



**USCVD YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN ZnO ve MgZnO KRİSTALLERİNİN
YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Polat NARİN

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Polat NARİN

01/07/2021

USCVD YÖNTEMİ İLE BÜYÜTÜLEN ZnO VE MgZnO KRİSTALLERİN YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Polat NARİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Son yıllarda oksit temelli malzemeler üzerine çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Geniş yasak bant aralığı (3,37 eV) ve yüksek eksiton bağlanma enerjisi ~60 meV nedeniyle Çinko oksit (ZnO) önemli bir yarıiletken haline gelmiştir. ZnO kristalinin bu kendine özgü özellikleri nedeniyle yeni kristal büyütme/hazırlama teknikleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu yeni kristal büyütme tekniklerinden birisi geleneksel Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yönteminin sıvı öncü ile geliştirilmesi ile elde edilen Ultrasonik Sprey Kimyasal Buhar Biriktirme (USCVD) yöntemidir. Bu tez çalışmasında USCVD yöntemi ile hekzagonal kristal fazda ZnO ve Magnezyum çinko oksit (MgZnO) kristallerin büyüme davranışları, yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri incelemiştir. ZnO ve MgZnO kristalleri farklı büyüme sıcaklığı, öncü molaritesi, ultrasonik titreştirici gücü, farklı alttaş kullanımı, tavlama işlemi gibi fiziksel ve kimyasal parametrelerin kristallerin büyüme özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Yüksek kristal kalitesi ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü için ZnO kristal büyümesi için uygun büyütme sıcaklığının 350 °C olduğu belirlenmiştir ve elde edilmiştir. Büyüyen ZnO kristallerinin büyüme yönelimi polikristal ZnO yapılarının yanısıra genellikle (0002) yönelimlidir ve ayrıca ZnO'in hekzagonal faz ile alakalı diğer pikleri de görülmüştür. İncelenen MgZnO kristal büyütme çalışmalarında büyüme sıcaklığının değişimine bağlı olarak çözeltideki Mg oranı aynı olmasına karşın MgZnO kristallerin Mg oranlarının arttığı görülmüştür. Ayrıca, elde edilen sonuçlara göre hazırlanan Mg oranı ile büyütülen MgZnO kristallerinin Mg oranlarının aynı olmadığı ancak Mg oranlarının doğrusal olarak değiştiği belirlenmiştir. ZnO ve MgZnO kristallerin çoğunlukla altıgen veya üçgenimsi şekillerde 2-boyutlu nanopul veya 3-boyutlu adacık yapılarda büyüdüğü görülmüştür. ZnO ve MgZnO büyütme çalışmalarının sonucunda yüksek kristal kalitesine sahip kristaller için en uygun büyütme şartları belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : ZnO, MgZnO, USCVD, sis biriktirme, nanoyapılar

Sayfa Adedi : 135

Danışman : Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF ZnO AND
MgZnO CRYSTALS GROWN BY USCVD

(Ph. D. Thesis)

Polat NARİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

In recent years, the studies on oxide-based materials have gained importance. Zinc oxide (ZnO) has become an important semiconductor material due to its wide bandgap (3.37 eV) and a large exciton binding energy (~60 meV). Because of these unique properties of ZnO, it is started to enhance new growth/preparing methods. One of the new growth methods is Ultrasonic Spray Chemical Vapor Deposition (USCVD) which is conventional CVD enhanced with liquid precursor delivery. In this thesis, the growth behavior, structural, electrical, and optical properties of ZnO and Magnesium Zinc oxide (MgZnO) grown by USCVD are investigated. The effect of some physical and chemical parameters such as different growth temperatures, precursor molarity, ultrasonic transducer power, usage of different substrates, annealing process were investigated on the growth properties of ZnO and MgZnO crystals. For high crystal quality and lower surface roughness, the optimum growth temperature for ZnO crystals is determined to be 350 °C. As well as the polycrystalline structure of ZnO, the growth direction of grown ZnO crystals is dominant in (0002) direction and also other peaks related to the wurtzite phase of ZnO are shown. In grown MgZnO crystal growth, though Mg content in the precursor is kept as constant depending on different growth temperatures, Mg mole fraction in MgZnO crystals is found to be different from initial Mg content. Also, according to obtained results initial Mg content and Mg mole fractions in grown MgZnO crystals were not the same but there is a linear relation between them. Growth behavior of ZnO and MgZnO crystals are mostly hexagonal and triangular shaped with two dimensional nanoplatelets and three dimensional islands. As a result of ZnO and MgZnO growths, the optimum growth conditions for high quality crystals have been determined.

Science Code : 20227

Key Words : ZnO, MgZnO, USCVD, mist deposition, nanostructures

Page Number : 135

Supervisor : Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca ve bu doktora tezimde desteğini hiçbir zaman esirgemeyen bilgi ve birikimi ile eğitim hayatıma yön veren değerli danışman hocam Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN'e göstermiş olduğu sabır ve emek için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez numunelerinin ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen ve birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum sayın hocam Prof. Dr. Abdullah YILDIZ'a teşekkür ederim. Tez çalışmasının olgunlaşmasında ve gelişmesinde emekleri olan Tez İzleme Komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Mehmet Mahir BÜLBÜL ve Doç. Dr. Özlem DUYAR COŞKUN hocalarıma ayırmış oldukları değerli vakitleri ve çok değerli yorumları için teşekkür ederim.

Tez numunelerin fabrikasyonu ve gerçekleştirilen ölçümler için Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nin imkanlarını sunan sayın Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a, optik ölçümlerde Gazi Üniversitesi Kimya bölümü öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Gökhan DEMİREL'e ve elektriksel ölçümlerin gerçekleştirildiği İstanbul Üniversitesi Fizik bölümü Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarı sorumlusu sayın Prof. Dr. Ayşe EROL'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Satı NARİN, babam Bilal NARİN, abim Onur NARİN'e verdikleri emeğin bir karşılığı olmadığını belirterek teşekkürü bir borç bilirim. Lisansüstü çalışmalarım ve akademik hayatımda verdiği destekler için meslektaşım, yol arkadaşım ve sevgili eşim Ece Kutlu Narin'e sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 116F197 no'lu "USPECVD Yöntemi ile Büyütülen MgZnO/ZnO Çokluyapıların Büyüme Davranışları ve 2DEG Özelliklerinin İncelenmesi" isimli Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) proje kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ZnO ve MgZnO MATERYAL ÖZELLİKLERİ.....	9
2.1. ZnO Kristali.....	9
2.1.1. ZnO kristalinin yapısal özellikleri.....	9
2.1.2. ZnO kristalinin elektronik özellikleri.....	11
2.1.3. ZnO kristalinin optiksel özellikleri	12
2.2. MgZnO Kristali	15
2.3. ZnO Büyütmelerinde Alttaş Seçimi	17
2.4. MgZnO/ZnO Çokluyapılar	18
3. İNCE FİLM BÜYÜTME YÖNTEMLERİ.....	19
3.1. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	20
3.1.1. Termal buharlaşma.....	21
3.1.2. Pulsu lazer biriktirme (PLD).....	22
3.1.3. Moleküler demet epitaksi (MBE)	22
3.1.4. RF-DC püskürtme	22

	Sayfa
3.2. Çözelti Temelli Kimyasal İşlemler (SBC)	23
3.2.1. Sol-jel işlemleri	23
3.2.2. Sprey piroliz yöntemi	25
3.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	26
3.3.1. Düşük basınçta kimyasal buhar biriktirme (LPCVD)	28
3.3.2. Plazma ile geliştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD).....	28
3.3.3. Atmosferik basınçta kimyasal buhar biriktirme (APCVD).....	29
3.4. Ultrasonik Sprey Kimyasal Buhar Biriktirme (USCVD).....	30
3.4.1. USCVD yöntemi ile ZnO ve MgZnO ince film büyütme	33
4. DENEYSEL TEKNİKLER.....	37
4.1. ZnO ve MgZnO Kristallerin Hazırlanması.....	37
4.1.1. Ultrasonik sprej kimyasal buhar biriktirme sistemi	37
4.1.2. Sıvı öncü hazırlanması.....	39
4.1.3. Alttaşların hazırlanması	41
4.1.4. ZnO ve MgZnO büyütme için deney şartları.....	42
4.2. Yapısal Karakterizasyon.....	48
4.2.1. X-ışınları kırınımı	48
4.2.2. Atomik kuvvet mikroskobu.....	50
4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu	52
4.3. Optiksel Karakterizasyon	53
4.3.1. Ultraviyole-görünür bölge spektrofotometresi.....	53
4.3.2. Raman spektroskopisi	55
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
5.1. SLG Alttaş Üzerine ZnO Büyütmeleri	59

	Sayfa
5.1.1. Ultrasonik titreştiricinin ZnO büyüme üzerine etkisi	59
5.1.2. Sıvı öncü molaritesinin ZnO büyüme üzerine etkisi	64
5.1.3. Farklı atmosferlerde tavlamanın ZnO büyüme üzerine etkisi.....	70
5.2. SiO ₂ /Si Alttaş Üzerine ZnO Büyütmeleri.....	74
5.2.1. SiO ₂ /Si alttaş üzerine farklı sıcaklıklarda ZnO büyütmeleri	74
5.2.2. SiO ₂ /Si alttaş üzerine düşük sıcaklıklarda ZnO büyütmeleri ve tavlamanın etkisi	79
5.3. C-Al ₂ O ₃ Alttaş Üzerine ZnO Büyütmeleri	84
5.4. SLG Alttaş Üzerine MgZnO Büyütmeleri	90
5.4.1. Mg oranının MgZnO büyümesi üzerine etkisi	90
5.4.2. Büyütme sıcaklığının MgZnO büyümesi üzerine etkisi	96
5.5. SiO ₂ /Si Alttaş Üzerine MgZnO Büyütmeleri	102
5.6. C-Al ₂ O ₃ Alttaş Üzerine MgZnO Büyütmeleri	104
5.7. MgZnO/ZnO Büyütmeleri ve Olası 2DEG incelemesi	108
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ	131

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Rs, zb, ve wz yapılarıdaki ZnO kristalinin toplam enerji hesaplamaları ...	10
Çizelge 2.2. ZnO kristaline ait bazı önemli parametreler	10
Çizelge 2.3. Wz ve rs fazlarda MgZnO kristalinin örgü parametre değişimi	15
Çizelge 2.4. ZnO ve bazı tek kristal altaşlar arasındaki örgü uyumsuzluğu	17
Çizelge 3.1. CVD yönteminin bazı avantaj, dezavantaj ve uygulama alanları.....	30
Çizelge 4.1. Büyütmelerde kullanılan altaşlar ve temizlik işlemi.....	42
Çizelge 4.2. UT gücünün etkisini incelemek için gerçekleştirilen ZnO büyütmeye şartları...	42
Çizelge 4.3. Sıvı öncü molaritesine bağlı olarak incelenen ZnO büyütmeye şartları	43
Çizelge 4.4. Tavlama etkisi ve tavlama ortamına bağlı olarak incelenen ZnO büyütmeye şartları	43
Çizelge 4.5. Farklı büyütmeye sıcaklıkları için SiO ₂ /Si(100) üzerine ZnO büyütmeye şartları	44
Çizelge 4.6. Farklı büyütmeye sıcaklıkları ve tavlama etkisi için SiO ₂ /Si(100) üzerine ZnO büyütmeye şartları.....	44
Çizelge 4.7. Düşük sıcaklıklar için c-Al ₂ O ₃ üzerine ZnO büyütmeye şartları.....	45
Çizelge 4.8. Farklı Mg oranları için MgZnO büyütmeye şartları.....	45
Çizelge 4.9. Farklı büyütmeye sıcaklıkları için MgZnO büyütmeye şartları.	45
Çizelge 4.10. Farklı büyütmeye sıcaklıkları için SiO ₂ /Si üzerine MgZnO büyütmeye şartları	46
Çizelge 4.11. Al katkılı ve katkısız MgZnO kristallerin büyütmeye şartları.....	46
Çizelge 4.12. ZnO tampon katman büyütmeye şartları	47
Çizelge 4.13. ZnO tampon katman üzerine n-MgZnO büyütmeye şartları	47
Çizelge 4.14. Shimadzu UV-1700 cihazına ait optik sistem kısaltmaları ve açıklamaları.....	54
Çizelge 5.1. RE025, RE026 ve RE027 kodlu ZnO kristallere ait yapısal ve optiksel parametreler	64

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.2. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu ZnO kristallere ait yapısal ve optik parametreler	69
Çizelge 5.3. RF047 ve RF048 kodlu ZnO kristallere ait yapısal ve optiksel parametreler	74
Çizelge 5.4. RE039, RE040 ve RE041 kodlu ZnO kristallere ait yapısal parametreler	79
Çizelge 5.5. RE043, RE044, RE045 ve RE046 kodlu ZnO kristallere ait yapısal parametreler	84
Çizelge 5.6. RF064 ve RF065 kodlu ZnO kristallere ait yapısal parametreler.....	89
Çizelge 5.7. RF054, RF049, RF051 ve RF052 kodlu MgZnO kristaller için bazı yapısal ve optiksel parametreler	95
Çizelge 5.8. RF057, RF051 ve RF058 kodlu MgZnO krsitaller için bazı yapısal ve optiksel parametreler	100
Çizelge 5.9. RF059, RF060 ve RF061 kodlu MgZnO kristaller için bazı yapısal parametreler	104
Çizelge 5.10. RF066, RF066-T, RF067 ve RF067-T kodlu MgZnO kristaller için bazı yapısal parametreler	108

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. ZnO-temelli bazı uygulamalar	2
Şekil 1.2. Yıllara göre ZnO içerikli yayın sayısı	3
Şekil 1.3. Yıllara göre USCVD yöntemi ve USCVD ile büyütülmüş ZnO üzerine yapılan yayın sayıları	4
Şekil 1.4. a) Yıllara göre MgZnO üzerine yapılan yayın sayıları b) USCVD yöntemi ile büyütülmüş MgZnO üzerine yapılan yayın sayıları.....	5
Şekil 2.1. ZnO kristalinin a) Kaya-tuzu (rs), b) Çinko-sülfür ve c) Hekzagonal (wz) fazları	9
Şekil 2.2. Kutuplu ve kutupsuz ZnO yüzeyleri a) yandan b) üstten şematik gösterimi	11
Şekil 2.3. ZnO kristalinin a) Brillioin yüksek simetri noktaları ve b) elektronik bant yapısı	12
Şekil 2.4. Katkısız ZnO kristaline ait soğurma spektrumu	13
Şekil 2.5. ZnO kristali için bazın Zn ve O kusur seviyeleri elektronik geçişleri.....	14
Şekil 2.6. ZnO kristaline ait bazı optik modlar	14
Şekil 2.7. Mg oranına bağlı olarak MgZnO kristalinin bant aralığının değışimi.....	16
Şekil 2.8. Oda sıcaklığında MgZnO kristalinin soğurma spektrumu.....	16
Şekil 2.9. a) Deneysel ve b) hesaplamalı olarak 2DEG oluşumu MgZnO/ZnO çoklu yapının c) şematik ve d) SEM görüntüsü.....	18
Şekil 3.1. İnce film büyüme modları	19
Şekil 3.2. Bazı ince film hazırlama yöntemleri.....	20
Şekil 3.3. Şematik olarak bir PVD yöntemi.....	21
Şekil 3.4. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi	23
Şekil 3.5. Sol-jel yönteminin temel adımları	24
Şekil 3.6. Sprey piroliz yönteminin şematik gösterimi.....	25

Şekil	Sayfa
Şekil 3.7. CVD yöntemi ile kristal büyüme süreci	26
Şekil 3.8. Bağlanma enerjisi ile kimyasal ve fiziksel yüzeye tutunma ilişkisi	27
Şekil 3.9. LPCVD sistemine ait şematik gösterim.....	28
Şekil 3.10. PECVD sistemine ait şematik gösterim.....	29
Şekil 3.11. APCVD sistemine ait şematik gösterim	30
Şekil 3.12. a) Sıcak duvarlı reaktör, b) hassas kanallı reaktör, c) doğrusal kaynaklı USCVD sistemlerine ait şematik gösterim	31
Şekil 3.13. Sıcak duvarlı USCVD yöntemine ait şematik gösterim	32
Şekil 3.14. USCVD yöntemi ile ZnO nanoparçacıkların oluşumunun şematik gösterim.....	35
Şekil 4.1. X-ışınlarının kristal düzlemleri arasından saçılması ve Bragg yasasının şematik gösterimi	49
Şekil 4.2. AFM tekniğine ait şematik gösterim	51
Şekil 4.3. SEM tekniğine ait şematik gösterim.....	52
Şekil 4.4. Shimadzu UV-1700 cihazına ait optik sistem	54
Şekil 4.5. Rayleigh, Stokes Raman ve Anti-Stokes Raman saçılmalarına ait elektronik geçişler	56
Şekil 4.6. Şematik Raman spektrumu.....	56
Şekil 5.1. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait XRD sonuçları	60
Şekil 5.2. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait geçirgenlik spektrumu	62
Şekil 5.3. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait soğurma spektrumu.....	62
Şekil 5.4. RE026 kodlu ZnO kristaline ait dA/dE türevinin enerjiye bağlı değişimi	63
Şekil 5.5. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait konfokal Raman ölçüm sonuçları.....	63
Şekil 5.6. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu numunelere ait XRD sonuçları.....	65
Şekil 5.7. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu numunelere ait geçirgenlik spektrumu.....	67

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu numunelere ait soğurma spektrumu.....	67
Şekil 5.9. 400 nm dalgaboyunda molariteye bağlı ZnO kristallerin soğurma ve geçirgenlik değerleri	68
Şekil 5.10. Molariteye bağlı ZnO kristallerin konfokal Raman ölçüm sonuçları.	68
Şekil 5.11. RF047 ve RF048 kodlu numunelere ait XRD sonuçları.....	71
Şekil 5.12. RF047 ve RF048 kodlu numunelere ait tavlama işleminin yapısal bazı parametrelere etkisi	71
Şekil 5.13. a) RF048 ve b) RF047 kodlu numunelere optik geçirgenlik sonuçları	73
Şekil 5.14. a) RF048 ve b) RF047 kodlu numunelere optik soğurma sonuçları.....	73
Şekil 5.15. RE039, RE040 ve RE041 kodlu numunelere ait XRD sonuçları	75
Şekil 5.16. RE039, RE040 ve RE041 kodlu numunelere ait konfokal Raman ölçüm sonuçları.....	78
Şekil 5.17. RE039, RE040 ve RE041 kodlu numunelere ait Raman parametrelerinin sıcaklıkla sonuçları.....	78
Şekil 5.18. RE043, RE044, RE045 ve RE046 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları.....	80
Şekil 5.19. RE043, RE044, RE045 ve RE046 kodlu numunelere ait konfokal Raman ölçüm sonuçları.....	83
Şekil 5.20. Büyütme sıcaklığının ZnO yüzey pürüzlülüğü ile değişimi	85
Şekil 5.21. a) RF064 ve RF064-T, b) RF065 ve RF065-T kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları.....	86
Şekil 5.22. RF049, RF051, RF052 ve RF054 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları.....	90
Şekil 5.23. Hazırlanan sıvı öncü içerisindeki Mg miktarı ile hesaplanan Mg oranının değişimi.....	90
Şekil 5.24. RF049, RF051, RF052 ve RF054 kodlu numunelere ait soğurma spektrumu.....	93
Şekil 5.25. RF049, RF051, RF052 ve RF054 kodlu numunelere Tauc metodu uygulanması	93

Şekil	Sayfa
Şekil 5.26. Mg oranına bağlı olarak örgü parametresi ve Tauc bant aralığının değişimi.....	95
Şekil 5.27. RF051, RF57 ve RF058 kodlu numunelere ait XRD sonuçları.....	96
Şekil 5.28. RF057, RF051 ve RF058 kodlu numunelere ait soğurma spektrumu	98
Şekil 5.29. RF051, RF57 ve RF058 kodlu numunelere Tauc metodu uygulanması	98
Şekil 5.30. Büyütme sıcaklığına bağlı olarak Mg oranının ve Tauc bant aralığının değişimi.....	100
Şekil 5.31. Farklı sistemlerde ve farklı sıcaklıklarıda büyütülen MgZnO kristallerin Mg oranına bağlı Tauc bant aralığının değişimi....	100
Şekil 5.32. a) RF059, b) RF060 ve c) RF061 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları	101
Şekil 5.33. RF066, RF066-T, RF067 ve RF067-T kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları.....	104
Şekil 5.34. a) RF083 ve b) RF088 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları	108
Şekil 5.35. RF083 ve RF088 kodlu numunelere ait elektriksel ölçüm sonuçları	110

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Ultrasonik Sprey Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi	38
Resim 4.2. Resim 4.2. USCVD sistemin detaylı gösterimi a) sis buharı oluşturma sistemi, b) sıvı öncü, c) sis buharının kuartz tüp içine gönderilmesi ve d) fırının iç kısmı ve SiO ₂ /Si alttaşı konumlandırması	39
Resim 4.3. Öncü hazırlanmasında kullanılan hassas terazi, manyetik karıştırıcı ve alttaş temizliğinde kullanılan ultrasonik banyo.....	30
Resim 4.4. a) Çinko asetat dihidrat ve Magnezyum asetat tetrahidrat tuzları, b) manyetik karıştırıcı yardımı ile çözeltinin hazırlanması	41
Resim 4.5. Hazırlanan MgZnO/ZnO çokluyapıları 1x1 cm ² ve van der Pauw kontak geometrisi.....	48
Resim 4.6. AFM-workshop TT-2 a) AFM ölçüm sistemi, b) kontrol sistemi	51
Resim 4.7. Hitachi SU5000 taramalı elektron mikroskop sistemi.....	53
Resim 4.8. Optik ölçümlerde kullanılan UV-Görünür bölge spektrofotometresi.....	55
Resim 4.9. Jasco NRS-4500 Konfokal Raman spektroskopisi sistemi	57
Resim 5.1. a) RE025, b) RE026 ve c) RE027 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 µm ² alanda taranmıştır)	60
Resim 5.2. a) RE030, b) RE031, c) RE032 ve d) RE033 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 µm ² alanda taranmıştır)	65
Resim 5.3. a) RF048, b) RF048 Ar-T, c) RF048 O ₂ -T, d) RF047, e) RF047 Ar-T, f) RF047 O ₂ -T, g) SLG ve h) MG kodlu numune ve alttaşlara ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 µm ² alanda taranmıştır)	72
Resim 5.4. (a-c) RE039, d) RE040, e) RE041 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri f) RE039 kodlu numuneye ait yüzey profili (AFM) görüntüleri 10x10, 5x5 ve 2x2 µm ² alanlarda taranmıştır).....	75
Resim 5.5. (a)-(b) RE039, c) RE040 ve d) RE041 kodlu numunelere ait SEM görüntüleri.....	76
Resim 5.6. Farklı büyütme sıcaklıklarında ZnO nanopul yapısının morfolojisindeki değişim.....	77

Resim	Sayfa
Resim 5.7. a) RE043, b) RE044, c) RE045 ve d) RE046 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri Farklı büyütme sıcaklıklarında ZnO nanopul yapısının morfolojisindeki (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	80
Resim 5.8. a) RE043, b) RE044, c) RE045 ve d) RE046 kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri	81
Resim 5.9. a) RE043, b) RE044, c) RE045 ve d) RE046 kodlu numunelere ait yandan SEM görüntüleri	82
Resim 5.10. a) RF062, b) RF063, c) RF064 ve d) RF065 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	85
Resim 5.11. a) RF064-T, b) RF065-T kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	86
Resim 5.12. a) ve c) RF064 b) ve d) RF065 kodlu numunelere ait SEM görüntüleri üstten ve yandan görünüm.....	87
Resim 5.13. a) ve c) RF064-T b) ve d) RF065-T kodlu numunelere ait SEM görüntüleri üstten ve yandan görünüm.....	87
Resim 5.14. a) RF054, b) RF049, c) RF051 ve d) RF052 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	91
Resim 5.15. a) RF054, b) RF049, c) RF051 ve d) RF052 kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri	91
Resim 5.16. a) RF057, b) RF051 ve c) RF058 kodlu numunere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	96
Resim 5.17. a) RF057, b) RF051 ve c) RF058 kodlu numunere ait üstten SEM görüntüleri.....	97
Resim 5.18. a) RF059, b) RF060 ve c) RF061 kodlu numunere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	102
Resim 5.19. a) RF066, b) RF067, c) RF066-T ve d) RF067-T kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	104
Resim 5.20. a) RF066, b) RF067, kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri c) RF066, d) RF067 kodlu numunelere ait yandan SEM görüntüleri.....	106
Resim 5.21. a) RF066-T ve b) RF067-T kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri ..	106
Resim 5.22. a) RF080 ve b) Zn-yüzlü ZnO tek kristal alttaşa ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır).....	107

Resim**Sayfa**

Resim 5.23. a) RF083 ve b) RF088 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri ve RF088 yüzey Profili (AFM görüntüleri 5x5 μm^2 alanda taranmıştır).....	109
--	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Å	Angstrom
a_0	Örgü parametresi
c_0	Örgü parametresi
°C	Santigrat celsius
d	Düzlemler arası mesafe
D	Kristalik boyutu
E_g	Yasak bant aralığı
C_{11}	Elastik sabiti
C_{12}	Elastik sabiti
C_{13}	Elastik sabiti
C_{33}	Elastik sabiti
C_{44}	Elastik sabiti
C_{66}	Elastik sabiti
h	Miller indisi
k	Miller indisi
i	Miller indisi
l	Miller indisi
m^2	Metrekare
m_e^*	Elektron etkin kütlesi
m_h^*	Deşik etkin kütlesi
M	Molarite
N	Mol sayısı
V	Hacim
α	Optik Soğurma
μm^2	Mikrometrekare

Kısaltmalar**Açıklamalar**

2DEG	2-boyutlu elektron gazı
AA	Asetik asit
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
Al	Alüminyum atomu
As	Arsenik atomu
ASTN	Aseton
ATK	Atomistik tool kit
C-Al₂O₃	C-yüzlü Safir alttaş
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
DFT	Yoğunluk fonksiyonel teorisi
DİS	Deiyonize saf su
DLE	Derin seviye salınımı
ETN	Etanol
FET	Alan etkili transistör
FTO	Flor katkılı Kalay Oksit
Ga	Galyum atomu
GaN	Galyum Nitrür
ITO	İndiyum Kalay Oksit
İPN	İzopropanol
H	Hidrojen atomu
K	Potasyum atomu
LA	Boyuna akustik fonon
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
Li	Lityum atomu
MBE	Moleküler demek epitaksi
MG	Mikroskop camı
Mg	Magnezyum atomu
MgO	Magnezyum Oksit
MgZnO	Magnezyum Çinko Oksit
N	Azot atomu
O	Oksijen atomu

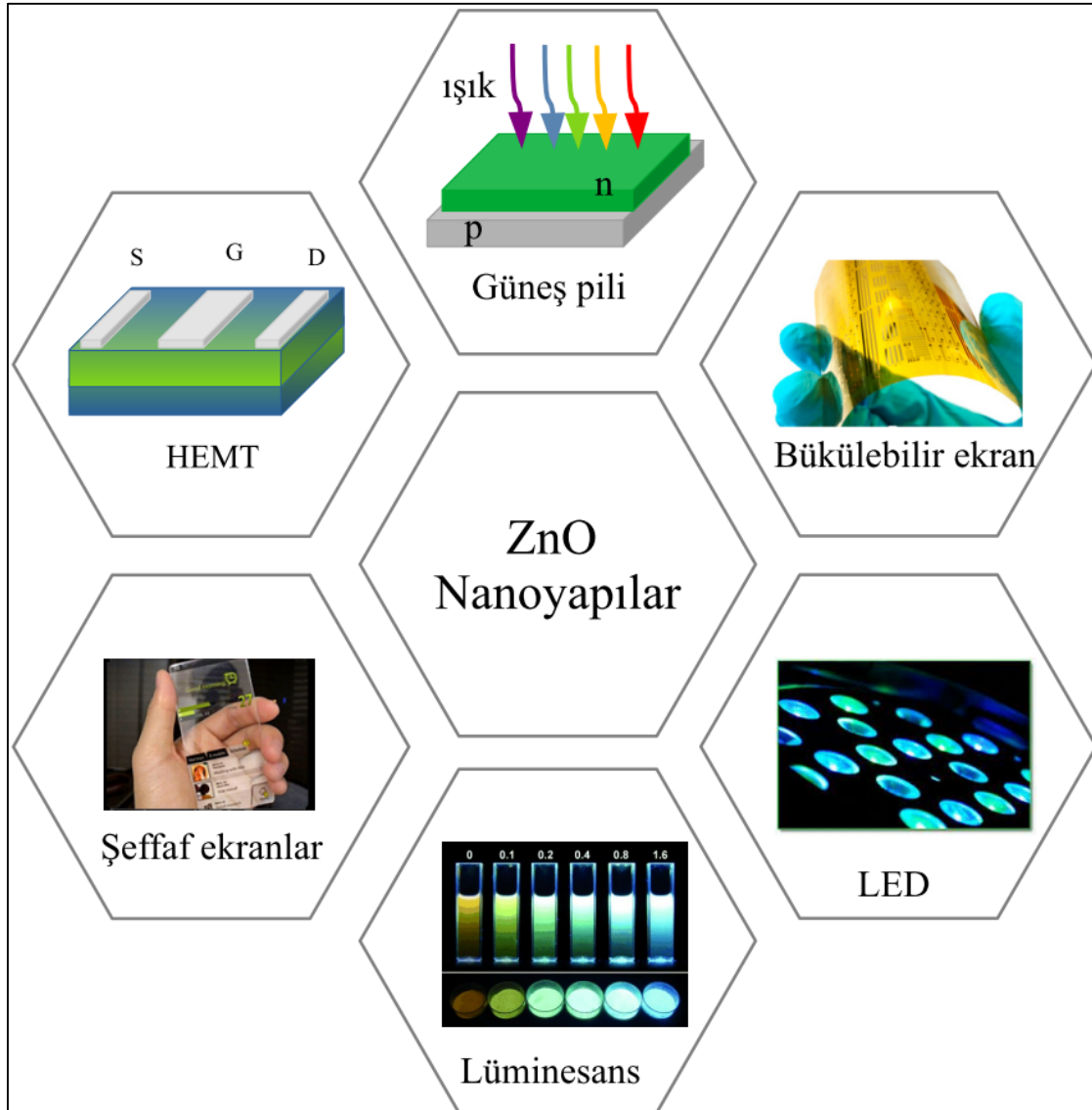
Kısaltmalar**Açıklamalar**

O_i	Oksijen arayerleşimi
P	Fosfor atomu
PLD	Pulslu Lazer biriktirme
RF	Radyo frekansı
Rs	Kaya-tuzu kristal fazı
RMS	Kök kare ortalama
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SLG	Soda-lime cam
Si	Silikon
SiO₂	Silikon DiOksit
TA	Enine akustik fonon
USCVD	Ultrasonik sprej kimyasal buhar biriktirme
UT	Ultrasonik titreştirici
UV	Ultraviyole
Vo	Oksijen kusuru
V_{Zn}	Çinko kusuru
Wz	Hekzagonal kristal fazı
XRD	X-ışınları kırınımı
Zb	Çinko-sülfür kristal fazı
Zn	Çinko
Zn_i	Çinko arayerleşimi
ZnO	Çinko Oksit

1. GİRİŞ

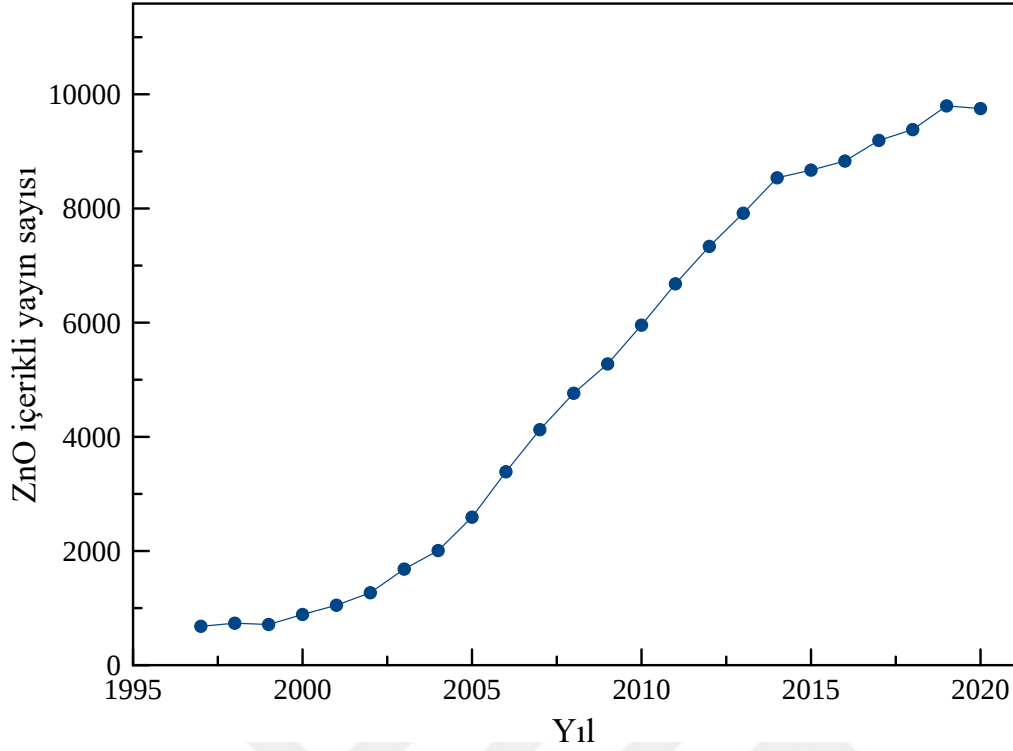
Yarıiletken kristaller üzerine araştırmalar, 1782 yılında Volta tarafından yarıiletken fikrinin ortaya atılmasına dayanmaktadır [1]. O tarihten itibaren, yarıiletken kristaller üzerine araştırmalar yoğunlaştırılmıştır. Günümüzde birçok elektronik ve optoelektronik uygulamalarda yarıiletken kristaller kullanılmaktadır [2-7]. Son yıllarda şeffaf iletken oksit kristaller (TCO) üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. İndiyum kalay oksit (ITO), Flor katkılı kalay oksit (FTO) gibi TCO'lar en çok tercih edilen oksit kristallerdir. ITO ve FTO gibi filmler ayrıca alttaş olarak kullanılmaktadır. Yarıiletken kristaller yasak bant aralıkları nedeniyle dar ve geniş bant aralıklı olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Çinko oksit (ZnO) geniş bant aralıklı yarıiletken sınıfında yer almaktadır. ZnO, 3,37 eV yasak bant aralığı ve 60 meV yüksek eksiton bağlanma enerjisi sayesinde son yıllarda onu birçok araştırmaya konu haline gelmiştir. ZnO-temelli nanoyapılar şekil 1.1 ile görüldüğü gibi güneş pilleri, transistörler, ışık yayan diyotlar (LED), Ultra-viyole (UV) dedektörler, geçirgen iletken elektrodlar, ince film transistörler ve sensörler gibi geniş bir uygulamaya sahiptir. [8-18]. Özellikle geniş bant aralığı sayesinde UV-temelli uygulamalar için önemli bir yarıiletken kristaldir.

ZnO görünür ve yakın infrared bölgelerde yüksek geçirgenliğe sahip olması, farklı üretim tekniklerine sahip olması, düşük üretim maliyeti, çevre dostu olması ve doğada bol bulunması nedeni son yıllarda üzerine yapılan çalışmaların hızla arttığı bir yarıiletken kristaldir. Bu özellikleri sebebi ile şekil 1.2'de de görüldüğü gibi son 2000'li yıllardan sonra araştırmalar hızlanmıştır. ZnO çinko sülfür (zb), kaya tuzu (rs) ve hekzagonal (wz) gibi üç farklı fazda kristallenebilmektedir. Isıl olarak wz-ZnO en kararlı fazdır. Wz-ZnO kristali dönme simetrisi eksikliği nedeniyle doğal ve piezoelektrik kutuplanmaya sahiptir. Bu, Galyum Nitrür (GaN)-temelli AlGaN/GaN veya AlInN/GaN gibi çoklu yapılarda da görülen iki boyutlu elektron gazı (2DEG) oluşumunun da kaynağıdır. Bu sebeple GaN-temelli çoklu yapılara benzer şekilde ZnO-temelli çoklu büyütmeler yarıiletken kristallerde de gerçekleştirilmektedir [19]. Magnezyum oksit (rs-MgO) ve wz-ZnO kristalleri ile sahip oldukları Zn^{+2} (0,57 Å) ve Mg^{+2} (0,60 Å) iyonlarının yarıçaplarının benzer olması sebebiyle MgZnO alaşımı oluşturulabilmektedir [20].



Şekil 1.1. ZnO-temelli bazı uygulamalar [17-19]

Elde edilen MgZnO kristali ZnO ile çoklu yapı oluşturulduğunda, MgZnO/ZnO çoklu yapısının arayüzeyinde 2DEG davranışının meydana geldiği görülmüştür [20-23]. Bu çoklu yapılar ile bazı çalışmalarda düşük sıcaklık bölgesinde $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerlerde 2DEG hareketliliği gözlemlendiği belirtilmiştir [23]. Günümüzde ZnO kristaller oldukça çeşitli büyütme yöntemleri ile üretilmektedir. Bölüm 3’de genişçe yer verilecek olan bu büyütme yöntemlerinden Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), Kimyasal Çözelti Temelli işlemler (CBS) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) şeklinde sınırlandırılmaktadır [24-28]. Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Sol-jel işlemleri ve Metal Organik CVD (MOCVD) sırasıyla PVD, SBC ve CVD yöntemlerine örneklerdir.

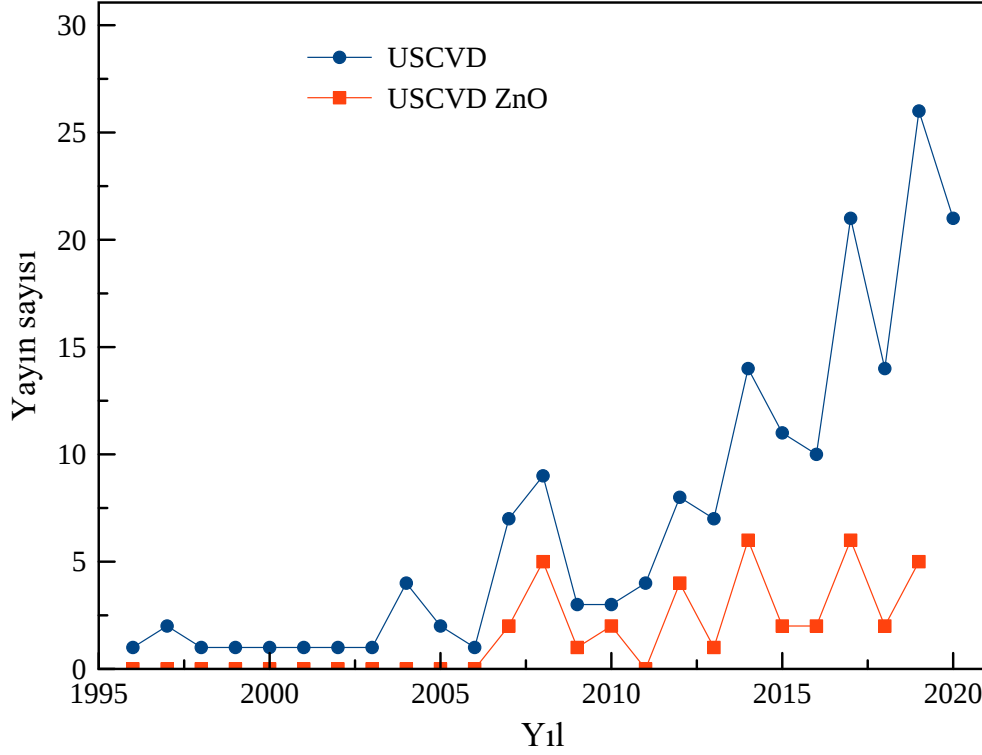


Şekil 1.2. Yıllara göre ZnO içerikli yayın sayısı (veriler Web of Science üzerinden taranmıştır)

MBE ve MOCVD gibi büyütme yöntemleri ile yüksek kristal kalitesine sahip ZnO kristallerin büyütülmesine olanak sağlarken, bu sistemlerin pahalı vakum ekipmanları ve kullanılan zehirli metal gazları nedeniyle araştırmacılar daha zararsız ve ucuz büyütme yöntemleri tercih etmişlerdir. Özellikle sol-jel yöntemleri ile gerçekleştirilen ZnO büyütme yöntemleri son yıllarda birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır. Sol-jel yöntemi vakum gerektirmeyen bir yöntemdir ancak bu yöntemde alttaş üzerinde oluşan ZnO, polikristal ve yüksek oranda yapısal kusurlar içerdiğinden düşük kristal kalitesine sahiptir [29]. Bu yöntemler ile elde edilen ZnO ince filmlerin sahip olduğu yapısal kusurlar nedeniyle herhangi bir aygıt dönüşmesi durumunda düşük performanslı cihazların oluşumunu meydana getirmektedir [30].

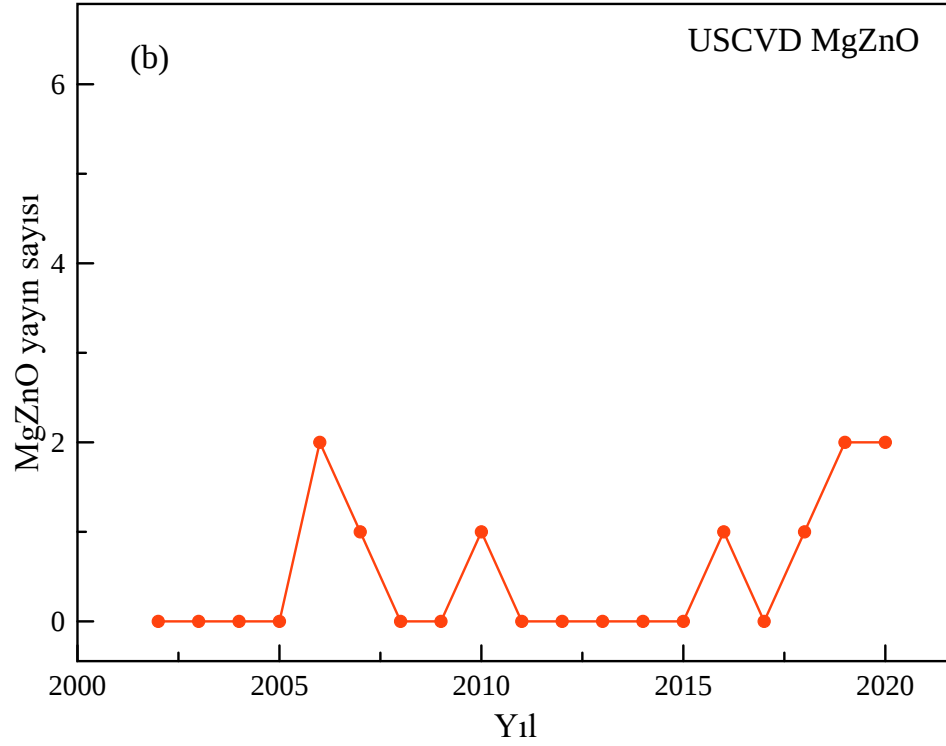
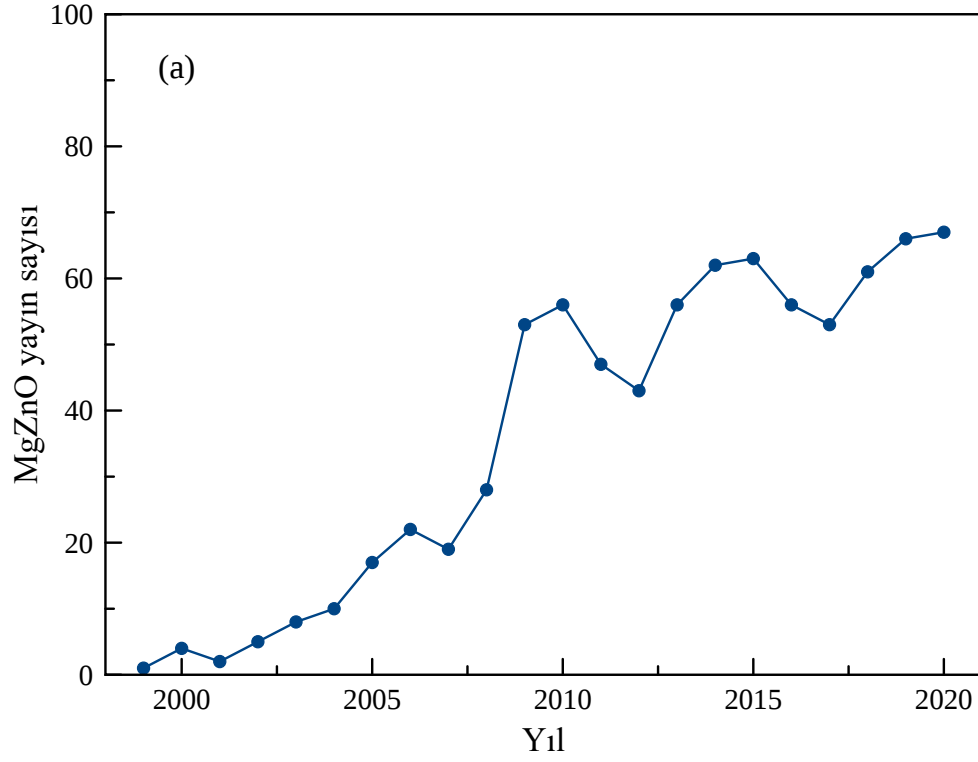
Son yıllarda CVD yöntemi üzerindeki değişiklikler ile ultrasonik sprey kimyasal buhar biriktirme yöntemi (USCVD) olarak adlandırılan yeni bir kristal büyütme yöntemi elde edilmiştir [31]. Bu yöntem ile oluşturulan çözelti, bir ultrasonik titreştirici ile soğuk buhar haline getirilerek sürücü bir gaz yardımı ile (O_2 , N_2 veya Ar) reaktöre gönderilmektedir. Sıcak duvarlı bir CVD reaktör içerisinde kimyasal reaksiyonlar sonucu bir alttaş üzerinde ZnO-temelli ince filmler oluşturulmaktadır [32]. Sürücü gaz olarak genellikle O_2 gazı tercih

edilmektedir ki bu durum oluşan kristal içerisinde oksijen boşlukları (V_O) gibi yapısal kusurları azaltmaktadır. Bu yöntemin atmosfer basıncında gerçekleştirilmesi, zehirsiz kaynak malzemelerin kullanımı ve en önemlisi CVD-temelli bir işlem olması bu yöntemi dikkat çekici hale getirmiştir.



Şekil 1.3. Yıllara göre USCVD yöntemi ve USCVD ile büyütülmüş ZnO üzerine yapılan yayın sayıları (veriler Web of Science üzerinden taranmıştır)

Şekil 1.3 ile yıllara göre USCVD yönteminin kullanıldığı yayınlar ve bu yöntemle elde edilen ZnO yayınlara ait sayılar verilmiştir. Görüldüğü gibi 2005 yılı sonrasında USCVD yöntemi üzerine yapılan incelemeler ciddi oranda artışa geçmiştir. Yöntemin kurulumunun kolay olması ve kaliteli kristallerin üretilmesi buna en önemli sebeplerdir. USCVD yöntemi ile günümüzde oksit-temelli Ga_2O_3 , Al_2O_3 , Cu_2O malzemelerin büyütmeleri sıklıkla gerçekleştirilmektedir [33, 34].



Şekil 1.4. a) Yıllara göre MgZnO üzerine yapılan yayın sayıları b) USCVD yöntemi ile büyütülmüş MgZnO üzerine yapılan yayın sayıları (veriler Web of Science üzerinden taranmıştır)

USCVD ile ZnO büyütme sayısının sayısı artmıştır, ancak yıl bazında 6 yayın veya daha altında seyretilmektedir. Bu durum USCVD yöntemi ZnO büyütme üzerine daha çok araştırma ve incelenmenin yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Şekil 1.4a) ile verilen grafik ile MgZnO üzerine araştırmaların sayısının gittikçe arttığı görülmektedir. USCVD yöntemi ile büyütülen MgZnO üzerine yapılan çalışma sayısı ise oldukça azdır. Bu nedenle MgZnO kristalinin USCVD yöntemi ile büyütülmesi ve üzerine araştırmaların yapılması oldukça büyük önem arz etmektedir. MgZnO büyütme çalışmalarında elde edilen kristale ait elektronik, yapısal ve optiksel özellikler Mg alaşım oranına bağlıdır. MgZnO alaşımı yaklaşık %40< Mg oranına kadar hekzagonal MgZnO kristal fazında kristallenmektedir. Ancak artan Mg oranı ile MgZnO kaya tuzu fazına doğru dönüşmektedir. Bu durumda MgZnO kristalinin yasak bant aralığı Mg alaşım oranına bağlı olarak 3,37-7,8 eV aralığında değişmektedir. Yüksek yasak bant aralığına sahip olan MgZnO kristalinin derin UV bölgelerde çalışabilen aygıtlara dönüşebilmesi oldukça olasıdır [35-37].

USCVD yönteminde büyütme süreci sürücü gaz akış oranı, hazırlanan çözelti molaritesi, büyütme sıcaklığı, ultrasonik titreştirici gücü gibi bazı deneysel parametreler ile kontrol edilmektedir. Bu yöntem ile büyütülen ZnO kristallerde oldukça pürüzsüz yüzeylerin elde edildiği daha önceki çalışmalarla raporlanmıştır [38]. Ayrıca USCVD yöntemi ile ZnO-temelli bazı aygıt çalışmaları da gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında USCVD yöntemi ile soda-lime, SiO₂/Si ve c-Al₂O₃ alttaşlar üzerine ZnO ve MgZnO büyütme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. USCVD yönteminde birçok deneysel optimizasyon parametresi belirlenmiştir. Elde edilen bulgular USCVD yöntemi ile MgZnO büyütme çalışmalarının ZnO büyütme çalışmalarından oldukça farklı bir büyüme davranışına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, büyütme sonucunda elde edilen deneysel parametrelerin başka USCVD büyütme çalışmalarında da kullanışlı olacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde oksit temelli iletken kristallerin özellikleri, ZnO kristallerin literatürdeki yeri ve ZnO-temelli kristaller üzerine yapılan çalışmalar üzerine genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde ise ZnO ve MgZnO malzemelerin kristal, optik ve elektronik özellikleri ile ilgili temel bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü bölümde kristal büyütme teknikleri detaylıca incelenmiştir. PVD, CVD ve SBC yöntemlerinden örnekler sunulmuş olup tez çalışmasında numunelerin hazırlandığı USCVD yöntemi anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ZnO ve MgZnO kristallerin hazırlanma aşaması ve kristallerin yapılan

karakterizasyonları ile ilgili deneysel bilgiler sunulmuştur. Beşinci bölümde ise elde edilen deneysel bulgular ve sonuçlar tartışılmıştır. Altıncı bölümde elde edilen bulgular ışığında sonuçların yorumlanması ve tez çalışması sonucunda önerilere yer verilmiştir.





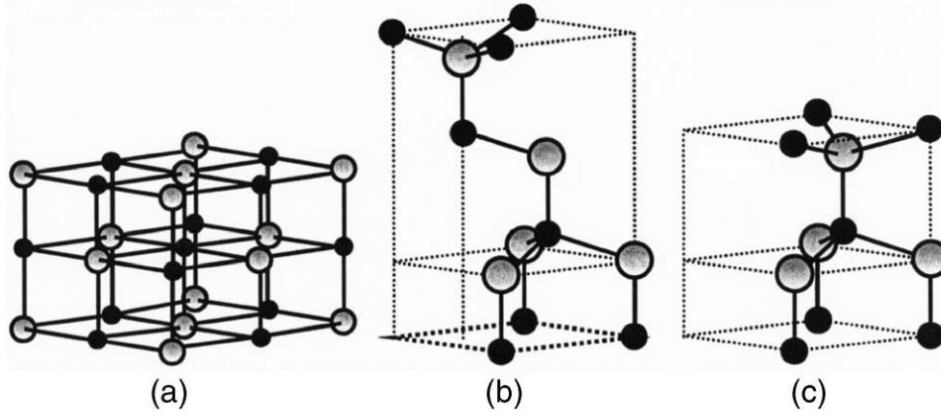
2. ZnO ve MgZnO MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde ZnO ve MgZnO kristallerinin yapısal, elektriksel, optiksel özellikleri hakkında temel bilgilere yer verilmiştir.

2.1. ZnO Kristali

2.1.1. ZnO kristalinin yapısal özellikleri

ZnO kristali Kaya-tuzu (rs), Çinko-Sülfür (zb) ve Hekzagonal (wz) gibi bilinen 3 farklı yapıda kristallenmektedir. Şekil 2.1 ile bu 3 kristal yapıya ait şematik çizimler gösterilmiştir.



Şekil 2.1. ZnO kristalinin a) Kaya-tuzu (rs), b) Çinko-sülfür (zb) ve c) Hekzagonal (wz) fazları (siyah küreler ve gri küreler sırasıyla O ve Zn atomlarını temsil etmektedir) [35]

ZnO kristalinin termodinamik olarak en kararlı yapısı hekzagonal kristal yapısıdır. Zb-ZnO kristal yapısı kübik alttaşılar üzerine büyütüldüğünde elde edilebilen bir kristal fazdır. Rs-ZnO ise daha yüksek basınçta kararlı hale gelebilen kristal fazdır. ZnO kristalinin kararlı olduğu yapıları belirlemek için literatürde hesaplamalı çalışmalar yapılmıştır. Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) kullanılarak elde edilen sonuçlardan bazıları Çizelge 2.1 ile listelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda wz-ZnO kristal fazının en düşük toplam enerjiye sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.1. Rs, zb ve wz yapılarıdaki ZnO kristalinin toplam enerji hesaplamaları [39,40]

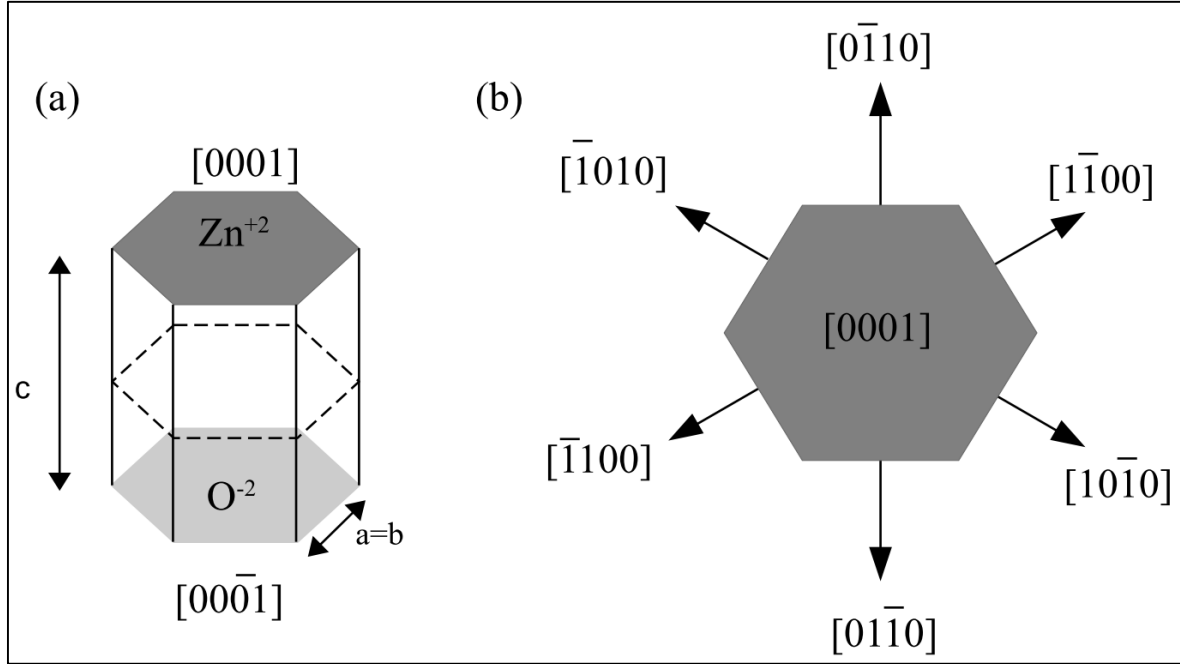
Kullanılan değiş-tokuş yaklaşımları	Toplam Enerji (eV)		
	rs-ZnO	zb-ZnO	wz-ZnO
DFT-GGA [39]	-7,455	-7,679	-7,692
DFT-LDA [40]	-5,416	-5,606	-5,658
DFT-GGA [40]	-9,611	-9,754	-9,769

Wz-ZnO kristalinin termodinamik olarak en kararlı olması onun daha çok araştırılması sonucunu doğurmuştur. Wz-ZnO kristal yapısı 2 tane Zn (VI. Grup) ve 2 tane O (II. Grup) atomlarından oluşan 4 atomlu hekzagonal birim hücreye sahiptir. Sırasıyla herbir Zn ve O atomu çevrelerinde 4 farklı atom ile çevrelenmektedir. ZnO kristaline ait bazı yapısal parametreler çizelge 2.2 ile verilmiştir.

Çizelge 2.2. ZnO kristaline ait bazı önemli parametreler [41]

Parametreler	Değerler
Uzay grubu	C_{6v}^4 veya $P6_3mc$
$a_0(\text{\AA})$	3,249
$c_0(\text{\AA})$	5,204
c/a	1,601
Yoğunluk g/cm^3	5,606
Erime noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1975
Isısal iletkenlik (W/mK)	98-116
C_{11} (GPa)	206,0
C_{12} (GPa)	110,0
C_{13} (GPa)	106,1
C_{33} (GPa)	209,5
C_{44} (GPa)	42,47
C_{66} (GPa)	44,29
Bulk Modülü (GPa)	142,4
Young Modülü (GPa)	111,2
Dielektrik sabiti	8,656
Kırılma indisi	2,029

ZnO $a = b \neq c$ örgü sabitlerine sahip olup ideal c/a oranı 1,633 olarak literatürde görülmektedir [35].



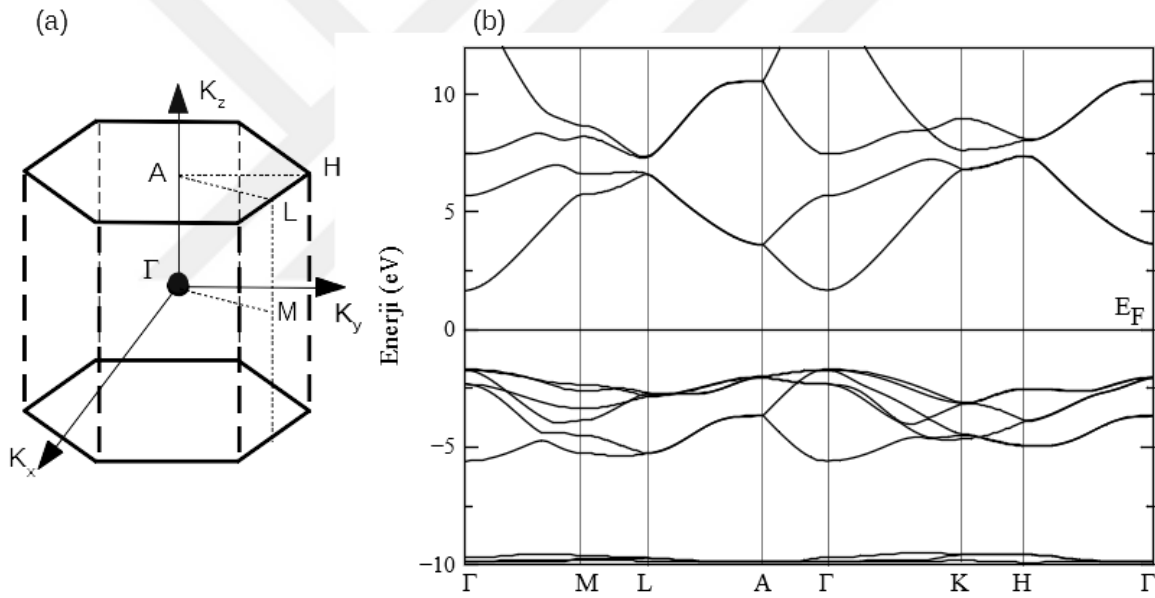
Şekil 2.2. Kutuplu ve kutupsuz ZnO yüzeyleri a) yandan b) üstten şematik gösterim [42]

ZnO kristali Zn yüzeyi $[0001]$ ve O yüzeyi $[000\bar{1}]$ gibi 2 tane kutuplu yüzeye ve 6 tane kutupsuz yüzeye sahiptir. $[0001]$ yüzeyi Zn^{+2} iyonları ile $[000\bar{1}]$ yüzeyi ise O^{-2} iyonları ile sonlanmaktadır. Bu yüzden $[0001]$ yüzeyi daha pozitif (+) iken $[000\bar{1}]$ yüzeyi ise daha negatif (-) yüke sahiptir. ZnO kristalini önemli bir yarıiletken haline getiren diğer bir durum ise bu kutuplu yüzeylerin negatif ve pozitif olması sonucuyla büyüme eksenini (c) boyunca doğal kutuplanmanın oluşmasıdır. Bu duruma ilave olarak kristal yapısındaki gerginlik nedeniyle de piezoelektrik kutuplanma oluşmaktadır. ZnO bu kristal yapısı sebebiyle tıpkı GaN gibi optoelektronik uygulamalarda araştırma konusu haline gelmektedir [43-45]. ZnO kristalinin yanal yüzeyleri ise 6 tane kutupsuz $[10\bar{1}0]$, $[\bar{1}010]$, $[0\bar{1}10]$, $[01\bar{1}0]$, $[\bar{1}100]$ ve $[1\bar{1}00]$ yüzeylerine sahiptir.

2.1.2. ZnO kristalinin elektronik özellikleri

ZnO, 300 K'de 3,37 eV yasak bant aralığına sahip geniş bant aralıklı yarıiletkenidir. Şekil 2.3 ile ZnO kristaline ait Brillouin yüksek simetri noktaları ve elektronik bant yapısı görülmektedir. Elektronik bant yapısı hesabı lisanslı 2017.2 Quantum ATK hesaplama yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Elektronik bant yapısı hesaplamaları GGA+U değiş-tokuş korelasyonu yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda 500 eV kesim enerjisi, 6x6x5 k-noktası değerleri kullanılmıştır [46]. Γ noktasında direkt yasak bant

aralığına sahiptir. Katkısız ZnO doğal olarak n-tipi yarıiletken özellik sergilemektedir. Bu durum kristal içerisindeki O-boşlukları (V_o) veya Zn-ara yerleşimleri (Zn_i) gibi yapısal kusurlar ve sitokiyometrideki bozukluklardan kaynaklanmaktadır. ZnO kristalini görece daha fazla n-tipi hale getirmek istenildiğinde periyodik cetvelin III. grubundaki Alüminyum (Al), Galyum (Ga) veya İndiyum (In) gibi katkı atomları kullanılmaktadır [47-53]. ZnO p-tipi yarıiletken haline dönüştürülmek istendiğinde, katkılama işlemi kolay değildir. Çünkü ZnO sahip olduğu doğal kusurlar veya Hidrojen (H) atomundan kaynaklanan arkaplan safsızlığı nedeniyle p-tipi ZnO oluşturmak görece daha zordur. Ancak I. grup'ta bulunan Lityum (Li), Sodyum (Na) veya Potasyum (K) gibi atomlar kullanılarak katkılama işlemi yapılmaktadır [54]. Bunun aynı sıra V. grup atomları Azot (N), Fosfor (P) veya Arsenik (As) ile de p-tipi ZnO oluşturmak için kullanılmaktadır [55].

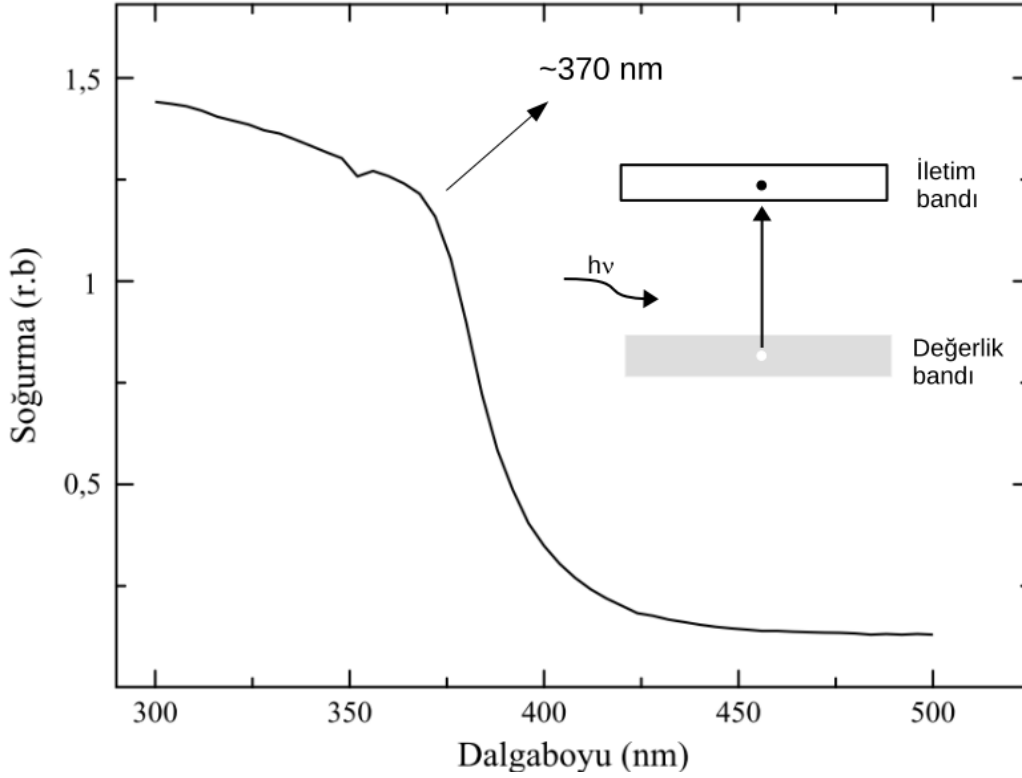


Şekil 2.3. ZnO kristalinin a) Brillouin yüksek simetri noktaları bölgesi ve b) elektronik bant yapısı

ZnO kristali sahip olduğu geniş yasak bant aralığının yanı sıra yüksek eksiton bağlanma enerjisine ~ 60 meV sahiptir. Bu özellik onu benzer kristal yapısında ve oldukça önemli III-V grubu ve ZnO gibi geniş yasak bant aralıklı yarıiletkenlerden olan GaN (~ 25 meV) kristalinden farklı kılmaktadır [56]. ZnO bu eksiton bağlanma enerjisi nedeniyle oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda verimli eksitonik salınım yapabilmektedir [57, 58]. ZnO kristalinin elektron m_e^* ve deşik m_h^* etkin kütleleri ise sırasıyla $0,24 m_{e0}$ ve $0,59 m_{h0}$ olarak literatürde bulunmaktadır [59, 60].

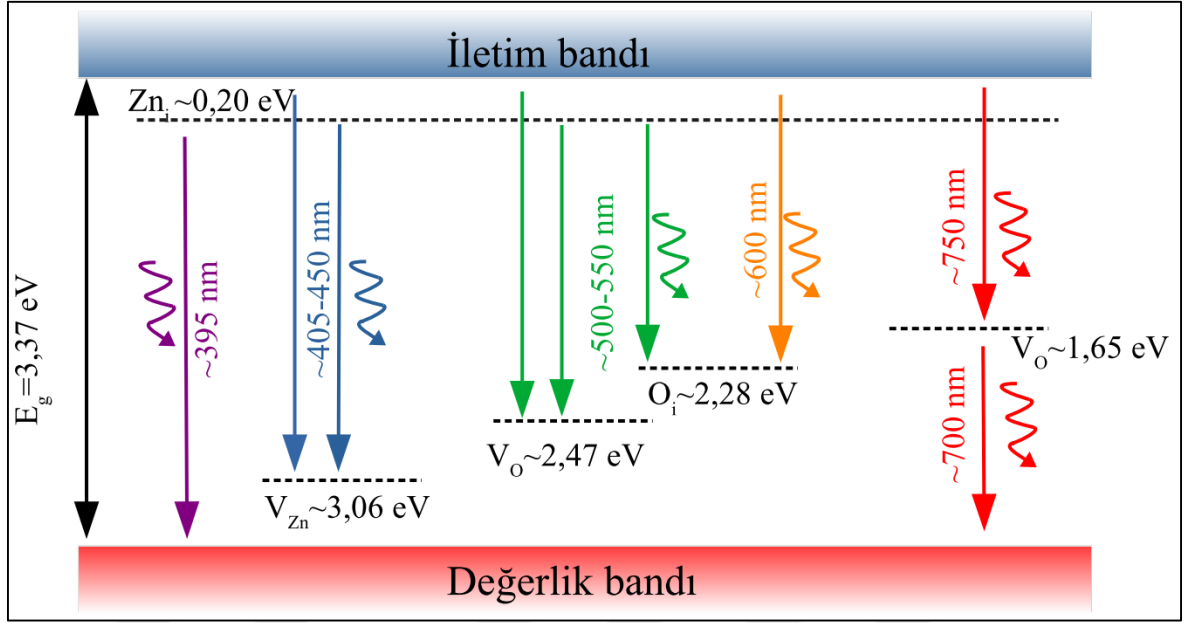
2.1.3 ZnO kristalinin optiksel özellikleri

ZnO kristalinin optiksel yapısı birçok deneysel yöntem ile tespit edilebilmektedir. Bu yöntemlerden birisi olan ultraviyole (UV)-görünür bölge spektrofotometre ölçümleri ile elde edilmiş soğurma spektrumunun dalgaboyuna bağlı değişimi şekil 2.4 ile görülmektedir.

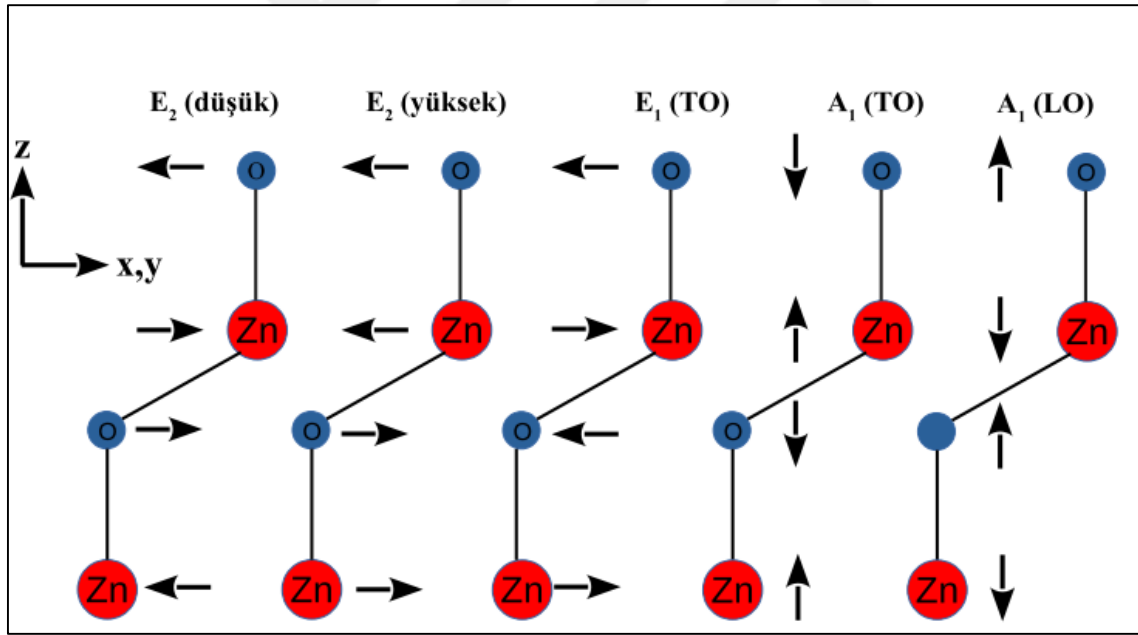


Şekil 2.4. Katkısız ZnO kristaline ait soğurma spektrumu [61]

ZnO kristali UV bölgenin kıyısında yaklaşık 370 nm civarında bir soğurmaya sahiptir. Görünür bölgede (400-700 nm) aralığında gelen $h\nu$ enerjili fotonu soğurmadığı için şeffaftır. ZnO kristali doğal olarak içerisinde bir çok yapısal kusur barındırmaktadır. Sırasıyla Zn boşluk kusuru, O boşluk kusuru, Zn ara yerleşimi ve O ara yerleşimini temsil eden V_{Zn} , V_O , Zn_i ve O_i gibi yapısal kusurlar iletim bandı ve değerlik bandı arasında bazı sıg ve derin seviyeler oluşturmaktadır. Şekil 2.5 ile verilen şematik bant gösteriminde Zn ve O kusurları derin seviye emisyonu (DLE) olan mavi, yeşil, sarı ve kırmızı salınımlar meydana getirmektedir [62].



Şekil 2.5. ZnO kristali için bazı Zn ve O kusur seviyeleri [62]



Şekil 2.6. ZnO kristaline ait bazı optik modlar [63]

Wurtzite fazdaki ZnO kristali C_{6v}^4 uzay grubuna ve $\Gamma_{\text{opt}}=A_1+E_1+2B_1+2E_2$ simetrisine sahiptir [63]. A_1 ve E_1 kutuplu modlar, E_2 ise kutupsuz moddur. Birim hücreinde 2 tane Zn 2 tane O atomu olduğu için 3 tane akustik 9 tane optik mod ile toplam 12 fonon moduna sahiptir. Akustik modlar boyuna akustik (LA) enine akustik (TA) olarak adlandırılır. Optik modlar ise boyuna optik (LO) ve enine optik (TO) modlar olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.6 ile z

yönünde büyütülen ince film ZnO kristaline ait bazı titreşim modları şematik olarak çizilmiştir. Yoğun madde fiziğinde bu modları tayin edebilmek için Raman ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Bu ölçümler sonucunda kristal hakkında kimyasal içerik, kristal yapısı, kristal kalitesi gibi yapısal özellikler hakkında bilgi sahibi olunmaktadır.

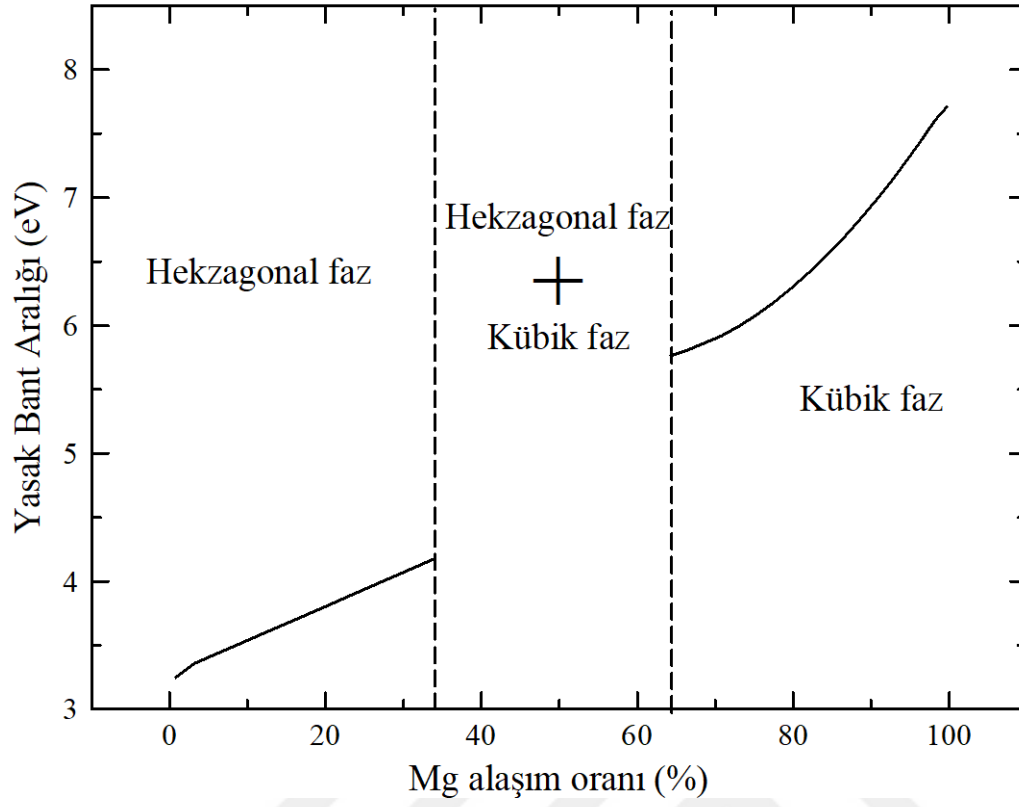
2.2. MgZnO Kristali

ZnO kristalinin sahip olduğu yasak bant aralığı nedeniyle daha düşük dalgalıboylarında yetersiz kalabilmektedir. Daha geniş yasak bant aralığına sahip bir malzeme üretebilmek amacıyla wz-ZnO kristali ile rs-MgO alaşımlaştırılarak MgZnO kristal yapısı elde edilebilmektedir. Zn ve Mg atomları kristal içerisinde birbirlerinin yerlerine geçebilmektedir. Çünkü Zn^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının atomik yarıçapları sırasıyla 0,57 Å ve 0,60 Å değerlerindedir [20]. Bu sayede oluşturulan MgZnO yapısının örgü parametresi çok fazla değişmemektedir. Çizelge 2.3 ile verilen değerlerde MgZnO alaşımlaştırıldığında wz-a ve rs-a örgü parametrelerindeki değişim yaklaşık olarak 0,05 Å oranında iken, wz-c örgü parametresi 0,1 Å oranında azalmıştır.

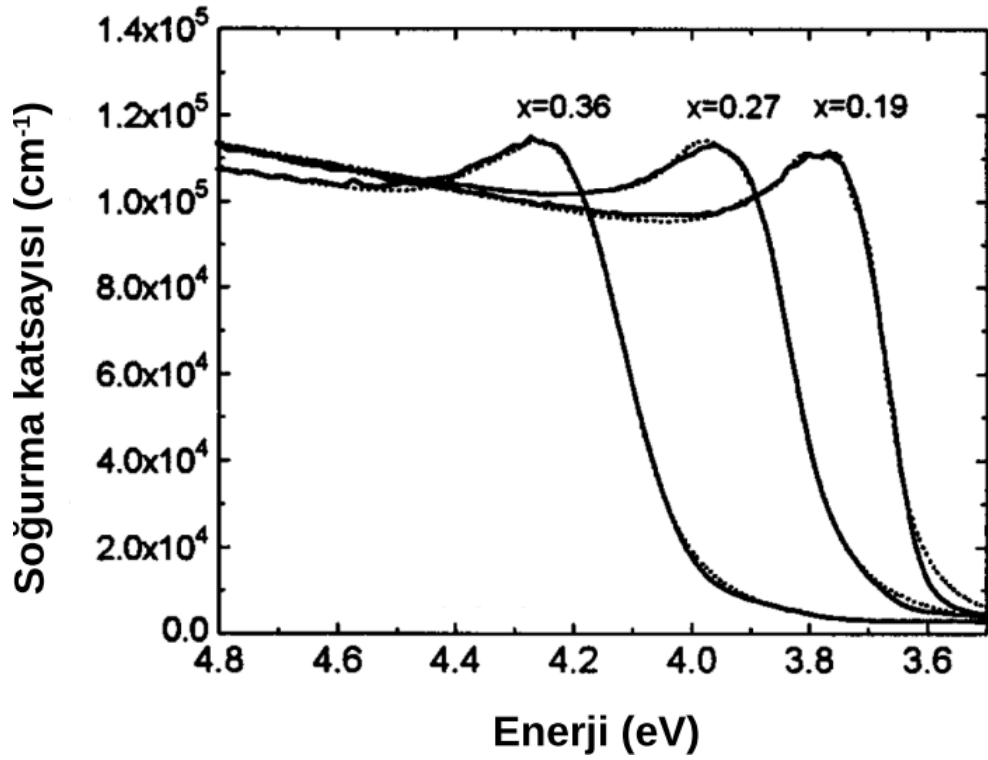
Çizelge 2.3. Wz ve rs fazlarda MgZnO kristalinin örgü parametre değişimi [41]

Örgü parametresi	Mg değişimi	$\text{Mg}_{0,0}\text{Zn}_{1,0}\text{O}$	$\text{Mg}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{O}$
wz-a (Å)	% 0-60	3,247	3,300
wz-c (Å)	% 0-60	5,205	5,098
rs-a (Å)	% 60-100	4,266	4,209

Elde edilen MgZnO kristali büyütme şartlarına bağlı olarak yaklaşık olarak %30 hatta %50 Mg oranına kadar hekzagonal yapısını korumaktadır [64]. Daha yüksek Mg oranlarında ise wz ve rs fazlarının karışımı daha yüksek Mg oranlarında rs-MgZnO kristal fazının elde edildiği görülmüştür [41]. Wz-ZnO kristali 3,37 eV yasak bant aralığına sahip iken rs-MgO kristali yaklaşık 7,8 eV bant aralığına sahiptir [65, 66]. Oluşturulan MgZnO kristalinin yasak bant aralığı Mg oranına bağlı olarak Şekil 2.7’de görüldüğü gibi değişmektedir. Şekil 2.8 ile görüldüğü gibi artan Mg oranı ile soğurma kıyısı daha düşük dalgalıboylarına doğru kaymaktadır. Bu durum UV bölgesinde MgZnO yarıiletken malzemesinin incelenmesi açısından oldukça önem arz etmektedir.



Şekil 2.7. Mg oranına bağlı olarak MgZnO kristalinin bant aralığının değişimi [67]



Şekil 2.8. Oda sıcaklığında MgZnO kristalinin soğurma spektrumu [68]

2.3. ZnO Büyütmelerinde Alttaş Seçimi

Kristal büyütmelerinde kaliteli kristal elde edebilmek için önemli parametrelerden birisi alttaş seçimidir. Örgü uyumsuzluğu alttaş seçiminde en önemli parametredir. ZnO kristali günümüzde amorf cam, indiyum katkılı kalay oksit (ITO), flor katkılı kalay oksit (FTO) tek kristal safir (c-Al₂O₃), Si (100), wz-GaN gibi alttaşlar üzerine büyütülmektedir. Amorf cam üzerine büyütmelerde ZnO kristalinin oluşum enerjisi oldukça yüksektir ve bu hızlı bir şekilde çekirdeklenme tabakasının oluşumuna olanak sağlamaktadır. Özellikle sol-jel yöntemleri ile yapılan büyütmelerde cam, ITO ve FTO alttaşlar kullanımı tercih edilmektedir. Bunun sebebi hem büyütülen yapıların optiksel özelliklerini incelenebilmesi hem de daha uygun maliyetli olmalarıdır. Ancak amorf cam üzerine gerçekleştirilen büyütmelerde yüksek kaliteli ultraince ZnO kristalleri elde etmek pek mümkün değildir. Alttaşın amorf olması nedeniyle ZnO polikristal bir yapıda büyümeyi tercih etmektedir [69].

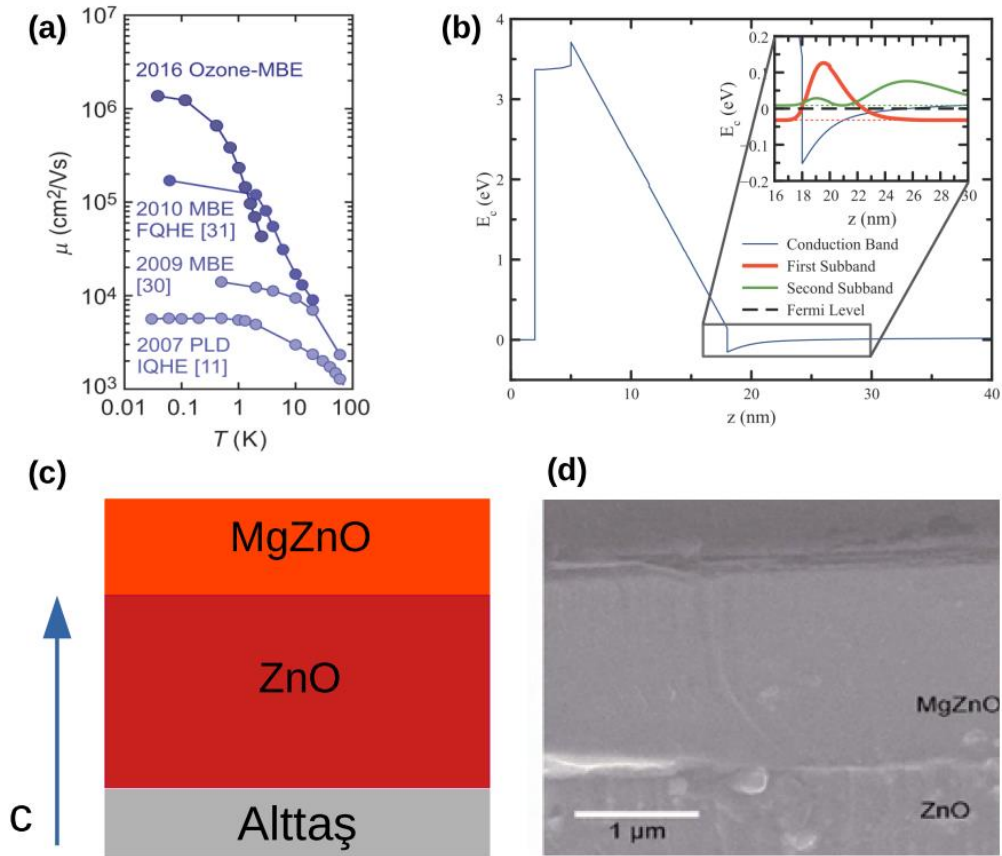
Çizelge 2.4. ZnO ve bazı tek kristal alttaşlar arasındaki örgü uyumsuzluğu [55]

Alttaş	Örgü uyumsuzluğu (%)
ScAlMgO ₄	0,09
GaN	1,80
6H-SiC	3,50
c-Al ₂ O ₃	18,0
Si (100)	40,1

Çizelge 2.4 ile verilen bazı tek kristal alttaşlardan ScAlMgO₄ (SCAM) ile ZnO kristali en düşük örgü uyumsuzluğuna sahip alttaşdır. Kaliteli ZnO kristal elde etmek için doğru seçimin SCAM olduğu görülmesine rağmen, bu alttaş oldukça pahalı olması üzerine araştırma yapılmasını kısıtlamaktadır. Günümüzde GaN üzerine ZnO büyütmeleri özellikle LED uygulamaları için büyütülmektedir. Yaygın olarak kullanılan alttaşlar arasında en bilineni c-Al₂O₃'tür. Örgü uyumsuzluğunun %18 olmasına karşın bazı çalışmalarda epitaksiyel olarak güçlü (0002) yöneliminde ZnO kristaller büyüdüğü raporlanmıştır [70]. Özellikle p-n eklem gibi bir yapı oluşturulmak istenildiğinde p-tipi Si (100) alttaşlar tercih edilmektedir. ZnO doğal n-tipi bir yarıiletkenidir alttaş p-tipi olduğunda kolayca p-n eklem elde edilebilir ve karakterizasyonları gerçekleştirilebilir [71-74]. Wz-MgZnO büyütmelerinde de a örgü parametresi çizelge 2.3 ile de görüleceği gibi çok değişmediğinden benzer durumlar söz konusudur.

2.4. MgZnO/ZnO Çokluyapılar

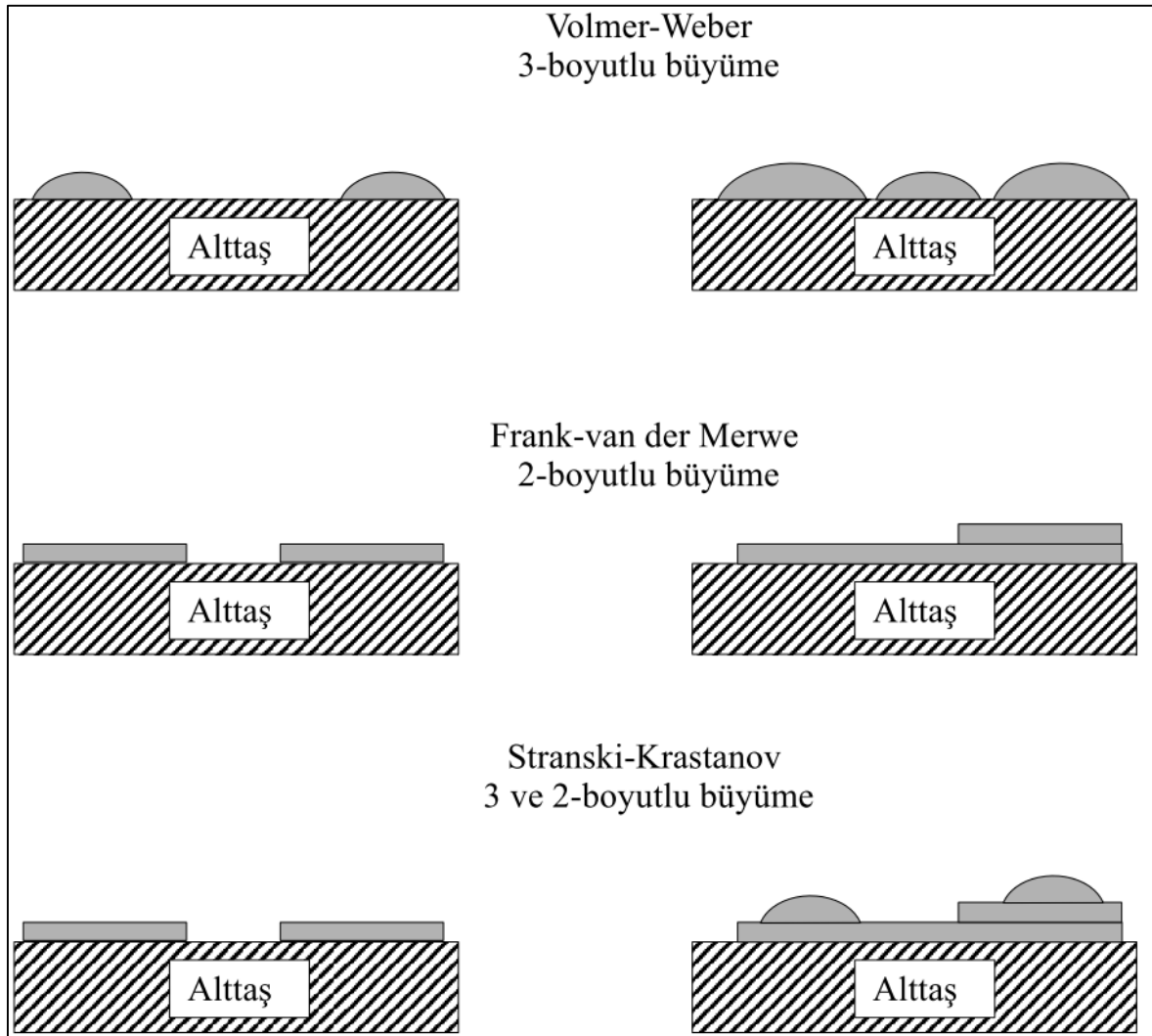
III-V grubu yarıiletken kristallerden oluşturulan AlGaIn/GaN veya InAlN/GaN gibi çokluyapılara benzer olarak ZnO-temelli kristallerde MgZnO/ZnO çokluyapısı oluşturulabilmektedir. Bu çoklu yapılar ZnO kristalin sahip olduğu doğal ve piezoelektik polarizasyon nedeniyle MgZnO ve ZnO arayüzeyinde 2DEG davranışı sergilemektedir. Bu sebeple yüksek elektron hareketliliğine sahip transistör (HEMT) uygulamaları için kullanışlı hale gelebilmektedir. Şekil 2.9’da görüldüğü gibi hem hesaplamalı hemde deneysel olarak 2DEG oluşumunun gerçekleştiği literatürde görülmektedir [75-78]. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda çok düşük sıcaklık bölgesinde $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerlerinde 2DEG hareketliliği gözlemlenmiştir [22].



Şekil 2.9. a) Deneysel ve b) hesaplamalı olarak 2DEG oluşumu MgZnO/ZnO çoklu yapının c) şematik ve d) SEM görüntüsü [21]

3. İNCE FİLM BÜYÜTME YÖNTEMLERİ

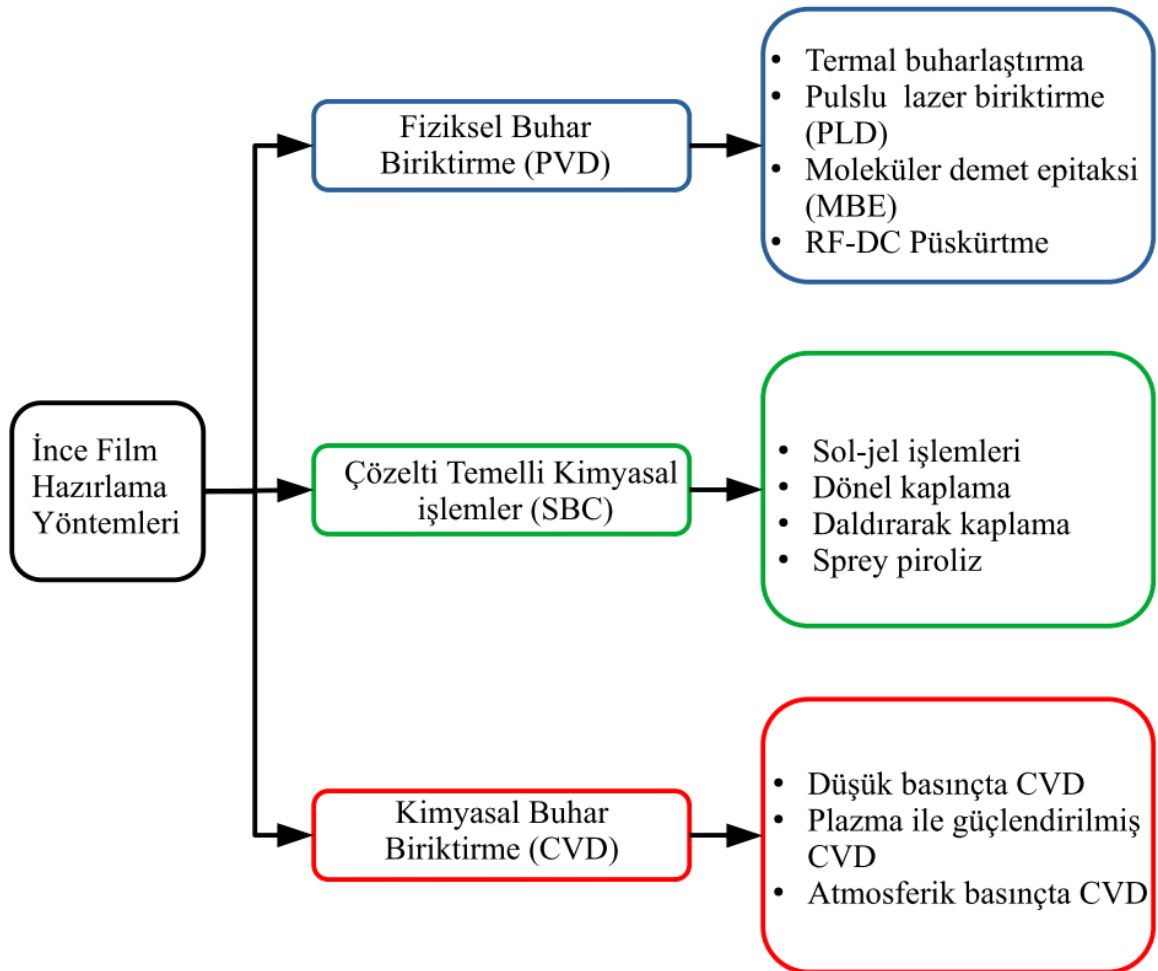
Bu bölümde bilinen ince film büyütme yöntemleri ve özellikle kimyasal buhar biriktirme yöntemi detaylıca incelenecektir. İnce film Şekil 3.1 ile şematik olarak gösterilen üç temel büyüme modunda büyüebilmektedir. Bunlar, 3-boyutlu büyüme (3D) olan Wolmer-Weber, 2-boyutlu (2D) büyüme olan Frank-van der Merwe ve hem 3D hem de 2D büyüme davranışı olan Stranski-Krastanov büyüme modlarıdır.



Şekil 3.1. İnce film büyüme modları [79-83]

Wolmer-Weber modu sıklıkla görülen adacıklar halinde büyümelerdir. Bu büyüme davranışında yüzeye yaklaşan atomların birbirine tutunma enerjisi yüzeye tutunma enerjisinden daha fazladır. Bu nedenle 3D yapılar oluşur ve bu yapılar birleşerek sürekli bir film haline gelir. Frank-van der Merwe modunda yüzeye ulaşan atomların birbirlerine

bağlanma enerjisi, yüzeye tutunma enerjilerinden daha düşük veya eşit ise yüzeyde atomlar katman katman yerleşirler. Bu sayede yüzeyde 2D büyüme davranışı görülür. Stranski-Krastanov modunda ise 2D büyüme ve 3D büyümelerin birleşimi görülmektedir. Önce yüzeyde 2D boyutlu bir büyüme gerçekleşir ve yüzeyde daha fazla 2D büyüme olmadığında yüzeye gelen atomlar 3D adacıklı yapıları oluşturur. Günümüzde çok çeşitli yöntemlerle ince film büyütme gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler üç ana başlıkta toplanmak istenirse şekil 3.2 ile görebileceği gibi PVD, SBC ve CVD yöntemleri şeklinde sınıflandırılabilir.

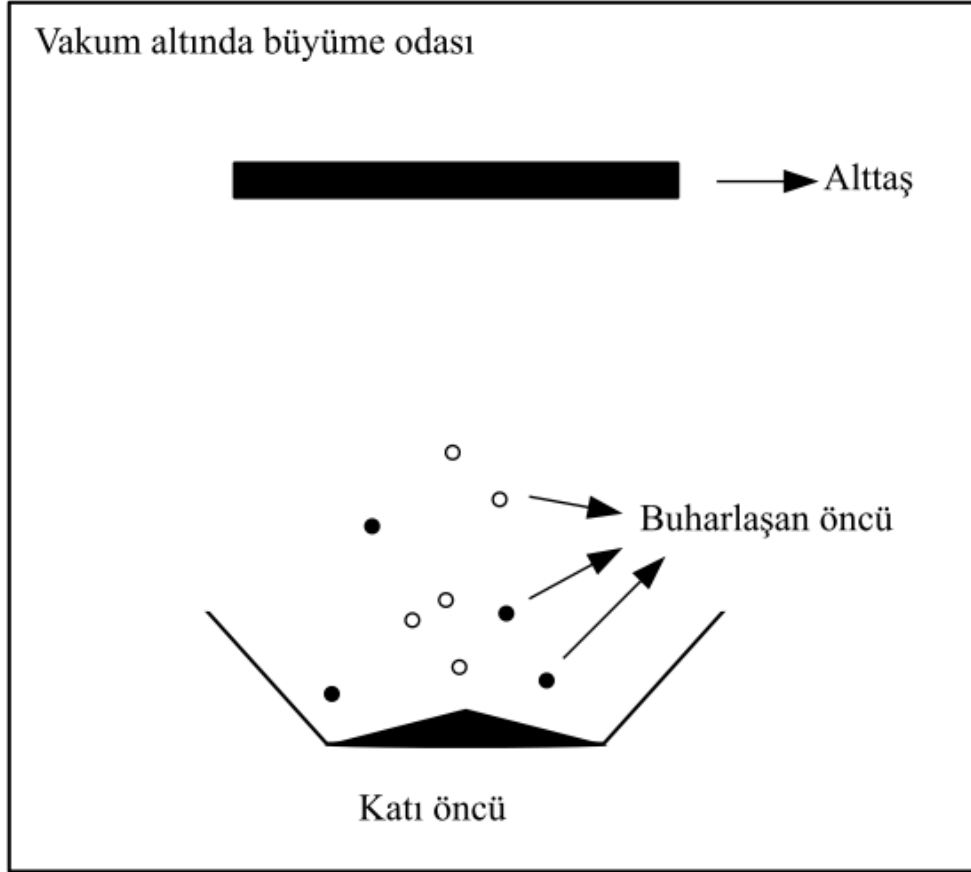


Şekil 3.2. Bazı ince film hazırlama yöntemleri

3.1. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Bu yöntemin kullanımı 1800’lü yıllara kadar uzanmakta olup genellikle endüstriyel metal veya farklı malzemelerin ince film büyütmelerinde veya kaplamalarında kullanılmaktadır. Şekil 3.3 ile görüldüğü gibi basitçe katı bir kaynak gaz faza geçirilir daha sonra ince film

olarak alttaş üzerinde katı faz oluşumu sağlanır. Isıl Buharlaşma, Pulsu Lazer Biriktirme (PLD), Moleküler Demet Epitaksi (MBE) ve RF/DC-Püskürtme metodları en bilinen PVD yöntemlerinden bazılarıdır [84-92].



Şekil 3.3. Şematik olarak bir PVD yöntemi

3.1.1. Isıl buharlaşma

Isıtılan bir kaynaktan oluşan buhar fazdaki gazların uygun bir alttaş üzerine birikmesi yöntemidir. Bu süreç temel birkaç adımda meydana gelmektedir; buhar bir kaynak malzemenin buharlaşması veya süblimleşmesi ile oluşturulur. Uygun bir alttaş üzerine oluşturulan buhar taşınır. Kaynak malzemenin buharlaşma sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta tutulan alttaş üzerine ulaşan buhar faz katılaşmaya ve ince filmi oluşturmaya başlamaktadır. Bu yöntemde büyütme oranını belirleyen en önemli parametre buhar basıncı olup kaynak malzemenin buharlaşma sıcaklığındaki buharlaşma basıncı belirlenmektedir [93-95].

3.1.2. Pulsu lazer biriktirme (PLD)

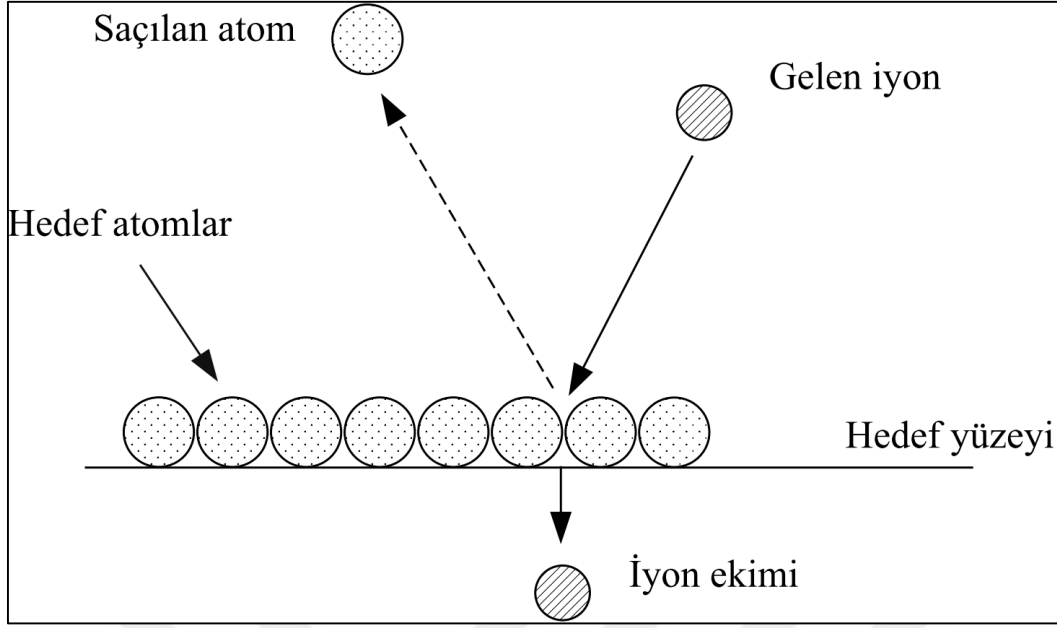
Pulsu lazer biriktirme yöntemi günümüzde ZnO ve diğer metal alaşımlarının da büyütülmesinde sıklıkla kullanılmaktadır [86, 87]. Genellikle yüksek güçlü KrF eksimer lazeri ($1\text{J}/\text{cm}^2$) gibi bir lazer kuartz pencereden kaynak malzeme üzerine düşürülmektedir [96]. Lazer şiddetini artırmak için kuartz bir lens kullanılmaktadır. Uyarılmış lazer ışını yüzeyden atom söker ve vakum ortamında sökülen veya buharlaşan atomlar alttaş üzerine taşınarak yüzeyde ince film oluşturur. PLD yönteminde tek kristal, toz veya pelet halinde kaynak malzemeler kullanılmaktadır.

3.1.3. Moleküler demet epitaksi (MBE)

MBE yönteminde temel nokta ultra yüksek vakum (UHV) kullanımıdır ($\sim 10^{-10}$ Torr). Isıtılan kaynaklardan atomik veya moleküler ölçekte elde edilen demet alttaş üzerine gönderilmektedir. Bu sayede atomik katmanlar şeklinde büyümeler gerçekleştirilmektedir. Özellikle III-V grubu yarıiletkenleri GaAs ve GaN veya bunların alaşımları gibi yarıiletkenler yüksek kristal kalitelerinde büyütülmektedirler [97-98]. ZnO kristalleri de MBE ile çok başarılı bir şekilde büyütülebilmektedir [99-102].

3.1.4. RF-DC püskürtme

Püskürtme yöntemi hem endüstriyel hem de bilimsel araştırmalarda oldukça kullanışlı bir PVD yöntemidir. Şekil 3.4 ile püskürtme işleminin şematik gösterimi verilmektedir. Katı bir hedef yüzeye yüksek enerjili iyonlar gönderildiğinde yüzeyden saçılan atomlar kaplanacak alttaş üzerine gönderilmektedir. Yüzeye gönderilen iyonlardan bazıları da yüzeyden hedef malzeme içerisine girer buna da iyon ekimi denilmektedir.



Şekil 3.4. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi [103]

DC-püskürtme yöntemi ile metal malzemelerin kaplaması işlemi gerçekleştirilmektedir. Özellikle Alüminyum (Al), Nikel (Ni), Titanyum (Ti) gibi kontak metali olarak kullanılan metallerin kaplama işleminde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca birçok metalik yüzey kaplama işleminde DC-püskürtme yöntemi kullanılmaktadır. RF-püskürtme ile daha çeşitli malzemelerin işlemi yapılabilmektedir. Yüksek gerilime sahip 13,6 MHz frekansta bir RF kaynağı kullanılmaktadır. İletken veya iletken olmayan hedef yüzeyler kullanılmaktadır. Bu yöntem yarıiletken ve yalıtkan ince filmlerin kaplanması işleminde kullanılmaktadır. ZnO büyütmelerinde de çok sıklıkla RF püskürtme yöntemi ile büyütülmektedir [104-106].

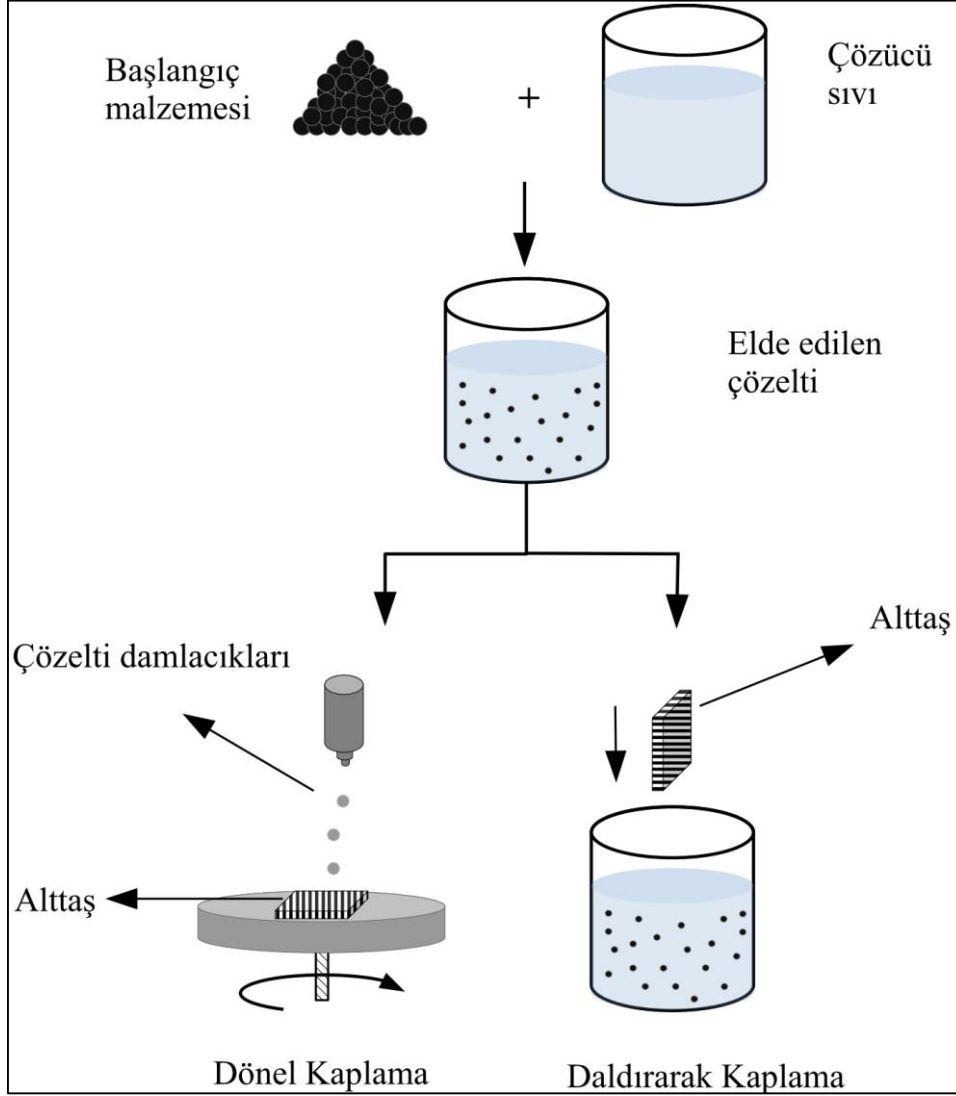
3.2. Çözelti Temelli Kimyasal İşlemler (SBC)

Kristal büyütme yöntemlerinde geleneksel fiziksel ve kimyasal büyütme yöntemlerinin yanı sıra bazı kimyasal çözeltiler kullanılarak kristal hazırlama metotları vardır. Bu yöntemlerde başlangıç malzemesi bir sıvı içerisinde çözülerek bir sol haline getirilmektedir. Daha sonra bazı kimyasal adımlar ile kristal büyütme işlemi gerçekleştirilmektedir.

3.2.1. Sol-jel işlemleri

Sol-jel yöntemleri özellikle oksit-temelli kristal hazırlamalarda oldukça kullanılan yöntemlerdir. Bunların en başında dönel kaplama (ing. Spin coating) ve daldırarak kaplama

(ing. Dip coating) yöntemleri gelmektedir. Bu yöntemlerin kullanılmasının birçok sebebi vardır. En önemli sebebi ekonomik ve basit sentezleme yöntemleri olmasıdır.



Şekil 3.5. Sol-jel yönteminin temel adımları

Dönel kaplama yöntemi

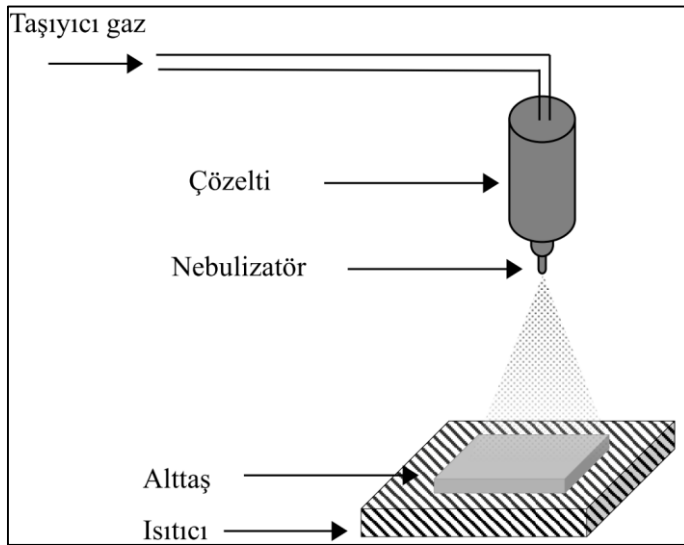
Şekil 3.5 ile verilen şematik gösterimde altaş dönen bir numune tutucu tabla üzerine yerleştirilir ve yüzeyine çözelti damlatılmaktadır. Belirli dönme hızlarında tabla döndürülerek çözeltinin tüm yüzeye kaplanması sağlanmaktadır. Daha sonra kaplı yüzey ısı işleme maruz bırakılarak çözücülerin buharlaşması sağlanarak kristallenme gerçekleşmektedir. Bu yöntem literatürde birçok ZnO ince film hazırlama çalışması bulunmaktadır.

Daldırılarak kaplama yöntemi

Bu yöntemde alttaş bir çözelti içerisinde daldırılır yüzey tamamen kaplanmaktadır. Dönel kaplama yöntemine benzer olarak ısıtılarak işlem uygulanarak kristallerin oluşumu sağlanır. Bu yöntemde alttaşın her iki tarafı da kaplanmakta olup kaplama işlemi sonunda yüzeyden kaldırma işlemi gerçekleştirilmektedir.

3.2.2. Sprey piroliz yöntemi

Sprey piroliz yöntemi çözelti temelli bir kristal hazırlama yöntemidir. Şekil 3.6 ile gösterilen yöntemde hazırlanan bir çözeltideki damlacıklar bir nebulizatör (ing. nebulizer) yardımı ile spray haline getirilir. Bu damlacıklar sıcak bir alttaş üzerine püskürtülür ve yüzeyde sıcaklıkla birlikte ince film oluşması beklenir. Sprey piroliz yönteminde oluşturulan parçacıkların büyüklükleri yaklaşık birkaç mikrometre ölçeğindedir. Bu yöntemdeki en önemli parametre damlacıkların boyutlarıdır. Damlacık boyutları nebulizatör çalışma frekansı, oluşturulan çözelti molaritesi, gazın buhar basıncı ve alttaş sıcaklığı ile belirlenebilmektedir. Nebulizatör ile alttaş yüzeyi arasındaki mesafe ile yüzeyde oluşan film morfolojisinin değiştiği yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir [107]. Yüksek sıcaklık (800 °C) ve 60 Torr gibi bir basınç altında yüksek kaliteli kristal oluşumları gösterilmiştir. Ancak atmosfer basıncında büyütülen kristallerin daha düşük kalitelere sahip olduğu literatürde raporlanmıştır [108].

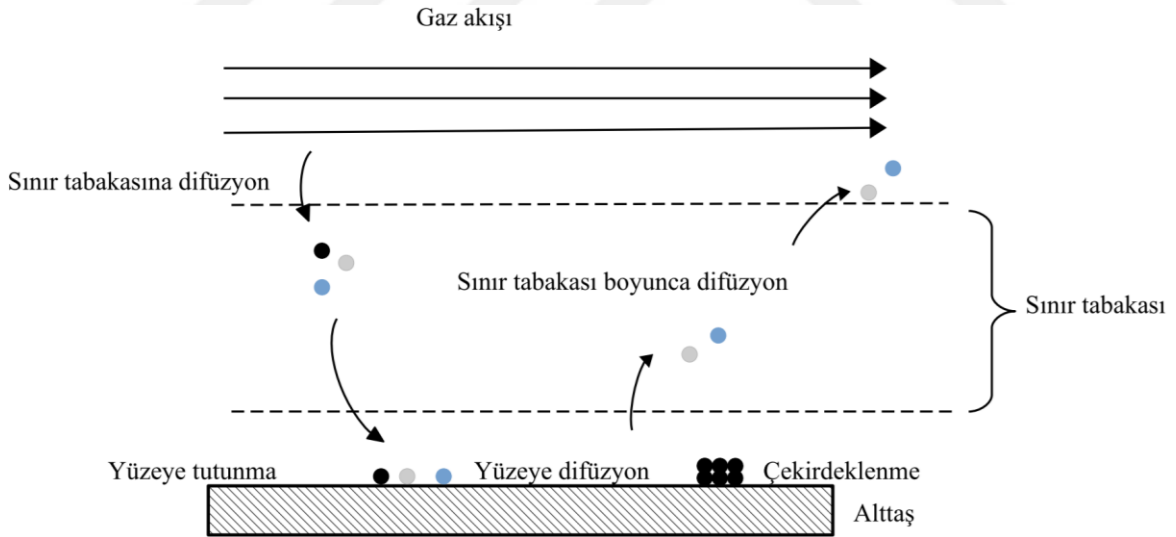


Şekil 3.6. Sprey piroliz yönteminin şematik gösterimi

3.3. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

CVD yöntemi gaz öncülerin bir alttaş üzerinde kimyasal reaksiyon gerçekleştirilmesi sonucunda ince film katmanların oluşması sürecidir. Bir CVD işlemi şekil 3.7 ile verilen işlemler ile temsil edilmektedir. Tepkimeye girmeyen yan ürünler ise ortamdan ayrılırlar. CVD işlemi basitçe aşağıda verilen adımlarla tanımlanabilmektedir;

- Gaz veya buhar fazdaki öncü reaktör içerisine sürülür
- Öncüler sınır tabaka boyunca difüze olurlar alttaş üzerine ulaşırlar
- Öncüler yüzeye tutunurlar ve alttaş üzerinde birleşirler
- Alttaş yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir
- Katı çekirdeklenme tabakasının oluşumu meydana gelir
- Çekirdeklenme, adacıklara ve sonunda sürekli filme dönüşür
- Diğer gazlar yüzeyden ayrılırlar
- Sınır tabaka boyunca difüze olurlar ve reaktörden dışarı atılırlar



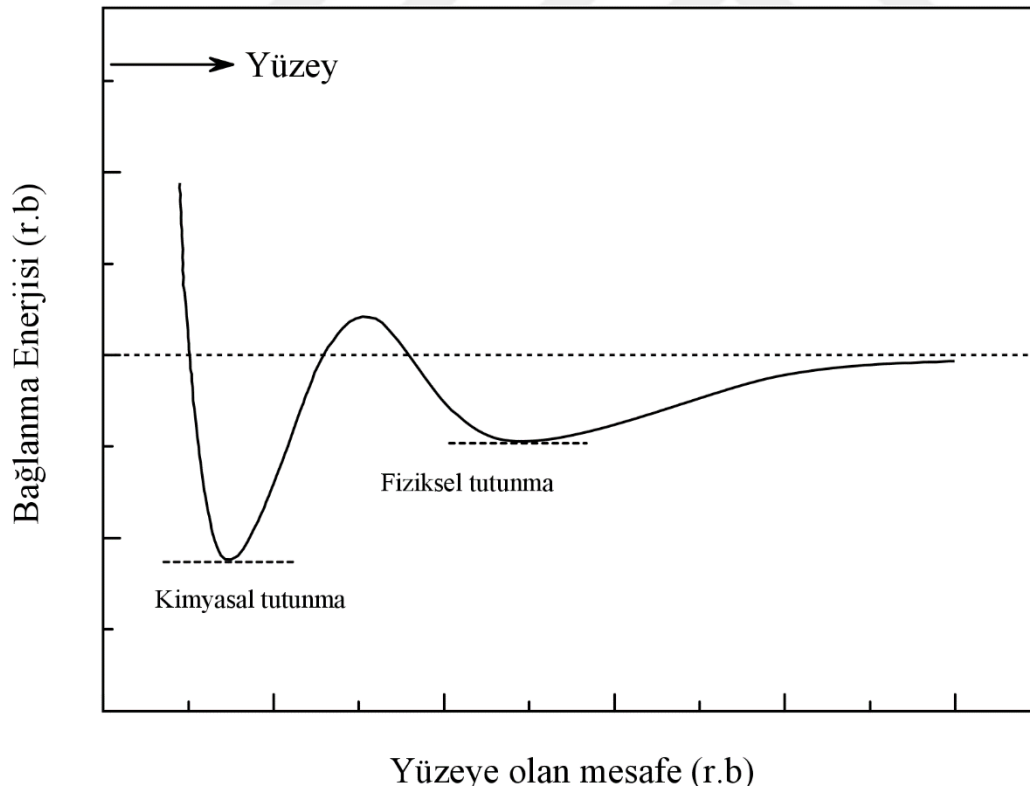
Şekil 3.7. CVD yöntemi ile kristal büyüme süreci [109]

Galyum arsenür (GaAs) oluşumu için bir CVD işlemi tanımlanmak istenirse;



Kimyasal reaksiyonu ile gösterilebilir. Burada $[Ga(C_2H_5)_3]$ ve (AsH_3) sırasıyla trietil

galyum ve arsin gazlarıdır [109]. $\uparrow$ işaretleri sırasıyla alttaş yüzeyinde yüzeye yapışma için kullanılırken $\downarrow$ işareti ise reaksiyodan sonra yüzeyden atılan bir ürün molekülü temsil etmektedir. Basitçe anlatılan bu CVD işleminde sınır tabakası boyunca birçok bozunma işlemi gerçekleşerek yüzeyde çekirdeklenme ve kristal oluşumu meydana gelmektedir. Sınır tabakasına difüze olan molekül için yüzeye tutunma işlemi gerçekleşmektedir. Yüzeye tutunma işleminde kimyasal ve fiziksel olarak iki farklı tutunma işlemi mevcuttur. Şekil 3.8 ile görülen bağlanma enerjisi ve yüzeye olana mesafe ilişkisinde görüldüğü gibi kimyasal tutunma işleminde yüzey atomları ile öncü atomları arasında bir kimyasal bağ meydana gelmektedir. Yüzeye atomları ve öncü atomları birbirlerine yaklaşık 2 eV'dan fazla bir enerji ile bağlanmaktadır. Bu tip güçlü bağlanma nedeniyle yüzeyde kimyasal olarak tutunan atomlar düşük yüzey hareketliliğine sahiptir. Fiziksel tutunma işleminde ise yüzeye tutunan atomlar kimyasal tutunmaya göre yaklaşık 0,5 eV gibi küçük bir enerji ile bağlanmaktadır. Fiziksel olarak yüzeye tutunan atomlar daha zayıf tutunduğundan atomların hareketlilikleri kimyasal tutunmaya göre daha yüksektir.

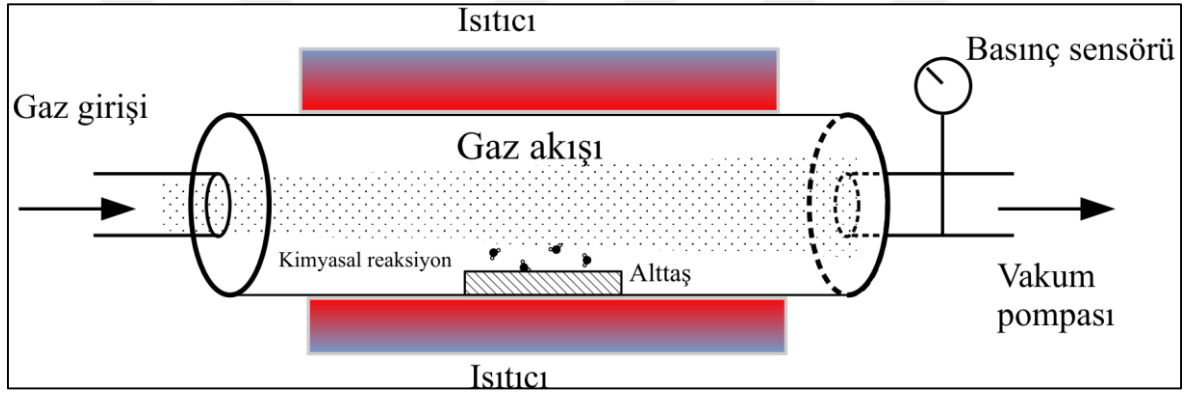


Şekil 3.8. Bağlanma enerjisi ile kimyasal ve fiziksel yüzeye tutunma ilişkisi [110]

CVD reaktörleri genellikle 3'e ayrılmaktadır; Atmosferik basınçta CVD (APCVD), Düşük basınçlı CVD (LPCVD) ve Plazma ile geliştirilmiş CVD (PECVD).

3.3.1. Düşük basınçta kimyasal buhar biriktirme (LPCVD)

Şekil 3.9 ile şematik olarak gösterilen LPCVD yönteminde reaktör basıncı yaklaşık olarak 0,1-1 Torr aralığında değişmektedir. Reaktör içerisindeki vakumu kontrol etmek için büyütme sistemi bir vakum sistemine bağlanmaktadır. Alttaş reaktör içerisinde dikey ya da yatay konumlandırabilmektedir. Dikey konumlandırmalarda alttaşlar arası yeterli mesafe bırakarak büyütme gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde büyütme ile daha fazla sayıda alttaş üzerine büyütme yapılabilir. Büyüme hızı genellikle reaktör sıcaklığı ve basınç ile kontrol edilebilmektedir. Görece gaz akış oranının büyüme hızına etkisi çok daha düşük kalmaktadır.

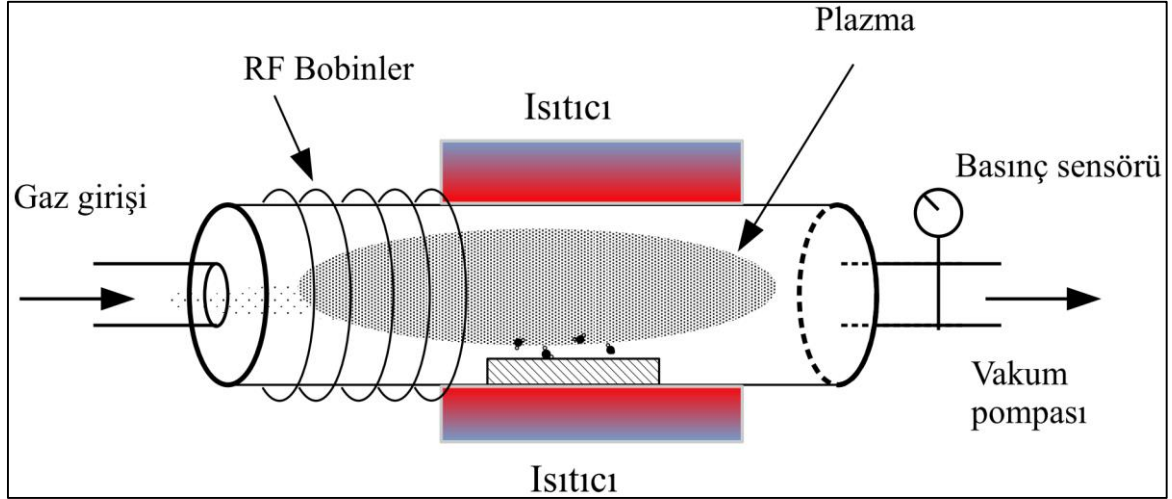


Şekil 3.9. LPCVD sistemine ait şematik gösterim

LPCVD ile genellikle oksitler, nitrürler veya polisilikon büyütme gerçekleştirilmektedir. LPCVD ile büyüme oranı düşük ve genellikle yüksek sıcaklıklarda büyümeler gerçekleştirilmektedir. LPCVD yöntemi hem karmaşık hem de pahalı bir sistemdir ancak oldukça düzgün filmler üretilmektedir. Bu nedenle epitaksiyel ince film üretmek için çok kullanışlı bir metottür.

3.3.2 Plazma ile geliştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD)

PECVD yöntemi geleneksel CVD sisteminin plazma ile güçlendirilmiş hali olup vakum gerektiren bir yöntemdir. PECVD genellikle 1-10 Torr basınç aralığında çalışmaktadır. PECVD yönteminde oluşturulan plazmayı sabit tutmak için RF gücü önemli bir faktördür. Hem RF gücü hem de gaz akış oranı, büyütme üzerindeki önemli deneysel parametrelerdir.

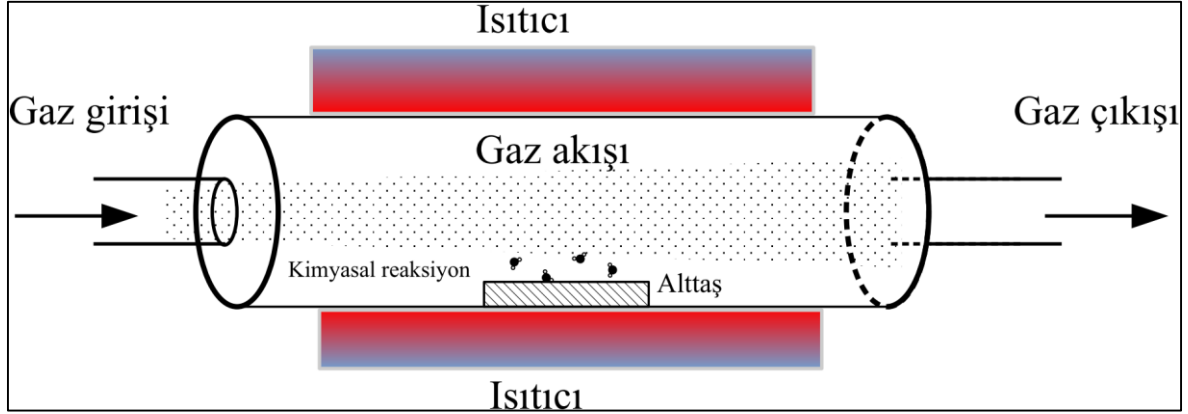


Şekil 3.10. PECVD sistemine ait şematik gösterim

Şekil 3.10 ile PECVD yöntemine ait şematik gösterim verilmiştir. PECVD yönteminde plazma alttaş üzerinde sarımlı bobinler tarafından oluşturuluyorsa buna direkt plazma PECVD yöntemi denilmektedir. Ancak plazma alttaştan uzak bir bölümde oluşuyorsa bu sisteme uzak plazma PECVD yöntemi denilmektedir. PECVD yönteminde reaksiyonlar diğer yöntemlere göre yüksek enerjilere sahip elektronlar veya uyarılmış bazı radikal gruplar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple yüzeyde bazı kusurlar meydana gelebilmektedir.

3.3.3. Atmosferik basınçta kimyasal buhar biriktirme (APCVD)

Herhangi bir vakum ekipmanı gerektirmeyen zararsız kimyasallar ile büyütme gerçekleştirilen bir CVD yöntemidir. Şekil 3.11 ile şematik olarak gösterilmiştir. Reaktör içerisinde yüksek oranda reaktant girdiğinden APCVD yüksek büyüme oranına sahip olup düşük sıcaklık bölgesinde çalışmaktadır. APCVD yönteminde elde edilen yüzeylerin pürüzlü olması, düzenli kaplayamama problemi ve özellikle ince film yerine toz gibi yüzey kaplamaları başlıca problemlerdir. Araştırmacılar tarafından vakum sistemi gerektirmeyen kurulumu kolay bir yöntem olmasına rağmen, LPCVD ve PECVD gibi oldukça kontrollü yöntemlere göre bazı dezavantajlara sahiptir.



Şekil 3.11. APCVD sistemine ait şematik gösterimi.

Çizelge 3.1 ile verilen 3 farklı CVD reaktörü arasındaki avantaj, dezavantaj ve reaktörlerin uygulamalarına ait bazı bilgiler verilmiştir. PECVD ve LPCVD, yüzey pasivasyonu ve geçit dielektriği olarak kullanılan Silikon nitrür (Si_3N_4) gibi daha çok transistör, LED gibi aygıt uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

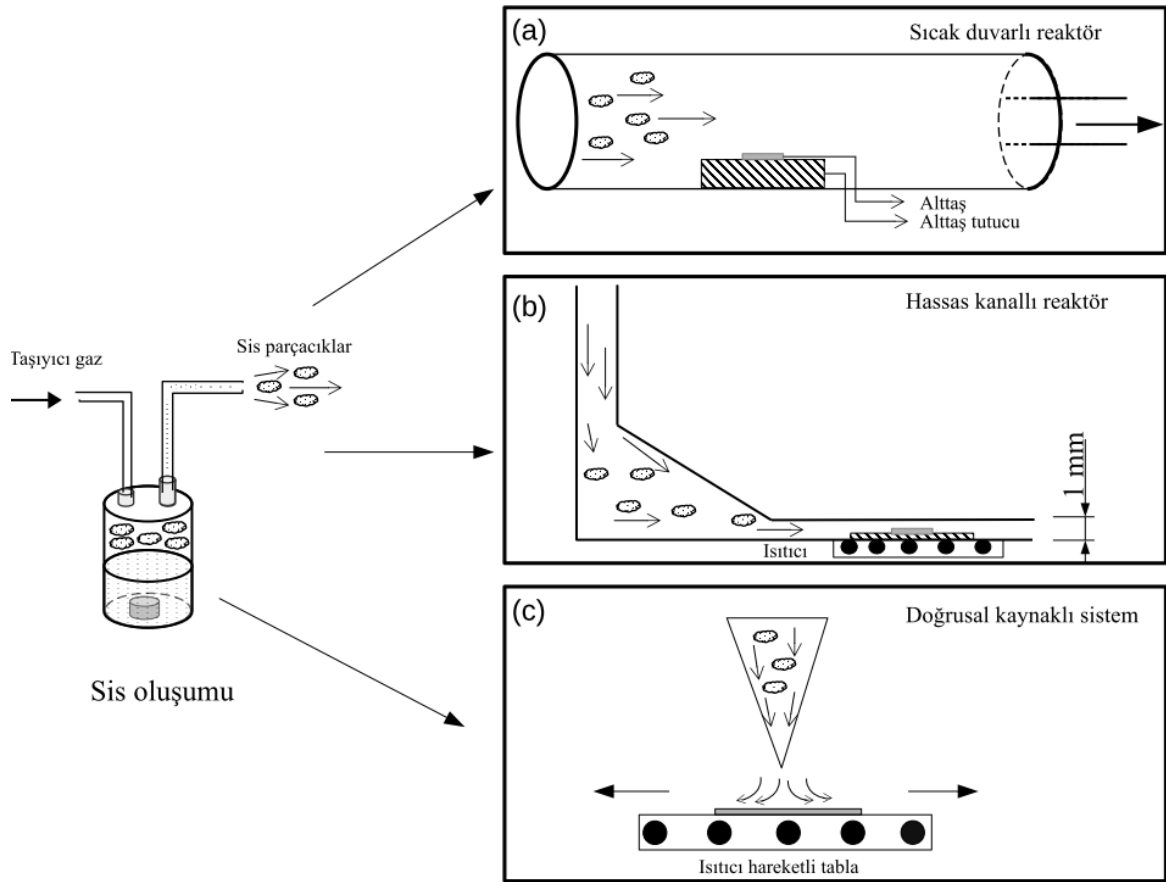
Çizelge 3.1. CVD yöntemlerinin bazı avantaj, dezantaj ve uygulama alanları

CVD yöntemi	Avantajları	Dezavantajları	Uygulamalar
LPCVD	• Yüksek kalitede yüzey üniformu • Çok sayıda alttaş hazırlama	• Yüksek büyütme sıcaklığı • Düşük büyüme oranı	• Poli-silikon • Silikon Nitrür • Yüksek sıcaklık oksitler
PECVD	• Düşük sıcaklık büyütme • Yüksek büyüme oranı	• Kimyasal kirlilik	• Düşük sıcaklık yalıtkanları • Pasivasyon katmanları
APCVD	• Basit reaktör • Yüksek büyüme oranı • Düşük sıcaklıkta büyütme	• Kimyasal kirlilik • Yüzey pürüzlülüğü	• Düşük sıcaklık oksitler

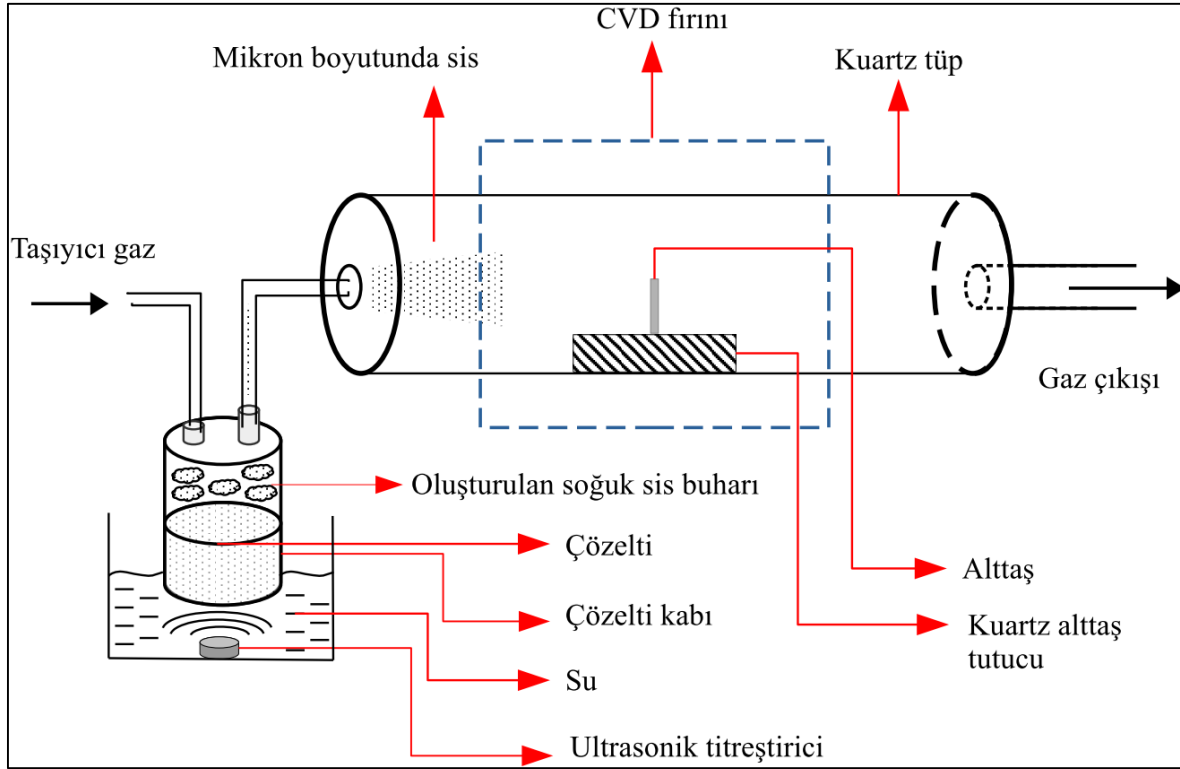
3.4. Ultrasonik Sprey Kimyasal Buhar Biriktirme (USCVD)

USCVD yöntemi, klasik bir CVD sistemi ve bir sprej piroliz sisteminin birleştirilmesi ile yeni bir büyüme metodu olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem ile kaliteli ve kolay üretilen kristallerin önünün açabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple son 10 yılda gelişen yeni bir

yöntemdir. Literatür incelendiğinde USCVD sistemlerinin üç farklı reaktör tipine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 3.12 ile üç farklı reaktör tipini içeren şematik gösterim görülmektedir. Şekil 3.12a) ile görülen reaktör tipi sıcak duvarlı reaktör tipine örnek olup klasik CVD büyütmelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu reaktörün avantajı yüksek sıcaklıklarda büyütme yapabilmesidir. Şekil 3.12b)'de hassas kanallı reaktör sistemi gösterilmiştir. Alttaş ile öncü arasında reaksiyon mesafesinin azaltılması hedeflenmiştir. Bu sayede reaksiyon alanında yüksek basınçta Oksijen oluşturularak büyütülen yapı içerisinde oksijen kusurlarının en aza indirilmesi amaçlanmıştır [8]. Diğer bir sistem ise şekil 3.12c) ile verilen doğrusal kaynaklı USCVD büyütme sistemidir. Bu sistemde oluşturulan sis parçacıkları bir başlık yardımı ile alttaş üzerine gönderilmektedir. Bu büyütme yönteminde hareketli ve ısıtıcı tabla sayesinde daha büyük yüzeylere büyütme yapılabilir. Bu sistem bir lazer yazıcı başlığı şeklinde düşünebilir. Literatürde bu yöntem ile yüksek kristal kalitesine sahip ZnO kristaller büyütüldüğü görülmektedir [8, 111-113].



Şekil 3.12. a) Sıcak duvarlı reaktör, b) hassas kanallı reaktör, c) doğrusal kaynaklı USCVD sistemlerine ait şematik gösterim [8, 111-113]



Şekil 3.13. Sıcak duvarlı USCVD yöntemine ait şematik gösterim

Şekil 3.12 ile verilen reaktör tiplerinden sıcak duvarlı reaktör tipi kullanılarak bu tez çalışmasından ZnO ve MgZnO numuneler hazırlanmıştır. Bu sebeple bu reaktör tipi Şekil 3.13 ile daha detaylı gösterilmiştir. USCVD yönteminde alttaş dikey veya yatay olarak konumlandırılabilir. USCVD yönteminde büyüme adımlarını daha iyi anlayabilmek için büyütme gerçekleşmesindeki temel adımlar aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir;

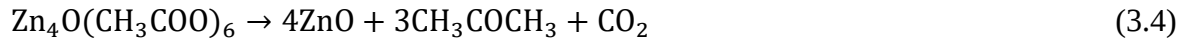
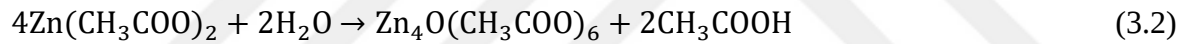
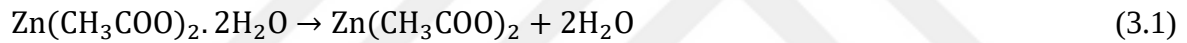
- hazırlanan bir çözelti, ultrasonik titreştirici ile soğuk sis buharı haline getirilmektedir,
- taşıyıcı bir gaz (O_2 , Ar, N_2 gibi) yardımı ile sis buharı reaktör içerisine gönderilmektedir,
- başlangıçta birkaç mikrometre boyutundaki öncü, alttaş üzerine yaklaştıkça çok daha küçük nanoparçacıklara ayrılarak yüzeye tutunma işlemi gerçekleşmektedir,
- Yüzeye tutunmayan ve reaksiyona girmeyen gruplar dışarı atılmaktadır.

Bu yöntemde büyütme, taşıyıcı gazın akış oranı, ultrasonik titreştirici gücü, oluşturulan çözeltinin molaritesi, büyütme sıcaklığı gibi deneysel parametreler ile kolay bir şekilde kontrol edilmektedir. En önemli deneysel parametre ise büyütme sıcaklığıdır. USCVD yönteminin ekonomik ve çevreye zararsız kaynakların kullanılması olması onun en dikkat çekici özellikleridir. Bu önemli avantajların yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir.

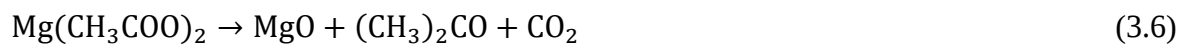
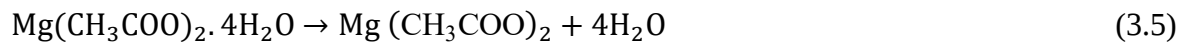
- Yüksek yüzey pürüzlülüğü,
- Polikristal büyüme,
- Yapısal kusurlar

3.4.1. USCVD yöntemi ile ZnO ve MgZnO ince film büyütme

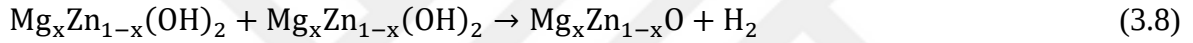
USCVD yöntemi ile genelde Çinko Asetat Dihidrat tuzu ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Zn kaynağı olarak kullanılmaktadır ve literatürde bazı alkol çeşitleri ve asitler çözücü olarak kullanılmaktadır [114-115]. Etanol ve propanol gibi alkol kullanımında çözeltinin yeterince dengeye gelmesi için bir dengeleyici (ing. stabilizer) kullanılmaktadır [116-118]. Yaygın olarak kullanılan ise de-iyonize su ve asetik asit çözücülerdir. Hem düşük sıcaklık hem de yüksek sıcaklıklarda ZnO büyümelerinin gerçekleştirildiği literatürde görülmektedir [21]. $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ tuzunun bozunma süreci ve ZnO nanoparçacıkların oluşumunda aşağıdaki olası temel kimyasal tepkimeler gerçekleşmektedir [116],



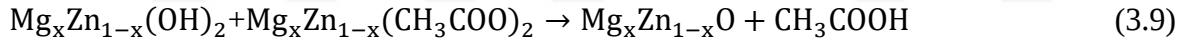
Eşitlik (3.1)-(3.4) ile $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ tuzunun ısısal bozunma süreci ve ZnO kristalin oluşumu olası kimyasal işlemler halinde verilmektedir. İlk olarak $\sim 100^\circ\text{C}$ sıcaklıkta $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ tuzunun dehidrasyon işlemi gerçekleşmektedir. $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ kaynağının bozulma süreci 200°C - 300°C sıcaklıkları aralığında gerçekleşmektedir [119, 120]. Kullanılan $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ kaynağında büyütme sıcaklığı seçimi en kritik işlemlerden birisidir. Yukarıda verilen bilgiler ışığında, 300°C 'nin altındaki bir büyütme sıcaklığında büyüyen ZnO kristallerinin yanı sıra CH_3COO^- grubuna ait oluşumların görülmesi de olasıdır. Isısal analizler sonucunda $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tuzunun bozunma süresine ait olası temel kimyasal tepkimeler Eş. (3.5)-(3.6) ile verilmektedir [121],



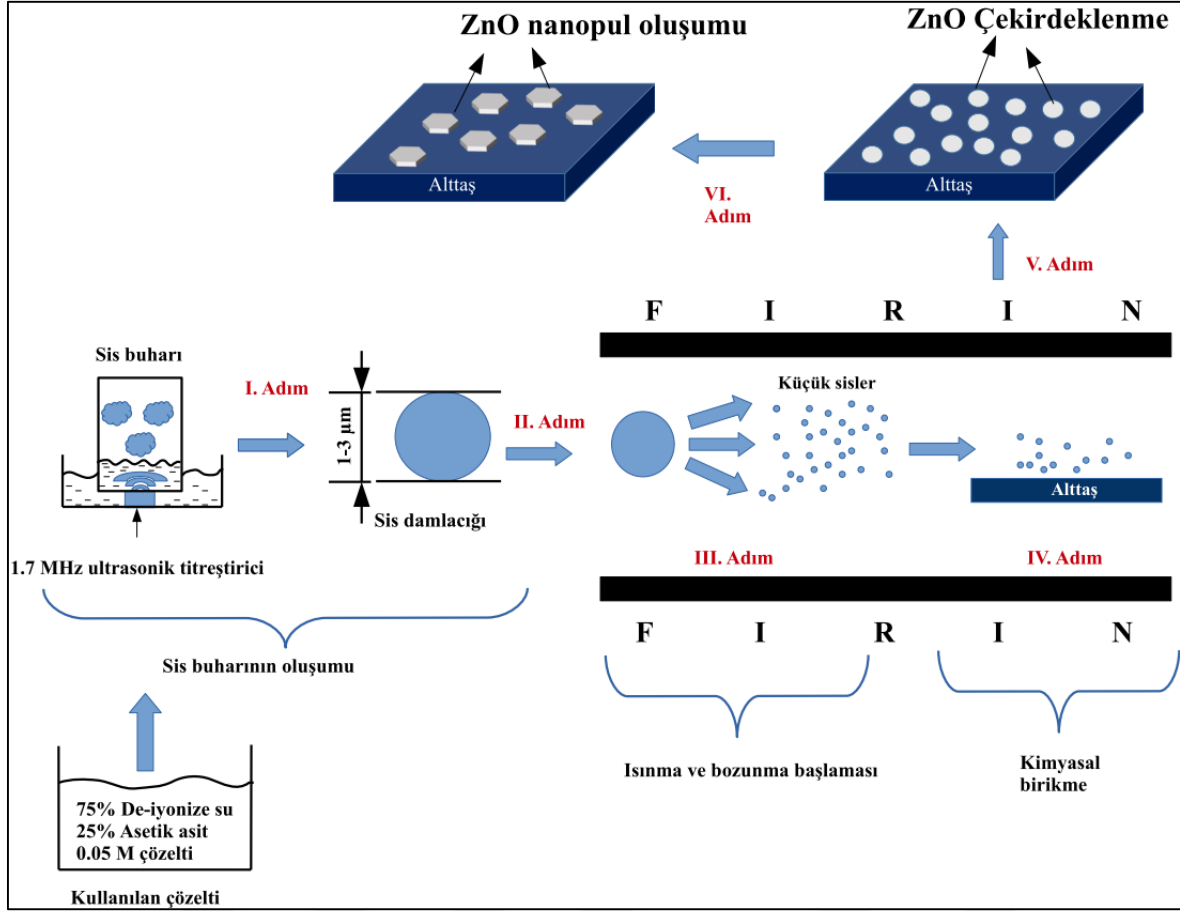
$\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tuzunun ısısal bozunma sürecine ilişkin çalışmalar bulunmaktadır [121, 122]. Bu çalışmalarda yukarıda bahsedilen kimyasal işlemlerin gerçekleşme adımları detaylıca incelenmiştir. $\text{Mg}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tuzunun ısısal bozunması boyunca öncelikle $\sim 100^\circ\text{C}$ civarında su kaybı/dehidrasyon gerçekleşmektedir. Asetat'ın bozunma süresinde birçok karboksil grup meydana gelmektedir. Bu gruplar Mg ile birleşerek öncelikle Magnezyum oksalat (MgC_2O_4) ve daha sonra da Magnezyum karbonat (MgCO_3) yapılarına dönüşmektedir. Yapılan X-ışınları analizi sonucunda yaklaşık 350°C sıcaklığına kadar bazı radikal grupların varlığı görülmüştür [123]. Magnezyum asetat tetra hidrat tuzunun bozunma süreci MgZnO büyütmelerinde büyütme sıcaklığının belirlenmesinde oldukça önemli bilgiler vermektedir. MgZnO oluşumunda literatürde bilinen kimyasal süreç Eş. (3.7)-(3.9) ile verilmektedir [124].



$\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}(\text{OH})_2$ ve CH_3COO gruplarının bozunma süreci ise,



ile verilmektedir. ZnO ve MgZnO oluşumunda kimyasal süreçlerin ve çözeltiden başlayarak ZnO nanoyapıların oluşumu şematik olarak şekil 3.14 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.14. USCVD yöntemi ile ZnO nanoparçacıkların oluşumunun şematik gösterimi

ZnO nanoparçacık oluşumunu yaklaşık altı adımda özetleyebiliriz. Birinci adımda bir çözelti hazırlanarak onun ultrasonik titreştirici yardımı ile soğuk sis buharı haline dönüştürülmesi sağlanmaktadır. İkinci adımda, yaklaşık birkaç mikron boyutundaki sis damlacığı büyütme sıcaklığına ulaşmış bir CVD fırını içerisinde bir sürücü gaz yardımı (Ar veya O₂) ile sürülmektedir. Üçüncü adımda, içerisinde asetat, su buharı ve Zn metali bulunan sis damlacığı ısısal olarak bozunma sürecine girer ve daha küçük gruplara ayrılmaktadır. Bu yöntem daha önce Bhaumik tarafından önerilen üç bölgeli bir sisteme benzemektedir [125].

Bu sistemde ilk bölge sis buharının girişi, ikinci bölge sis buharının fırına paralel hareket ettiği bölge ve üçüncü bölge alttaş üzerinde nanoparçacık biriktirme bölgesidir. Dördüncü adımda alttaş yüzeyine yaklaşan parçacıklar, yüzey ile etkileşim haline girerek yüzeye tutunma işlemini gerçekleştirmektedir. Yüzeye tutunmayan gaz ve parçacıklar dışarı atılmaktadır. Beşinci adımda, alttaş üzerine tutunan moleküller önce bir çekirdeklenme tabakasını oluşturmaya başlar ve daha fazla parçacık yüzeye gönderildikçe bu

çekirdeklenme tabakası birleşerek daha büyük adacıkları oluşturmaktadır. Bu adacıklar ise en son adımda birleşerek ZnO nanoparçacıkları meydana getirmektedir.



4. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu çalışmada, USCVD sistemi ile büyütülen ZnO ve MgZnO kristallerinin büyüme davranışları, yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi için X-ışınları kırınımı (XRD), Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Ultraviyole-görünür bölge spektrofotometre, konfokal Raman ve Hall etkisi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ZnO ve MgZnO kristallerinin elde edilme deneysel parametreleri çözelti hazırlama ve büyütme prosedürleri ile birlikte karakterizasyon sistemleri hakkında bilgiler sunulmuştur.

4.1. ZnO ve MgZnO Kristallerin Hazırlanması

4.1.1. Ultrasonik sprej kimyasal buhar biriktirme sistemi

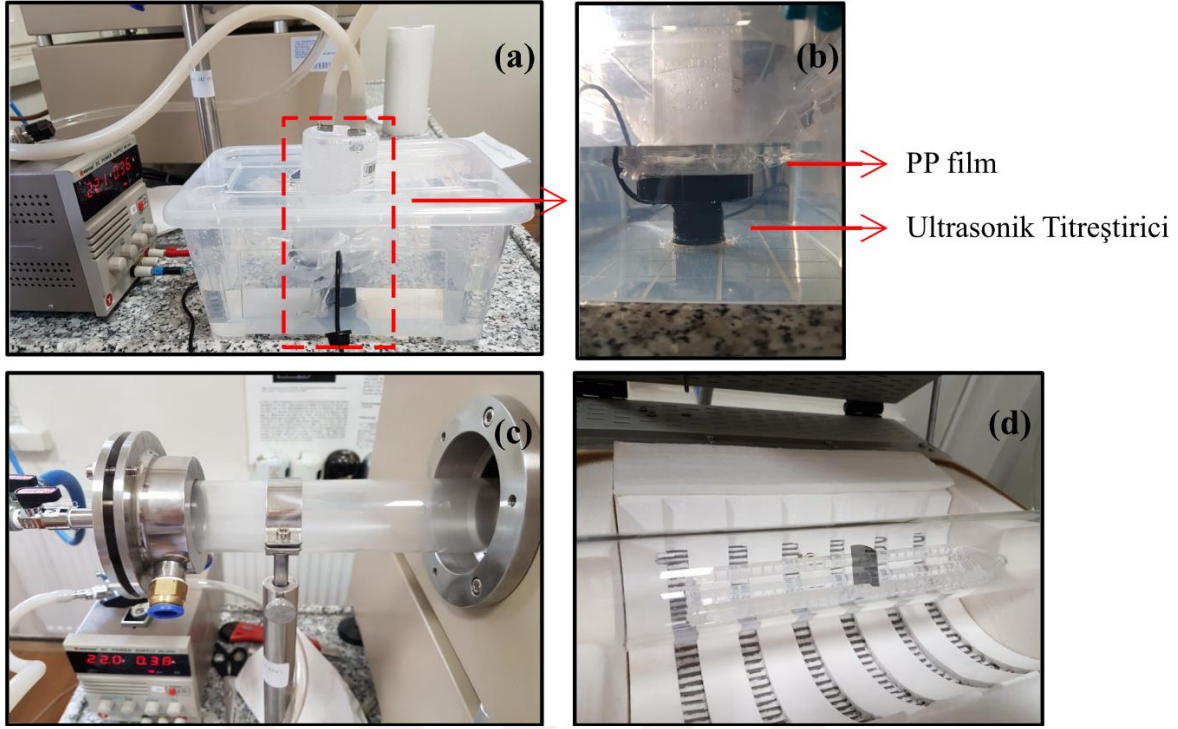
ZnO ve MgZnO nanoyapıların büyütülmesi Gazi Üniversitesi Fizik bölümü Düşük Boyutlu Malzemeler ve Sistemler Araştırma Grubu (LRG) bünyesinde bulunan USCVD sistemi ile büyütülmüştür. Büyütme sistemi, sis buharı oluşturma sistemi, taşıyıcı ve ısınma ve soğutma süresinde kullanılan gazların miktarlarını ayarlayabildiğimiz gaz akış kontrol sistemi ve büyümenin gerçekleştiği CVD reaktörü gibi temel üç bölümden oluşmaktadır. Büyütme sistemi birçok deneysel parametre ile kontrol edilebilmektedir. Bu parametreler başlıca kullanılan ultrasonik titreştirici gücü, sıvı öncü molaritesi, büyütme sıcaklığı, tavlama sıcaklığı, tavlama ortamı gibi sıralanabilir. Tez çalışması kapsamında bu deneysel parametrelerin büyütülen ZnO ve MgZnO nanoyapılara etkisi detaylıca incelenmiştir. Büyütmenin ilk adımı olarak öncü hazırlık aşamasında detaylıca anlatılacak olan 1 gün öncesinden hazırlanan ve yeterince çözünmüş olan çözelti ile öncü sis oluşturma sistemi hazırlanmaktadır. Kullanılacak olan alttaş reaktöre yerleştirildikten sonra reaktör büyütme sıcaklığına ulaşana kadar Ar atmosferinde tutulmaktadır. Dahası Ar gazı, büyütme öncesi birkaç sefer yüksek gaz akış oranlarında reaktör içerisine gönderilerek neredeyse tamamen Ar ortamının oluşması sağlanmaktadır. Fırın büyütme sıcaklığına ulaştığında sis buharı oluşturma sisteminin içerisinde oluşan sis buharının dengeye gelmesi beklenir ve daha sonrasında büyütme işlemi başlatılır. Büyütme süresi boyunca taşıyıcı gaz olarak kullanılan O₂ gaz akış oranı sabit tutulmuş olup tez çalışması boyunca bu oranda değişikliğe gidilmemiştir. Büyütmelerde literatürde farklı taşıyıcı gazların kullanıldığı görülmüştür. Fakat büyütülen kristallerin birer oksit kristaller olacağı düşünüldüğünde taşıyıcı gaz olarak

O₂ kullanımının kristal içerisinde büyütme boyunca istenmeyen durumlardan birisi olan O-boşluklarının doldurulmasını gerçekleştireceği öngörülmektedir.



Resim 4.1. Ultrasonik Sprey Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi

Büyütmelerin gerçekleştirildiği USCVD sistemi Resim 4.1 ile gösterilmektedir. Sistemi oluşturan parçalar 1’den 6’ya kadar numaralandırılmıştır. 1 ve 2 nolu yüksek basınçlı gaz kaynakları sırasıyla O₂ ve Ar gazlarıdır. Yüksek basınçlı gaz sisteminden gelen gazların sisteme gönderilmesini kontrol etmek için kullanılan gaz kontrol sistemi 3 numara ile gösterilmektedir. Bu gaz kontrol ünitesi oldukça hassas olup (hassasiyeti ~10 ml/dk) iğne valflidir. Daha sonra detaylıca anlatılacak olan sistemin önemli parçalarından olan sis buharının oluşumunun gerçekleştirildiği sıvı öncü şişesi, ultrasonik titreştiricinin bulunduğu bölüm 4 numara ile gösterilmiştir. Yüksek sıcaklıklı ve sıcak duvarlı Protherm marka kapaklı split fırın 5 numara ile işaretlenmiştir. 6 numarada ise 120 cm uzunluğunda 2 inç çapında kuantız tüp gösterilmiştir.



Resim 4.2. USCVD sistemin detaylı gösterimi a) sis buharı oluşturma sistemi, b) sıvı öncü, c) sis buharının kuartz tüp içerisine gönderilmesi ve d) fırının iç kısmı ve SiO₂/Si alttaşın konumlandırılması

Resim 4.1’de 4 numara ile temsil edilen sis buharı oluşturma sistemi Resim 4.2 a) ile görülmektedir. Bir güç kaynağına bağlı ultrasonik titreştirici, sıvı öncü, ultrasonik titreştiricinin çalışması için içerisinde su bulunan bir kap’tan oluşmaktadır. Resim 4.2 b) ile sıvı prekursorun olduğu kap detaylı gösterilmiştir. Ultrasonik titreştirici, çözelti ile temas halinde olmamakla birlikte arada bir polipropilen (PP) film bulunmaktadır [126]. Deneysel gözlemlerimiz sonucunda ultrasonik titreştirici çözelti ile temas ettiğinde, titreştiricinin birkaç büyütme sonucunda bozulduğu görülmüştür. Bu sebeple ultrasonik titreştirici ile çözelti arasına PP film yerleştirilmiştir.

4.1.2. Sıvı Öncü Hazırlanması

Büyütmelerde kullanılan Çinko asetat dihidrat ve Magnezyum asetat tetrahidrat tuzlarının molarite hesaplamaları Eş. (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır;

$$M = \frac{N}{V} \quad (4.1)$$

burada M molarite, N çözünen maddenin mol sayısı ve V hazırlanan öncü çözelti hacmidir. Tez çalışması boyunca 0,01-0,1 M aralığında değişen çözelti molariteleri kullanılarak ZnO ve MgZnO kristalleri büyütülmüştür. Resim 4.3 ile öncü hazırlanma aşamasında kullanılan hassas terazi, manyetik karıştırıcı ve ultrasonik banyo görülmektedir. 0,001 g hassasiyetle tartım yapabilen Desis EHB 300 dijital terazi kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltilerin en az bir gün süre ile karıştırılması işlemi 0-2600 rpm aralığında hıza sahip ve oda sıcaklığından 100 °C'ye kadar ısıtılabilen bir manyetik karıştırıcı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Herbir büyütme öncesi alttaş temizliğinde 30 kHz frekansta çalışabilen ve 30-80 °C sıcaklık aralığında ısıtma sistemine sahip ultrasonik banyo kullanılmıştır.



Resim 4.3. Öncü hazırlanmasında kullanılan hassas terazi, manyetik karıştırıcı ve alttaş temizliğinde kullanılan ultrasonik banyo

Ultrasonik temizleme işlemi alttaş yüzeyindeki kirlilikleri uzaklaştırmak için önemli bir temizlik işlemidir. Resim 4.4 a) ile Çinko asetat dihidrat ve magnezyum asetat tetrahidrat tuzları görülmektedir. Hem ZnO hem de MgZnO büyütmeleri bu tuz kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Zn ve Mg kaynakları Sigma aldrich firmasından satın alınmış olup saflığı %99,5'in üzerindedir. Çözelti hazırlanırken asetik asit ve saf su oranı

korunmuştur. Hacimce %25 asetik asit ve %75 saf su ile çözelti hazırlanmıştır. Daha sonra hazırlanan çözelti resim 4.3 b)'de görüldüğü gibi oda sıcaklığında 1 (bir) gün süre ile manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Bu sayede çözeltideki Zn ve Mg tuzlarının yeterince çözünmesi hedeflenmiştir. Büyütme öncesinde yapılan kontrollerde herhangi bir tuz birikimi veya çözelti tabanına çökelme görülmemiştir.



Resim 4.4. a) Çinko asetat dihidrat ve Magnezyum asetat tetrahidrat tuzları, b) Manyetik karıştırıcı yardımı ile çözeltinin hazırlanması

4.1.3. Alttaşların hazırlanması

Tez çalışması boyunca ZnO ve MgZnO kristallerinin büyütülmesinde amorf soda-lime cam (SLG), tek kristal SiO₂/p-Si (100) ve tek kristal [0001] yönelimli Safir (c-Al₂O₃) alttaşlar kullanılmıştır. Alttaşlar MTI firmasından satın alınmıştır. Ayrıca MgZnO/ZnO büyütmeleri için yine MTI firmasından Zn-kutuplu ve O-kutuplu alttaşlar hazır olarak alınmıştır. Alttaşların temizliğinde Asetik asit (AA) CH₃COOH, Aseton (ASTN) C₃H₆O, Etanol (ETN) C₂H₅OH, İzopropanol (İPN) C₃H₈O ve De iyonize saf su (DİS) kullanılmıştır. Alttaşlar yaklaşık olarak 2,5x2,5 cm² ölçülerinde kare biçiminde hazırlanmıştır.

SiO₂/p-Si, c-Al₂O₃ alttaşlarının kalınlıkları 0,5 mm ve SLG ise 1 mm kalınlığındadır. P-Si alttaş üzerinde 90 nm kalınlığında ısıtılarak oksitlenmiş katman bulunmaktadır. Alttaş temizlik işleminde AA, ASTN, ETN ve İPN kimyasal temizliği sonucunda alttaşlar DİS ile durulanmıştır. Alttaşların kurutma işlemi kuru hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Alttaş temizlik işlemleri resim 4.6’da görülen ultrasonik banyo kullanılarak her bir işlem için 5’er dk. sürelerle gerçekleştirilmiştir.

4.1.4. ZnO ve MgZnO büyütmeleri için deney şartları

ZnO/SLG büyütme şartları

SLG üzerine büyütme işlemlerinde ilk olarak ultrasonik titreştirici (UT) gücünün ZnO büyütme işlemleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu büyütme işlemlerindeki deneysel şartlar çizelge 4.2 ile verilmektedir. Bu büyütme işlemlerinde öncü molaritesi, büyütme sıcaklığı ve taşıyıcı gaz akış oranı sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.2. UT gücünün etkisini incelemek için gerçekleştirilen ZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	UT gerilimi (V)	UT gücü (W)	Büyütme süresi (dk)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RE025	0,05	450	20	6,6	15	5
RE026	0,05	450	22	7,9	15	5
RE027	0,05	450	24	9,6	15	5

SLG üzerine gerçekleştirilen ZnO büyütme işlemlerinin ikincisi kullanılan sıvı öncünün molaritesindeki değişimin ZnO büyütme işlemlerine etkisinin incelenmesi olarak planlanmıştır. Sıvı öncü molarite etkisinin incelendiği büyütme şartları çizelge 4.3 ile verilmektedir.

Çizelge 4.3. Sıvı öncü molaritesine bağlı olarak incelenen ZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	UT gücü (W)	Büyütme süresi (dk)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RE030	0,1	450	7,9	15	5
RE031	0,05	450	7,9	15	5
RE032	0,02	450	7,9	15	5
RE033	0,01	450	7,9	15	5

ZnO kristallere ait büyütme sonrası tavlama ve tavlama ortamının etkisi incelenmiştir. Bu büyültmelerde iki farklı cam çeşidi SLG ve mikroskop camı (MG) kullanılmıştır. Bu büyültmeler ait deneysel parametreler çizelge 4.4 ile verilmektedir.

Çizelge 4.4. Tavlama etkisi ve tavlama ortamına bağlı olarak incelenen ZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	UT gücü (W)	Büyütme süresi (dk)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)	Altaş
RF047	0,05	350	7,9	15	5	MG
RF048	0,05	350	7,9	15	5	SLG

Çizelge 4.4 ile büyütülen ZnO kristalleri Ar ve O₂ ortamında 500 °C sıcaklıkta 15 dk. süre ile 160 ml/dk gaz akışında ısıtılma işlemde tutulmuştur.

ZnO/SiO₂/Si(100) büyüme şartları

SLG üzerine büyütülen ZnO kristalleri ile birçok deneysel parametre belirlenmiş olup büyültmelerin daha kaliteli altaşlar üzerine büyütülmesi planlanmıştır. İlk olarak tek kristal SiO₂/Si (100) altaş üzerine düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerinde büyültmeler planlanmış olup çizelge 4.5 ile büyütme şartları verilmektedir.

Çizelge 4.5. Farklı büyütme sıcaklıkları için SiO₂/Si(100) üzerine ZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	UT gücü (W)	Büyütme süresi (dk)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RE039	0,05	375	7,9	15	5
RE040	0,05	525	7,9	15	5
RE041	0,05	675	7,9	15	5

SiO₂/Si (100) alttaş üzerine planlanan bir diğer numune grubu ise düşük sıcaklık bölgesinde iki farklı sıcaklıkta büyütme ve yüksek sıcaklıkta ZnO kristallerin tavlama şeklinde planlanmıştır. Bu sayede en uygun büyütme sıcaklığı SiO₂/Si (100) alttaş üzerine ZnO büyümesi için belirlenmiş olacaktır. ZnO kristaller çizelge 4.6’da verilen büyütme şartlarında büyütülmüştür. Tüm ZnO numuneler büyütme sonrasında 900 °C sıcaklıkta tavlama. Ayrıca temizlik prosedüründe ETN ve ASTN etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı büyütme sıcaklıkları ve tavlama etkisi için SiO₂/Si(100) üzerine ZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	UT gücü (W)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)	Tavlama ortamı	Alttaş temizliği
RE043	0,05	450	7,9	5	O ₂	ETN, DİS
RE044	0,05	450	7,9	5	O ₂	ASTN, ETN, DİS
RE045	0,05	350	7,9	5	O ₂	ASTN, ETN, DİS
RE046	0,05	350	7,9	5	Ar	ASTN, ETN, DİS

ZnO/c-Al₂O₃ büyüme şartları

Hekzagonal alttaş olan c-Al₂O₃ üzerine ZnO büyütme şartları çizelge 4.7 ile verilmektedir.

Çizelge 4.7. Düşük sıcaklıklar için c-Al₂O₃ üzerine ZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	Büyütme süresi (dk)	UT gücü (W)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RF062	0,05	250	30	7,9	5
RF063	0,05	300	30	7,9	5
RF064	0,05	350	30	7,9	5
RF065	0,05	400	30	7,9	5

MgZnO/SLG büyütme şartları

MgZnO kristalleri ilk olarak SLG alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Hem öncü içerisindeki Mg oranının hem de sabit Mg oranında büyütme sıcaklığının etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı Mg oranları için MgZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	Büyütme süresi (dk)	Hazırlanan Mg oranı (%)	UT gücü (W)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RF049	0,05	350	30	15	7,9	5
RF051	0,05	350	30	30	7,9	5
RF052	0,05	350	30	45	7,9	5
RF054	0,05	350	30	0	7,9	5

Çizelge 4.9. Farklı büyütme sıcaklıkları için MgZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	Büyütme süresi (dk)	Hazırlanan Mg oranı (%)	UT gücü (W)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RF057	0,05	300	30	30	7,9	5
RF051	0,05	350	30	30	7,9	5
RF058	0,05	400	30	30	7,9	5

Mg içeriğinin etkisinin incelendiği büyütme için deneysel parametreler çizelge 4.8 ile verilmektedir. İkinci MgZnO büyütme planında ise büyütme sıcaklığının MgZnO

büyütmesine etkisi incelenmiştir. Bu büyütmelere ait deneysel şartlar çizelge 4.9 ile verilmektedir.

MgZnO/SiO₂/Si büyütmeleri

ZnO büyütmelerine benzer olarak MgZnO büyütmeleri de tek kristal alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Bu amaçla MgZnO kristaller SiO₂/Si alttaş üzerine büyütülmüştür. Büyütmelere ait deneysel şartlar çizelge 4.10 ile verilmektedir.

Çizelge 4.10. Farklı büyütme sıcaklıkları için SiO₂/Si üzerine MgZnO büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	Büyütme süresi (dk)	Hazırlanan Mg oranı (%)	UT gücü (W)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RF059	0,05	300	30	30	7,9	5
RF060	0,05	350	30	30	7,9	5
RF061	0,05	400	30	30	7,9	5

MgZnO/c-Al₂O₃ büyütmeleri

MgZnO kristallerin baskın (0002) yönelimli kristallere sahip olması amacıyla c-Al₂O₃ üzerine büyütme gerçekleştirilmiştir. Büyütme işleminde n-tipi özelliğini daha iyi hale getirmek için %1 oranında Al katkısı yapılmıştır. Literatürde de bilindiği gibi Al katkısı MgZnO kristallere n-tipi davranış özelliği vermektedir [127, 128]. Bu sebeple AlCl₃ kaynağı ile katkılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tez boyunca Al katkılı MgZnO kristaller n-MgZnO olarak temsil edilecektir. Büyütme şartları çizelge 4.11 ile verilmektedir. Büyütülen MgZnO kristaller 900 °C sıcaklıklarda O₂ ortamında tavlanmıştır.

Çizelge 4.11. Al katkılı ve katkısız MgZnO kristallerin büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Sıcaklık (°C)	Al katkısı (%)	Büyütme süresi (dk)	Hazırlanan Mg oranı (%)	UT gücü (W)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RF066	0,05	350	-	30	30	7,9	5
RF067	0,05	350	1	30	30	7,9	5

MgZnO/ZnO çokluyapı büyütmeleri

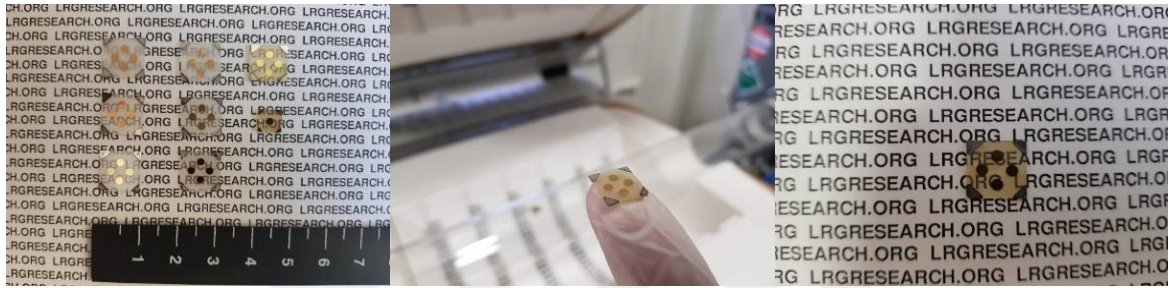
Tez çalışmasının son büyütme grubunda MgZnO/ZnO çoklu yapı büyütmeleri gerçekleştirilmiştir. Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi MgZnO/ZnO çokluyapısının 2DEG göstermesi nedeniyle ZnO alttaş üzerine MgZnO büyütmesi ve c-Al₂O₃ alttaş üzerine USCVD ile ZnO ve üzerine MgZnO büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Sadece ZnO tek kristal alttaş üzerine büyütülen MgZnO kristallerde %1 oranında Al katkısı bulunmaktadır. İlk olarak ZnO tampon katmanın büyütme şartları çizelge 4.12 ile verilmektedir. Burada c-Al₂O₃ üzerine kalın bir ZnO tampon katman oluşturulması hedeflenmiştir. Bu sebeple büyütme süresi ve tavlama süresi daha önceki ZnO büyütmelerinin yaklaşık 4 katı sürede gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bu ZnO tampon tabaka ve Zn-kutuplu ZnO alttaş, 2 tane MgZn/ZnO çoklu yapısı için tampon katman olarak kullanılmıştır. Farklı şartlarda başka ZnO tampon katman büyütmeleri denenmesine rağmen yüzey direnci okunamadığı için bu tez kapsamında incelenmemiştir. Her iki tampon tabaka için MgZnO büyütmelerine ait deneysel şartlar çizelge 4.13 ile verilmektedir.

Çizelge 4.12. ZnO tampon katman büyütme şartları

Numune kodu	Molarite (M)	Büyütme sıcaklığı (°C)	Büyütme süresi (dk)	UT gücü (W)	Tavlama süresi (dk)	Tavlama sıcaklığı (°C)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RF080	0,05	350	120	7,9	120	900	5

Çizelge 4.13. ZnO tampon katman üzerine n-MgZnO büyütme şartları

Numune kodu	ZnO tampon katman	Molarite (M)	Al (%)	Sıcaklık (°C)	Büyütme süresi (dk)	Hazırlanan Mg oranı (%)	UT gücü (W)	O ₂ gaz akış oranı (L/dk)
RF083	RF080	0,05	-	350	30	30	7,9	5
RF088	Zn-kutuplu ZnO	0,05	1	350	30	30	7,9	5

Resim 4.5. Hazırlanan MgZnO/ZnO çokluyapıları 1x1 cm² ve van der Pauw kontak geometrisi

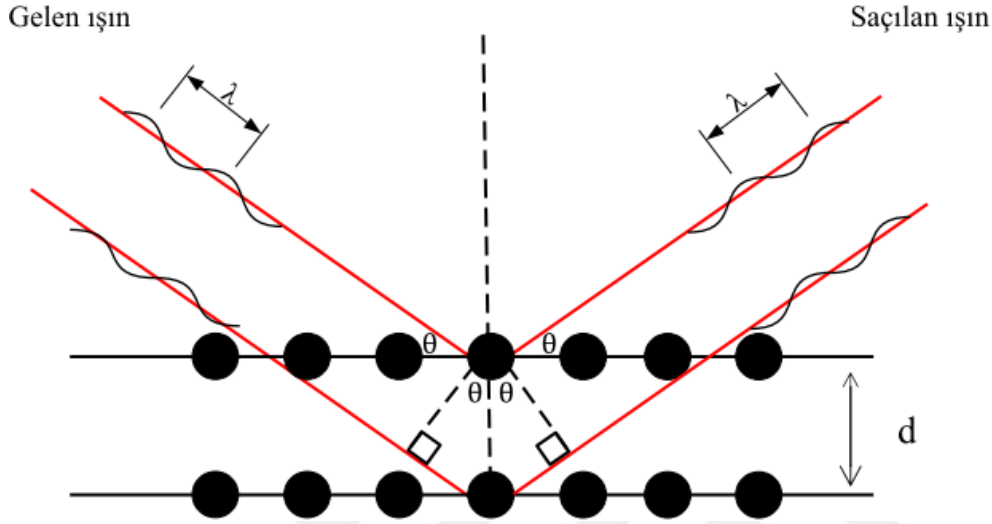
Büyütlen MgZnO/ZnO çokluyapılarına ait resim 4.5 ile verilmektedir. Van der Pauw kontak geometrisi kullanılarak elektiksel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Numuneler üzerine İPN ve DİS ile temizlik işlemi gerçekleştirildikten sonra ilk olarak Titanyum metali 30 nm kalınlığında daha sonra Alüminyum metali 300nm kalınlığında omik kontak için numune üzerine biriktirilmiştir. Metalizasyon işlemi gerçekleştirdikten sonra 300 °C sıcaklıkta 2 dakika süre boyunca tavlama işlemi yapılmıştır. Numunelere ait kontaklar Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'da alınmıştır.

4.2. Yapısal Karakterizasyon

4.1.2. X-ışınları kırınımı (XRD)

Bir malzemenin kristal yapısı tayinini yapabilmek için X-ışınları kırınımı analizlerini gerçekleştirmek gerekmektedir. X-ışınları 0,01 nm ile 10 nm aralığında dalga boyuna sahip dalgalardır. X-ışınları kullanılmasının sebebi sahip olduğu dalga boyu sayesinde kristal düzlemleri arası mesafe ve örgü parametreleri ile benzer ölçekte olmasıdır. Bu analiz sayesinde kristal düzlemleri arası mesafe, örgü parametreleri gibi kristal'e ait temel

parametreler belirlenmektedir. Bir monokromatik X ışın demeti kristal üzerine düştüğü zaman şekil 4.1 de görünen gibi atomik düzlemlerden saçılmaktadır. Gelen ışın ile saçılan ışın arasında bir yol farkı oluşur. Bu yol farkı Bragg yasası ile formülize edilmektedir [129, 130]. Burada saçılan ışınlar yapıcı girişim meydana getirmektedir.



Şekil 4.1. X-ışınlarının kristal düzlemleri arasından saçılması ve Bragg yasasının şematik gösterimi

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.2)$$

Eş. (4.2)'de Bragg yasasının matematiksel ifadesi görülmektedir. Burada d , atomik düzlemler arası mesafe, θ gelen ışın ile atomik düzlem arasındaki açı, n bir tam sayı ve yansıma sayısıdır. Burada yansıma neredeyse ayna yansıma gibi kabul edildiğinden gelen ışın ile saçılan ışın atomik düzlem ile aynı açıya sahiptir. Bragg yasası sonucunda d parametresi elde edilmektedir. Bu d parametresi yardımı ile kristal'e ait örgü parametreleri kolay bir şekilde hesaplanmaktadır. Tüm kristaller için düzlemler Miller indisleri olarak adlandırılan h , k ve l harfleri ile (hkl) şeklinde ifade edilmektedir. Miller indisleri kristal düzlemlerin sınırları ile elde edilmektedir. Eş. (4.3)-(4.6) arasında sırasıyla Kübik, Tetragonal, Ortorombik ve Hekzagonal kristalleri için d ile örgü parametreleri arasındaki ilişki verilmektedir.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.5)$$

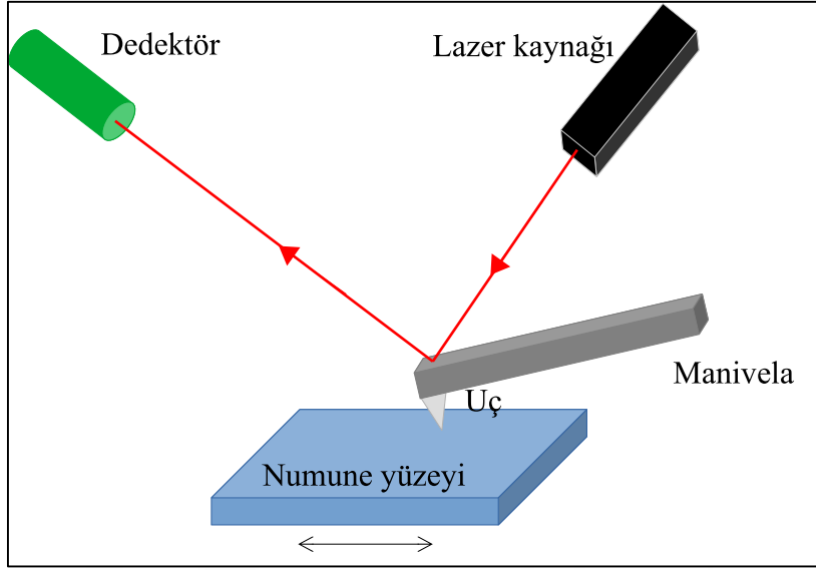
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.6)$$

4.2.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

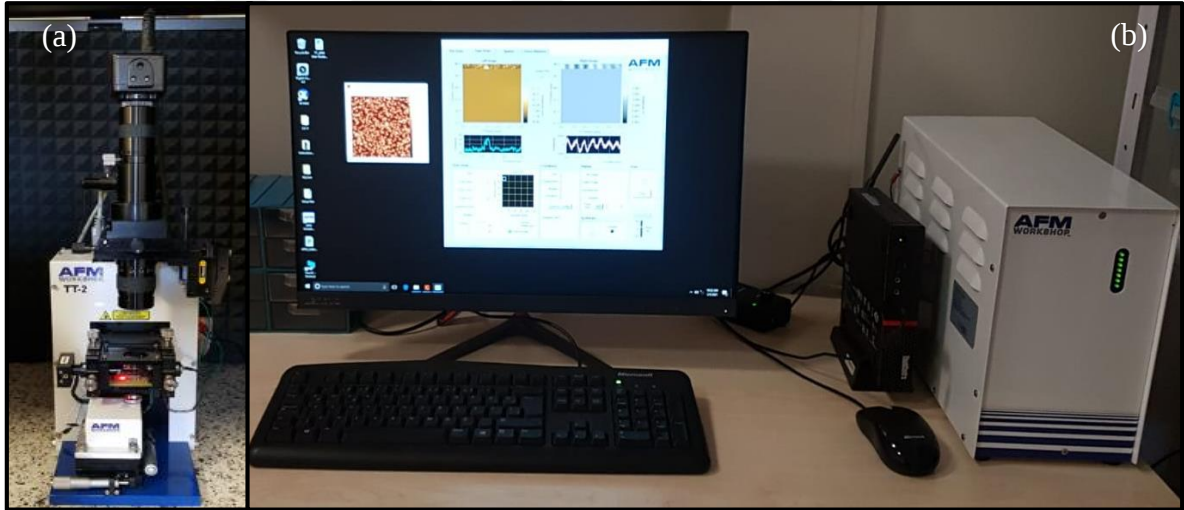
Bir ince film veya yığın malzemenin yüzey özelliklerini incelemek için en çok kullanılan yöntemlerden birisi AFM ölçümleridir. AFM yüksek kalitede yüzey morfolojisini incelemek için gerekli en temel mikroskop tekniğidir. Yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki parçacık boyutu veya genel yüzey morfolojisi için yaygın bir biçimde tercih edilen bir deney sistemidir. AFM bir yüzey analiz tekniğidir. Şekil 4.2 ile görüldüğü gibi bu sistem temelde bir lazer kaynağı, bir dedektör ve yüzeyi tarayan esnek bir manivela (ing. Cantilever) ile buna bağlı bir uç'tan oluşmaktadır. Yüzey atomları ile elastik bir manivela arasındaki etkileşim sonucunda AFM ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Yüzey üzerinde manivela ucundaki yüzeyi tararken, yüzey ve uç arasındaki etkileşim nedeniyle manivela bir miktar bükülmektedir. Lazer kaynağından gelen odaklanmış lazer bükülen manivela üzerinden bir fotodedektör üzerine düşmektedir. Fotodedektör üzerinde manivelanın hareketinden kaynaklanan bir yüzey deseni meydana gelmektedir. Yüzeyi tarayan uç genellikle Silikon-temelli bir malzemeden oluşmaktadır. Yaklaşık birkaç nanometre mesafeden yüzey taranmaktadır. AFM tekniği Hooke kanununa dayanmaktadır.

$$\vec{F} = -k \cdot \vec{x} \quad (4.7)$$

Burada $\vec{F}$ kuvvet, k yay/burulma sabiti ve $\vec{x}$ ise manivela eğilme mesafesidir. Manivelanın k değeri yaklaşık 0,1 ile 1 N/m aralığındadır. Tez çalışması boyunca hazırlanan ZnO ve MgZnO nanoyapıların yüzey özellikleri için Gazi Üniversitesi Fizik bölümünde Düşük-boyutlu Malzemeler ve Sistemler grubu bünyesinde bulunan AFM Workshop TT-2 serisi ile incelenmiştir. Resim 4.6 ile AFM cihazına ait görsel bulunmaktadır. AFM TT-2 serisi oldukça hassas z ekseninde yaklaşık 0,2 nm hassasiyete sahiptir.



Şekil 4.2. AFM tekniğine ait şematik gösterim



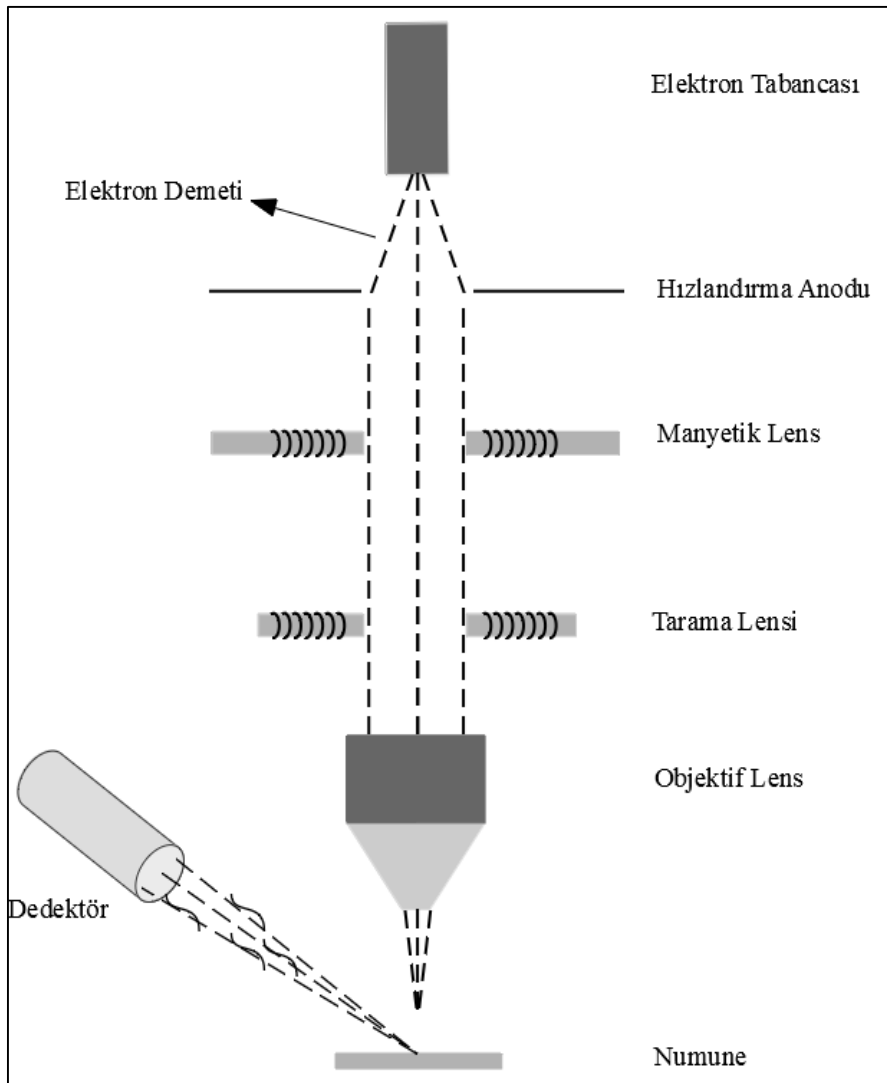
Resim 4.6. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM-Workshop TT-2) a) AFM ölçüm sistemi b) kontrol sistemi

AFM TT-2 serisi oldukça geliştirilmiş bir mikroskop olup yüksek çözünürlüklü (x400) 3MP kamera, manuel veya otomatik olarak z eksenini boyunca hareket edebilme kabiliyetine sahiptir. Analizler için Gwyddion v. 2.35 yazılımı kullanılmıştır.

4.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu tıpkı AFM gibi günümüzde en çok tercih edilen yüzey görüntüleme tekniğidir. 0,5-30 kV aralığında bir hızlandırma gerilimi altında hızlandırılan

elektronlar oldukça yüksek kinetik enerjiye ulaşarak numune üzerine düşürülür. Burada elektron-numune etkileşmesi sonucu gelen elektronlar numune üzerinde yavaşlayarak geri saçılırlar. Yüzeyden çıkan bu elektronlar ikincil elektron (ing. SE), geri saçılmış elektron (ing. BSE), kristal yapı ve yönelimleri belirlemek için kırınımlı geri saçılmış elektronlar (ing. EBSD) ve karakteristik X-ışınları olarak farklı şekillerde saçılmaktadır. İkincil elektron ve geri saçılmış elektron görüntülemeye sıkça kullanılmaktadır. Bu sayede numune yüzeyinde herhangi bir tahribat yaratmadan yüzey bilgisi alınmaktadır. Şekil 4.3 ile bir SEM'e ait şematik gösterim verilmektedir.



Şekil 4.3. SEM tekniğine ait şematik gösterimi

Tez çalışması kapsamında ZnO ve MgZnO kristallerin SEM ölçümleri Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde bulunan (NANOTAM) ve bir hibrit sistem olan e-

Line Plus elektron demet litografi ve elektron mikroskobu ile resim 4.7 görülen Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama Araştırma Merkezinde bulunan Hitachi SU5000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



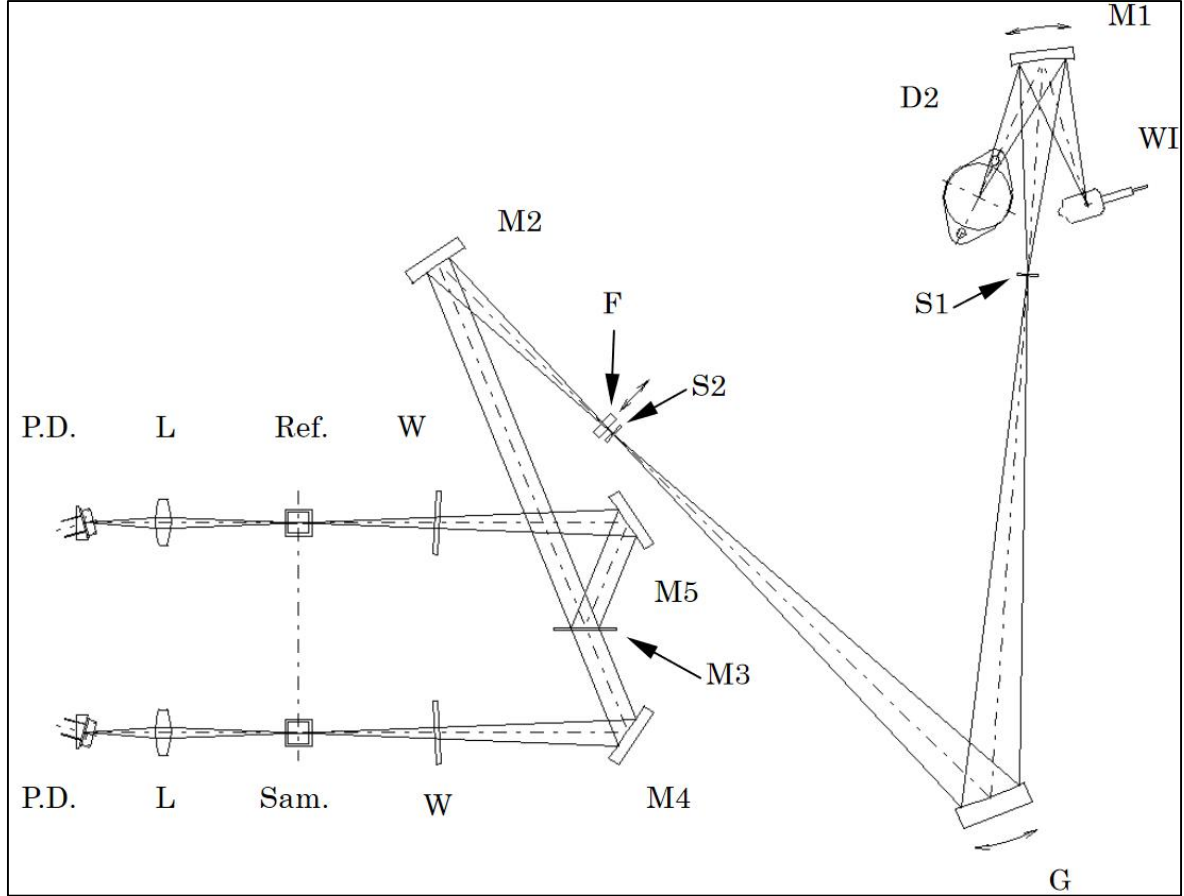
Resim 4.7. Hitachi SU5000 taramalı elektron mikroskop sistemi

4.3. Optiksel Karakterizasyon

4.3.1. Ultraviyole-görünür bölge spektrofotometresi

UV-Görünür bölge spektrofotometre ölçümleri ile bir ince film veya nanoyapıya ait optiksel soğurma, geçirgenlik ve yansıtıcılık gibi ölçümler gerçekleştirilmektedir. Ölçümün fiziksel temeli ışık-madde etkileşmesine dayanmaktadır. Bir kristal üzerine onu uyarabilecek bir enerjide ışık düştüğünde değerlik bandında bulunan bir elektron, iletim bandına geçiş yapmaktadır. Bu sayede kristal üzerine düşen ışığın enerjisini soğurmuş olur. Bu temelde kristalin optik özelliklerini inceleyebilmek için esas olan kristal üzerine düşen ışığın yeterli enerjiye sahip olması gerekliliğidir. Tez kapsamında çalışılan UV-görünür bölge spektrofotometresi 190-1100 nm aralığında ölçüm yapabilmektedir. Bu sayede dar yasak bant aralıklı yarıiletkenlerden ultrageniş yasak bant aralıklı yarıiletken kristallere kadar UV-görünür bölge ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir. UV-görünür bölge spektrofotometresine ait optik sistem/konfigürasyon şekil 4.4 ile verilmektedir. Ölçüm sisteminde ışık kaynağının

tayflarına ayırabilen bir optik düzenek, Bir ışık kaynağından gelen ışın önce bir spektrometre daha sonra numune üzerinden geçer ve bir dedektör ile veri toplanarak o numunenin optik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilir. UV-görünür bölge ölçümlerinde birçok ışık kaynağı kullanılabilir.



Şekil 4.4. Shimadzu UV-1700 cihazına ait optik sistem [131]

Çizelge 4.14. Shimadzu UV-1700 cihazına ait optik sistem kısaltmaları ve açıklamaları

Kısaltmalar	Açıklamalar	Kısaltmalar	Açıklamalar
WI	Halojen lamba	M1	Işık kaynağı ayarlama aynası
D2	D ₂ lamba	M2	Toroidal ayna
S1	Giriş Yarık (ing. slit)	M3	Işık ayırıcı
S2	Çıkış Yarık	M4	Numune kenarındaki ayna
G	Kırınım ağı	M5	Referans kenarındaki ayna
F	Kaçak ışık filtresi	W	Pencere camı
L	Lens	P.D.	Fotodiyot
Sam.	Numune tutucu	Ref.	Referans tutucu

Ancak uygun ışık kaynağı gereksinimi incelenen yarıiletken yapının yasak bant aralığı ile de değişmektedir. Örneğin bir ZnO kristal için (yasak bant aralığı $\sim 3,37$ eV) halojen ışık kaynağı (UV-B bölgesi ve üzeri) kullanmak yeterlidir. Daha yüksek yasak bant aralıklı yarıiletkenler için ise UV-C ve daha düşük dalgaboylu bölgeler (< 280 nm) için halojen lamba yeterli gelmemektedir. Tez çalışması boyunca ZnO ve MgZnO ölçümlerinde halojen ışık kaynağı kullanılmıştır.



Resim 4.8. Optik ölçümlerde kullanılan UV-Görünür bölge spektrofotometresi

ZnO ve MgZnO nanoyapıların optiksel özellikleri Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde bulunan Resim 4.8 ile gösterilen Shimadzu 1700 UV-görünür bölge spektrofotometre ölçümleri ile incelenmiştir.

4.3.2. Raman spektroskopisi

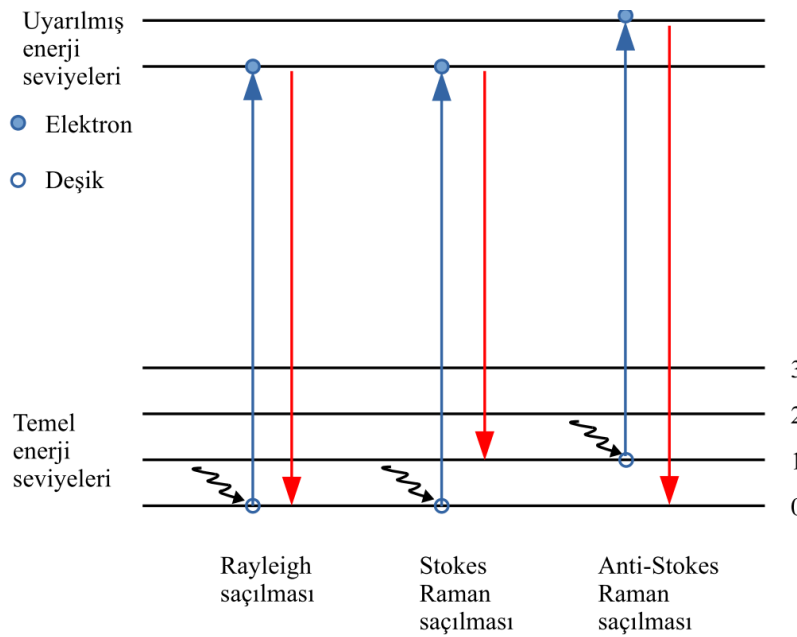
Bir ışık, kristal üzerine düştüğünde kristal tarafından ışık soğurulabilir, kristal ışığı geçirebilir veya ışık kristal üzerinden saçılabilir. Işığın kristalden saçılması Raman spektroskopisinin temelini oluşturmaktadır. Bir kristale ait elementsel içerik, kristal yapı, dislokasyon veya kusur gibi yapısal özellikleri Raman spektroskopi ölçümleri ile anlaşılabilir. Raman spektroskopisi temelde madde-ışık etkileşmesine dayanmaktadır. Bir lazer kaynağından çıkan monokromatik ışık numune üzerine düşmektedir. Işık veya fotonlar yüzeyden elastik veya elastik-olmayan biçimde

saçılmaktadır. Gelen foton ile saçılan foton aynı enerjiye sahipse buna elastik eğer farklı enerjiye sahipse buna da elastik-olmayan saçılma denilmektedir. Elastik saçılma Rayleigh saçılması olarak adlandırılırken elastik olmayan saçılma Raman saçılması olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.5 ile Rayleigh ve Raman saçılmalarına ait elektronik geçişler şematik olarak gösterilmektedir. Rayleigh saçılmasında uyarılmış seviyedeki elektron kararlı seviyesine dönerken aynı miktarda enerji ile bir foton yayınlar. Raman saçılmasında ise iki durum vardır; birinci durumda uyarılmış seviyeye çıkan elektron kararlı duruma dönerken daha az miktarda enerjili foton yayınlar ve bir fonon yaratmış olur. Bu durum Stokes-Raman saçılması olarak bilinmektedir. İkinci durumda ise uyarılmış elektron kararlı seviyesine dönerken daha yüksek enerjili foton yayınlar ve bir fonon soğurmuş olur. Bu durum ise Anti-Stokes saçılması olarak bilinmektedir. Örnek bir Raman spektrumu üzerinden şekil 4.6 ile gösterilmektedir. Eş. (4.8) ve (4.9) sırasıyla Stokes Raman ve anti-Stokes Raman saçılmalarına ait formülasyonları göstermektedir [132, 133].

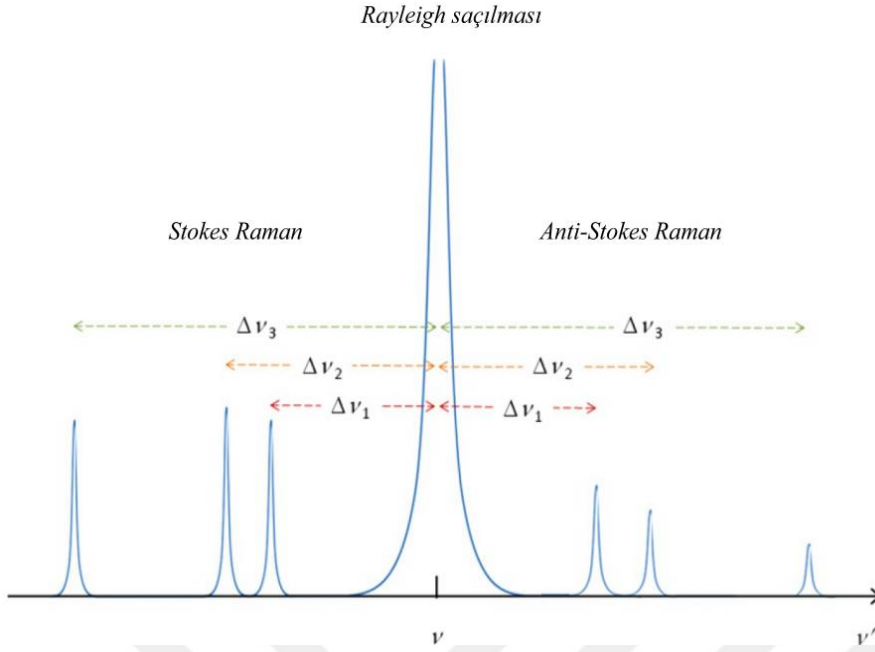
$$\nu' = \nu - \Delta\nu, \quad (4.8)$$

$$\nu' = \nu + \Delta\nu \quad (4.9)$$

Burada ν' ve ν sırasıyla saçılan fotonun ve gelen fotonun frekansını göstermektedir. $\Delta\nu$ ise molekülün titreşim frekansıdır.

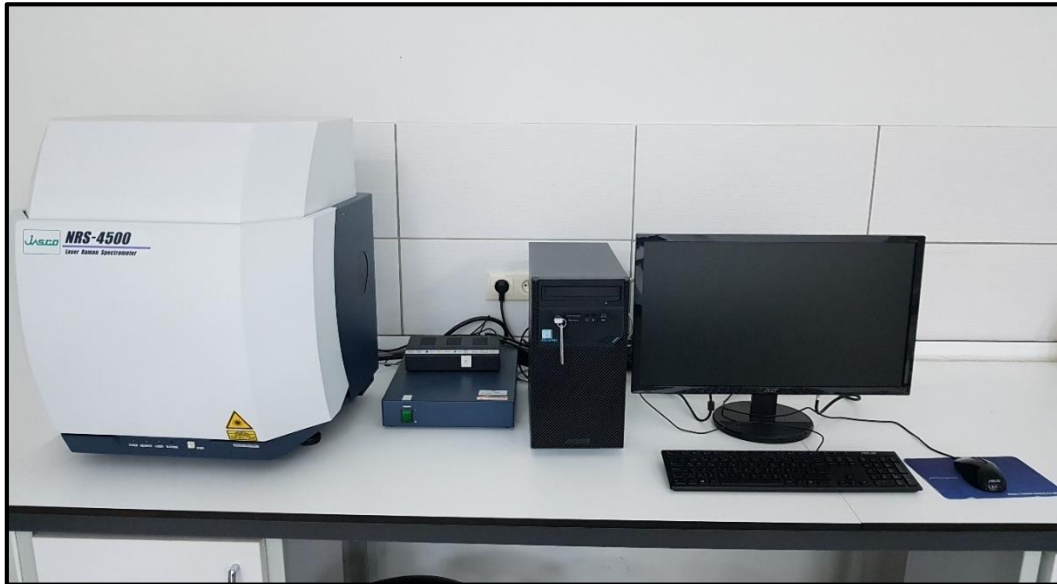


Şekil 4.5. Rayleigh, Stokes Raman ve Anti-Stokes Raman saçılmalarına ait elektronik geçişler



Şekil 4.6. Şematik Raman spektrumu [133]

Büyütlen numunelere ait konfokal Raman analizleri Resim 4.9 ile verilen Jasco NRS-4500 Raman spektroskopi cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 2 μm çaplı 532 nm (Yeşil) dalgaboyuna sahip lazer kullanılmıştır.



Resim 4.9. Jasco NRS-4500 Konfokal Raman spektroskopisi sistemi



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

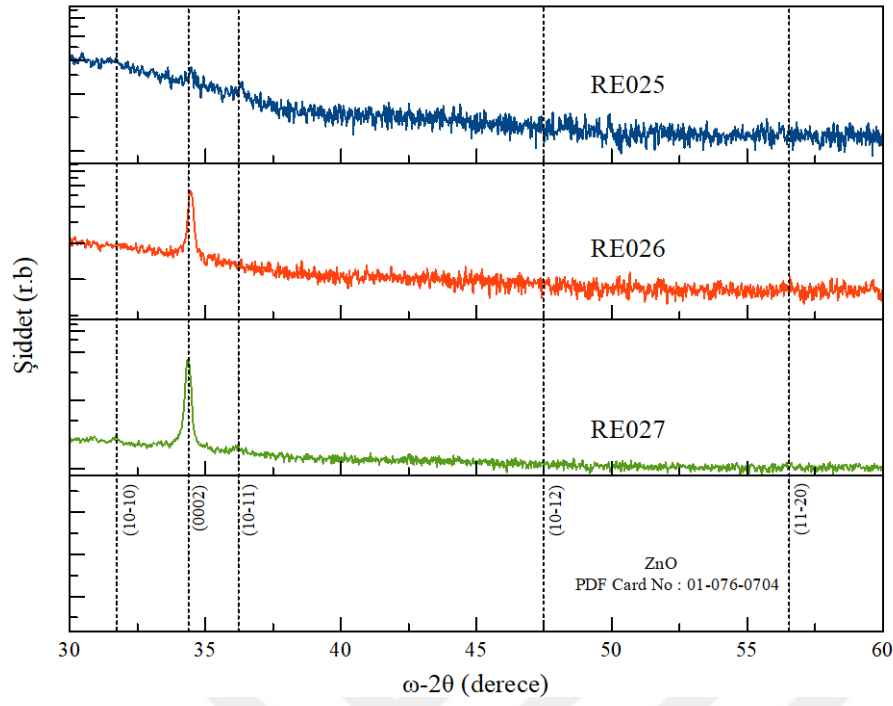
Bu bölümde büyütülen ZnO ve MgZnO kristallere ait büyüme davranışları, yapısal ve optik özellikler tartışılacaktır. Ayrıca MgZnO/ZnO çokluyapısına ait gerçekleştirilen Hall etkisi sonuçlarında olası 2DEG davranışına ait bulgular tartışılacaktır.

5.1. SLG Alttaş Üzerine ZnO Büyütmeleri

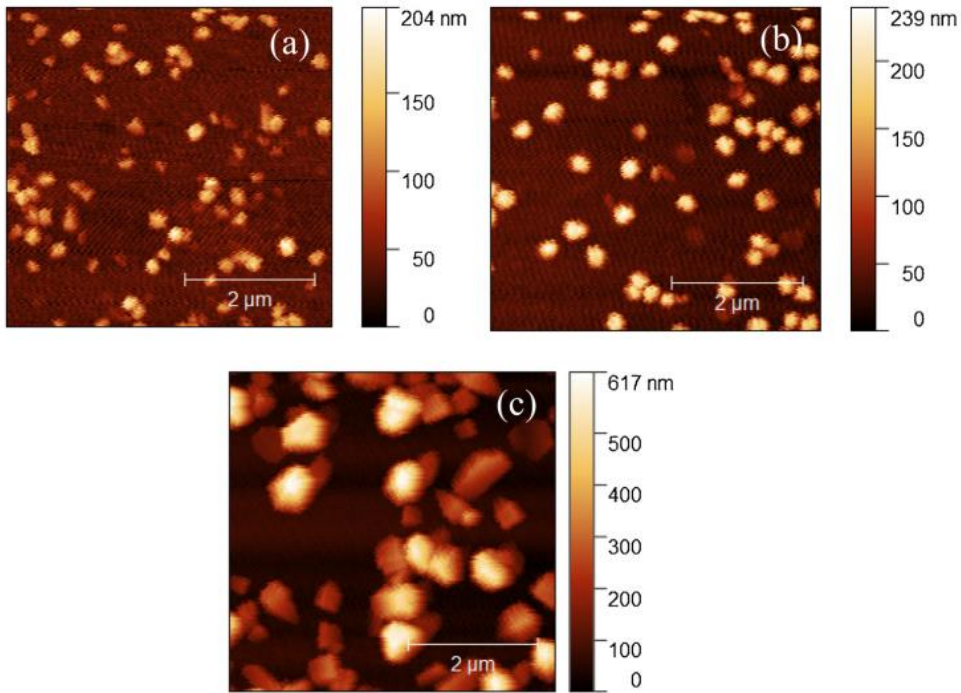
5.1.1. Ultrasonik titreştiricinin ZnO büyüme üzerine etkisi

USCVD sisteminin birçok kontrol parametresi bulunmaktadır. Bunların başında ise ultrasonik titreştiricinin gücünün ayarlanması gelmektedir. Bunu test edebilmek amacıyla çizelge 4.2 ile verilen deneysel şartlara göre büyütülen ZnO kristallere ait XRD sonuçları şekil 5.1 ile verilmektedir. Büyüyen ZnO kristallerinin polikristal olduğu görülmektedir. Bununla birlikte baskın büyümenin (0002) yönelimde olduğu görülmüştür. Artan UT gücüne bağlı olarak XRD pik şiddetlerinde de artış görülmüştür. Bu durum daha fazla sıvı öncü'nün soğuk buhar haline gelmesi ve alttaş üzerinde daha fazla büyümeye neden olduğunu göstermektedir. RE026 numunesinde diğerlerine kıyasla çok daha baskın (0002) yönelimli pik görülmüş olup hekzagonal kristallere ait diğer pikler görülmemiştir. Bu sonuçlar UT gücünün kristal kalitesi açısından önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. RE026 kodlu ZnO numunesine ait UT gücünün diğer büyütmeler için uygun parametre olarak kullanılması sonucuna varılmıştır.

Resim 5.1. ile ZnO kristallere ait AFM yüzey görüntüsü verilmektedir. Artan UT gücüne bağlı olarak yüzeyde ZnO nanoparçacık boyutlarının arttığı görülmüştür. Özellikle RE027 numunesinin yüzeyinde belirgin bir şekilde altıgen ve üçgen formda nanoparçacık büyümleri olduğu belirlenmiştir. ZnO kristalleri genellikle 3-boyutlu (3-B) Volmer-Weber formunda büyümeyi tercih ettiği görülmüştür. Bu büyüme moduna literatürde sık bir biçimde rastlanıldığı görülmektedir. Büyüyen ZnO kristallere ait yüzey pürüzlülüğü ortalama karekök (ing. root mean square) (RMS) değerleri çizelge 5.1 ile özetlenmiştir. Artan UT gücüne bağlı olarak RMS değerinin arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.1. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait XRD sonuçları

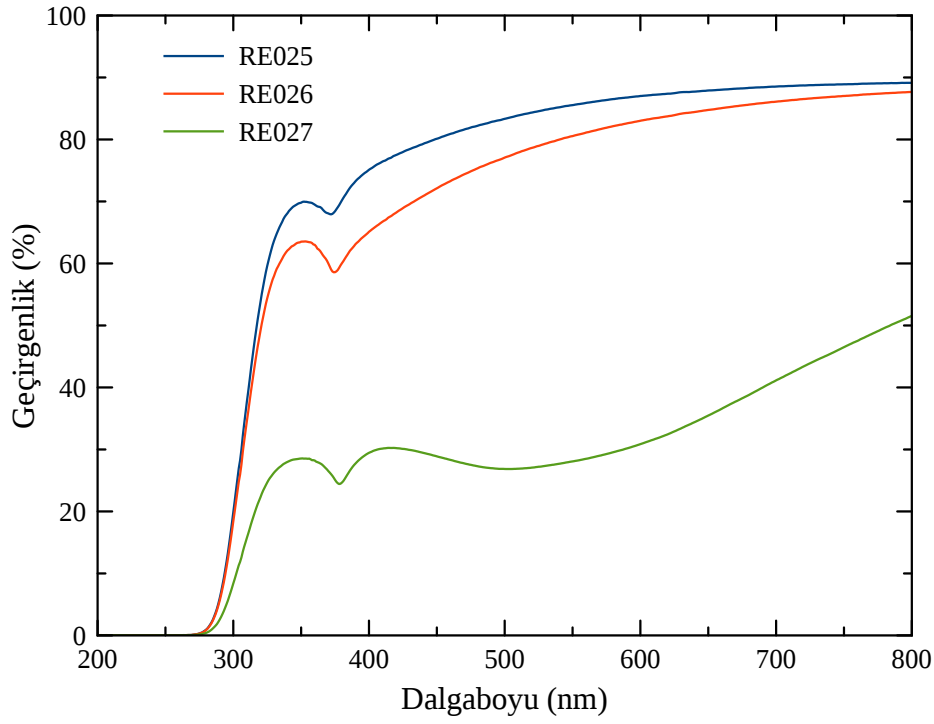


Resim 5.1. a) RE025, b) RE026 ve c) RE027 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır)

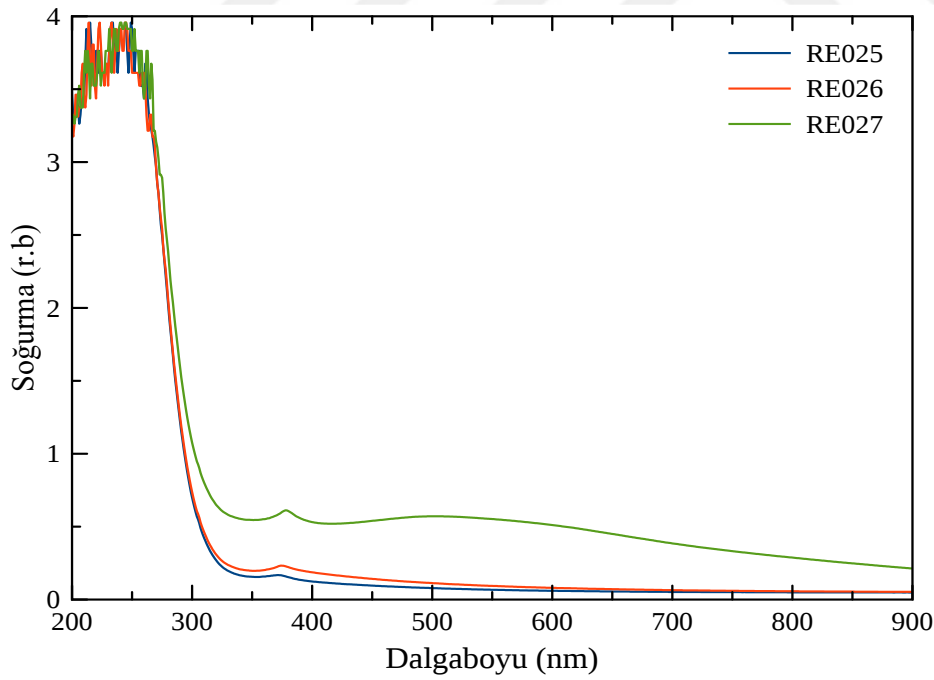
Şekil 5.2 ile büyütülen ZnO kristallere ait 200-800 nm aralığında geçirgenliğin dalga boyu ile değişimi görülmektedir. Artan UT gücü ile büyütülen numunelerin geçirgenlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Kristallerde geçirgenlik nanoyapıların veya filmlerin kalınlığı ve büyüyen nanoparçacık yüzeyinin pürüzlü olması gibi bazı önemli yapısal faktörlere bağlıdır [134]. Bu nedenle daha yüksek UT gücü kullanımı, daha kalın ve pürüzlü ZnO kristallerin büyümesine neden olmuştur ve geçirgenlik değerleri azalmıştır. Özellikle RE027 numunesi için geçirgenliğin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Buna ek olarak 400 nm ile 600 nm aralığında ZnO kristallerin geçirgenlik değerlerinde bir miktar azalma olduğu belirlenmiştir. RE025 ve RE026 numunelerinin geçirgenlik değerlerinin ise 400 nm sonrasında %60'ın üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.3 ile büyütülen ZnO kristallerin soğurma spektrumları görülmektedir. Her ZnO kristallerinin de ~378 nm civarında soğurma pikine sahip olduğu görülmüştür. Bu soğurma şekil 5.2'de aynı dalgaboyunda geçirgenlik değerinde azalma olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu dalga boyunda soğurma görülmesi, büyütülen numunelerde ZnO ince film'den ziyade yüzeyde ZnO nanopul (ing. nanoplate) şeklinde büyümelerin olduğunu göstermektedir ve literatürde benzer sonuçlar görülmektedir [135]. Ayrıca RE027'nin görünür bölgede soğurma yaptığı belirlenmiştir. Bu durumun, büyütülen ZnO kristalinin yüksek miktarda oksijen boşlukları, çinko arayerleşimleri gibi yapısal kusurları ve safsızlıkları ihtiva etmesi ile ilişkisi bulunmaktadır. Literatürde birçok ZnO kristallerde benzer yapısal sorunlar nedeniyle bahsedilen dalgaboyları civarında soğurma olduğu bilinmektedir [135].

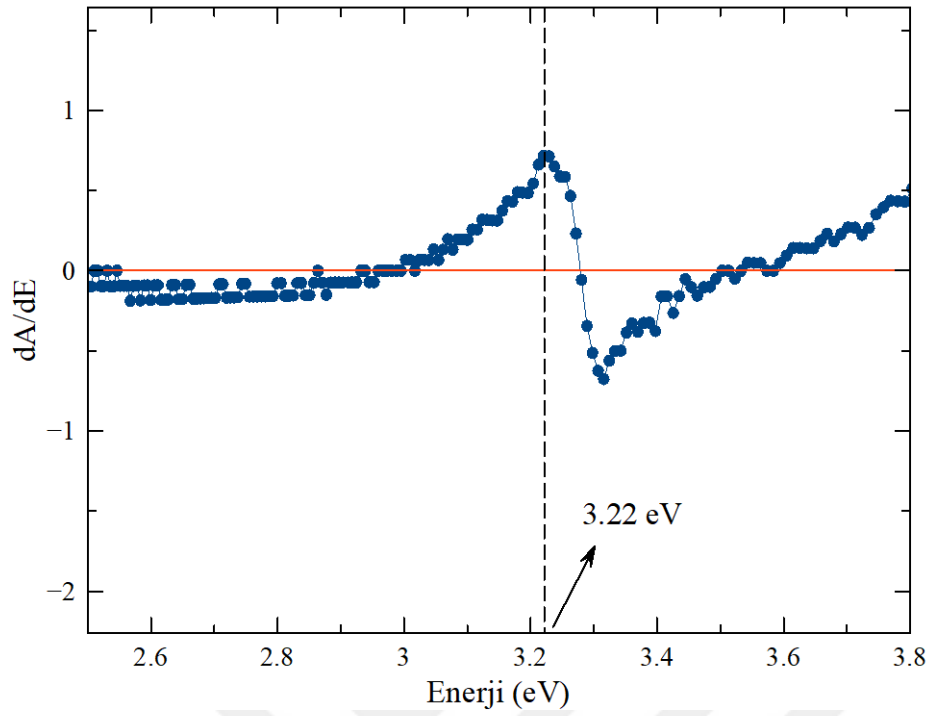
Soğurma spektrumundan faydalanarak foton enerjisine göre birinci dereceden türevinde (dA/dE) düşük enerji kıyısındaki pik değeri Tauc bant aralığı elde etmek oldukça yaygın kullanılan bir yöntemdir [136]. Bu yöntemle elde edilmiş Tauc bant aralığı değeri RE026 kodlu ZnO numunesi için şekil 5.5 ile verilmiştir. Hesaplama sonucuna göre elde edilen Tauc bant aralığı değerleri çizelge 5.1 ile verilmiştir. Elde edilen Tauc bant aralığı değerlerinin saf ZnO kristaline ait 3,37 eV değerinden düşük olduğu görülmüştür. Bu durum daha önce de bahsedildiği gibi ZnO kristal içerisinde bulunan birçok safsızlık ve yapısal kusurlardan kaynaklanmaktadır. Bu kusurlar iletim bandı ve değerlik bandı kıyısında safsızlık seviyeleri oluşturması ve Tauc bant aralığında azalmaya neden olması ile açıklanabilmektedir. Elde edilen Tauc bant aralığı değerleri literatürdeki deneysel birçok sonuç ile uyumludur [137-139].



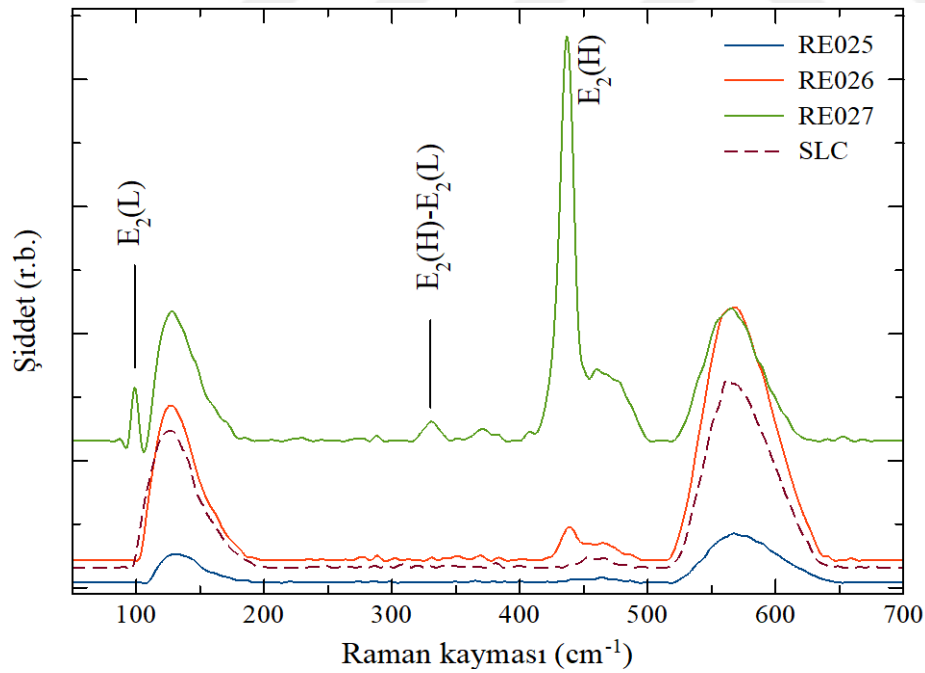
Şekil 5.2. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait geçirgenlik spektrumu



Şekil 5.3. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait soğurma spektrumu



Şekil 5.4. RE026 kodlu ZnO kristaline ait dA/dE türevinin enerjiye bağlı değişimi



Şekil 5.5. RE025, RE026 ve RE027 kodlu numunelere ait konfokal Raman ölçüm sonuçları

Şekil 5.5 ile konfokal Raman ölçüm sonuçları görülmektedir. ZnO kristali wz-hekzagonal kristal yapıya sahiptir. $E_2(H)$ ve $E_2(L)$ fonon modları sırasıyla Zn ve O atomlarının örgü içerisindeki atomik titreşimlerine karşılık gelmektedir [140, 141]. RE025 nolu ZnO

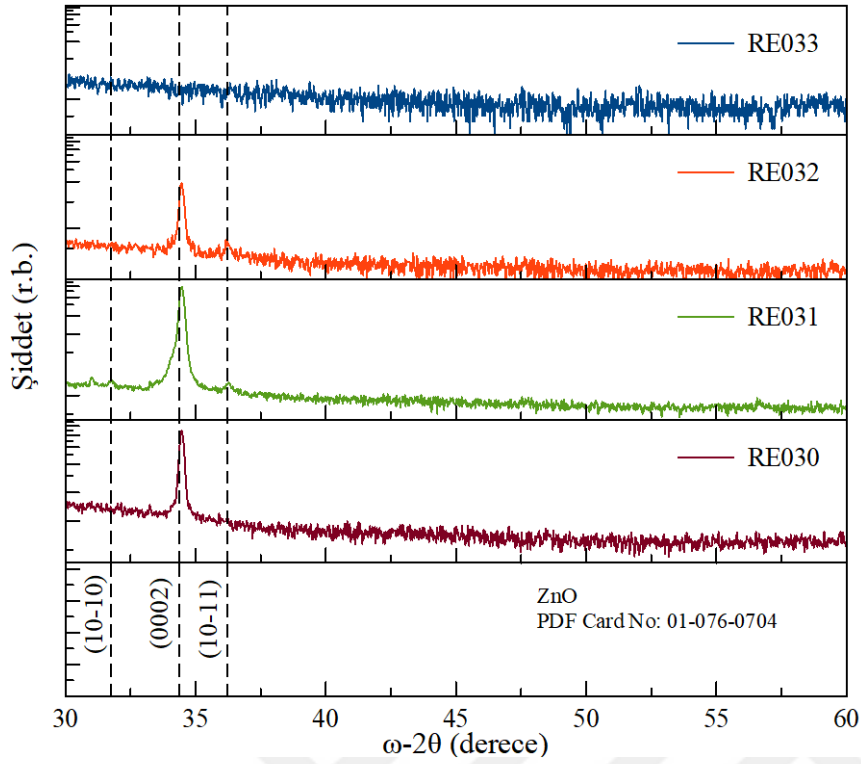
kristalinde bu titreşimlere ait pikler görülmezken RE026 numunesinde $E_2(H)$ piki, RE027 numunesinde ise hem $E_2(H)$ hem de $E_2(L)$ pikleri açıkça görülmektedir. Bu piklerin konumları yaklaşık 99 cm^{-1} ve 438 cm^{-1} civarında olduğu belirlenmiştir. Literatürde ZnO kristaline ait $E_2(H)$ ve $E_2(L)$ pikleri elde edilen sonuçlar ile tutarlıdır [140-142]. Elde edilen bu sonuçlar XRD sonuçlarını desteklemektedir.

Çizelge 5.1. RE025, RE026 ve RE027 kodlu ZnO kristallere ait yapısal ve optiksel Parametreler

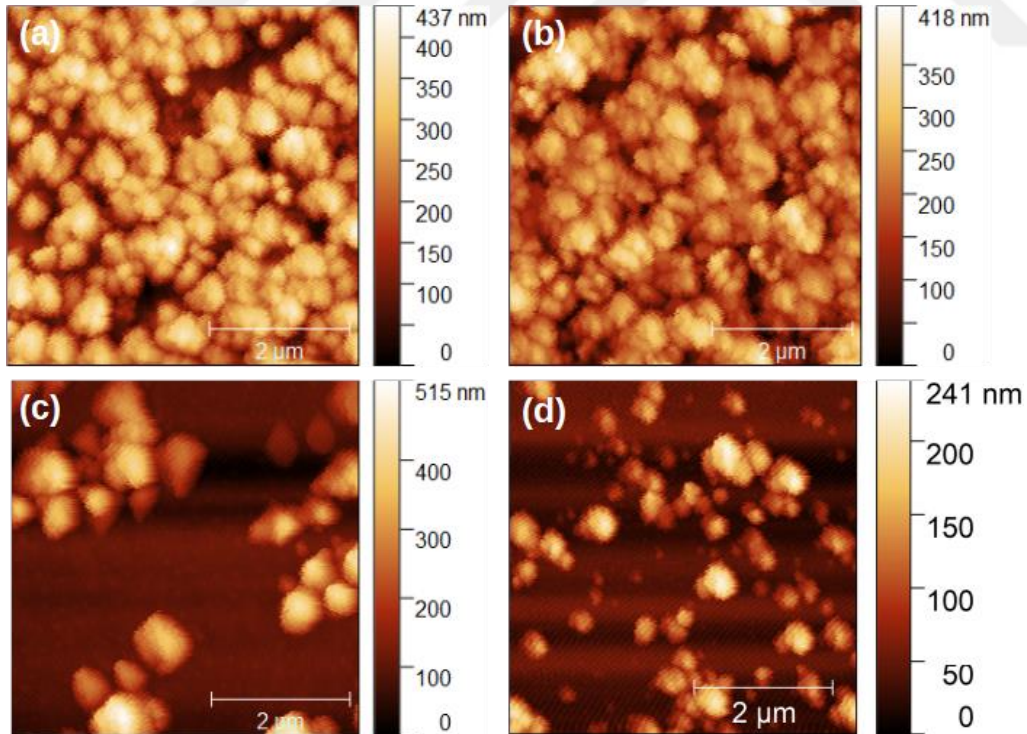
Numune Kodları	Kristalit boyutu (nm)	RMS (nm)	Düzlemler arası mesafe (Å)	Örgü parametresi c (Å)	Gerilme (ϵ_{zz})	Tauc bant aralığı (eV)
RE025	23,9	24,10	2,59	5,197	-0,0004	3,23
RE026	45,7	41,80	2,59	5,199	-0,0001	3,22
RE027	55,8	127,1	2,60	5,213	0,0026	3,23

5.1.2. Sıvı öncü molaritesinin ZnO büyüme üzerine etkisi

Bir önceki kısımda UT gücünün ZnO kristal büyüme davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. RE026 kodlu numuneye ait deneysel şartlar sabit tutulmuş olup sadece sıvı öncü molarite değişimi incelenmiştir. Çizelge 4.3 ile verilen deneysel şartlara göre RE030, RE031, RE032, RE033 sırasıyla 0,1, 0,05, 0,02 ve 0,01 M'ye sahip öncü çözeltileri kullanılarak büyütülen ZnO numunelerine karşılık gelmektedir. Şekil 5.7 ile ZnO kristallere ait XRD sonuçları verilmektedir. 0,01 M kullanılarak elde edilen ZnO kristale ait herhangi bir kırınım piki görülmemiştir. Bu durum yeterince öncünün yüzey üzerinde ZnO kristal oluşturmaması veya oluşan yapının amorf olarak büyüdüğü anlamına gelmektedir. Diğer 3 farklı ZnO kristaller için baskın büyüme yöneliminin (0002) olduğu görülmüştür. ZnO kristaller içerisinde en şiddetli (0002) pike ait numune RE031 olarak belirlenmiştir. Bu sebeple sıvı öncü molaritesinin 0,05 M olarak kullanılması yüzeyde daha iyi bir ZnO büyümesine neden olacağını göstermektedir. Bunu daha iyi anlayabilmek için bu numunelere ait AFM görüntüleri resim 5.2 ile verilmiştir.



Şekil 5.6. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu numunelere ait XRD sonuçları

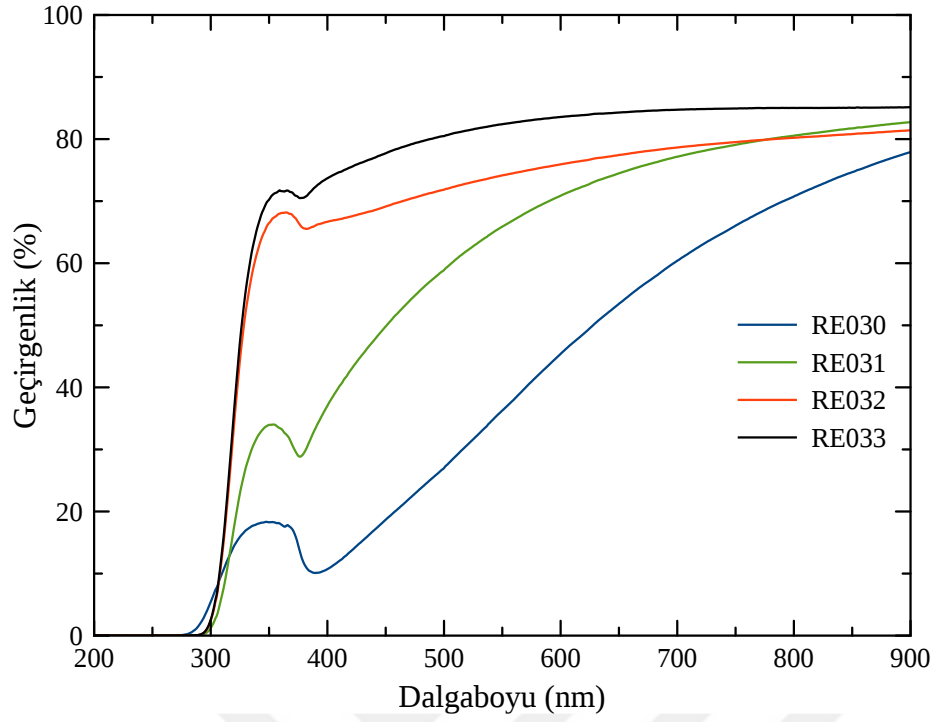


Resim 5.2. a) RE030, b) RE031, c) RE032 ve d) RE033 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır)

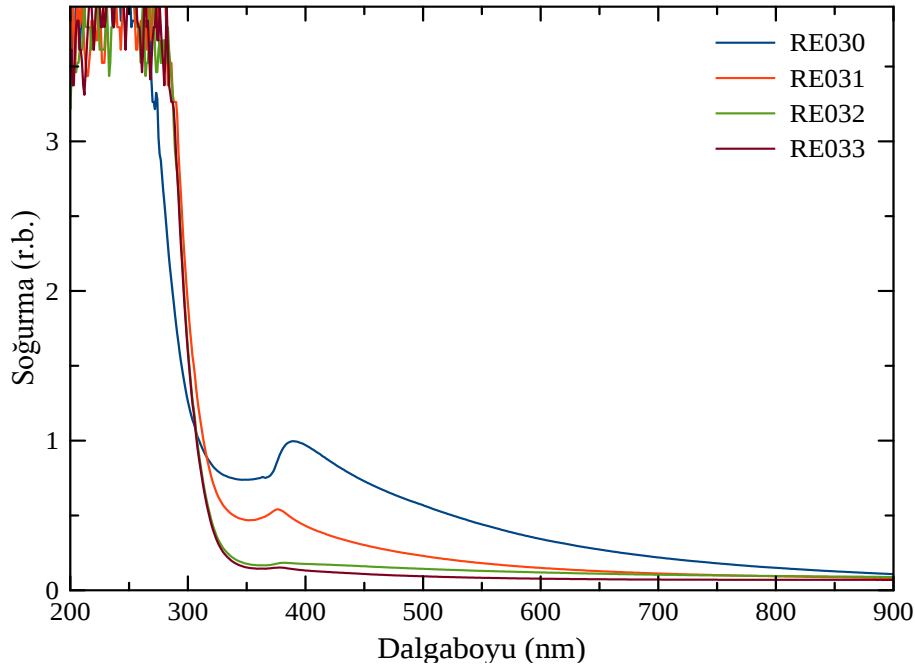
Resim 5.2 ile farklı molariteler için büyütülen ZnO kristallere ait AFM görüntüleri verilmektedir. Öncü molaritesi arttıkça yüzeydeki ZnO nanoparçacık miktarının arttığı görülmektedir. RE030 ve RE031 numunelerin yüzeyinin neredeyse tamamen kaplanmış olduğu görülmektedir. ZnO kristallerin genellikle küresel bir formda 3-B büyüme modunda büyümeyi tercih ettiği belirlenmiştir. Bununla birlikte 0,1 ve 0,05 M’lık ZnO kristallerin yüzeyindeki parçacık boyutlarının oldukça homojen olduğu görülmektedir. Buna karşın 0,01 M’lık ZnO kristalin yüzeyinde oldukça farklı boyutlarda nanoyapıların büyüdüğü görülmektedir. AFM görüntüleri sonucunda elde edilen RMS değerleri çizelge 5.2 ile verilmiştir. Artan molarite değerine bağlı olarak RMS değerlerinin arttığı belirlenmiştir. XRD sonuçlarında (0002) kırınım piki görülen ZnO kristallerden 0,05 M’lık RE031 numunesinin RMS değerinin diğerlerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.7 ile molarite değişiminin ZnO kristallerin optik özelliklerine etkilerini incelemek için geçirgenliğin dalgaboyuna bağlı değişimi incelenmiştir. Artan molariteye bağlı olarak görünür bölgede optik geçirgenlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi artan molarite ile daha fazla Zn ve O atomlarının alttaş üzerinde büyümesi ve geçirgenliğin azalması ile açıklanabilmektedir. Literatürde ince film şeklinde büyüyen ZnO kristallerin kalınlıkları arttıkça geçirgenlik değerinin azaldığı görülmüştür [143]. Burada RE030 numunesinin geçirgenlik spektrumunun diğerlerine kıyasla çok daha düşük olduğu özellikle 400-700 nm aralığında geçirgenliğin doğrusal olarak arttığı görülmüştür. En fazla geçirgenliğin ise RE033 numunesine ait olduğu belirlenmiştir.

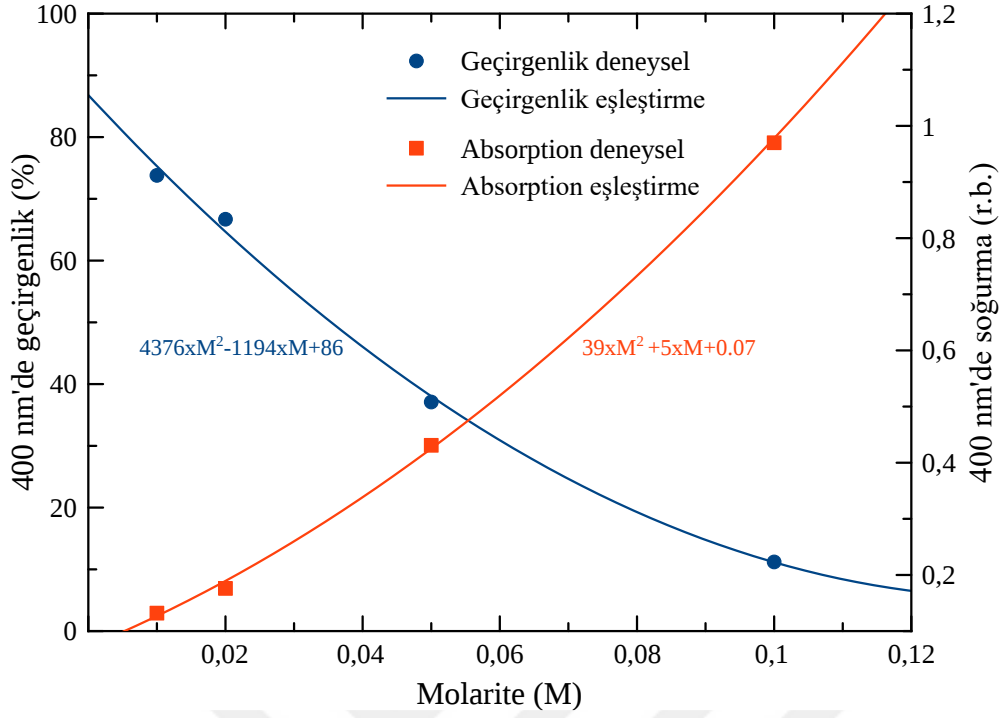
Şekil 5.8 ile molarite değişiminin ZnO kristallerin soğurma spektrumlarına etkisi görülmektedir. Geçirgenlik spektrumunun tersi olarak yüksek molariteye sahip öncü çözeltisi ile büyütülen ZnO kristali olan RE030 görünür bölgede en yüksek soğurmaya sahiptir. 280 nm altında görülen ve RE025-RE027 numunelerinde de olan soğurma değerleri yeterli foton bulunmadığından yüksek hataya sahiptir. Ayrıca bir önceki numune grubunda (RE025-RE027) ~378 nm civarında görülen soğurma pikleri bu numunelerde de görülmektedir. ZnO nanopul yapıların bu numunelerde de büyüdüğü söylenebilir. Hem soğurma hem de geçirgenlik spektrumun öncü molaritesine bağlı olarak nasıl değiştiğini anlamak için şekil 5.10 ile verilen ve 400 nm dalga boyunda ZnO kristallerine ait geçirgenlik ve soğurma değerleri incelenmiştir.



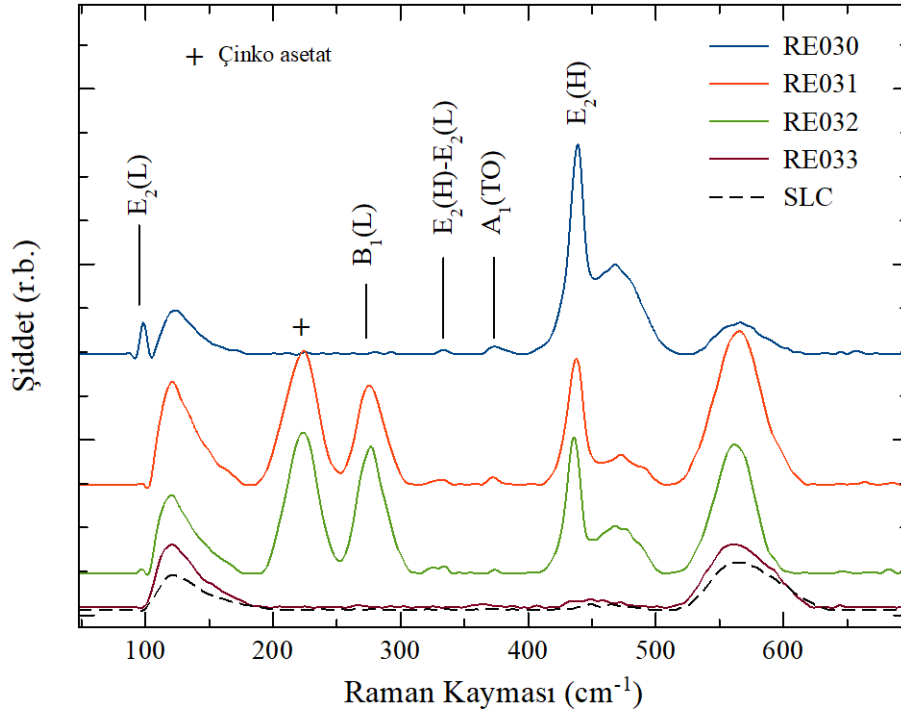
Şekil 5.7. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu numunelere ait geçirgenlik spektrumu



Şekil 5.8. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu ZnO numunelere ait soğurma spektrumu



Şekil 5.9. 400 nm dalga boyunda molariteye bağlı ZnO kristallerinin soğurma ve geçirgenlik değerleri



Şekil 5.10. Molariteye bağlı ZnO kristallerinin konfokal Raman ölçüm sonuçları

Şekil 5.9 ile 400 nm’de ZnO kristallere ait geçirgenlik ve soğurma spektrumu görülmektedir. Elde edilen geçirgenlik ve soğurma değerlerine göre artan molariteye bağlı olarak ZnO

kristallerin geçirgenlik ve soğurma değerleri azalmaktadır. Sonuçlara fit uygulandığında azalma ve artma değerlerinin parabolik olarak değiştiği görülmüştür. Ayrıca hem geçirgenlik hem de soğurma için fit parametreleri elde edilmiştir. Şekil 5.10 ile ZnO kristallere ait konfokal Raman ölçüm sonuçları verilmektedir. Ölçüm sonuçlarında RE030, RE031 ve RE032 kristalleri için $E_2(H)$ pikinin varlığı görülmektedir. Ayrıca RE030 kristali için $E_2(L)$ piki de görülmüştür. Artan molariteye bağlı olarak $E_2(H)$ pik konumu 438 cm^{-1} değerinden 435 cm^{-1} değerine doğru kaymıştır. Bu durum ZnO kristal içerisindeki gerilmelere bağlı olduğu atfedilebilir [144]. Elde edilen pik konumlar literatürle oldukça uyum içerisinde [145]. Hem RE031 hem de RE032 numunelerinde yaklaşık 275 cm^{-1} civarında şiddetli pik görülmektedir. Literatürde bu pik ZnO kristalinin $B_1(L)$ moduna karşılık gelmektedir [146]. Hekzagonal ZnO kristalinde B_1 sessiz ve Raman aktif olmayan mod olduğundan Raman ölçümlerinde görmek olası değildir. Ancak kristal içerisindeki yapısal kusurlar veya dislokasyonlar bu modu aktif hale getirebilmektedir [147]. Ayrıca Çinko asetat tuzundan kaynaklanan yaklaşık $\sim 227\text{ cm}^{-1}$ 'de pik olduğu belirlenmiştir [148]. Çizelge 5.2 ile XRD, AFM ve UV-görünür bölge ölçümlerinden elde edilen bazı parametreler verilmiştir. ZnO kristallerin optik Tauc bant aralığı soğurma spektrumunun birinci dereceden türevi alınarak (dA/dE) hesaplanmıştır. Artan molariteye bağlı olarak Tauc bant aralığı azalmıştır. Özellikle RE030 numunesinde bant aralığı oldukça düşük çıkmıştır. Bunun sebebi yüksek molariteli büyütmelemlerde daha fazla O veya Zn safsızlığı meydana gelmektedir. Bu safsızlıklar bant kıyılarında safsızlık seviyeleri oluşturduğundan bant kıyılarının netliğini azaltmaktadır.

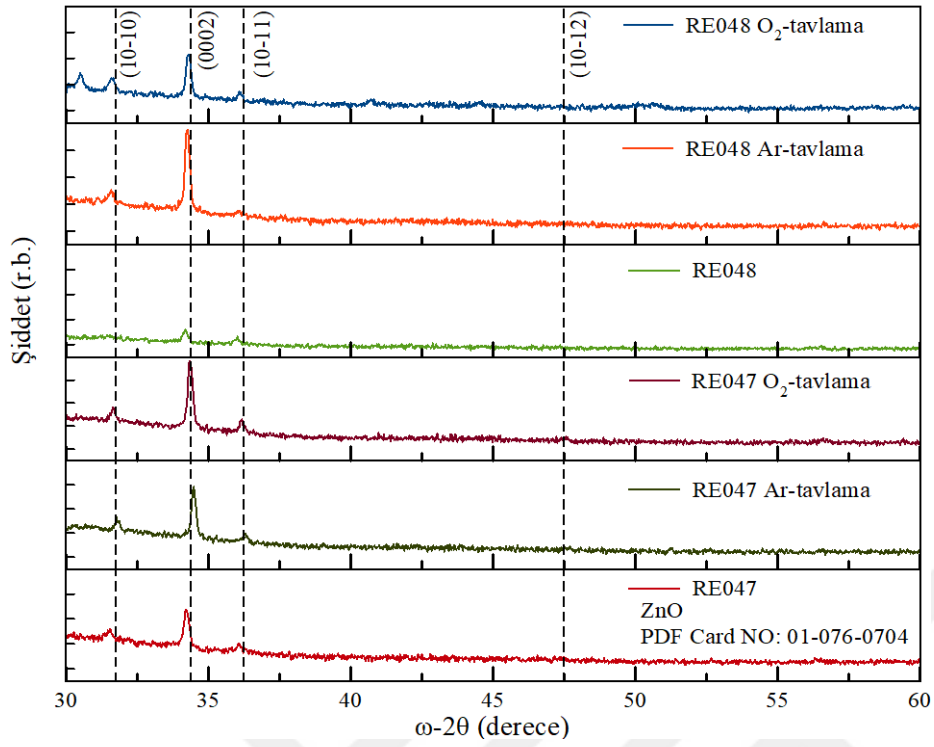
Çizelge 5.2. RE030, RE031, RE032 ve RE033 kodlu ZnO numuneler ait yapısal ve optik parametreler

Numune Kodu	Molarite (M)	Tanecik boyutu (nm)	RMS (nm)	Düzlemler arası mesafe (Å)	Örgü Parametresi c (Å)	Tauc bant aralığı (eV)
RE030	0,10	49,24	81,51	2,599	5,198	3,03
RE031	0,05	49,95	67,61	2,599	5,198	3,21
RE032	0,02	54,86	83,22	2,599	5,198	3,23
RE033	0,01	-	37,39	-	-	3,24

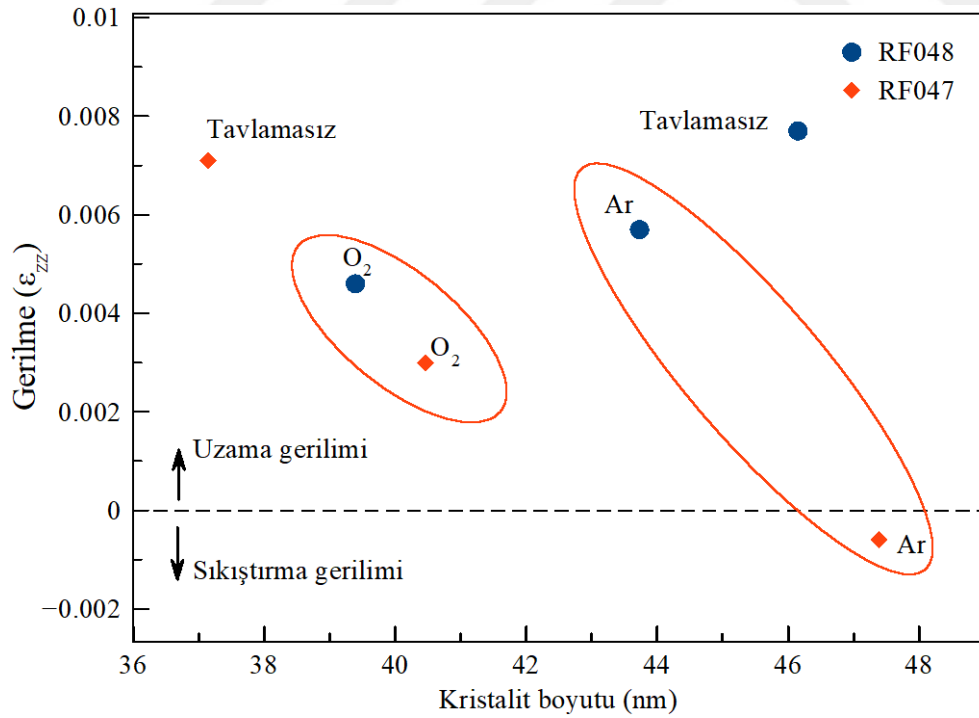
5.1.3. Farklı atmosferlerde tavlamanın ZnO büyüme üzerine etkisi

ZnO kristalleri çizelge 4.4 ile verilen deneysel parametrelere göre hazırlanmıştır. RF047 ve RF048 numuneleri sırasıyla MG ve SLG üzerine büyütülmüştür. Büyütülen ZnO kristalleri Ar ve O₂ ortamlarında 500 °C sıcaklıkta tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu tez kapsamında Tavllanmış numuneler yeniden kodlandırılmamış olup “T” harfi eklenerek açıklanmıştır. Elde edilen ZnO numunelerin kristal kalitelerini anlayabilmek için XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.12. ile XRD ölçüm sonuçları görülmektedir. Tüm ZnO kristallerde büyüme yönüne karşılık gelen (0002) kırınım piki görülmüştür. Tavlamanın etkisi ile bu pikler daha da şiddetli hale gelmiştir. Bu durum tavlamanın, ZnO kristallerin kalitesinde iyileşmeye sebebiyet vermiştir. Bu durumu daha iyi anlayabilmek için XRD sonuçlarından elde edilen kristalit boyutları ve ZnO kristallerin gerilmeleri (ing. strain) arasındaki ilişkinin tavlama açısından değişimi şekil 5.13 ile görülmektedir. Tavlama ile birlikte kristali oluşturan atomlar daha fazla kinetik enerji kazandığından örgü içerisinde kararlı duruma geçebilmek için yeterli enerjiye sahiptir. Bu sebeple her iki numune içinde tavlama ile birlikte gerilme değerlerinde ciddi ölçüde azalma olduğu belirlenmiştir.

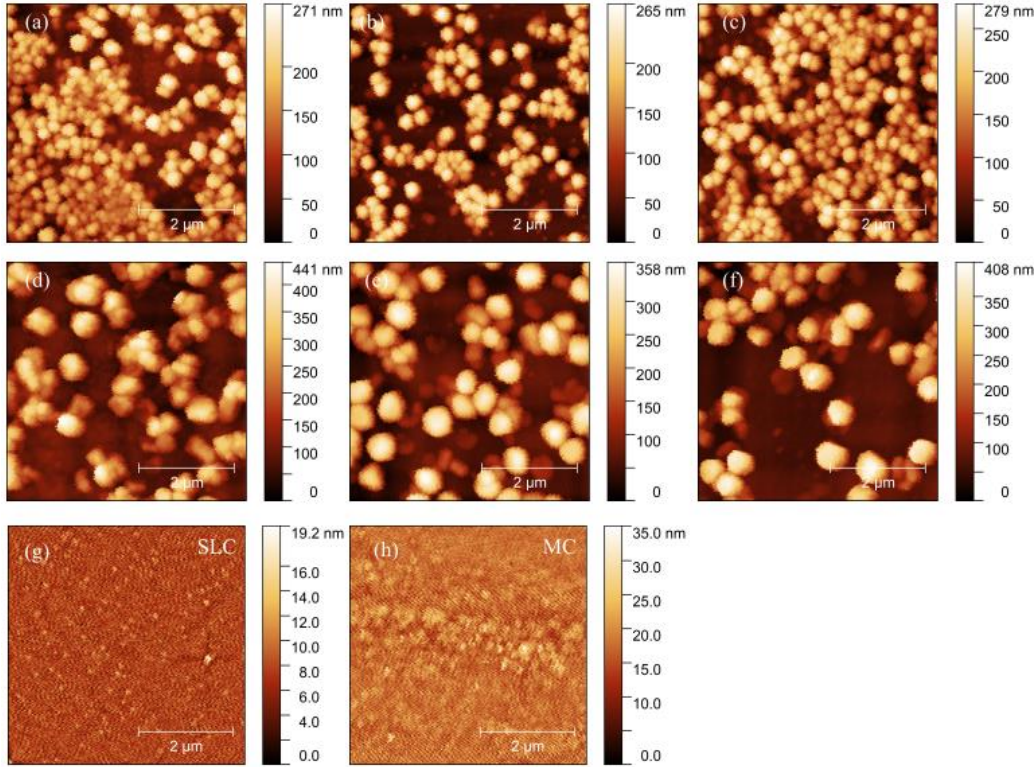
Tavlama işleminin yüzey morfolojisi üzerine etkisini incelemek için AFM ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Resim 5.3 ile RF047 ve RF048 kodlu ZnO numunelere ait AFM görüntüleri verilmektedir. Yüzeyde büyüyen ZnO nanoparçacıklar genel olarak küresel formda büyümüştür. RF048 kodlu ZnO numunelerin parçacık boyutunun RF047’den daha küçük olduğu görülmüştür. Ar ortamında tavlanan RF048 (RF048 Ar-T) numunesinin yüzeyindeki parçacık miktarı tavlama öncesine göre azaldığı görülmüştür. Tavlama işlemi yapılan ZnO kristallerin en iyi yüzey özellikleri RF048 O₂-T numunesine aittir. ZnO kristalleri O₂ ortamında tavlama, önceki kısımlarda da bahsedilen O boşluk kusurlarının doldurulmasına neden olduğundan, kristalin yüzey özelliklerini de iyileştirebilmektedir. XRD ve AFM sonuçlarından elde edilen parametreler çizelge 5.3 ile verilmektedir. Ayrıca AFM görüntülerinde SLG ve MG alttaşlara ait yüzey görüntüleri de görülmektedir. Açıkça görüldüğü gibi SLG çok daha düşük yüzey pürüzlüğüne sahiptir. Bu durumda beklenildiği gibi SLG üzerine büyütülen ZnO kristallerin daha düşük yüzey pürüzlüğüne sahip olmasıdır. Çizelge 5.3 ile verilen RMS değerlerine göre RF048 nolu numune grubu daha düşük yüzey pürüzlülük değerine sahiptir. ZnO kristaller üzerine farklı ortamlarda tavlamanın etkilerini incelemek için UV-görünür bölge optik geçirgenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.11. RF047 ve RF048 kodlu numunelere ait XRD sonuçları

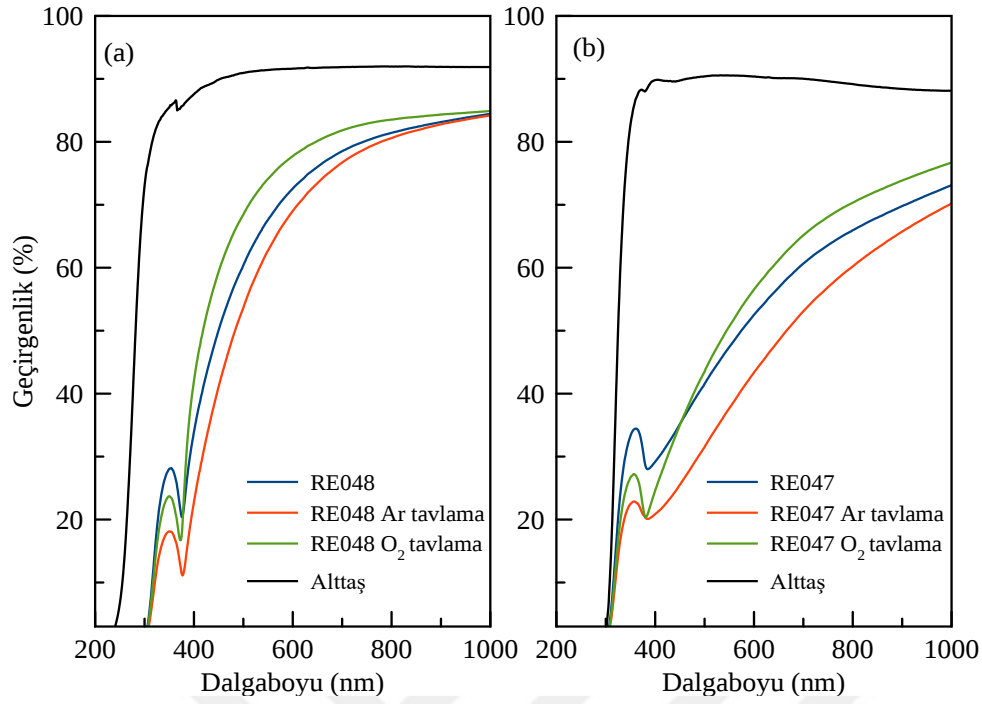


Şekil 5.12. RF047 ve RF048 kodlu numunelere ait tavlama işleminin gerilmeye etkisi

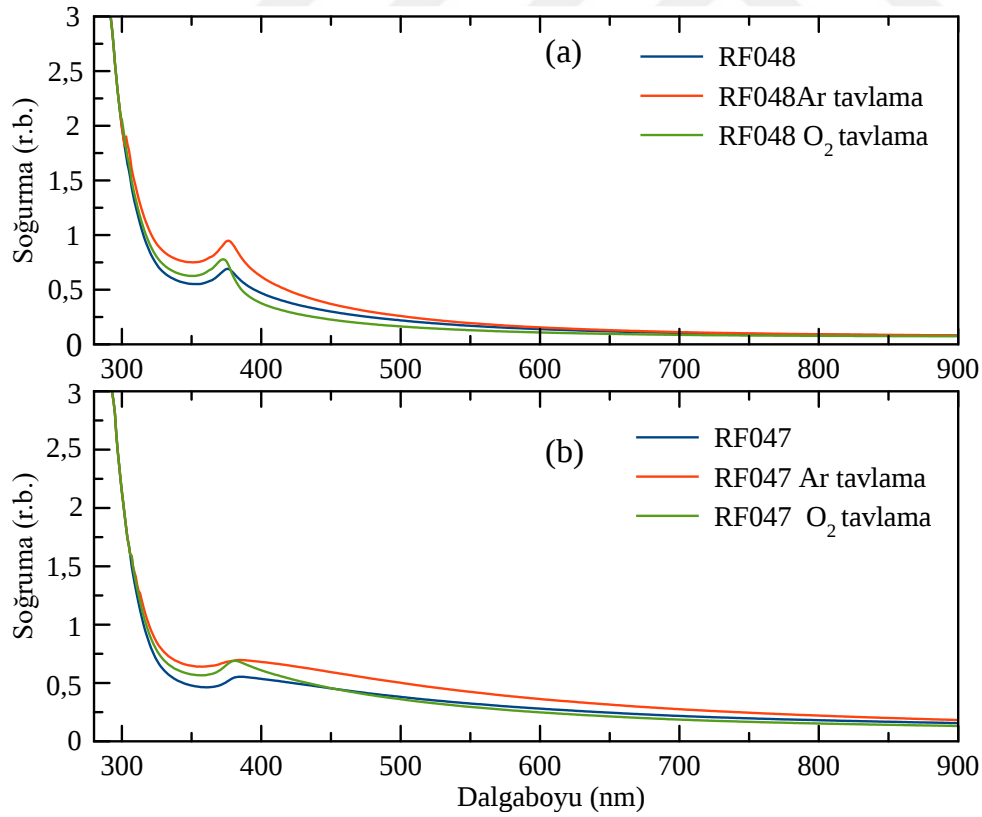


Resim 5.3. a) RF048, b) RF048 Ar-T, c) RF048 O₂-T, d) RF047, e) RF047 Ar-T, f) RF047 O₂-T, g) SLG ve h) MG kodlu numune ve altaşlara ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 μm^2 alanda taranmıştır)

Şekil 5.14 ile RF047 ve RF048 numunelerine ait görülen optik geçirgenlik sonuçlarından RF048 kodlu numune grubu, RF047'ye 400 nm sonrasında daha yüksek optik geçirgenlik sergilemiştir. Her iki numune grubu için de O₂ ortamında tavlamanın optik geçirgenlikleri artırdığı görülmüştür. Bu nedenle O₂ ortamında tavlama işlemi hem optik özellikler açısından hem de yüzey özellikleri açısından oldukça önemli görülmektedir. Yaklaşık olarak ~378 nm dalgaboyu civarında tüm numunelerde soğurma piki görülmüştür. Bu pik daha önce de büyütülen ZnO numunelerinin soğurma spektrumlarında görülen pikler ile aynıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi bu pik büyütülen numunelerin nanopul şeklinde büyüyen ZnO kristallere karşılık geldiği bilinmektedir. AFM görüntülerinden de görüleceği gibi yüzeyde görülen yapılar ince film değil daha çok nano yapılar şeklindedir. Daha önce bahsedilen yöntemle ZnO numunelerin Tauc bant aralığı değerleri hesaplanmıştır. RE048 numunesinin O₂ ortamında tavlama sonucu bant aralığı değeri deneysel sonuçlara daha çok yaklaşmıştır. Her iki durum içinde O₂ ortamında tavlama Tauc bant aralığında artışa neden olmuştur. Bu durum O boşluk kusurlarının dolması ve bant kıyılarında daha az safsızlık seviyesinin oluşması ile açıklanabilmektedir. Literatürde benzer bant aralığı değerleri bulunmaktadır [149].



Şekil 5.13. a) RF048 ve b) RF047 kodlu numunelere optik geçirgenlik sonuçları



Şekil 5.14. a) RF048 ve b) RF047 ZnO numunelere optik soğurma sonuçları

Çizelge 5.3. RF047 ve RF048 kodlu ZnO kristallere ait yapısal ve optiksel parametreler

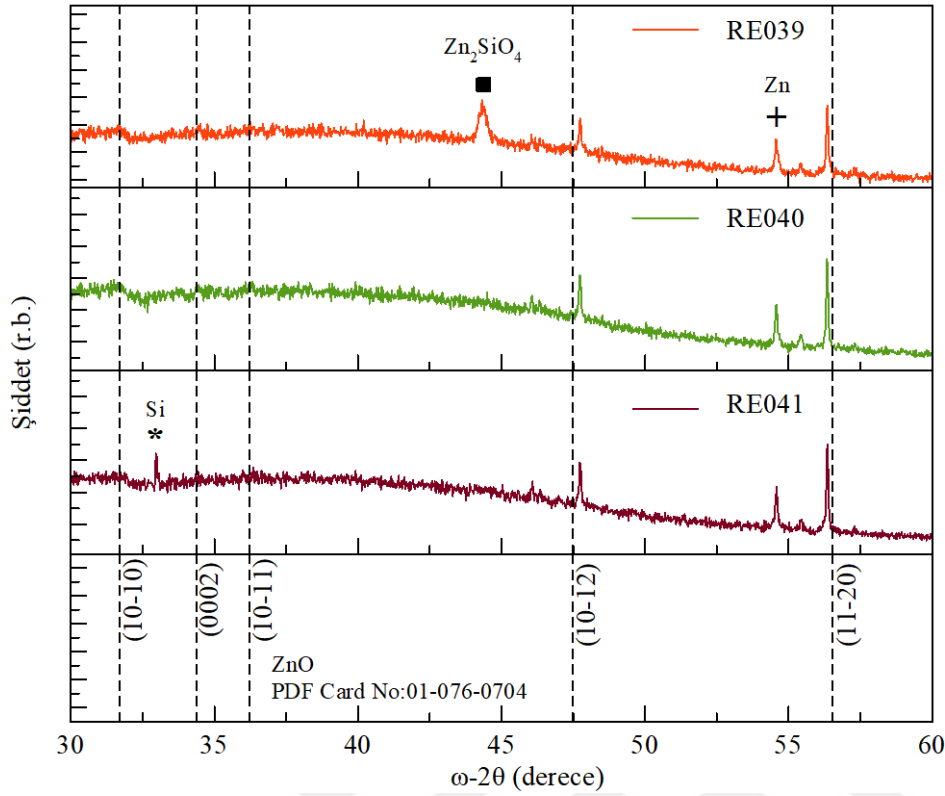
Numune kodu	Tanecik boyutu (nm)	RMS (nm)	Düzlemler arası mesafe (Å)	Örgü parametresi c (Å)	Optik bant aralığı (eV)
RE047	37,14	95,14	2,617	5,234	3,18
RE047 Ar-T	47,39	71,80	2,607	5,196	3,16
RE047 O ₂ -T	40,64	92,33	2,598	5,215	3,22
RE048	46,15	57,26	2,620	5,240	3,25
RE048 Ar-T	43,73	58,72	2,612	5,229	3,25
RE048-O ₂ -T	39,39	51,22	2,614	5,224	3,28

5.2. SiO₂/Si Altaş Üzerine ZnO Büyütmeleri

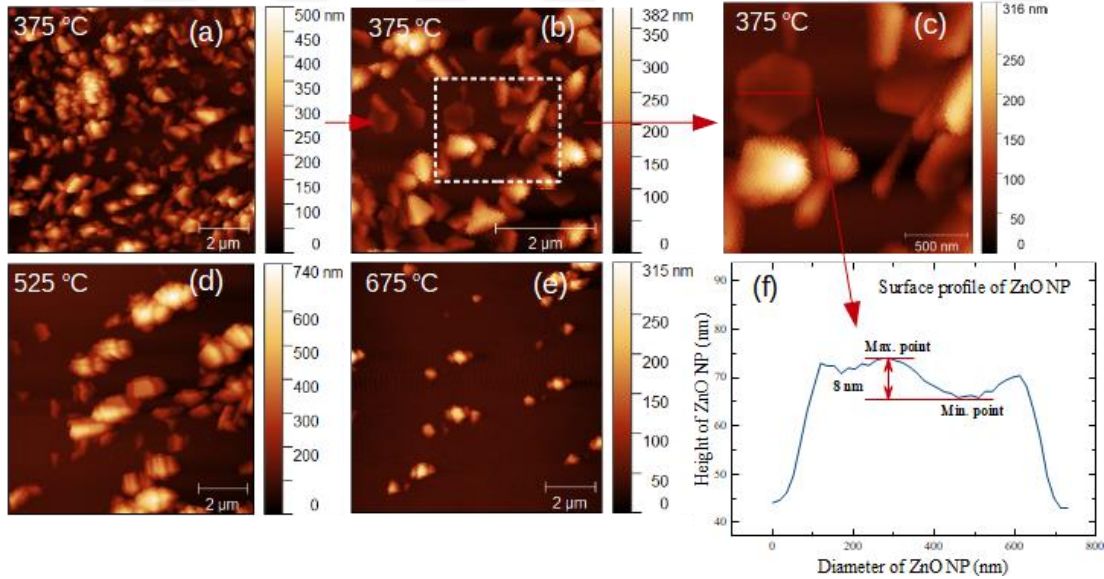
Bu kısımda tek kristal kübik altaş üzerine ZnO büyüme davranışları ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. İlk büyüme grubunda düşük, orta ve yüksek sıcaklık bölgesinde ZnO kristallerin büyüme davranışları incelenmiştir.

5.2.1. SiO₂/Si altaş üzerine farklı sıcaklıklarda ZnO büyütmeleri

ZnO kristaller bir önceki bölümde çizelge 4.5 ile verilen büyüme şartlarına göre büyütülmüştür. 375 °C, 525 °C ve 675 °C sıcaklıklarda 15 dk. süre boyunca büyütülmüştür. Büyütmelere ait XRD ölçüm sonuçları şekil 5.15 ile verilmektedir. XRD sonuçlarına göre ZnO kristaller polikristal yapıda büyümüş olup (10 $\bar{1}2$) ve (11 $\bar{2}0$) yönelimlerinde büyümeyi tercih etmiştir. ZnO kristal büyümelerinde görülen (0002) yönelimine ait herhangi bir pik 3 numune için de görülmemiştir. Yüzeyde (0002) yöneliminde yeterince büyüme olmaması sebebiyle (0002) piki görülmemiştir. Literatürde, büyütülen filmlerin kalınlığının (0002) pik şiddeti ile doğru orantılı olara değiştiğini göstermektedir [150]. Ayrıca ZnO kristallerin Si/SiO₂ altaş üzerinde seçimli büyüme ekseninin farklı olduğunu göstermektedir. Şekil 5.15c)' de görülen yaklaşık 44,3°'de (242) yönelimli çok güçlü bir pik görülmüştür. Literatür taraması yapıldığında bu pik Zn₂SiO₄ (Willemite) yapısının (242) düzlemine karşılık geldiği görülmektedir [151]. Bu Zn₂SiO₄ yapısı SiO₂ ve ZnO arasında bir katman şeklinde büyümüş olabileceğini akla getirmektedir.



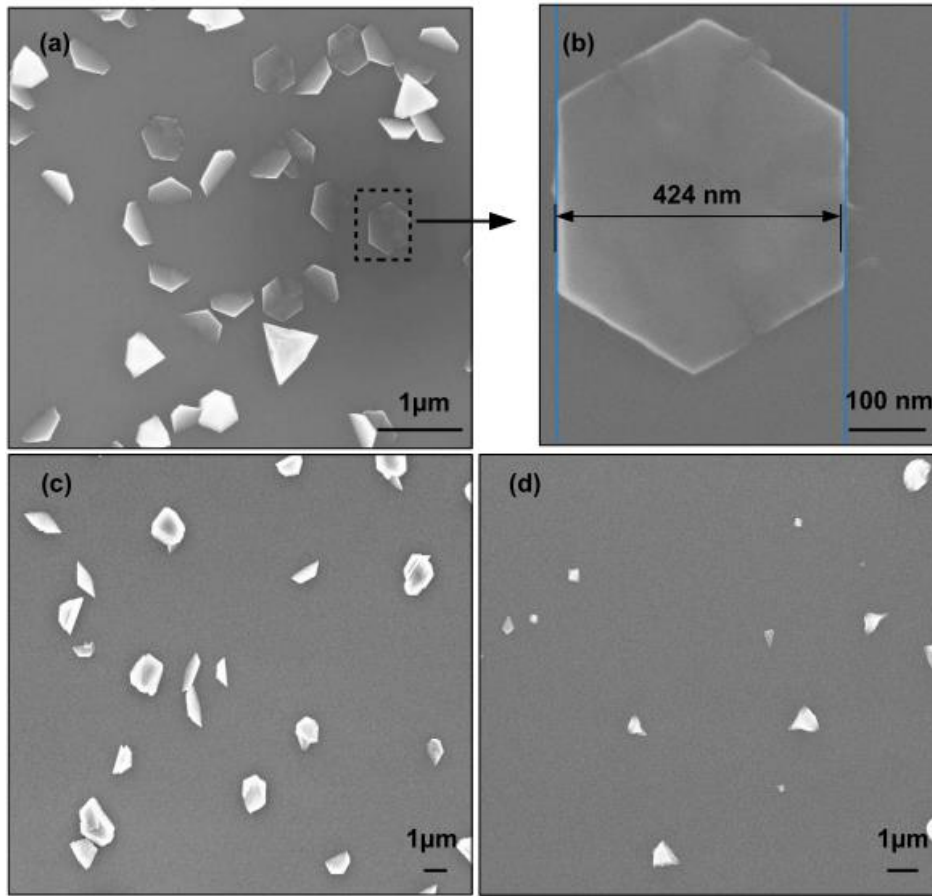
Şekil 5.15. RE039, RE040 ve RE041 kodlu numunelere ait XRD sonuçları



Resim 5.4. (a-c) RE039, d) RE040, e) RE041 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri f) RE039 kodlu numuneye ait yüzey profili (AFM görüntüleri 10x10, 5x5 ve 2x2 μm^2 alanlarda taranmıştır)

Bu olgu, beyaz ışık saçan diyotlarda (LED) fosfor maddesi olarak kullanılan Willemite tabakasının kolay bir yöntemle *in situ* olarak büyütülebileceği bir olasılık karşımıza

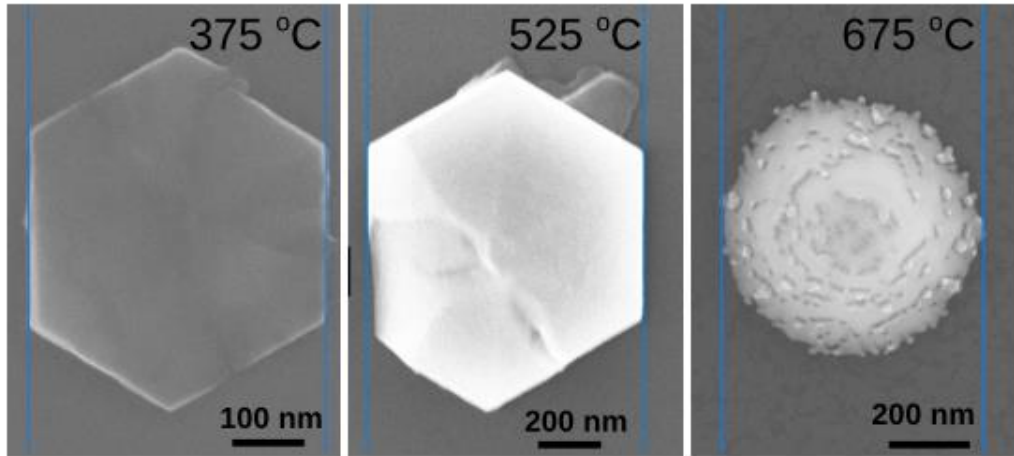
getirmektedir. Bu olgu, tek başına ZnO-temelli LED yapılarda önemli bir araştırma konusu olabilecek düzeyde olabilir. Resim 5.4 (a-c) ile verilen AFM görüntülerinde farklı ölçeklerde alınan AFM görüntülerinde 375°C sıcaklıkta büyütülen ZnO numunesinin yüzeyinde hekzagonal biçimli nanopul yapılar olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte artan büyüme sıcaklığı ile yüzeydeki ZnO nanopul yoğunluğu azalmıştır. AFM görüntülerinden elde edilen yüzey bilgisini daha derinleştirebilmek için ZnO kristallerin SEM görüntüleri resim 5.5 ile verilmektedir.



Resim 5.5. (a)-(b) RE039, c) RE040 ve d) RE041 kodlu numunelere ait SEM görüntüleri

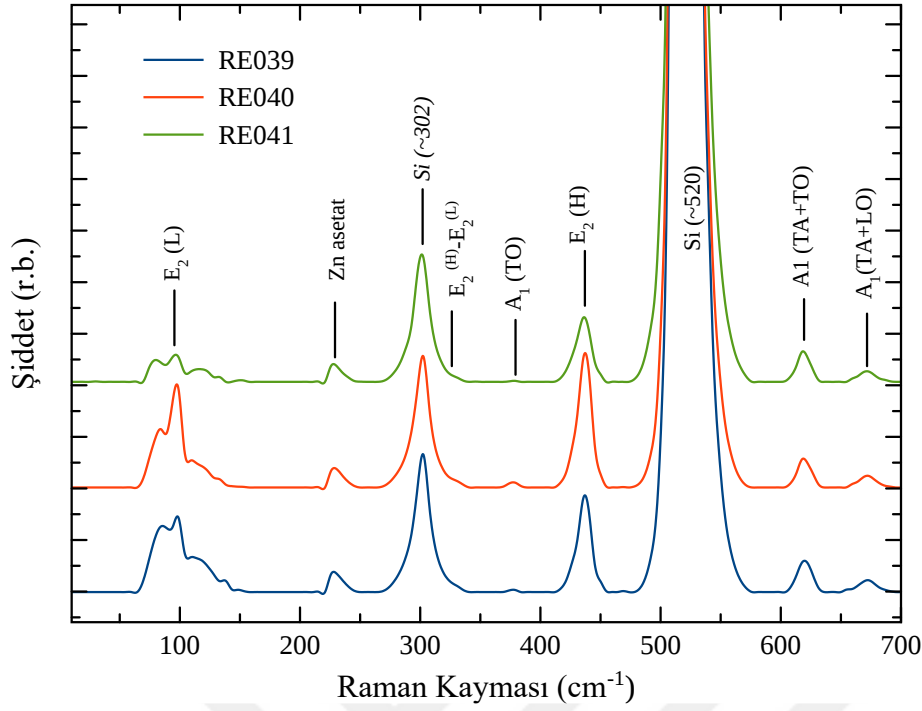
AFM görüntülerinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde yüzeyde oldukça simetrik hekzagonal ZnO nanopul yapıların oluştuğu görülmektedir. Özellikle RE039 numunesinin yüzeyinde hekzagonal ZnO nanopul yapılar açık bir biçimde görülmektedir. Literatürde bu tip hekzagonal nano-pul şeklinde büyüyen ZnO kristallerin Lityum-iyon (Li-ion) pillerin anot malzemesinde kullanılmasının daha yüksek enerji kapasitesine sahip olabileceği üzerine deneysel çalışma mevcuttur [152]. Bazı çalışmalar tarafından CH_3COO^- iyonlarının ZnO_2^{-2} molekülünün yüzeye tutunmasını engellediği öne sürülmektedir [153]. Bu sebeple

ZnO'nun (0002) yönelimi boyunca büyümesi yetersiz kalmaktadır. Bu durum çalışmalarımızda görülen nanopul yapılarına neden olabilir. Literatürde farklı Zn kaynakları kullanılarak benzer ZnO nanopul oluşumu görülmüştür [154-156]. Artan sıcaklığa bağlı olarak yüzeydeki ZnO nanopul büyüme miktarında önemli ölçüde azalma olduğu görülmektedir. Büyütme sıcaklığına bağlı bu değişim literatürde "Leidenfrost etkisi" olarak bilinen davranış ile açıklanabilmektedir [157]. Alttaş yüzey sıcaklığının artmasıyla yüzeye yaklaşan sıvı öncü, yüzey sıcaklığı nedeniyle alttaş yüzeyine tutunamayıp yüzeye yakın bir bölgede asılı olarak kalmaktadır. Bu aşamada taşıyıcı gaz sürekli olarak reaktör içerisine gönderildiğinden yüzeydeki asılı duran öncü buharını ortamdan uzaklaştırmaktadır. Bu nedenle yüzeyde çok az miktarda büyüme gerçekleşmektedir. Bu sebeple alttaş sıcaklığının ZnO nanopul büyümesini ciddi ölçüde etkilemektedir. Büyüme sıcaklığı ayrıca ZnO nanopul morfolojisini de değiştirmektedir. Bunu anlamak için farklı büyütme sıcaklıkları için yüzeyden alınan SEM görüntüleri resim 5.6 ile verilmektedir.

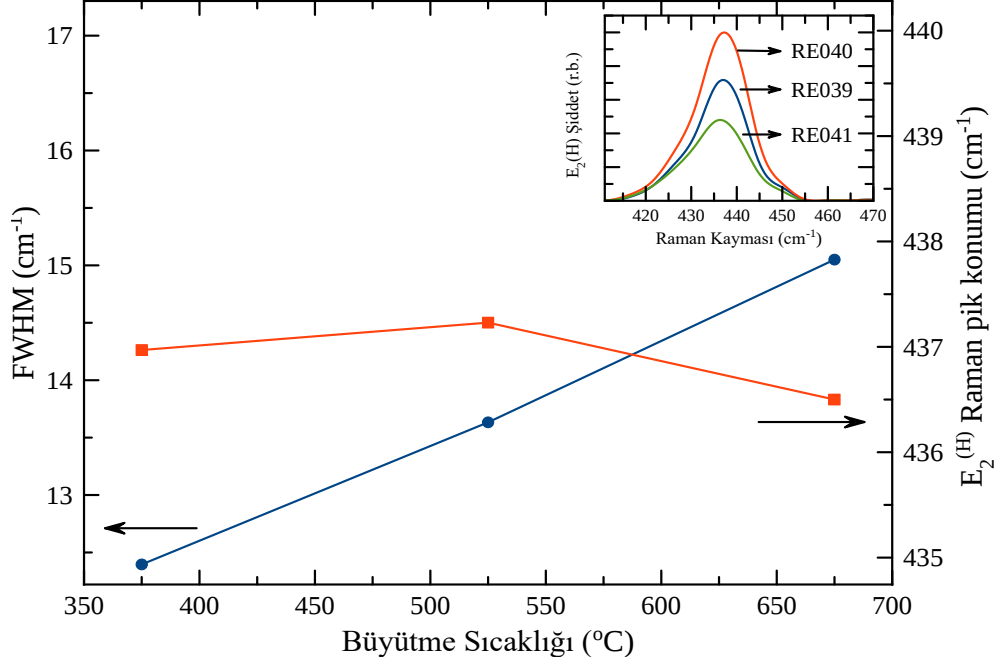


Resim 5.6. Farklı büyütme sıcaklıklarında ZnO nanopul yapısının morfolojisindeki değişim

Artan sıcaklıkla birlikte yüzeydeki simetrik altıgen ZnO nanopul yapısı küresel bir forma dönüşmektedir. Bu durum USCVD yönteminin sıcaklık ile ZnO nanopul yapısının yüzey morfolojisinin kontrol edilebileceğini göstermektedir. Hem AFM hem de SEM görüntüleri sonucunda ZnO nanoyapıların yüksek sıcaklık büyütme miktarının yüzeydeki ZnO birikme oranının negatif yönde etkilediğini göstermiştir. Bu sebeple RE039 numunesine ait 375 °C sıcaklıklar civarındaki büyütme sıcaklıklarında daha kontrollü ve daha simetrik ZnO nanopul yapılarının oluşabildiği görülmüştür. Bununla birlikte yüzeyde büyüyen nanopul yapılarının boyutlarının da artan sıcaklıklarla birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 5.16. RE039, RE040 ve RE041 kodlu numunelere ait konfokal Raman ölçüm sonuçları



Şekil 5.17. RE039, RE040 ve RE041 kodlu numunelere ait Raman parametrelerinin sıcaklıkla değişimi

ZnO nanopul yapılarına ait konfokal Raman ölçüm sonuçları şekil 5.16 ile verilmektedir. Ölçüm sonuçlarında tüm ZnO nanopul numuneleri için $E_2(H)$ ve $E_2(L)$ pikleri görülmüştür.

Ayrıca bazı çoklu fonon modlarının da olduğu belirlenmiştir. $E_2(L)$ piki her 3 numune için birçok pik içeren duruma karşılık gelmektedir. Yaklaşık 99 cm^{-1} civarındaki $E_2(L)$ piki hem nanopul şekline hemde boyutlarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

Şekil 5.17 ile RE039, RE040 ve RE041 kodlu numunelerin $E_2(H)$ piklerine ait bazı hesaplanan parametrelerin büyütme sıcaklığına bağlı değişimi incelenmiştir. $E_2(H)$ pik konumunun çok değişmediği ancak FWHM değerinin artan sıcaklıkla birlikte arttığı belirlenmiştir. Ayrıca içerideki şekilde de görülebileceği gibi $E_2(H)$ piklerinin simetrik olduğu belirlenmiştir.

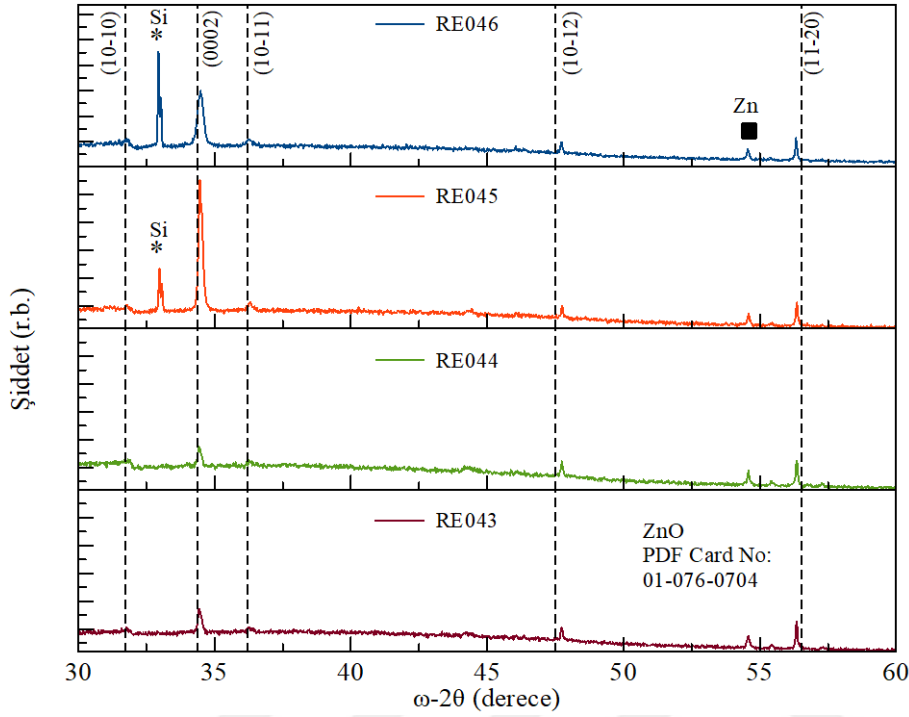
Çizelge 5.4. RE039, RE040 ve RE041 kodlu ZnO kristallere ait yapısal parametreler

Numune Kodu	Düzlemler arası mesafe ($\text{\AA}$) ($11\bar{2}0$)	Örgü parametresi a ($\text{\AA}$)	Kristalit boyutu ($11\bar{2}0$) (nm)	Gerilme a-ekseni boyunca (ϵ_{xx})	RMS (nm)
RE039	1,630	3,261	111	0,0040	65,3
RE040	1,631	3,262	114	0,0043	110
RE041	1,630	3,261	118	0,0040	25,8

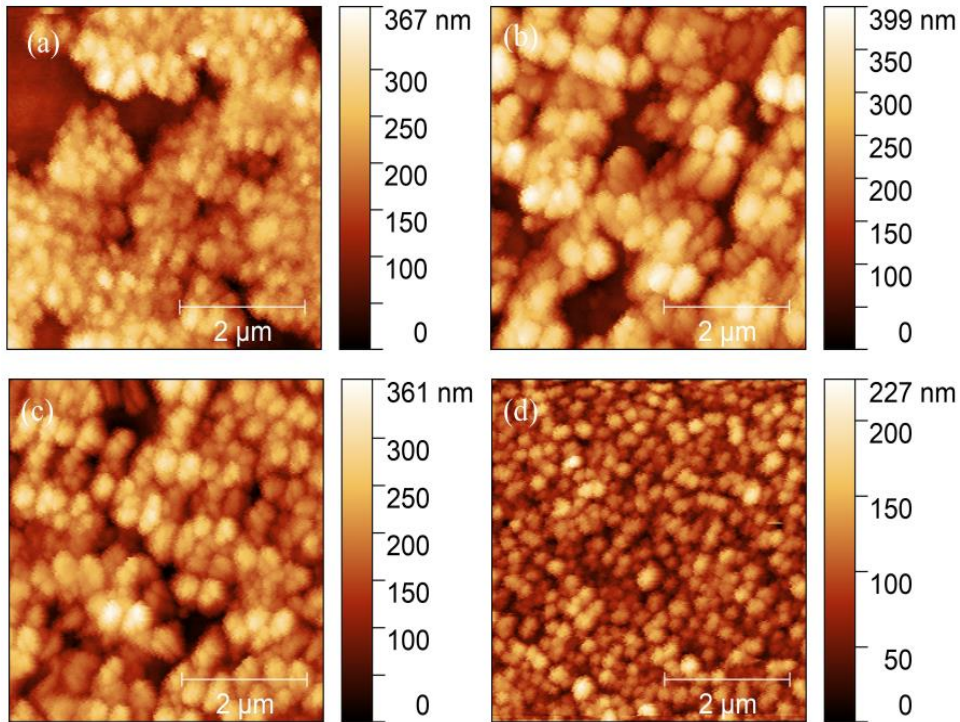
5.2.2. SiO_2/Si alttaş üzerine düşük sıcaklıklarda ZnO büyütmeleri ve tavlamanın etkisi

Bir önceki büyütmelerde, kübik SiO_2/Si alttaşlar üzerine düşük sıcaklık ZnO büyütmelerinde yüzeyde büyüme miktarının daha fazla olduğu AFM ve SEM ölçümleri ile belirlenmiştir. Ayrıca Leidenfrost etkisinin de düşük sıcaklık bölgesinde daha az etkili olduğu görülmüştür. Bu sebeple çizelge 4.6 ile verilen büyütme şartlarına göre iki farklı düşük sıcaklık bölgesinde ZnO nanoyapılar büyütülmüştür ve tek bir sıcaklıkta tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu büyütmelere ait XRD sonuçları şekil 5.18 ile verilmektedir. ZnO kristallerinin polikristal yapıda olduğu görülmektedir. $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'de büyütülen RE045 ve RE046 numunelerinde baskın büyüme yönü (0002) iken $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de büyütülen RE043 ve RE044 numuneleri için (0002) ve ($11\bar{2}0$) yönelimleri benzer pik şiddetine sahiptir. RE043 numunesine ait alttaş ETN ve DİS ile temizlenirken RE044 numunesine ait alttaş ASTN, ETN ve DİS ile temizlenmiştir. XRD sonuçlarından da görüleceği gibi aynı sıcaklıkta büyütülmelerine rağmen (0002) pik şiddeti RE044 numunesinde daha fazladır. RE045 ve RE046 kodlu numunelerde ise tavlama ortamı

farklı seçilmiştir. RE045 numunesi O₂ ortamında, RE046 numunesi ise Ar ortamında tavlانmıştır.

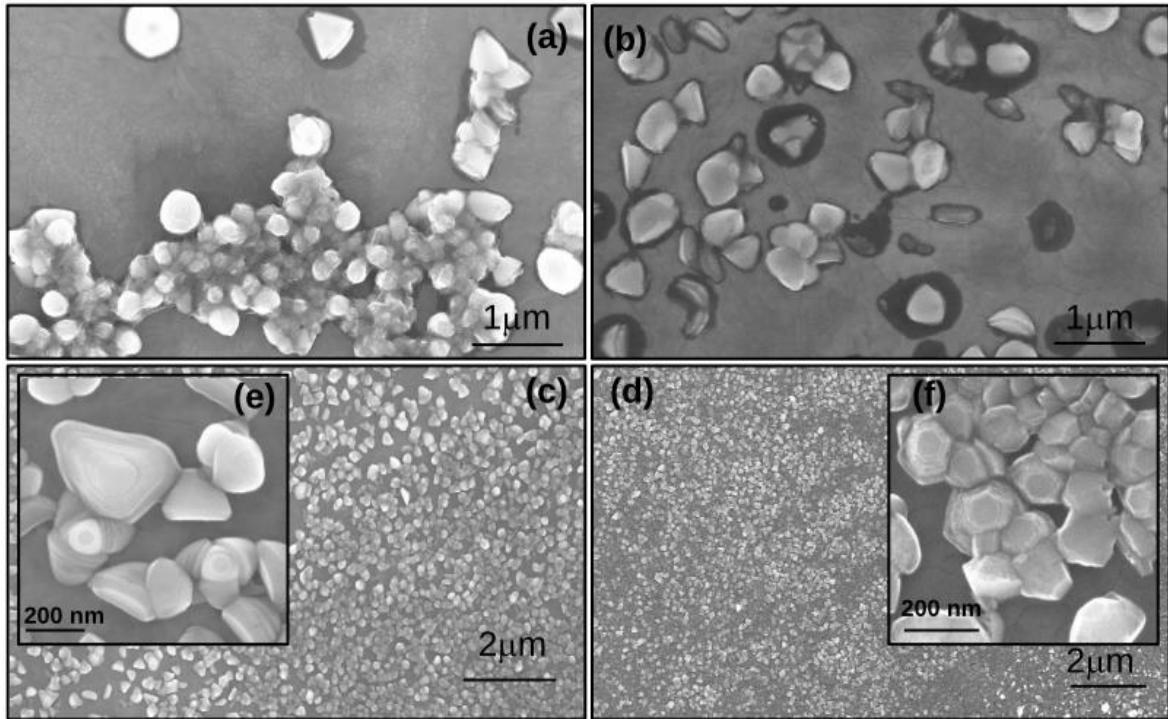


Şekil 5.18. RE043, RE044, RE045 ve RE046 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları



Resim 5.7. a) RE043, b) RE044, c) RE045 ve d) RE046 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5µm² alanda taranmıştır)

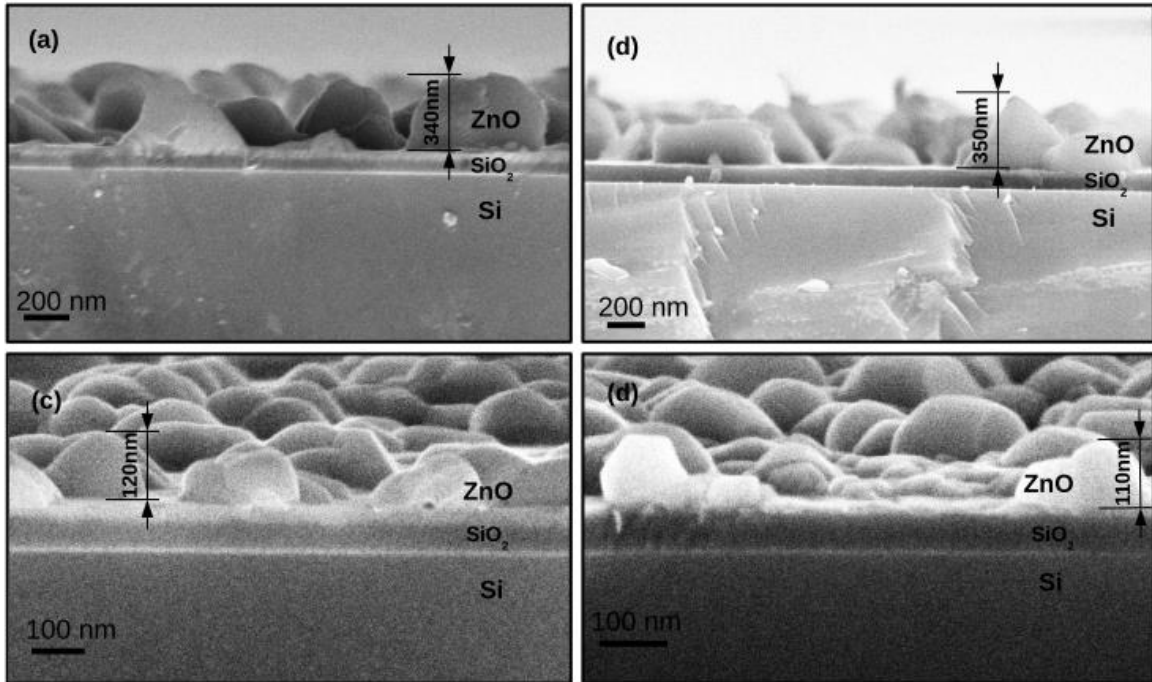
Bunun sonucunda O_2 ortamında tavlanan ZnO kristali daha baskın (0002) yönelimine sahiptir. XRD sonuçları kullanılarak hesaplanan kristalit boyutu (küresel nanoparçacık yaklaşımına göre), gerilme, örgü parametreleri gibi yapısal bazı parametreler çizelge 5.5. ile verilmiştir. Resim 5.7. ile RE043, RE044, RE045 ve RE046 kodlu ZnO numunelere ait AFM görüntüleri verilmektedir. 450 °C sıcaklıkta büyütülen RE043 ve RE044 numunelerinin yüzeylerinde yer yer büyümemiş bölgeler görülürken 350 °C sıcaklıkta hazırlanan RE045 ve RE046 numunelerinin yüzeyleri neredeyse tamamen ZnO ile kaplanmıştır. Bu sebeple daha düşük sıcaklıklarda büyütme yapmak yüzeyde daha fazla ZnO büyümesine neden olmaktadır. Özellikle RE046 numunesinin yüzey pürüzlülüğünün de diğer numunelere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülükleri ile ilgili RMS değerleri çizelge 5.5. ile verilmektedir. Düşük sıcaklık büyütmesi için ZnO kristaline ait RMS değeri yaklaşık 25 nm olarak belirlenmiştir. ZnO büyüme davranışını daha iyi anlayabilmek için SEM görüntüleri alınmıştır.



Resim 5.8. a) RE043, b) RE044, c) RE045 ve d) RE046 kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri

Resim 5.8 ile büyütülen ZnO numunelere ait SEM görüntüleri verilmektedir. Tıpkı AFM görüntülerindeki gibi 450°C sıcaklıkta büyütülen ZnO numunelerin yüzeylerinde büyümemiş bölgeler görülürken 350°C sıcaklıkta büyütülen ZnO numunelerin yüzeyinin

yüksek büyüme oranına sahip olduğu görülmektedir. Resim 5.8 e) ve f) ile verilen SEM görüntülerinden görüldüğü gibi yüzeyde üçgenimsi ve altıgen şekillere sahip ZnO nano piramit/prizma benzeri yapıların büyüdüğü görülmüştür. Literatürde benzer piramit formda büyüyen altıgen tabanlı ZnO nanoyapıların oluştuğu bilinmektedir [158]. Ayrıca görüntülerinden büyüyen ZnO nanoyapıların belirgin büyüme yönelimine sahip oldukları görülmektedir. Bu sebeple XRD sonuçlarında 350°C sıcaklıkta büyütülen ZnO numuneler daha baskın (0002) pikine sahiptir. Genel itibariyle yaygın büyüme formu hekzagonal ve altıgen nanoyapı şeklindedir. Resim 5.9 ile bu numune grubuna ait yandan görünüş SEM görüntüleri görülmektedir.

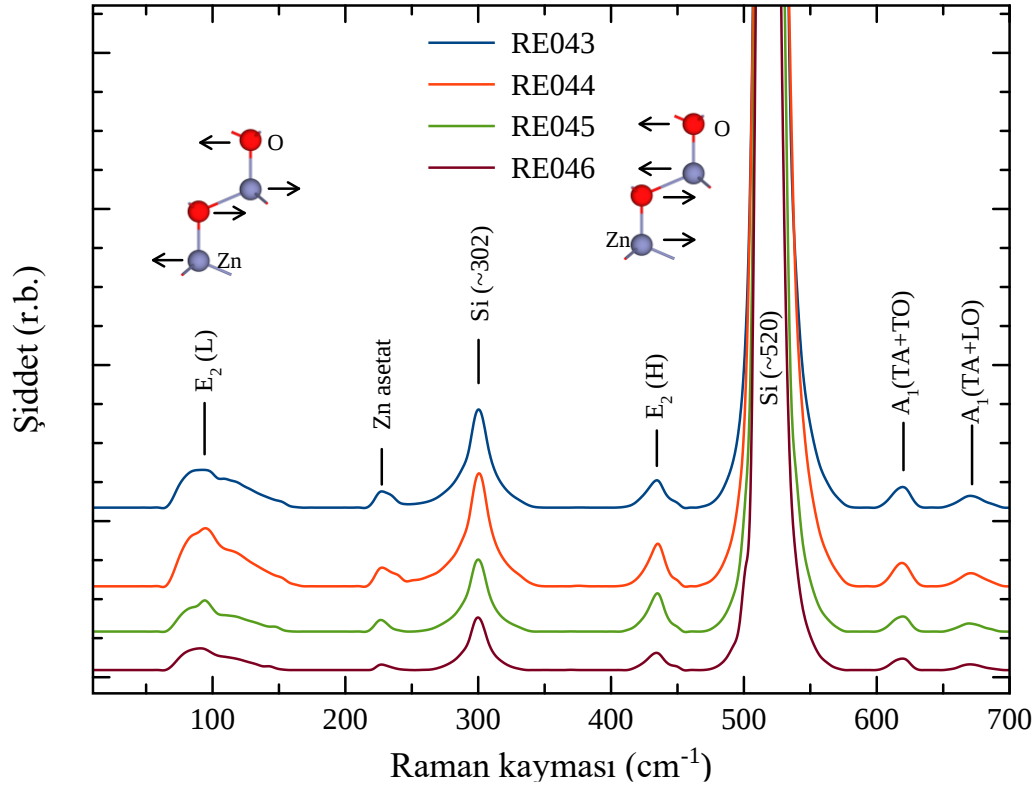


Resim 5.9. a) RE043, b) RE044, c) RE045 ve d) RE046 kodlu numunelere ait yandan SEM görüntüleri

Yüzeyde büyüyen ZnO nanoparçacıkların Volmer-Weber (3-B) büyüme davranışına sahip olduğu görülmektedir. Bu görüntülerden yüzeyde büyüyen ZnO kristallerinin yükseklik değerleri elde edilmiştir. RE045 ve RE046 numunelerinde ZnO nano-yapıların yüksekliği yaklaşık 110-120 nm iken RE043 ve RE044 numunelerinde 340-350 nm civarındadır.

ZnO kristallerin konfokal Raman ölçüm sonuçları şekil 5.19 ile verilmektedir. Tüm numunelerde $E_2(H)$ ve $E_2(L)$ pikleri görülmüştür. $E_2(L)$ piki bir önceki büyütmelemlerde olduğu gibi birçok safsızlıklara sahip kristal neticesinde farklı piklerin birleşimi şeklinde

görülmektedir. Belirlenebilen $E_2(L)$ pik konumları RE044 ve RE045 için sırasıyla 96 cm^{-1} ve 95 cm^{-1} değerlerindedir. $E_2(H)$ pik konumları ise RE043, RE044, RE045 ve RE046 numuneleri için sırasıyla 434 cm^{-1} , 435 cm^{-1} , 435 cm^{-1} ve 434 cm^{-1} olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.19. RE043, RE044, RE045 ve RE046 kodlu numunelere ait konfokal Raman ölçüm sonuçları

Çizelge 5.5. RE043, RE044, RE045 ve RE046 kodlu ZnO kristallere ait yapısal parametreler

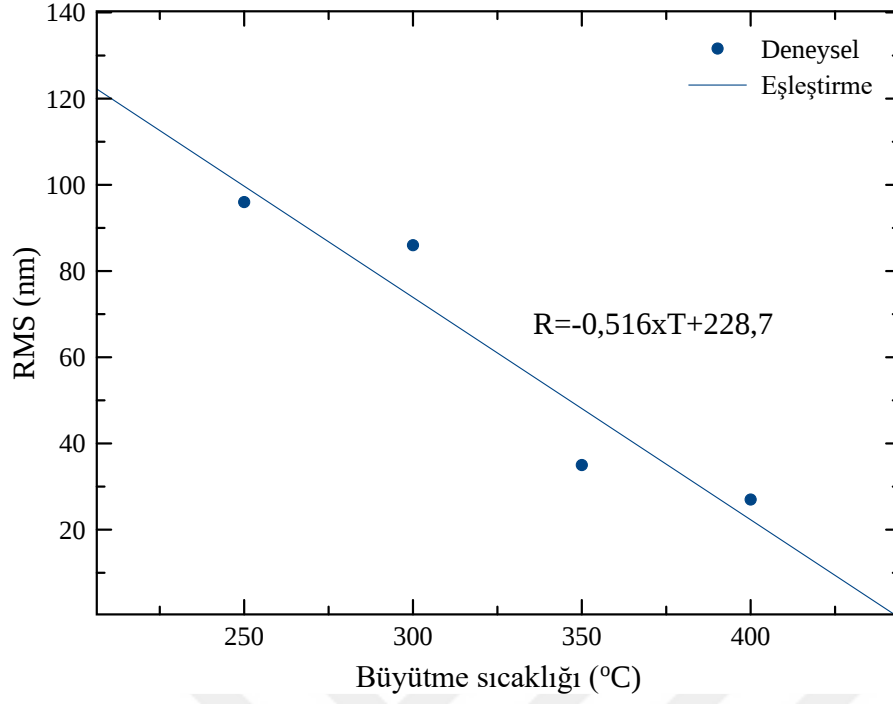
Numune Kodu	Kristalit boyutu (nm)	Düzlemler arası mesafe (Å)	c (Å)	a (Å)	c/a	Gerilme (ϵ_{zz})	Gerilme (ϵ_{xx})	RMS (nm)
RE043	51,96	2,600	5,201	3,263	1,594	-0,0004	-0,0040	126,0
RE044	50,02	2,600	5,201	3,261	1,595	-0,0004	-0,0034	70,52
RE045	47,51	2,599	5,199	3,261	1,594	0,0002	-0,0034	31,14
RE046	34,21	2,598	5,196	3,262	1,593	0,0007	-0,0037	25,33

5.3. C-Al₂O₃ Alttaş Üzerine ZnO Büyütmeleri

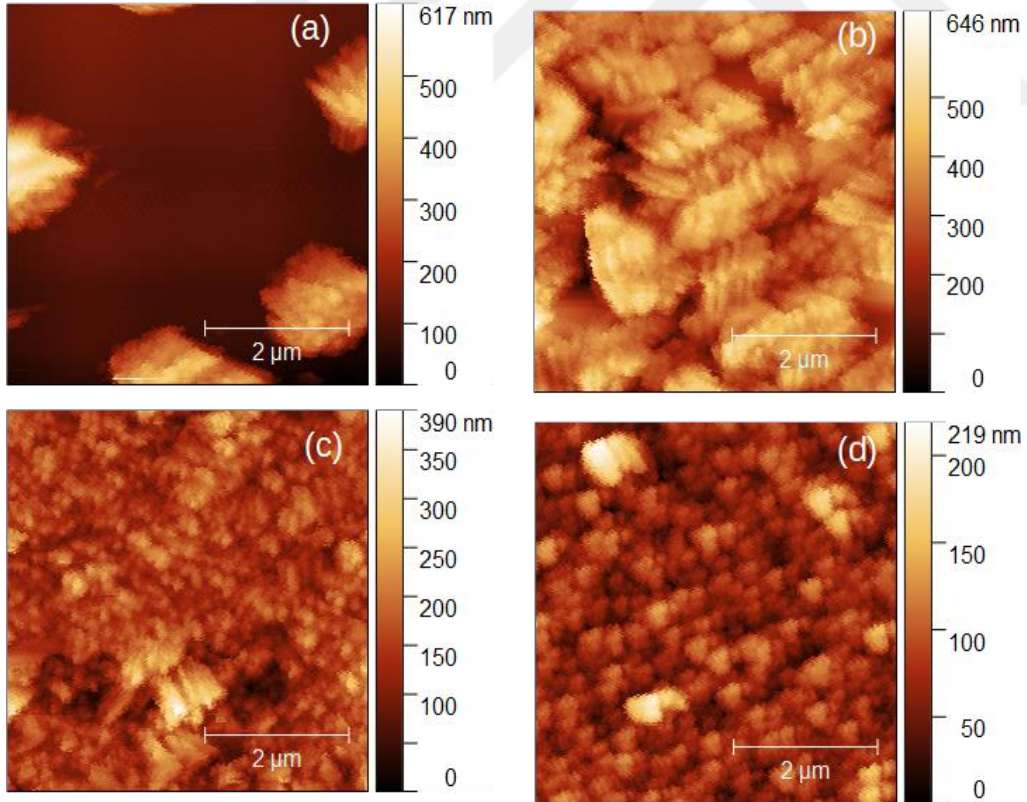
Bu kısma kadar birçok deney parametresi belirlenmiştir. Daha kaliteli ve baskın (0002) yönelimli ZnO kristalleri elde edebilmek için, c-Al₂O₃ üzerine ZnO kristaller detayları çizelge 4.7 ile verilen RE062, RF063, RF064 ve RE065 kodlu ZnO numuneleri sırasıyla 250°C, 300°C, 350 °C ve 400 °C sıcaklıklarda büyütülmüştür. Büyütme sonrası tavlama işlemi O₂ atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. Tezin akışına karşı bu büyütmelere ait XRD sonuçlarını vermeden önce AFM görüntüleri alınmıştır. Yüzeyde yoğun büyüme olan numuneler için XRD ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Resim 5.10 ile RF062, RF063, RF064 ve RF065 kodlu ZnO numunelerine ait AFM görüntüleri verilmektedir.

Herhangi bir tavlama işlemi yapılmadan yüzeyden alınan AFM görüntüleri resim 5.10 ile görülmektedir. AFM görüntülerine göre resim 5.10 a) ve b) ile verilen RF062 ve RF063 kodlu numunelerinin oldukça yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir. Ancak resim 5.10 c) ve d) ile verilen RF064 ve RF065 numunelerinin yüzey pürüzlülükleri daha düşüktür. RF062 ve RF063 kodlu numunelerinin yeterince düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olmaması nedeniyle tavlama işlemleri sadece RF064 ve RF065 kodlu numuneleri için yapılmıştır.

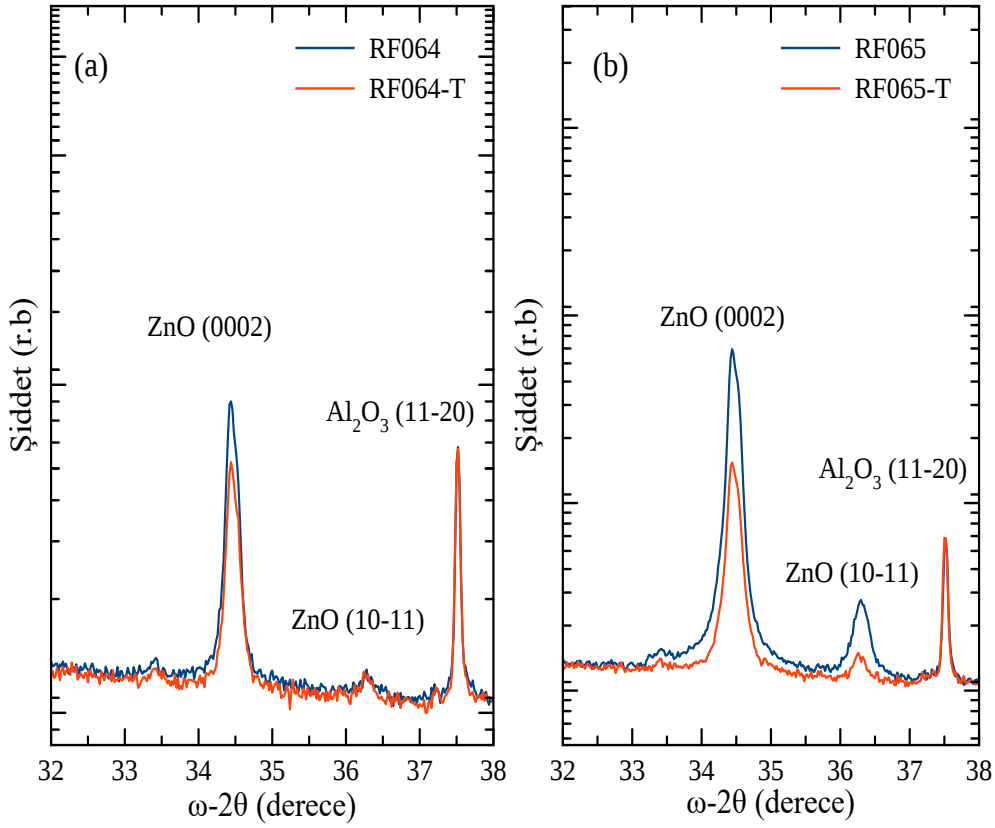
Elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimi şekil 5.20 ile verilmektedir. Görüldüğü gibi büyüme sıcaklığı arttıkça yüzey pürüzlülüğü daha düşük hale gelmektedir. Daha önce yüksek sıcaklık büyütmelerinde görülen Leidenfrost etkisinin düşük sıcaklıklarda görülmediği, ancak düşük sıcaklık bölgesinin de bir alt sınırının olduğu bu büyüme grubu ile belirlenmiştir. Bu sıcaklık sınırı en düşük 350 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca RF062 ve RF063 numunelerinin yeterince düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olmaması nedeniyle tavlama işlemleri sadece RF064 ve RF065 numuneleri için yapılmıştır. Şekil 5.21 ile XRD sonuçları verilmektedir. Her iki sıcaklıkta büyütilen numuneler için tavlandıktan sonra 2θ pik şiddetinin azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte 350 °C’de büyütilen RF064 numunesinde (0002)’nin dışındaki diğer ZnO (10-11) kırınım pikinin oldukça düşük olduğu buna karşın RF065 numunesinde bu pik’in daha belirgin olduğu görülmektedir. Ancak tavlama ile (10-11) pik şiddetinin azaldığı görülmektedir.



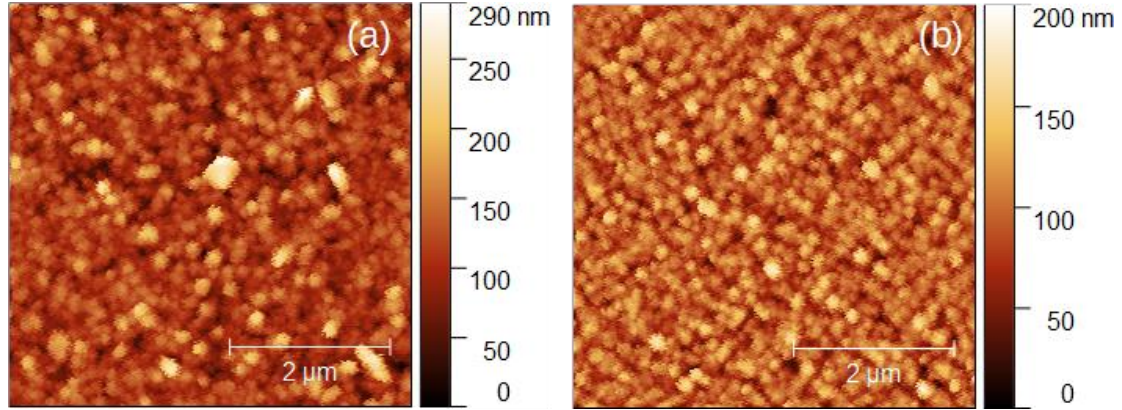
Şekil 5.20. Büyütme sıcaklığının ZnO yüzey pürüzlülüğü ile değişimi



Resim 5.10. a) RF062, b) RF063, c) RF064 ve d) RF065 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 μm² alanda taranmıştır)

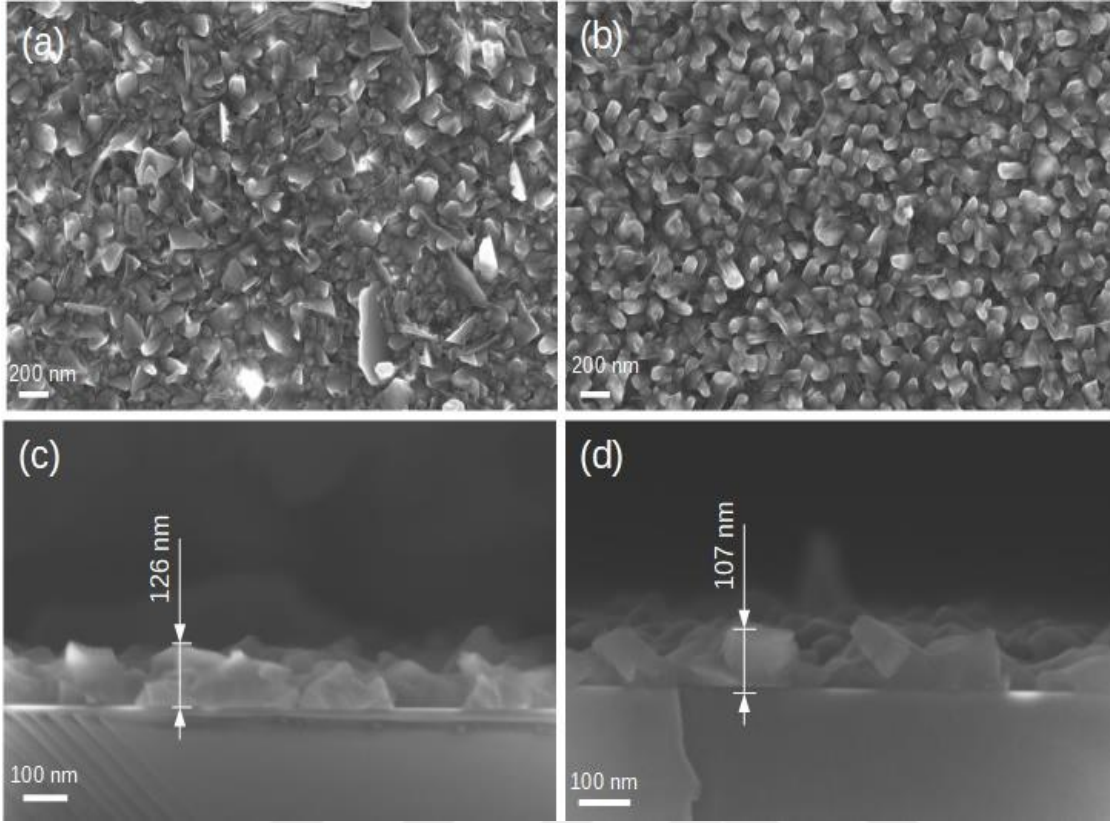


Şekil 5.21. a) RF064 ve RF064-T, b) RF065 ve RF065-T kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları

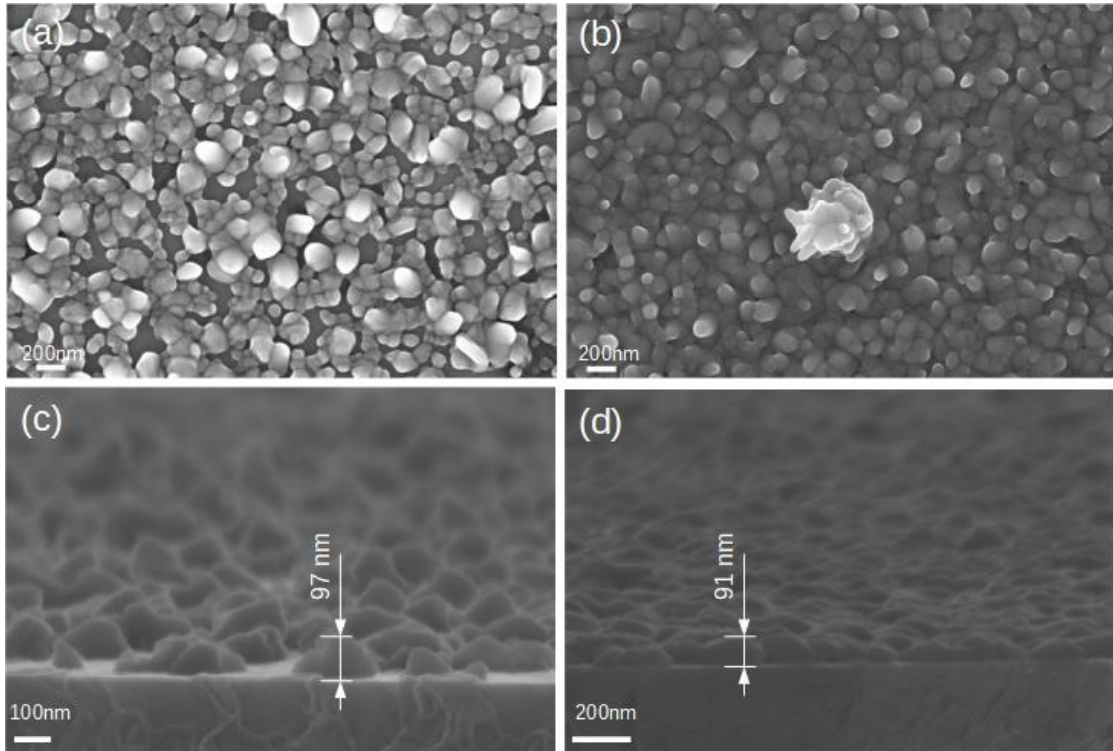


Resim 5.11. a) RF064-T b) RF065-T kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 µm² alanda taranmıştır)

Resim 5.11 ile görülen AFM görüntülerinde tavlama işleminin yüzeyi oldukça düzenli hale getirdiği ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği görülmektedir. Özellikle RF065 numunesinin yüzeyi oldukça tekdüze nanoparçacıklardan oluştuğu görülmektedir. Yüzey özellikleri hakkında daha fazla bilgi sahibi olabilmek için SEM ölçümleri gerçekleştirilmiş olup resim 5.12 ile verilmektedir.



Resim 5.12. a) ve c) RF064 b) ve d) RF065 kodlu numunelere ait SEM görüntüleri üstten ve yandan görünüm



Resim 5.13. a) ve c) RF064-T b) ve d) RF065-T kodlu numunelere ait SEM görüntüleri üstten ve yandan görünüm

Resim 5.12. a) ile verilen 350 °C sıcaklıkta büyütülen RF064 kodlu ZnO numunesine ait SEM görüntüsünde yüzeyde farklı büyüklüklerde ZnO nanoparçacıklar görülmektedir. Altıgen ve üçgen yapıya sahip nanopul şeklinde ve bunlardan daha küçük boyutlarda nanoparçacıklar görülmektedir. Resim 5.12b) ile verilen 400 °C ile büyütülen RF065 kodlu ZnO numunesinin SEM görüntüsünde daha düzenli birbirine benzer ZnO nanoparçacıklar olduğu görülmektedir. Bu numunelerin yandan görünüşleri de resim 5.12 c) ve d) ile görülmektedir. Her iki yüzeyde de Volmer-Weber (3-B) bir büyüme olduğu görülmektedir. Bu parçacıkların yükseklikleri yaklaşık olarak birbirlerine benzer şekildedir ve 100-130 nm aralığında değiştiği görülmektedir. Tavlamanın etkisini incelemek için resim 5.13 ile SEM görüntüleri verilmiştir.

Resim 5.13. a) ve b) ile gösterilen SEM görüntülerinde tavlama işleminden sonra RF064 numunesinde tavlama işleminden önce görülen altıgen ve üçgen 2-boyutlu nanopul yapılar yerine daha çok birbirine benzeyen nanoparçacık şeklinde büyümeler görülmektedir. RF065 numunesinin yüzeyinde görülen parçacıkların tavlama öncesi görüntüsüne benzer şekilde büyüme yönünde (c-ekseni) yöneldiği görülmektedir. Resim 5.13. c) ve d) ile bu numunelere ait yandan çekilen SEM görüntüsü verilmiştir. Büyüyen nanoparçacıkların yükseklikleri tavlama işleminden sonra azalmıştır. Bununla birlikte RF065-T numunesinin yüzeyinde RF064-T numunesine göre daha fazla ZnO nanoparçacık büyüdüğü de görülebilmektedir. RF064 ve RF065 kodlu ZnO numunelerine ait XRD ve AFM sonuçlarından elde edilen bazı parametreler çizelge 5.6 ile özetlenmiştir.

Çizelge 5.6. RF064 ve RF065 kodlu ZnO kristallere ait bazı yapısal parametreler

Numune kodu	Kristalit boyutu (nm)	Örgü parametresi c (Å)	RMS (nm)
RF064	56,36	5,20	35,0
RF064-T	51,01	5,20	28,5
RF065	52,29	5,20	27,2
RF065-T	50,70	5,20	22,0

5.4. SLG Alttaş Üzerine MgZnO Büyütmeleri

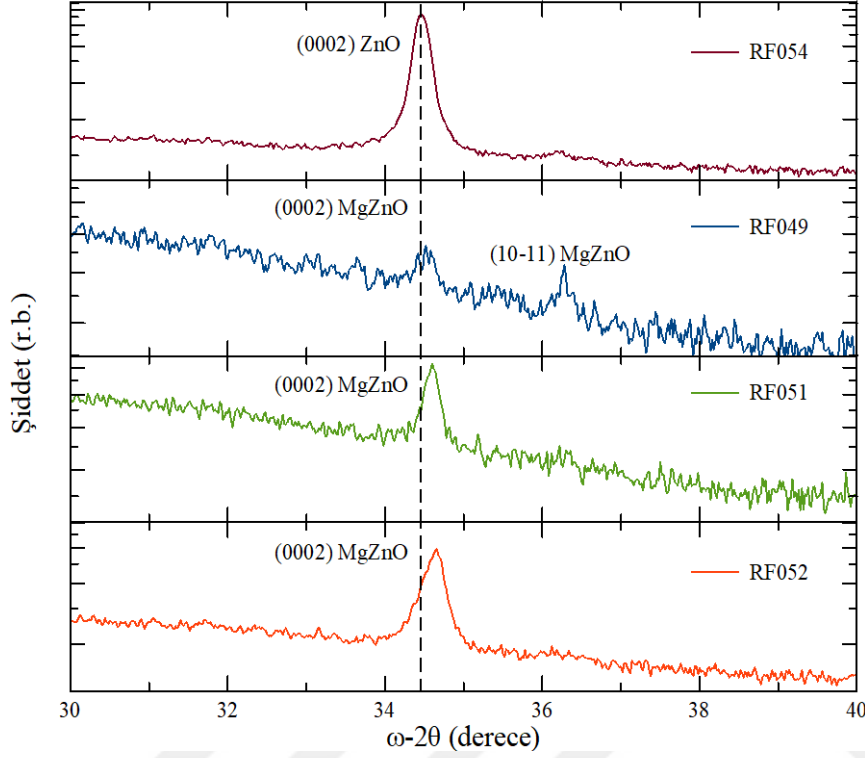
5.4.1. Mg oranının MgZnO büyümesi üzerine etkisi

SLG, SiO₂/Si ve c-Al₂O₃ alttaşlar üzerine ZnO kristallerin büyütülmesi önceki kısımlarda detaylıca incelenmiştir. Bu tez çalışmasında incelenecek olan bir diğer kristal Mg ile alaşımlaştırılmış ZnO kristalidir. Tıpkı saf ZnO büyütmelerinde olduğu gibi bir önceki bölümde çizelge 4.8 ve 4.9 ile verilen deneysel şartlar kullanılarak büyütülen MgZnO büyüme sonuçları bu başlık altında tartışılacaktır. MgZnO büyüme davranışı ve büyüyen MgZnO kristallerin fiziksel özellikleri incelenecektir. İlk olarak çizelge 4.8 ile verilen büyüme şartları ile büyütülen MgZnO kristallere ait XRD sonuçları şekil 5.22 ile verilmektedir. Magnezyum asetat tetrahidrat ve çinko asetat dihidrat tuzları %15, %30 ve %45 Mg oranlarında karıştırılarak SLG üzerine MgZnO kristalleri büyütülmüştür. RF049, RF051, RF052 ve RF054 kodlu MgZnO kristalleri sırasıyla %15, %30, %45 ve %0 Mg oranlarına sahip büyütmelere karşılık gelmektedir. Ölçümler 30° ve 40° aralığında taranmış olup geniş taramada herhangi başka bir MgZnO fazı görülmemiştir. Elde edilen sonuçlarda RF049 kodlu MgZnO numunesi hariç tüm kristaller baskın (0002) kırınım pikine sahiptir. Açıkça görüldüğü gibi öncü içerisindeki Mg içeriği arttıkça büyütülen MgZnO kristallerin (0002) kırınım pikleri yüksek açı değerlerine doğru kaymaktadır. XRD sonuçları ile büyüyen MgZnO kristallerin Mg oranları literatürde bilinen MgO ve ZnO kristallerinin örgü parametreleri ile kullanılarak eş. 5.1 ile verilen Vegard yasası kullanılarak hesaplanmıştır [159].

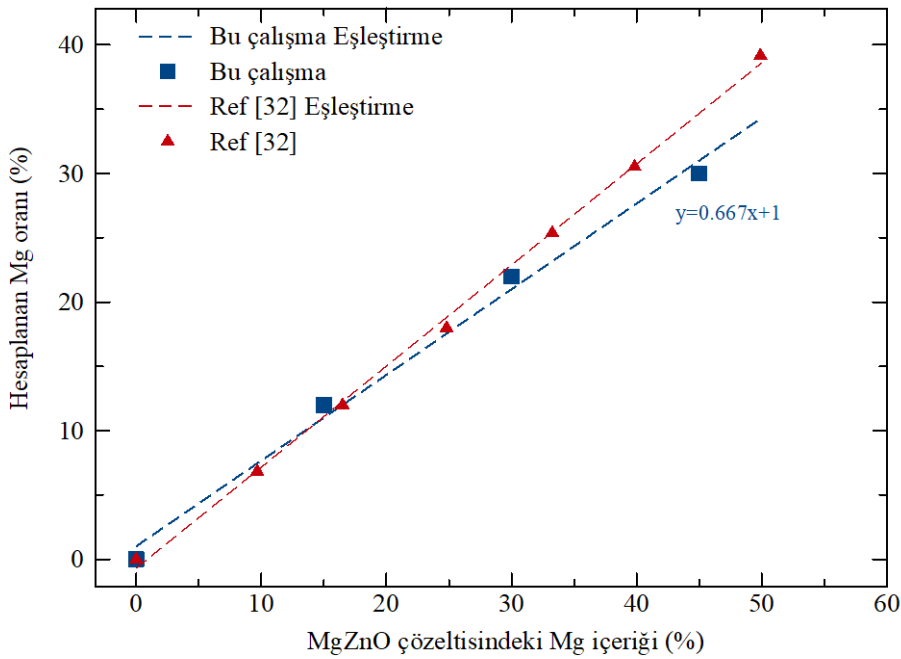
$$\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x} = x\text{MgO} + (1 - x)\text{ZnO} \quad (5.1)$$

Elde edilen Mg çizelge 5.7 ile verilmiştir. Bununla birlikte sıvı öncü içerisinde kullanılan Mg içeriği ile XRD sonuçlarında elde edilen Mg oranının birbiri ile nasıl değiştiği şekil 5.23 ile verilmektedir. Hem bu tez çalışması hemde benzer yöntemle büyütülmüş bir başka çalışmanın kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hazırlanan öncü içerisindeki Mg içeriği ile XRD sonuçlarından elde edilen Mg oranı doğrusal olarak değişmektedir. Literatürdeki sonuç ile de uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Hazırlanan Mg içeriğinin tamamının büyütülen MgZnO içerisinde olmadığı ayrıca görülmüştür. Bu durum Mg ve Zn kaynağı olarak kullanılan asetat tuzlarının sıvı öncü içerisinde aynı

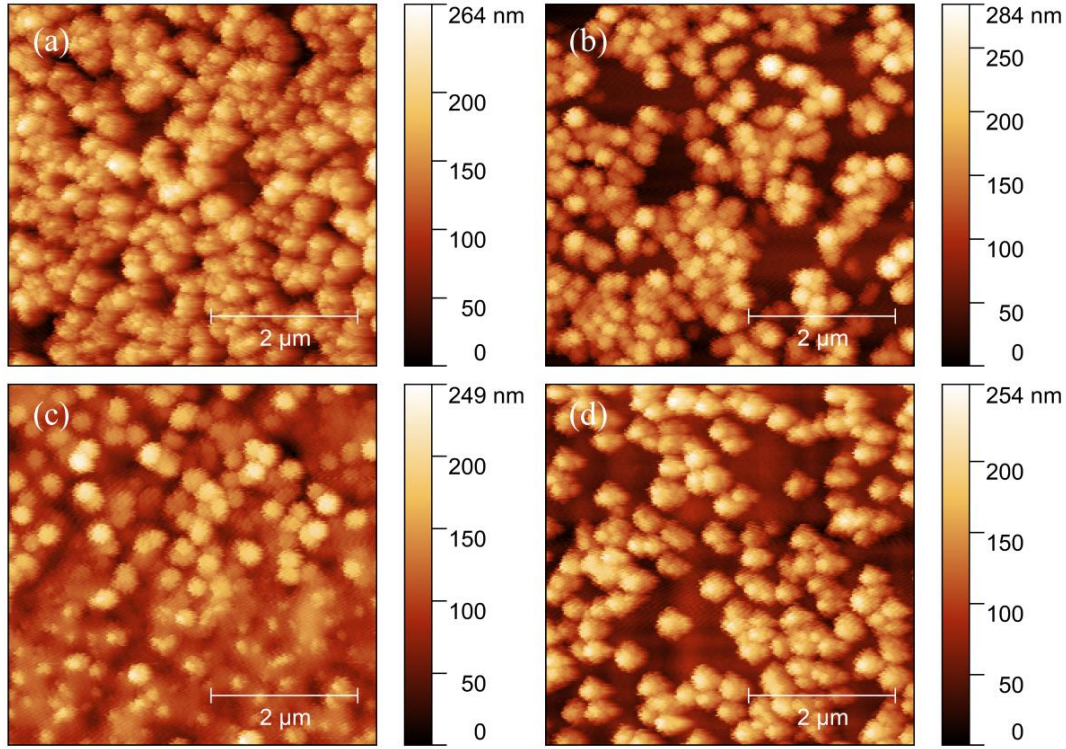
miktarda çözünmemesi ve UT'nin su ve asetik asiti buharlaştırma oranının farklı olmasından kaynaklandığını önerilmiştir.



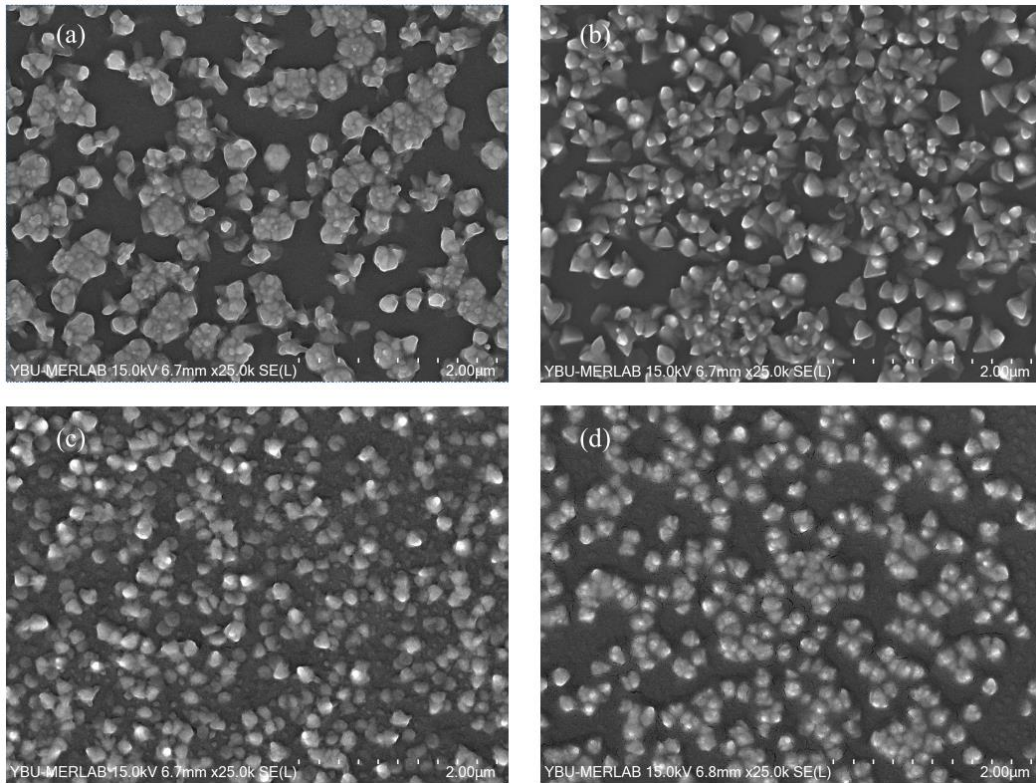
Şekil 5.22. RF049, RF051, RF052 ve RF054 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları



Şekil 5.23. Hazırlanan sıvı öncü içerisindeki Mg miktarı ile hesaplanan Mg oranının değişimi [32]



Resim 5.14. a) RF054, b) RF049, c) RF051 ve d) RF052 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 μm² alanda taranmıştır)

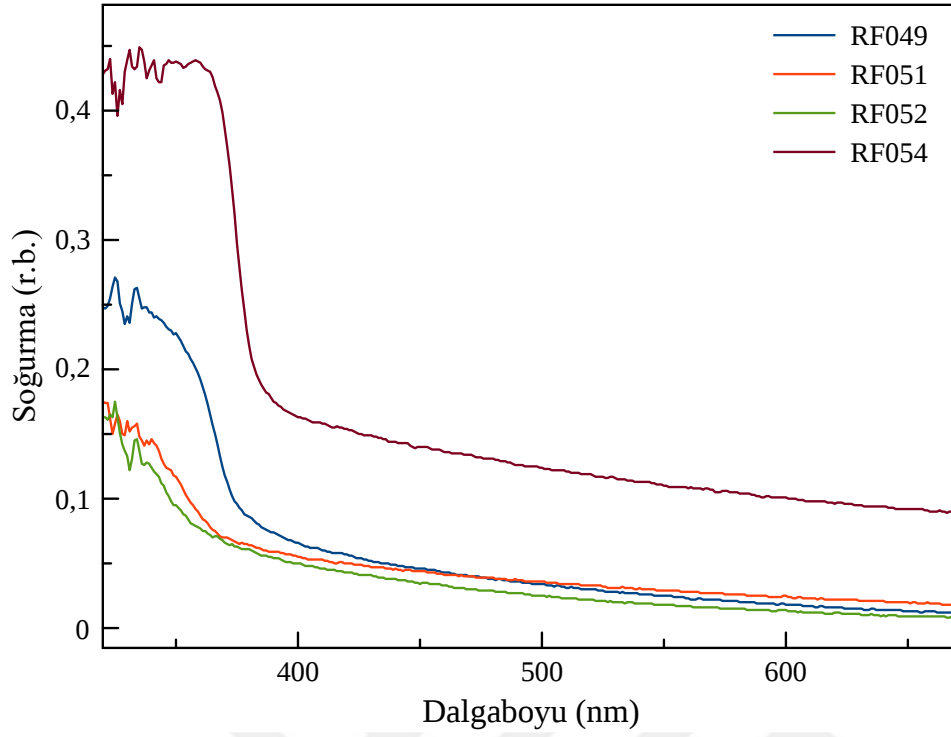


Resim 5.15. a) RF054, b) RF049, c) RF051 ve d) RF052 kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri

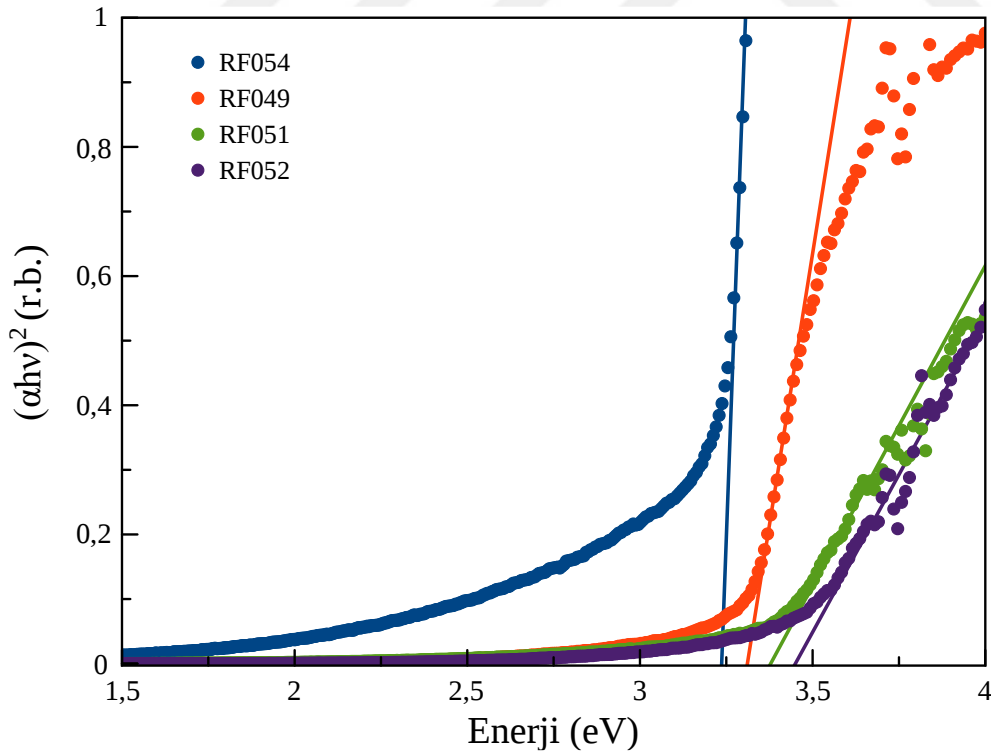
Literatürde bazı çalışmalarda %30 Mg oranından MgZnO kristalinin kaya-tuzu fazının oluşabileceği söylenmesine rağmen büyütmelerimizde sadece hekzagonal fazda MgZnO kristallerinin büyüdüğü görülmüştür. MgZnO kristallerin yüzey özellikleri AFM ölçümleri ile incelenmiştir. Resim 5.14 ile MgZnO kristallerin AFM görüntüleri verilmektedir. RF051 kodlu ve %22 Mg oranına sahip MgZnO kristali yüzey özellikleri bakımından en düşük RMS değerini göstermiştir. Daha önceki ZnO büyütmelerinin aksine MgZnO kristalleri genel anlamda küresel formda büyümeyi tercih etmiştir. ZnO büyütmelerinden de bildiğimiz Volmer-Weber (3-B) büyüme davranışının olduğu görülmüştür. Daha sonraki büyütülecek MgZnO kristalleri için önerilen Mg oranı %22 olarak seçilmiştir. Bu sebeple hem yüzey pürüzlülüğündeki düşüklük hem de yüzeyde daha yoğun miktarda büyümenin olması başlıca sebeplerdir.

MgZnO kristallerin detaylı yüzey özellikleri incelemesi için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Resim 5.15 ile kristallerin üstten SEM görüntüleri verilmektedir. Sonuçlar AFM ile birbirini destekler niteliktedir. Buna ek olarak RF054 numunesinin yüzeyinde oldukça yönelimli nanoparçacıklar olduğu görülmektedir. Öyleki XRD sonuçlarında güçlü (0002) pikinin kaynağı ZnO kristallerin büyüme yönü doğrultusunda olmasıdır. RF049 numunesinin yüzeyinde ise üçgenimsi nanoparçacıkların olduğu görülmektedir. MgZnO kristallerin yanal yüzeylerine karşılık gelen yüzeyler SEM üzerinde görülmüş olabilir. Bu nedenle RF049 numunesinin XRD sonuçlarında (10 $\bar{1}$ 1) pikinin (0002) piki kadar baskın olduğu görülmektedir. RF051 numunesi AFM görüntülerinden elde edilen sonuçlar oldukça uyum içerisinde olup yüzey diğer numunelere göre neredeyse tamamen kaplanmıştır. RF052 ise RF051 numunesi ile benzer yüzey özellikleri sergilemiştir.

Büyütülen MgZnO kristallerin optik özelliklerini inceleyebilmek için UV-görünür bölge soğurma spektrumu ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.24 ile MgZnO kristallere ait soğurma spektrumu verilmektedir. Şekil 5.24 ile verilen soğurma spektrumları sonucunda %0 Mg oranına sahip RF054'ten %30 Mg oranına sahip RF052 kodlu MgZnO kristaline doğru gidildikçe kristallerin soğurma kıyısı daha düşük dalga boylarına doğru kaymıştır. Bu sonuçların literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür [161].



Şekil 5.24. RF049, RF051, RF052 ve RF054 kodlu numunelere ait soğurma spektrumu



Şekil 5.25. RF049, RF051, RF052 ve RF054 kodlu numunelere Tauc metodu uygulanması

Elde edilen soğurma spektrumları kullanılarak eş. 5.2 ile verilen Tauc yaklaşımı kullanılarak MgZnO kristallerin Tauc bant aralığı değerleri hesaplanmıştır.

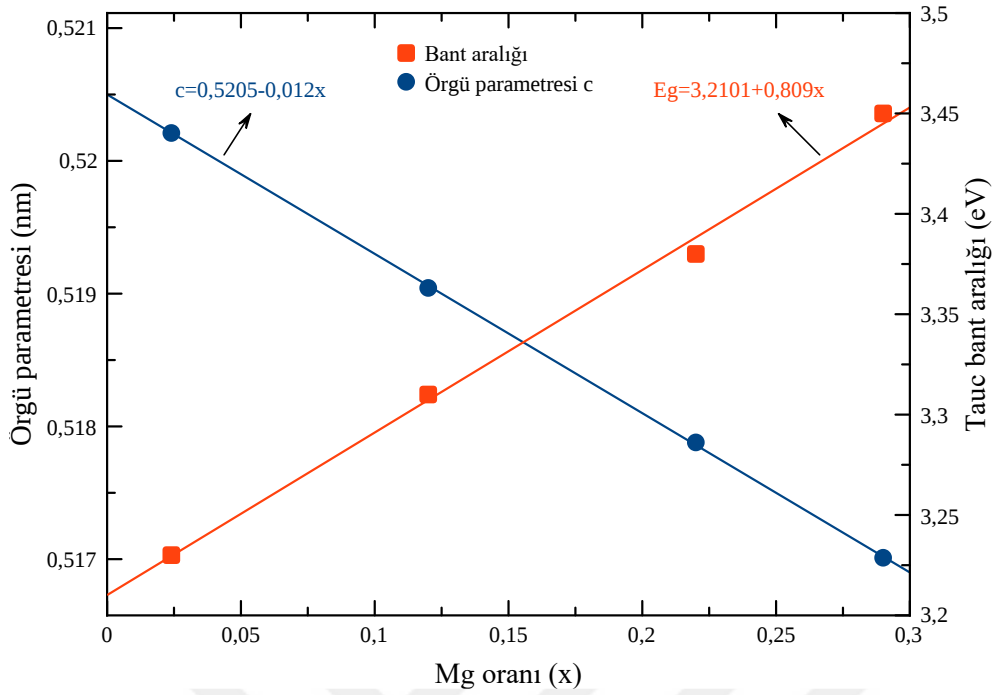
$$(\alpha h\nu)^2 = (h\nu - E_g) \quad (5.2)$$

Burada α , h , ν ve E_g sırasıyla, soğurma, Planck sabiti, frekans ve Tauc bant aralığını temsil etmektedir. MgZnO kristallere Tauc yaklaşımın uygulanması sonucu şekil 5.25 ile verilmektedir. Soğurma verileri üzerinden en iyi doğrusal bir bölge üzerinden fit yapılması sonucu fitin enerji eksenini kestiği nokta o kristal için Tauc bant aralığı değerini vermektedir. Bu yöntemle, Tauc bant aralığı değerleri artan Mg oranına bağlı olarak 3,24 eV ile 3,45 eV aralığında değişmektedir.

Elde edilen Tauc bant aralığı ve örgü parametresinin Mg oranı ile değişimi şekil 5.26 ile verilmektedir. Hem Tauc bant aralığı hem de örgü parametresi MgZnO kristali içerisindeki Mg oranına göre doğrusal olarak değişmektedir. Elde edilen deneysel veriler için doğrusal eşleştirmeler gerçekleştirilmiştir. MgZnO kristallerin farklı Mg oranları için incelemeleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen bulgularda %22 Mg oranına sahip MgZnO büyütme şartlarının hem düşük RMS değeri hem de yüzeyde büyüyen MgZnO miktarı sebebiyle daha kaliteli MgZnO büyütme için uygun olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.7. RF054, RF049, RF051 ve RF052 kodlu MgZnO kristaller için bazı yapısal ve optiksel parametreler

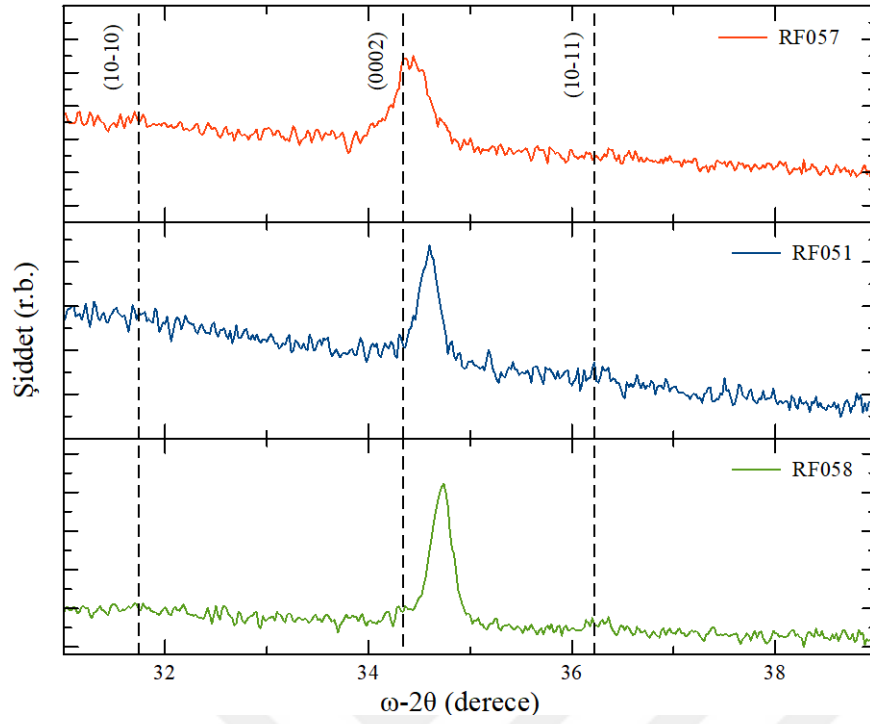
Numune kodu	Hazırlanan Mg içeriği (%)	Hesaplanan Mg oranı (%)	Düzlemler arası mesafe (Å)	Örgü sabiti c (Å)	RMS (nm)	Bant aralığı (eV)
RF054	0	0	2,602	5,203	34,7	3,24
RF049	15	12	2,595	5,190	55,5	3,30
RF051	30	22	2,589	5,178	32,3	3,38
RF052	45	30	2,585	5,169	48,2	3,45



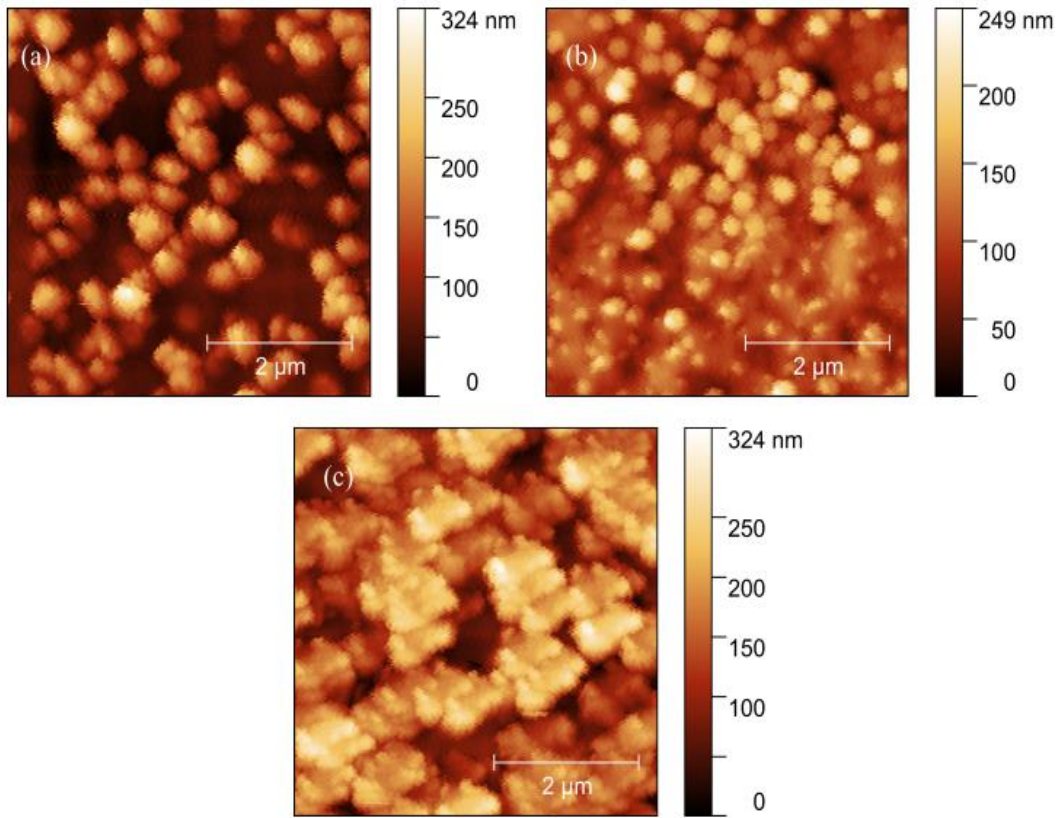
Şekil 5.26. Mg oranına bağlı olarak örgü parametresi ve Tauc bant aralığının değişimi

5.4.2. Büyütme sıcaklığının MgZnO büyümesi üzerine etkisi

Bir önceki kısımda tartışılan sıvı öncü içerisindeki Mg miktarının MgZnO kristallerin özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği belirlenmişti. Bu kısımda ise düşük sıcaklık bölgesinde 3 farklı sıcaklık için sabit Mg içeriğinde hazırlanan öncüler kullanılarak elde edilen MgZnO kristallerin büyüme davranışları ve fiziksel özellikleri tartışılacaktır. Bir önceki kısımda belirlenen RF051 kodlu numuneye ait %22 Mg oranına sahip MgZnO kristalinin büyüme şartları sabit tutulmuş sadece büyüme sıcaklığı değişmiştir. Burada RF057, RF051 ve RF058 kodlu MgZnO büyütme örneklerine ait büyüme sıcaklıkları sırasıyla 300°C, 350°C ve 400 °C şeklindedir. Bu büyütme örneklerine ait XRD sonuçları 5.27 ile verilmektedir. Tüm MgZnO kristallerde baskın (0002) pikleri görülmüştür. Artan büyüme sıcaklığına bağlı olarak (0002) pik şiddetinin arttığı bu da daha kalın veya daha büyük nanoparçacıkların büyüdüğüne işaret etmektedir. Mg içeriğinin sabit tutulduğu büyütme örneklerinde büyüme sıcaklığına bağlı olarak (0002) pikinin büyük açı değerlerine doğru kaydığı görülmüştür. Bu durum MgZnO büyütmesi açısından oldukça ilginç bir sonuçtur. Bu sonuçla birlikte büyüme sıcaklığı ile ayarlanabilir bir Mg alaşım oranının önü açılmıştır.

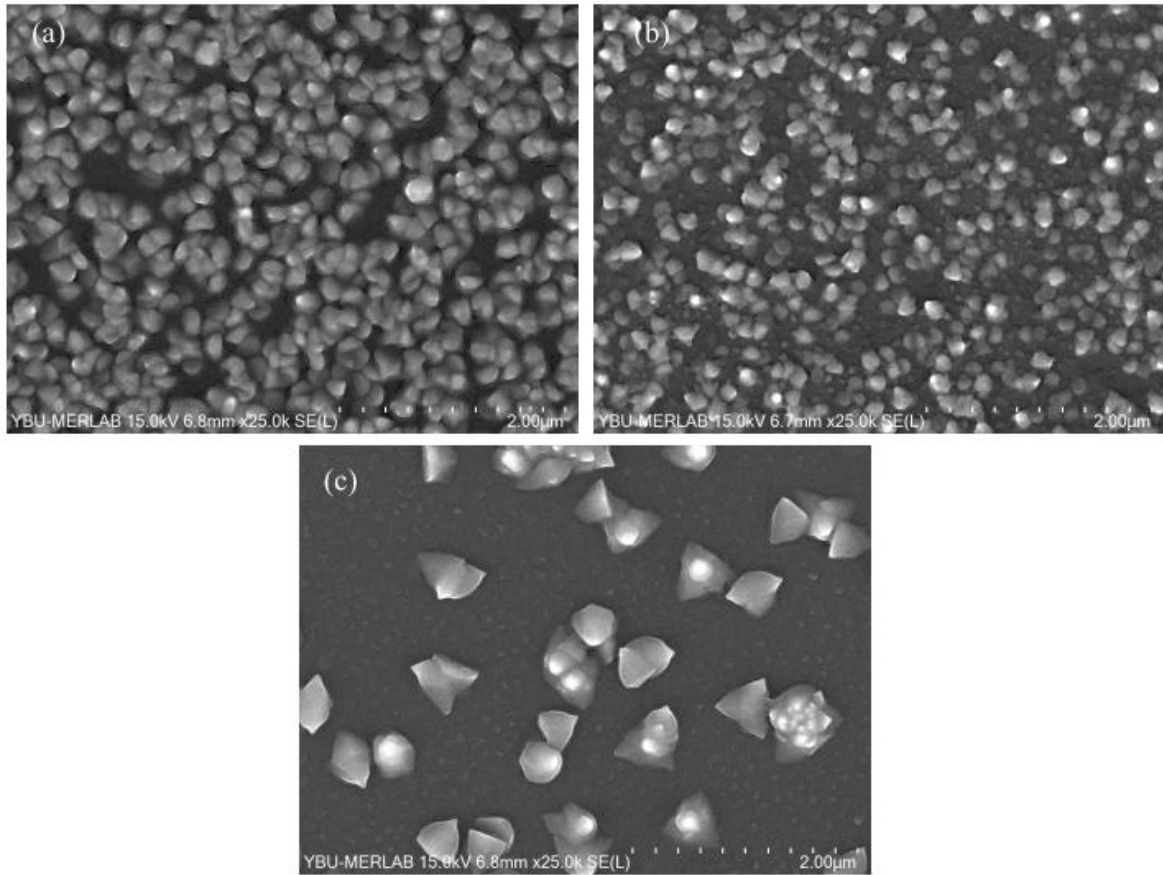


Şekil 5.27. RF051, RF057 ve RF058 kodlu numunelere ait XRD sonuçları

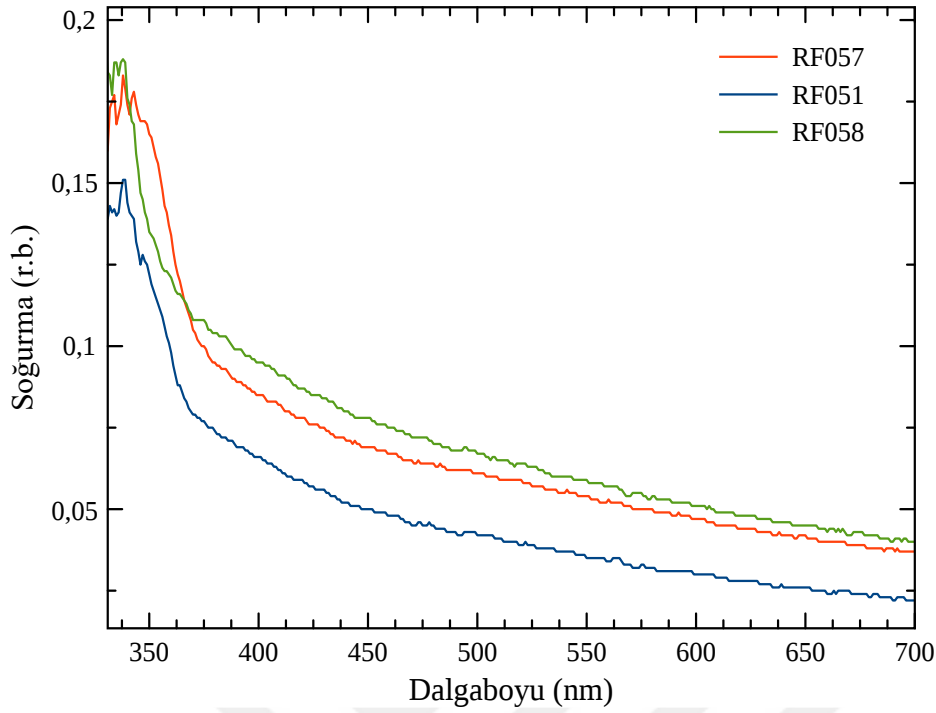


Resim 5.16. a) RF057, b) RF051 ve d) RF058 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 μm^2 alanda taranmıştır)

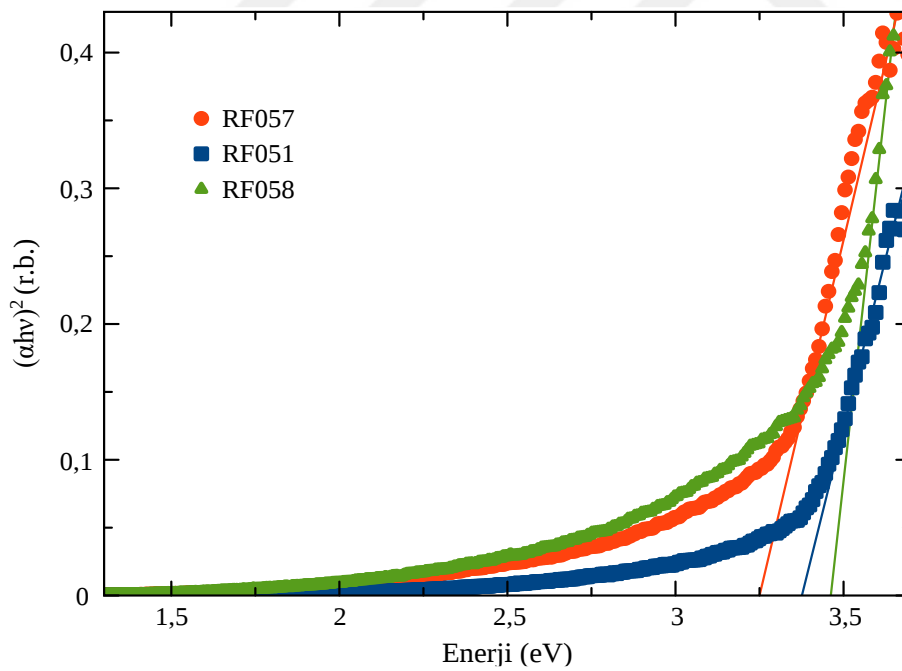
XRD ölçüm sonuçlarından (0002) pik yardımı ile hesaplanan örgü parametreleri ve Mg oranı çizelge 4.8 ile verilmiştir. Büyütme sıcaklığının artması ile birlikte MgZnO kristallerin Mg oranı % 2’de %39’a kadar artmıştır. %39 Mg oranı oldukça yüksek bir değerdir ve hala hekzagonal MgZnO fazı görmemiz yüksek Mg oranında hekzagonal MgZnO büyütme açısından oldukça değerlidir. Farklı sıcaklıklarda büyütülen MgZnO kristallerin yüzey özellikleri resim 5.16 ile verilen AFM görüntülerinde incelenmiştir. 300 °C sıcaklıkta hazırlanan RF057 numunesi küresel nanoparçacık şekline sahiptir ve RF051’e kıyasla daha büyük nanoparçacık boyutlarına sahiptir. 400 °C sıcaklıkta büyütülen RF058 numunesinin yüzeyi diğerlerinden tamamen farklıdır. Yüzeyde oldukça büyük ve daha küçük nanoparçacıkların bir araya gelmesiyle oluşmuş ve mikrometre ölçeğinde topaklanmış büyümeler olduğu görülmektedir. AFM ölçümleri sonucunda yüzey pürüzlülük değerleri çizelge 5.8 ile verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip numunenin RF051 olduğu belirlenmiştir.



Resim 5.17. a) RF057, b) RF051 ve d) RF058 kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri



Şekil 5.28. RF057, RF051 ve RF058 kodlu numunelere ait soğurma spektrumu



Şekil 5.29. RF057, RF051 ve RF058 kodlu numunelere Tauc metodu uygulanması

Resim 5.17 ile Farklı sıcaklıklarda büyütülen MgZnO kristallere ait SEM görüntüleri verilmektedir. Büyüyen MgZnO nanoparçacıklar üçgen ve küresel formda büyümeyi tercih etmiştir. 400 °C sıcaklıkta büyüyen MgZnO kristaller AFM görüntülerinden de görüldüğü

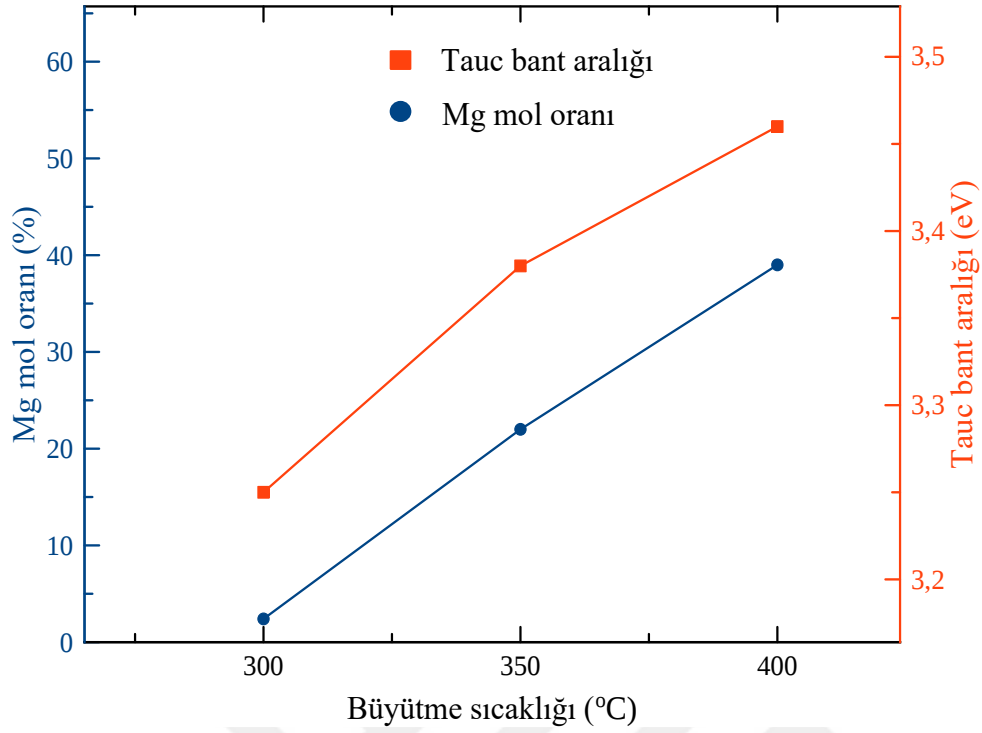
gibi oldukça büyük nanoparçacıkların oluştuğu görülmüştür. Büyüyen nanoparçacıklar Volmer-Weber büyüme modunda büyümüştür.

Farklı sıcaklıklarda büyütülen MgZnO kristallerin optik özellikleri UV-görünür bölge ölçümleri ile incelenmiştir. Şekil 5.28 ile RF057, RF051 ve RF058 kodlu MgZnO kristallere ait soğurma spektrumunun dalgaboyuna göre değişimi görülmektedir. Yapılan ölçüm sonuçlarında artan büyütme sıcaklığı ile MgZnO kristallerin soğurma kıyısı daha düşük dalgaboyuna doğru kaymıştır. Bu durum büyüyen MgZnO kristallerin Mg oranının arttığının göstergesidir. XRD sonuçlarından elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde.

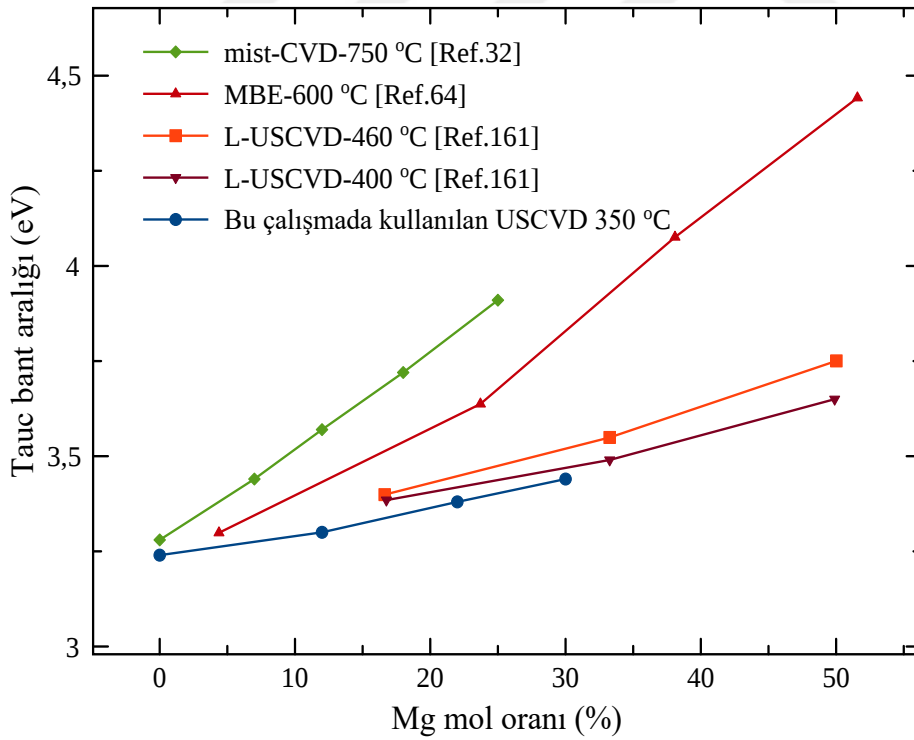
Soğurma spektrumu kullanılarak şekil 5.29 da verilen ve daha önce kullanılan eş. (5.2) ile verilen Tauc yöntemi ile MgZnO kristallerin Tauc bant aralığı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalara göre Mg oranları %2 ile %39 arasında değişen MgZnO kristalin Tauc bant aralığı değerleri 3.25 eV ile 3,46 eV aralığında değişmektedir. Öncüde sabit Mg içeriği kullanılmasına karşın büyütme sıcaklığının etkisiyle MgZnO kristallerinin Tauc bant aralığının değiştirilebildiği bu sonuçlarla belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında Mg alaşım oranının ve Tauc bant aralığının büyütme sıcaklığına bağlı değişimi şekil 5.30 ile verilmektedir. Her iki parametrenin de MgZnO büyütme sıcaklığına bağlı olarak neredeyse doğrusal olarak değiştiği görülmüştür. Ancak unutmamak gerekir ki bu doğrusal değişim hekzagonal fazda büyüyen MgZnO kristalleri için geçerlidir. Farklı fazlarda büyüyen MgZnO kristallerin optik özellikleri farklı olabilir.

Çizelge 5.8. RF057, RF051 ve RF058 kodlu MgZnO kristaller için bazı yapısal ve optiksel parametreler

Numune kodu	Hazırlanan Mg içeriği (%)	Hesaplanan Mg oranı (%)	Düzlemler arası mesafe (Å)	Örgü sabiti c (Å)	RMS (nm)	Bant aralığı (eV)
RF057	30	2	2,601	5,202	53,8	3,25
RF051	30	22	2,594	5,188	32,3	3,38
RF058	30	39	2,588	5,176	48,2	3,46



Şekil 5.30. Büyütme sıcaklığına bağlı olarak Mg oranının ve Tauc bant aralığının değişimi

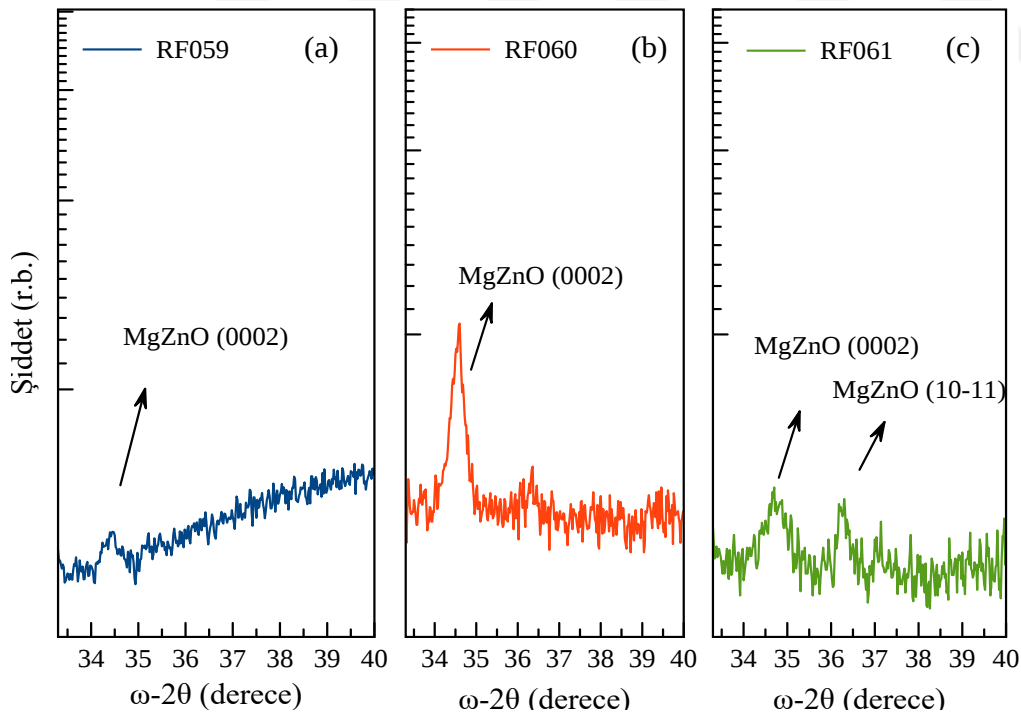


Şekil 5.31. Farklı sistemlerde ve farklı sıcaklıklarda büyütülen MgZnO kistallerin Mg oranına bağlı Tauc bant aralığının değişimi

Farklı büyüme sıcaklıkları ve farklı büyüme yöntemleri kullanılarak büyütülen MgZnO kristallere ait Mg mol oranı ve Tauc bant aralığının değişimi şekil 5.31 ile verilmektedir. Tüm büyüme sistemlerinde artan Mg oranının bağlı olarak Tauc bant aralığının arttığı görülmektedir. İlginç bir sonuç olarak, farklı büyüme sistemleri olmasına karşın yüksek sıcaklık büyütme sistemlerine çıkıldığında daha yüksek Tauc bant aralığı sonuçları elde edildiği görülmektedir.

5.5. SiO₂/Si Altaş Üzerine MgZnO Büyütmeleri

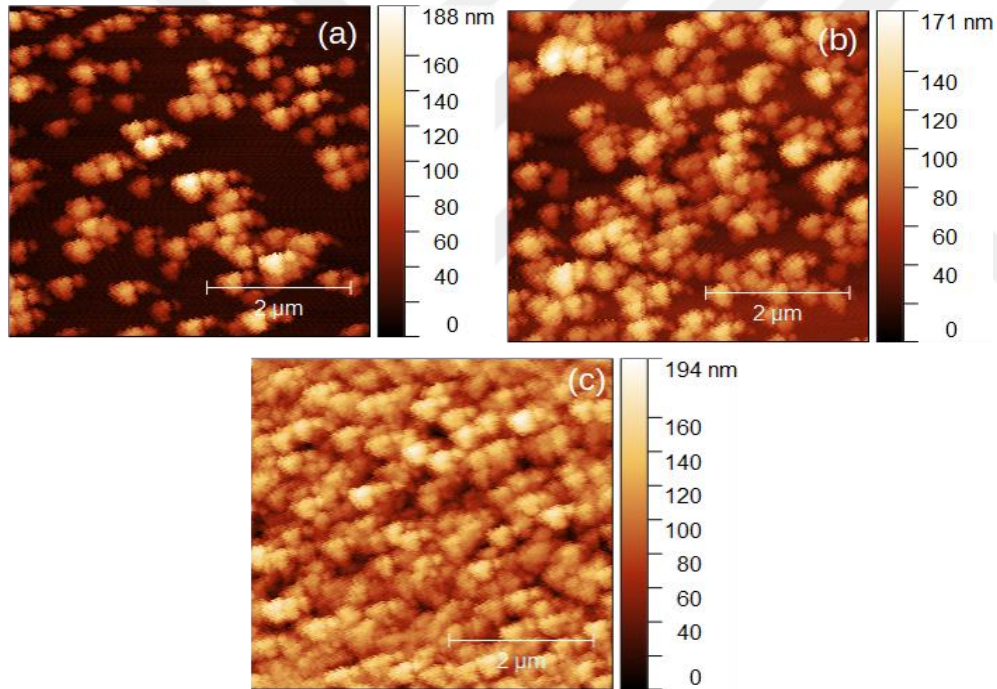
MgZnO kristallerin kübik altaş üzerine büyüme davranışlarını görebilmek amacıyla SiO₂/Si altaş üzerine sadece farklı büyüme sıcaklıkları için büyütme gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.10 ile verilen büyüme şartları kullanılmıştır. Büyütmelerde RF059, RF060 ve RF061 kodlu MgZnO numuneleri sırasıyla 300 °C, 350 °C ve 400 °C sıcaklıklarda hazırlanmıştır. Büyütülen MgZnO kristallerine ait XRD sonuçları şekil 5.32 ile verilmektedir. Büyütülen MgZnO kristaller genellikle polikristal yapıda büyümüştür.



Şekil 5.32. a) RF059, b) RF060 ve c) RF061 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları

Ancak RF060 kodlu MgZnO kristali baskın (0002) kırınım pikine sahiptir. Diğerlerinde ise bu pik şiddetleri oldukça zayıftır. Elde edilen verilere göre (0002) pikinin tepe noktası

büyütme sıcaklığı arttıkça 34,48°'den 34,70°'ye doğru kaymıştır. Bu sebeple Mg alaşım oranı tıpkı SLG üzerine büyütülen MgZnO kristallerde olduğu gibi büyütme sıcaklığına bağlı olarak artmıştır. Daha önce literatürde yapılan MgZnO büyütmelerinde benzer bir davranış görülmüştür [162]. Bu durum MgZnO büyütmelerinde Mg oranının büyüme sıcaklığı ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Eş. 4.1 ile hesaplanan Mg oranları ve XRD'den elde edilen diğer parametreler çizelge 4.10 ile verilmiştir. Büyüyen MgZnO kristallerin AFM ile yüzey özellikleri incelenmiştir. AFM görüntüleri resim 5.18 ile verilmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre artan büyütme sıcaklığı ile birlikte yüzeyde büyüyen MgZnO miktarı artmıştır. Bu numuneler için elde edilen yüzey pürüzlülüğü çizelge 4.10 ile verilmiştir. Artan büyütme sıcaklığına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün çok değişmediği görülmüştür.



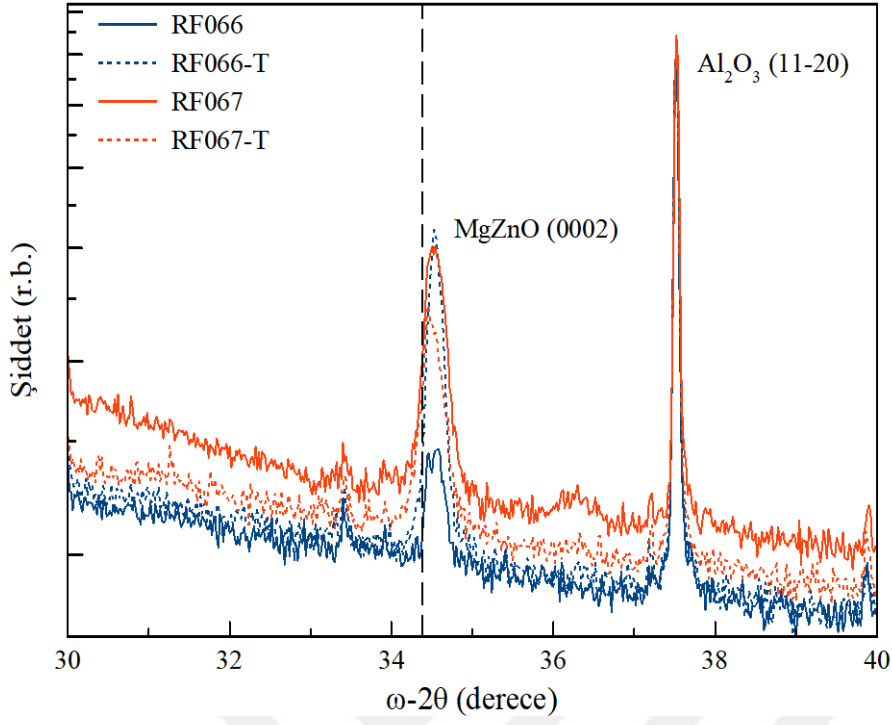
Resim 5.18. a) RF059, b) RF060 ve c) RF061 kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 µm² alanda taranmıştır)

Çizelge 5.9. RF059, RF060 ve RF061 kodlu MgZnO kristaller için bazı yapısal parametreler

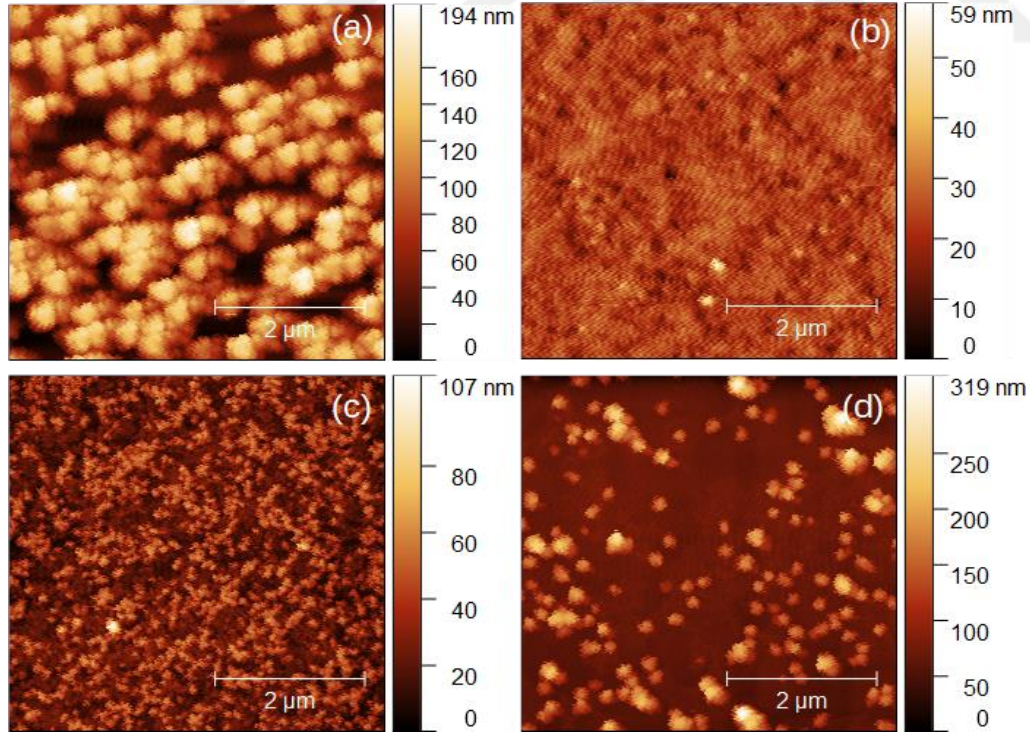
Numune kodu	Büyütme Sıcaklığı (°C)	Hazırlanan Mg oranı (%)	Hesaplanan Mg oranı (%)	RMS (nm)
RF059	300	30	7,33	32,1
RF060	350	30	22,0	28,2
RF061	400	30	34,2	30,1

5.6. C-Al₂O₃ Altaş Üzerine MgZnO Büyütmeleri

MgZnO kristallerinin SLG ve SiO₂/Si altaşlar üzerine büyütülmesi sonucu %30 Mg içeriği ihtiva eden sıvı öncü ve 350 °C sıcaklıktaki büyütmelerin hem XRD sonuçlarından hem de AFM ölçüm sonuçlarına göre en kaliteli büyüme davranışına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple c-Al₂O₃ altaşlar üzerine MgZnO büyütmeleri gerçekleştirilmiştir. Büyütmelerde daha öncekilerin haricinde ilk defa Al katkısı incelenmiştir. Bilindiği gibi Al katkısı ZnO kristallerde n-tipi yarıiletken davranışını geliştirmektedir [163]. Bu nedenle AlCl₃ ağırlıkça %1 oranında MgZnO sıvı öncüüne ilave edilmiştir. Hem Al katkılı hem de katkısız MgZnO büyütmeleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının bir sonraki aşamasında MgZnO/ZnO çoklu yapı büyümesi gerçekleştirileceğinden Al katkılı MgZnO büyüme davranışını bu aşamada incelemek oldukça önemlidir. Büyütmeler sonrasında O₂ ortamında 900 °C sıcaklıklarda tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Büyütülen MgZnO kristallere ait XRD sonuçları şekil 5.33 ile verilemektedir. Sırasıyla RF066 ve RF067 numuneleri [0001] yönelimli c-yüzlü Al₂O₃ altaşlar üzerine büyütülen katkısız MgZnO ve Al-katkılı MgZnO numunelerini göstermektedir. Büyütülen numunelere ait XRD sonuçları şekil 7.6 ile verilmiştir. Hiçbir gerilme olmadığı durumda ZnO için 2θ değeri kesikli çizgilerle gösterilmiştir. RF066 ve RF067 numunelerinin her ikisi için de tavlama sonrasında (0002) MgZnO piklerinin düşük açılara kaydığı görülmektedir. Tavlama işleminin MgZnO büyütmeleri için önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Bu numunelere ait hesaplanan Mg alaşım oranları çizelge 5.10 ile verilmiştir. Resim 5.19 a) ile verilen AFM görüntülerinde RF066 numunesinin yüzeyinde MgZnO nanoparçacıklar görülmektedir. Tavlama işleminden sonra resim 5.19 c) ile görülen yüzey görüntüsünde çok daha küçük nanoparçacıklar oluştuğu ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.33. RF066, RF066-T, RF067 ve RF067-T kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları

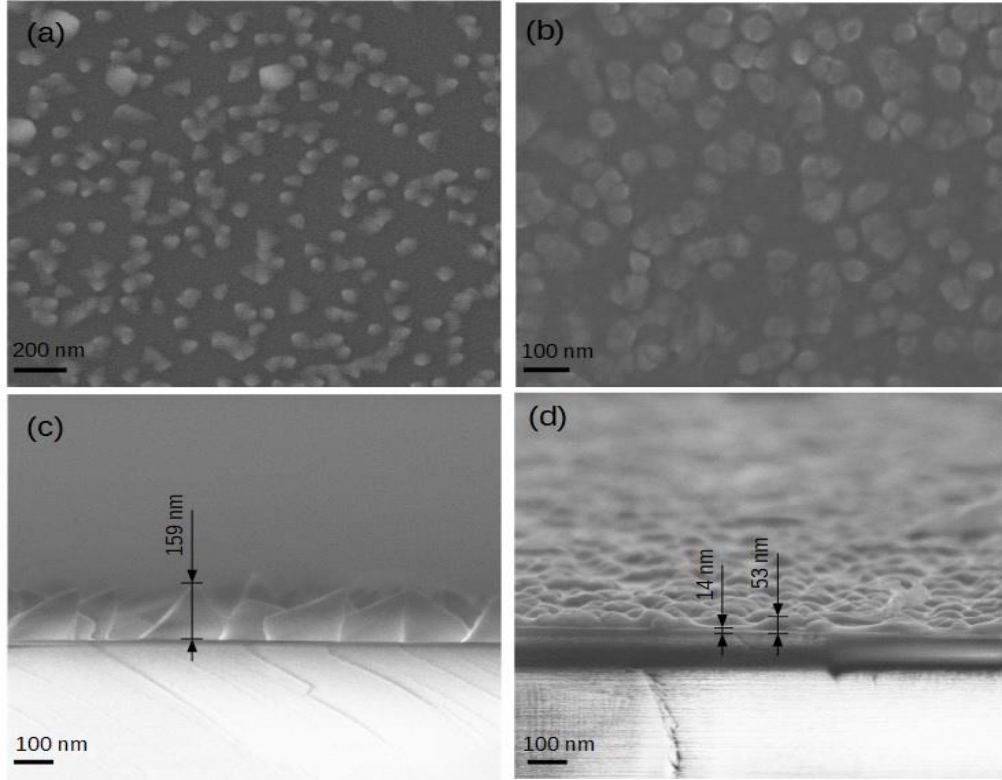


Resim 5.19. a) RF066 b) RF067, c) RF066-T ve d) RF067-T kodlu numunelere ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır)

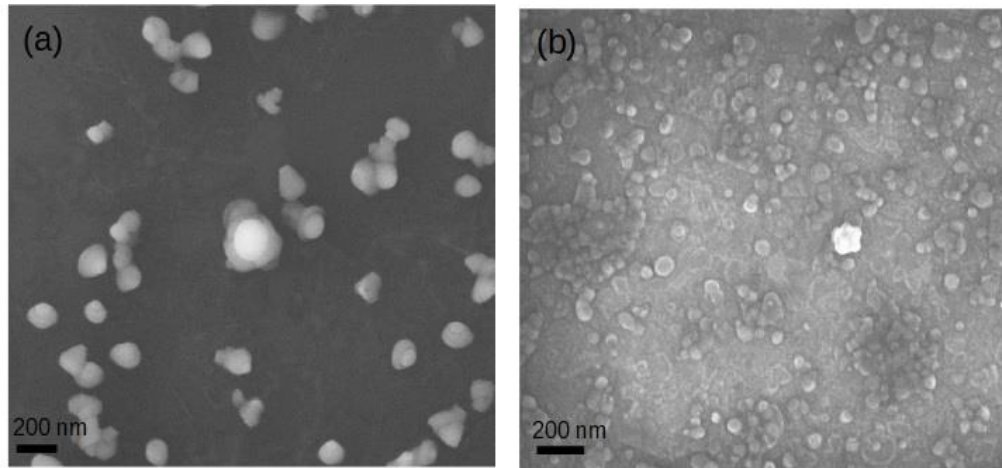
Resim 5.19 b) ile görülen RF067 numunesinin yüzeyinde çok küçük bazı nanoparçacıklar ve ince film şeklinde büyümüş bir MgZnO yapısı görülebilmektedir. Ancak tavlama işleminden sonra yüzeyde daha çok nanoparçacık şeklinde görülen MgZnO yapılarının yanı sıra yüzeyde nanoparçacıkların arasında görülen 2-boyutlu bir büyüme olduğu öngörülebilir. Bu sebeple RF067-T numunesinin Stranski-Krastanov (hem 2-B hem de 3-B) tarzı büyümenin olduğu söylenebilir.

Yüzey morfolojisini daha iyi anlayabilmek için ve AFM görüntülerinde Al-katkılı MgZnO için öngörülen 2-B büyümenin daha iyi anlaşılabilmesi için bu numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir. Resim 5.20 ile hem üstten hem de yandan tavlama öncesine ait SEM görüntüleri görülmektedir. Resim 5.20 a) ile verilen SEM görüntüsünde RF066 numunesinin yüzeyinde nanoparçacık şeklinde büyümüş yapılar görülmektedir. Yüzeyin tamamen MgZnO ile kaplanmadığı görülmektedir. Resim 5.20 b) ile verilen SEM görüntüsünde ise Al-katkılı MgZnO yapısının yüzeyde daha fazla miktarda büyüdüğü görülmektedir. Yüzeyde (0002) büyüme yönüne denk gelen büyümeler olduğu açıkça görülebilir. Resim 5.20 c) ve d) ile verilen yandan çekilmiş SEM görüntülerinde RF066 numunesinin daha çok 3-boyutlu nanoparçacıklar şeklinde büyüdüğü görülürken RF067 numunesinde hem 3-boyutlu hemde yaklaşık 14 nm kalınlığında 2-B ince film şeklinde büyüme olduğu görülmektedir. Bu tez çalışması boyunca MgZnO kristalinin ilk defa 2-B bir davranışta büyüdüğü görülmüştür. Bu ilerde büyütülecek MgZnO numuneleri açısından sürekli bir film büyütme yönünde oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca RF066 numunesinin nanoparçacık yüksekliği 159 nm olarak ölçülürken RF067 numunesinde yaklaşık 53 nm olarak ölçülmüştür.

Resim 5.21 ile tavlama işlemi sonrası RF066 ve RF067 kodlu MgZnO kristallerine ait üstten alınmış SEM görüntüleri verilmektedir. Tavlama işlemi sonucunda yüzeyde yine nanoparçacık şeklinde büyümelerin olduğu RF066-T numunesinin yüzey morfolojisinin yine 3-B olduğu görülmektedir. Yüzeydeki nanoparçacık miktarında azalma olduğu söylenebilir. RF067-T numunesinin yüzeyi ise tavlama öncesine göre bir miktar değişmiştir. Yüzeyde 3-B büyümelerin olduğu buna karşın daha fazla bölgede 2-B büyüme davranışının da kaydadeğer şekilde arttığı açıklıkla söylenebilir.



Resim 5.20. a) RF066, b) RF067 kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri c) RF066, d) RF067 numunelerine ait yandan SEM görüntüleri



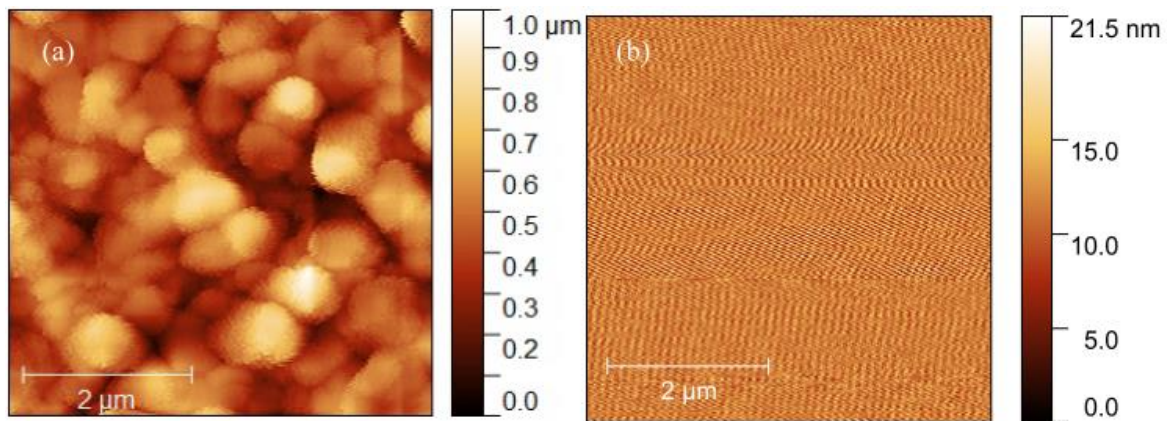
Resim 5.21. a) RF066-T ve b) RF067-T kodlu numunelere ait üstten SEM görüntüleri

Çizelge 5.10. RF066, RF066-T, RF067 ve RF067-T numunelerine ait XRD ve AFM sonuçlarından elde edilen yapısal parametreler

Numune kodu	Mg alaşım oranı (%)	Örgü parametresi c (Å)	Kristalit boyutu (nm)	RMS (nm)
RF066	19,5	5,181	36,0	36,0
RF066-T	13,5	5,188	27,6	12,4
RF067	12,6	5,190	39,8	4,55
RF067-T	5,00	5,199	31,2	38,4

5.7. MgZnO/ZnO Büyütmeleri ve Olası 2DEG Oluşumu

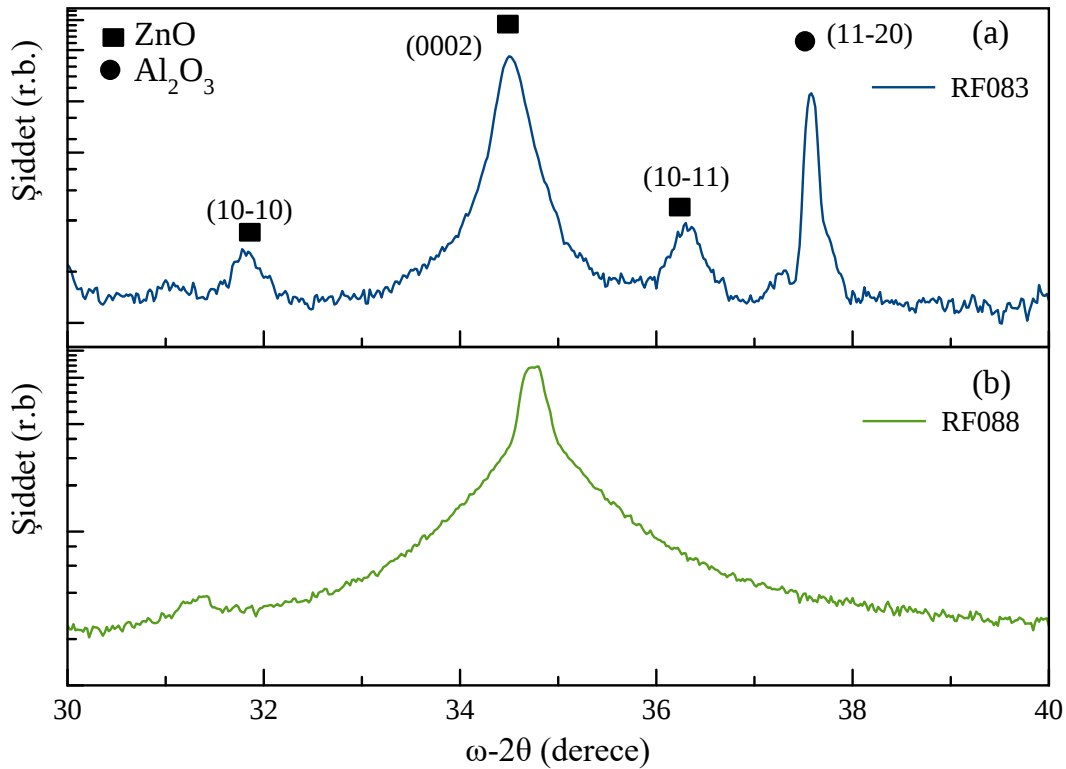
Bölüm 4’de büyüme detayları verilen MgZnO/ZnO büyütmeleri 2 farklı şekilde planlanmıştır. İlk olarak USCVD ile ZnO tampon katman c-Al₂O₃ alttaş üzerine büyütülmüş ve ardından tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Büyütme şartları çizelge 4.12 ile verilen ZnO tampon katman kalın bir katman oluşturmak istenildiği için 120 dk. süreyle büyütülmüştür. Hem RF080 ZnO tampon katman hemde Zn-yüzlü ZnO tek kristalin AFM görüntüsü resim 5.22 ile verilmektedir. RF080 kodlu ZnO numunesinin yüzeyinde oldukça büyük nanoparçacıklar olduğu görülmüştür. Bu parçacıklar nedeniyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü 136 nm olarak hesaplanmıştır. ZnO-tek kristal yüzeye ait AFM sonucunda yüzeyde yaklaşık 2 nm civarında bir RMS değeri elde edilmiştir.



Resim 5.22. a) RF080 ve b) Zn-yüzlü ZnO tek kristal alttaş a ait AFM görüntüleri (AFM görüntüleri 5x5 μm² alanda taranmıştır)

USCVD ile ZnO tampon tabaka büyütülmesi sonucunda çizelge 4.13 ile verilen deneysel parametreler kullanılarak ZnO tampon katmanlar üzerine MgZnO bariyer katmanının büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Daha öncede bahsedildiği gibi yeterince n-tipi katkı

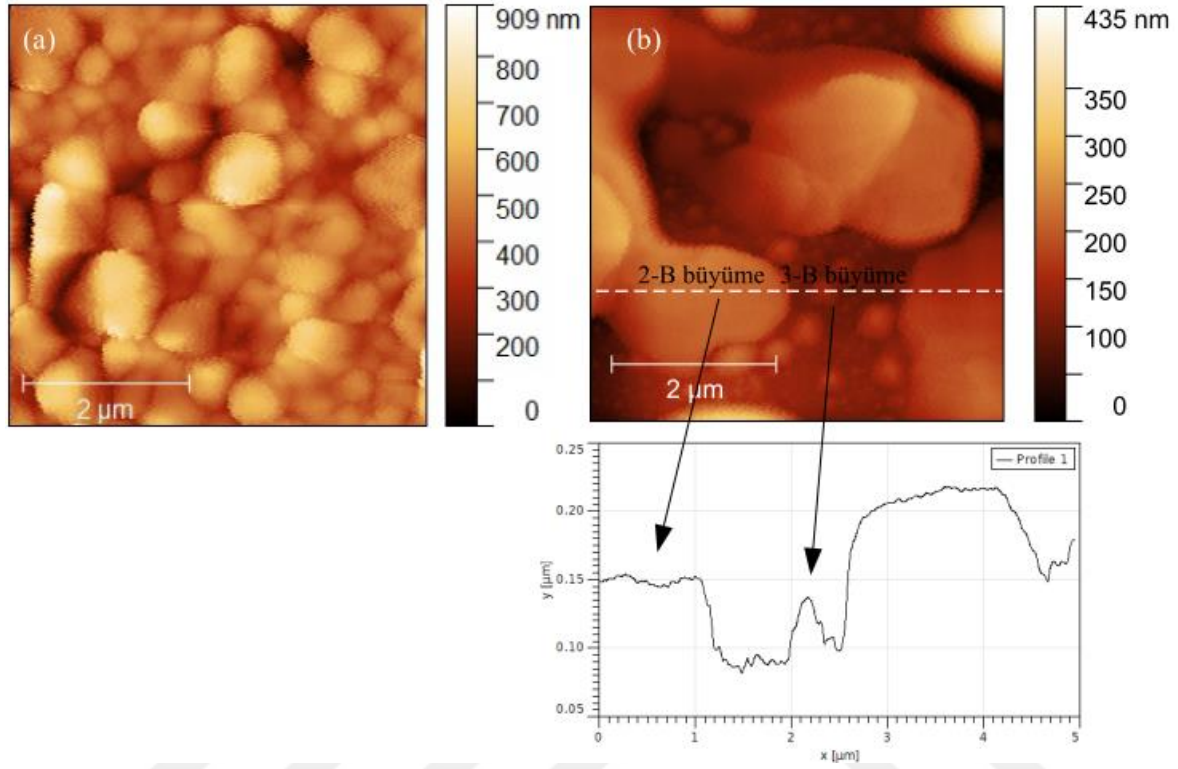
sağlayabilmek için Al-katkı kullanılmıştır. RF083 ve RF088 kodlu numuneler sırasıyla MgZnO/ZnO/c-Al₂O₃ ve Al-MgZnO/ZnO(Zn-polar) çoklu yapılara karşılık gelmektedir. Büyütülen MgZnO/ZnO yapılara ait XRD ölçüm sonuçları şekil 5.34 ile verilmektedir. RF083 numunesinde baskın (0002) kırınım pikinin yanı sıra azda olsa diğer pikler de görülmüştür. Ayrıca c-Al₂O₃'a ait kırınım piki de 37,5° civarında görülmüştür. Ancak (0002) pik şiddeti altaş pikinden daha şiddetlidir. Bu durum oldukça kalın bir ZnO kristal büyüdüğünü işaret etmektedir. MgZnO kristaline ait bir kırınım görülmemiştir. Bunun sebebi ZnO (0002) pikinin geniş ve şiddetli olduğundan MgZnO'a ait kırınım piki ZnO pikinin yanında oldukça az şiddette kalması ile ilgilidir. RF088 numunesinin XRD sonuçlarında ise tek kristal ZnO tampon tabaka kullanıldığından çok güçlü bir (0002) piki görülmüştür. Yine burada da MgZnO'a ait bir pik görülmemiştir. Bu durum yüzeyde görece daha ince MgZnO oluşundan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.34. a) RF083 ve b) RF088 kodlu numunelere ait XRD ölçüm sonuçları

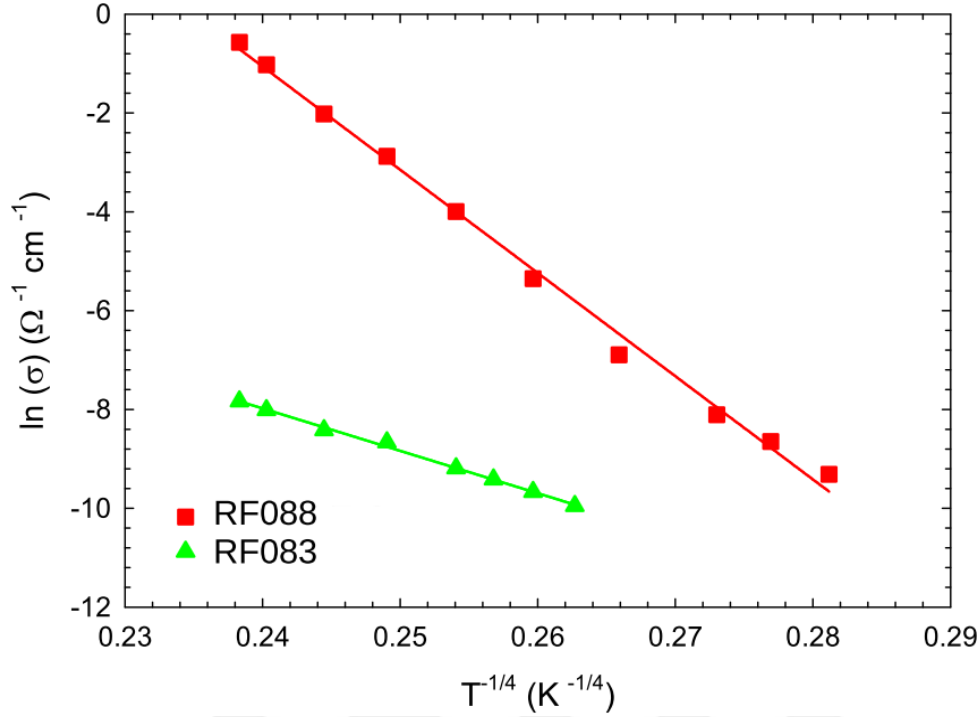
Al-MgZnO/ZnO büyütmelerine ait AFM görüntüleri resim 5.23 ile verilmektedir. AFM görüntülerine göre yüzeyde farklı büyüme davranışları görülmüştür. RF083 kodlu MgZnO/ZnO numunesinin yüzeyi MgZnO büyütme öncesi yüzey morfolojisine oldukça benzemektedir. Ancak yüzey pürüzlülüğü bir miktar azalmıştır. Bu durum yüzeydeki

MgZnO büyümesinden kaynaklanabilir. RF088 numunesinin yüzeyinde ise hem 2-B hem de 3-B büyümeler olduğu belirlenmiştir.



Resim 5.23. a) RF083 ve b) RF088 numunelerine ait AFM görüntüleri ve RF088 yüzey profili (AFM görüntüleri $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ alanda taranmıştır)

Büyütülen Al-MgZnO/ZnO çoklu yapılarına ait elektriksel ölçüm sonucunda olası 2DEG davranışının gözlenmesi beklenilmiştir. Ancak bu numunelerde yapılan ölçümlerde 2 boyutlu davranışına rastlanılmamış olup yapıların sıcaklık düştükçe öz direncinin arttığı ve 3-boyutlu davranış gösterdiği anlaşılmıştır. Sıcaklığın düşüşüyle öz direncin artışına bağlı olarak numuneler düşük sıcaklıklarda ölçüm alınamamış yaklaşık 200 K'den daha düşük sıcaklıklarda elektriksel özellikleri tamamen yalıtkan olarak kaydedilmiştir. Ölçüm alınabilen iki numune olan, Zn-polar ZnO altaş üzerine büyütülen Al- MgZnO çoklu yapısı RF088 ve USCVD ile hazırlanan ZnO tampon tabaka üzerine büyütülen MgZnO çoklu yapısı RF083 numunelerine ait elektriksel iletkenlik-sıcaklık ilişkisi şekil 5.35 ile verilmiştir.



Şekil 5.35. RF083 ve RF088 kodlu numunelere ait elektriksel ölçüm sonuçları

Yığın davranış gösteren yarıiletken malzemelerde iletim incelemeleri $\ln(\sigma)$ 'ya karşı T , $1/T$, $1/T^{-1/2}$ ve $1/T^{-1/4}$ davranışları incelenmiştir. Doğrusal bir bağlaşım bulunabilen tek durum şekil 5.35'de gösterilmiştir. Numunedeki yük taşıyıcıların hareketinin, bozulmuş kristal potansiyelinde lokalize olduğu kabul edilirse, iletim mekanizması ısı olarak aktive olmuş iletim mekanizmasından değişken aralıklarla sıçrama (VRH) iletim modeline dönüşmektedir. Bu nedenle deneysel iletkenliği açıklayabilmek için VRH iletim modeli numunelere uygulandı [164]. Bu iletim modelinde bir taraftan diğer bir tarafa sıçrama boyunca enerjiyi korumak fononlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Genel olarak VRH iletimi;

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^s \right] \quad (5)$$

formülü ile verilmektedir. Burada T_0 ve üstel s değeri Fermi seviyesine yakın tek elektron durum yoğunluğu ($N(E_F)$) değerine bağlıdır [55]. Sabit bir $N(E_F)$, elektriksel iletkenlik değerlerinde en iyi fit değeri $s=1/4$ (Mott, VRH) olarak belirlenmiştir ve şekil 5.35 ile görülmektedir. Bu durum T sıcaklığına bağlı bir σ elektriksel iletkenliğini meydana getirmektedir [165].

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (6)$$

Sıçrama teorisi, $\sigma = \sigma_0 T^{-1/2}$ ile de ifade edilmektedir. Ancak burada σ_0 'ın, sıcaklıktan bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Şekil 5.35 ile verilen grafikte görüldüğü gibi deneysel veriler ile yapılan fit'in oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Eşitlik 2 ile elde edilen fit sonucunda tüm sıcaklık boyunca VRH iletiminin baskın iletim mekanizması olduğu görülmektedir. Taşıyıcıların VRH iletimi, büyüten çoklu yapılarda iletimin grainler arası iletim ile sağlandığını göstermektedir [166].



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

USCVD yöntemi son yıllarda sıvı öncü kaynağı ile geliştirilmiş atmosferik basınç altında çalışabilen bir CVD yöntemi olarak oldukça ilgi çekmektedir. Öyle ki ZnO ve Ga₂O₃ gibi önemli oksit temelli yarıiletken kristaller kolay bir şekilde bu yöntem ile büyütülebilmektedir. USCVD yönteminin ticari boyutuda bulunmaktadır ve Kyoto üniversitesinde bir araştırmacı grubunun kurduğu FLOSFIA adlı şirket ilk defa ticari kullanıma sahip bir diyot geliştirmiştir. Tez çalışması kapsamında oldukça değerli bir CVD yöntemi olan USCVD yöntemi ile hem ZnO ve MgZnO kristaller büyütülmüş hem de MgZnO/ZnO çoklu yapısı büyütülmüştür. Hem amorf alttaş SLG hem kübik alttaş SiO₂/Si hemde hekzagonal alttaş c-Al₂O₃ üzerine büyütmeler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede 3 farklı kristal yapıya sahip alttaş üzerine ZnO ve MgZnO büyütmeleri gerçekleştirilmiştir.

ZnO büyütmelerinde SLG alttaşlar üzerinde farklı UT güçleri ve farklı öncü molariteleri kullanılarak ZnO büyütmeleri gerçekleştirilmiştir. UT gücü ZnO kristalinin hem kristal kalitesini hem de optiksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği gözlemlenmiştir. Bu deneysel sonunda uygun UT gücü belirlenmiştir. Sıvı öncü molaritesinin etkisinin ZnO kristallerin fiziksel özellikleri üzerine etkileri incelenmiş olup büyütülen ZnO kristallerde hem yüzey hem de optiksel özellikleri molaritenin etkisi ile farklı büyüme davranışlarına sahip olmuştur. Optiksel olarak ZnO kristallerinin Tauc bant aralığının öncü molaritesine sıkıca bağlı olduğu görülmüştür. Bunlara ek olarak ZnO kristallerin tavlama ortamlarının da oldukça önemli olduğu belirlenmiş olup O₂ ortamında tavlamanın Tauc bant aralığını iyileştirdiği, optiksel geçirgenliği artırdığı ve yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir.

SiO₂/Si alttaş üzerine büyütülen ZnO kristallerde düşük ve yüksek sıcaklık bölgelerinin incelemeleri gerçekleştirilmiş olup 350 °C gibi düşük bir sıcaklık büyütmelerinin en uygun ZnO kristal kalitesine sahip büyütmeler olduğu görülmüştür. Büyütülen ZnO kristallerin hem oldukça simetrik 2-B hekzagonal nanopul yapıda hemde 3-B nanopramit/prizma formunda nanoyapıların oluştuğu görülmüştür. SiO₂/Si üzerine büyütmelerde olası ZnSiO₄ (Willemite) oluşumuna ait parmak izine raslanılmıştır. Böyle bir yapının oluşumu literatürde görülmektedir [168]. ZnSiO₄ beyaz LED’lerde fosfor olarak kullanılmaktadır ve USCVD yöntemi ile olası ZnSiO₄ oluşumu oldukça değerlidir.

ZnO kristallerin hekzagonal alttaşlar üzerine büyütmesi sonucu (0002) yönelimine sahip oldukça kaliteli kristaller elde edilmiştir. Amorf kristaller üzerine büyütülen ZnO kristallerine ait yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 150 nm civarındayken, c-Al₂O₃ alttaş üzerine büyütülen ZnO kristaller yaklaşık 20 nm civarında yüzey pürüzlülüğü değerleri sergilemişlerdir. Hem büyütme parametrelerinin optimizasyonu hem de kullanılan alttaşın hekzagonal kristal yapıya sahip olması nedeniyle düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. ZnO büyütmelerinde genel itibariyle Volmer-Weber tarzı büyümelerin olduğu görülmüştür.

Tez çalışması boyunca incelenen MgZnO büyütmeleri, ZnO kristal büyütmelerine benzer şekilde 3 farklı alttaş üzerine büyütülmüştür. SLG üzerine gerçekleştirilen büyütmelerde hem sıvı öncü'un içerdiği Mg oranının etkisi hem de sabit Mg oranında büyütme sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde hazırlanan Mg içeriği ile MgZnO kristallerindeki Mg oranları arasında doğrusal bir değişim olduğu belirlenmiştir. Artan Mg oranına bağlı olarak Tauc bant aralığının da arttığı görülmüştür. Bu sayede kontrol edilebilir bir Tauc bant aralığı elde edilmiştir. Büyütme sıcaklığının MgZnO büyümesi üzerine etkileri incelendiğinde hazırlanan Mg içeriğinin sabit olmasına karşın artan büyütme sıcaklığı ile birlikte MgZnO kristalinde Mg mol oranının arttığı belirlenmiştir. Bu oldukça değerli bir sonuç olup Tauc bant aralığı ve optik özelliklerin kontrolünü sadece büyütme sıcaklığı ile kontrol edilebilir bir durumu meydana getirmektedir. Büyütme sıcaklığı ile birlikte Mg oranının ve Tauc bant aralığının doğrusal olarak değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen verilerin hekzagonal MgZnO kristalleri için geçerli olduğu unutulmamalıdır.

MgZnO kristalleri SiO₂/Si alttaşlar üzerine büyütme sıcaklığının etkisini inceleyebilmek için büyütülmüş olup SLG üzerine büyütülen MgZnO sonuçları ile benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Büyütme sonunda elde edilen sonuçlardan MgZnO büyütmeleri için de ZnO'ya benzer şekilde 350 °C büyütme sıcaklığının en iyi değer olduğu belirlenmiştir.

Hekzagonal c-Al₂O₃ üzerine büyütlen MgZnO kristallerinde hem tavlama hemde n-tipi katkılama incelenmiştir. Düşük sıcaklıklarda büyütülen MgZnO kristalleri yüksek sıcaklıklarda tavllanmış olup SEM ölçümleri sonucunda yüzeyde 2-B şeklinde yaklaşık 14 nm kalınlığında ince bir film oluştuğu görülmüştür. Bu ince film aslında daha önce Volmer-Weber büyümeleri olarak görülen büyütmelerin Stranski-Krastanov modunda büyüme olabileceğini göstermiştir.

MgZnO büyütmelerinin, ZnO büyütmelerinden tamamen farklı bir büyüme davranışına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

USCVD ile MgZnO/ZnO çoklu yapı büyütmeleri ve olası 2DEG incelemeleri elektriksel ölçüm sonucunda herhangi bir 2DEG iletimi davranışı görülmemiştir. Yapılan analizler sonucunda iletim modelinin yığın ZnO iletimi olduğu ve iletimin kristalit sınırları boyunca gerçekleştiği belirlenmiştir.

Bu tez çalışması boyunca birçok ölçüm ve analiz gerçekleştirilmiş olup ölçümler sonucunda USCVD yönteminin incelenebilecek birçok parametresinin bulunduğu, öncü hazırlama aşamalarında farklı parametrelerin kullanılması, farklı alttaşların üzerine büyütmelerin gerçekleştirilmesinin gerekli olduğu görülmüştür. USCVD yönteminin bu sayede daha iyi anlaşılmasına neden olacağı sonucuna varılmıştır. Sonraki çalışmalarda bahsedilen parametrelerin etkisinin araştırılması önerilmektedir. Bu sayede ZnO veya başka oksit kristallerin araştırılması ve kaliteli kristallerin büyütülmesinin önü açılmış olacaktır. Elde edilen ZnO nanopiramit veya nanopul benzeri büyümelerin gaz sensörü uygulamalarında kullanılmasının önemli olacağı önerilmektedir.



KAYNAKLAR

1. Volta, A. (1782). XVI. Del modo di render sensibilissima la più debole elettricità sia natural, sia artificiale. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (72), 237-280.
2. Liu, B., Abbas, A., and Zhou, C. (2017). Two-dimensional semiconductors: from materials preparation to electronic applications. *Advanced Electronic Materials*, 3(7), 1700045.
3. Joyce, H. J., Gao, Q., Tan, H. H., Jagadish, C., Kim, Y., Zou, J., Smith, L. M., Jackson, H. E., Yarrison-Rice, J. M., Parkinson, P., and Johntson, M. B. (2011). III–V semiconductor nanowires for optoelectronic device applications. *Progress in Quantum Electronics*, 35(2-3), 23-75.
4. Hosono, H. (2007). Recent progress in transparent oxide semiconductors: Materials and device application. *Thin Solid Films*, 515(15), 6000-6014.
5. Zhang, X., Dong, H., and Hu, W. (2018). Organic semiconductor single crystals for electronics and photonics. *Advanced Materials*, 30(44), 1801048.
6. Mak, K. F., and Shan, J. (2016). Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides. *Nature Photonics*, 10(4), 216-226.
7. Jie, J., Zhang, W., Bello, I., Lee, C. S., and Lee, S. T. (2010). One-dimensional II–VI nanostructures: synthesis, properties and optoelectronic applications. *Nano Today*, 5(4), 313-336.
8. Kawaharamura, T., Nishinaka, H., and Fujita, S. (2008). Growth of crystalline zinc oxide thin films by fine-channel-mist chemical vapor deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(6R), 4669.
9. Shindo, K., Morita, A., and Kamimura, H. (1965). Spin-orbit coupling in ionic crystals with zinblende and wurtzite structures. *Journal of the Physical Society of Japan*, 20(11), 2054-2059.
10. Zu, P., Tang, Z. K., Wong, G. K., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H., and Segawa, Y. (1997). Ultraviolet spontaneous and stimulated emissions from ZnO microcrystallite thin films at room temperature. *Solid State Communications*, 103(8), 459-463.
11. Lee, H. Y., Hsu, Y. T., and Lee, C. T. (2013). ZnO-based resonant cavity enhanced metal–semiconductor–metal ultraviolet photodetectors. *Solid-State Electronics*, 79, 223-226.
12. Basak, D., Amin, G., Mallik, B., Paul, G. K., and Sen, S. K. (2003). Photoconductive UV detectors on sol–gel-synthesized ZnO films. *Journal of Crystal Growth*, 256(1-2), 73-77.

13. Lim, J. H., Kang, C. K., Kim, K. K., Park, I. K., Hwang, D. K., and Park, S. J. (2006). UV electroluminescence emission from ZnO light-emitting diodes grown by high-temperature radiofrequency sputtering. *Advanced Materials*, 18(20), 2720-2724.
14. Hoffman, R. L., Norris, B. J., and Wager, J. F. (2003). ZnO-based transparent thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 82(5), 733-735.
15. Mia, M. N. H., Pervez, M. F., Hossain, M. K., Rahman, M. R., Uddin, M. J., Al Mashud, M. A., Glos, H. K., and Hoq, M. (2017). Influence of Mg content on tailoring optical bandgap of Mg-doped ZnO thin film prepared by sol-gel method. *Results in Physics*, 7, 2683-2691.
16. Xiong, H. M., Shchukin, D. G., Möhwald, H., Xu, Y., and Xia, Y. Y. (2009). Sonochemical synthesis of highly luminescent zinc oxide nanoparticles doped with magnesium (II). *Angewandte Chemie*, 121(15), 2765-2769.
17. Rahman, F. (2019). Zinc oxide light-emitting diodes: a review. *Optical Engineering*, 58(1), 010901.
18. Zhang, L., Xiao, W., Wu, W., and Liu, B. (2019). Research progress on flexible oxide-based thin film transistors. *Applied Sciences*, 9(4), 773.
19. Tampo, H., Shibata, H., Maejima, K., Yamada, A., Matsubara, K., Fons, P., Kashiwaya, S., Niki, S., Chiba, Y., Wakamatsu, T., and Kanie, H. (2008). Polarization-induced two-dimensional electron gases in ZnMgO/ZnO heterostructures. *Applied Physics Letters*, 93(20), 202104.
20. Chin, H. A., Cheng, I. C., Huang, C. I., Wu, Y. R., Lu, W. S., Lee, W. L., Chen, J. Z., Chiu, K. C. and Lin, T. S. (2010). Two dimensional electron gases in polycrystalline MgZnO/ZnO heterostructures grown by rf-sputtering process. *Journal of Applied Physics*, 108(5), 054503.
21. Kumar, P., Khan, M. A., Siddharth, G., Kumar, S., Singh, R., and Mukherjee, S. (2020). Electron scattering analysis in 2DEG in sputtering-grown MgZnO/ZnO heterostructure. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(12), 125108.
22. Falson, J., Kozuka, Y., Uchida, M., Smet, J. H., Arima, T. H., Tsukazaki, A., and Kawasaki, M. (2016). MgZnO/ZnO heterostructures with electron mobility exceeding $1 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8.
23. Falson, J., and Kawasaki, M. (2018). A review of the quantum Hall effects in MgZnO/ZnO heterostructures. *Reports on Progress in Physics*, 81(5), 056501.
24. Kong, Y. C., Yu, D. P., Zhang, B., Fang, W., and Feng, S. Q. (2001). Ultraviolet-emitting ZnO nanowires synthesized by a physical vapor deposition approach. *Applied Physics Letters*, 78(4), 407-409.

25. Gradwell, M. H. S., and McGill, W.J. (1996). Sulfur vulcanization of polyisoprene accelerated by benzothiazole derivatives. IV. The reaction of polyisoprene with N-cyclohexylbenzothiazole sulfenamide, sulfur, and zinc oxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 61(9), 1515-1523.
26. Johnson, M. A. L., Fujita, S., Rowland, W. H., Hughes, W. C., Cook, J. W., and Schetzina, J. F. (1996). MBE growth and properties of ZnO on sapphire and SiC substrates. *Journal of Electronic Materials*, 25(5), 855-862.
27. Sbrokeky, N. M., and Ganesan, S. (2004). "ZnO thin films by MOCVD", *III-Vs Review*, 17(7), 23-25.
28. El-Shaer, A., Mofor, A. C., Bakin, A., Kreye, M., and Waag, A. (2005). High-quality ZnO layers grown by MBE on sapphire. *Superlattices and Microstructures*, 38(4-6), 265-271.
29. Znaidi, L. (2010). Sol-gel-deposited ZnO thin films: A review. *Materials Science and Engineering: B*, 174(1-3), 18-30.
30. Ko, Y., Kim, Y., Kong, S. Y., Kunnan, S. C., and Jun, Y. (2018). Improved performance of sol-gel ZnO-based perovskite solar cells via TiCl₄ interfacial modification. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 183, 157-163.
31. Lu, J. G., Kawaharamura, T., Nishinaka, H., Kamada, Y., Ohshima, T., and Fujita, S. (2007). ZnO-based thin films synthesized by atmospheric pressure mist chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 299(1), 1-10.
32. Nishinaka, H., Kamada, Y., Kameyama, N., and Fujita, S. (2010). Growth characteristics of single-crystalline ZnMgO layers by ultrasonic spray assisted mist CVD technique. *Physica Status Solidi (b)*, 247(6), 1460-1463.
33. Shinohara, D., and Fujita, S. (2008). Heteroepitaxy of corundum-structured α -Ga₂O₃ thin films on α -Al₂O₃ substrates by ultrasonic mist chemical vapor deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(9R), 7311.
34. Medina-Valtierra, J., Ramírez-Ortiz, J., Arroyo-Rojas, V. M., and Ruiz, F. (2003). Cyclohexane oxidation over Cu₂O–CuO and CuO thin films deposited by CVD process on fiberglass. *Applied Catalysis A: General*, 238(1), 1-9.
35. Morkoç, H., and Özgür, Ü. (2008). *Zinc oxide: fundamentals, materials and device technology*. (1st Ed.). Darmstadt: John Wiley and Sons Press, 55-85.
36. Wang, L. K., Ju, Z. G., Zhang, J. Y., Zheng, J., Shen, D. Z., Yao, B., Zhao, D. X., Zhang, Z. Z., Li, B. H., and Shan, C. X. (2009). Single-crystalline cubic MgZnO films and their application in deep-ultraviolet optoelectronic devices. *Applied Physics Letters*, 95(13), 131113.
37. Chen, H., Yu, P., Zhang, Z., Teng, F., Zheng, L., Hu, K., and Fang, X. (2016). Ultrasensitive self-powered solar-blind deep-ultraviolet photodetector based on all-solid-state polyaniline/MgZnO bilayer. *Small*, 12(42), 5809-5816.

38. Masuda, Y. (2008). Mist CVD growth of ZnO-based thin films and nanostructures. *Journal of the Korean Physical Society*, 53(5), 2976-2980.
39. Jaffe, J. E., Snyder, J. A., Lin, Z., and Hess, A. C. (2000). LDA and GGA calculations for high-pressure phase transitions in ZnO and MgO. *Physical Review B*, 62(3), 1660.
40. Weaver, J. H., and Frederikse, H. P. R. (1977). *Crc handbook of chemistry and physics*. (1st ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, 12-156.
41. Feng, Z. C. (2013). *Handbook of Zinc Oxide and Related Materials. Volume One. Materials* (1st ed.). Boca Raton, FL: CRC Press, 35-65.
42. Kumar, R., Al-Dossary, O., Kumar, G., and Umar, A. (2015). Zinc oxide nanostructures for NO₂ gas-sensor applications: A review. *Nano-Micro Letters*, 7(2), 97-120.
43. Gruber, T., Kirchner, C., Kling, R., Reuss, F., and Waag, A. (2004). ZnMgO epilayers and ZnO-ZnMgO quantum wells for optoelectronic applications in the blue and UV spectral region. *Applied Physics Letters*, 84(26), 5359-5361.
44. Panda, D., and Tseng T. Y. (2013). One-dimensional ZnO nanostructures: fabrication, optoelectronic properties, and device applications. *Journal of Materials Science*, 48(20), 6849-6877.
45. Godlewski, M., Guziewicz, E., Kopalko, K., Łuka, G., Łukasiewicz, M. I., Krajewski, T., Witkowski, B. S., and Gierałtowska, S. (2011). Zinc oxide for electronic, photovoltaic and optoelectronic applications. *Low Temperature Physics*, 37(3), 235-240.
46. Ibrahim, R., Narin, P., Lisesivdin, S. B., and Ozbay, E. (2019). Investigation of electronic and optical properties of wurtzite MgZnO using GGA+U formalism. *Philosophical Magazine Letters*, 99(11), 424-433.
47. Myong, S. Y., Baik, S. J., Lee, C. H., Cho, W. Y., and Lim, K. S. (1997). Extremely transparent and conductive ZnO: Al thin films prepared by photo-assisted metalorganic chemical vapor deposition (photo-MOCVD) using AlCl₃ (6H₂O) as new doping material. *Japanese Journal of Applied physics*, 36(8B), L1078.
48. Ataev, B. M., Bagamadova, A. M., Djabrailov, A. M., Mamedov, V. V., and Rabadanov, R. A. (1995). Highly conductive and transparent Ga-doped epitaxial ZnO films on sapphire by CVD. *Thin Solid Films*, 260, 19-20.
49. Assuncao, V., Fortunato, E., Marques, A., Aguas, H., Ferreira, I., Costa, M. E. V., and Martins, R. (2003). Influence of the deposition pressure on the properties of transparent and conductive ZnO: Ga thin-film produced by rf sputtering at room temperature. *Thin Solid Films*, 427(1-2), 401-405.
50. Liu, Z. F., Shan, F. K., Li, Y. X., Shin, B. C., and Yu, Y. S. (2003). Epitaxial growth and properties of Ga-doped ZnO films grown by pulsed laser deposition. *Journal of Crystal Growth*, 259(1-2), 130-136.

51. Kuo, S. Y., Chen, W. C., Lai, F. I., Cheng, C. P., Kuo, H. C., Wang, S. C., and Hsieh, W. F. (2006). Effects of doping concentration and annealing temperature on properties of highly-oriented Al-doped ZnO films. *Journal of Crystal Growth*, 287(1), 78-84.
52. Ko, H. J., (2000). Ga-doped ZnO films grown on GaN templates by plasma-assisted molecular-beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 77(23), 3761-3763.
53. Minami, T., Nanto, H., and Takata, S. (1984). Highly conductive and transparent aluminum doped zinc oxide thin films prepared by RF magnetron sputtering. *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(5A), L280.
54. Jeon, H. J., Lee, S. G., Kim, H., and Park, J. S. (2014). Enhanced mobility of Li-doped ZnO thin film transistors fabricated by mist chemical vapor deposition. *Applied Surface Science*, 301, 358-362.
55. Özgür, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M., Doğan, S., Avrutin, S. Cho, S. J., and Morkoç, A. H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 11.
56. Look, D. C., Farlow, G. C., Drevinsky, P. J., Bliss, D. F., and Sizelove, J. R. (2003). On the nitrogen vacancy in GaN. *Applied Physics Letters*, 83(17), 3525-3527.
57. Reynolds, D. C., Look, D. C., and Jogai, B. (1996). Optically pumped ultraviolet lasing from ZnO. *Solid State Communications*, 99(12), 873-875.
58. Bagnall, D. M., Chen, Y. F., Zhu, Z., Yao, T., Koyama, S., Shen, M. Y., and Goto, T. (1997). Optically pumped lasing of ZnO at room temperature. *Applied Physics Letters*, 70(17), 2230-2232.
59. Yan, Q., Rinke, P., Winkelnkemper, M., Qteish, A., Bimberg, D., Scheffler, M., and Van de Walle, C. G. (2010). Band parameters and strain effects in ZnO and group-III nitrides. *Semiconductor science and technology*, 26(1), 014037.
60. Sernelius, B. E., Berggren, K. F., Jin, Z. C., Hamberg, I., and Granqvist, C. G. (1988). Band-gap tailoring of ZnO by means of heavy Al doping. *Physical Review B*, 37(17), 10244.
61. Bindu, P., and Thomas, S., (2017). Optical properties of ZnO nanoparticles synthesised from a polysaccharide and ZnCl₂. *Acta Physica Polonica A*, 131(6), 1474-1478.
62. Alvi, N. H., Ul Hasan, K., Nur, O., and Willander, M. (2011). The origin of the red emission in n-ZnO nanotubes/p-GaN white light emitting diodes. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 1-7.
63. Margueron, S., Pokorny, J., Skiadopoulou, S., Kamba, S., Liang, X., and Clarke, D. R. (2016). Optical and vibrational properties of (ZnO) *k*-In₂O₃ natural superlattice nanostructures. *Journal of Applied Physics*, 119(19), 195103.

64. Alema, F., Hertog, B., Ledyayev, O., Volovik, D., Miller, R., Osinsky, A., Bakhshi, S., and Schoenfeld, W. V. (2016). High responsivity solar blind photodetector based on high Mg content MgZnO film grown via pulsed metal organic chemical vapor deposition. *Sensors and Actuators A: Physical*, 249, 263-268.
65. Gao, J., Zhao, G. J., Liang, X. X., and Song, T. L. (2015). First-principles study of structural properties of $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ ternary alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 574,(1), 012169-012174.
66. Nourozi, B., Aminian, A., Fili, N., Zangeneh, Y., Boochani, A., and Darabi, P. (2019). The electronic and optical properties of MgO mono-layer: Based on GGA-mBJ. *Results in Physics*, 12, 2038-2043.
67. Yang, W., Hullavarad, S. S., Nagaraj, B., Takeuchi, I., Sharma, R. P., Venkatesan, T., Vispute, R. D., and Shen, H. (2003). Compositionally-tuned epitaxial cubic $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ on Si (100) for deep ultraviolet photodetectors. *Applied Physics Letters*, 82 (20), 3424-3426.
68. Teng, C. W., Muth, J. F., Özgür, Ü., Bergmann, M. J., Everitt, H. O., Sharma, A. K., Jin, C., and Narayan, J. (2000). Refractive indices and absorption coefficients of $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ alloys. *Applied Physics Letters*, 76(8), 979-981.
69. Owen, J. I., Zhang, W., Köhl, D., and Hüpkes, J. (2012). Study on the in-line sputtering growth and structural properties of polycrystalline ZnO: Al on ZnO and glass. *Journal of Crystal Growth*, 344(1), 12-18.
70. Jung, Y. S., Kononenko, O., Kim, J. S., and Choi, W. K. (2005). Two-dimensional growth of ZnO epitaxial films on c-Al₂O₃ (0 0 0 1) substrates with optimized growth temperature and low-temperature buffer layer by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 274(3-4), 418-424.
71. Aydoğan, Ş., Grilli, M. L., Yilmaz, M., Çaldiran, Z., and Kaçuş, H. (2017). A facile growth of spray based ZnO films and device performance investigation for Schottky diodes: determination of interface state density distribution. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 55-66.
72. Yim, K. G., Cho, M. Y., Jeon, S. M., Kim, M. S., and Leem, J. Y. (2011). ZnO thin films grown on Si (100) substrates with growth interrupted buffer layers by using plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of the Korean Physical Society*, 58(3), 520-524.
73. Nishimoto, Y., Nakahara, K., Takamizu, D., Sasaki, A., Tamura, K., Akasaka, S., Yuji, H., Fuj, T., Tanabe, T., Takasu, H., Tsukazaki, A., Ohtomo, A., Onuma, T., Chichibu, S. F., and Kawasaki, M. (2008). Plasma-assisted molecular beam epitaxy of high optical quality MgZnO films on Zn-polar ZnO substrates. *Applied Physics Express*, 1(9), 091202.

74. Lee, J. Y., Choi, Y. S., Kim, J. H., Park, M. O., and Im, S. (2002). Optimizing n-ZnO/p-Si heterojunctions for photodiode applications. *Thin Solid Films*, 403, 553-557.
75. Sarikavak-Lisesivdin, B. (2013). Numerical optimization of two-dimensional electron gas in $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ heterostructures ($0.10 < x < 0.30$). *Philosophical Magazine*, 93(9), 1124-1131.
76. Tsukazaki, A., Akasaka, S., Nakahara, K., Ohno, Y., Ohno, H., Maryenko, D. ..., and Kawasaki, M. (2010). Observation of the fractional quantum Hall effect in an oxide. *Nature Materials*, 9(11), 889-893.
77. Nakano, M., Tsukazaki, A., Ohtomo, A., Ueno, K., Akasaka, S., Yuji, H. ..., and Kawasaki, M. (2010). Electronic-Field Control of Two-Dimensional Electrons in Polymer-Gated-Oxide Semiconductor Heterostructures. *Advanced Materials*, 22(8), 876-879.
78. Ye, J. D., Pannirselvam, S., Lim, S. T., Bi, J. F., Sun, X. W., Lo, G. Q., and Teo, K. L. (2010). Two-dimensional electron gas in Zn-polar ZnMgO/ZnO heterostructure grown by metal-organic vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters*, 97(11), 111908.
79. Proessdorf, A., Hanke, M., Jenichen, B., Braun, W., and Riechert, H. (2013). Volmer-Weber growth of AlSb on Si (111). *Applied Physics Letters*, 102(4), 041601.
80. Díaz-Fernández, D., Méndez, J., Bomati-Miguel, O., Yubero, F., Mossaneck, R. J. O., Abbate, M., Dominguez-Canizarez, G., Gutierrez, A., Tougaard, S., and Soriano, L. (2014). The growth of cobalt oxides on HOPG and SiO_2 surfaces: A comparative study. *Surface Science*, 624, 145-153.
81. Hang, Z. Y., and Thompson, C. V., (2014). Grain growth and complex stress evolution during Volmer–Weber growth of polycrystalline thin films. *Acta Materialia*, 67, 189-198.
82. Koch, R., Hu, D., and Das, A. K. (2005). Compressive stress in polycrystalline Volmer-Weber films. *Physical Review Letters*, 94(14), 146101.
83. Seel, S. C., Thompson, C. V., Hearne, S. J., and Floro, J. A. (2000). Tensile stress evolution during deposition of Volmer–Weber thin films. *Journal of Applied Physics*, 88(12), 7079-7088.
84. Jimenez-Cadena, G., Comini, E., Ferroni, M., Vomiero, A., and Sberveglieri, G. (2010). Synthesis of different ZnO nanostructures by modified PVD process and potential use for dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry and Physics*, 124(1), 694-698.
85. Hamelmann, F. U. (2016). Thin film zinc oxide deposited by CVD and PVD. *Journal of Physics: Conference Series* 764(1), 012001.
86. Shan, F. K., Shin, B. C., Jang, S. W., and Yu, Y. S. (2004). Substrate effects of ZnO thin films prepared by PLD technique. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(6), 1015-1018.

87. Fan, X. M., (2005). Microstructure and photoluminescence properties of ZnO thin films grown by PLD on Si (111) substrates. *Applied Surface Science*, 239(2), 176-181.
88. Johnson, M. A. L., Fujita, S., Rowland, W. H., Hughes, W. C., Cook, J. W., and Schetzina, J. F. (1996). MBE growth and properties of ZnO on sapphire and SiC substrates. *Journal of Electronic Materials*, 25(5), 855-862.
89. Jeong, S. H., Kim, J. K., and Lee, B. T. (2003). Effects of growth conditions on the emission properties of ZnO films prepared on Si (100) by rf magnetron sputtering. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(16), 2017.
90. Wang, Z. A., Chu, J. B., Zhu, H. B., Sun, Z., Chen, Y. W., and Huang, S. M. (2009). Growth of ZnO: Al films by RF sputtering at room temperature for solar cell applications. *Solid-State Electronics*, 53(11), 1149-1153.
91. Ko, H., Tai, W. P., Kim, K. C., Kim, S. H., Suh, S. J., and Kim, Y. S. (2005). Growth of Al-doped ZnO thin films by pulsed DC magnetron sputtering. *Journal of Crystal Growth*, 277(1-4), 352-358.
92. Nakada, T., Ohkubo, Y., and Kunioka, A. (1991). Effect of water vapor on the growth of textured ZnO-based films for solar cells by DC-magnetron sputtering. *Japanese Journal of Applied Physics*, 30(12R), 3344.
93. Bouhssira, N., Abed, S., Tomasella, E., Cellier, J., Mosbah, A., Aida, M. S., and Jacquet, M. (2006). Influence of annealing temperature on the properties of ZnO thin films deposited by thermal evaporation. *Applied Surface Science*, 252(15), 5594-5597.
94. Chen, S. J., Liu, Y. C., Ma, J. G., Zhao, D. X., Zhi, Z. Z., Lu, Y. M., Zhang, Y. J., Shen, D. Z., and Fan, X. W. (2002). High-quality ZnO thin films prepared by two-step thermal oxidation of the metallic Zn. *Journal of Crystal Growth*, 240(3-4), 467-472.
95. Fouad, O. A., Ismail, A. A., Zaki, Z. I., and Mohamed, R. M. (2006). Zinc oxide thin films prepared by thermal evaporation deposition and its photocatalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental*, 62(1-2), 144-149.
96. Museur, L., Dine, S., Chhor, K., Manousaki, A., Anglos, D., and Kanaev, A. (2014). Modification of ZnO thin films induced by high-density electronic excitation of femtosecond KrF laser. *JOSA B*, 31(6), 1351-1354.
97. Kondow, M., Kitatani, T., Larson, M. C., Nakahara, K., Uomi, K., and Inoue, H. (1998). Gas-source MBE of GaInNAs for long-wavelength laser diodes. *Journal of Crystal Growth*, 188(1-4), 255-259.
98. Moustakas, T. D., Lei, T., and Molnar, R. J. (1993). Growth of GaN by ECR-assisted MBE. *Physica B: Condensed Matter*, 185(1-4), 36-49.
99. Iwata, K., Fons, P., Yamada, A., Matsubara, K., and Niki, S. (2000). Nitrogen-induced defects in ZnO: N grown on sapphire substrate by gas source MBE. *Journal of Crystal Growth*, 209(2-3), 526-531.

100. Johnson, M. A. L., Fujita, S., Rowland, W. H., Hughes, W. C., Cook, J. W., and Schetzina, J. F. (1996). MBE growth and properties of ZnO on sapphire and SiC substrates. *Journal of Electronic Materials*, 25(5), 855-862.
101. Bagnall, D. M., Chen, Y. F., Shen, M. Y., Zhu, Z., Goto, T., and Yao, T. (1998). Room temperature excitonic stimulated emission from zinc oxide epilayers grown by plasma-assisted MBE. *Journal of Crystal Growth*, 184, 605-609.
102. El-Shaer, A., Mofor, A. C., Bakin, A., Kreye, M., and Waag, A. (2005). High-quality ZnO layers grown by MBE on sapphire. *Superlattices and Microstructures*, 38(4-6), 265-271.
103. Wasa, K., Kanno, I., and Kotera, H. (2nd Ed.). (2012). *Handbook of sputter deposition technology: fundamentals and applications for functional thin films, nano-materials and MEMS*. Oxford, William Andrew press, 55-112.
104. Yang, W., Liu, Z., Peng, D. L., Zhang, F., Huang, H., Xie, Y., and Wu, Z. (2009). Room-temperature deposition of transparent conducting Al-doped ZnO films by RF magnetron sputtering method. *Applied Surface Science*, 255(11), 5669-5673.
105. Zhang, Z., Bao, C., Yao, W., Ma, S., Zhang, L., and 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. *Superlattices and Microstructures*, 49(6), 644-653.
106. Cho, H. J., Lee, S. U., Hong, B., Shin, Y. D., Ju, J. Y., Kim, H. D., Park, M., and Choi, W. S. (2010). The effect of annealing on Al-doped ZnO films deposited by RF magnetron sputtering method for transparent electrodes. *Thin Solid Films*, 518(11), 2941-2944.
107. Kumar, D. S., Sumanth, B., Kumar, J., and Mahesh, H. M. (2018). Quantum nanostructures (QDs): an overview. *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*, 10, 59-88.
108. Kang, Y. C., Park, S. B., and Kang, Y.W., (1995). Preparation of high surface area nanophase particles by low pressure spray pyrolysis. *Nanostructured materials*, 5(7-8), 777-791.
109. Rockett, A. (2007). *The materials science of semiconductors*. Urbana: Springer Science and Business Media, 80-127.
110. Grinham, R., and Chew, D. A. (2017). A review of outgassing and methods for its reduction. *Applied Science and Convergence Technology*, 26(5), 95-109.
111. Kawaharamura, T., and Fujita, S. (2008). An approach for single crystalline zinc oxide thin films with fine channel mist chemical vapor deposition method. *Physica Status Solidi C*, 5(9), 3138-3140.
112. Lu, J. G., Kawaharamura, T., Nishinaka, H., Kamada, Y., Ohshima, T., and Fujita, S. (2007). ZnO-based thin films synthesized by atmospheric pressure mist chemical vapor deposition. *Journal of Crystal Growth*, 299(1), 1-10.

113. Kawaharamura, T. (2014). Physics on development of open-air atmospheric pressure thin film fabrication technique using mist droplets: Control of precursor flow. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(5S1), 05FF08.
114. Tiwary, P., Mahapatra, R., and Chakraborty, A. K. (2019). ZnO nanobristles prepared by one-step thermal decomposition of zinc nitrate as ultra-high response ethanol sensor at room temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(6), 5464-5469.
115. Saidani, T., Zaabat, M., Aida, M. S., Barille, R., Rasheed, M., and Almohamed, Y. (2017). Influence of precursor source on sol-gel deposited ZnO thin films properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(13), 9252-9257.
116. Lin, C. C., and Li, Y. Y. (2009). Synthesis of ZnO nanowires by thermal decomposition of zinc acetate dihydrate. *Materials Chemistry and Physics*, 113(1), 334-337.
117. Sreekanth, M., Ghosh, S., Mehta, S. K., Ganguli, A. K., and Jha, M. (2017). Investigation of the growth mechanism of the formation of ZnO nanorods by thermal decomposition of zinc acetate and their field emission properties. *CrystEngComm*, 19(16), 2264-2270.
118. Yang, Y., Chen, H., Zhao, B., and Bao, X. (2004). Size control of ZnO nanoparticles via thermal decomposition of zinc acetate coated on organic additives. *Journal of Crystal Growth*, 263(1-4), 447-453.
119. Ghule, A. V., Lo, B., Tzing, S. H., Ghule, K., Chang, H., and Ling, Y. C. (2003). Simultaneous thermogravimetric analysis and in situ thermo-Raman spectroscopic investigation of thermal decomposition of zinc acetate dihydrate forming zinc oxide nanoparticles. *Chemical Physics Letters*, 381(3-4), 262-270.
120. Afzal, M., Butt, P. K., and Ahmad, H. (1991). Kinetics of thermal decomposition of metal acetates. *Journal of Thermal Analysis*, 37(5), 1015-1023.
121. Jiang, Y., Chen, H., Mu, X., and He, Z. (2020). Thermal decomposition of magnesium acetate in nitrogen. *Journal of Physics: Conference Series*, 1653(1) 012057.
122. Koga, N., Suzuki, Y., and Tatsuoka, T. (2012). Thermal dehydration of magnesium acetate tetrahydrate: formation and in situ crystallization of anhydrous glass. *The Journal of Physical Chemistry B*, 116(49), 14477-14486.
123. Shao, J., Ma, F., Wu, G., Dai, C., Geng, W., Song, S., and Wan, J. (2017). In-situ MgO (CaCO₃) templating coupled with KOH activation strategy for high yield preparation of various porous carbons as supercapacitor electrode materials. *Chemical Engineering Journal*, 321, 301-313.
124. Bak, S. Y., Lee, J., Kim, Y., Lee, S. H., Woo, K., Lee, S., and Yi, M. (2019). Sensitivity Improvement of Urchin-Like ZnO Nanostructures Using Two-Dimensional Electron Gas in MgZnO/ZnO. *Sensors*, 19(23), 5195.

125. Bhaumik, G. K., Nath, A. K., and Basu, S. (1998). Laser annealing of zinc oxide thin film deposited by spray-CVD. *Materials Science and Engineering: B*, 52(1), 25-31.
126. Uno, K., Yamasaki, Y., and Tanaka, I. (2016). Growth mechanisms of zinc oxide and zinc sulfide films by mist chemical vapor deposition. *Applied Physics Express*, 10(1), 015502.
127. Kuo, S. Y., Chen, W. C., Lai, F. I., Cheng, C. P., Kuo, H. C., Wang, S. C., and Hsieh, W. F. (2006). Effects of doping concentration and annealing temperature on properties of highly-oriented Al-doped ZnO films. *Journal of Crystal Growth*, 287(1), 78-84.
128. Ng, Z. N., Chan, K. Y., and Tohsophon, T. (2012). Effects of annealing temperature on ZnO and AZO films prepared by sol-gel technique. *Applied Surface Science*, 258(24), 9604-9609.
129. Marra, W. C., Eisenberger, P., and Cho, A. Y. (1979). X-ray total-external-reflection-Bragg diffraction: A structural study of the GaAs-Al interface. *Journal of Applied Physics*, 50(11), 6927-6933.
130. Pope, C. G. (1997). X-ray diffraction and the Bragg equation. *Journal of Chemical Education*, 74(1), 129.
131. Ge, L. (2011). Synthesis and photocatalytic performance of novel metal-free g-C₃N₄ photocatalysts. *Materials Letters*, 65(17-18), 2652-2654.
132. Masilamani, V., Ghaithan, H. M., Aljaafreh, M. J., Ahmed, A., Al Thagafi, R., Prasad, S., and Alsalhi, M. S. (2017). Using a spectrofluorometer for resonance raman spectra of organic molecules. *Journal of Spectroscopy*, 2017, 1-7.
133. Andrews, D. L. (2014). *Molecular photophysics and spectroscopy*. Bristol: Morgan and Claypool Publishers, 78-95.
134. Lin, Y. J., Tsai, C. L., Lu, Y. M., and Liu, C. J. (2006). Optical and electrical properties of undoped ZnO films. *Journal of Applied Physics*, 99(9), 093501.
135. Xu, C., Kim, D., Chun, J., Rho, K., Chon, B., Hong, S., and Joo, T. (2006). Temperature-controlled growth of ZnO nanowires and nanoplates in the temperature range 250–300 C. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(43), 21741-21746.
136. Zak, A. K., Razali, R., Abd Majid, W. H., and Darroudi, M. (2011). Synthesis and characterization of a narrow size distribution of zinc oxide nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, 6, 1399.
137. Dalouji, V., Solaymani, S., Dejam, L., Elahi, S. M., Rezaee, S., and Mehrparvar, D. (2018). Gap states of ZnO thin films by new methods: optical spectroscopy, optical conductivity and optical dispersion energy. *Chinese Physics Letters*, 35(2), 027701.
138. Davis, K., Yarbrough, R., Froeschle, M., White, J., and Rathnayake, H. (2019). Band gap engineered zinc oxide nanostructures via a sol-gel synthesis of solvent driven shape-controlled crystal growth. *RSC Advances*, 9(26), 14638-14648.

139. Franco Jr, A., and Pessoni, H. V. S. (2017). Effect of Gd doping on the structural, optical band-gap, dielectric and magnetic properties of ZnO nanoparticles. *Physica B: Condensed Matter*, 506, 145-151.
140. Mondal, P. (2019). Oxygen vacancy induced anomalous Raman mode in intrinsic ZnO film. *Vibrational Spectroscopy*, 103, 102939.
141. Cuscó, R., Alarcón-Lladó, E., Ibanez, J., Artús, L., Jiménez, J., Wang, B., and Callahan, M. J. (2007). Temperature dependence of Raman scattering in ZnO. *Physical Review B*, 75(16), 165202.
142. Zhang, R., Yin, P. G., Wang, N., and Guo, L. (2009). Photoluminescence and Raman scattering of ZnO nanorods. *Solid State Sciences*, 11(4), 865-869.
143. Du, C. L., Gu, Z. B., Lu, M. H., Wang, J., Zhang, S. T., Zhao, J., Cheng, G. X., Heng, H., and Chen, Y. F. (2006). Raman spectroscopy of (Mn, Co)-codoped ZnO films. *Journal of Applied Physics*, 99(12), 123515.
144. Haarindraprasad, R.F, Hashim, U., Gopinath, S. C., Kashif, M., Veeradasan, P., Balakrishnan, S. R., Foo, K. L., and Poopalan, P. (2015). Low temperature annealed zinc oxide nanostructured thin film-based transducers: characterization for sensing applications. *PLoS One*, 10(7), e0132755.
145. Decremps, F., Pellicer-Porres, J., Saitta, A. M., Chervin, J. C., and Polian, A. (2002). High-pressure Raman spectroscopy study of wurtzite ZnO. *Physical Review B*, 65(9), 092101.
146. Manjón, F. J., Mari, B., Serrano, J., and Romero, A. H. (2005). Silent Raman modes in zinc oxide and related nitrides. *Journal of Applied Physics*, 97(5), 053516.
147. Musa, I., Qamhieh, N., and Mahmoud, S. T. (2017). Synthesis and length dependent photoluminescence property of zinc oxide nanorods. *Results in Physics*, 7, 3552-3556.
148. Yahia, S. B., Znaidi, L., Kanaev, A., and Petitet, J. P. (2008). Raman study of oriented ZnO thin films deposited by sol-gel method. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(4), 1234-1238.
149. Fang, Z. B., Yan, Z. J., Tan, Y. S., Liu, X. Q., and Wang, Y. Y. (2005). Influence of post-annealing treatment on the structure properties of ZnO films. *Applied Surface Science*, 241(3-4), 303-308.
150. Van Heerden, J. L., and Swanepoel, R. (1997). XRD analysis of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 299(1-2), 72-77.
151. Mehmood, S., Rehman, M. A., Ismail, H., Mirza, B., and Bhatti, A. S. (2015). Significance of postgrowth processing of ZnO nanostructures on antibacterial activity against gram-positive and gram-negative bacteria. *International Journal of Nanomedicine*, 10, 4521.

152. Li, H., Wei, Y., Zhao, Y., Zhang, Y., Yin, F., Zhang, C., and Bakenov, Z. (2016). Simple one-pot synthesis of hexagonal ZnO nanoplates as anode material for lithium-ion batteries. *Journal of Nanomaterials*, 2016.
153. Raj, C. J., Joshi, R. K., and Varma, K. B. R. (2011). Synthesis from zinc oxalate, growth mechanism and optical properties of ZnO nano/micro structures. *Crystal Research and Technology*, 46(11), 1181-1188.
154. Mahmoud, W. E. (2010). Synthesis and optical properties of Ce-doped ZnO hexagonal nanoplatelets. *Journal of Crystal Growth*, 312(21), 3075-3079.
155. Pradhan, D., and Leung, K. T. (2008). Vertical growth of two-dimensional zinc oxide nanostructures on ITO-coated glass: effects of deposition temperature and deposition time. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(5), 1357-1364.
156. Mani, G. K., and Rayappan, J. B. B. (2014). Novel and facile synthesis of randomly interconnected ZnO nanoplatelets using spray pyrolysis and their room temperature sensing characteristics. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 198, 125-133.
157. Leidenfrost, J. G. 1756. *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus*, Duisburg: Ovenius, 10-29.
158. Zhou, X., Xie, Z. X., Jiang, Z. Y., Kuang, Q., Zhang, S. H., Xu, T. Huang, R. B., and Zheng, L. S. (2005). Formation of ZnO hexagonal micro-pyramids: a successful control of the exposed polar surfaces with the assistance of an ionic liquid. *Chemical Communications*, (44), 5572-5574.
159. Ashrafi, A. A., and Segawa, Y. (2005). Determination of Mg composition in $Mg_xZn_{1-x}O$ alloy: Validity of Vegard's law. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 23(5), 2030-2033.
160. Suja, M., Bashar, S. B., Debnath, B., Su, L., Shi, W., Lake, R., and Liu, J. (2017). Electrically driven deep ultraviolet MgZnO lasers at room temperature. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.
161. Kamada, Y., Kawaharamura, T., Nishinaka, H., and Fujita, S. (2006). Linear-source ultrasonic spray chemical vapor deposition method for fabrication of ZnMgO films and ultraviolet photodetectors. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(8L), L857.
162. Choopun, S., Vispute, R. D., Yang, W., Sharma, R. P., Venkatesan, T., and Shen, V. (2002). Realization of band gap above 5.0 eV in metastable cubic-phase $Mg_xZn_{1-x}O$ alloy films. *Applied Physics Letters*, 80(9), 1529-1531.
163. Lu, J. G., Fujita, S., Kawaharamura, T., Nishinaka, H., Kamada, Y., Ohshima, T. and Zhao, B. H. (2007). Carrier concentration dependence of band gap shift in n-type ZnO: Al films. *Journal of Applied Physics*, 101(8), 083705.

164. Davis, E. A., and Mott, N. F. (1971). Electronic processes in non-crystalline materials. (2nd Ed.) Oxford: Clarendon Press, 199-314.
165. Serin, T., Yildiz, A., Uzun, Ş., Çam, E., and Serin, N. (2011). Electrical conduction properties of In-doped ZnO thin films. *Physica Scripta*, 84(6), 065703.
166. Ali, E. E., Matori, K. A., Saion, E., Aziz, S. H. A., Zaid, M. H. M., and Alibe, I. M. (2018). Structural and optical properties of heat treated Zn₂SiO₄ composite prepared by impregnation of ZnO on SiO₂ amorphous nanoparticles. *ASM Science Journal*, 11, 75-85



SCI ile indekslenmiş makaleler

1. Sarikavak-Lisesivdin, B., Lisesivdin, S. B., Balkan, N., Atmaca, G., Narin, P., Cakmak, H., and Ozbay, E. (2015). Energy relaxation of electrons in InGaN quantum wells. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(4), 1565-1569.
2. Atmaca, G., Narin, P., Lisesivdin, S. B., Kasap, M., and Sarikavak-Lisesivdin, B. (2015). Electron Transport Properties of Two-Dimensional Electron Gas in $\text{Be}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ Heterostructures. *Philosophical Magazine*, 95(1), 79-89.
3. Atmaca, G., Ardali, S., Narin, P., Kutlu, E., Lisesivdin, S. B., Malin, T., and Tiras, E. (2016). Energy relaxation of hot electrons by LO phonon emission in AlGaIn/GaN heterostructure with in situ Si_3N_4 passivation. *Journal of Alloys and Compounds*, 659, 90-94.
4. Atmaca, G., Narin, P., Sarikavak-Lisesivdin, B., and Lisesivdin, S. B. (2016). Two-dimensional electron gas in a hybrid GaN/InGaIn/ZnO heterostructure with ultrathin InGaIn channel layer. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 79, 67-71.
5. Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., Sarikavak-Lisesivdin, B., Lisesivdin, S. B., and Ozbay, E., (2016). Effect of substitutional As impurity on electrical and optical properties of β - Si_3N_4 structure. *Materials Research Bulletin*, 83, 128-134.
6. Narin, P., Kutlu, E., Sarikavak-Lisesivdin, B., Lisesivdin, S. B., and Özbay, E. (2016). Electronic properties of Li-doped zigzag graphene nanoribbons. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 84, 543-547.
7. Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., Sarikavak-Lisesivdin, B., Lisesivdin, S. B., and Ozbay, E. (2017). Electronic structure of β - Si_3N_4 crystals with substitutional icosagen group impurities. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 19, 278-282.
8. Abbas, J. A., Atmaca, G., Narin, P., Kutlu, E., Sarikavak-Lisesivdin, B., and Lisesivdin, S. B. (2017). A Comparative Study of AlGaIn and InGaIn Back-Barriers in Ultrathin-Barrier AlN/GaN Heterostructures. *Journal of Electronic Materials*, 46(8), 5278-5286.
9. Abbas, J. A., Narin, P., Atmaca, G., Kutlu, E., Sarikavak-Lisesivdin, B., and Lisesivdin, S. B. (2017). The effect of doping in different layers on 2DEG for ultrathin-barrier AlN/GaN heterostructures. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 11, 328-331.
10. Narin, P., Kutlu, E., Atmaca, G., Lisesivdin, S. B., and Özbay, E. (2017). A First Principles Investigation of the Effect of Aluminum, Gallium and Indium Impurities on Optical Properties of β - Si_3N_4 Structure. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 147, 115-122.
11. Kutlu, E., Narin, P., Lisesivdin, S. B., and Ozbay, E. (2018). Electronic and optical properties of black phosphorus doped with Au, Sn and I atoms. *Philosophical Magazine*, 98(2), 155-164.

12. Atmaca, G., Narin, P., Kutlu, E., Malin, T. V., Mansurov, V. G., Zhuravlev, K. S., Lisesivdin, S.B., and Özbay, E. (2018). Negative Differential Resistance Observation and a New Fitting Model for Electron Drift Velocity in GaN-Based Heterostructures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65(3), 950-956.
13. Narin, P., Kutlu, E., Atmaca, G., Atilgan, A., Yildiz, A., Lisesivdin, S. B. (2018). Structural and optical properties of hexagonal ZnO nanostructures grown by ultrasonic spray CVD. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 168, 86-91.
14. Omeroglu, O., Kutlu, E., Narin, P., Lisesivdin, S. B., Ozabay, E. (2018). Electronic properties of graphene nanoribbons doped with zinc, cadmium, mercury atoms. *Physica E*, 104, 124-129.
15. All Abbas, J. M., Narin, P., Kutlu, E., Lisesivdin, S. B., Ozbay, and E. (2019). Electronic properties of zigzag ZnO nanoribbons with hydrogen and magnesium passivations. *Physica B*, 556, 12-16.
16. Narin, P., Arslan, E., Ozturk, M., Ozturk, M., Lisesivdin, S. B., and Ozbay, E. (2019). Scattering analysis of ultrathin barrier (<7 nm) GaN-based heterostructures. *Applied Physics A*, 125, 1-7
17. Narin, P., All Abbas, J. M., Atmaca, G., Kutlu, E., Lisesivdin, S. B., and Ozbay, E. (2019). Ab-initio study of electronic properties of armchair graphene nanoribbons passivated with heavy metal elements. *Solid State Communications*, 296, 8-11.
18. Ibrahim, R., Narin, P., Lisesivdin, S. B., and Ozbay, E. (2019). Investigation of electronic and optical properties wurtzite MgZnO using GGA+U formalism. *Philosophical Magazine Letters*, 99(11), 424-433.
19. Kutlu-Narin, E., Narin, P., Yildiz, A., Lisesivdin, S. B. (2020). Effects of annealing under different atmospheres on structural and optical properties of USCVD grown ZnO nanostructures. *Materials Science and Engineering B*, 254, 114506, 1-6
20. Narin, P., Kutlu-Narin, E., and Lisesivdin, S. B. (2021). Growth dynamics of mist-CVD grown ZnO nanoplatelets. *Physica B: Condensed Matter*, 614, 413028.
21. Kutlu-Narin, E., Narin, P., Yildiz, A., and Lisesivdin, S. B. (2021). Effect of magnesium content and growth temperature on structural and optical properties of USCVD-grown MgZnO films. *Applied Physics A*, 127(5), 1-9.

Uluslararası Konferanslarda Sunulan Bildiriler

1. Boyalı, E., Narin, P., Atmaca, G., Lisesivdin, S. B., Kasap, M., and Özçelik, S. (2013, September). *The Investigation of Temperature Dependent Electrical Transport Properties of $In_xGa_{1-x}P/GaAs$* , Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, İstanbul.

2. Narin, P., Atmaca, G., Sarıkavak-Lişesivdin, B., Lişesivdin, S. B., and Kasap, M. (2013, September). *A Numerical Investigation on Electronic Properties of Two Dimensional Electron Gas in $\text{Be}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ Heterostructures*, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, İstanbul.
3. Lişesivdin, S. B., Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., and Sarıkavak-Lişesivdin, B. (2014, September). *Investigation of the effect of the arsenic impurity on the electronic and optical properties of $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ dielectric material*, Turkish Physical Society 31th International Physics Congress, Muğla.
4. Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., Lişesivdin, S. B., and Kasap, M. (2014, September). *Investigation of electrical properties of two dimensional hole gas in hybrid InGaN/ZnO heterostructure*, Turkish Physical Society 31th International Physics Congress, Muğla.
5. Narin, P., Atmaca, G., and Lişesivdin, S. B. (2014, September). Effects of ultrathin InGaN channel layer on two dimensional electron gas in hybrid $\text{GaN}/\text{InGaN}/\text{ZnO}$ heterostructures, Turkish Physical Society 31th International Physics Congress, Muğla.
6. Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., Sarıkavak-Lisesivdin, B., and Lisesivdin, S. B. (2014, June). *Ab initio study of oxygen and arsenic impurities on non-linear optical properties of $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ material*, Конференция И Школа Молодых Учёных По Актуальным Проблемам Физики Полупроводниковых Структур, Novosibirsk, Russia.
7. Narin, P., Kutlu, E., Atmaca, G., Sarıkavak-Lisesivdin, B., and Lisesivdin, S. B. (2015, March). *Investigation of Optical Properties of the $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ structure doped with some Group IIIA Elements*, 1st International Conference on Organic Electronic Material Technologies, Elazığ.
8. Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., Sarıkavak-Lisesivdin, B., and Lisesivdin, S. B. (2015, March). *First Principle Calculations of Electrical Properties of Insulator Wurtzite the $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ with Aluminum, Indium, Gallium Impurities*, 1st International Conference on Organic Electronic Material Technologies, Elazığ.
9. Atmaca, G., Narin, P., Kutlu, E., and Lişesivdin, S. B. (2015, September). *The Effect of Si_3N_4 Passivation with As-Impurity on the Device Properties of $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ HEMT Structures*, IX. Uluslararası Balkan Fizik Birliği Konferansı, İstanbul.
10. Atmaca, G., Malin, T., Kutlu, E., Ardalı, S., Narin, P., Mansurov, V., Sarıkavak-Lişesivdin, B., Lişesivdin, S. B., Tiras, E., and Zhuravlev, K. (2015, February). *The Effect of In-Situ Si_3N_4 Passivation on Hot-Electron Energy Relaxation Rates in $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ Heterostructures*, Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы, Санкт-Петербурге, Moscow, Russia.

Ulusal Konferanslarda Sunulan Bildiriler

1. Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., Al Abbas, J. M., Sarıkavak-Lişesivdin, B. ve Lişesivdin, S. B. (2016, Nisan). *Li Katkılı Zigzag Kenarlı Grafen Nano Şeritlerin Elektronik Özelliklerinin İncelenmesi*, ADIM Fizik Kongresi V, Eskişehir.

2. Al Abbas, J. M., Narin, P., Atmaca, G., Kutlu, E., Lişesivdin, S. B. ve Sarıkavak-Lişesivdin. (2016, Nisan). B. *Ultraince Bariyerli AlN/GaN Çoklu Yapılarda Farklı Katmanların 2DEG Üzerine Etkisi*, ADIM Fizik Kongresi V, Eskişehir.
3. Al Abbas, J. M., Narin, P., Kutlu, E., Atmaca, G., Lişesivdin, S. B. ve Lişesivdin-Sarıkavak, B. (2016, Nisan). *P-tipi ve N-tipi InGaN Arka-Bariyerli Ultraince AlInN/GaN Çoklu Yapılarda İki Boyutlu Elektron Gazı*" ADIM Fizik Kongresi V, Eskişehir.
4. Öztürk, M. Arslan, E. Narin, P., Lişesivdin, S. B., Sarıkavak-Lişesivdin, B. ve Özbay, E. (2016, Eylül). *Ultraince Bariyerli GaN-Temelli HEMT'lerde Elektron Gazının Elektriksel Özellikleri ve Saçılma Analizleri*, 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Ankara.
5. Al Abbas, J. M., Atmaca, G., Narin, P., Kutlu, E., Sarıkavak-Lişesivdin, B. ve Lişesivdin, S. B. (2016, Eylül). *Numerical Investigation of 2DEG Properties In Ultrathin-Barrier AlN/GaN Heterostructures With AlGaIn and InGaIn Back-Barriers*, 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Ankara.
6. Narin, P., Kutlu, E., Atmaca, G., Sarıkavak-Lisesivdin, B., Lisesivdin, S. B. ve Ozbay, E. (2016, Eylül). *Ultraince Bariyere Sahip AlN/GaN ve InAlN/GaN HEMT Yapıların Yapısal ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi*, 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Ankara.
7. Kutlu, E., Narin, P., Atmaca, G., Lişesivdin, S. B. ve Özbay, E. (2016, Eylül). *Sn, I, Au gibi Bazı Safsızlıkların Siyah Fosfor'un Elektronik ve Optik Özelliklerine Etkileri*, 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Ankara.

Hobiler

Müzik, Yüzme, Kitap okuma



GAZİ GELECEKTİR..