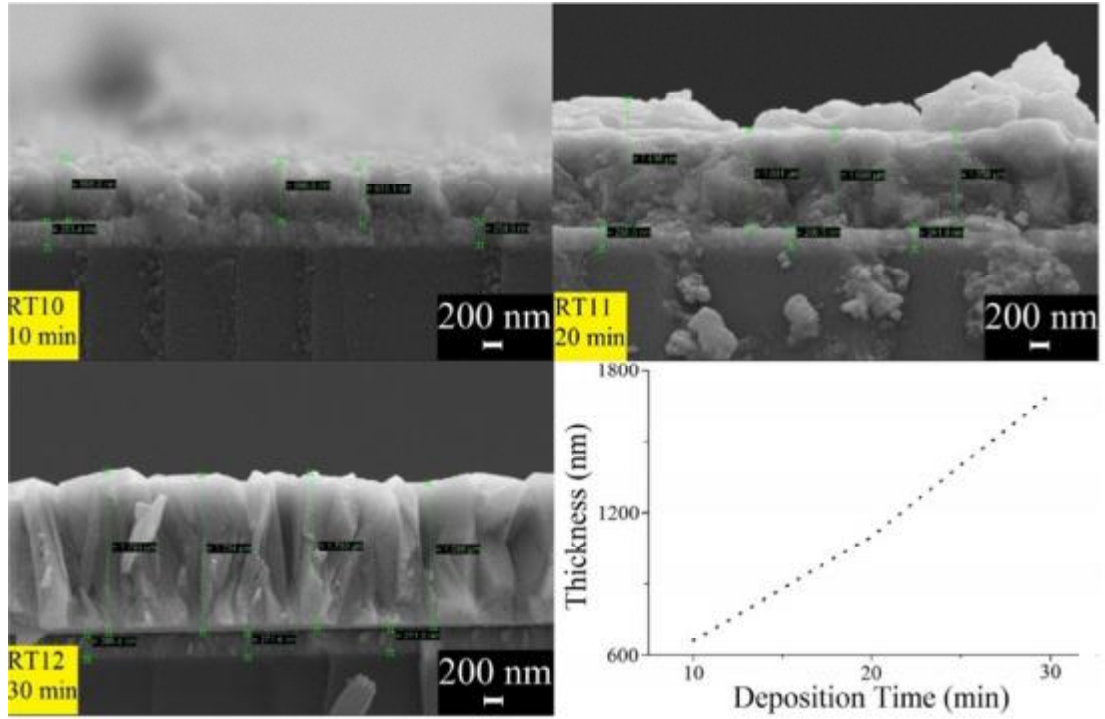


Şekil 4.3.Molaritenin kristallik üzerine etkisi.

0.05M çözeltide kaplanan RT24 kodlu numunenin kristallik özeliği, 0.1M çözeltide kaplanan RT12 kodlu numunenin kristallik özelliğinden çok daha iyidir. Her ne kadar bu sonuç bir önceki referans ile ters düşse de, molariteden kaynaklanan yüksek akımın kristallik üzerine olumsuz etkisi ihtimali, ileriki çalışmalarda incelenmeye değer bir sonuçtur. Pahalı ve çok aşamalı üretim teknikleri kullanmadan elde ettiğimiz bu ZnO nanorod yapıların kristallik özellikleri literatür ile kıyaslanabilir seviyede iyidir (Li ve ark, 2001; Wu ve ark, 2004). Bu sonuçlar göstermektedir ki laboratuarda geliştirdiğimiz düşük maliyetli ve kolay üretim tekniği, düzenli büyümüş ZnO nanorod üretimi için oldukça uygun bir tekniktir (Li ve ark, 2005).

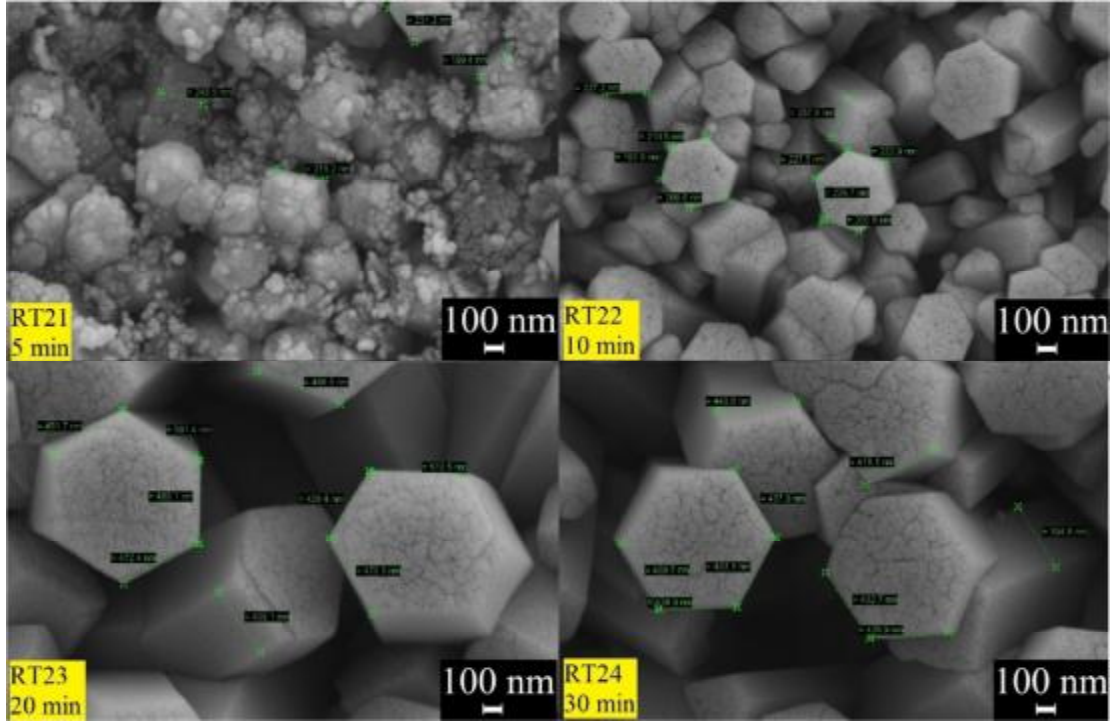
4.2. Yüzey ve Kalınlık Karakterizasyonu

Yüzey ve kalınlık karakterizasyonu için iyi bir kıyaslama yapabilmek adına, daha önce kristallik yönünden incelenen RT10, RT11 ve RT12 kodlu numunelerin kaplanma zamanının ZnO nanorod film kalınlığına etkisi, kesit FESEM analizi ile yapılmıştır.



Şekil 4.4.ZnO nanorod kaplama kalınlığı zaman ilişkisi.

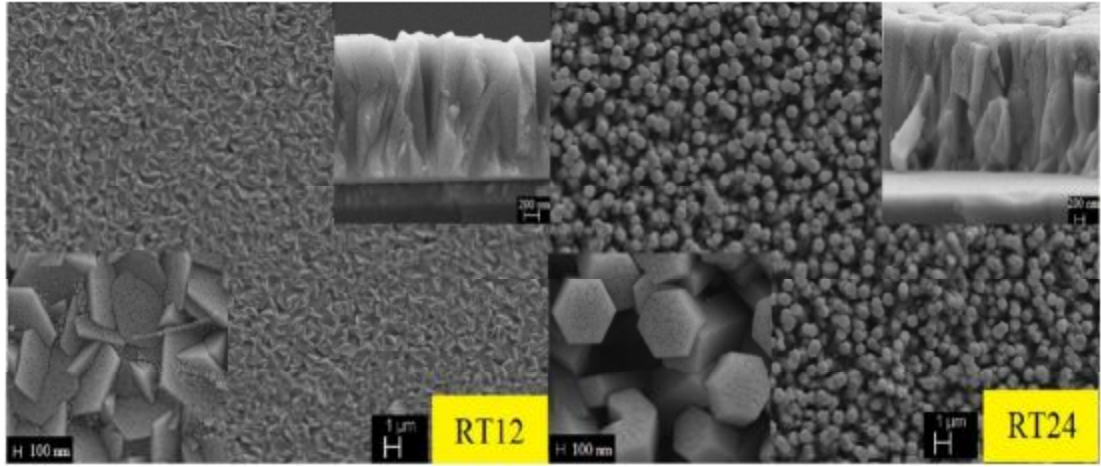
Şekil 4.4'teki kaplama zamanı-film kalınlığı eğrisinden görüldüğü gibi, ZnO nanorod film kalınlıkları neredeyse lineer bir şekilde artmıştır. Bu artış daha önce de referans verilerek incelenen Zn^{+} iyon miktarındaki artış ile doğru orantılıdır. Yani kaplama süresi arttıkça, sıcaklık ve molarite gibi parametreler sabit iken ITO üzerine birim zamanda eşit miktarda Zn^{+} iyon biriktirildiği söylenebilir. Bu sonuç da laboratuarda kendi imkânlarımızla elde ettiğimiz ECD sisteminin zaman parametresi dışında diğer parametrelerinin neredeyse sabit olduğu, yani defalarca tekrarlanabilen bir deney gerçekleştirilebildiği anlamına gelmektedir.



Şekil 4.5. 0.05M çözeltide 5, 10, 20 ve 30 dakika süreyle kaplanan ZnO nanorod yapıların FESEM görüntüleri.

Şekil 4.5'te de görüldüğü gibi 5 dakikalık kaplama süresi için bile elde edilen ZnO yapılar neredeyse hegzagonal rod yapı şeklindedir. Kaplama süresi arttıkça ZnO nanorod yapılar belirgin bir şekilde hegzagonal bir şekilde büyümektedir. Ancak burada RT21, 22 ve 23 kodlu numunelerdeki rod yapıların kalınlığı giderek artarken, RT24 kodlu numunenin hegzagonal rod yapı kalınlığı RT23 kodlu numuneye göre daha ince elde edilmiştir. Bu durum 80 °C sıcaklıkta 0.1M çözeltide 5, 10, 20 ve 30 dakika için büyütülen RT9, 10, 11 ve 12 için de aynı şekildedir. Yani 30 dakika için kaplanan RT12 ve RT24 kodlu numunelerin rod yapı kalınlıkları, 20 dakika için büyütülen RT11 ve RT23 kodlu numunelere göre daha incedir. Rod yapı kalınlıklarındaki bu azalma eğilimi, bütün sıcaklık ve molaritelerde 30 dakika için kaplanan numunelerin hepsinde görülmüştür.

Şekil 4.6'da RT12 ve RT24 kodlu numunelerin iç içe kesit ve yüzey FESEM görüntüleri görülmektedir. Numunelerin kıyaslanması göstermektedir ki daha düşük molariteli çözeltide kaplanan RT24 kodlu numunenin ZnO nanorod yapıları çok daha düzenli ve yüzeye diktir. Bu durumda molaritedeki azalmanın ZnO nanorod yapıların şekillenmesinde olumlu etkisi olduğu söylenebilir.

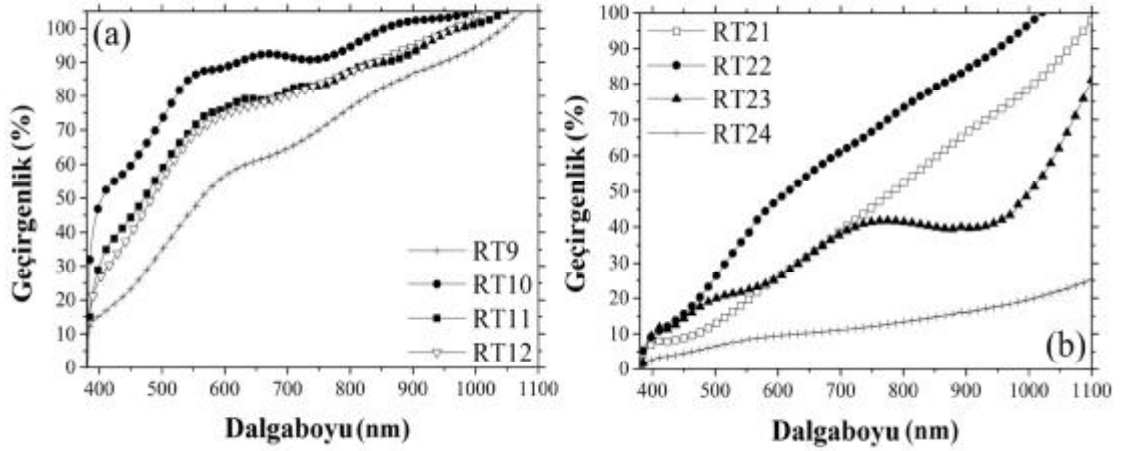


Şekil 4.6. 80 °C sıcaklıkta 0.1 ve 0.05M çözeltide 30 dakika boyunca kaplanan numunelerin kesit ve yüzey FESEM görüntüleri.

Şu ana kadar FESEM görüntüleri yardımıyla yapılan karakterizasyonlar, kendi geliştirdiğimiz ECD sistemi ile ürettiğimiz ZnO nanorod yapıların literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir (Zhang ve ark, 2012). Tohum tabakası kullanmadan yaptığımız çalışmalarda büyüttüğümüz ZnO nanorod yapılar hem hegzagonal hem de alttaban yüzeyine dik bir formda büyümüştür (Foo ve ark, 2014; Yi ve ark, 2005).

4.3. Optik ve elektriksel karakterizasyon

Büyüttüğümüz ZnO nanorod yapıların optik özellikleri, 380-1100 nm dalgaboyu aralığında oda sıcaklığında geçirgenlik ölçümleri yapılarak elde edilmiştir. ITO ve cam malzemelerin optik özelliklerinin ölçümlere etkilerini elimine etmek için her ölçüm öncesi ITO/Cam alttaban referans olarak kullanılmıştır.

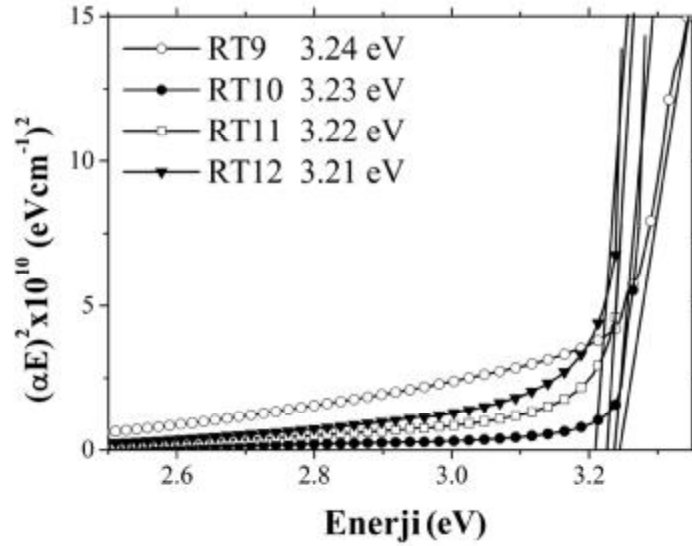


Şekil 4.7. 5, 10, 20 ve 30 dakika boyunca 80 °C sıcaklıkta 0.1 ve 0.05M çözeltilerde kaplanan ZnO nanorod yapıların optik geçirgenlik eğrileri.

Şekil 4.7'de alttabana dik büyütülen RT9-12 ve RT21-24 numune serilerinin optik geçirgenlik spektrumları görülmektedir. Ölçümlerin yapıldığı cihazda entegre küre aparatı bulunmadığından dolayı, numunelerden geçen ışının yansıyan/saçılan bileşenleri ölçülemediği için, RT9-12 ve RT21-24 numunelerinin ortalama optik geçirgenliği sırasıyla %60 ve %42 dolayındadır. Bu ortalama optik geçirgenlik verileri göstermektedir ki numunelerden geçen ışın demetinde büyük miktarda yansıyan/saçılan bileşenler mevcuttur (Schwarz ve ark, 2014). RT10-12 numune serilerinin eğrilerinden görüldüğü üzere, kaplama zamanı arttıkça optik geçirgenlik azalmaktadır. Optik geçirgenlikteki bu azalma numunelerin kalınlığının ve yüzeylerinin pürüzlülüğünün artmasına bağlanabilir. Benzer kalınlık-optik geçirgenlik ilişkisi RT22-24 kodlu numune serileri için de geçerlidir. Buna rağmen 5 dakika süreyle kaplanan RT9 ve RT21 için optik geçirgenlik oldukça düşük çıkmıştır. Oysa bu numuneler kendi serilerindeki diğer 3 numuneye göre en ince olanlardır. Optik geçirgenliklerindeki bu büyük düşüş, homojen olmayan yani yığınlar şeklinde oluşan kaplamalara ve dolayısıyla büyük ölçüde oluşan yüzey pürüzlülüğüne bağlanabilir.

Filmlerin optik enerji band aralık değerleri, $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ eğrisi üzerinde ZnO nanorod yapıların soğurmaya başladığı 380 nm değerinden lineer bir doğru çıkılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.8'de gösterilmiştir. RT9, RT10, RT11 ve RT12 için elde edilen optik bandaralık enerjileri sırasıyla 3.24 eV, 3.23 eV, 3.22 eV

ve 3.21 eV değerindedir. Kaplama süresi arttıkça kalınlık artmış ve optik bandaralık enerjisi azalmıştır.



Şekil 4.8. 0.1M çözeltide 80 °C sıcaklıkta 5, 10, 20 ve 30 dakika süreyle kaplanan RT9, RT10, RT11 ve RT12 için foton enerjisinin bir fonksiyonu olan $(\alpha h\nu)^2$ eğrileri.

Hall ölçümlerinin sonucu olarak elde edilen elektriksel karakterizasyon sonuçları Çizelge 4.2'de verilmektedir. Bütün ZnO nanorod yapılar n-tipi yarıiletkenler ve taşıyıcı konsantrasyonları $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ değerindedir. Ayrıca direnç değerleri $1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ kadar düşüktür. Elektrokimyasal hücrelere kaplama öncesi O_2 gazı verilmesine ve numunelerin kaplama sonrası 450 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca tavlanmasına rağmen, ölçülen taşıyıcı yoğunluğu $\times 10^{20}$ değerleri seviyesindedir ki literatüre göre yüksek bir değerdir (Elias ve ark, 2008; Ogata ve ark, 2000). Tohum tabakası kullanmadan iyi derecede elektriksel özellikte ürettiğimiz ZnO nanorod yapılar (Lin ve ark, 2011; Sun ve ark, 2013) çeşitli sensör uygulamaları için de ideal malzeme olarak elde edilmiştir (Zhang ve ark, 2005; Hsueh ve ark, 2007).

Çizelge 4.2. Elektriksel karakterizasyon sonuçları.

	Taşıyıcı Konsantrasyonu	Mobilite (cm²/Vs)	Direnç (x10⁻³Wcm)	Taşıyıcı Tipi
RT9	-1.77	18.2	1.94	n
RT10	-1.54	18.6	2.10	n
RT11	-1.35	20.9	2.20	n
RT12	-1.45	18.5	2.33	n

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrokimyasal yolla büyüttüğümüz ZnO nanorod yapılar, endüstriyel ECD sistemler kullanmadan basit bir lineer DC güç kaynağı, miliampermetre ve elektrokimyasal hücre kullanılarak başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Büyütme tekniğimizin maliyeti oldukça düşük ve büyütme işlemi ise oldukça kolay ve tamamen kontrol edilebilir bir süreçtir. ZnO nanorod yapıların kristallik, yüzey/kesit ve optoelektronik karakterizasyonları, kullandığımız ekonomik ve kolay üretim tekniğinin literatür ile kıyaslanabilir. ZnO nanorod üretimi için yeterli olduğunu göstermiştir. Bu kıyaslamalar her karakterizasyon aşamasında literatürden referanslar verilerek yapılmıştır. Dolayısıyla ECD parametrelerinin ZnO nanorod büyütme üzerine etkisi sistematik bir şekilde yapılarak incelenmiştir. ZnO nanorod yapıların kristal yapıları hegzagonal wurtzite ve büyütülen rod yapılar alttabana oldukça dik bir şekildedir. Büyütülen nanorod yapılar oldukça iyi elektriksel özellikler ve ortalama bir optik geçirgenlik özelliği gösterdiğinden TCO materyal uygulamaları için uygun bir optoelektronik malzemedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki laboratuarda geliştirdiğimiz düşük maliyetli, düşük sıcaklıklı ve kolay üretim sağlayan tekniğimiz ileri ZnO üretim çalışmaları için oldukça umut vericidir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ayrıca makale halinde hazırlanmış ve *Thin Solid Films* akademik dergisinde yayınlanmıştır (Özdağ ve ark, 2015).

KAYNAKLAR

- AFAAH, A.N., KHUSAİMİ, Z., MAHMOOD, M.R., 2013. A review on zinc oxide nanostructures:doping and gas sensing, *Adv. Mater. Res.* 667: 329–332.
- AHMAD, R., TRİPATHY, N., HAHN, Y., 2013. High-performance cholesterol sensor based on the solution-gated field effect transistor fabricated with ZnO nanorods, *BiosensBioelectron.* 45: 281–286.
- ALLEN, B., LARRY, R.F., 2000. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, s. 856, Wiley.
- AN, S.J., Yİ, G., 2007. Near ultraviolet light emitting diode composed of n-GaN/ZnO coaxial nanorod heterostructures on a p-GaN layer, *Appl. Phys. Lett.* 91: 123109.
- ANTA, J.A., GUİLLÉN, E., TENA-ZAERA, R., 2012. ZnO-based dye-sensitized solar cells, *J. Phys. Chem. C* 116: 11413–11425
- APPELL, D., 2002. Nanotechnology: wired for success *Nature* 419:553.
- ARMSTRONG, N.R., CARTER, C., DONLEY, C., SİMMONDS, A., MİCHAEL, LEE, P., BRUMBACH, M., KİPPELEN, B., DOMERCQ, B., YOO, S., 2003. Interface modification of ITO thin films- organic photovoltaic cells, *Thin Solid Films*, 445: 342–352.
- ASHRAFİ, A.B.M.A., UETA, A., AVRAMESCU, A., KUMANO, H., SUEMUNE, I., OK, Y.W., SEONG, T.Y., 2000. *Applied Physics Letters*, 76: 550.
- B. MARİ, MANJO'N, F.J., MOLLAR, M., CEMBRERO, J., GO'MEZ, R., 2006. Photoluminescence of thermal-annealed nanocolumnar ZnO thin films grown by electrodeposition.
- BAKİN, A., 2007. "ZnMgO-ZnO Quantum Wells Embedded in ZnO Nanopillars: Towards Realisation of Nano-LEDs". *Physica Status Solidi (c)* 4: 158–161. Bibcode:2007PSSCR.4.158B.
- BAKİN, A., 2010. "ZnO – GaN Hybrid Heterostructures as Potential Cost Efficient LED Technology". *IEEE (Invited Paper for a special volume), Proceedings of the IEEE* 98 (7): 1281–1287.

- BHANDARI, C.M., ROWE, D.M., 1988. Thermal Conduction in Semiconductors, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- BJÖRK, M.T., OHLSSON, B.J., SASS, T., PERSSON, A.I., THELANDER, C., MAGNUSSON, M.H., DEPPERT, K., WALLENBERG, L.R., SAMUELSON, L., 2002. One-dimensional steep-slope foreelectrons realized Nano Lett.2: 87.
- BRAEKKEN, H., JØRE, C., 1935. Det Norske Videnskabers Skifter (The Norwegian Science Scripts), NR8, 1(in Norwegian).
- BUNN, C.W., 1935. Proceedings of the Physical Society, 47: 836.
- CERAC, 2010. Ito, tin-doped indium oxide for optical coating.
- CHANDERA, R., RAYCHAUDHURY, A.K., 2008. Electrodeposition of aligned arrays of ZnO nanorods in aqueous solution.
- DEKKERS, J.M., 2007. Transparent Conducting Oxides on Polymeric Substrates by Pulsed Laser Deposition, Ph.D. thesis University of Twente, Enschede, The Netherlands.
- DUAN, X.F., LIEBER, C.M., 2000. Laser-assisted catalytic growth of single crystal GaN nanowires J. Am. Chem. Soc.122:188.
- ELÍAS, J., TENA-ZAERA, R., LÉVY-CLÉMENT, C., 2008. Electrochemical deposition of ZnO nanowire arrays with tailored dimensions, J. Electroanal. Chem. 62: 171–177.
- FAÏ, S., KROLL, U., BUCHER, C., VALLAT-SAUVAIN, E., SHAH, A., 2005. Low pressure chemical vapour deposition of ZnO layers for thin-film solar cells: temperature-induced morphological changes, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 86: 385–397.
- FOO, K.L., HASHIM, U., MUHAMMAD, K., VOON, C.H., 2014. Sol–gel synthesized zinc oxide nanorods and their structural and optical investigation for optoelectronic application, Nanoscale Res. Lett. 9: 429.
- GAO, P.X., DING, Y., WANG, Z.L., 2003. Crystallographic orientation-aligned ZnO nanorods grown by a tin catalyst Nano Lett.3: 1315.

- GOVENDER, K., BOYLE, D.S., O'BRIEN, P., BRINKS, D., WEST, D., COLEMAN, D., 2002. Room temperature lasing observed from ZnO nanocolumns grown by aqueous solution deposition, *Adv. Mater.* 14: 1221–1224.
- GREENE, L.E., LAW, M., GOLDBERGER, J., KIM, F., JOHNSON, J.C., ZHANG, Y.F., SAYKALLY, R.J., YANG, P.D., 2003. low-temperature wafer-scale production of zno nanowire arrays *angew. chem. int. ed.* 42:3031.
- GREENE, L.E., LAW, M., TAN, D.H., MONTANO, M., GOLDBERGER, J., SOMORJAI, G., YANG, P., 2005. General route to vertical ZnO nanowire arrays using textured ZnO seeds, *Nano Lett.* 5: 1231–1236.
- GUDIKSEN, M.S., LAUHON, L.J., WANG, J., SMOTH, D.C., LIEBER, C.M., 2002. Growth of nanowire superlattice structures for nanoscale photonics and electronics *Nature* 415: 617.
- GUO, M., DIAO, P., CAI, S., 2005. Hydrothermal growth of well-aligned ZnO nanorod arrays: dependence of morphology and alignment ordering upon preparing conditions, *J. Solid State Chem.* 178: 1864–1873.
- HAN, W.Q., FAN, S.S., LI, Q.Q., HU, Y.D., 1997. *Science* 277: 1287.
- HAN, W.Q., FAN, S.S., LI, Q.Q., HU, Y.D., 1997. Synthesis of gallium nitride nanorods through a carbon nanotube confined reaction *Science* 277: 1287.
- HASSAN, J.J., MAHDI, M.A., RAMIZY, A., ABU HASSAN, H., HASSAN, Z., 2013. Fabrication and characterization of ZnO nanorods/p-6H-SiC heterojunction LED by microwave-assisted chemical bath deposition, *Superlattice. Microst.* 53: 31–38.
- HELLER, R.B., MCGANNON, J., WEBER, A.H., 1950. *Journal of Applied Physics*, 21: 1283.
- HOU, Q., ZHU, L., CHEN, H., LIU, H., LI, W., 2012. Growth of flower-like porous ZnO nanosheets by electrodeposition with $\text{Zn}_5(\text{OH})_8(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ as precursor.
- HSIEH, H.H., WU, C.C., 2007. Amorphous ZnO transparent thin-film transistors fabricated by fully lithographic and etching processes, *Appl. Phys. Lett.* 91: 013502.

- HSUEH, T.J., CHEN, Y.W., CHANG, S.J., WANG, S.F., HSU, C.L., LIN, Y.R., LIN, T.S., CHEN, I.C., 2007. ZnO nanowire-based CO sensors prepared at various temperatures, *J. Electrochem. Soc.* 154 J393–J396.
- HUANG, M.H., MAO, S., FEICK, H., YAN, H.Q., WU, Y.Y., KIND, H., WEBER, E., RUSSO, R., YANG, P.D., 2001. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers *Science* 292: 1897.
- HUANG, M.H., WU, Y.Y., FEICK, H., TRAN, N., WEBER, E., YANG, P.D., 2001. Catalytic growth of zinc oxide nanowires by vapor transport *Adv. Mater.* 13: 113.
- JIANG, Y., WU, Y., MO, X., YU, W.C., XIE, Y., QIAN, Y.T., 2000. Elemental solvothermal reaction to produce ternary semiconductor CuInE_2 ($E = \text{S, Se}$) nanorods *Inorg. Chem.* 39: 2964.
- KANG, J.W., JEONG, W.I., KIM, J.J., KIM, H.K., KIM, D.G., LEE, G.H., 2007. High-performance flexible organic light-emitting diodes using amorphous indium zinc oxide anode, *Electrochem. Solid-State Lett.* 10 (6): J75–J78.
- KEEM, K., KIM, H., KIM, G.T., LEE, J.S., MIN, B., CHO, K., SUNG, M.Y., KIM, S., 2004. Photocurrent in ZnO nanowires grown from Au electrodes *Appl. Phys. Lett.* 84: 4376.
- KISI, E., ELCOMBE, M.M., 1989. *Acta Crystallographica Section C. Crystal Structure Communications*, 4: 1867.
- KOGURE, T., BANDO, Y., 1993. *Journal of Electron Microscopy*, 47: 7903.
- KONENKAMP, R., BOEDECKER, K., LUX-STEINER, M.C., POSCHENRIEDER, M., ZENIA, F., CLEMENT, C.L., WAGNER, S., 2000. *Appl. Phys. Lett.* 77: 2575.
- KONG, Y.C., YU, D.P., ZHANG, B., FANG, W., FENG, S.Q., 2001. *Appl. Phys. Lett.* 78: 407.
- LANGER, D.W., VESELY, C.J., 1970. *Physical Review B: Condensed Matter*, 2: 4885.
- LAUHON, L.J., GUDIKSEN, M.S., WANG, D., LIEBER, C.M., 2002. Epitaxial core–shell and core–multishell nanowire heterostructures *Nature* 420: 57.

- LEE, C.J., LEE, T.J., LYU, S.C., ZHANG, Y., RUH, H., LEE, H.J., 2002. Field emission from well-aligned zinc oxide nanowires grown at low temperature Appl. Phys. Lett. 81:3648.
- LESZCZYŃSKI, M., EDGAR, J.H., STRIATE, S., AKASAKI, I., AMANO, H., WETZEL, C., 1999. Common crystal structure of the group III-nitrides, in Properties, Processing and Applications of Gallium Nitride and Related Semiconductors. EMIS Datareviews Series No. 23, INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, UK, pp. 3–5.
- LESZCZYŃSKI, M., SUSKI, T., PERLIŃ, P., TEISSEYRE, H., GRZEGORY, I., BOCKOWSKI, M., JUN, J., POROWSKI, S., PAKULA, K., BARANOWSKI, J.M., FOXON, C.T., CHENG, T.S., 1996. Applied Physics Letters, 69: 73.
- LEY, L., POLLAK, R.A., MCFEELY, F.R., KOWALEZYK, S.P., SHIRLEY, D.A., 1974. Physical Review B: Condensed Matter, 9: 600.
- Lİ, J.Y., CHEN, X.L., Lİ, H., HE, M., QIAO, Z.Y., 2001. Fabrication of zinc oxide nanorods, J. Cryst. Growth 233: 5–7.
- Lİ, Q., KUMAR, V., Lİ, Y., ZHANG, H., MARKS, T.J., CHANG, R.P.H., 2005. Fabrication of ZnO nanorods and nanotubes in aqueous solutions, Chem. Mater. 17: 1001–1006.
- Lİ, S.Y., LİN, P., LEE, C.Y., TSENG, T.Y., 2004. Field emission and photofluorescent characteristics of zinc oxide nanowires synthesized by a metal catalysed vapour–liquid–solid process, J. Appl. Phys. 95: 3711.
- Lİ, Y., MENG, G.W., ZHANG, L.D., PHILLIPP, F., 2000. Appl. Phys. Lett. 76: 2011.
- LİM, J.H., KANG, C.K., KİM, K.K., PARK, I.K., HWANG, D.K., PARK, S.J., 2006. UV electroluminescence emission from ZnO light-emitting diodes grown by high-temperature radiofrequency sputtering, Adv. Mater. 18: 2720–2724.
- LİN, Y., YANG, J., ZHOU, X., 2011. Controlled synthesis of oriented ZnO nanorod arrays by seedlayer-free electrochemical deposition, Appl. Surf. Sci. 258: 1491–1494.

- MAHALİNGAMA, T., JOHNA, V.S., M. RAJAA, SUB, Y.K., SEBASTIAN, P.J., 2005. Electrodeposition and characterization of transparent ZnO thin films. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 88: 227–235.
- MORALES, A.M., LIEBER, C.M., 1998. A laser ablation method for the synthesis of crystalline semiconductor nanowires *Science* 279:208.
- MORKOÇ, H., ÖZGÜR, Ü., 2009. Zinc Oxide: Fundamentals, Materials and Device Technology. Copyright WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- MOUET, T., DEVERS, T., TELİA, A., MESSAI, Z., HAREL, V., KONSTANTINOV, K., KANTE, I., TA, M.T., 2010. Growth and characterization of thin ZnO films deposited on glass substrates by electrodeposition technique.
- NG, H.T., CHEN, B., Lİ, J., HAN, J., MEYYAPPAN, M., WU, J., Lİ, S.X., HALLER, E.E., 2003. Optical properties of single-crystalline ZnO nanowires on m-sapphire *Appl. Phys. Lett.* 82: 2023.
- OGATA, K., SAKURAI, K., FUJITA, S., MATSUSHIGE, K., 2000. Effects of thermal annealing of ZnO layers grown by MBE, *J. Cryst. Growth* 214–215: 312–315.
- ÖZDAL, T., TAKTAKOĞLU, R., ÖZDAMAR, H., ESEN, M., TAKÇI, D.K., KAVAK, H., 2015. Crystallinity improvement of ZnO nanorods by optimization of low-cost electrodeposition technique.
- ÖZDEMİR, R., 2010. Elektrodepolama Yöntemi ile Elde Edilen ZnFe İnce Filmlerinin Elektriksel Özdirenç Özelliklerinin Sezgisel Yöntemler Yardımıyla İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis.
- PARK, J., CHOI, H.H., SIEBEIN, K., SINGH, R.K., 2003. Two-step evaporation process for formation of aligned zinc oxide nanowires *J. Cryst. Growth* 258: 342.
- PARK, J.H., CHOI, H.J., CHOI, Y.J., SOHN, S.H., PARK, J.G., 2004. Ultrawide ZnO nanosheets, *J. Mater. Chem.* 14: 35–36.

- PARK, W.I., JUN, Y.H., JUNG, S.W., YI, G.C., 2003. Excitonic emissions observed in ZnO single crystal nanorods *Appl. Phys. Lett.* 82: 964.
- PARK, W.I., JUNG, S.W., JUN, Y.H., YI, G.C., 2002. Heteroepitaxial ZnO/ZnMgO quantum structures in nanorods *Proc. 26th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors* (Edinburgh, UK) pp 176: 7.
- PARK, W.I., KIM, D.H., JUNG, S.W., YI, G.C., 2002. Metalorganic vapor-phase epitaxial growth of vertically well-aligned ZnO nanorods *Appl. Phys. Lett.* 80: 4232.
- PARK, W.I., YI, G.C., JANG, H.M., 2001. Metalorganic vapor-phase epitaxial growth and photoluminescent properties of $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$ ($0 \leq x \leq 0.49$) thin films *Appl. Phys. Lett.* 79: 2022.
- PARK, W.I., YI, G.C., KIM, M., PENNYCOOK, S.J., 2003. Quantum confinement observed in ZnO/ZnMgO nanorod heterostructures *Adv. Mater.* 15: 526.
- PARK, W.I., YI, G.C., KIM, M., PENNYCOOK, S.J., 2003. Quantum confinement observed in ZnO/ZnMgO nanorod heterostructures *Adv. Mater.* 15: 526.
- PARK, W.I., YI, G.C., KIM, M.Y., PENNYCOOK, S.J., 2002. ZnO nanoneedles grown vertically on Si substrates by non-catalytic vapor-phase epitaxy *adv. mater.* 14: 1841.
- PENG, X.G., WICKHAM, J., ALIVISATOS, A.P., 1998. Kinetics of II-VI and III-V colloidal semiconductor nanocrystal growth: 'focusing' of size distributions *J. Am. Chem. Soc.* 120: 5343.
- POWELL, R.A., SPICER, W.E., MCMENAMIN, J.C., 1971. *Physical Review Letters*, 27: 97.
- POWELL, R.A., SPICER, W.E., MCMENAMIN, J.C., 1972. *Physical Review B: Condensed Matter*, 6: 3056.
- RÖSSLER, U., 1969. Energy band of hexagonal II-VI semiconductors. *Physical Review*, 184: 733.
- SAMUELSON, L., 2003. Self-forming nanoscale devices *Mater. Today* 6: 22.

- SCHWARZ, M.M., RİCHTER, T., PEARSON, R., TAMANG, A., BALSTER, T., KNİPP, D., WAGNER, V., 2014. Controlled electrodeposition of ZnO nanostructures for enhanced light scattering properties, *J. Appl. Electrochem.* 44: 613–620.
- SHAN, F.K., YU, Y.S., 2003. Optical properties of pure and Al doped ZnO thin films fabricated with plasma produced by excimer laser, *Thin Solid Films* 435: 174–178.
- SİNGH, T., PANDYA, D.K., SİNG, R., 2013. Effect of supporting electrolytes on the growth and optical properties of electrochemically deposited ZnO nanorods.
- SÖNMEZOĞLU, S., KOÇ, M., AKIN; S., 2012. İnce film üretim teknikleri Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 28: 389-401.Strukturbericht, 1–8:1919-1939.
- SUN, J. BİAN, J., CHEN, L., WANG, Y., GONG,Y., Lİ, Y., LİU, K., CHANG, C., Lİ, M., DU, G., 2013. Realization of wide size range 1D ZnO micro/nano rods for versatile micro/nano devices by controlled seed layer thickness, *Appl. Surf. Sci.* 276: 782–786.
- SUN, X.C., ZHANG, H.Z., XU, J., ZHAO, Q., WANG, R.M., YU, D.P., 2004. Shape controllable synthesis of ZnO nanorod arrays via vapor phase growth *Solid State Commun.* 129: 803.
- TANG, Y., UO, L., CHEN, Z., JİANG, Y., Lİ, B., JİA, Z., XU, L., 2007. Electrodeposition of ZnO nanotube arrays on TCO glass substrates.
- VERNARDOU, D., KENANAKİS, G., COURİS, S., MANİKAS, A.C., VOYİATZİS, G.A., PEMBLE, M.E., KOUDOUMAS, E., KATSARAKİS, N., 2007. The effect of growth time on the morphology of ZnO structures deposited on Si (100) by the aqueous chemical growth technique, *J.Cryst. Growth* 308: 105–10.
- WAGNER, R.S., 1970. Whisker Technologyed A P Levitt (New York: Wiley-Interscience)

- WANG, C.R., TANG, K.B., YANG, Q., HAI, B., SHEN G.Z., AN, C.H., YU, W.C., QIAN, Y. T., 2001. Synthesis of novel SbSI nanorods by a hydrothermal method *Inorg. Chem. Commun.* 4:339.
- WANG, C.R., TANG, K.B., YANG, Q., QIAN, Y.T., 2003. Preparation and photoluminescence of CaS:Bi, CaS:Ag, CaS:Pb and $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{S}$, nanocrystallites *J. Electrochem. Soc.* 150:G163.
- WANG, X.D., SUMMERS, C.J., WANG, Z.L., 2004. Large-scale hexagonal-patterned growth of aligned ZnO nanorods for nano-optoelectronics and nanosensor arrays *Nano Lett.* 4: 423.
- WANG, Z.L., 2004. Nanostructures of zinc oxide *Mater. Today* 7:26.
- WU, H.Q., WEI, X.W., SHAO, M.W., GU, J.S., 2004. Synthesis of zinc oxide nanorods using carbon nanotubes as templates, *J. Cryst. Growth* 265: 184–189.
- XU, X.L., LAU, S.P., CHEN, J.S., CHEN, G.Y., TAY, B.K., 2001. Polycrystalline ZnO thin films on Si(100) deposited by filtered cathodic vacuum arc, *J. Cryst. Growth* 223: 201–205.
- YAN, H. JOHNSON, J., LAW, M., HE, R., KNUTSEN, K., MCKINNEY, J.R., PHAM, J., SAYKALLY, R., YANG, P., 2003. ZnO nanoribbon microcavity lasers, *Adv. Mater.* 15: 1907–1911.
- YAN, H., HE, R., PHAM, J., YANG, P., 2003. Morphogenesis of one-dimensional ZnO nano- and microcrystals, *Adv. Mater.* 15: 402–405.
- YANG, P.D., LIEBER, C.M., 1996. Nanorod-superconductor composites: a pathway to materials with high critical current densities *Science* 273:1836.
- YATSUI, T., LIM, J., OHTSU M., AN, S.J., YI, G.C., 2004. Evaluation of the discrete energy levels of individual ZnO single-quantum-well nanorods by near-field ultraviolet photoluminescence spectroscopy *Appl. Phys. Lett.* 85: 727.
- YAZAWA, M., KOGUCHI, M., MUTO, A., OZAWA, M., HIRUMA, K., 1992. Effect of one monolayer of surface gold atoms on the epitaxial growth of InAs nanowhiskers *Appl. Phys. Lett.* 61:2051.

- YI, G.C., WANG, C., PARK, W.I., 2005. ZnO nanorods: synthesis, characterization and applications. *Semiconductor Science and Technology*, Volume 20, Number 4: 790-784.
- YI, G.C., WANG, C., PARK, W.I., 2005. ZnO nanorods: synthesis, characterization and applications, *Semicond. Sci. Technol.* 20: S22–S34.
- YIN, Z., WU, S., ZHOU, X., HUANG, X., ZHANG, Q., BOEY, F., ZHANG, H., 2010. Electrochemical deposition of ZnO nanorods on transparent reduced graphene oxide electrodes for hybrid solar cells, *Small* 6: 307–312.
- YOSHIDA, T., KOMATSU, D., SHIMOKAWA, N., MINOURA, H., 2004. Mechanism of cathodic electrodeposition of zinc oxide thin films from aqueous zinc nitrate baths. *Thin Solid Films* 451–452: 166–169.
- YU, D.P., SUN, X.S., LEE, C.S., BELLO, I., LEE, S.T., GU, H.D., LEUNG, K.M., ZHOU, G. W., DONG, Z.F., ZHANG, Z., 1998. Synthesis of boron nitride nanotubes by means of excimer laser ablation at high temperature *Appl. Phys. Lett.* 72:1966.
- YU, W.D., LI, X.M., GAO, X.D., 2004. Self-catalytic synthesis and photoluminescence of ZnO nanostructures on ZnO nanocrystal substrates, *Appl. Phys. Lett.* 84: 2658.
- ZHANG, H., JIN, S., DUAN, G., WANG, J., CAI, W., 2014. Controllable Synthesis of Well-aligned ZnO Nanorod Arrays on Varying Substrates via Rapid Electrodeposition.
- ZHANG, Q., DANDENEAU, C.S., ZHOU, X., CAO, G., 2009. ZnO nanostructures for dye-sensitized solar cells, *Adv. Mater.* 21: 4087–4108.
- ZHANG, R.Q., LIFSHITZ, Y., LEE, S.T., 2003. Oxide-assisted growth of semiconducting nanowires *Adv. Mater.* 15:635.
- ZHANG, Y., JIA, H.B., WANG, R.M., CHEN, C.P., LUO, X.H., YU, D.P., LEE, C.J., 2003. Low-temperature growth and Raman scattering study of vertically aligned ZnO nanowires on Si substrate *Appl. Phys. Lett.* 83: 4631.
- ZHANG, Y., RAM, M.K., STEFANAKOS, E.K., GOSWAMI, D.Y., 2012. Synthesis, characterization, and applications of ZnO nanowires, *J. Nanomater.* 2012: 22 pages.

ZHANG, Y., YU, K., JIANG, D., ZHU, Z., GENG, H., LUO, L., 2005. Zinc oxide nanorod and nanowire for humidity sensor, Appl. Surf. Sci. 242: 212–217.

ZHANG, Z., BAO, C., YAO, W., MA, S., ZHANG, L., HOU, S., 2011. Influence of deposition temperature on the crystallinity of Al-doped ZnO thin films at glass substrates prepared by RF magnetron sputtering method, Superlattice. Microst. 49: 644–653.

http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc#/media/File:Zinc_fragment_sublimed_and_1cm3_cube.jp

<http://www.genbilim.com/fen-bilimleri/kimya/cinko/>

http://www.zinc.org/basics/zinc_properties

<https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87inko>

ÖZGEÇMİŞ

30 Kasım 1970 yılında Adana'da doğdu. İlkokulu Celalettin Sayhan İlkokulu'nda, ortaokulu Ferit Çobanoğlu Ortaokulu'nda, lise öğrenimini ise Borsa Lisesi'nde tamamladı. 1988 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde lisans eğitime başladı.1993 yılında Milli Eğitim Bakanlığı bünyesinde Fizik öğretmeni olarak göreve başladı. Halen Seyhan Rotary Anadolu Lisesi'nde Fizik öğretmeni olarak görevine devam etmekte. 2011 yılında, uzun yıllar ara verdiği yüksek lisans eğitime başladı. 2016 Şubat ayında yüksek lisans eğitimini tamamladı.