Katkılı Galyum Nitratlı Bileşiklerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Soner Özen

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Mart 2017

The Doped Gallium Nitride Compounds Deposition and Investigation of Some Physical Properties

Soner Özen

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Physics

March 2017

Katkılı Galyum Nitratlı Bileşiklerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi

Soner Özen

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Fizik Anabilim Dalı

Genel Fizik Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şadan Korkmaz

Bu tez calışması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri

Komisyonu tarafından desteklenmistir. Proje No: 201619A218

Mart 2017

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Soner Özen'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Katkılı Galyum Nitratlı Bileşiklerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

Danışman **:** Yrd. Doç. Dr. Şadan Korkmaz

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç.Dr. Şadan Korkmaz

Üye : Doç.Dr. Ahmet Şenol Aybek

Üye : Doç.Dr. Suat Pat

Üye : Doç.Dr. Metin Kul

Üye : Yrd. Doç.Dr. Ömer Özbaş

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd. Doç. Dr. Şadan KORKMAZ danışmanlığında hazırlamış olduğum "Katkılı Galyum Nitratlı Bileşiklerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez calışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalısmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 13/03/2017

Soner Özen

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı, termiyonik vakum ark yöntemi ile iki farklı alttaş üzerine katkılı ve katkısız GaN ince filmler üretmek ve karakterizasyonlarını yaparak cihaz tasarımlarının temelini oluşturmaktır. Alttaş malzeme olarak yalıtkan ve şeffaf materyaller olan cam ve polietilen tereftalat (PET) kullanılmıştır. İnce film üretimleri her alttaş için tek katman olarak 9 ayrı deney ve toplamda 18 ayrı numune olarak gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri deney süresi hariç tüm üretimler için sabit tutulmuştur. Deney sürelerini anot potasındaki malzemenin tükenme zamanı belirlemiştir. Üretilen katkısız ve katkılı GaN ince filmlerin yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özellikleri uygun ölçüm teknikleri ile belirlenmiştir. İnce film tabakaların kalınlıkları Filmetrics F20 cihazı tarafından 30-65 nm arasında ölçülmüştür. XRD ölçümleri sonucunda üretilen ince filmlerin 15 nm ve 90 nm arasında değişen kristal boyutlarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Tauc yöntemi kullanılarak optiksel yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve doğrudan band geçişli oldukları görülmüştür. Üretilen ince filmlerin yasak enerji aralıkları en düşük InGaN için 1,64 eV ile en yüksek AlGaN için 3,88 eV arasında değişmektedir. Atomik kuvvet mikroskobu ve alan emisyonlu elektron mikroskobu aracılığıyla yüzey özellikleri incelendiğinde PET alttaşlar üzerine üretimlerin daha pürüzsüz ve simetrik yapıda oldukları tespit edilmiştir. Hall etkisi ölçüm sistemi tarafından BGaN, AlGaN ve Si katkılı GaN ince filmler p-tipi yarıiletken olarak belirlenirken diğer tüm numuneler n-tipi yarıiletken özellik göstermiştir. Aynı deneyin ürünü olan cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen ince filmler yakın denilemeyecek kadar farklı özdirenç gösterdiği durumda; özdirenci yüksek olan filmin taşıyıcı yoğunluğu ve hareketliliği azalmaktadır. Tam tersi olarak özdirencin azalış gösterdiği durumda ise taşıyıcı yoğunluğu ve hareketliliğinin artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GaN, termiyonik vakum ark, optiksel özellikler, yapısal özellikler, elektriksel özellikler, PET.

SUMMARY

The aim of this thesis, it is to produce undoped and doped GaN thin films on two different substrates by using thermionic vacuum arc method and to form the basis for device designs by making characterizations. As a substrate, the glass and the polyethylene terephthalate (PET) which insulator and transparent materials were chosen. For fabrication of thin films, the only single layer was employed for each substrate, then 9 experiments for each substrate and totally 18 separate samples carried out. All experimental parameters keep constant for all fabricated films except experiment time. The materials depletion in the anode crucible has been specified the duration of the experiment. The structural, optical, morphological and electrical properties of the doped and un – doped GaN thin films have been determined by suitable measurement techniques., The thickness values of the thin film layers were measured between 30–65 nm by using the Filmetrics F20 device. The crystallite size values of the produced thin films were defined between 15 – 90 nm through XRD measurement results. The optical band gap values of the films were estimated using Tauc method and direct band transition in the samples has been observed. In the prepared thin films, the calculated band gap values were changed between 1.64 eV to 3.88 eV which possesses to In–doped GaN and AlGaN thin films, respectively. According to atomic force microscope and field emission scanning electron microscope results, for surface properties, the low roughness and symmetric structure were detected for thin films deposited on PET substrates. In order to the Hall effect measurement system, the BGaN, AlGaN, and Si–doped GaN thin films were determined as p–type, but all other samples were specified as n–type semiconductors. In the case where the thin films deposited on the glass and PET substrates which the product of the same experiment exhibit a resistivity that is not so close to each other, the carrier density and mobility of the high resistivity thin film was decreased. But, the carrier density and mobility increased when the resistivity decreased.

Keywords: GaN, thermionic vacuum arc, optical properties, structural properties, electrical properties, PET.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca yaklaşımları ve önerileri ile beni yönlendiren saygıdeğer danışmanım Yrd. Doç.Dr. Şadan KORKMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim. Yine ESOGÜ Fizik Bölümünden Doç.Dr. Suat PAT'a ders ve tez aşaması boyunca sağladığı tüm imkânlar, bilgi ve yöntem destekleri için çok teşekkür ederim. Tez dönemimde "201619A218" no'lu BAP projesi kapsamında çalışmamı destekleyen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım. Gerek doktora eğitimime başlarken gerekse de doktora eğitimim boyunca beni maddeten ve manen yalnız bırakmayan canım aileme destekleri için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
SUMMARY vii
TEŞEKKÜR viii
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xix
1. GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
3. GENEL BİLGİLER 9
3.1. Yalıtkan, Yarıiletken, İletken 9
3.2. III-V Yarıiletkenler 11
3.3. Nitratlı Bileşikler 13
3.4. Nanoteknoloji ve Nanoyapılar 15
3.5. İnce Film Teknolojisi 17
4. İNCE FİLM ÜRETİM YÖNTEMLERİ 19
4.1. Kimyasal Buhar Depolama (CVD) Yöntemi 19
4.1.1. Atmosferik basınçlı kimyasal buhar biriktirme (APCVD) yöntemi 19
4.1.2. Alçak basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) yöntemi 20
4.1.3. Metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemi 21
4.1.4. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi 22
4.1.5. Lazer kimyasal buhar biriktirme (LCVD) yöntemi 23
4.2. Fiziksel Buhar Depolama (PVD) Yöntemi 24
4.2.1. Doğru akım (DC) saçtırma yöntemi 25
4.2.2. Radyo frekansı (RF) saçtırma yöntemi 26
4.2.3. Lazer demeti ile buharlaştırma (PLE) yöntemi 27
4.2.4. Elektron demeti ile buharlaştırma (EBPVD) yöntemi 28
4.2.5. Katodik ark buharlaştırma yöntemi 29
4.2.6. Anodik ark buharlaştırma yöntemi 30

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) YÖNTEMİ 31
5.1. TVA Vakum Odası 32
5.2. Elektrotlar Sistemi 33
5.3. Güç Kaynağı 34
5.4. Vakum Sistemleri 35
5.5. Basınç Ölçüm Sistemi 36
5.6. Akım ve Voltaj Ölçüm Sistemi 36
6. MATERYAL VE YÖNTEM 38
6.1. İnce Film Analiz Teknikleri 38
6.1.1. X-ışını kırınım (XRD) cihazı 38
6.1.2. Uv-vis spektrofotometre 39
6.1.3. Filmetrics ince film analiz cihazı 40
6.1.4. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) 41
6.1.5. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) 43
6.1.6. Hall etkisi ölçüm sistemi 45
6.2. GaN Temelli İnce Filmlerin Üretimi ve Üretim Parametreleri 47
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 51
7.1. GaN Temelli İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi 51
7.1.1. GaN ince filmlerin yapısal özellikleri 51
7.1.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin yapısal özellikleri 53
7.1.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin yapısal özellikleri 56
7.2. GaN Temelli İnce Filmlerin Optiksel Özelliklerinin Belirlenmesi 61
7.2.1. GaN ince filmlerin optiksel özellikleri 62
7.2.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin optiksel özellikleri 65
7.2.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin optiksel özellikleri ... 74
7.3. GaN Temelli İnce Filmlerin Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi 87
7.3.1. GaN ince filmlerin yüzey özellikleri 87
7.3.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin yüzey özellikleri 90
7.3.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin yüzey özellikleri 99
7.4. GaN Temelli İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi 114
7.4.1. GaN ince filmlerin elektriksel özellikleri 116

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.4.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin elektriksel özellikleri 117
7.4.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin elektriksel özellikleri 119
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 122
KAYNAKLAR DİZİNİ 127
ÖZGEÇMİŞ 145

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1 Elektron düzenli periyodik tablo 12
4.1 APCVD yöntemi 20
4.2 LPCVD yöntemi 21
4.3 MOCVD yöntemi 22
4.4 PECVD yöntemi 23
4.5 LCVD yöntemi 23
4.6 DC reaktif saçtırma yöntemi 25
4.7 RF saçtırma yöntemi 27
4.8 PLE yöntemi 28
4.9 EBPVD yöntemi 29
4.10 Katodik ark buharlaştırma yöntemi 30
4.11 Anodik ark buharlaştırma yöntemi 30
5.1 TVA üretim yöntemi simülasyonu 32
5.2 TVA vakum odası 33
5.3 TVA elektrotlarının düzenlenişi 34
5.4 TVA sistemine özel güç kaynağı 35
5.5 Vakumlama için (a) mekanik pompa ve (b) difüzyon pompası fotoğrafları 35
5.6 Basınçölçer kontrol cihazı fotoğrafı 36
5.7 Akım ve voltaj ölçerlerin fotoğrafı 37
6.1 Atomik düzlemlerden X-ışınlarının yansıması 38
6.2 Filmetrics F20 ince film analiz cihazı 40
6.3 Alan emisyonlu elektron tabancası tasarımı 42
6.4 Hall ölçümünde kullanılan Van der Pauw ölçüm tekniği 46
6.5 Cam ve PET alttaşların konulduğu numune tutucu 47
7.1 (a) Cam ve (b) PET alttaşlar üzerine üretilen GaN temelli ince filmlerin XRD tayfları 52
7.2 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin XRD tayfları 53
7.3 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin XRD tayfları 54
7.4 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin XRD tayfları 55
7.5 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin XRD tayfları 56

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

7.6 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C:GaN ince filmlerin XRD tayfları 57
7.7 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si:GaN ince filmlerin XRD tayfları 58
7.8 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge:GaN ince filmlerin XRD tayfları 59
7.9 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn:GaN ince filmlerin XRD tayfları..... 60
7.10 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb:GaN ince filmlerin XRD tayfları..... 61
7.11 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 63
7.12 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği..... 64
7.13 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 65
7.14 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 66
7.15 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği..... 67
7.16 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 68
7.17 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 69
7.18 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği..... 70
7.19 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 71
7.20 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 72
7.21 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği..... 73
7.22 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 74

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

7.23 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 75
7.24 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği 76
7.25 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 77
7.26 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 78
7.27 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği 78
7.28 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 79
7.29 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 80
7.30 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği 81
7.31 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 82
7.32 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 83
7.33 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği 83
7.34 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 84
7.35 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri 85
7.36 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği 86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

7.37 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri 87
7.38 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 88
7.39 Cam alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 89
7.40 PET alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 89
7.41 Cam alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği..... 90
7.42 PET alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 90
7.43 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 91
7.44 Cam alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 91
7.45 PET alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 92
7.46 Cam alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 93
7.47 PET alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 93
7.48 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 94
7.49 Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 94
7.50 PET alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 95
7.51 Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği..... 96
7.52 PET alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 96
7.53 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 97

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

7.54 Cam alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 97
7.55 PET alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 98
7.56 Cam alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 99
7.57 PET alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 99
7.58 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 100
7.59 Cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü..... 100
7.60 PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü..... 101
7.61 Cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 102
7.62 PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 102
7.63 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 103
7.64 Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü..... 103
7.65 PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü..... 104
7.66 Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 105
7.67 PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 105
7.68 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 106

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

7.69 Cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 106

7.70 PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 107

7.71 Cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 108

7.72 PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 108

7.73 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 109

7.74 Cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 109

7.75 PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 110

7.76 Cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 111

7.77 PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 111

7.78 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü 112

7.79 Cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 112

7.80 PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü 113

7.81 Cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 114

7.82 PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği 114

7.83 Van Der Pauw tekniği ile kontak alınan numunenin fotoğrafı 115

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

6.1 TVA tekniği ile biriktirilen ince filmlerin üretim parametreleri 49
6.2 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen katkılı ve katkısız GaN ince filmlerin kalınlıkları 50
7.1 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmlerin Hall ölçüm sonuçları 116

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Amper
A	Soğurma
Å	Angström
B	Manyetik alan
°C	Santigrat derece
d	XRD'de paralel düzlemler arasındaki mesafe
E	Elektrik alan
E_g	Yasak enerji aralığı
eV	Elektron volt
h	Planck sabiti
I	Malzemeyi geçen ışık şiddeti
I_0	Gelen ışık şiddeti
j	Akım yoğunluğu
K	Kelvin
k	Boltzman sabiti
k	Sönüm katsayısı
L	Kristal büyüklüğü
m_e	Elektronların kütlesi
m_h	Hollerin kütlesi
n	Birim hacimdeki elektronların sayısı
n_0	Elektron yoğunluğu
n_r	Kırılma indisinin gerçel kısmı
Nc	İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
Nv	Valans bandındaki durumların yoğunluğu
p_0	Hol yoğunluğu
q	Elektrik yükü
R	Yansıma
T	Geçirgenlik
t	Film kalınlığı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
V	Volt
ν	Elektrik yükünün hızı
V_H	Hall voltajı
α	Lineer soğurma katsayısı
δ	Dislokasyon yoğunluğu
ε	Dielektrik sabiti
θ	XRD'de gelen ışın ile yansıtıcı düzlem arasındaki açı
λ	Dalgaboyu
μ	Mobilite
ν	Frekans
π	Pi sayısı
ρ	Özdirenç
σ	İletkenlik
Ω	Ohm

Kısaltmalar	Açıklama
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
AC	Alternatif akım
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
Al	Alüminyum
ALD	Atomik katman kaplama
AlGaN	Alüminyum galyum nitrat
As	Arsenik
B	Bor
BGaN	Bor galyum nitrat
C	Karbon
cm	Santimetre
CVD	Kimyasal buhar biriktirme

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar	Açıklama
DC	Doğru akım
EDS	Enerji dağılımı spektrometresi
ESOGÜ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
FESEM	Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu
g	Gram
Ga	Galyum
GaAs	Galyum arsenik
GaN	Galyum nitrat
Ge	Germanyum
GOF	Goodness of fit
HEMT	Yüksek elektron mobiliteli transistör
HFET	Heterojunction alan etkili transistör
HRTEM	Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu
In	İndiyum
InGaN	İndiyum galyum nitrat
InN	İndiyum nitrat
LED	Işık yayan diyot
MBE	Moleküler ışın epitaksi
MgO	Magnezyum oksit
MHz	Megahertz
N	Azot
NaCl	Sodyum klorür
nm	Nanometre
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
RF	Radyo frekans
RMS	Ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü
P	Fosfor
PET	Polietilen tereftalat
Pb	Kurşun

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar	Açıklama
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
s	Saniye
Sb	Antimon
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
Skr	Kurtosis
Sn	Kalay
Ssk	Skewness
TFT	İnce film transistör
TVA	Termiyonik vakum ark
UV/VIS	Morötesi/Görünür
vb	ve benzeri
vd	ve diğerleri
VLS	Buhar-sıvı-katı
XRD	X- Işını kırınımı
ZnO	Çinko oksit
ZnS	Çinko sülfür
μm	Mikrometre

1. GİRİŞ VE AMAÇ

III-grubu nitratlı yarıiletken materyaller geçmişten bugüne kadar önemi korumakla beraber son yıllarda elektronik ve optoelektronik teknolojisi alanında derinlemesine araştırılan materyal gruplarından en önemlisi olarak sayılabilir. III-grubu nitratlı yarıiletken materyallerden olan GaN ve onun katkılı bileşikleri birçok sivil ve askeri uygulamalar için cihaz tasarımlarında ön plana çıkmıştır. Al ve In materyalleri ile oluşturulan galyum nitrat (GaN) temelli heteroyapılar yüksek elektron mobiliteli transistör (HEMT) yapıların yüksek frekanslı ve yüksek güçlü mikrodalga uygulamalar için iyi ısıl iletkenliğe, geniş bant aralığına, piezoelektrik polarizasyon alanına sahip olması, HEMT yapıların ticari ve askeri uygulamalarda kullanılmasına olanak tanımaktadır (Tut, 2008). Günümüz teknolojisinde oluşan rekabet ile yeni üretim yöntemleri kullanılmaya ve mevcut üretim yöntemlerinde geliştirme çalışmaları yürütülmüştür. Bu alandaki her yenilik ile ürün kalitesi, zaman ve üretim kolaylığı gibi birçok faktör göz önüne alınarak uygun üretim yöntemleri oluşturma çabaları gösterilmektedir.

GaN ince filmler wurtzite, zincblende (çinko oksit) ve rocksalt (NaCl) yapıda kristalleşebilmektedir. Galyum nitrat yarıiletken bileşiklerinin dış ortam koşullarında termodinamiksel kararlı yapıları wurtzite yapısıdır (Lawaetz, 1972; Goyal, 1976; Dean, 1977). GaN ve GaN bileşiklerinin ince filmleri Si, SiC, ve GaAs gibi kübik yapılı (001) yönelimli alttaşların kristal düzlemleri üzerine epitaksiyel ince filmler olarak büyütülmesi durumunda kararlı zincblende yapısında kristalleştikleri bilinmektedir (Liu ve Edgar, 2002). NaCl yapıda kristallenme gösterebilmesi için oldukça yüksek dış basınç gerekmektedir (Halsall vd., 2004; Mbaye vd., 1986; Xie vd., 1996). GaN ince filmler katkılama olmaksızın büyütüldüğünde düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahip n-tipi katkılanmış gibi davrandığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak azotun aşırı asal doğası (kimyasal tepkimeye zor giren) ve GaN üzerinde oluşan yüksek buhar basıncı sebebiyle, büyütülen GaN ince filmlerin azot eksikliğinden ya da oksijen kirlenmesinden oluştuğuna, örgü kusurlarından kaynaklandığına işaret edilmektedir (Van Hove vd., 1995; Namkoong vd., 2002; Georgakilas vd., 2003; Jung vd., 2005).

GaN kristalinin büyütülmesi aşamasında bir takım sorunlarla karşı karşıya kalmak kaçınılmaz gibidir. GaN'ın kimyasal özelliğinden ötürü galyum ve azot atomları arasındaki yüksek bağlanma enerji değeri, çok yüksek erime noktası sıcaklığına sahip olmasına yol açmaktadır. Azot molekülünün aşırı asal doğaya sahip olması 1200℃ sıcaklıkta 1000 atm gibi bir yüksek azot buhar basıncının ortaya çıkarmasına sebep olmaktadır. Materyal büyütme sıcaklığı genellikle erime sıcaklığının yarısı ile üçte ikisi arasında yer alan mertebede yer alır (Perlin vd., 1995; Tanaka vd., 1996; Yang vd., 2013; Wen vd., 2010). Bu sıcaklıklarda büyütme yüzeyi üzerinde tepkimeye giren materyaller (Ga ve N) yüzey difüzyonu ve bölünme için yeterli termal enerjiye sahip olurlar ve tabakaların yüzey üzerine biriktirilmesi işlemi gerçekleşmiş olur. GaN tabakaların büyütülmesi için gerekli olan bu büyütme sıcaklıkları (> 1000℃) diğer yarıiletken bileşiklerden kat kat büyüktür ve yüksek azot buharı basıncı GaN sentezini daha zor hale getirmektedir (Karpiński vd., 1984; Cao vd., 1998; Amano vd., 1986; Özen vd., 2016d). Bu kadar yüksek sıcaklıklarda GaN tabakaların büyütülmesi alttaş seçimini de sınırlı hale getirmektedir. Düşük erime sıcaklığına sahip materyaller üzerine GaN büyütme için yeni üretim methodları geliştirilmiştir ve bunlardan biriside düşük erime sıcaklığına sahip materyaller üzerine GaN tabakaların büyütülmesine olanak tanıyan termiyonik vakum ark methodudur (Pat vd., 2015a; Özen vd., 2016b; Özen vd., 2016c; Pat vd., 2016b).

Bu tez çalışması ile laboratuarımızda nano yapılı, yüksek biriktirme hızlı ve düşük sıcaklıkta ince film üretimine olanak sağlayan termiyonik vakum ark (TVA) yöntemi kullanılarak ilk defa tarafımızdan GaN ve farklı element katkılı GaN ince filmler üretilmiştir. Ergime sıcaklıkları birbirinden oldukça farklı olan 3A grubundan bor, alüminyum ve indiyum, 4A grubundan karbon, silisyum, germanyum, kalay ve kurşun katkı elementleri yaklaşık sabit oranlarda GaN'a katkılanarak cam ve polietilen teraftalat (PET) alttaşlar üzerine ince filmler tek katman olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan ince filmlerin; yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi ile ışık saçan diyotlar (LED) için uygunluğu araştırılmıştır. Ayrıca, diğer üretim yöntemleri ile yapısının ve esnekliğinin bozulma durumu olan PET alttaş üzerine GaN büyütmeyle esnek LED üretimlerine temel oluşturması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Akasaki ve arkadaşları Mg katkılı p-tipi GaN'ın fotolüminesansı ve p-n eklemli GaN ışık yayan diyot (LED)'un elektrolüminesansı çalışmaları ile renkli LED görüntüleme sistemleri ve etkin enerji tasarrufu alanında ilk adımları atmışlardır. LED tasarımında safir alttaş üzerine tabaka üretimlerini metal organik buhar faz epitaksi üretim yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri p-n eklemli LED cihazı ile ilk kez oda sıcaklığında ultraviole ve mor-mavi ışık yayan GaN temelli tasarım olduğunu belirtmişlerdir (Akasaki vd., 1991).

1993 yılında Nakamura ve arkadaşları GaN temelli çift heteroyapılı mavi ışık yayan diyot çalışmaları ile yine renkli LED görüntüleme sistemleri ve enerji tasarrufu alanında önemli bir adım atmışlardır. Bu çalışmalarında safir alttaş üzerine sırasıyla GaN tabaka, n-tipi GaN tabaka (negatif elektrot), n-tipi InGaN tabaka, p-tipi GaN tabaka (pozitif elektrot) üretimini metal organik kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. n-tipi katkılama için silisyum elementi seçilirken, p-tipi katkılama için Mg elementi kullanılmıştır. 20mA lik akım değerinde 125 μW lık çıkış gücü olan 440 nm dalgaboyunda mavi ışık saçan LED üretimi gerçekleştirdiklerini belirtmişlerdir (Nakamura vd., 1993).

Hong ve arkadaşları 2013 yılında bir kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi olan buhar-sıvı-katı (VLS) yöntemi ile dikey tipte c yönelimli GaN alttaş üzerine iki farklı tipte GaN nanotel LED üretimi gerçekleştirmişlerdir. Tasarımlar p-tipi GaN üzerine n-tipi nanotel GaN LED yapı (tip-1) ve n-tipi GaN üzerine arası bir yalıtkan ile ayrılmış p-n GaN nanotel eklemli yapı (tip-2) şeklinde belirlenmiştir. HRTEM analizi sonucunda üçgen nanoteller ya $(1\bar{1}00)$ ya da $(11\bar{2}0)$ tercihli yönelim göstermiştir. Elektroluminesans sonuçlarına göre tip-1 LED tasarımı beyazımsı eflatun emisyonu, tip-2 LED tasarımı mavi emisyonu vermiştir. Alttaşlar üzerinde yer alan GaN nanoadalardan dolayı oluşan parazit direnç ve sızıntı akımı baskılanarak iyileştirilmiştir (Hong vd., 2013).

Fong ve arkadaşları wurtzite yapılı GaN ince filmin sentezini spin kaplama yöntemi ile gerçekleştirmeyi başarmışlardır. (002) ve (004) yönelimli hekzagonal wurtzite GaN yapılar silisyum alttaş üzerine büyütülmüştür. FESEM görüntüleri üzerinden GaN katmanın

kalınlığı 256 nm olarak belirtilmiştir. Atomik kuvvet mikroskobu ile yüzey pürüzlülüğü araştırılmış ve 39 nm yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir (Fong vd., 2014).

2014 yılında GaN temelli düşük sıcaklıklı ince film transistör (TFT) üretimi Bolat ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. GaN ince filmler plazma destekli atomik katman kaplama (ALD) yöntemi ile üretilmiştir. Polikristal GaN ince filmin ortalama kristal boyutları yaklaşık 9 nm olarak belirlenmiştir. XPS analizleri 60 saniyelik argon iyon aşındırma işlemi sonrası %42.2 galyum, %54.6 azot, %1.7 oksijen ve %1.5 argon elementlerin kompozisyonundan oluştuğunu vermiştir. Üretilen transistörün kanalında efektif yük mobilitesi 0.025 $cm^2/V.s$ olarak hesaplanmıştır. Transistörün eşik voltajının daha yüksek değerlere kaydığı saptanmıştır. Bu çalışmaları ile kararlı esnek/saydam TFT cihazlar için düşük sıcaklıklı ALD büyütmeli GaN tabakaların kullanımlarının mümkün olduğunu göstermişlerdir (Bolat vd., 2014).

Hong Kong Bilim ve Teknoloji Üniversitesinden Chen ve arkadaşları, ZnO temelli TFT'lere bir alternatif olarak ağır katkılı kaynak/drenaj bölgeli n-tipi geçitli TFT için GaN ince film kullanmışlardır. İnce filmler galyum hedef kullanılarak DC magnetron saçtırma yöntemi ile depolanmıştır. XRD sonuçlarına göre c yönelimli polikristal wurtzite yapısı tespit edilmiştir. Üretilen ince filmin ortalama tanecik boyutları 10 nm ve atomik kuvvet mikroskobu aracılığıyla da yüzey pürüzlülüğü 1.4 nm olarak belirlenmiştir. TFT 0.2 sızıntı voltajında 1 $cm^2/V.s$ mobilite değeri vermiştir. Tek kristal GaN ince filmlerin 3.4 eV yasak enerji aralığına, polikristal GaN ince filmlerin 3.2-3.4 eV arasında değişen değerlere sahip olduklarını, ürettikleri filmin 3.3 eV yasak enerji aralığına sahip olduğunu belirtmişlerdir (Chen vd., 2012).

Das ve arkadaşları 4 μm kalınlıklı GaN film tabakasını metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemi ile safir alttaş üzerine büyütmüşlerdir. Üretilen GaN ince film n-tipi iletkenlik gösteren 10^{17} cm^{-3} mertebesinde taşıyıcı yoğunluğuna sahiptir. pH duyarlı GaN temelli sensör tasarımı gerçekleştirilmiş ve pH duyarlılık özellikleri ışık etkisi ile araştırılmıştır. Geleceğin biyomedikal görüntüleme araştırmaları için yüksek çözünürlük sunması beklenmektedir (Das vd., 2013).

2013 yılında Stolz ve arkadaşları silikon alttaş üzerine GaN temelli ince film üretimleri gerçekleştirerek üretimin elektro-optik etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. İnce film üretimlerini metal organik kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Kırılma indisi değişimlerini sıcaklık ve voltaj etkisi altında incelemişlerdir. Sıcaklık ve voltaj etkisi ile kırılma indisinde negatif yönde bir değişim elde etmişler ve bunun nedeni olarak da ters elektro-sınırlandırma etkisi ve elasto-optik etki ile ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir (Stolz vd., 2013).

Karbon nanotüp-grafen hibrit yapı üzerine GaN büyütme Seo ve arkadaşları tarafından metal organik kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Üretimde alttaş olarak safir kullanılmış ve üretilen GaN numunenin yüzey pürüzlülüğü AFM analizi sonucunda yaklaşık 0,2 nm olarak tespit edilmiştir. Ürettikleri GaN temelli LED tasarımının elektrolüminesans ölçümleri sonucu 10 mA de 449 nm den 100mA de 442 nm ye kayan mavi LED olduğunu göstermiştir. LED tasarımında grafen ve karbon nanotüpün ileri termal özelliklerinin cihaz üretimlerinin geliştirilmesine katkıda bulunabileceği belirtilmiştir (Seo vd., 2015).

LED uygulamaları için (111) yönelimli silisyum alttaş üzerine GaN tellerin üretimini Salomon ve arkadaşları 2013 yılı makalelerinde sunmuşlardır. Film üretimini metal organik buhar faz epitaksi ile gerçekleştirmişler ve bazı fiziksel özelliklerini uygun analiz cihazlar ile belirlemişlerdir. Elektroluminesans ölçümü sonucunda 420 nm dalgaboyunda mor ışık saçan GaN temelli LED tasarımı gerçekleştirdiklerini ve gerilim eşiği azaltılabildiği taktirde optoelektronik cihazlar için düşük maliyetli bir alternatif olarak sunmuşlardır (Salomon vd., 2013).

2013 yılında Baliga elektronik güç uygulamaları için Si güç cihazlarına alternatif olarak GaN temelli cihazların bir incelemesini gerçekleştirmiştir. Silikon alttaş üzerine üretilen GaN HEMT yapılarının elektriksel sonuçları verilerek karşılaştırmaları yapılmıştır. GaN temelli HEMT güç cihazlarının dayanıklı oldukları sonucuna varılmıştır (Baliga, 2013).

Blu-ray disk cihazlar için mavi-mor lazer diyotlar üzerine 2002 yılında Ikeda ve Uchida bir makale yayınlamışlardır. Bu çalışmalarında metal organik kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile safir alttaş üzerine GaN temelli lazer diyot yapılar büyütülmüştür.

Ürettikleri lazer diyot yapısının cihaz ömrü ile dislokasyon yoğunluğu arasında bir ilişki kurarak; yüksek dislokasyon yoğunluklarında sızıntı akımının artmasıyla sonuçlanan kısa cihaz ömürlerine sahip oldukları sonucuna varmışlardır (Ikeda ve Uchida, 2002). Akasaka ve Makimoto ise 2005 yılında yayınladıkları bir makale ile yüksek dislokasyon yoğunluklarının GaN temelli LED gibi elektronik cihazlarda taşıyıcı hareketliliğini ve emisyon etkinliğini azalttığını belirtmişlerdir (Akasaka ve Makimoto, 2005).

GaN temelli HEMT cihazlar için BGaN filmin bariyer tabaka olarak kullanımı üzerine 2012 yılında Ravindran ve arkadaşları bir çalışma yürütmüşlerdir. HEMT cihaz üretiminde üretim yöntemi olarak MOCVD yöntemi tercih edilmiştir. BGaN film tabaka kalınlığı 5nm olarak GaN tampon tabaka ile GaN kanal tabaka arasına biriktirilmiştir. BGaN bariyer tabakanın HEMT cihaz için performans katkısı incelenmiştir. BGaN ince film elektrostatik bariyer oluşturması yanında ayrıca tampon tabaka ile kanal tabaka arasında elektron geçişine dirençli bir tabaka oluşturmuştur. BGaN bariyer tabakalı HEMT cihazın üretimi ile Hall etkisi ölçümlerinde taşıyıcı yoğunluğunda ve taşıyıcı hareketliliğinde artış olduğunu tespit etmişlerdir (Ravindran vd., 2012).

Hamady 2012 yılında AlGaN ve BGaN fotodedektörlerin simülasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Simülasyon çalışmasında n-tipi iletkenlikli 100-500 nm kalınlıklı %26 Al oranlı AlGaN ve %1 B oranlı BGaN tabakalar tercih etmiştir. Schottky kontak kalınlığının 10 nm den 50 nm'ye artmasıyla kuantum etkililiğin 10 kat azaldığını belirtmişlerdir. Aktif tabakada %1 bor katkısıyla bile kuantum etkililiğin önemli ölçüde arttığını göstermişlerdir. 260 nm dalgaboyunda gerçekleştirilen kuantum etkililik analizinde katkı konsantrasyonunun 10^{16} cm^{-3} seviyelerinde daha yüksek olduğunu belirtmiştir (Hamady, 2012).

Güneş pili uygulamalarında kullanılan GaN temelli tasarımların InGaN tabakasının morfolojik özellikleri üzerine bir çalışma 2014 yılında Bae ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında film üretim yöntemi olarak MOCVD yöntemi kullanılmış ve InGaN film kalınlıkları 30 nm ve 100 nm arasında değişen 5 farklı kalınlıkta üretilmiştir. Yüzey analizleri sonucu film kalınlığının artması ile karanlık nokta boyutlarının arttığını gözlemlemişlerdir. Karanlık nokta boyutları ile güneş pili etkinliği arasında bir

bağıntı oluşturamamakla beraber 50 nm kalınlıklı InGaN tabakanın GaN temelli güneş pili uygulamaları için en uygun üretim kalınlığı olduğunu belirtmişlerdir (Bae vd., 2014).

Muziol ve arkadaşları 2015 yılında mavi lazer diyotlarda InGaN dalga kılavuzu tarafından optiksel sınırlama faktörünün geliştirilmesi üzerine bir çalışma yayınlamışlardır. Bu çalışmalarında film üretimi için moleküler ışın epitaksi (MBE) yöntemini kullanmışlardır. Mavi lazer diyotlarda ara tabaka olarak kullanılan InGaN tabakanın dalga kılavuzu kalınlığının artması ve In içeriğinin artması ile eşik akım yoğunluğunda önemli bir iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir (Muziol vd., 2015).

Radyo frekansı saçtırma yöntemi ile InGaN film büyütme üzerine bir çalışma 2013 yılında Wang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Hedef materyal olarak yüksek saflıkta InGa hedef tercih edilerek argon-azot atmosferinde, 300℃ alttaş sıcaklığında, 6 cm alttaş-hedef arası mesafede biriktirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çoğunlukla amorf yapıda yüksek oksijen içerikli az sayıda wurtzite kristal yapılı ince filmler ürettiklerini belirtmişler ve üretim basıncının artması ile yasak enerji aralığında artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir (Wang vd., 2013).

2015 yılında Kim ve arkadaşları GaN ve safir alttaşlar üzerine büyüttükleri AlGaN morötesi fotodiyotların alttaş üzerine etkisi ile performans karşılaştırması üzerine bir çalışma yayınlamışlardır. Fotodiyot yapıları aynı koşullar altında MOCVD yöntemi ile büyütmüşlerdir. Safir üzerine büyütülen AlGaN yapıların yüzey pürüzlülükleri GaN alttaşa göre biraz daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Yine GaN alttaş kullanımı ile daha yüksek fotodiyot performanslı üretim gerçekleştirdiklerini ifade etmişlerdir. GaN alttaş üzerine büyütülen AlGaN fotodiyotun aktif tabakasının düşük dislokasyon yoğunluğunun performans üzerinde baskın bir rol oynadığını belirtmişlerdir (Kim vd., 2015).

Tchoulfian ve arkadaşları 2013 yılında wurtzite kristal yapılı 20 μm uzunluklu 1μm yarıçaplı Si katkılı GaN mikro telleri metal organik buhar faz epitaksi yöntemi ile GaN alttaşlar üzerine büyütmüşlerdir. Termoelektrik ölçümler ile özdirenç ölçümlerini beraber değerlendirerek ürettikleri katkılı GaN tellerin taşıyıcı hareketliliği ve taşıyıcı konsantrasyonlarını belirlemişlerdir. Ağır Si katkılanmış GaN filmlerin yüksek iletkenlikli

ve yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduklarını belirterek katkılamanın mikro tel yapılarda daha etkili sonuçlar verdiğini öne sürmüşlerdir (Tchoulfian vd., 2013).

Görüntüleme uygulamaları için Ge katkılı GaN üretimi metal organik kimyasal buhar depolama yöntemi ile Young ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. n-tipi elektriksel iletkenliğe sahip 300 nm kalınlıklı Ge katkılı GaN filmin yüzey özellikleri araştırılmış ve izobütil germanyum akış oranına göre 0,4 ve 15 nm aralığında değişen yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir. Üretilen filmin yüzey pürüzlülüğü arttıkça taşıyıcı yoğunluğunun da arttığını ifade ederek yüksek iletkenliğe sahip Ge katkılı GaN üretimi gerçekleştirildiğini belirtmişlerdir. Işık saçan diyotlar ve görüntüleme sistemleri uygulamaları için üretilen filmlerin elektriksel özelliklerinin uygun olduğunu fakat yüzey morfolojilerinin geliştirilmesi gerektiğini söylemişlerdir (Young vd., 2016).

Metal organik buhar faz epitaksi (MOVPE) üretim yöntemi ile silisyum alttaşlar üzerine biriktirilen karbon (C) katkılı GaN tampon tabakaların yüksek güç uygulamaları için breakdown voltajları üzerine bir çalışma yapılmıştır. 2007 yılında Kato ve arkadaşları tarafından yayınlanan makalede azot eksikliğinin nedeni olan n-tipi taşıyıcıların artması (C konsantrasyonunun artması) ile breakdown voltajında da artış olduğunu ifade etmişlerdir. C katkılı GaN tampon tabaka üzerine AlGaN/GaN heteroyapı büyütülerek alan etkili transistör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak yüksek dirence sahip C katkılı GaN tampon tabakalı AlGaN/GaN heterojunction alan etkili transistör (HFET) elde edildiğini belirtmişlerdir (Kato vd., 2007).

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Yalıtkan, Yarıiletken, İletken

Maddenin en düzenli hali olan katı materyaller elektriksel iletkenliklerine göre başlıca yalıtkan, iletken ve yarıiletken olarak sınıflandırılabilirler. Katı materyallerin elektriksel iletkenliğini anlayabilmemiz için katıların bant yapılarının bilinmesi oldukça önemlidir. Katıların bant yapısı; uyarılma düzeylerinden oluşan elektronların serbest olarak hareket edebildiği iletim bandı, elektronlarla dolu olan en yüksek işgal edilmiş bant olan valans bandı ve bu iki bant arasında yer alan yasak banttan oluşmaktadır. İletkenliğin oluşması için elektronların iletim bandı denilen banda geçişlerinin sağlanması gerekir. Aksi durumda yüklü parçacıkların iletimi gerçekleşmez ve bir akım değeri okunamaz. Bu durum yalıtkan materyaller için geçerlidir (Kittel, 1996; Blatt, 1968). Yalıtkan materyallerde valans bandında yer alan valans elektronları atoma sıkı sıkıya bağlıdır. Bu sebepten ötürü elektrik yükünü taşıyacak olan tanecikler materyal içerisinde serbest şekilde hareket edemezler. Elektriksel iletimin oluşması için elektronların serbest hale gelmesi gerekir. Yasak enerji bandı denilen enerji bandı yalıtkan materyaller için 4-12 eV değerindedir (Strehlow ve Cook, 1973). Metaller elektriği iyi ileten iletken materyallerdir. İletken materyaller iletim bandı ile valans bandının çakıştığı yani elektronların hareket etmesi için bir engelin olmadığı materyallerdir. Elektronlar en küçük voltaj değerinde bile serbest olarak hareket ederek elektriksel akım oluşur. Her sıcaklık değerinde iletkenlik vardır (Jacobs, 1968). Bazı materyallerde elektronlar kendilerine ayrılan enerji düzeyinden daha aşağıda boş enerji seviyelerine sahiptirler ve iletim bandının alt kısmı ile valans bandının üst kısmı örtüşmektedir. Dolu olması beklenen valans bandın üst kısmında yer alan elektronlar, boş olan iletim bandının alt kısımlarına geçerler. Bu durumda da elektronların hareket edebilmeleri mümkün olur. Fakat metallerde olduğu kadar iletim bandında elektron yer almadığı için iletkenlikleri daha düşüktür. Bu tür materyallere yarıiletken materyaller denir. Yarıiletkenler herhangi bir örgü kusuruna sahip değilse ya da herhangi bir safsızlığa sahip değilse mutlak sıcaklıkta (0 K) yalıtkan özellik göstermektedirler. Sıcaklığın artması ile valans bandı ve iletim bandı birbirine daha fazla yaklaşmaktadır ve iletkenlik dereceleri de böylece artar. Herhangi bir yüklü parçacığın bulunmadığı bu iki izinli bant arasındaki yasak

enerji bandı yarıiletken materyallerde 4 eV dan daha düşüktür (Strehlow ve Cook, 1973; Hamaguchi, 2009).

Elektriksel iletkenlik kısaca bir materyale elektriksel potansiyel uygulandığında potansiyel uygulanan uçlar arasında bir elektriksel akımın oluşması olarak tanımlanabilir. Birçok materyalde elektriksel akım elektronlar tarafından taşınır ve buna elektronik iletkenlik denilir (Blatt, 1968). İyonik kristallerde ise yük taşıyıcıları iyonlardır (deşikler) ve bu iletkenlik türü ise iyonik iletkenliktir (Peter, 1997). Eğer bu her iki parçacık (elektronlar ve iyonlar, iyon yerine çoğunlukla deşik kullanılmaktadır) birlikte akım taşıyıcısı görevini üstlenirse karma iletkenlik olarak adlandırılır (Lişesivdin, 2008).

Elektrik ve manyetik alan altında serbest halde hareket eden bir elektron

$$m_e^* \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - e\vec{v} \times \vec{B} \tag{3.1}$$

ivmelenme denklemine uyarak hareket eder. Denklemde yer alan *e* elektronun yükü, *v* elektron hızı, *E* elektrik alan ve *B* manyetik alandır. Bu denklem herhangi bir çarpışmaya maruz kalmadan hareket eden elektron için yazılmış bir denklemdir. Elektron gerçekte kristal içinde birçok sebepten ötürü çarpışmaya ve saçılmaya uğrar (Mckelvey, 1966). Gerçekleşecek bu çarpışmaları da dahil ederek denklemi tekrar yazar isek

$$m_e^* \left(\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{\vec{v}}{\tau}\right) = -e\vec{E} - e\vec{v} \times \vec{B} \tag{3.2}$$

Burada τ zaman sabitidir. τ üstel olarak elektronun hızını sönümlendirmektedir. Bu nedenle *v* için artık taşıyıcı hızı yerine sürüklenme hızı dememiz daha uygun olacaktır. Manyetik alanın kaldırılıp yalnızca elektrik alanı altında yazılırsa

$$\vec{v} = -\frac{e\tau}{m_e^*}\vec{E} \tag{3.3}$$

denklemi ortaya çıkmaktadır. Sürüklenme hızı ile elektrik alanının orantısına taşıyıcı hareketliliği yani mobilite (μ_e) denilmektedir ve denklem

$$\mu_e = \frac{e\tau}{m_e^*} \tag{3.4}$$

halini alır. *n* taşıyıcı yoğunluğu olmak üzere elektriksel akım yoğunluğu denklemi

$$\vec{j} = n(-e)\vec{v} \tag{3.5}$$

ile verilmektedir (Kittel, 1996). Eşitlik 3.3 Eşitlik 3.5 içinde yerine konulursa

$$\vec{j} = \frac{ne^2\tau}{m_e^*}\vec{E} = \sigma\vec{E} \tag{3.6}$$

Ohm yasası olarak bilinen denklem elde edilmiş olur ve burada σ elektriksel iletkenliktir (Lişesivdin, 2008). Elektriksel iletkenlik (σ) ise özdirencin(ρ) tersidir ve aralarındaki bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{3.7}$$

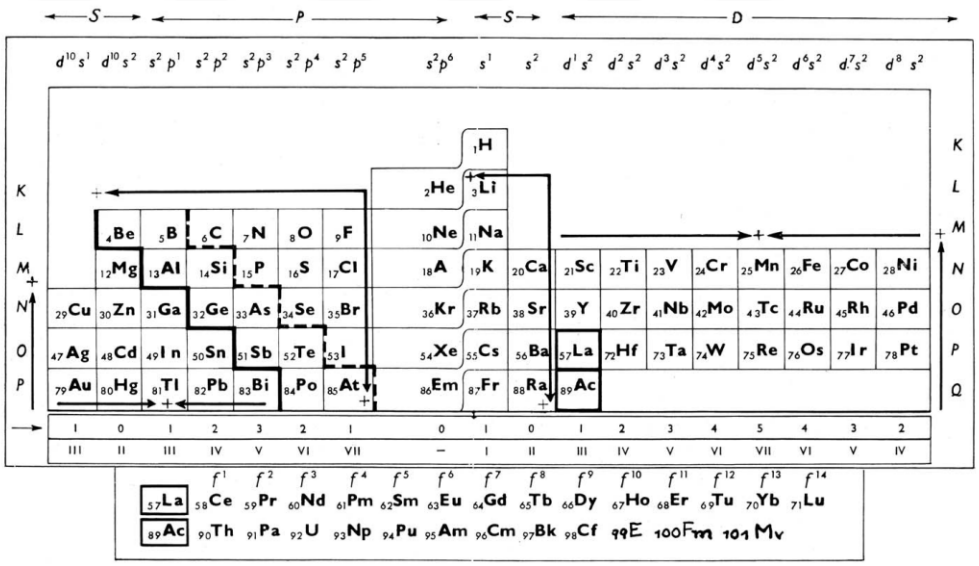
Elektronik iletkenlerde elektriksel iletkenlik değerleri metaller için 10^3–10^7 $(\Omega.cm)^{-1}$ arasında, yarıiletkenler için 10^{-3}–10^4 $(\Omega.cm)^{-1}$ arasında, yalıtkanlar için 10^{-10} $(\Omega.cm)^{-1}$ mertebesinden daha düşüktür. İyonik kristallerin elektriksel iletkenlikleri ise 10^{-16}–10^{-2} $(\Omega.cm)^{-1}$ mertebesindedir (Altuner, 2009).

3.2. III-V Yarıiletkenler

Periyodik tablonun IIIA grubunda (B, Al, Ga, In) ve VA grubunda (N, P, As, Sb) bulunan elementlerin çeşitli üretim yöntemleri aracılığıyla birleştirilmesi ile çoklu yarıiletken yapılar elde edilebilmektedir. III-V grubu yarı iletken bileşikler ve alaşımlar örgü sabiti, yasak enerji aralığı, kırılma indisi gibi fiziksel parametrelerin kontrol edilebilir olması nedeniyle yarıiletken teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Bu yarıiletken materyallerin alaşımı yapılırken göz önünde bulundurulacak en önemli ölçüt belki de yer değiştirecek atomların aynı bağ sayısına sahip olmaları gerekliliğidir. Bu durum keyfi atom değişimlerinin önüne geçer. III-V yarıiletkenler zinc blende olarak da bilinen çinko sülfür kristal yapısındadırlar. Çinko sülfür kristal yapı bazı oluşturan iki atomun farklı olması dışında wurtzite olarak da bilinen elmas yapı ile aynıdır.

Medeleev'in periyodik tabloyu oluşturduğu yıllarda elektronik yapı bilinmemekteydi. Periyodik tablo sıralar halinde düzenlenmiş periyotlardan meydana gelmekteydi ve atomic ağırlığa göre elementler kategorize edilmişti. Daha sonraları modern

periyodik tablo atom numaralarının periyodik fonksiyonları şeklinde düzenlenmiştir. Modern periyodik tablo ile elementlerin elektron dizilimleri, değerlik elektron sayıları ve metalik özellikleri belirli bir düzene kavuşmuştur (Szabo ve Lakatos, 1957). Modern periyodik tablodan farklı elektron düzenli periyodik tablo Şekil 3.1 de gösterilmektedir. III grubu elementleri üç, V grubu elementleri ise beş valans elektronuna sahiptirler. Bu iki grubun elementleri bileşik oluşturduğunda elementler son yörünge elektronlarını tetrahedral kovalent bağa katarlar. Fakat bağlanma tam olarak kovalent bağ oluşturmasa da kovalent bağ baskın özellik göstermektedir (Usanmaz, 2009). Alaşımların yapısına bakılırsa günümüzde en fazla üçlü ve dörtlü alaşım tipleri tercih edilmektedir. Dörtlü alaşımların elde edilebilmesi için üçlü alaşımlara ve de ikili bileşiklere ihtiyaç duyulduğu kesindir (Yalçın, 2014).



Şekil 3.1 Elektron düzenli periyodik tablo (Szabo ve Lakatos, 1957)

İkili III-V grubu yarıiletkenler görünür bölgede çalışan ayarlanabilir aygıt uygulamaları, heteroyapı fabrikasyon uygulamaları, yüksek frekans bölgelerinde çalışabilen cihaz tasarımları ve optoelektronik alandaki uygulamaları kapsayan geniş kullanılabilir alanlara sahip olması bu malzemelere olan ilgiyi arttırmıştır (Wilmsen, 2013; Adachi, 1992).

III–V grubu malzemeler kullanılarak yüksek verimli fotovoltaik hücreler elde edilmesi bu konuda yapılan araştırmaların hızla artmasına neden olmuştur. GaInP gibi üç eklemli hücrelerden elde edilen verimlilik değerleri araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Üçlü GaInP alaşımı güneş ışınları tayfının görünür bölgesinde yer alan ışınları soğurma

özelliğinden dolayı yüksek verimli fotovoltaik ve güneş hücreleri için en uygun malzemelerden biridir. GaInP yarıiletken materyallerin kristal yapısı çinko sülfür yapıdadır (Kınacı, 2013). Çoklu alaşımların üretiminde kullanılan elementlerin oranları kullanım alanlarına göre kritik rol oynamaktadır. GaAs alttaş üzerine örgü uyumlu büyütülen $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ yapısının teknolojik açıdan önemli bir yere sahip olduğu çeşitli araştırmalarda belirtilmektedir (Sogabe vd., 2014; Derendorf vd., 2013; Zhang vd., 2010). Mevcut teknolojiler ile üretilen üç eklemli yapılarda; GaInP (1,9 eV), GaAs (1,4 eV) ve Ge (0,7 eV) katmanları yaygın olarak kullanılmaktadır (Özen, 2015).

3.3. Nitratlı Bileşikler

Nitrat temelli aygıtların performanslarının arttırılması ve buna bağlı olarak da tasarım parametrelerin ey uygun duruma getirilmesi için temel bazı fiziksel özeliklerinin bilinmesi son derece önemlidir. III grubu nitrat yarıiletkenler sahip oldukları fiziksel özelliklerden dolayı optoelektronik ve elektronik teknolojisinde birçok kullanım alanlarına sahiptir (Tülek, 2010; Orton ve Foxon, 1998). Azot atomu V grubu elementleri arasında en güçlü elektronegativiteye sahip olan atomdur. Azot ve III grubu elementler arasındaki büyük elektronegativite farkı Ga, Al, ya da In arasındaki kovalent bağa güçlü iyonik bağ bileşeni ekler ve sonuç olarak sıkı bağlı bir kristal yapı oluşur (Di Quarto ve Santamaria, 2008). Ayrıca III-N' lerin valans bandındaki yük taşıyıcıları, azot atomlarının güçlü elektron birleşme eğilimleri nedeniyle güçlü derecede sınırlandırılmıştırlar. Bu özellikleri III-N yarıiletkenleri yüksek-güç/yüksek sıcaklık uygulamaları için öncü materyal haline getirmiştir. Azot atomları III-N malzemelerde büyük iyonik bağ bileşeni oluşturur, böylece bu atomlar sıkı bağlı kristal yapısı oluşturmada önemli rol oynarlar. Doğrudan bant aralığına sahip olan nitratların en önemli özelliklerinden biri AlGaN, InGaN, InAlN ve AlGaInN gibi üçlü ve dörtlü bileşiklerinin üretilebilmesidir. Bu bileşiklerin enerji bant aralıkları InN bileşiği için elektromanyetik spektrumun yakın kızılötesi bölgesi olan 0.7 eV'dan, AlN bileşiği için elektromanyetik spektrumun morötesi bölgesi olan 6.1 eV'a kadar çok geniş bir dalgaboyu aralığını taramaktadır (Akasaki vd., 1991; Nakamura vd., 1993; Honda vd., 2000; Pantha vd., 2008; Baliga 2013; Khanna 2014; Kim vd., 2015). Bu özellik III-nitrat yarıiletkenleri, görünür ve morötesi bölgede çalışan ışık yayan diyotlar (LED), lazer diyotlar, fotodetektörler, optiksel modülatör ve anahtarlamalar gibi birçok optoelektronik aygıtın üretilmesinde ve geliştirilmesinde çok önemli bir yere koymaktadır (Akasaki vd., 1991; Kato

vd., 2007; Huang vd., 2009; Hamady 2012; Ong vd., 2012; Chen vd., 2012; Das vd., 2013; Bae vd., 2014).

III grubu nitratlı yarıiletkenler yüksek sıcaklıklara ve kimyasallara karşı dayanıklı olduklarından, aşındırıcı ve zarar verici ortamlarda, aşırı sıcaklıkta çalışabilen cihazların üretiminde gelecek vaat eden materyallerdir. Galyum nitrat (GaN) bileşikler, sıkça kullanılan GaAs ve Silisyum gibi diğer yarıiletken materyallerle mukayese edildiğinde yüksek gerilim ve yüksek güç uygulamalarında kullanımlarına olanak tanıyan geniş bant aralığına sahiptir (Kato vd., 2007; Baliga, 2013). Galyum arsenik 6.52 eV/bağ' lık bağ enerjili materyal iken GaN 8.92 eV/bağ ve AlN 11.52 eV/bağ' enerjili materyallerdir (Khanna, 2014; Lişesivdin, 2008). GaN bileşiklerin yüksek bağ enerjisine sahip olması ve yüksek erime noktasına (>2500℃) sahip materyal olması diğer avantajlarıdır. Bu yüksek enerjiye sahip güçlü bağlar III grubu nitratlı bileşiklerin yüksek kimyasal kararlılığa da sahip olmaları anlamına gelmektedir. Bu durum avantaj sağlayan bir iken aynı zamanda dezavantajları da mevcuttur. Bu özellik mekanik ve tribolojik açıdan zarar verici, aşındırıcı ortamlarda çalışabilen cihaz tasarımlarında yararlar sağlarken materyalin işlenebilirliği ve üretimi açısından zorluklar çıkarmaktadır. Yapılan çalışmalarda c-düzlemli GaN yarıiletken kristalini aşındırabilecek herhangi bir ıslak aşındırıcı tespit edilememiştir. En etkili asitler dahi aşındırıcı özellik gösterememiş ve sadece yüzeyde oluşan oksit tabakasını kaldırabilmekle yetinmiştir. AlN için ise az sayıda aşındırıcı bulunmaktadır (Liu vd., 2007; Basilio vd., 2010; Taşlı, 2010; Jiang vd., 2014).

Geçiş metallerinin nitratlı bileşiklerinin taban malzeme üzerine adezyonu sert kaplama uygulamalarında en önemli parametrelerden biridir. AlN ve ZrN kaplamaların alttaş üzerinde zayıf adezyona sahiptirler. Bu durumun temel nedenleri olarak alttaş ile zayıf fiziksel ve kimyasal bağlar oluşturması ve yüksek iç gerilmelere sahip olması söylenebilir. Nitratlı geçiş metallerinin filmleri düşük yüzey pürüzlülüğü, düşük sürtünme katsayısı, düşük droplet oranı gibi üstün tribolojik özelliklere sahip olmasına rağmen mikrosertlik, adezyon kuvveti gibi bazı mekanik özellikleri yönünden zayıftır (Yee, 1978; Wong vd., 2000a; Tsai vd., 2016; Levashov ve Shtansky, 2007; Türküz, 2006).

Nitratlı bileşiklerin üretiminde temel zorluklardan bir tanesi örgü uyumu ve ısıl uyumlu alttaşların eksikliğinin olmasıdır. Üretimde kullanılacak alttaş, epitaksiyel filmlerin

yüzey morfolojisini, kristal yönelimini, polaritesini, gerilme ve kusur yoğunluğunu belirler. Nitratlı bileşiklerin büyütülmesindeki zorluklardan dolayı genelde kristal yapıda silisyum karbür ya da safir üzerine biriktirilir. Yine nitrat temelli bileşikler kristal yapıları farklı NaCl, Si, TiO_2 birçok alttaşlar üzerine de biriktirilmektedirler (Bharatan vd., 1994; Bairamov vd., 1999; Konca vd., 2005; Tamer, 2013). Nitratlı bileşiklerin üretiminde karşılaşılan diğer bir sorun ise; azot molekülünün asal doğaya sahip olması 1200℃ de 1000 atm lik çok yüksek azot buhar basıncı ortaya çıkarması üretilecek bileşiklerin sentezini zorlaştırmaktadır.

3.4. Nanoteknoloji ve Nanoyapılar

1947 yılında 14. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) konferansında, bir birimin 10^9 da biri olan nano fiziksel büyüklüğü önek olarak tanıtılmıştır. Nano tabiri resmi standart olarak 1960'lı yıllarda kabul edilmiştir. Uluslararası Birimler Sistemi'ne (SI) göre metrenin milyarda biri nanometre olarak tanımlanır ve sembolü "nm" dir. Bu boyutlarda yapılan teknolojik çalışmalara nanoteknoloji adı verilmektedir. 1974 yılında Nanoteknoloji terimi ilk kez Norio Taniguchi tarafından kullanılmıştır (Taniguchi, 1974). Nanoteknoloji en genel tabiri ile mühendislik ve teknoloji alanında nano uzunluk ölçeğinde görüntüleme, modelleme, ölçme ve yönlendirmeyi içeren bir anlayıştır. Nanoteknolojide materyallerin yönlendirilmesi belirtildiği gibi oldukça küçük bir ölçekte gerçekleşmesinden dolayı nanoteknolojik uygulamayla mevcut materyalin sahip olduğu özelliklerden daha özel daha yeni ürünler elde etmek mümkün olabilmektedir (Güzeloğlu, 2012). Son yıllarda tüm dünya genelinde yüksek yüzey hacim oranına sahip olması nedeniyle nanoteknoloji üzerine araştırmalar yoğun şekilde devam etmektedir. Nanoteknoloji enerji, elektronik, optoelektronik alanda fotonik kristaller, lazer diyotlar, görüntüleme panelleri, güneş pilleri, yüksek frekanslı cihazlar, sensörler gibi pek çok alanda çalışılmaya başlanmıştır. Nanoteknoloji alanında sürdürülen bu araştırma ve geliştirme çalışmaları bilim ve teknolojide önemli atılımları da beraberinde getirmiştir. Seramik, metal ve yarıiletken materyaller üzerinde yüksek kalitede nano yapılar başarılı şekilde üretilmeye başlanmış ve geliştirilmeye devam etmektedir (Kılıç, 2010).

Nanoteknoloji alanındaki uygulamalarda yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetleri materyal yaratıcılığını da arttırmıştır. Bu süreç ile birlikte nanoteknolojik ürünler bir önceki teknolojik ürünlerden daha karmaşık yapılar göstermektedir. 2007 yılında James M. Tour,

nanoteknolojiyi 3 ayrı kategoride sınıflandırmıştır: pasif, aktif ve hibrit nanoteknoloji. Pasif nanoteknolojiyi; mevcut ürünlerin fiziksel ve kimyasal işlevlerinin iyileştirildiği, aktif nanoteknolojiyi; materyallerin atomlarının yeniden düzenlenip işlenerek farklı özellikler ve işlev kazandırıldığı, hibrit nanoteknolojiyi ise: şimdiye kadar ürün haline getirilmemiş ve bir takım özelliklerinin bilinmediği yenilikçi ürünlerin ortaya konduğu araştırma alanları olarak tanımlamıştır (Tour, 2007). 2011 yılında Mihail C. Roco ise bir makalesinde, nanoteknoloji alanında yapılan araştırma geliştirme çalışmalarını nesil ayrımı ile nitelendirmiştir. İlk nesil ürünleri 2000-2005 yıllarını kapsayan pasif nanoyapılar (nanoparçacıklar, nano yapılı metaller, kaplamalar vb.) olarak nitelendirmiş. İkinci nesil ürünleri 2050-2010 yıllarını kapsayan aktif nanoyapılar (3 boyutlu transistörler, güçlendiriciler, aktüatörler, uyum sağlayan yapılar vb.) olarak nitelendirmiş. Üçüncü nesil ürünleri 2010-2015 yıllarını kapsayan bütünleşik hetero-nanosistemler (3 boyutlu ağ ve hiyerarşik mimariler, robotikler vb.) olarak tanımlamıştır. Ve dördüncü nesil ürünler olarak da 2015-2020 yıllarını kapsayan moleküler nanosistemler (femtosaniye çözünürlüklü moleküler cihazlar, atomik tasarım ürünler vb.) olarak tanımlama yapmıştır (Güzeloğlu, 2012; Roco, 2011).

Yarıiletkenler üzerine nanoyapıdaki materyallerin bir alt kümesi olarak kabul edilen nano gözenekli yapıların elde edilmesi özel fonksiyonel materyaller üretmede bir alternatif olarak kabul görmektedir. Küçük boyutlarda hacmine göre büyük yüzey alanına sahip olması dolayısıyla nano gözenekli yapıdaki materyallerde nokta, yüzey kristal kusurları ve ara yüzey kristal kusurları gibi birçok örgü kusuru oluşmaktadır (Kılıç, 2010). Bu kusurlar ince film de lüminesans merkezleri olarak görev alabilmektedir (Kim vd., 2010). Örneğin; yüksek kalitede ZnO ince filmler görünür bölgede bant kenarı emisyonunundan zayıf fotolüminesans şiddeti göstermektedir. Fakat nano gözenekli ZnO yapılar için çok daha güçlü emisyon şiddeti gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca nanoyapıların bulk hallerinden çok daha özel uygulamalar için kullanımlarının mümkün olduğu belirtilmektedir (Wang vd., 2010).

Üretilecek materyallerin hacimlerinin ve boyutlarının küçültülmesinin elektronik durum enerjilerini artıracağı bilinen bir gerçektir. Böyle bir durumda ayrık enerji değerlerine sahip altbant enerji seviyeleri oluşmaktadır. GaN filmlerin nanometre mertebelerine boyutlarının küçültülmesi daha düşük dalga boylarında ışıma yapmasına olanak tanıyacaktır.

Bu yolla morötesi ışık saçan LED nanoyapılı aygıtların üretimi gerçekleştirilmektedir (Morkoc, 2013).

3.5. İnce Film Teknolojisi

Alttaş materyalin yüzeyi üzerine çeşitli yöntemlerle biriktirme işlemlerinin yapıldığı filmler kalın film veya ince film adı altında iki grupta yer almaktadır. Üretim yöntemleri olarak birbirlerine yakın teknolojilerin kullanılmasına rağmen ince film ve kalın film teknolojileri arasında farklar mevcuttur. İnce film teknolojisinde yalın halde tek tek atom ya da moleküllerin alttaş üzerine biriktirilmesi sağlanırken, kalın film üretimlerinde biriktirme işlemi makro parçacıklar şeklinde gerçekleştirilir (Danışman, 2011). İnce film teknolojisinde çok az materyal kullanım ihtiyacı duyulduğu için ekonomik açıdan fayda sağlamaktadır. Ayrıca ince filmler, yüksek dayanıklılık, dönüşüm verimliliği, yüksek kapasitede üretim gibi avantajlara sahiptirler (Green, 2006). Kullanılacak üretim materyallerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak teknolojiye uyarlanabilen ince filmlerin üretimleri gerçekleştirilmektedir. Bunlar; kristal, amorf yarıiletken, iletken, süperiletken, alaşım, şeffaf, ferroelektrik, polimerik, inorganik ince filmler şeklinde gerçekleştirilebilmektedir.

Üretilecek materyallerin ince filmlerinin oluşumu rastgele oluşum süreci ile başlar. İnce film büyütme depolama sıcaklığı, alttaş sıcaklığı, büyütme gücü gibi çeşitli depolama (biriktirme) koşullarına doğrudan bağımlıdır. İnce filmlerin yapısı üretim yöntemlerinin dayandığı üretim parametrelerine göre değişim göstermektedir. Üretim koşullarının kontrol edilmesi yolu ile ince filmlerin bazı temel özelliklerinde istenilen değişimler yapılabilmektedir. Hatta aynı üretim yöntemi ile tek bir parametrede ufak bir değişim dahi ince filmin temel özelliklerini değiştirmeye yetmektedir. Örneğin; alttaş tutucu yüksekliği, kullanılan bağlantı elemanlarının kullanıldığı materyaller, vakum çemberinin büyüklüğü gibi belki de pek önemsenmeyecek durumlar dahi etki edebilmektedir.

İnce filmler genel olarak homoepitaksiyel (tek katlı), heteroepitaksiyel (çok katlı) ve polikristal filmler olmak üzere üç ana grupta yer almaktadır (Koelmans, 1971). Homoepitaksiyel filmler ve heteroepitaksiyel filmler tek kristal yapıda ve genellikle 1 μm kalınlıktan daha kalın filmlerdir. Polikristal filmler ise çok sayıda kristal yapının bulunduğu ve genellikle 1 μm den daha az kalınlığa sahip olan filmlerdir. Homoepitaksiyel büyütme

aynı malzemeden yapılmış alttaş veya film üzerine tek çeşit malzeme ile biriktirilerek gerçekleştirilir. Heteroepitaksiyel büyütme kullanılan alttaş ve üretilecek ince filmin farklı materyallere sahip olması ile gerçekleştirilen biriktirme işlemidir. Polikristal büyütme metal, seramik, cam, polimer benzeri tabanlar üzerine biriktirme işlemidir. Tek kristal ince filmler yüksek maliyet gerektiren yöntemlerle üretilirken, polikristal ince filmler düşük maliyetli tekniklerle pratik şekilde elde edilebilmektedir. Bu sebeple polikristal ince filmler üzerine çalışmalar daha çok yoğunlaşmıştır. Polikristal ince filmler uygun fiziksel özelliklerinden ötürü güneş pilleri, fotodetektörler, fotovoltaikler gibi birçok uygulama alanını kapsayan ince filmlerdir (Rudden ve Wilson, 1980).

4. İNCE FİLM ÜRETİM YÖNTEMLERİ

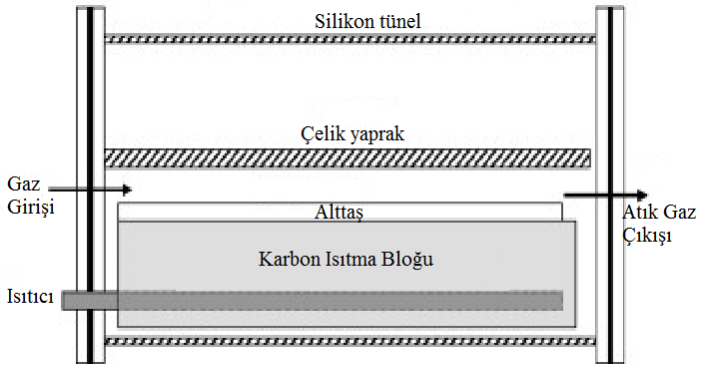
4.1. Kimyasal Buhar Depolama (CVD) Yöntemi

Kimyasal buhar depolama (CVD) yöntemi çok yaygın kullanılan bir malzeme üretim teknolojisidir. İnce film kaplama işlemi en çok kullanılan uygulamaları arasındadır. Ancak yüksek saflığa sahip film üretimlerinde ve toz materyal üretiminde de kullanılmaktadır. CVD yönteminde kimyasal bileşikler ya da malzeme buharlaştırılır ve bunlar bir sonraki aşamada ısıtılan sıcak yüzeyler üzerinde ayrıştırılırlar. Yöntem, buharlaştırılan materyalden farklı olarak yeni bir ürün elde etmek veya doğrudan materyal biriktirme için kimyasal reaksiyonla depolama şeklinde de olabilir. Üretimde sıcak yüzeylerin üzerinde veya yakınında kimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve yüzey üzerine ince film olarak biriktirilmesi sağlanır. CVD sistemi başlıca üç bölümden oluşur: egzoz görevi gören çıkış gazlarını atan bölüm, buhar fazı halindeki reaksiyon bileşenlerini besleyen bölüm ve CVD reaktörü (tabanı ısıtıcı sistem) bölümüdür (Özkan, 2010). Üretimde alttaş ile uyum sağlaması, yüksek saflıkta depolamaya imkân tanıması, yüksek depolama oranı, pek çok tekniğe göre yüksek vakuma gerek duyulmaması bu tekniğin avantajları olarak sayılabilir (Bunshah, 2001; Pierson, 1992). Bu yöntemin, avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Kullanılan reaktif gazların tehlikeli ve pahalı olması, yüksek ısıya maruz kaldığında zarar gören alttaşlar üzerine biriktirmenin yapılamaması ve reaksiyon sonucu oluşan istenmeyen bazı bileşenlerin alttaşa doğrudan etki etmesi öne çıkan dezavantajlar olarak sıralanabilir (Pierson, 1992; Bunshah, 2001; Özkan, 2010). Tüm dezavantajlar gelişen teknoloji ile bertaraf edilmeye çalışılmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Fakat tüm bu gelişmeler CVD tekniğine ek maliyetler getirmektedir.

4.1.1. Atmosferik basınçlı kimyasal buhar biriktirme (APCVD) yöntemi

Lander ve Germer tarafından 1948 yılında atmosferik kimyasal buhar biriktirme yöntemi (APCVD) başarıyla uygulandı. Bu kimyasal buhar biriktirme yöntemi herhangi bir vakumlamaya ihtiyaç duymadan atmosferik basınç altında üretime imkân tanıyan biriktirme yöntemidir. Biriktirmenin yapılacağı reaktör içerisine işlem gazları salınarak alttaşların yüzeyleri üzerinde bir gaz bulutu oluşturulur. Bu yolla alttaşlar üzerinde buhar biriktirme ile

ince filmler oluşturulur (Dunnill vd., 2009). Ortam içerisinde kullanılmayan atık işlem gazları vakum yolu ile dışarıya atılımı sağlanır. Atmosferik basınçlı kimyasal buhar biriktirme işlemi termal ısıtma yolu ile 400-1000 $^{\circ}$C sıcaklıklarda gerçekleştirilerek ince film tabaka oluşturulur (Ikeda vd., 1969). Sadece alttaşların ısıtıldığı sistemler olduğu gibi aynı zamanda tüm sistemin termal olarak ısıtıldığı sistemlerde mevcuttur.



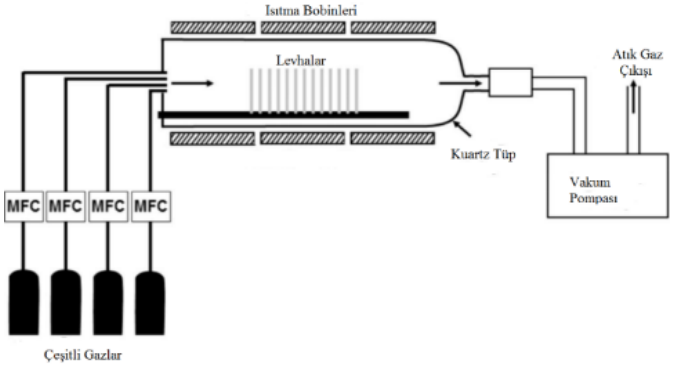
Şekil 4.1 APCVD yöntemi (Dunnill vd., 2009)

Bu yöntem ile üretilen ince filmlerde kısıtlı numune sayısı sistemin bir dezavantajı sayılabilir. Bu dezavantaj dolaylı olarak zaman kaybına da yol açmaktadır. Aynı zamanda film kalınlığında homojenlik sağlanamaması, yüksek pürüzlülük oranı, yüzey verimi nedeni ile birikmenin düşük olması diğer dezavantajlarıdır. Bu yöntemin basit şematik gösterimi Şekil 4.1 de verilmiştir.

4.1.2. Alçak basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) yöntemi

Alçak basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) yöntemi ince film biriktirmede iyi koruma ve çok düşük safsızlık oranı (parçacık kirlenmesi) sağlar. Bu yöntem ile biriktirme işlemi katkılanmış silikon biriktirme işleminde, yarıiletken uygulama endüstrisinde, yarıiletken bileşenleri üretmede, geniş hacimli uygulamalarda tercih edilen bir yöntemdir. Alçak basınç kimyasal buhar biriktirme mümkün olduğunca ince film biriktirme işlemleri yapmak amacı ile kullanılmaktadır (Tozlu, 2011). Bu yöntemde de atmosferik kimyasal buhar biriktirme yöntemi gibi kimyasal bozunma için gerekli enerji termal yolla elde edilmektedir. Çok yüksek sıcaklıklarda ince film biriktirme olanağı vardır. Fakat bu yöntemde alçak basınç tercihi olduğu için üretim sırasında vakum için bir pompaya ihtiyaç vardır. Çok iddialı olmasa da 10^{-1} Torr gibi düşük basınçlarda biriktirme işlemi

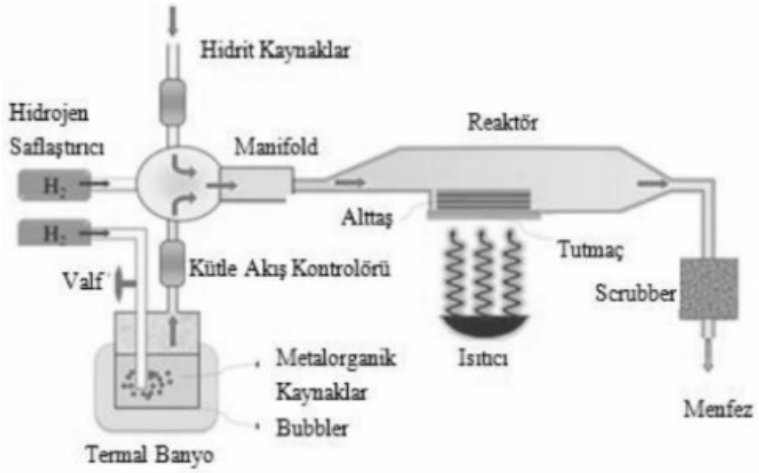
yapılmaktadır (Satō, 1967). LPCVD yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.2 de yer almaktadır.



Şekil 4.2 LPCVD yöntemi (Kazmi vd., 2012)

4.1.3. Metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemi

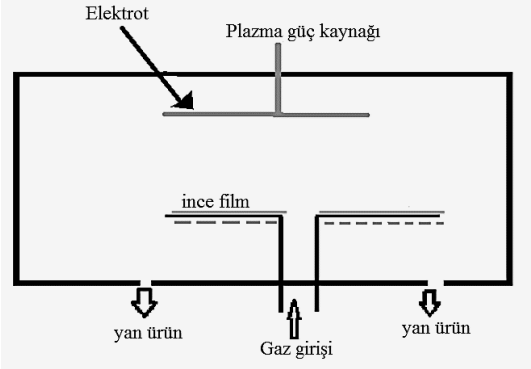
Metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) 1960'lı yıllarda indiyum fosfit büyütme için kullanılmıştır. İlk deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında termal kimyasal buhar depolama yönteminden daha düşük sıcaklıklarda kristal büyütmeye imkân tanımıştır. MOCVD yıllar içerisinde gelişmesine devam ederek şu an özellikle elektronik ve optoelektronik uygulamalarda geniş ölçekte kullanılmaktadır (Sönmezoğlu vd., 2012). Metal organik kimyasal buhar biriktirme sisteminde büyütülmesi istenilen yarıiletken ince filmler için gerekli kimyasallar, grafit suseptör üzerine yerleştirilmiş alttaşın bulunduğu reaktör odasına hidrojen ve azot gaz taşıyıcı balonları ile iletilir. Büyütme sıcaklığında (600-1100K) organik moleküller ile metal atomları arasındaki bağlar kırılarak istenilen yarıiletken, kimyasal süreçlerin gerçekleşmesi ile alttaş üzerinde tabakalar halinde kristalleşir (Şit, 2014). Gaz akışının geniş yüzeyli alanlarda ve çoklu tabaka tasarımlarında daha düzgün olması için farklı reaktörler geliştirilmiştir. Gaz girişi ve pozisyonuna göre yatay ve dikey olmak üzere iki tip reaktör vardır (Sönmezoğlu vd., 2012). MOCVD yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.3 de yer almaktadır.



Şekil 4.3 MOCVD yöntemi (Sönmezoğlu vd., 2012)

4.1.4. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi

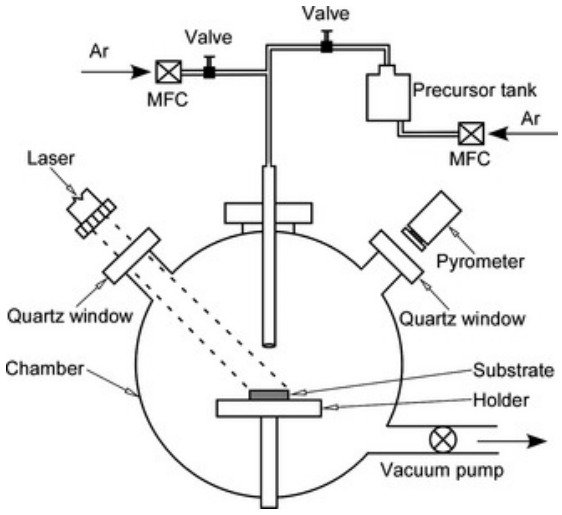
Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) yöntemi ilk olarak 1960'lı yıllarda yarıiletken uygulamaları için geliştirilmiştir. PECVD yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.4 de yer almaktadır. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yönteminin diğer CVD yöntemlerinden ayrı yanı kimyasal reaksiyonun plazma ile harekete geçirilmesi ve plazma yoğunluğunu temel almasıdır. Bu yöntem fiziksel ve kimyasal olayların gerçekleştiği bütünleşik bir yöntemdir (Orhon, 2012). PECVD yönteminde biriktirme sıcaklığı oldukça düşüktür. Düşük sıcaklıklarda üretim gerektiren alüminyum gibi maddeler, yarıiletkenler için katkı materyali olarak kullanılan bor ve fosfor ve organik polimerler gibi malzemeler PECVD yöntemi tercih edilerek alttaşlar üzerine depolanmaktadır (Çabuk, 2012). Bu yöntemde birbirine paralel iki elektrot arasında gazlar güç kaynağı aracılığıyla yüksek enerjili parçacıklar halinde aktif duruma getirilir. Uyarılan gaz kimyasal reaksiyonlar sonucunda alttaş üzerinde ince film halinde birikmeye başlar. Diğer CVD yöntemlerinde en az 600℃ sıcaklığa ihtiyaç duyulurken bu yöntemde 250-350℃ sıcaklıklarda biriktirme gerçekleştirilebilmektedir. Bu yönü ile diğer CVD yöntemlerine avantaj sağlamaktadır (Yongxin, 1980).



Şekil 4.4 PECVD yöntemi (Çabuk, 2012)

4.1.5. Lazer kimyasal buhar biriktirme (LCVD) yöntemi

Bazı CVD yöntemleri ile kalitatif benzerlikleri vardır fakat mekanizması diğerlerinden farklıdır. Diğer CVD yöntemleri gibi bazı yollarla kimyasal reaksiyonların oluşumuna dayanır. Bu yöntemde biriktirme işlemi lazerin benzersiz özelliklerinin kullanımıyla gerçekleştirilir (Roy, 1988). Lazer ışının yönlendirildiği yol boyunca hareket etmesi ve tek renkli oluşu iki çok önemli yanıdır. Bu iki özellik kimyasal reaksiyonun oluşturulması için gerekli olan enerjinin kontrolünü sağlar. Bu yöntem ile metaller, yarıiletkenler, yalıtkanlar element halinde tek başlarına ya da bileşik olarak alttaşlar üzerine biriktirilebilmektedir (Allen, 1984). Buhar biriktirme işlemi düşük sıcaklıklarda lazerin etkisi ile bölgesel termal ayrışma temeline dayanarak gerçekleştirilmektedir. Geniş alanlarda biriktirme işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi, düşük depolama sıcaklığı, düşük uyarma enerjisinden ötürü filmlere zarar vermemesi bu yöntemi ön plana çıkaran avantajlarıdır (Choy, 2003). Bu yöntemin basit şematik gösterimi Şekil 4.5 de verilmiştir.



Şekil 4.5 LCVD yöntemi (Zhang vd., 2014)

4.2. Fiziksel Buhar Depolama (PVD) Yöntemi

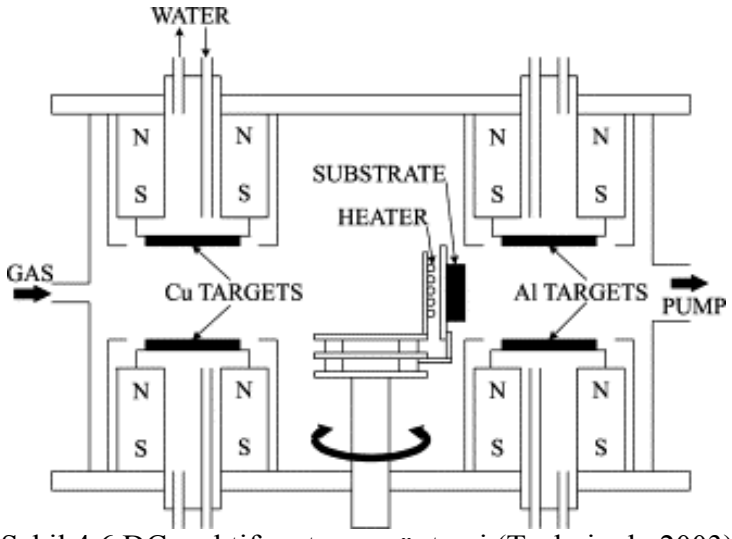
Fiziksel buhar biriktirme çok eskillere dayanan (1800'lü yıllar) vakum koşulları altında üretilecek materyalin aktif ya da reaktif yolla istenilen alttaş üzerine biriktirilmesi yöntemidir. Bu yöntem çeşitli şekillerde saçtırma yoluyla veya ısısal buharlaştırma yoluyla gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntem endüstriyel uygulamalar için yaklaşık elli yıldır kullanımı yaygınlaşmıştır. Fiziksel buhar biriktirme akademik araştırmaların yanısıra seri üretim için ticari ve askeri uygulamalarda kendisine ihtiyaç duyulan bir teknolojik üretim yöntemidir. PVD tekniği yıllar içerisinde optik, elektronik, medikal, optoelektronik, tribolojik, kimyasal, enerji sistemleri gibi cihazların gelişim ihtiyacından ötürü daha kaliteli üretimlere olanak tanımak için geliştirilmiştir. Bu gelişimde en büyük rol plazma destekli PVD tekniklerine düşmüştür. Plazma destekli bu teknikler ile kaplanacak materyallerin kaplanacak yüzeye yüksek difüzyon sağlamasının yanı sıra sıçratma yoluyla ısıtma sırasında da temizleme olanağı vardır. Ayrıca yüksek biriktirme hızı, materyallerin ısıtılması için gerekli olan ısıtıcı kaynağa ihtiyaç duyulmaması, düşük sıcaklıklarda bile daha yoğun daha kaliteli kaplama özellikleri göstermesi bu yönteme olan ilgiyi artırmaktadır.

Saçtırma tekniği ısısal olmayan bir ince film üretim sürecidir. Bu yöntemde hedef materyalin yüzey atomları, bir plazma ya da iyon tabancasından çıkan hız kazandırılmış atom, iyon, elektron gibi parçacıklar yolu ile momentum transferi sağlanarak kaplanacak alttaş üzerine tutunması ile biriktirme gerçekleştirilmektedir. Termal yolla buharlaştırma tekniğinde ince film üretimi kaynağa yerleştirilmiş materyalin buharlaştırılması veya süblimasyonuyla alttaş üzerine biriktirme ile gerçekleştirilir.

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yönteminin kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemine göre daha ön plana çıkmasının başlıca nedeni olarak düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesi gösterilebilir. Böylece CVD yönteminde yaşanan alttaş olarak kullanılan materyallerin özelliklerini olumsuz etkileyecek sıcaklık etkisi bertaraf edilebilmektedir. Bu yüzden, PVD tekniği ile üretilen ince film kaplamalar alttaşın yüzey özelliklerini geliştirerek film alttaş arasındaki yüzey etkileşimine olumlu katkı sağlayabilmektedir.

4.2.1. Doğru akım (DC) saçtırma yöntemi

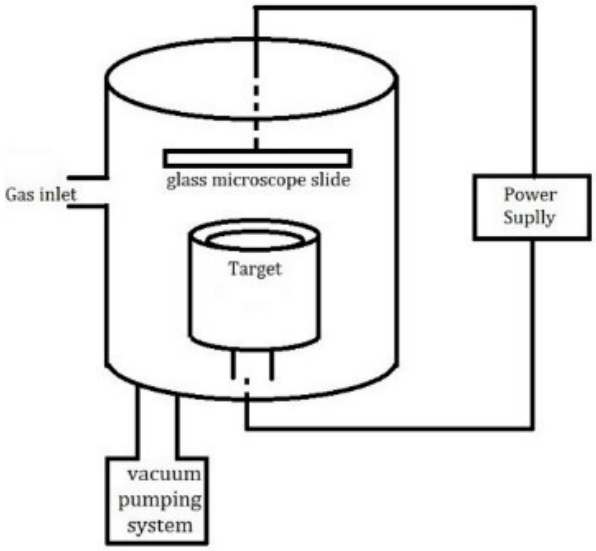
Doğru akım (DC) saçtırma, vakum altında biriktirmenin gerçekleştirildiği alttaşın yerleştirildiği anot ve hedef malzemenin yer aldığı katottan oluşan bir çift düzlemsel elektrottan oluşan bir sistemdir. DC saçtırma yönteminde ince film üretimi için soygazlar kullanılır. İyonize hale getirilmiş soygaz atomlarını hızlandırmak için bir enerji gereklidir. Soygaz atomlarını hızlandırmak için DC gücü vasıtasıyla elektrik alana dik doğrultuda manyetik alan uygulanarak, oluşturulan bu elektromanyetik alan sayesinde hedef üzerinde iyon yoğunlaşması sağlanmış olur. Bilindiği üzere manyetik alan ile parçacıkların kontrolü mümkün kılınmaktadır. Bu alan etkisiyle hedeften kopan elektronlar yüzey etrafında yoğunlaştırılmaktadır. Yüzey etrafında dolaşan bu elektronlar yüzey üzerinde yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturmaktadır. DC saçtırma süreci oluşan bu plazma yolu ile başlamaktadır. Bu yöntem ile uygun alttaşlar üzerine tek tabakalı ince filmler büyütülebildiği gibi çok tabakalı film büyütme içinde uygun bir yöntemdir. Bu yöntem ile ince film büyütme esnasında kalınlık kontrol sistemi ile film kalınlığı ve kaplama oranı, ısı kontrol sistemleri (soğutma ya da ısıtma) ile sıcaklık gibi ince film kaplama parametrelerinin kontrolü sağlanabilmektedir. Genellikle çok tabakalı ince film büyütme için birden fazla saçtırma hedefinin bulunduğu sistemler kullanılmaktadır (Addemir ve Tavşanoğlu, 2009). Bu yöntem bazı dezavantajlara sahiptir. Bunlar; düşük plazma yoğunluğu, düşük depolama oranı, yüksek deşarj voltajına gereksinim duyulması, yönlenme eksikliği, en önemlisi de yalıtkan film büyütülememesidir (Waite vd., 2007). DC saçtırma yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.6 da yer almaktadır.



Şekil 4.6 DC reaktif saçtırma yöntemi (Tsuboi vd., 2003)

4.2.2. Radyo frekansı (RF) saçtırma yöntemi

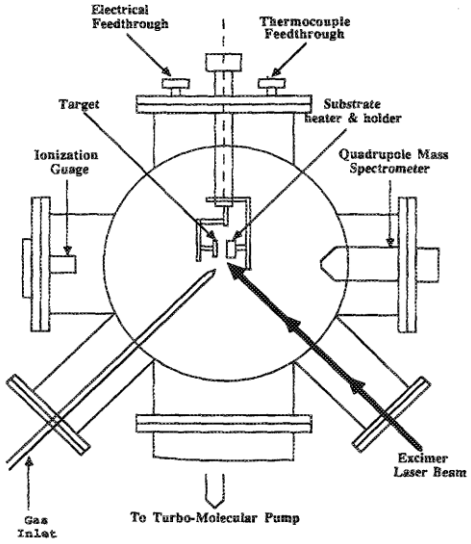
RF saçtırma yöntemi ilk 1960'lı yıllarda Davides and Maisel tarafından dielektrik filmler üretmek için kullanılmıştır (Waite vd., 2007). RF saçtırma yöntemi de DC saçtırma yöntemi ile benzer koşullara sahiptir. Bu yöntemde güç kaynağı olarak doğru akım yerine radyo frekansı güç kaynağı kullanılmaktadır. Endüstriyel-bilimsel ve tıbbi araştırmalar için Federal İletişim Komisyonu tarafından belirlenen frekans 13.56 MHz ve 27 MHz dir ve bu sistemlerin çoğu 13.56 MHz frekansta çalıştırılır (Kutz, 2015). RF saçtırma sistemi; vakum odası, vakum pompası, radyo frekansı güç kaynağı, eşleştirme ünitesi olmak üzere dört ana kısımdan oluşur ve şematik gösterimi Şekil 4.7 de yer almaktadır. Radyo frekansı güç kaynağı ile elektromanyetik dalgalar oluşturulur. Bu dalgalar eşleştirme ünitesi sayesinde vakum odası içinde titreşim frekansı oluşturarak hedef materyalin iyonize olması sağlanır. Frekansın yüksek olması plazma deşarjını sürekli hale getirir. DC saçtırma yöntemine göre daha düşük depolama oranına sahiptir. Elektrotlar arasındaki pozitif iyon sayısını artırmak için katodun arka kısmına mıknatıs yerleştirilmektedir. Bu şekilde yapılan saçtırma işlemi, RF magnetron saçtırma yöntemi olarak adlandırılır. Bu teknikte iyonlaşmış soygaz atomlarını hızlandırmak için kullanılan elektriksel alana ek olarak bu alana dik doğrultuda bir manyetik alan uygulanır. Manyetik alan sayesinde elektronlar sarmal yörünge boyunca hareket ederek depolama oranı artmaktadır. Ayrıca bu teknikle hedeften kopan elektronların alttaşa ulaşması manyetik alan sayesinde önlendiğinden alttaş üzerindeki filmin ısınması da bir dereceye kadar önlenmiş olur. Yine bu yöntem ile daha düşük basınçlarda plazma oluşturulabilmektedir. RF saçtırma yöntemi yalıtkan malzemelerinde kullanımına olanak tanıması, plazma veriminin yüksek olması, düşük basınçlarda üretimin gerçekleştirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir. Yöntemin dezavantajları olarak; düzensiz plazma yoğunluğu, dolayısıyla depolama oranının düzensiz olması sayılabilir (Waite vd., 2007).



Şekil 4.7 RF saçtırma yöntemi (Özen vd., 2016a)

4.2.3. Lazer demeti ile buharlaştırma (PLE) yöntemi

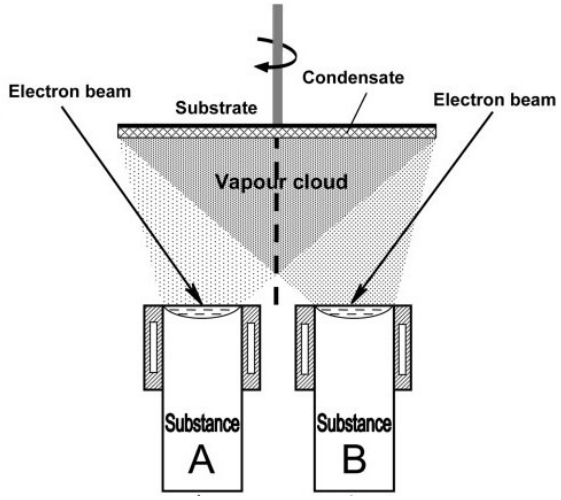
Lazer ile buharlaştırma yönteminde ince film üretimi, vakum ortamında kaplanacak hedef materyal üzerine lazer ışınlarının düşürülmesi ile buharlaştırılır. Buharlaşan materyal ince film olarak istenilen alttaş üzerine biriktirilir. Hedef materyal tercihen alttaş yüzeyine dik olacak şekilde konumlandırılır. Bu üretim yönteminde 10^5-10^7 K gibi yüksek sıcaklıklara ulaşılmaktadır. Kullanılacak lazerin dalga boyu buharlaştırılacak materyalin ışınım soğurma karakteristiği ile bağlantılıdır (Singh ve Narayan, 1990; Willmott ve Huber, 2000). Üretilecek materyalin parametreleri lazer ışın enerjisi yoğunluğundan bağımsız ise ışının enerji yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak buharlaştırılan materyalin kalınlığında doğrusal bir artış gözlemlenecektir. Üretilen plazmanın frekansı kullanılan lazerin dalgaboyu frekansından daha küçük olmalıdır. Aksi halde tüm ışınım plazma tarafından geri yansıtılır. Bu açıdan kullanılan lazerin dalgaboyu ince film üretiminde önemli bir parametredir. Üretilen filmin özelikleri enerji yoğunluğuna, lazerin dalgaboyuna, darbe süresine ve sistem geometrisi gibi bazı üretim parametrelerine bağlıdır (Singh ve Narayan, 1990). Bu tekniğin en önemli avantajı lazer ışınını soğurabilen yüksek erime sıcaklığına sahip materyaller buharlaştırılabilmekte, dielektrik ve seramik filmler, diğer çoklu oksit ve nitrit bileşiklerin üretiminin gerçekleştirilebilmesi gösterilebilir (Willmott ve Huber, 2000). PLE yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.8 de yer almaktadır.



Şekil 4.8 PLE yöntemi (Singh vd., 1990)

4.2.4. Elektron demeti ile buharlaştırma (EBPVD) yöntemi

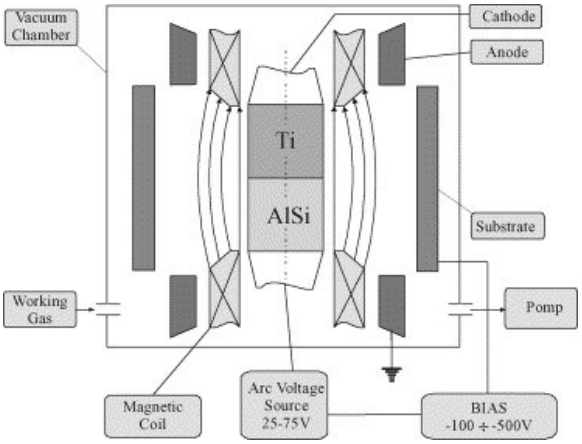
Elektron demeti ile buharlaştırma (EBPVD) yönteminde buharlaştırılacak malzeme su soğutmalı bir gövdenin içindeki potaya yerleştirilir. Pota içindeki materyal, potanın altında bulunan filaman tarafından yayınlanan ve bir manyetik alanla yönlendirilen elektronlarla bombardıman edilerek ısıtılır ve buharlaştırılır. Erime ve buharlaşma potadaki şarjın elektron demetine maruz kalan yüzey kısmından başladığı için kirlilik (safsızlık) diğer termal buharlaştırma yöntemlerine göre daha az düzeyde olur. Bu yöntemde manyetik alanın kullanım avantajı buhar kaynağı üzerinde tarama yapmaya olanak tanıması ve daha homojen bir buharlaşmayı ve erimenin malzeme yüzeyinde kalmasını sağlamaktır. Yöntemin diğer avantajları olarak ince filmlerin yapısal ve morfolojik kontrolü, biriktirilen filmin daha orantılı üretiminin sağlanması, malzemeden yararlanma verimliliği, buhar akışının yönlülüğü, yüzeyde manyetik alan avantajıyla tarama yapılarak daha homojen buharlaştırma yapmanın mümkün olması, yüksek ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerin buharlaştırılabilmesi gösterilebilir (Ohring, 2001). Bu yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.9 da verilmiştir.



Şekil 4.9 EBPVD yöntemi (Movchan, 2006)

4.2.5. Katodik ark buharlaştırma yöntemi

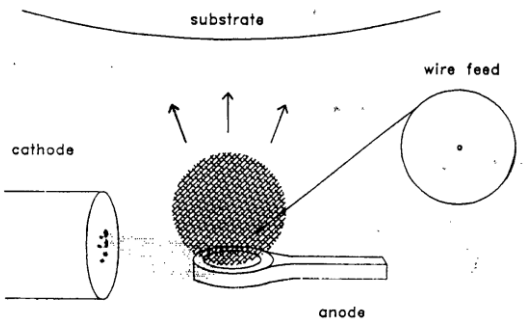
Diğer bir fiziksel buhar biriktirme yöntemide adından da anlaşılacağı üzere katodik ark ile materyalin buhar fazına geçirildiği katodik ark buharlaştırma yöntemidir. Bu yöntem ile sertlik derecesi yüksek aşınmaya dirençli ince filmler biriktirilebilmektedir. Katodik ark buharlaştırma sisteminde vakum odası içinde kaynak olarak kullanılacak katot materyali ve anot görevi gören alttaş, katodik ark için gerekli enerjiyi sağlayacak alttaşa uygulanacak bias voltajı güç kaynağı ünitesinden oluşmaktadır (Demir, 2007). Katodik ark uygulaması için buharlaştırılacak materyal ve vakum odasının duvarları arasına düşük voltaj (20-30V) yüksek akım (100-200A) özelliğine sahip bir potansiyel uygulanır. Katot elektrotunda arkın oluştuğu bölgelerde çok yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 2500 °C) ulaşması bu bölgelerde erimeleri ve buharlaşmaları meydana getirir. Katot üzerinde arkın oluştuğu noktalar sabit değildir ve hızla yer değiştirirler. Böylece katodun homojen olarak buharlaşması sağlanır. Negatif bias voltajı uygulanmış alttaşa doğru yönlendirilen iyonlar alttaş üzerinde biriktirilirler. Katodik ark ile buharlaştırma tekniğinin yararları arasında metalik parçacıkların tamamına yakınının iyonizasyonu ve iyonların yüksek kinetik enerjiye sahip olması, yüksek buharlaştırma verimi sayılabilir (Swift, 1996). Tekniğin ön plana çıkan en önemli dezavantajı ise katot yüzeyinde oluşan arkın etkisiyle 0.1–100 μm boyutlarında makro parçacıkların kopmasıyla ortaya çıkan kaplama yüzeylerinde droplet olarak bilinen kusurların meydana gelmesidir (Demir, 2007). Katodik ark buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.10 da yer almaktadır.



Şekil 4.10 Katodik ark buharlaştırma yöntemi (Gołombek vd., 2004)

4.2.6. Anodik ark buharlaştırma yöntemi

Bu fiziksel buhar biriktirme yönteminin katodik ark buharlaştırma yönteminden en belirgin farkı kaynak olarak kullanılan katot materyalinin bu yöntemde anotta yer almasıdır. Bu sistem basit olarak vakum pompası, vakum odası, pasif görev alan bir katot, materyalin yer aldığı anot ve vakum odası içine yerleştirilen alttaş tutucudan oluşmaktadır ve yöntemin basit bir şematik gösterimi Şekil 4.11 de verilmiştir. Anodik ark uygulaması düşük DC voltajında (40-50 V) ve düşük akımda (>14 A) gerçekleştirilir. DC güç kaynağı bir indüktif direnç aracılığıyla elektrotlara DC akımı uygular. Katot 25mm yarıçapında bir karbon diskten oluşmaktadır (Wang, 1999). Bu karbon diski saran bir porselen silindir bulunmaktadır. İnce film üretimi yüksek vakum şartlarında gerçekleştirilmektedir. İnce film üretimi, 1 eV dan daha düşük sıcaklığa sahip tek tek iyonize olan elektronların vasıtasıyla anotta yer alan materyalin buharlaştırılmasıyla alttaş üzerine biriktirilir (McGuire vd., 2012). Katodik ark biriktirme yönteminde üretilen filmlerde oluşan büyük boyutta dropletler bu yöntemde çok sayıda küçük boyutlu droplet olarak karşımıza çıkmaktadır (Wang, 1999).



Şekil 4.11 Anodik ark buharlaştırma yöntemi (Siefert, 1993)

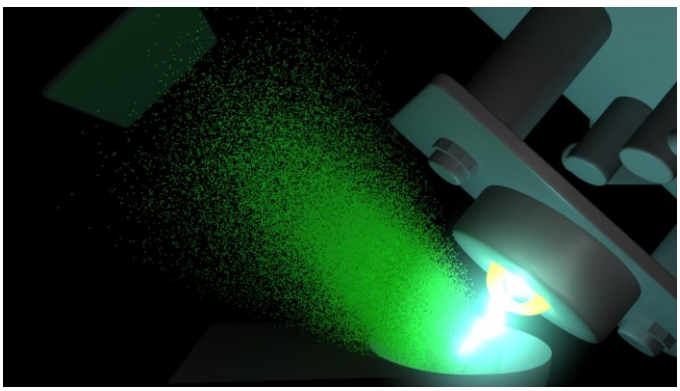
5. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) YÖNTEMİ

Gazlarda elektriksel deşarjın incelenmesi ilk kez 1808 yılında Sir Humphry Davy tarafından kararlı hal DC ark deşarjın geliştirilmesi ile başlamıştır. Daha sonra ise 1830'lu yıllarda Michael Faraday ve arkadaşları tarafından yüksek voltaj DC elektriksel deşarj tüpünün geliştirilmesi ile devam etmiştir. Plazma tanımı ilk kez 1879 yılında Sir William Crookes tarafından maddenin dördüncü hali olarak tanımlanmıştır. İyonlaşan gazın, maddenin dördüncü hali olan ve sürekli hareket halindeki negatif ve pozitif olarak yüklü parçacıklardan oluşan plazma hali olduğu anlaşılmıştır (Chakraborty ve Ledwani, 2016). Elektriksel deşarj zaman içerisinde çeşitli materyal üretim yöntemlerinin temelini oluşturmuştur ve zamanla geliştirilmiştir (Swift, 1996; McGuire vd., 2012; Wang, 1999). 1983 yılında yüksek vakum koşullarında (10^{-6} Torr) anot materyalinin plazmasının üretilebilmesine olanak tanıyan termiyonik vakum ark (TVA) adıyla yeni tip bir vakum ark üretim yöntemi Ulusal Lazer Plazma ve Radyasyon Fiziği Enstitüsünün (INFLPR, Bükreş, Romanya) alt grubunda yer alan Geavit Musa ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Musa vd., 1983). Termiyon kavramı yüksek sıcaklıkta materyalden elektriksel yüklü parçacığın sızıntısı ya da yüksek sıcaklıktaki materyallerden elektron veya iyon salınımı şeklinde tanımlara sahiptir (Richardson, 1909; Hall, 1929; Brewer, 1928; Özen vd., 2015a; Özen vd., 2016; Pat vd., 2016a; Özen vd., 2016b).

Termiyonik vakum ark (TVA) yönteminde anot materyalinin yüksek vakumda plazması oluşturulması esnasında tampon gazı kullanılmadığı için oluşan deşarj, gaz karışımı içermeyen saf metal plazması olmaktadır. TVA yöntemi erime sıcaklığı düşük yada yüksek metal, seramik, yarıiletken gibi hemen hemen her materyalin plazmasını üretebilen bir ince film üretim yöntemidir. TVA istenilen her materyal üzerine kaplama yapılabilme olanağı tanıyan özel bir yöntemdir. Örneğin kumaş, plastik materyaller, bardak, mermer, takı taşları, tarımda kullanılan aletler, gözlük camları vb. materyaller üzerine kaplamalar yapılabilmektedir. TVA yöntemi ile şu ana kadar alüminyum, kalay, nikel, magnezyum, molibden, bakır, altın, gümüş gibi metallerin; bor, çinko oksit, çinko sülfür, silisyum, germanyum, galyum arsenik gibi yarıiletkenlerin; bor nitrür, titanyum dioksit, alüminyum oksit gibi seramiklerin; karbon gibi ametallerin plazması üretilmiştir (Musa vd., 1983;

Balbağ, 2009; Özkan, 2010; Şenay vd., 2014; Pat vd. 2015a; Özen vd., 2015b; Özen vd., 2016a; Pat vd., 2016a).

TVA yönteminde anot elektrotu içine yerleştirilen materyal (metal, seramik ya da yarıiletken), katot elektrotu tarafından üretilen elektronlarla bombardıman edilmektedir. Katottan yayınlanan elektronlar, anot materyali üzerine Wehnelt silindiri vasıtasıyla odaklanmaktadır. Düşük voltajlı güç kaynağı vasıtasıyla filament üzerinden akım geçirilir. Böylelikle filamentin ısınması ve termiyonik emisyon yapması sağlanır. Bu durumda ısıtılmış katot (filament) ile anot arasına yüksek voltajlı güç kaynağı ile voltaj uygulanarak filamentten termiyonik emisyonla birlikte elektron emisyonu sağlanır. Aynı zamanda elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj, yayınlanan elektronların anot içinde bulunan materyal üzerine hızlanmasını ve onun ısınmasını sağlar (Pat vd., 2015b). Elektronlar tarafından anot üzerine aktarılan termiyonik enerji, anot içinde bulunan materyalin önce erimesine ve daha sonra sürekli bir şekilde buharlaşmasına yol açmaktadır. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttırıldığı takdirde uygun bir voltaj değerinde elektrotlar arası uzayda anot materyali buharında parlak bir deşarj oluşur. TVA yönteminde bir tampon gaz kullanılmadığı için oluşan deşarj saf materyal buharı deşarjı olmaktadır. Şekil 5.1 de TVA buhar deşarjının simülasyon görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.1 TVA üretim yöntemi simülasyonu

5.1. TVA Vakum Odası

Şekil 5.2'de gösterilen vakum odasının yüksekliği 60 cm ve çapı 70 cm olan 10^{-9} Torr ultra yüksek vakum değerine dayanabilecek şekilde tasarlanmış ve paslanmaz çelikten özel olarak imal edilmiştir. Vakum odasının üst kısmında yer alan parça elektrikli bir vinç

yardımıyla açılıp kapanabilmektedir. Bu sayede bir tabla üzerine monte edilmiş taşınabilir elektrotlar sistemi ve alttaşların konulduğu alttaş tutucu sistem vakum odası içinden kolayca çıkarılıp tekrar yerine konulabilmektedir. Bu üst kısım ile vakum odası arasında vakumun korunması için sızdırmazlık elemanı olarak özel lastik (O-ring) kullanılmaktadır. Vakum odası üzerinde 50 mm çapında ve tutucularla kapakları tutturulmuş sistem içerisine elektrik bağlantılarının ve basınç, akım, voltaj ölçerlerin bağlantılarının girişini sağlamak üzere boşluklar mevcuttur. Yine aynı şekilde vakumlama için 100 mm çapında bir giriş mevcuttur. Katoda dışarıdan yüksek akım verilirken ve anoda yüksek voltaj uygulanırken katot ve anot bağlantılarının vakum odasına kısa devre yapmaması için; anot ile katodun elektriksel bağlantılarının vakum odası ile teması seramik yalıtkanlar ile yalıtılmıştır (Deligöz, 2006).

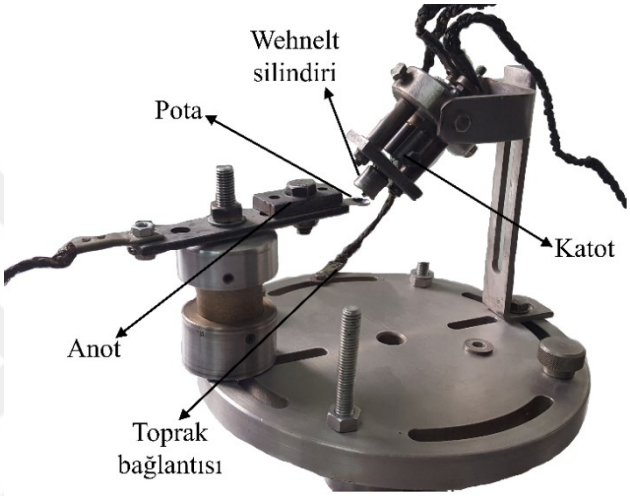


Şekil 5.2 TVA vakum odası

5.2. Elektrotlar Sistemi

TVA yönteminin elektrotlar sistemi, Şekil 5.3'te görüldüğü gibi katot ve anot olarak adlandırılan ve konumları istenilen şekilde değiştirilebilen iki elektrottan oluşur. Katot elektrotu değişik kalınlıklara sahip tungsten tellerden istenilen çaplarda sarılarak elde edilen ve elektron tabancasının ucuna yerleştirilen bir filamenttir. Katot filamentinin çevresinde molibdenden yapılmış elektron demetini anot üzerine odaklamak amacıyla elektrostatik mercek görevi yapan bir Wehnelt silindiri bulunmaktadır. Bu Wehnelt silindiri içine yerleştirdiğimiz filamentin dışarıdan elektrik bağlantılarının yapılacağı mekanizmalarla birlikte düzenlenişine elektron tabancası adı verilmektedir. Anot elektrotu ise içine

buharlaştırılarak plazması oluşturulacak materyalin konduğu genellikle kaşık şeklinde karbon, tungsten ve molibden gibi materyallerden yapılmış bir potadır. Kullanılan pota materyali, potaya konulan üretilecek materyal ile alaşım yapmayacak şekilde seçilmesi gereklidir. Materyal plazması üretiminde pota seçimi bu açıdan kritik bir önem arz etmektedir. Katodun içine yerleştirildiği elektron tabancası ile anot elektrotları paslanmaz çelikten yapılmış bir tabla üzerine monte edilmiştirler. Bu tabla üzerinde katot ile anot arasındaki açı ve uzaklık ayarlanabilmektedir.



Şekil 5.3 TVA elektrotlarının düzenlenişi

5.3. Güç Kaynağı

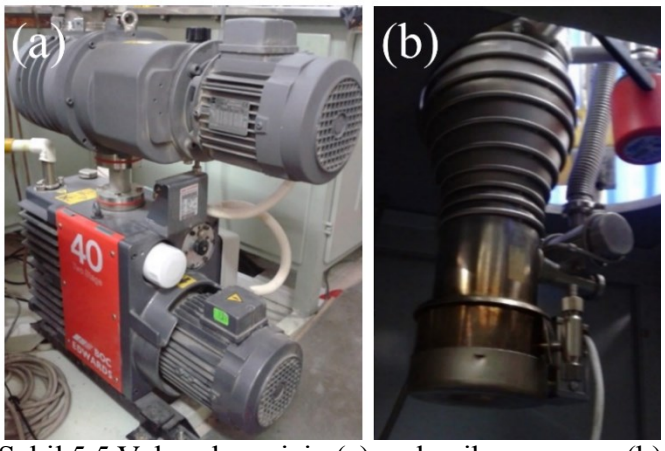
TVA sisteminde iki ayrı güç kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Katot ve anot güç kaynağı olarak TVA için aynı pano üzerine yerleştirilmiş iki elektriksel kaynak kullanılmıştır. TVA için özel olarak üretilmiş güç kaynağının fotoğrafı Şekil 5.4'te yer almaktadır. Bu güç kaynakları yüksek akım (0-200A alternatif akım) ve yüksek voltaj (0-5000V doğru akım voltajı) üretebilmektedir. Katot elektrotun filamanından termiyonik emisyon sağlamak için bir düşük voltajlı AC güç kaynağı kullanılmaktadır. Bu güç kaynağı 12V voltaj değerine sahip ve 200A'lik bir akım sağlayabilmektedir. Elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulamak için ise yüksek voltajlı bir DC güç kaynağı kullanılmaktadır. Bu güç kaynağı ise 0-5kV arasında değişen hızlandırma potansiyeline sahiptir. Pano üzerinde her iki kaynağın açma kapama düğmeleri, sigortaları ve uygulama voltajlarının kademe kademe arttırılabildiği varyakları bulunmaktadır.



Şekil 5.4 TVA sistemine özel güç kaynağı

5.4. Vakum Sistemleri

Vakum odasının vakumlanması için Edwards E2M40/EH250 marka ve modele sahip bir mekanik pompa ve Edwards Diffstak 63/150 marka ve modele sahip difüzyon pompası kullanılmaktadır (Şekil 5.5). Mekanik pompa ile vakum odasının basıncı 10^{-3} Torr'a kadar indirilebilmektedir. Difüzyon pompasının çıkışı mekanik vakum pompasının girişine bağlanır. Difüzyon pompası 10^{-1} Torr çıkış basıncı değerinden daha küçük basınçta çalışabilmektedir. Bu nedenle daha düşük basınçlara ulaşması için 10^{-1} Torr değerine ulaştıktan sonra difüzyon pompası çalıştırmaya başlanır. Difüzyon pompasının devreye girmesiyle vakum odasının basıncı 10^{-6} Torr'a kadar ulaşmaktadır. Kullanılan vakum pompalarının fotoğrafları Şekil 5.5 de yer almaktadır.



Şekil 5.5 Vakumlama için (a) mekanik pompa ve (b) difüzyon pompası fotoğrafları

5.5. Basınç Ölçüm Sistemi

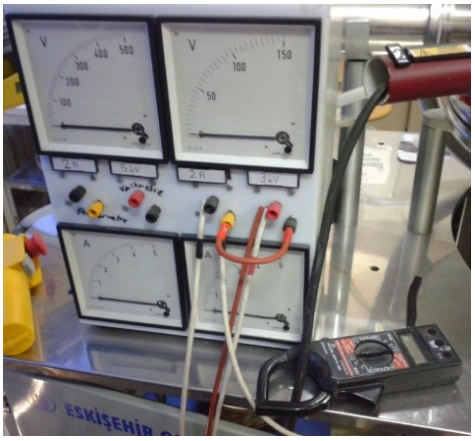
Vakum odasının basıncı Edwards Active Pirani Gauge APG-M marka ve modelde düşük basınçölçer ve Edwards Active Inverted Magnetron Gauge AIM-S marka ve modelde daha düşük basınç ölçebilen basınçölçer ile ölçülmektedir. Düşük basınçölçer 10^{-3} Torr'a kadar olan düşük basınçları doğrulukla ölçebilmektedir. Daha düşük basınçları ölçebilen diğer basınçölçer ise 10^{-3} ile 10^{-6} Torr arasındaki değerleri doğrulukla ölçebilmektedir. Bu her iki basınçölçer Edwards TIC Instrument Controller D39701000 marka ve modelde bir vakum kontrol cihazına bağlıdır (Şekil 5.6). Bu kontrol cihazının bağlantılı olduğu bilgisayarın ekranında üretici firma tarafından sağlanan yazılım kullanılarak basınçölçerlerin ölçtükleri değerler ayrı ayrı gözlenebilmektedir.



Şekil 5.6 Basınçölçer kontrol cihazı fotoğrafı

5.6. Akım ve Voltaj Ölçüm Sistemi

Şekil 5.7'de akım ve voltaj ölçüm sistemlerinin fotoğrafı yer almaktadır. Yüksek akım ve yüksek voltaj değerlerinin ölçülebilmesi için uygun direnç eklemeleri yapılarak özel olarak tasarlanmış ampermetre ve voltmetreler kullanılmaktadır. Ampermetre ve voltmetre ile kaplanacak materyallerin termiyonik vakum arklarının oluşturduğu elektrotlar arasındaki deşarj akımı, ateşleme voltajı ve voltaj düşümü değerleri ölçülebilmektedir. Ayrıca bir askı ampermetre ile katot filamenti üzerinden geçirilen filament akımı tespit edilebilmektedir.



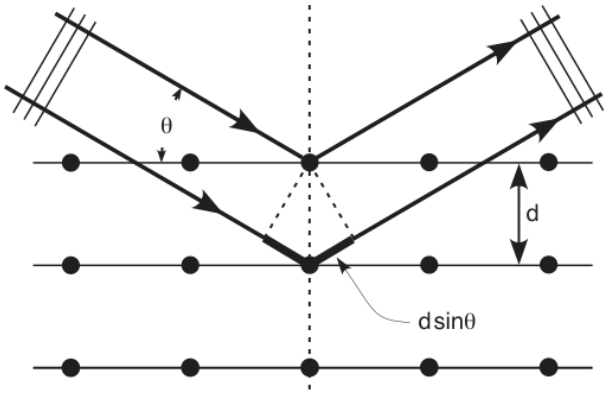
Şekil 5.7 Akım ve voltaj ölçerlerin fotoğrafı

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. İnce Film Analiz Teknikleri

6.1.1. X-ışını kırınım (XRD) cihazı

X-ışını kırınım (XRD) analiz yönteminde ultraviyole ışından daha kuvvetli, gamma ışınından daha zayıf enerjili X-ışınları kullanılmaktadır. XRD analiz yöntemi tahrip edici bir analiz yöntemi değildir ve numuneye zarar vermemektedir. X-ışınları 100-100000 eV aralığında foton enerjisine sahip elektromanyetik dalgalardır. Yöntemin çalışma prensibi kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalga boyuna sahip X-ışını dalgalarının kristal ile kırınıma uğraması sonucu düzlemlerden yansıyan X-ışını dalgalarının girişiminin dedekte edilmesine dayanmaktadır (Kelekçi, 2011). Tipik bir XRD cihazı monokromatik X-ışını üretebilen X-ışınları tüpü, gonyometre ve dedektörden oluşmaktadır. Diğer yapısal özellik belirleme yöntemlerine göre X-ışını kırınım yöntemi önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan bazılarını belirtecek olursak; yüksek çözünürlükte geniş alanların ölçümlerinin yapılabilmesi, vakumlama ihtiyacına gerek duyulmaması, ölçüm için ayrıyeten numune hazırlığı olmaması, gonyometre boyutlarını aşmadığı müddetçe numune boyutlarında sınırlama olmaması sayılabilir.



Şekil 6.1 Atomik düzlemlerden X-ışınlarının yansıması (Fang, 2016).

Şekil 6.1 de gösterildiği üzere gelen X ışının dalga boyu λ olmak üzere, θ gelen X ışını ile yansıtıcı düzlem arasındaki açı ve d ise paralel düzlemler arasındaki mesafe olarak tanımlanır. Materyalin üst atomik tabakasından X-ışını yansır, yine aynı şekilde alt atomik

tabakadan da X-ışını yansımaya uğrar. Alt atomik tabakadan yansıyan ışın 2dsinθ mesafesi kadar daha fazla yol alır. Eğer 2dsinθ mesafesi gelen monokromatik X-ışınlarının dalga boyunun tam katları şeklinde olursa her iki tabakadan gelen ışın da aynı fazda olur ve maksimum kırınım oluşur, eğer yarım katlarına eşit ise minimum kırınım oluşmaktadır. Numune yüzeyi belirlenen açı aralığında tarandığında X-ışını kırınım deseni ortaya çıkar. İşte bu oluşan kırınım deseni Bragg şartı olarak bilinen Denklem 6.1 ile açıklanmaktadır.

$$2\mathrm{dsin}\theta = \mathrm{n}\lambda \tag{6.1}$$

Burada n yansıma mertebesi ve θ ise Bragg açısı olarak adlandırılmaktadır. Saçılan X-ışını desenlerinin genişliğinden, kristal ince filmlerin kristal büyüklüklerini

$$L = \frac{\lambda}{\mathrm{dcos}\theta} \tag{6.2}$$

ile verilen Debye-Scherrer eşitliğinden tespit etmek mümkündür (Tamer, 2013).

6.1.2. Uv-vis spektrofotometre

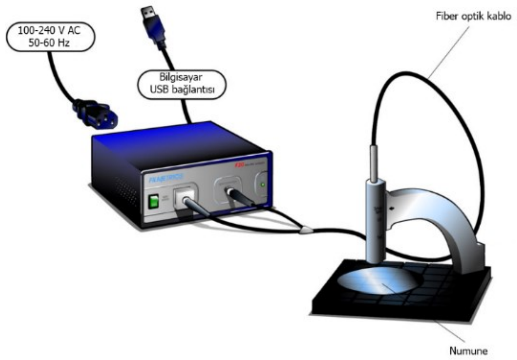
Bir ışın demetinin bir materyalden geçtikten veya bir materyal yüzeyinden yansıtıldıktan sonra şiddetinin azalmasına soğurma denilmektedir. Bu soğurma miktarının ölçülmesi işlemine absorpsiyon spektroskopisi ve bu ölçümün yapıldığı cihaza ise spektrofotometre cihazı denir. Spektrofotometre cihazları ölçüm alınan dalga boyu aralığına göre isimlendirilirler. Morötesi için Uv, görünür bölge için VIS ve kızıl ötesi için IR terimleri kullanılır. Bir Uv-VIS spektrofotometre cihazı morötesinden kızılötesine kadar olan dalgaboylarında ölçüm alabilmektedir. Uv-VIS spektrofotometre cihazı bir ışık kaynağı, bir monokromatör ve birde dedektörden oluşmaktadır. Uv-Vis spektrofotometre cihazlarında ışık kaynağı olarak cihazın ölçüm alabildiği elektromanyetik bölgeye göre tungsten fitilli lambalar, ksenon lambalar, döteryum ve hidrojen lambalar kullanılmaktadır. Monokromatör olarak cihazlarda genellikle prizma kullanılmaktadır. Morötesi ve görünür bölge ışınlarının dedekte edilebilmesi için fotovoltaik dedektörler, fototüpler ve foto çoğaltıcı tüpler olarak üç çeşit detektör kullanılmaktadır.

Bir ışık kaynağı geniş dalgaboyu aralığına sahip ışınlardan oluşmaktadır. Materyalin soğurma ölçümü esnasında ışık materyale ulaşmadan evvel ışık kaynağından gelen çok

dalgaboylu ışıktan (polikromatik) tek bir dalga boyunda (monokromatik) ışık seçilerek örneğe gönderilir ve polikromatik ışıktan monokromatik ışık elde edilmesini sağlayan düzeneğe monokromatör adı verilmektedir. Tek dalga boyuna ayrıştırılmış olan ışık materyal üzerine düşer. Burada eğer fotonun enerjisi, enerji bant aralığından daha büyük ise fotonlar soğurulur, enerji bant aralığından daha küçük ise fotonlar soğurulmadan direk geçer. Materyalden geçen ışığın ne kadar soğurulduğunu anlamak için geçen ışık demetinin şiddeti sistemdeki dedektör tarafından ölçülür. Bir kaydedici veya galvanometre aracılığıyla optik sinyal elektrik sinyaline dönüştürülür ve veriler bilgisayar yazılımı aracılığıyla elde edilir (Pat, 2007).

6.1.3. Filmetrics ince film analiz cihazı

Bir ince filmin yansıma ölçümleri yolu ile o ince filmin kalınlığı, kırılma indisi, sönüm katsayısı gibi optiksel sabitleri ve pürüzlülüğü belirlenebilmektedir. İnce filmin özellikleri bu cihaz ile belirlenirken ölçüm alınan dalgaboyu aralığında her bir dalgaboyuna karşılık gelen ince filmden yansıyan ışık miktarı ölçülür. Ölçülen bu yansıma tayfı hesaplanan yansıma tayfının bir dizi serisi ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma işlemi bilgisayar yazılımı vasıtasıyla gerçekleştirilir. Ölçülen ve hesaplanan yansıma eğrisinin uyumu GOF (goodness of fit) adı verilen eğri uyum iyiliği ile belirlenmektedir. Bu değer 0 (sıfır) ile 1 (bir) arasında değişen bir değerdir. Sıfır değeri hiçbir şekilde uyumun olmadığını, 1 değeri ise mükemmel bir uyuma işaret eder. Uygulamada 1 mükemmel uyum GOF değerine ulaşmak mümkün değildir. Kullanıcı FILMeasure adı verilen yazılım aracılığıyla sadece istediği GOF değerlerinde eşleştirme yapma seçeneğine sahiptir (Filmetrics, 2011). Filmterics F20 ince film analiz cihazının şematik gösterimi Şekil 6.2 de yer almaktadır.

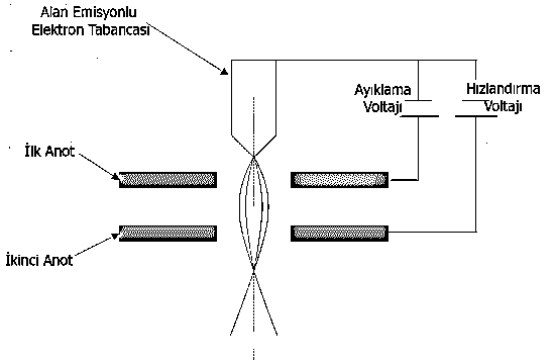


Şekil 6.2 Filmetrics F20 ince film analiz cihazı (Filmetrics, 2011)

Filmetrics cihazı ile ince film numunenin analizine başlamadan önce ışık kaynağının ışık şiddetinin dengeye gelmesi için cihaz en az 10 dakika süre ile çalıştırılır. Biriktirme işlemi yapılmamış alttaş numune yazılımda yer alan Baseline seçeneği ile tanıtılır. Alttaşın referansı alınırken materyalin kırılma indisi değerine göre belirlenen dalgaboyu aralığında ölçümler elde edilir. İncelenecek ince filmlerin 100 nm nin altındaki kalınlıklarında her 20-30 dakikada bir tekrar referans ölçümü alınmalıdır (Filmetrics, 2011). Üretilen ince filmin kırılma indisi, pürüzlülüğü gibi bilinen özellikleri yazılıma tanıtılarak üretilen ince film numunin yansıma ölçümleri fiber optik kablolar aracılığıyla elde edilir. FILMeasure yazılımı ölçülen ve hesaplanan yansıma tayflarını karşılaştırarak bir GOF değeri sunar. Bu GOF değeri en iyi uyumu gösterene kadar fiziksel parametreler değiştirilerek en doğru sonuca ulaşılmaya çalışılır.

6.1.4. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM)

C.J. Davison ve L.H. Germer, 1927 yılında deneysel olarak elektronun dalga doğasını göstermiştir. Bu iki bilimadamı yüksek enerjili bir elektronun dalgaboyunun düşük enerjili bir elektrondan daha küçük olduğunu ortaya koymuşlardır. Onların bu çalışmaları geometrik elektron optiğinin gelişmesine yol açmıştır ve E. Ruska ve M. Kroll tarafından 1931 yılında ilk elektron mikroskobunun icat edilmesine öncülük etmiştir. 1931 yılından bu yana elektron mikroskopları devamlı gelişime uğramıştır ve günümüzde alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobunun (FESEM) üretimine kadar ulaşmıştır. FESEM materyallerin yüzeysel özelliklerini belirlemek ve yüksek çözünürlükte görüntüler elde etmek için ışık yani foton yerine elektronları kullanan bir mikroskop türüdür. FESEM cihazının çözünürlük gücü nün yüksek olması, odaklama derinliğinin iyi olması, elde edilen görüntü ile analiz verilerini birleştirebilme özelliğinden dolayı kullanım alanı oldukça geniştir. Elektron mikroskoplarında önemli bir faktör olan çözünürlük gücü optik mikroskoplarda 2000 Å, SEM cihazlarında 25 Å, geçirimli elektron mikroskobunda (TEM) 1-2 Å ve FESEM cihazında 5-10 Å düzeyindedir (Çakıcı, 2014).



Şekil 6.3 Alan emisyonlu elektron tabancası tasarımı (Scanning Electron Microscope, 2016)

Bir FESEM sistemi başlıca elektron tabancası, dedektör, sinyal yükseltici, anot, tarama sistemi, manyetik mercek sistemi, sinyallerin görüntülendiği katot ışınları tüpü (CRT) ve kaydedildiği bilgisayar sisteminden meydana gelmektedir. FESEM cihazı ile ölçüm alınması için çok yüksek vakum (10^{-9}-10^{-10} Torr) koşullarına ihtiyaç duyulur. Yüksek vakum koşulları elektron tabancası bölgesinde oluşabilecek deşarjları önlemektedir. Ayrıca yayımlanan elektronun saçılmalara uğramadan doğrudan numuneye ulaşmasını sağlar. Alan emisyonlu elektron tabancası küçük bir ışın ile kararlı ve yüksek akım sağlamaktadır. Bu açıdan SEM cihazlarından daha iyi performans sağlamaktadır. Şekil 6.3 de alan emisyonlu elektron tabancasının tasarımı verilmiştir. Elektrostatik odaklama için 2 adet anot mevcuttur. İlk anot akım emisyonunu sağlarken ikinci anot yayımlanan elektron ışınının enerjisini artırmaya yöneliktir. Elektron ışınlarını yoğunlaştırma işlevi manyetik mercek sistemi tarafından gerçekleştirilir. FESEM görüntüsü elde edilirken elektron tabancası aracılığıyla yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların incelenecek numune üzerine odaklanması sağlanır. Numune yüzeyinin belirlenen parametrelerde hızlandırılan elektron demetiyle taranması sağlanır. Elektron ve numune yüzeyinin etkileşimi ile oluşan çeşitli girişimler sonucunda esnek ve esnek olmayan etkileşimler meydana gelir. Esnek saçılma etkileşimi ile elektronun yörüngesinde değişme olsa bile kinetik enerjisi etkilenmez. Esnek olmayan etkileşim ile elektrondan atoma enerji transferi gerçekleştirilir. Bu etkiler dedektör vasıtasıyla algılayıcılarda toplanırlar. Sistemde yer alan sinyal yükselticilerden bu sinyaller geçirildikten sonra CRT ekranına aktarılır. Toplanan bu sinyaller dijital sinyallere çevrilerek bu şekilde yüzey görüntüleme gerçekleştirilmiş olmaktadır (Çakıcı, 2014).

6.1.5. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), 1986 yılında Binning, Quate ve Gerber tarafından icat edilmiştir. Kullanılan birçok AFM cihazında lazer ışın demeti bükülme sistemi kullanılmaktadır. AFM cihazında lazer ışın demeti hassas konumlu foto diyot üzerine gelerek ışın demeti tip ya da kantilever denilen silikon veya silikon nitrit malzemeden yapılmış materyalin arka yüzeyinden yansır. Tip numune ile etkileşmediği zaman lazer bir referans noktası olarak foto diyotun merkezinde konumludur. Işın demetinin sivri uçlu tipi numune ile yakından etkileştiği zaman foto diyot üzerine konumlanan lazer ışın demetinin yer değişimine neden olan tip ve numune arasındaki kuvvetlere karşılık ışın demeti bükülmektedir. Sonuçta foto diyotun bir çeyrek dairesi, diğerine göre daha çok aydınlatılmaktadır. Foto diyotun alt ve üst kısımları arasındaki ışık şiddetindeki farklılığı ölçmek için farklı sinyal yaratılır ve voltaj sinyaline dönüştürülür. Bu sinyal, tip ve numune arasında kuvveti sabit tutabilmek için kontrol geri besleme kısmında kullanılmaktadır. Işın demeti numune yüzeyini belirlenen frekans aralığında satır satır taramaktadır.

Bu işlem sırasında tip ve numune arasındaki atomlar bir araya getirildiği için ilk olarak birbirleri ile zayıf olarak etkileşirler. Atomlar birbirlerine çok fazla yaklaşıncaya kadar bu etkileşim artmaktadır ve birbirlerini itmeye başlarlar. Uzaklık azaldığı için itici kuvvet sürekli çekici kuvveti zayıflatır. Atomlar arası mesafe birkaç angström olduğu zaman kuvvet sıfıra gider. Kuvvet pozitif olduğunda tip ve numune arasındaki atomlar birbirleri ile etkileşim içine girerler. Bu işlemin farklı uygulama şekillerinden bahsettiğimiz zaman tip ve numune arasındaki etkileşme önemlidir.

AFM cihazlarında genel olarak üç çeşit işlem uygulaması kullanılır. Bu işlemler kontak mod, non-kontak mod ve tapping mod olarak tanımlanırlar. Kontak mod işleminde tip numuneyi taraması sırasında numune yüzeyi ile yakın temas içindedir. Tip üzerindeki kuvvet karşılıklı moleküler kuvvet eğrisinin itici bölgesindedir. İtici bölgedeki işlem sayesinde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilebilmektedir. Çünkü bu bölgedeki kuvvetler çekici bölgeye göre daha büyüktür. Kontak mod işleminin dezavantajı, numune üzerinde tipin sürüklenmesinden dolayı büyük dış kuvvetler ortaya çıkar. Bu durum hem tipin hem de numunenin zarar görmesine neden olmaktadır. Bu nedenle özel durumlar haricinde pek tercih edilmeyen bir yöntemdir. Non-kontak mod olarak adlandırılan işlemde

tip ile numune yüzeyi arasında 50-150 angström mesafede ölçümler gerçekleştirilir. Çekici kuvvetler tip ve numune arasında baskın kuvvetlerdir. Çekici bölgedeki kuvvetler itici bölgesine göre önemli derecede zayıftır ve bu yüzden küçük salınımlar tip tutucu içine yerleştirilen piezoelektrik kristal titreşimleri ile tipin ucuna kadar ulaşır. Tip ve numune arasındaki kuvvetler salınım frekansı, genliği veya fazındaki ölçüm değişimleri ile bulunur. Tapping mod işleminde tipin titreşim frekansında ya da yakınında veya numunenin yüzeyinde taps olarak adlandırılan bağlantı salınımı gerçekleşir. Tip zamanın çok küçük periyotları için numune yüzeyi ile etkileşim içine girmektedir. İtici bölgedeki işlem ile yüksek çözünürlük elde edilir. Ancak tip numune ile kısa süreli etkileşim içinde olması nedeniyle kontak mod uygulamasında meydana gelen zararı azaltır. Tip tutucu içine yerleştirilen piezoelektrik kristal titreşimleri ile tip ve yakınında titreşim frekansı sürdürülür. Tarama sürecinde tip 50-500 kHz frekanslarında salınım yapar. Tip numune ile ara ara etkileşim içinde olduğundan salınımın genliği enerji kaybından dolayı azalır. Salınım genliğindeki azalma yüzey özelliklerini ölçmek ve tanımlamak için kullanılır.

Yüzey topolojisinin bazı uzaysal özellikleri istatiksel açıdan incelenerek histogram analizi aracılığıyla belirlenebilmektedir. İncelenecek numune yüzeyinde belirlenen tarama aralıklarında inişli çıkışların bölgelerin bölümsel boyut ayrımı yapılarak incelen yüzey üzerinde materyalin kapladığı alan, materyalin ve oluşan boşlukların hacimsel hesabı, ortalama yüksekliği, pürüzlülüğü, yüzeyin simetrik mi gaussiyan mı düz mü olduğunu söyleyen geometrik özellikleri, maksimum pikler (peaks) ya da çukurların (valleys) yüksekliği genişliği gibi bilgilere ulaşılabilmektedir. İstenilen tarama alanında AFM görüntüsü aldıktan sonra yüzey özellikleri incelenirken görüntüdeki en alçak nokta sıfır yükseklik olarak belirlenir ve geriye kalan tüm pikseller bu sıfır noktaya göre değer kazanır. İncelenen numunenin ortalama yüksekliği tüm piksel sayımlarının ortalaması alınarak AFM yazılımı aracılığıyla belirlenir. Bu yolla ana yüzey düzlemi belirlenir ve bu düzleme göre bir standart sapma mevcuttur. Ana yüzey düzleminden ortalama sapma değeri ortalama pürüzlülük değeri olarak ifade edilir. Tespit edilen bu ortalama pürüzlülük değerlerinin kareköklü sapma değerlerinin tespiti ile ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü değeri belirlenmektedir. Yüzey dağılımının şekli histogram analizi ile skewness (çarpıklık) ve kurtosis (basıklık) değeri ile tespit edilebilmektedir. Yüzeyin simetrik bir dağılım mı yoksa asmitrik bir dağılım mı gösterdiği bunun ne derecede olduğu skewness değeri ile değerlendirilebilmektedir. Analiz sonucu 0 (sıfır) skewness değerini gösteriyorsa yüzey

mükemmel simetrik dağılıma sahip demektir. Yüzey dağılımında pikler çukurlardan daha fazla ise skewness pozitif değer gösterecektir. Eğer yüzey daha düzlemsel ve çukurlu yapıya sahip ise negatif değer vermektedir. Yüzey dağılımın dikenli yapı yada düzlemselliğinin ölçüsü ise kurtosis değeri ile değerlendirilebilmektedir. Normal bir gaussiyan yüzey dağılımı 0 (sıfır) kurtosis değerine sahiptir. Eğer kurtosis değeri pozitif ise yüzey keskin piklerden oluşan dağılıma sahiptir. Eğer yüzey dağılımı düz tepelerden oluşan bir yapıdaysa negatif kurtosis değerine sahip olur. Ana yüzey düzleminin üstünde kalan pürüzlü yapının en yüksek değeri maksimum pik yüksekliğini, altında kalan çukurların en yüksek değeri ise maksimum çukur derinliğini verir.

6.1.6. Hall etkisi ölçüm sistemi

19. yüzyılın sonlarında manyetik alan altında tutulan bir metal şerit üzerinden akım geçirildiğinde dikey bir potansiyel oluştuğu Edwin Hall tarafından gözlemlenmiştir. Yarıiletken bir numunenin elektrik ve manyetik alan altında tutulması sonucunda karşılıklı yüzeyleri arasında potansiyel fark oluşması Hall etkisi olarak adlandırılmıştır. Hall etkisi ölçümleri ile bir yarıiletken materyalin özdirenci, iletim tipi, serbest taşıyıcı yoğunluğu, bu taşıyıcıların hareketliliği ve iletkenliği hakkında bilgi edinmek mümkündür (Narin, 2014). Manyetik alanın ve ortam sıcaklığının değişimi ile bu elektriksel özelliklerin incelenmesine olanak tanınmaktadır. Bu nedenle yarıiletkenlerin elektriksel karakterizasyon davranışları açısından oldukça önemli bir ölçüm sistemidir. Hall etkisi ölçümleri için çeşitli kontak alma yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler 6 veya 8 noktadan kontak alınan Hall bar ve 4 noktadan kontak alınan Van der Pauw yöntemleridir (Narin, 2014).

Hall etkisinin temel prensibi manyetik alan altında hareket eden elektronu saptıran Lorentz kuvvetine dayanır. Eğer manyetik alan akım yönüne dik olarak uygulanması halinde Hall voltajı hem akıma hemde manyetik alana dik olarak indüklenir. Yarıiletkenin iki yan yüzü arasında oluşan bu Hall voltajı (V_H)

$$V_H = \frac{I\,B}{nqt} \tag{6.3}$$

ile verilir. Burada; I numune üzerinden geçen akım, B uygulanan manyetik alan, n elektronların yük taşıyıcı yoğunluğu, q elektronun yükü ve t numunenin kalınlığıdır. Hall

etkisi yöntemi ile tespit edilen tabaka taşıyıcı yoğunluğu (n_s) denklemi Eşitlik (6.4) ile verilmiştir (Van der Pauw, 1958; Chandra vd., 1979;).

$$n_s = \frac{I\,B}{q|V_H|} \tag{6.4}$$

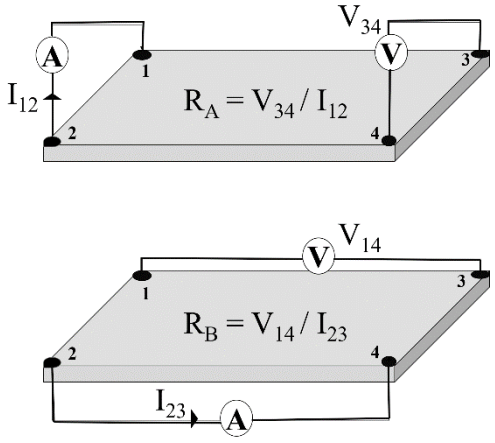
Van der Pauw yöntemi ile karşılıklı yatay ve düşey dirençler ölçülerek numunenin tabaka direnci belirlenebilmektedir.

$$e^{\left(-\frac{\pi R_A}{R_S}\right)} + e^{\left(-\frac{\pi R_B}{R_S}\right)} = 1 \tag{6.5}$$

Eşitlik (6.5) Van der Pauw eşitliği olarak bilinir. Mobilite olarak da bilinen taşıyıcı hareketliliği denklemi

$$\mu = \pm\frac{1}{qn_sR_s} \tag{6.6}$$

ile verilir (Measurer, 1930; Van der Pauw, 1958; Mayer vd., 1967). Taşıyıcı hareketliliği denklemi n-tipi yarıiletken materyallerde eksi (-), p-tipi yarıiletken materyallerde artı (+) işaretini alır. Van der Pauw ölçüm methodu ile Hall etkisi ölçümlerinin alınışı Şekil 6.4 de verilmiştir.



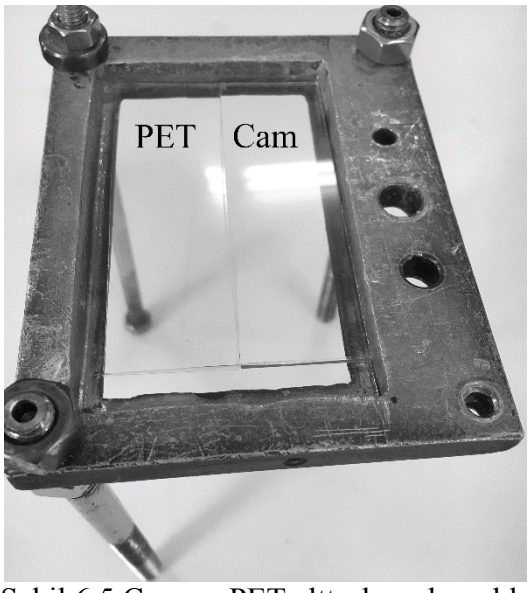
Şekil 6.4 Hall ölçümünde kullanılan Van der Pauw ölçüm tekniği

Hall etkisi ölçümü alınırken bazı koşulların mümkün olduğunca iyi sağlanması gereklidir. Uygulanan omik kontakların kalitesi ve kontak boyutları önemli faktörlerdendir. Ölçüm alınacak numunenin homojen olması ve numune kalınlığının bilinmesi yine ölçüm

sonuçlarının doğruluğu açısından önemlidir. Fotovoltaik ve fotoiletkenlik etkilerinin sıfıra indirilmesi için ölçümlerin karanlık ortamda alınması gerekir. Bilhassa ölçülenecek numunenin boyutları kontak boyutuna ve numune kalınlığına oranla büyük tutulmalıdır (Kelekçi, 2011).

6.2. GaN Temelli İnce Filmlerin Üretimi ve Üretim Parametreleri

GaN temelli ince filmlerin üretiminde cam ve polietilen teraftalat (PET) alttaşlar seçilmiştir. İnce filmlerin üretimi öncesinde alttaşların hazırlanması aşaması gerçekleştirilmiştir. Cam alttaş olarak 75mmx25mmx1mm boyutlarında İSOLAB marka ticari mikroskop camları kullanılmıştır. PET alttaş olarak A4 boyutlarında 0,08mm kalınlığında ticari şeffaf PET yapraklardan mikroskop camı boyutlarında kesilerek kullanılmıştır. Standart alttaş temizlik yöntemleri deney öncesinde cam ve PET alttaşlar için uygulanmıştır. Alttaşlar öncelikle saf su ile üzerlerindeki kaba kirliliklerden arındırılmıştır. Daha sonra etil alkol ile tüm alttaşlar temizlenmiştir. Ultrasonik temizleme cihazında saf su ile 50℃ sıcaklıkta her bir alttaş 5 dakika süre ile geri kalan kirliliklerden arındırılmış ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmıştır. Arındırma işleminden sonra sıvı emme özelliğine sahip kurutma kâğıtları aracılığıyla tüm alttaşlar kurumaya bırakılmıştır. Temizlenip kurutulan alttaşlar TVA sisteminde yer alan vakum odası içine yerleştirilen numune tutucu üzerine yatay şekilde konulmuşlardır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5 Cam ve PET alttaşların konulduğu numune tutucu

İnce film üretimi TVA tekniği ile herbir alttaş için tek katman olarak 9 ayrı deney ve toplamda 18 ayrı numune olarak gerçekleştirilmiştir. Numune tutucuya yerleştirilen alttaşlar ile üretilecek materyalin konulduğu anot potası arası mesafe sabit değer olarak cam alttaşlar için 90mm ve PET alttaşlar için 95 mm olarak ölçülmüştür. Deneylerde katot filamenti olarak 4 sarımlı 0,5mm çaplı tungsten tel kullanılmıştır. Anot materyalin konulduğu pota olarakta kullanılan materyal ile alaşıma girmeyecek molibden pota tercih edilmiştir. Üretimde anot malzemeleri olarak Alfa Aesar marka %99.99 saflıkta GaN, B, Al, In, C, Si, Ge, Sn, ve Pb materyaller kullanılmıştır. Kullanılan anot materyallerinin kütleleri 0,01 gram hassasiyete sahip Super Scale SS-H elektronik laboratuar terazisi aracılığıyla tespit edilmiştir. Saf GaN ince film üretim deneyinde 0,03 gram GaN malzeme kullanılmıştır. Diğer deneylerde 0,03 gram kütleli GaN malzeme ile birlikte 0,01 gram kütleli B, Al, In, C, Si, Ge, Sn ve Pb malzemeler kullanılmıştır. Anot ve katot elektrotları arası mesafe herbir deney için sabit tutularak 4 mm olarak ayarlanmıştır. Katot elektrotunun anot elektrotuna olan açısı ise 45° olarak sabitlenmiştir.

Deney öncesi işlemlerden sonra vakum odası elektrikli vinç aracılığıyla kapatılmıştır. Vakum odası önce mekanik pompa vasıtasıyla 10^{-3} Torr basınç değerine kadar vakumlandıktan sonra difüzyon pompası devreye girerek 10^{-5} Torr vakum değerine ulaşılmıştır. Yüksek vakum koşullarına (10^{-5}-10^{-6} Torr) ulaşıldığında güç kaynağı aracılığıyla katot filamenti tüm deneyler için 18A'lik akım değeri ile ısıtılarak termiyonik elektron salınımı gerçekleştirilmiştir. Anot elektrotunda bulunan materyal ya da materyaller bu ısıtma akımı ile eritilmiştir. Bu erime işlemi ardından DC güç kaynağı ile uygulanan voltaj tüm deneylerde 200V'a ulaştığında parlak materyal plazması oluşmuştur. Plazmanın oluşması ile voltmetreden okunan voltaj değeri 0V'u göstermiştir. Ampermetreden okunan deşarj akımı ise yaklaşık 600mA değerini göstermiştir. Oluşan plazma kaybolana kadar yani anot potasındaki materyal bitene kadar deneyler devam ettirilmiştir. Her bir deneyde farklı sürelerde deney gerçekleştirilmiştir. TVA yöntemi ile biriktirilen GaN temelli ince filmlerin üretim parametreleri Çizelge 6.1 de verilmiştir.

Çizelge 6.1 TVA tekniği ile biriktirilen ince filmlerin üretim parametreleri

Deney	Anot Materyali	Elektrotlar Arası Mesafe (mm)	Elektrotlar Arası Açı (°)	Üretim Basıncı (Torr)	Filament Akımı (A)	Uygulanan Voltaj (V)	Deşarj Voltajı (V)	Deşarj Akımı (A)	Deney Süresi (s)
1	GaN	4	45	$2x10^{-5}$	18	200	0	0,6	35
2	B ve GaN								50
3	Al ve GaN								45
4	In ve GaN								40
5	C ve GaN								60
6	Si ve GaN								50
7	Ge ve GaN								45
8	Sn ve GaN								45
9	Pb ve GaN								45

Filmetrics F20 interferometre cihazı aracılığıyla üretilen tüm ince film numunelerin kalınlıkları yüksek goodness of fit (GOF) değerlerinde tespit edilmiş ve Çizelge 6.2 de özetlenmiştir. GaN temelli ince filmlerin kalınlıkları 30 nm ile 65 nm arasında değişen değerler göstermiştir. PET alttaş üzerine üretilen ince filmler cam alttaş üzerine üretilen ince filmlerden daha az kalınlığa sahip oldukları görülmüştür. Aynı alttaş üzerine üretilen tüm numuneler göz önüne alındığında cam alttaşlar üzerine üretilen ince filmlerde kalınlıktaki sapma 20 nm iken, PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmlerde kalınlıktaki sapma 35 nm olarak tespit edilmiştir. Tüm bunların başlıca nedenleri olarak; alttaşların numune tutucuya konuldukları konum ile anot elektrodu arasında kalan mesafenin aynı olmaması, alttaşların farklı fiziksel özelliklerinden ötürü ince filmlerin tutunabilirliğinin farklı olması, ince filmlerin yapısal özelliklerinin farklı olmasından dolayı ölçümlerde sapma oluştuğu düşünülmüştür.

Çizelge 6.2 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen katkılı ve katkısız GaN ince filmlerin kalınlıkları

	Numune	**Kalınlık (nm)**		**Numune**	**Kalınlık (nm)**
Cam alttaş üzerine üretilen	GaN	50	**PET alttaş üzerine üretilen**	GaN	30
	BGaN	45		BGaN	40
	AlGaN	60		AlGaN	35
	InGaN	45		InGaN	30
	C katkılı GaN	45		C katkılı GaN	45
	Si katkılı GaN	45		Si katkılı GaN	40
	Ge katkılı GaN	65		Ge katkılı GaN	65
	Sn katkılı GaN	45		Sn katkılı GaN	40
	Pb katkılı GaN	45		Pb katkılı GaN	40

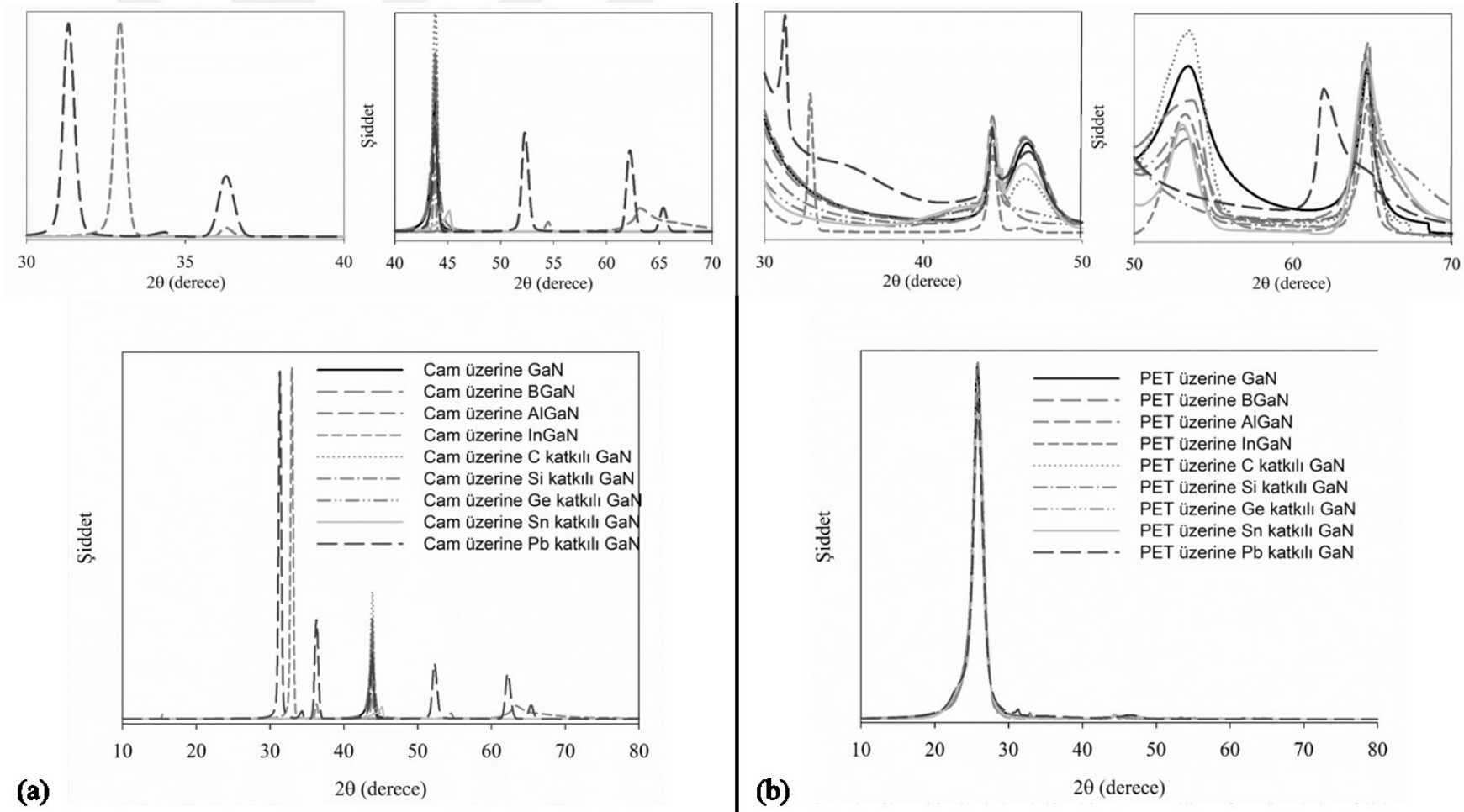
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. GaN Temelli İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesi

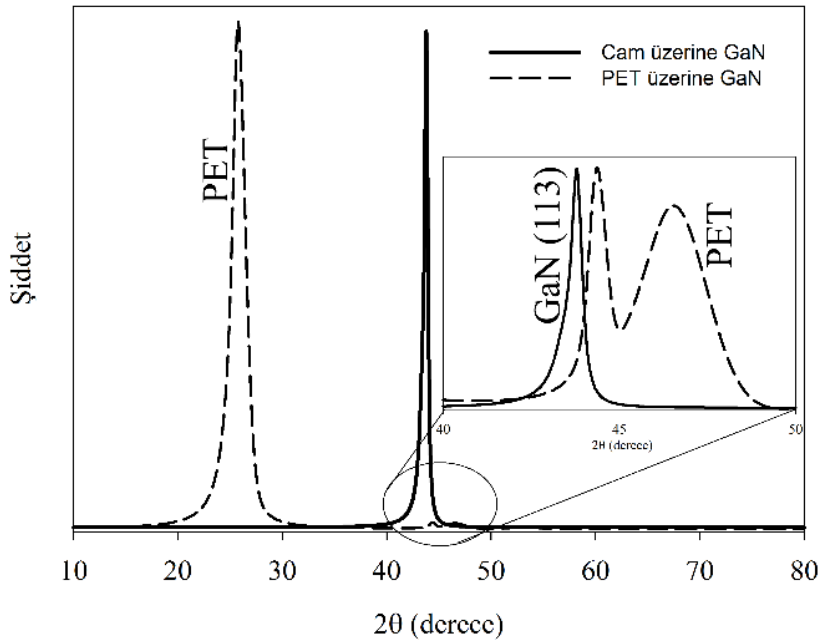
Bu çalışmada, üretilen filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için SmartLab gonyometreli Rigaku MiniFlex 600 X-ışını kırınım cihazı kullanılmıştır. Tüm ölçümler oda sıcaklığında 1,54056 Å dalga boyuna sahip CuKα ışını kullanılarak, 40 kV gerilim, 30 mA akımda, 3 derece/dk tarama hızında ve 0,02 derecelik adım aralığında, $10° \leq 2\theta \leq 80°$ tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen X-ışını kırınım desenleri Şekil 7.1 de cam ve PET alttaş üzerine tüm katkısız ve katkılı GaN üretimleri için verilmektedir. PET üzerine üretilen numunelerin XRD grafiklerinde 25,78° de görülen (100) yönelimli PET kristal yapısının şiddetli pikinden ötürü GaN pikleri 10°-80° tarama aralığında çizdirildiğinde görülememekteydi (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012). Bu nedenle 30°-70° tarama aralığında da çizdirilerek değişimler incelenmeye çalışılmıştır. Tüm numunelerin XRD analizleri ilgili başlıklar altında detaylı olarak sonuçları ve tartışması yapılarak verilecektir.

7.1.1. GaN ince filmlerin yapısal özellikleri

Cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen GaN ince filmlerin XRD desenleri tek bir grafik altında Şekil 7.2 de verilmiştir. Cam üzerine üretilen GaN ince film tek bir yerde 43,9° de pik göstermiştir. Bu pik değeri (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısı ile ilişkilendirilmektedir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). PET üzerine üretilen numune için XRD pikleri 25,78°, 44,32°, 46,52°, 53,2° ve 64,64° de oluşmuştur. 25,78°, 46,52°, 53,2° ve 64,64° 2θ değerlerinde gözlemlenen pikler gerilime uğramış kristal yapılı PET alttaşa ait XRD pikleridir (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). 44,32° 2θ değerinde gözlemlenen pik ise alttaşın etkisi ile farklı bir yerde oluşmuştur. Bu pik cam üzerine GaN ince film numunesinde ilişkilendirilen (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına aittir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen GaN ince film için yaklaşık 20 nm ve PET üzerine üretilen GaN ince film için yaklaşık 15 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretim için $2,5x10^{-3}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretim için $4,4x10^{-3}$ nm^{-2} dir.



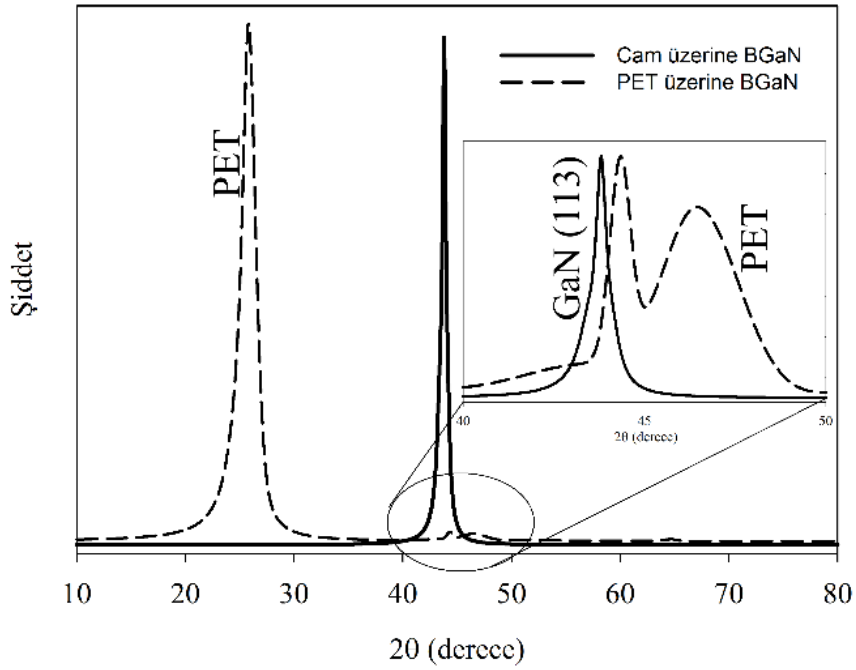
Şekil 7.1 (a) Cam ve (b) PET alttaşlar üzerine üretilen GaN temelli ince filmlerin XRD tayfları



Şekil 7.2 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin XRD tayfları

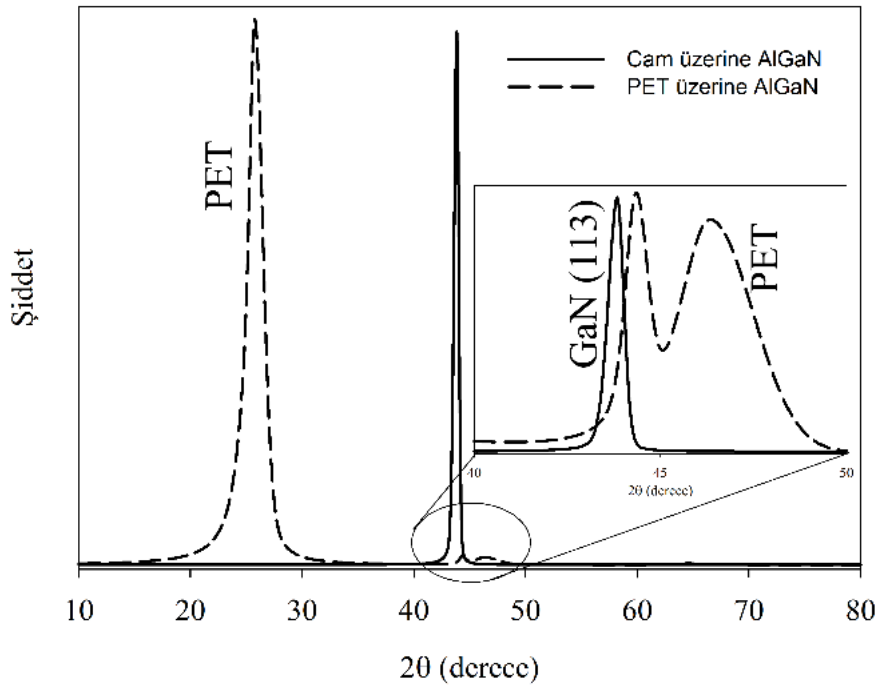
7.1.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin yapısal özellikleri

İki farklı alttaş üzerine üretilen BGaN ince filmlerin XRD tayfları Şekil 7.3 de yer almaktadır. Cam üzerine üretilen ince film numunesi 43,88° 2θ değerinde (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısı ile ilişkilendirilen tek bir kırınım piki göstermiştir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011; Özen vd., 2017). Üretilen katkısız GaN'ın XRD desenlerine benzeyen XRD desenleri görülmüştür. PET üzerine üretilen BGaN numunesi için XRD pikleri 25,82°, 44,3°, 46,48°, 53,1° ve 64,58° de oluşmuştur. PET alttaşa ait olan XRD pikleri 25,82°, 46,48°, 53,1° ve 64,58° 2θ değerlerinde yer almaktadır (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). PET üzerine üretilen BGaN ince filmin 44,3° 2θ değerinde gözlemlenen pik, alttaşın etkisinden dolayı cam alttaş üzerine üretilen ince filmde oluşan (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına ait olan pikten farklı bir yerde oluşmuştur (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Eşitlik (6.2) ile verilen Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen BGaN ince film için yaklaşık 90 nm ve PET üzerine üretilen BGaN ince film için yaklaşık 55 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretim için $1{,}2 \times 10^{-4}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretim için $3{,}3 \times 10^{-4}$ nm^{-2} dir.



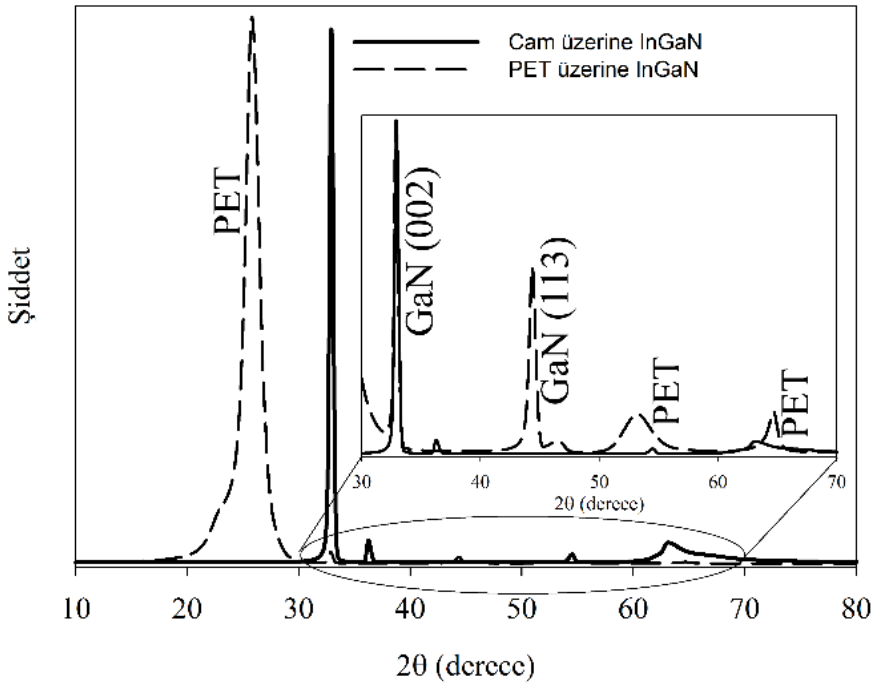
Şekil 7.3 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin XRD tayfları

Cam ve PET alttaşlar üzerine depolanan AlGaN ince filmlerin XRD desenleri Şekil 7.4 de verilmiştir. Cam üzerine biriktirilen AlGaN ince film tek bir yerde 43,92° de pik göstermiştir. Bu pik değeri (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına oldukça yakın bir değerdir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Al miktarı ile 2θ değerinde artış olacağı literatürde belirtilmiştir (Yi vd., 2014; Ishida vd., 2012). PET üzerine üretilen numune için XRD pikleri 25,76°, 44,36°, 46,34°, 53,48° ve 64,54° de oluşmuştur. Gerilime uğramış kristal yapılı PET alttaşa ait XRD pikleri 25,76°, 46,34°, 53,48° ve 64,54° 2θ değerlerinde gözlemlenmiştir (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). Cam alttaş üzerine AlGaN ince film numunesinde ilişkilendirilen (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına ait pik PET alttaş üzerine üretimde 44,36° 2θ değerinde gözlemlenmiştir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Alttaşın etkisi ile farklı bir 2θ değerinde pik oluşmuştur. Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen AlGaN ince film için yaklaşık 20 nm ve PET üzerine üretilen AlGaN ince film için yaklaşık 15 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretim için $2,5x10^{-3}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretim için $4,4x10^{-3}$ nm^{-2} dir.



Şekil 7.4 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin XRD tayfları

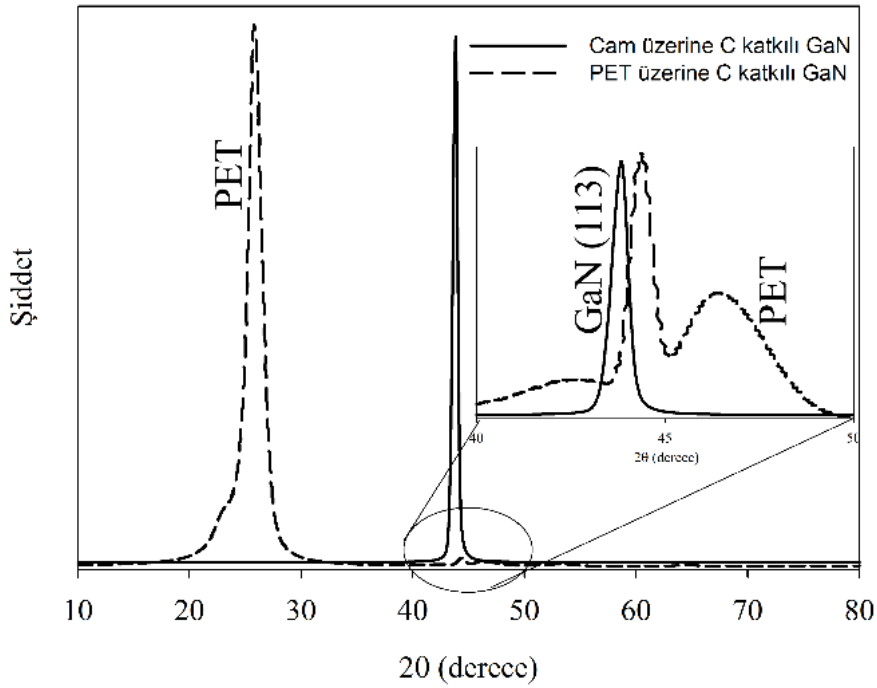
Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin XRD desenleri Şekil 7.5 de verilmiştir. Cam alttaş üzerine biriktirilen ince film 32,93°, 36,27°, 54,51°, 63,16° 2θ değerlerinde kırınım pikleri göstermiştir. 32,93°, 36,27° 2θ değerleri sırasıyla (002) yönelimli ve (101) yönelimli %49 indiyum oranına sahip hekzagonal GaN yapısının piklerine aittir (Shen vd., 2012; Yi vd., 2014; Park vd., 2015). 54,51°, 63,16° 2θ değerlerinde oluşan pikler indiyum elementine ait oldukları saptanmıştır. PET üzerine üretilen InGaN numunesi için XRD pikleri 25,8°, 32,88°, 44,34°, 46,56°, 53,2° ve 64,68° de oluşmuştur. Gerilime uğramış PET alttaşa ait olan XRD pikleri 25,8°, 46,56°, 53,2° ve 64,68° 2θ değerlerinde yer almaktadır (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). PET üzerine üretilen GaN ince filmin 32,88° 2θ değerinde gözlemlenen pik (002) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN (Shen vd., 2012; Yi vd., 2014; Park vd., 2015) ve 44,34° 2θ değerinde gözlemlenen pik (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN (ABD Patent No. 7,906,358, 2011) yapılarına ait olduğu saptanmıştır. Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen InGaN ince film için yaklaşık 20 nm ve PET üzerine üretilen InGaN ince filmin (002) yönelimli kristali için yaklaşık 25 nm ve (113) yönelimli kristali için yaklaşık 20 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretim için $2{,}5 \times 10^{-3}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretimin en şiddetli pikine göre $1{,}6 \times 10^{-3}$ nm^{-2} dir.



Şekil 7.5 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin XRD tayfları

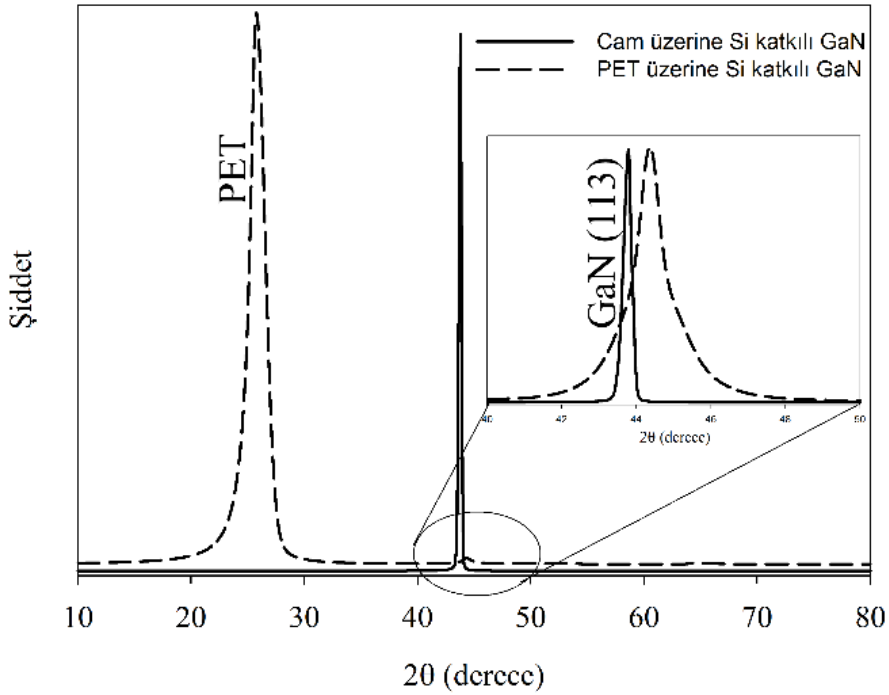
7.1.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin yapısal özellikleri

Cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen C katkılı GaN ince filmlerin XRD desenleri Şekil 7.6 da verilmiştir. Cam üzerine üretilen C katkılı GaN ince film tek bir yerde 43,88° de pik göstermiştir. Bu pik değeri (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısı ile ilişkilendirilmektedir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). PET üzerine üretilen numune için XRD pikleri 25,8°, 44,3°, 46,5°, 53,3° ve 64,7° de oluşmuştur. 25,8°, 46,5°, 53,3° ve 64,7° 2θ değerlerinde gözlemlenen pikler gerilime uğramış kristal yapılı PET alttaşa ait XRD pikleridir (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). 46,5° 2θ değerinde gözlemlenen PET alttaşa ait pik karbon katkılama ile şiddeti azalmıştır. 44,3° 2θ değerinde gözlemlenen pik (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına aittir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Gözlemlenen bu GaN piki alttaşın etkisi ile farklı bir yerde oluşmuştur. Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen C katkılı GaN ince film için yaklaşık 20 nm ve PET üzerine üretilen C katkılı GaN ince film için yaklaşık 15 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretim için $2,5x10^{-3}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretim için $4,4x10^{-3}$ nm^{-2} dir.



Şekil 7.6 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C:GaN ince filmlerin XRD tayfları

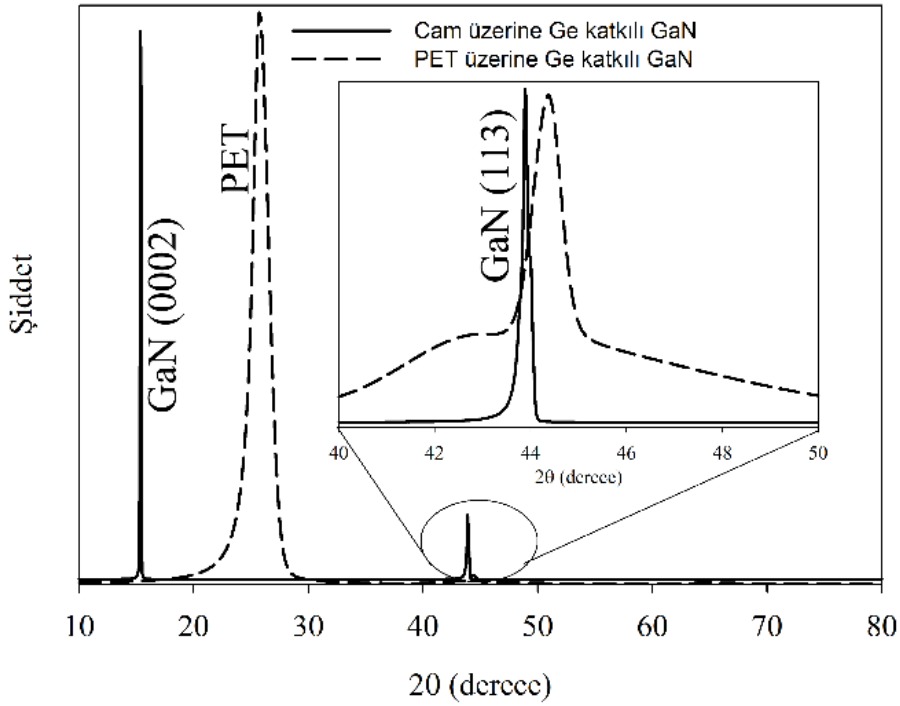
Cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen Si katkılı GaN ince filmlerin XRD desenleri Şekil 7.7 de verilmiştir. Cam üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film tek bir yerde 43,8° de pik göstermiştir. Bu pik değeri (113) yönelimli hekzagonal wurtzite GaN yapısı ile ilişkilendirilmektedir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). PET üzerine üretilen numune için XRD pikleri 25,78°, 44,33°, 53,1° ve 64,6° de oluşmuştur. Diğer üretimlerde 46,5° civarında ortaya çıkan pik Si katkılandığında ortadan kaybolmuştur. 25,78°, 53,1° ve 64,6° 2θ değerlerinde gözlemlenen pikler gerilime uğramış kristal yapılı PET alttaşa ait XRD pikleridir (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). 44,33° 2θ değerinde gözlemlenen pik alttaşın etkisi ile cam üzerine biriktirilen filmden farklı bir yerde oluşmuştur. Bu pik cam üzerine Si katkılı GaN ince film numunesinde ilişkilendirilen (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına aittir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film için yaklaşık 45 nm ve PET üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film için yaklaşık 10 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretim için $4{,}9 \times 10^{-4}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretim için $1{,}0 \times 10^{-2}$ nm^{-2} dir.



Şekil 7.7 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si:GaN ince filmlerin XRD tayfları

Cam ve PET alttaşlar üzerine depolanan Ge katkılı GaN ince filmlerin XRD desenleri tek bir grafik altında Şekil 7.8 de verilmiştir. Cam üzerine biriktirilen ince filmin 15,4° ve 43,9° 2θ değerinde pik yaptığı görülmüştür. 15,4° 2θ değerinde yer alan XRD piki Ge katkılama ile elde edilen (002) yönelimli GaN yapısına aittir (Zhang vd., 2013; Tian vd., 2015; Zsebök vd., 2001). Ge katkılama ile XRD piklerinin daha düşük değerlere kaydığı literatürde yer almaktadır (Fritze vd., 2012; Wang vd., 2015; Wieneke vd., 2013). 43,9° de yer alan XRD piki (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına oldukça yakın bir değerdir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). PET üzerine üretilen Ge katkılı GaN numunesi için XRD pikleri 25,75°, 44,36°, ve 64,56° de oluşmuştur. Diğer üretimlerde 46,5° ve 53,2° 2θ değerlerinde yer alan PET alttaşın pikleri Ge katkılandığında görülmemektedir. Gerilime uğramış kristal yapılı PET alttaşa ait XRD pikleri 25,75° ve 64,56° 2θ değerlerinde gözlemlenmiştir (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). Cam alttaş üzerine Ge katkılı GaN ince film numunesinde ilişkilendirilen (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına ait pik PET alttaş üzerine üretimde 44,36° 2θ değerinde gözlemlenmiştir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). PET alttaşın etkisi ile pik farklı bir 2θ değerinde oluşmuştur. Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmin (002) yönelimli kristali için yaklaşık 85 nm ve (113) yönelimli kristali için yaklaşık 55 nm, PET üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film için yaklaşık 20 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon

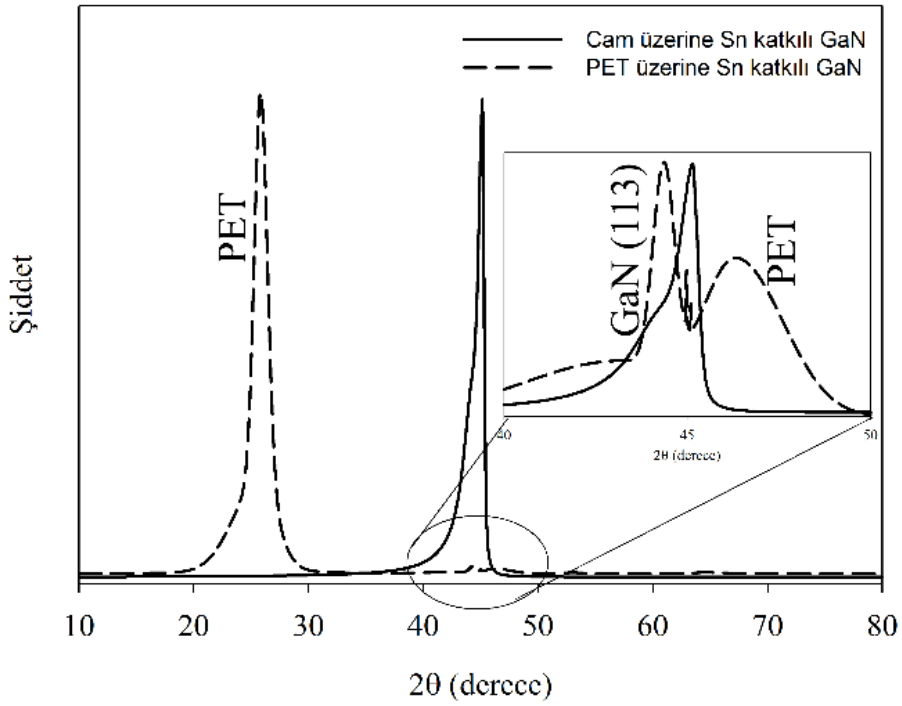
yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretimin en şiddetli piki için $1,4x10^{-4}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretim için $2,5x10^{-3}$ nm^{-2} dir.



Şekil 7.8 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge:GaN ince filmlerin XRD tayfları

Cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen Sn katkılı GaN ince filmlerin XRD desenleri Şekil 7.9 da verilmiştir. Cam üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film 45,1° 2θ değerinde geniş bir pik göstermiştir. Bu pik değeri tetragonal Sn faz yapısı ile ilişkilendirilmektedir (Wu vd., 2011; Arora ve Jagirdar, 2014). 43,9° 2θ değeri civarındaki (113) yönelimli hekzagonal wurtzite GaN yapısı (ABD Patent No. 7,906,358, 2011) bu baskın Sn piki tarafından gölgelenmiştir. PET üzerine üretilen Sn katkılı GaN numunesi için XRD pikleri 25,82°, 44,36°, 46,32°, 53,08° ve 64,62° de oluşmuştur. Si ve Ge katkılama ile ortadan kaybolan PET alttaşlara ait olan XRD pikleri Sn katkılama ile yeniden ortaya çıkmıştır. Oda sıcaklığında karbon elementi hekzagonal kristal yapılı, Si ve Ge elementleri kübik yapılı, kalay elementi tetragonal kristal yapılı ve kurşun elementi yüzey merkezli kübik kristal yapılıdırlar. Katkılama elementlerinin kristal yapılarındaki bu farklılıkların PET alttaşın XRD desenlerini etkilediği düşünülmektedir. 25,82°, 46,32°, 53,08° ve 64,62° 2θ değerlerinde gözlemlenen pikler gerilime uğramış kristal yapılı PET alttaşa ait XRD pikleri ile ilişkilendirilebilirler (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). 44,36° 2θ değerinde gözlemlenen pik alttaşın etkisi ile cam üzerine biriktirilen filmden farklı bir yerde

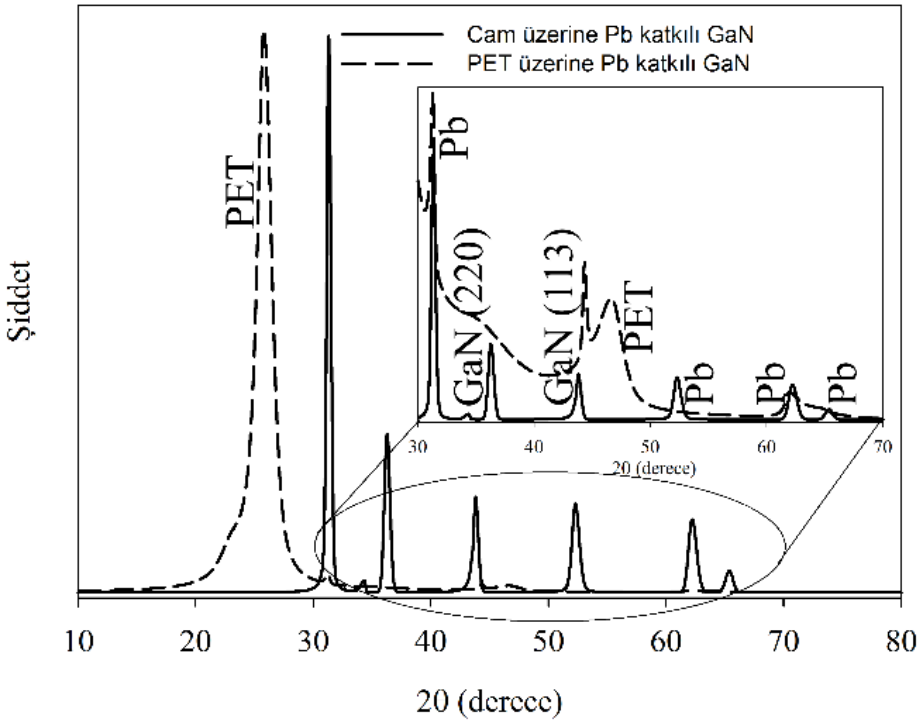
oluşmuştur. Bu pik cam üzerine üretilen Sn katkılı ince film numunesinde ilişkilendirilen (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına ait olduğu söylenebilir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film için yaklaşık 15 nm ve PET üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film için yaklaşık yine 15 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise her iki alttaş üzerine üretim için $4{,}4x10^{-3}$ nm^{-2} dir.



Şekil 7.9 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn:GaN ince filmlerin XRD tayfları

Cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen Pb katkılanmış GaN ince filmlerin XRD desenleri Şekil 7.10 da tek bir grafik altında verilmiştir. Cam üzerine üretilen ince film 31,31°, 34,38°, 36,28°, 43,83°, 52,3°, 62,23° ve 65,38° 2θ değerlerinde pikler göstermiştir. 34,38°, 36,28° ve 43,83° 2θ değerlerinde sırasıyla (002) yönelimli hekzagonal wurtzite GaN, (220) yönelimli hekzagonal wurtzite GaN (Bao vd., 2010) ve (113) yönelimli hekzagonal wurtzite GaN (ABD Patent No. 7,906,358, 2011) yapıları ile ilişkilendirilebilmektedir. 31,31°, 52,3°, 62,23° ve 65,38° değerlerinde oluşan pikler literatürde kübik yapılı Pb pikleri olarak yer almaktadır (Tachan vd., 2011; Zhang vd., 2014; An vd., 2009). PET üzerine üretilen numune için XRD pikleri 25,82°, 31,3°, 44,34°, 46,62° ve 62,14° de oluşmuştur. 31,3° ve 62,14° 2θ değerlerinde oluşan pikler literatürde kübik yapılı Pb pikleri olarak yer almaktadır (Tachan vd., 2011; Zhang vd., 2014; An vd., 2009). 25,82° ve 46,62° 2θ

değerlerinde gözlemlenen pikler gerilime uğramış kristal yapılı PET alttaşa ait XRD pikleridir (Mayoral vd., 2013; Ong vd., 2012; Fernandez vd., 2009). 44,34° 2θ değerinde gözlemlenen pik (113) yönelime sahip hekzagonal wurtzite GaN yapısına aittir (ABD Patent No. 7,906,358, 2011). Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak hesaplanan ortalama kristal boyutları cam üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmin (002) yönelimli kristali için yaklaşık 20 nm, (220) yönelimli kristali için yaklaşık 15 nm ve (113) yönelimli kristali için yaklaşık 20 nm'dir. PET üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film için yaklaşık 30 nm'dir. Üretilen numunelerin dislokasyon yoğunlukları ise cam alttaş üzerine üretimin en şiddetli piki için $4{,}4\times10^{-3}$ nm^{-2} ve PET alttaş üzerine üretim için $1{,}1\times10^{-3}$ nm^{-2} dir.



Şekil 7.10 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb:GaN ince filmlerin XRD tayfları

7.2. GaN Temelli İnce Filmlerin Optiksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada üretilen ince filmlerin optiksel özelliklerini incelemek için Unico UV-VIS spektrofotometre cihazı ve Filmetrics F20 interferometre cihazı kullanılmıştır. Unico UV-VIS spektrofotometre cihazı ile 200-1100 nm dalgaboyu aralığında cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen GaN ve katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma tayfları elde edilmiştir. Optiksel yasak enerji aralıkları (E_g) doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt)

geçişler için ayrı ayrı çizdirilmiştir ve üretilen ince filmlerin soğurma tayf değerleri kullanılarak Tauc ilişki olarak da bilinen

$$\alpha h\nu = A(h\nu\text{-}E_g)^2 \quad (7.1)$$

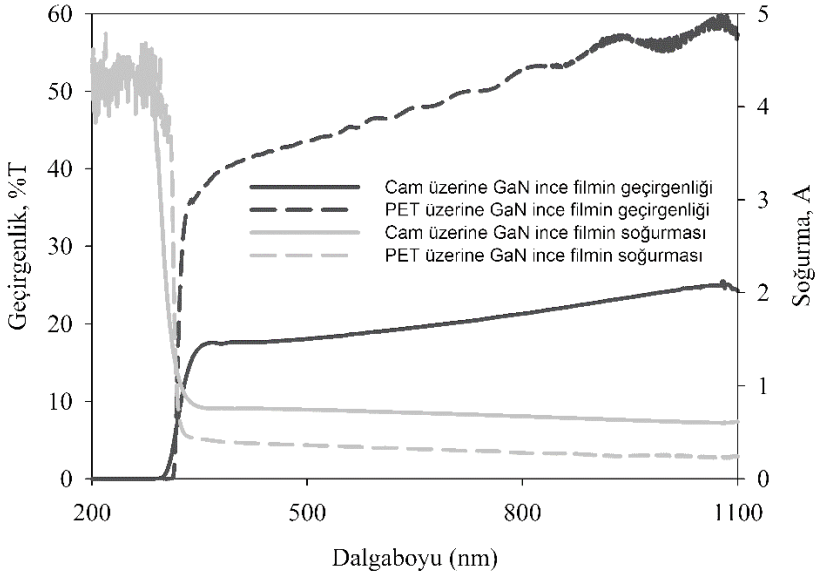
doğrudan yasak enerji aralığının belirlendiği eşitlik kullanıldığında daha uygun sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenden dolayı sadece doğrudan band aralıklarının grafiklerine yer verilmiştir. Burada; α optiksel soğurma katsayısı, h Planck sabiti, ν kullanılan fotonun frekansı, A ise bir sabittir (Pankove, 2012).

Filmetrics F20 interferometre cihazı aracılığıyla ise cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen ince filmlerin 400-1000 nm dalgaboyu aralığında kırılma indisleri ve yansıma tayfları elde edilmiştir. Üretilen numunelerin optiksel özelliklerinin sonuçları katkısız GaN ince filmler, üç atomlu GaN ince filmler ve 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmler olarak 3 ayrı alt başlık altında detaylı olarak verilecektir.

7.2.1. GaN ince filmlerin optiksel özellikleri

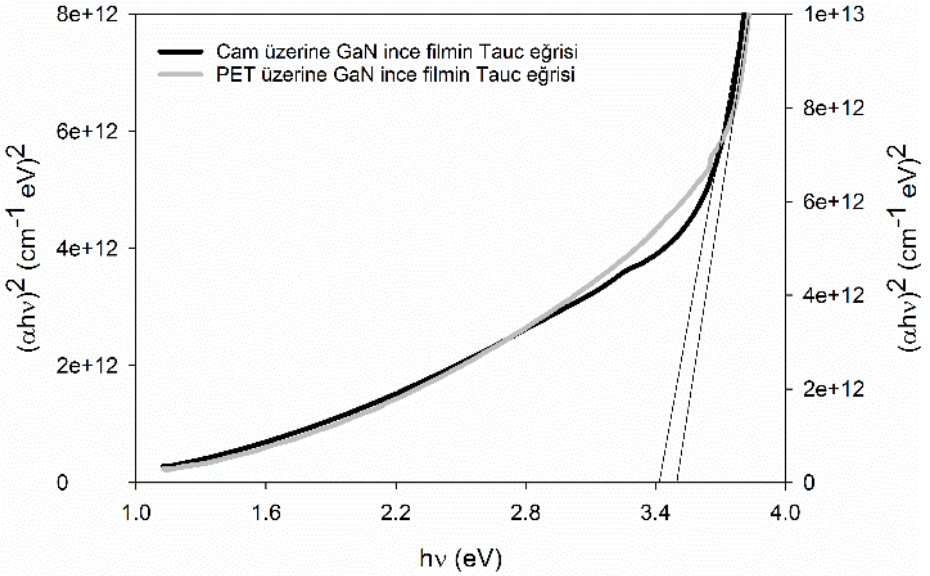
Şekil 7.11 de katkısız GaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin geçirgenlik ve soğurma grafikleri verilmiştir. Cam üzerine üretilen GaN ince film 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %18-23 aralığında artış gösteren geçirgenlik göstermiştir. PET üzerine üretilen GaN ince film ise 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %39-59 aralığında artış gösteren geçirgenlik değerleri göstermiştir. PET alttaş üzerine üretimde geçirgenlik tayfı girişim saçakları görülmüştür ve bunun nedeni olarak; PET alttaş üzerine üretimin daha düşük pürüzlülüğe sahip olduğu düşünülmüştür. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında birbirine çok yakın soğurma değerleri göstermiştir. 350 nm' den sonra soğurma sıfır noktasına doğru yaklaşmıştır. 350-

1100 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik grafiklerinde olduğu gibi cam ve PET alttaşlar üzerine ince filmlerde hemen hemen 2 kat soğurma farkı gözlemlenmiştir.



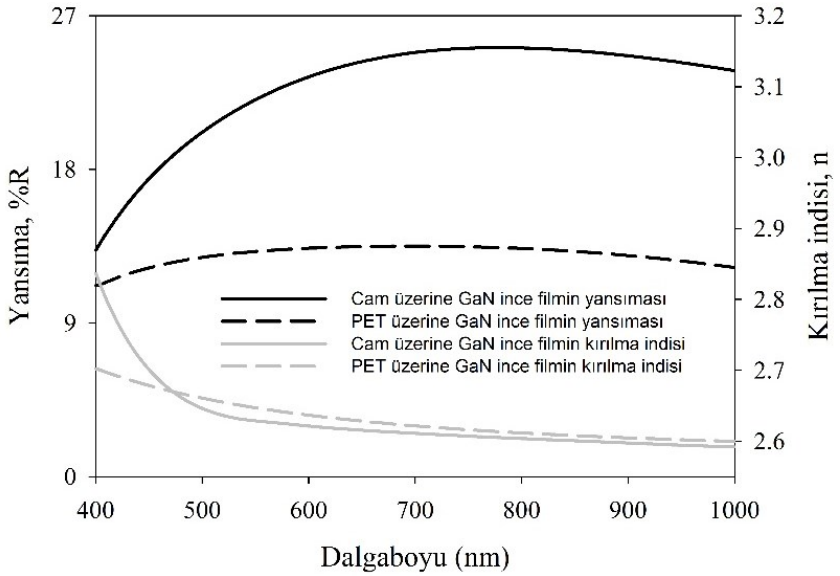
Şekil 7.11 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.11 de yer alan soğurma grafiğinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen katkısız GaN ince filmlerin yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve Şekil 7.12 de grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,42 eV ve PET üzerine üretim için 3,49 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden daha küçük olduğu için ultraviyole bölgeye kayan değer göstermiştir. Bu değerler literatürdeki GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı değeri ile uyumludur (Park vd., 2002; Huang vd., 2009; Kanga vd., 2012; Selvaraj vd., 2011).



Şekil 7.12 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

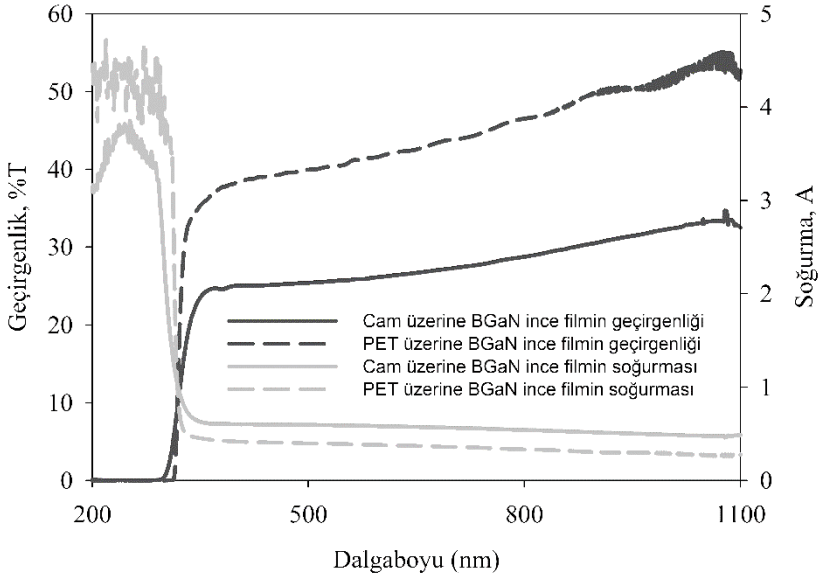
Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren grafikler Şekil 7.13 de yer almaktadır. Cam üzerine üretilen GaN ince film %13 ila %25 aralığında değişen yansıma eğrisi göstermiştir. En yüksek yansıma değerine 700 nm de ulaşmış ve 800 nm den sonra yavaşça azalmaya başlamıştır. PET alttaş üzerine üretilen GaN ince film ise daha düşük ve daha küçük değişimli yansıma grafiği göstermiştir. PET üzerine üretilen ince film %11-13 yansıma değerlerine sahiptir. Yine PET üzerine üretimde de yaklaşık 700 nm de en yüksek seviyeye ulaşıp 800 nm den sonra azalma eğilimi göstermiştir. İki farklı alttaş üzerine üretilen GaN ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında; cam üzerine üretilen GaN ince filmde 400 nm dalgaboyunda 2,83 den 500 nm dalgaboyunda 2,64 e düşüş görülmüştür. PET üzerine üretilen GaN ince filmin kırılma indisi değeri ise ölçülen dalgaboyu aralığında 2,7 den 2,6 ya düşmüştür. Her iki alttaş üzerine üretimin kırılma indisleri yaklaşık 700 nm den sonra hemen hemen aynı kırılma indisi değerlerine sahiptir. GaN ince filmlerin kırılma indisi değerleri 2,3-2,7 aralığında değişmektedir (Muth vd., 1999; Naser vd., 2009; Nayak vd., 2017)



Şekil 7.13 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

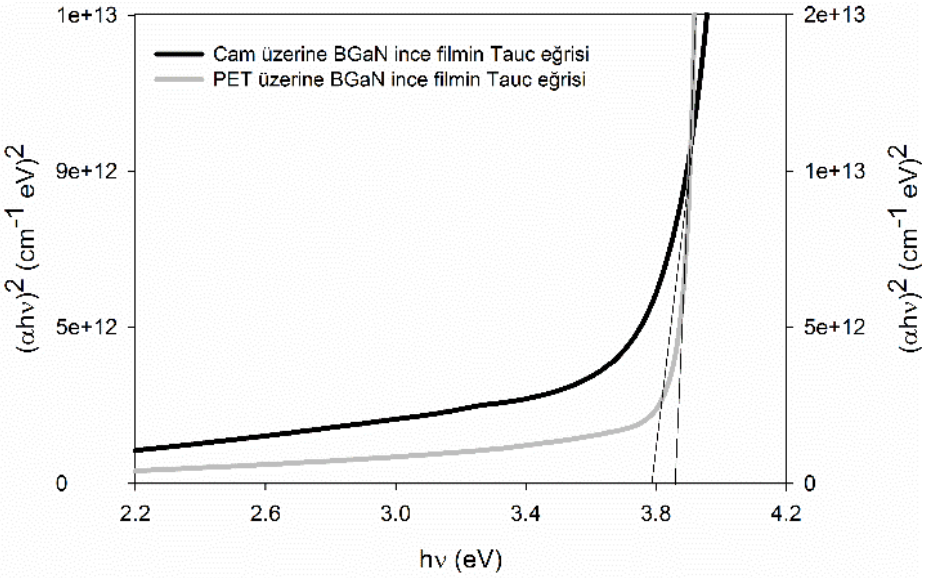
7.2.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin optiksel özellikleri

Bor katkılama yapılarak elde edilen BGaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin geçirgenlik ve soğurma grafikleri Şekil 7.14 de verilmiştir. Cam üzerine üretilen BGaN ince film 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyu ile %24 den %31'e artan bir geçirgenlik grafiği göstermiştir. PET üzerine üretilen BGaN ince film ise 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %38-54 aralığında artış gösteren geçirgenlik değerleri göstermiştir. PET alttaş üzerine üretimin daha düşük pürüzlülüğe sahip olduğundan ötürü girişim saçaklarının oluştuğu düşünülmektedir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince film daha soğurucu davranış göstermiştir. 350 nm'den sonra soğurma sıfıra doğru yaklaşmıştır. 350-1100 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik grafiklerinde olduğu gibi cam ve PET alttaşlar üzerine ince filmlerde hemen hemen 1,5 kat soğurma farkı gözlemlenmiştir.



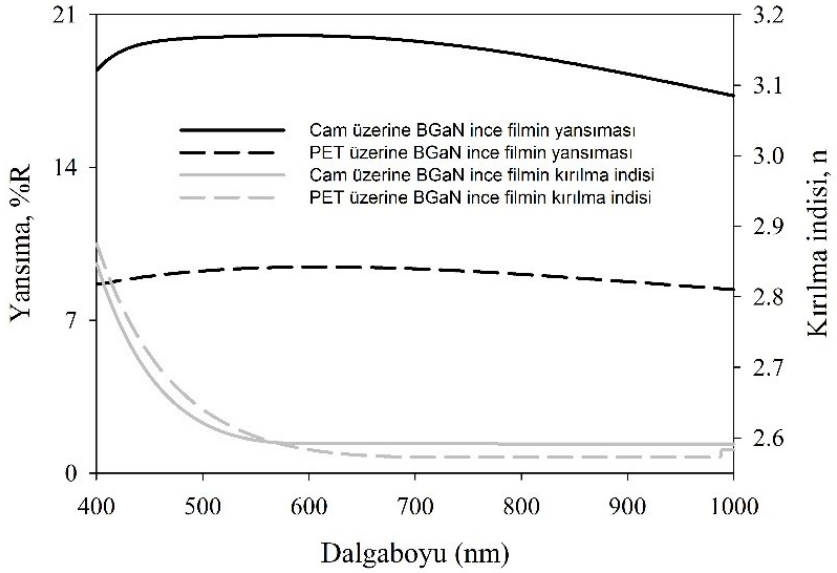
Şekil 7.14 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.14 de yer alan soğurma eğrilerinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin yasak enerji aralıkları Tauc ilişkisi ile belirlenmiştir ve Şekil 7.15 de grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,79 eV ve PET üzerine üretim için 3,86 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden daha küçük olduğu için ultraviyole bölgeye kayan değer göstermiştir. Bu değerler %25 B katkılama ile elde edilen BGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığından biraz daha düşük bir değerdir (Honda vd., 2000; Ougazzadenn vd., 2007; Sakai vd., 1993).



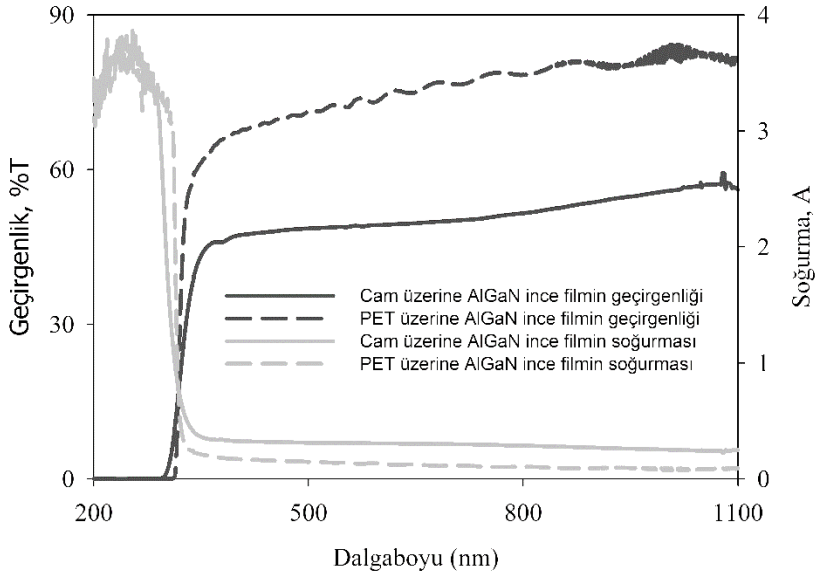
Şekil 7.15 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

Şekil 7.16 da cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren eğriler yer almaktadır. Cam üzerine üretilen BGaN ince film 400 nm dalgaboyunda %18 yansıma ile başlayıp yaklaşık 500 nm de %20 ye ulaşmıştır. 500 nm dalgaboyundan itibaren yavaş yavaş azalarak %17 ye kadar düşen bir yansıma eğrisi göstermiştir. PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince film ise daha düşük ve daha küçük değişimli yansıma grafiği göstermiştir. PET üzerine üretilen ince film %9-10 yansıma değerlerine sahiptir. PET üzerine üretimde yaklaşık 550 nm de en yüksek seviyeye ulaşıp 650 nm dalgaboyundan sonra azalma eğilimi göstererek 1000 nm de tekrar %9 yansıma değerine ulaştığı görülmüştür. Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında; cam üzerine üretilen ince film 400 nm dalgaboyunda 2,84 den 550 nm dalgaboyunda 2,6 değerine düşmüş, PET üzerine üretilen ince film 400 nm dalgaboyunda 2,86 dalgaboyundan 550 nm dalgaboyunda 2,6 değerine düşmüştür. PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince filmin kırılma indisi değeri 550 nm den sonrada hafifçe düşerek 2,59 a kadar ulaşmıştır. Yani, 550 nm dalgaboyundan önce PET üzerine üretilen ince film daha yüksek kırılma indisi eğrisine sahipken 550 nm den itibaren tersine dönerek cam üzerine üretilen ince film daha yüksek kırılma indisi eğrisine sahip olduğu görülmüştür. Buna sebep olarak PET alttaşlar üzerine üretimlerin daha pürüzsüz yapıya sahip olması görülmüştür.



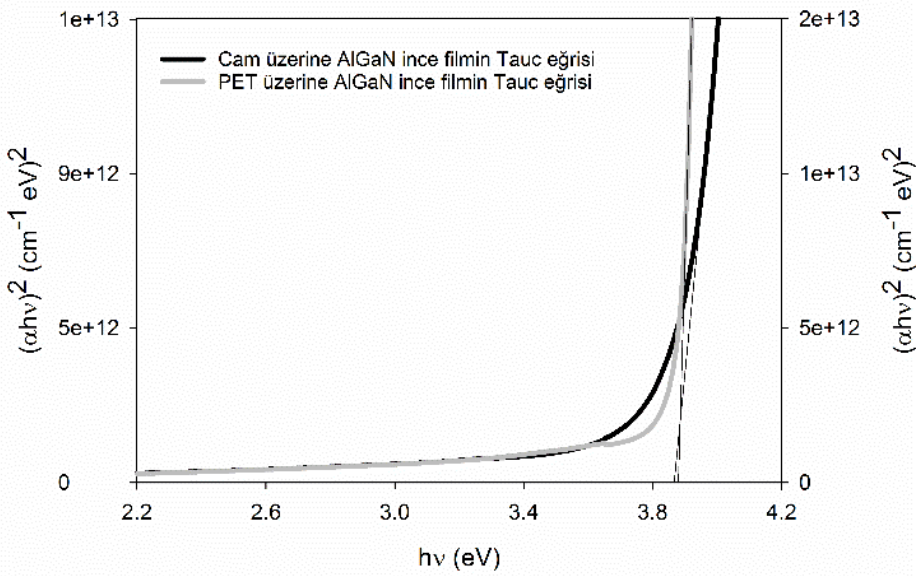
Şekil 7.16 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

AlGaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin optiksel geçirgenlik ve soğurma grafikleri Şekil 7.17 de yer almaktadır. Cam üzerine üretilen AlGaN ince film 350-1100 nm aralığında dalgaboyuna göre artış göstererek %44 den %57 e ulaşan değerlerde optiksel geçirgenlik göstermiştir. PET üzerine üretilen AlGaN ince film ise 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %68 den %87 ye kadar değişen artış gösteren optiksel geçirgenlik değerleri göstermiştir. PET alttaş üzerine üretimin daha düşük pürüzlülüğe sahip olduğundan ötürü girişim saçaklarının oluştuğu düşünülmektedir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında birbirine çok yakın soğurma değerleri göstermiştir. 350 nm' den sonra soğurma neredeyse sıfıra yaklaşmıştır. 350-1100 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik grafiklerinde olduğu gibi neredeyse 2 kat soğurma farkı gözlemlenmiştir.



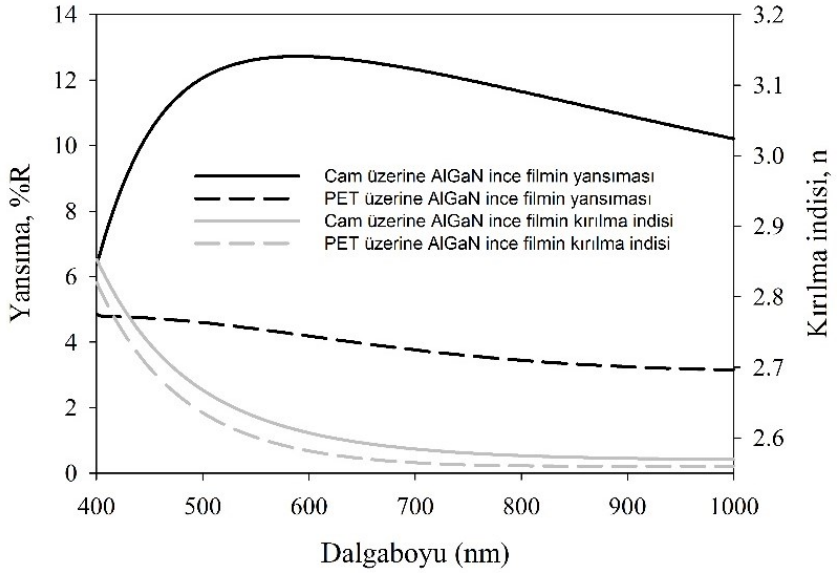
Şekil 7.17 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.17 de yer alan soğurma eğrilerinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Al katkılama ile elde edilen AlGaN ince filmlerin yasak enerji aralıkları Tauc ilişkisi ile belirlenmiştir ve Şekil 7.18 de optiksel yasak enerji grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,87 eV ve PET üzerine üretim için 3,88 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden küçük olduğu için ultraviyole bölgeye kayan değer göstermiştir. Bu yasak enerji aralığı değerleri Al katkılama ile elde edilen AlGaN ince filmlerin 3,45 ile 6,0 eV aralığında değişen optiksel yasak enerji değerine uygundur (Cheng vd., 2013; Coughlan vd., 2015; Li vd., 2010).



Şekil 7.18 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

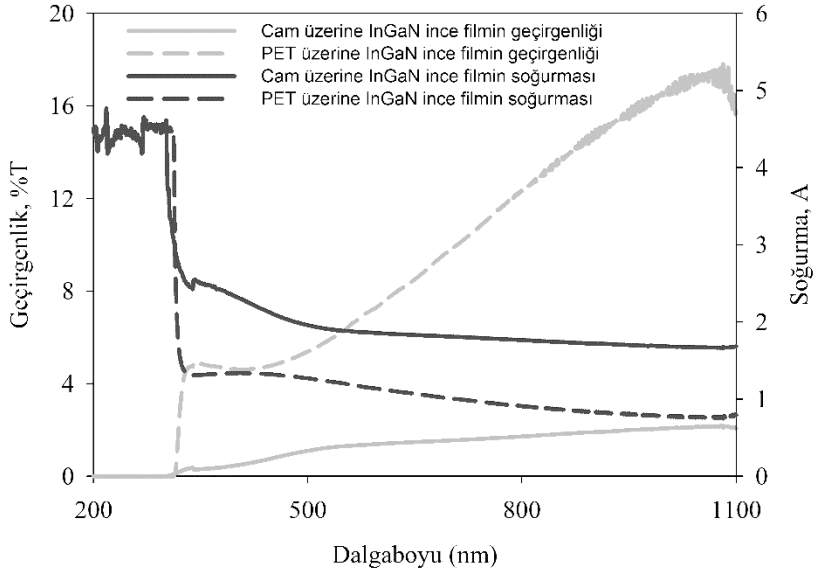
Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren eğriler Şekil 7.19 da yer almaktadır. Cam üzerine üretilen AlGaN ince film 400 nm dalgaboyunda %6 yansıma ile başlayıp yaklaşık 550 nm de %12 ile en yüksek değere ulaşmıştır. 550 nm dalgaboyundan itibaren yavaş yavaş azalarak %10 a kadar düşen bir yansıma eğrisi göstermiştir. PET alttaş üzerine üretilen AlGaN ince film ise daha düşük ve daha küçük değişimli yansıma grafiği göstermiştir. PET üzerine üretilen AlGaN ince film %4-5 yansıma değerlerine sahiptir. PET üzerine üretimde 400 nm dalgaboyunda %5 yansıma değeri ile başlayarak 1000 nm dalgaboyuna kadar yavaş yavaş azalarak %4 yansımaya ulaştığı görülmüştür. Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmler hemen hemen aynı kırılma indisi eğrisi göstermiştir. Cam alttaş üzerine üretim için 400 nm dalgaboyunda 2,84 kırılma indisi ile başlarken, PET alttaş üzerine üretim için 400 nm dalgaboyunda 2,8 kırılma indisi değeri ile başlamıştır. Her iki alttaş üzerine üretim için kırılma indisi dalgaboyunun artması ile eksponansiyel olarak azalarak 2,55 değerine kadar düştüğü görülmüştür.



Şekil 7.19 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

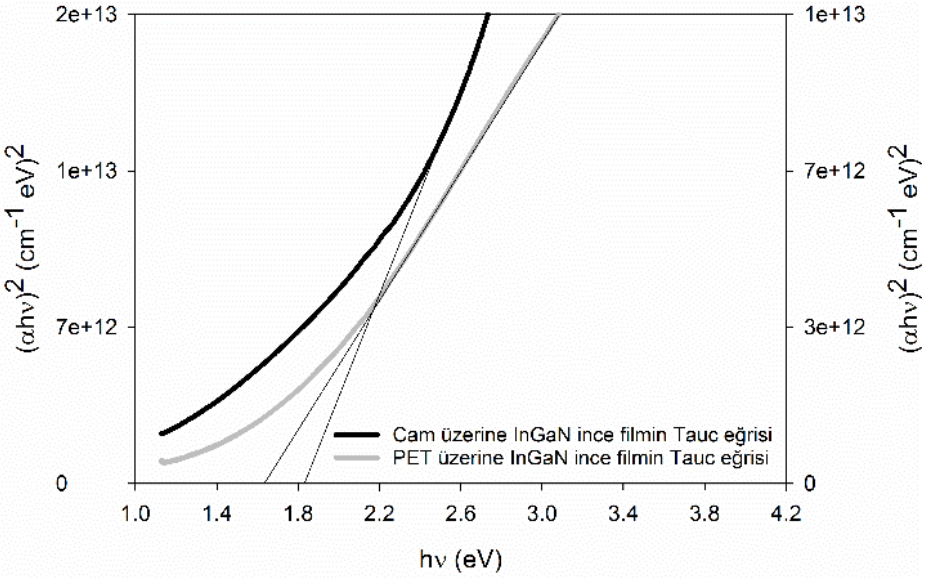
Şekil 7.20 de cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin optiksel geçirgenlik ve soğurma grafikleri yer almaktadır. Cam üzerine üretilen InGaN ince film 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %0.5 den %2 ye kadar ulaşan optiksel geçirgenlik göstermiştir. PET üzerine üretilen InGaN ince film ise 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %5 den %17 ye kadar değişen artış gösteren optiksel geçirgenlik değerleri göstermiştir. 350-1100 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik grafiklerinde PET alttaş üzerine üretilen ince filmde belirgin bir geçirgenlik farkı olduğu görülmüştür. Bu durum PET alttaş üzerine üretimin daha pürüzsüz ve sıkı yapıda oluştuğunu göstermektedir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında birbirine çok yakın soğurma değerleri göstermiştir. 350 nm' den sonra soğurma değerleri azalış gösterse de yine soğurucu özellik göstermeye devam etmiştir. 350-1100 nm dalga boyu aralığında cam alttaş üzerine üretilen ince filmin soğurma değerlerinin PET alttaş üzerine üretilen ince filmin soğurma değerlerinden 2 kat fazla olduğu görülmüştür. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda PET alttaş

üzerine InGaN ince filmlerin cam alttaş üzerine üretimden daha düşük pürüzlülüklü ve sıkı yapılı olduğu görüşüne varılmıştır.



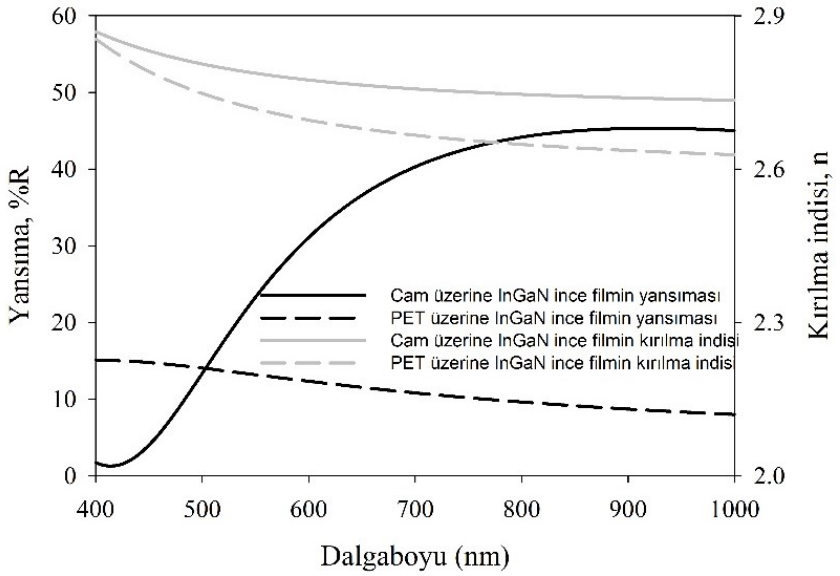
Şekil 7.20 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.20 de yer alan soğurma eğrilerinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen In katkılama ile elde edilen InGaN ince filmlerin yasak enerji aralıkları Tauc ilişkisi ile belirlenmiştir ve Şekil 7.21 de optiksel yasak enerji grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 1,83 eV ve PET üzerine üretim için 1,64 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden büyük olduğu için kızılötesi bölgeye kayan değer göstermiştir. Bu yasak enerji aralığı değerleri In katkılama ile azalan 0,7-3,4 eV aralığında değerler gösteren InGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığına uygun bir değerdir (Moses ve Van de Walle, 2010; Anani vd., 2007; Bae vd., 2014).



Şekil 7.21 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren grafikler Şekil 7.22 de yer almaktadır. Cam üzerine üretilen InGaN ince film 400 nm dalgaboyunda %2 yansıma ile başlayıp yaklaşık 850 nm de %44 ile en yüksek değere ulaşmıştır. 850 nm dalgaboyundan itibaren çok az bir değişim ile 1000 nm de %43 e düşen bir yansıma eğrisi göstermiştir. PET alttaş üzerine üretilen InGaN ince film ise daha düşük ve daha küçük değişimli yansıma grafiği göstermiştir. PET üzerine üretimde 400 nm dalgaboyunda %15 yansıma değeri ile başlayarak 1000 nm dalgaboyuna kadar yavaş yavaş azalarak %9 yansımaya ulaştığı görülmüştür. Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında artan dalgaboyu değeri ile PET üzerine üretilen ince filmin kırılma indisi değerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Cam alttaş üzerine üretim için 400 nm dalgaboyunda 2,87 kırılma indisi değerinden 1000 nm de 2,74 kırılma indisine, PET alttaş üzerine üretim için 400 nm dalgaboyunda 2,85 kırılma indisi değerinden 1000 nm de 2,63 kırılma indisi değerine ulaşmıştır.

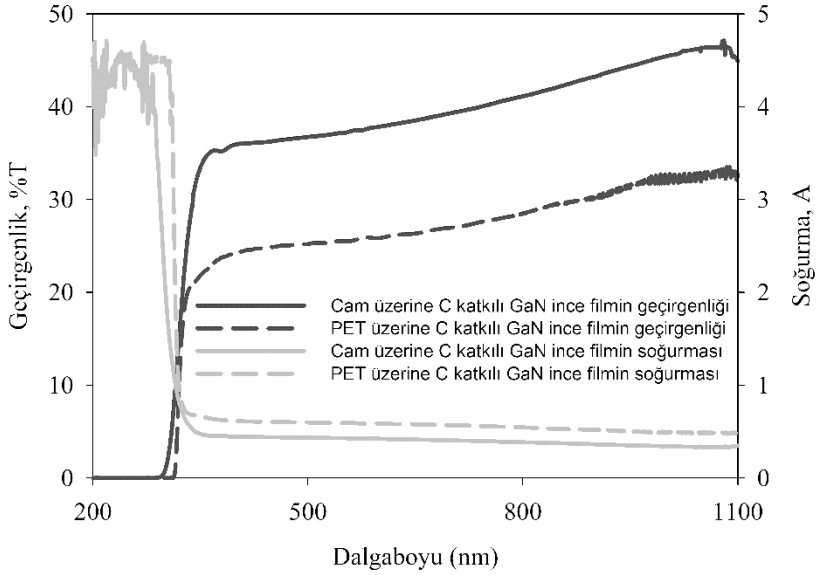


Şekil 7.22 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

7.2.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin optiksel özellikleri

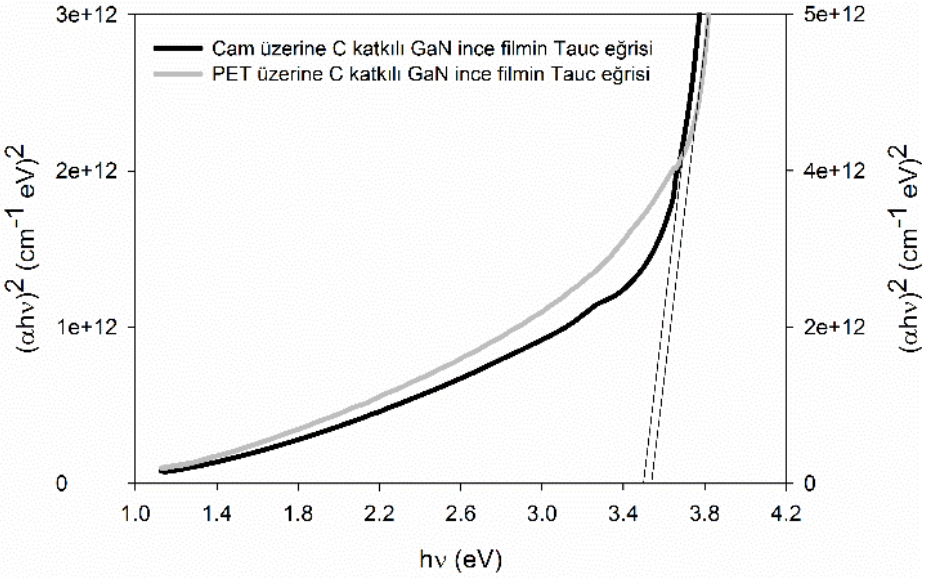
Şekil 7.23'te karbon katkılı GaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin optiksel geçirgenlik ve soğurma grafikleri yer almaktadır. Cam üzerine üretilen C katkılı GaN ince film 350-1100 nm aralığında dalgaboyuna göre artış göstererek %36 den %47 e ulaşan değerlerde optiksel geçirgenlik göstermiştir. PET üzerine üretilen C katkılı GaN ince film ise 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %21 den %31 e kadar değişen artış gösteren optiksel geçirgenlik değerleri göstermiştir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında birbirine çok yakın soğurma değerleri göstermiştir. 350

nm'den sonra soğurma değeri sıfıra doğru yaklaşmıştır. 350-1100 nm dalga boyu aralığında geçirgenlik grafiklerinde olduğu gibi hemen hemen1,5 kat soğurma farkı gözlemlenmiştir.



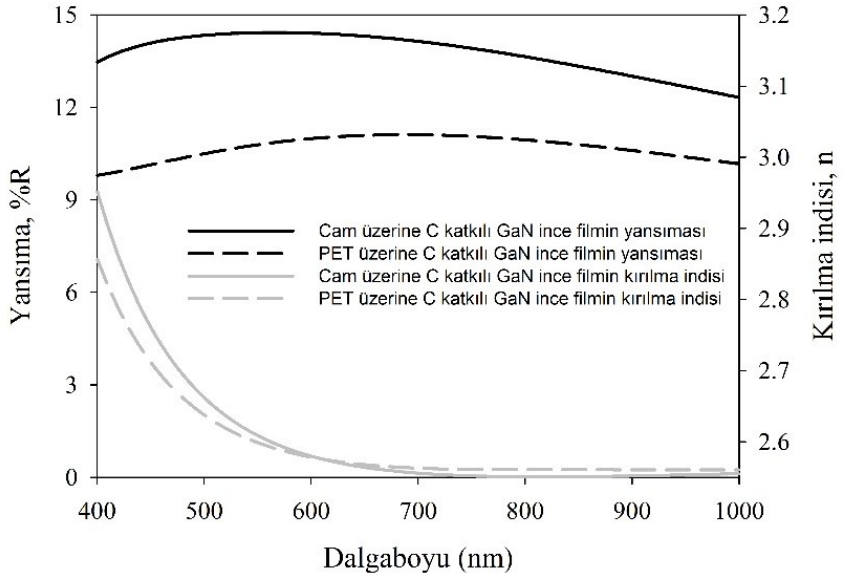
Şekil 7.23 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.23 de yer alan soğurma grafiğinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve Şekil 7.24 de grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,50 eV ve PET üzerine üretim için 3,54 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden küçük olduğu için morötesi bölgeye kayan değer göstermiştir.



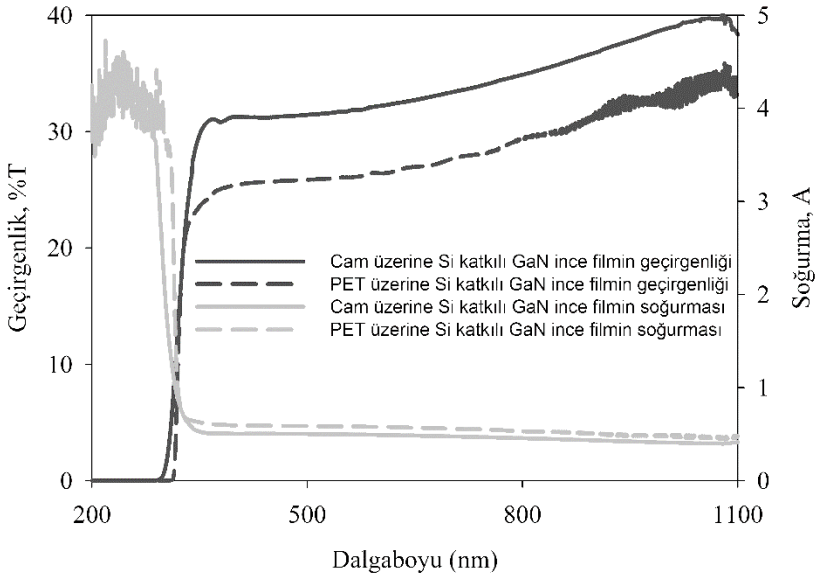
Şekil 7.24 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

Şekil 7.25 de cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren eğriler yer almaktadır. Cam üzerine üretilen C katkılı GaN ince film 400 nm dalgaboyunda %13 yansıma ile başlayıp yaklaşık 550 nm de %14 e ulaşmıştır. 550 nm dalgaboyundan itibaren yavaş yavaş azalarak %12 ye kadar düşen bir yansıma grafiği göstermiştir. PET alttaş üzerine üretilen ince film de düşük değişimli yansıma grafiği göstermiştir. PET üzerine üretilen ince film %10-11 yansıma değerlerine sahiptir. Yansıma değeri PET üzerine üretimde yaklaşık 650 nm de en yüksek seviyeye ulaşıp 650 nm dalgaboyundan sonra azalma eğilimi göstermiştir. PET üzerine üretilen C katkılı GaN ince film 1000 nm de tekrar %10 yansıma değeri göstermiştir. Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında; cam üzerine üretilen ince film 400 nm dalgaboyunda 2,94 den 650 nm dalgaboyunda 2,58 değerine düşmüş, PET üzerine üretilen ince film 400 nm dalgaboyunda 2,85 dalgaboyundan 650 nm dalgaboyunda 2,58 değerine düşmüştür. PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmin kırılma indisi değeri 650 nm den sonrada hafifçe düşerek 2,56 ya kadar ulaşmıştır. Yani, 650 nm dalgaboyundan önce PET üzerine üretilen ince film daha düşük kırılma indisi eğrisine sahipken 650 nm den itibaren tersine dönerek cam üzerine üretilen ince film daha düşük kırılma indisi eğrisine sahip olduğu görülmüştür.



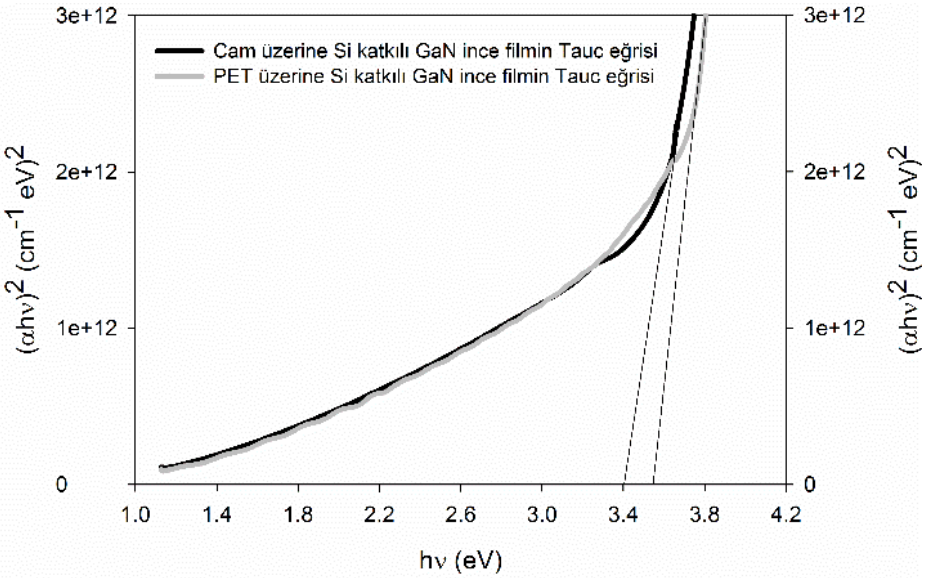
Şekil 7.25 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

Si katkılı GaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin optiksel geçirgenlik ve soğurma grafikleri Şekil 7.26 da yer almaktadır. Cam üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film 350-1100 nm aralığında dalgaboyuna göre artış göstererek %31 den %40 a ulaşan değerlerde optiksel geçirgenlik göstermiştir. PET üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film ise 350-1100 nm aralığında artan dalgaboyuna göre %24 den %32 e kadar değişen artış gösteren optiksel geçirgenlik değerleri göstermiştir. PET alttaş üzerine üretimin daha düşük pürüzlülüğe sahip olduğundan ötürü girişim saçaklarının oluştuğu düşünülmektedir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında birbirine çok yakın soğurma değerleri göstermiştir. 350 nm' den sonra soğurma sıfıra doğru yaklaşmıştır. 350-1100 nm dalga boyu aralığında soğurma değerleri her iki alttaş üzerine üretim için hemen hemen aynı değerleri göstermiştir.



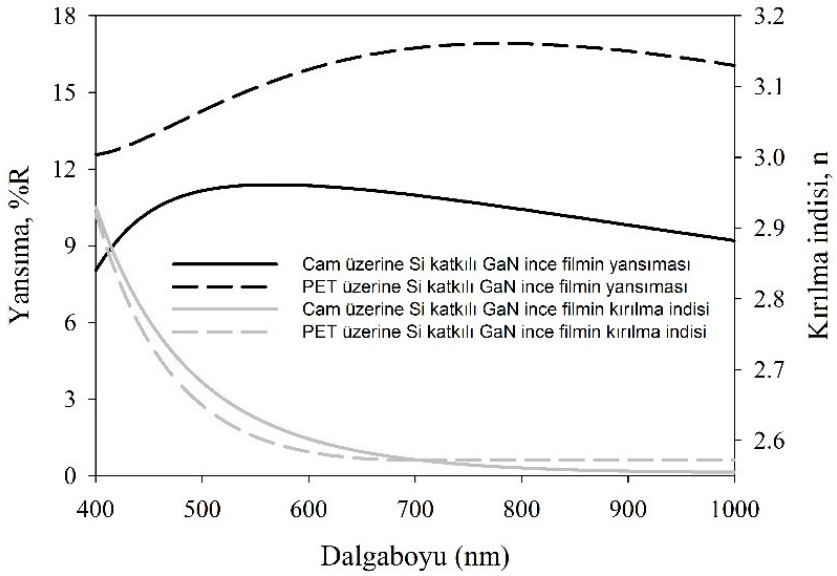
Şekil 7.26 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.26 da yer alan soğurma grafiklerinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve Şekil 7.27 de grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,40 eV ve PET üzerine üretim için 3,54 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden küçük olduğu için morötesi bölgeye kayan değer göstermiştir.



Şekil 7.27 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

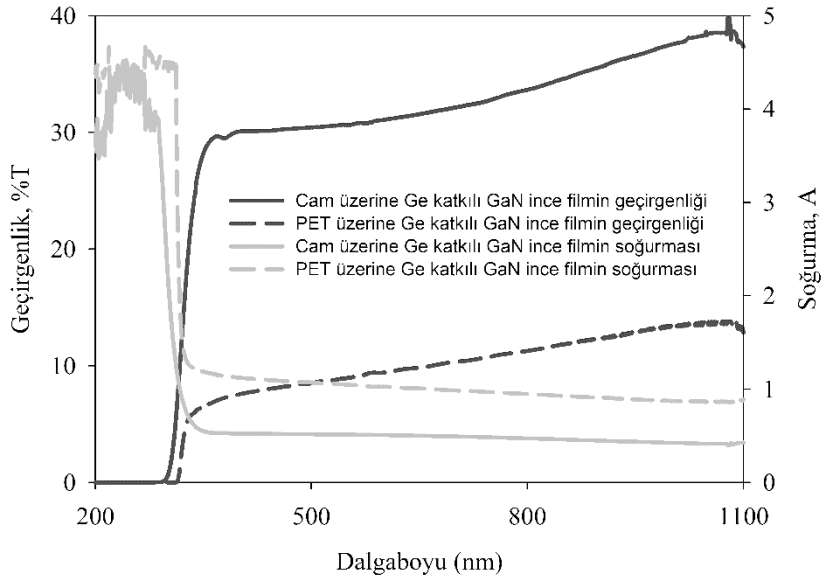
Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren eğriler Şekil 7.28 de yer almaktadır. Cam üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film 400 nm dalgaboyunda %8 yansıma ile başlayıp yaklaşık 550 nm de %11 e ulaşmıştır. 550 nm dalgaboyundan itibaren yavaş yavaş azalarak %9 a kadar düşen bir yansıma grafiği göstermiştir. PET üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film 400 nm dalgaboyunda %12 yansıma ile başlayıp yaklaşık 750 nm de %17 yansıma değerine ulaşmıştır. 750 nm dalgaboyundan itibaren yavaş yavaş azalarak 1000 nm de %16 ya kadar düşen bir yansıma grafiği göstermiştir. Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında; cam üzerine üretilen ince film 400 nm dalgaboyunda 2,91 den 700 nm dalgaboyunda 2,58 değerine eksponansiyel azalırken, PET üzerine üretilen ince film 400 nm dalgaboyunda 2,91 den 700 nm dalgaboyunda 2,58 değerine daha eksponansiyel düşüş göstermiştir. Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmin kırılma indisi değeri 700 nm den sonrada hafifçe düşerek 2,56 ya kadar ulaşmıştır. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda PET alttaş üzerine InGaN ince filmlerin cam alttaş üzerine üretimden daha düşük pürüzlülüklü ve sıkı yapılı olduğu görüşüne varılmıştır.



Şekil 7.28 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

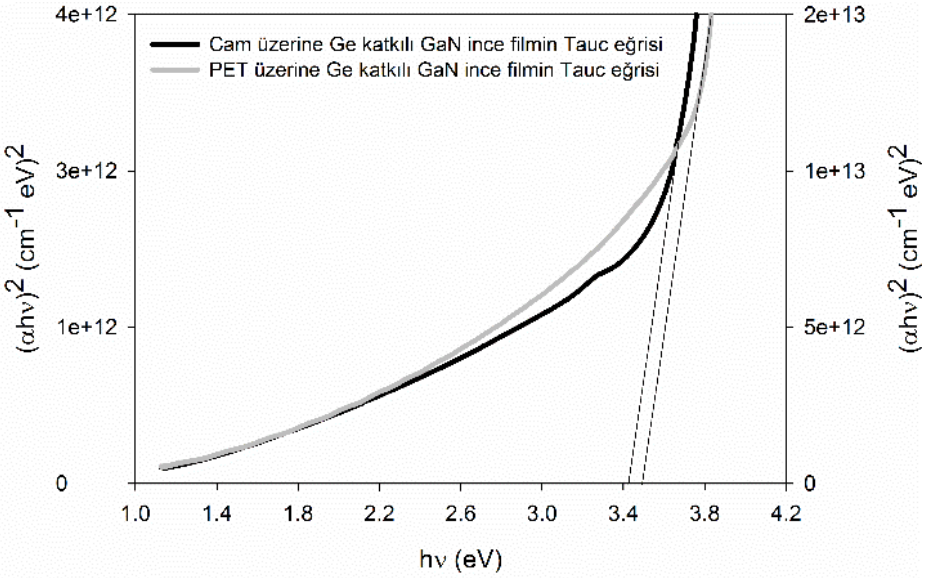
Ge katkılı GaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin optiksel geçirgenlik ve soğurma grafikleri Şekil 7.29 da verilmiştir. Cam üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film 350-1100 nm aralığında dalgaboyuna göre artış göstererek %30 dan %39 a

artan bir geçirgenlik grafiği göstermiştir. PET üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film ise 350-1100 nm dalgaboyu aralığında artan dalgaboyuna göre %7 den %11 e kadar artış gösteren geçirgenlik değerleri vermiştir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film diğer alttaş üzerine üretime göre daha fazla soğurucu davranış göstermiştir. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin PET alttaş üzerine üretimden daha düşük pürüzlülüklü ve sıkı yapılı olduğu görüşüne varılmıştır.



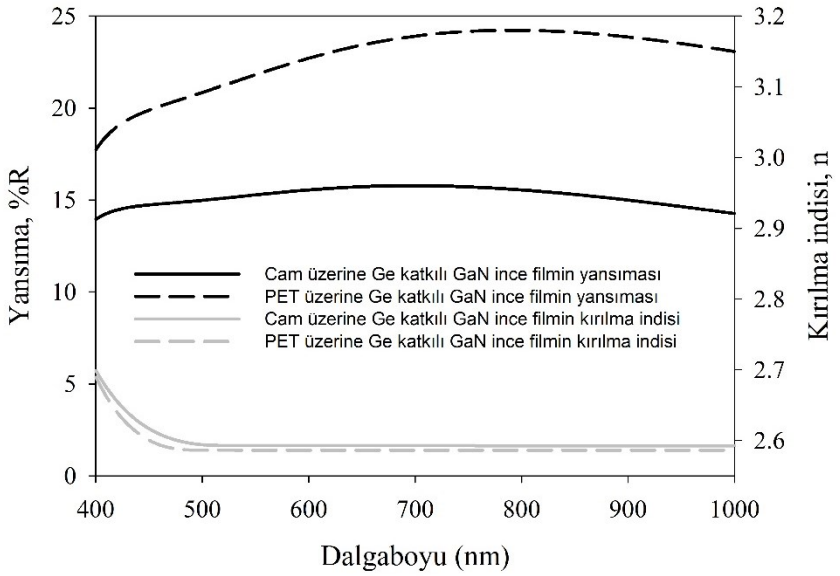
Şekil 7.29 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.29 da yer alan soğurma grafiklerinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve Şekil 7.30 da grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,42 eV ve PET üzerine üretim için 3,49 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden küçük olduğu için morötesi bölgeye kayan değer göstermiştir.



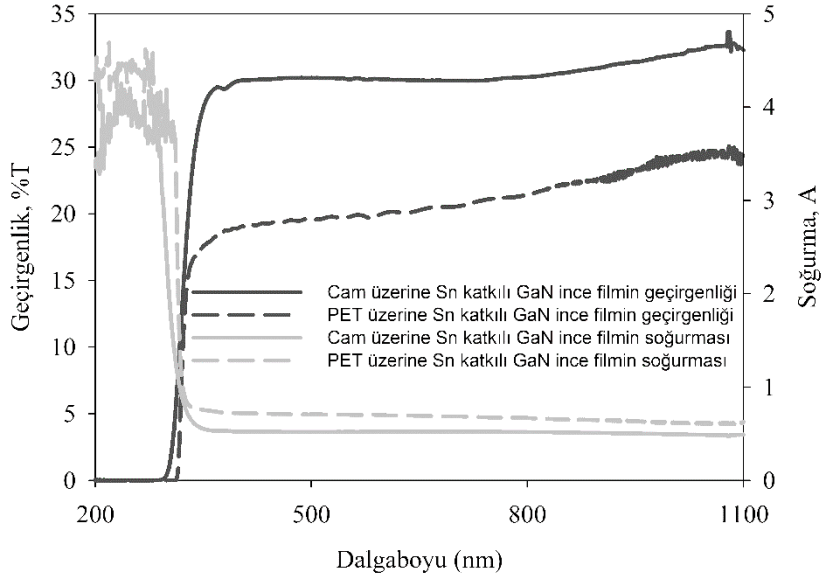
Şekil 7.30 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

Şekil 7.31 de cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren eğriler yer almaktadır. Cam üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film 400 nm dalgaboyunda %14 yansıma ile başlayıp yaklaşık 650 nm dalgaboyunda %15 değerine ulaşmış ve 650 nm dalgaboyundan itibaren yavaş yavaş azalarak tekrar %14 e kadar düşen bir yansıma eğrisi göstermiştir. PET üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film 400 nm dalgaboyunda %18 yansıma ile başlayıp yaklaşık 750 nm de %24 yansıma değerine ulaşmıştır. 750 nm dalgaboyundan itibaren yavaş yavaş azalarak 1000 nm de %23 e kadar düşen bir yansıma grafiği göstermiştir. Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmler hemen hemen aynı davranışta kırılma indisi eğrisi göstermiştir. Cam alttaş üzerine üretim için 400 nm dalgaboyunda 2,69 kırılma indisi ile başlarken, PET alttaş üzerine üretim için 400 nm dalgaboyunda 2,68 kırılma indisi ile başlamıştır. Her iki alttaş üzerine Ge katkılı GaN ince film üretimi için kırılma indisi dalgaboyunun artması ile eksponansiyel olarak azalarak 2,59 kırılma indisi değerine kadar düştüğü görülmüştür.



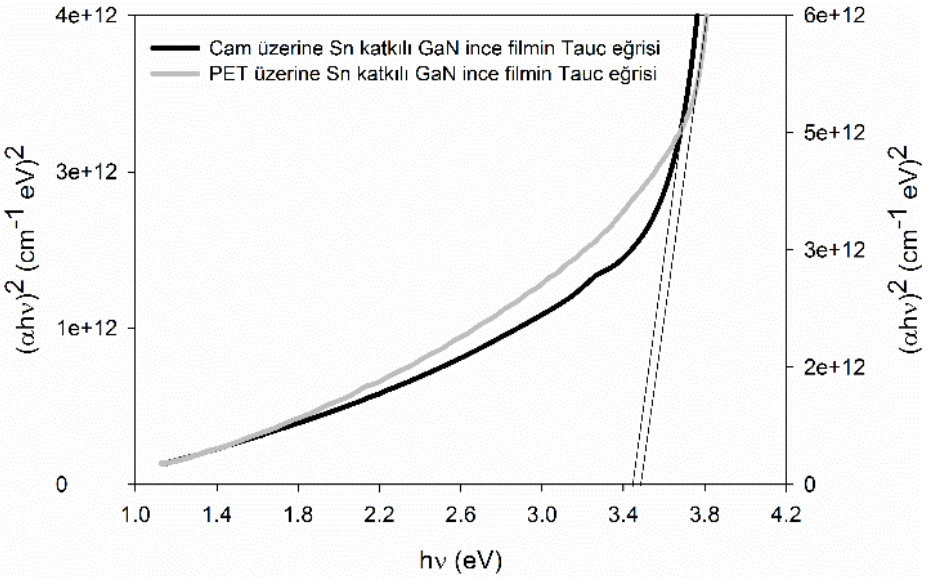
Şekil 7.31 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

Şekil 7.32 de Sn katkılı GaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin optiksel geçirgenlik ve soğurma grafikleri verilmiştir. Cam üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film 350-1100 nm aralığında dalgaboyuna göre artış göstererek %30 dan %32 ye artan bir geçirgenlik grafiği göstererek bu bölgede sabit bir geçirgenlik seyri izlediğini belirtebiliriz. PET üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film ise 350-1100 nm dalgaboyu aralığında artan dalgaboyuna göre %18 den %24 e kadar artış gösteren geçirgenlik değerleri vermiştir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film biraz daha fazla soğurucu davranış göstermiştir. 350 nm dalgaboyundan sonra her iki alttaş üzerine üretilen ince filmler geçirgenlik değerlerinin tersinde bir davranış göstermiştir.



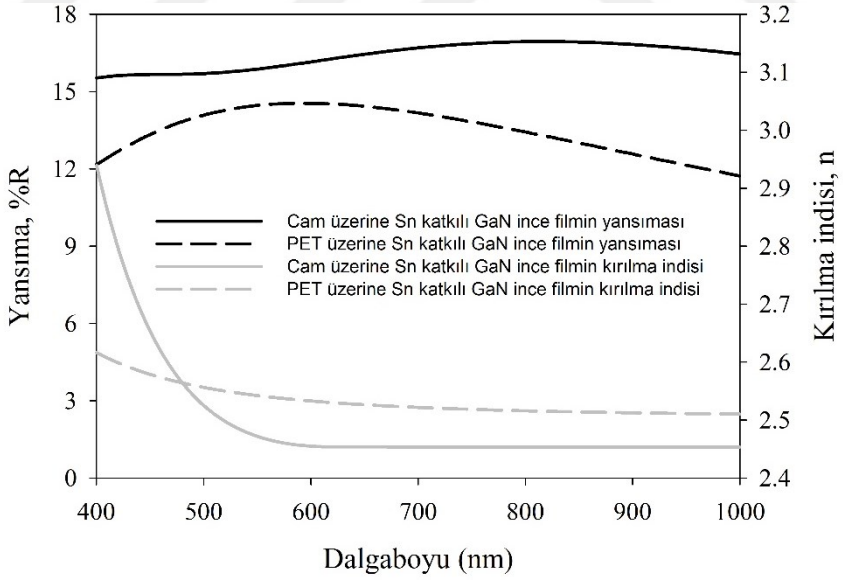
Şekil 7.32 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.32 de yer alan soğurma grafiklerinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve Şekil 7.33 de Tauc eğrisi grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,44 eV ve PET üzerine üretim için 3,49 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden küçük olduğu için morötesi bölgeye kayan değer göstermiştir.



Şekil 7.33 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

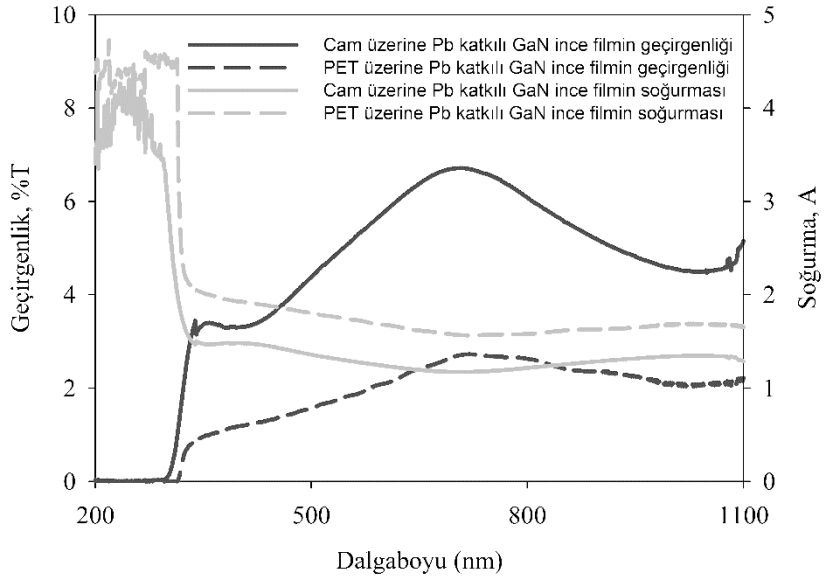
Şekil 7.34 de cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren grafikler yer almaktadır. Cam üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film yaklaşık %15 ila %17 aralığında değişen neredeyse sabit bir yansıma eğrisi göstermiştir. En yüksek yansıma değerine yaklaşık 800 nm de ulaşmış ve 800 nm den sonra yavaşça azalmaya başlamış ve %16 yansıma değerine ulaşmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince film yaklaşık %12-15 yansıma değerlerine sahiptir. PET üzerine üretilen ince film yaklaşık 600 nm de en yüksek seviyeye ulaşıp sonraki dalgaboylarında azalma eğilimi göstermiş ve 1000 nm de %12 yansıma değerini göstermiştir. İki farklı alttaş üzerine üretilen ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında; cam üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film 400 nm dalgaboyunda 2,91 den yaklaşık 550 nm dalgaboyunda 2,46 kırılma indisi değerine eksponansiyel düşüş göstermiştir. PET üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film ölçülen dalgaboyu aralığında 2,6 kırılma indisi değerinden 2,51 kırılma indisi değerine düşmüştür. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin PET alttaş üzerine üretimden daha düşük pürüzlülüklü ve sıkı yapılı olduğu görüşüne varılmıştır



Şekil 7.34 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

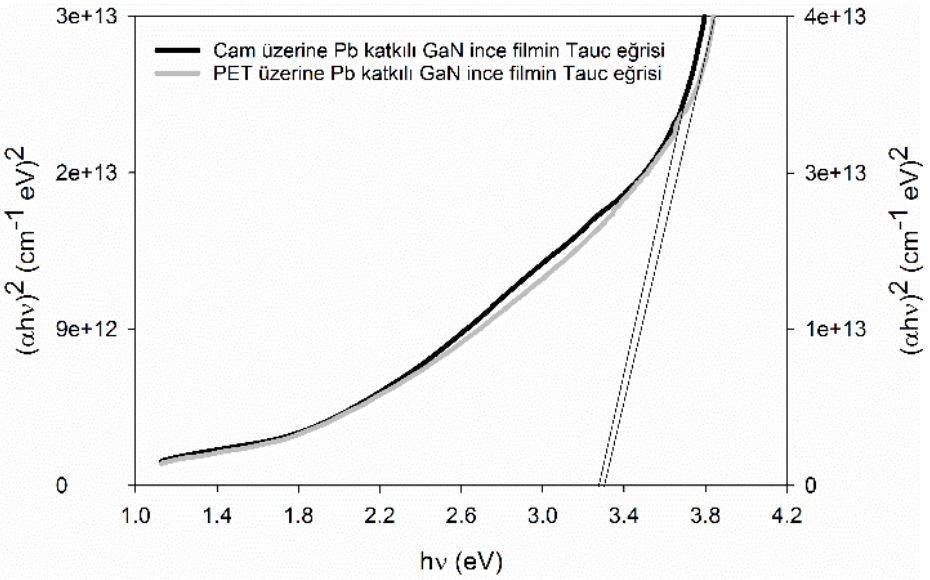
Pb katkılı GaN ince filmlerin cam ve PET alttaşlar üzerine üretimlerinin optiksel geçirgenlik ve soğurma grafikleri Şekil 7.35 de verilmiştir. Cam üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film 350-700 nm aralığında dalgaboyuna göre artış göstererek %3 den %7 ye artan bir geçirgenlik grafiği göstermiş 700 nm dalgaboyundan itibaren düşüş göstererek 1100 nm

de %4 optiksel geçirgenliğe ulaşmıştır. PET üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film ise cam alttaş üzerine ince film gibi 350-700 nm aralığında dalgaboyuna göre artış göstererek %1 den %2,5 a artan bir geçirgenlik grafiği göstermiş 700 nm dalgaboyundan itibaren düşüş göstererek 1100 nm de %2 optiksel geçirgenliğe ulaşarak daha düşük değerler vermiştir. Soğurma tayflarına bakıldığında; 200-350 nm aralığında PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film biraz daha fazla soğurucu davranış göstermiştir.



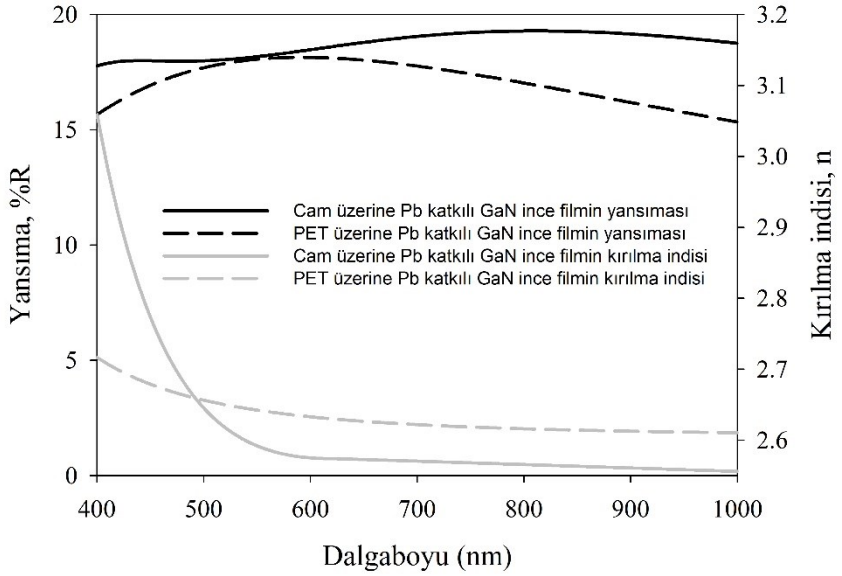
Şekil 7.35 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin geçirgenlik ve soğurma grafikleri

Şekil 7.35 de yer alan soğurma grafiklerinin değerleri kullanılarak cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralıkları belirlenmiştir ve Şekil 7.36 da Tauc eğrisi grafikleri verilmiştir. Tauc eğrisinin lineer kısmının hν eksenini sıfır noktasında kestiği değerler cam üzerine üretim için 3,28 eV ve PET üzerine üretim için 3,30 eV olarak saptanmıştır. PET alttaş üzerine üretilen ince filmin kristal boyutlarının diğer alttaş üzerine üretilen ince filmden küçük olduğu için morötesi bölgeye kayan değer göstermiştir.



Şekil 7.36 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin optiksel yasak enerji aralığı grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin dalgaboyuna göre yansıma ve kırılma indisi değişimlerini veren grafikler Şekil 7.37 de yer almaktadır. Cam üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film yaklaşık %18 ila %19 aralığında değişen bir yansıma eğrisi göstermiştir. En yüksek yansıma değerine yaklaşık 800 nm de ulaşmış ve 800 nm den sonra yavaşça azalmaya başlamış ve %18 yansıma değerine ulaşmıştır. PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film yaklaşık %15-18 yansıma değerlerine sahiptir. PET üzerine üretilen ince film yaklaşık 550 nm de en yüksek seviyeye ulaşıp sonraki dalgaboylarında azalma eğilimi göstermiş ve 1000 nm de %15 yansıma değerini göstermiştir. İki farklı alttaş üzerine üretilen ince filmlerin kırılma indisi grafiklerine bakıldığında; cam üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film 400 nm dalgaboyunda 3,05 den yaklaşık 550 nm dalgaboyunda 2,56 kırılma indisi değerine düşmüştür. PET üzerine üretilen ince film ölçülen dalgaboyu aralığında 2,69 kırılma indisi değerinden 2,61 kırılma indisi değerine düşmüştür.



Şekil 7.37 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin yansıma ve kırılma indisi grafikleri

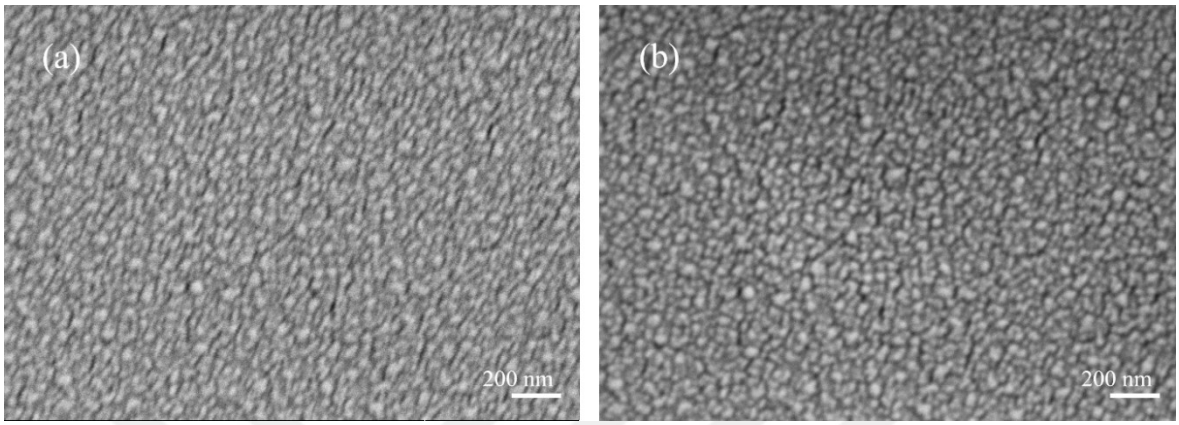
7.3. GaN Temelli İnce Filmlerin Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada üretilen GaN temelli ince filmlerin yüzey özelliklerini incelemek için Zeiss SUPRA 55 alan emisyonlu taramalı elektron mikroskop (FESEM) cihazı ve Ambios Q-Scope atomik kuvvet mikroskop cihazı (AFM) kullanılmıştır. FESEM analizi öncesinde üretilen numunelerin yüzeyleri Quorum Q150R ES kaplama cihazı tarafından altın paladyum ile kaplanmıştır. Zeiss SUPRA 55 FESEM cihazı ile 100kx büyütmede cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen GaN ve katkılı GaN ince filmlerin yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Ambios Q-Scope AFM cihazı aracılığıyla ise cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilen ince filmlerin yüzey morfolojileri temassız biçimde (non-contact mode) kullanılarak 2000 nm x 2000 nm tarama boyutlarında, 2 Hz tarama hızında iki ve üç boyutlu görüntüleri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, skewness, kurtosis, yükseklik, tanecik boyutu gibi yüzey özellikleri AFM cihazının yazılımı aracılığıyla belirlenmiştir. Üretilen numunelerin yüzeysel özelliklerinin sonuçları katkısız GaN ince filmler, üç atomlu GaN ince filmler ve 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmler olarak 3 ayrı alt başlık altında detaylı olarak verilmiştir.

7.3.1. GaN ince filmlerin yüzey özellikleri

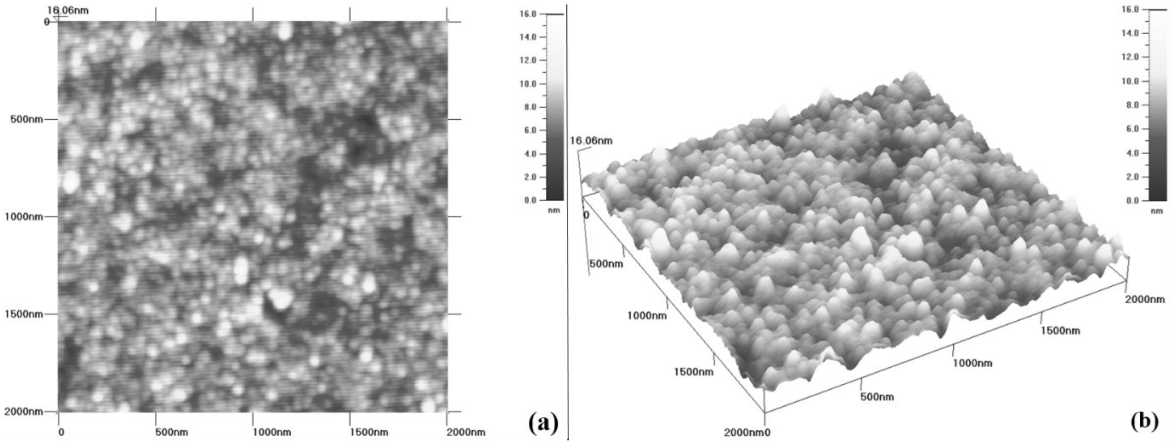
Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen katkısız GaN ince filmin FESEM görüntüsü Şekil 7.38 de verilmiştir. Üretilen yarıiletken ince filmlerin yaklaşık 40-50 nm genişliğe

sahip yuvarlak taneciklerden oluştuğu görülmüştür. GaN ince film yapısının sıkı formda oluştuğu görülmektedir. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların GaN ince film ile homojen bir şekilde tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

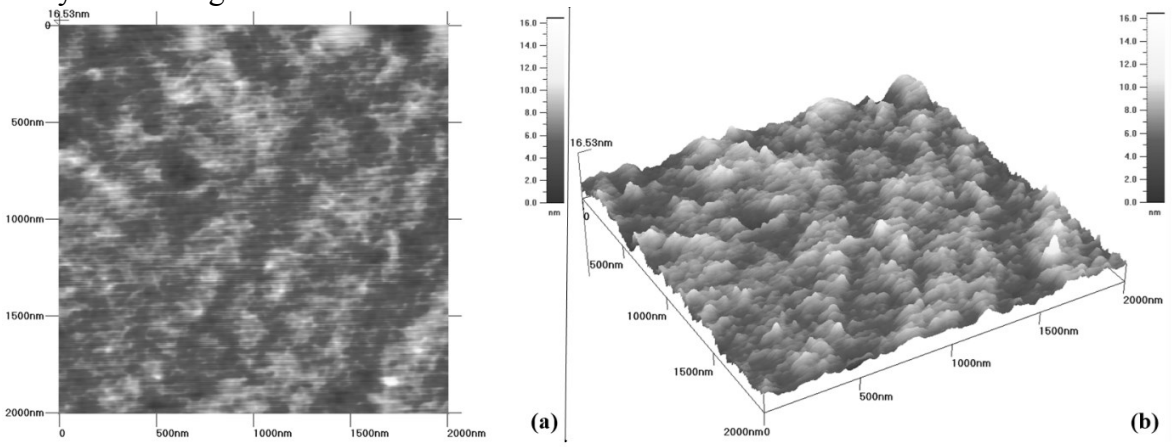


Şekil 7.38 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.39 ile katkısız GaN ince filmin 2-boyutlu ve 3-boyutlu AFM grafiği cam alttaş üzerine üretimi için verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında birkaç yerde siyah bölgeler birkaç yerde de nispeten daha geniş sarı bölgeler görünmektedir. Siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, siyahtan beyaz renge giderken yükseltinin arttığını ve pik yaptığını temsil etmektedir. Şekil 7.39 da yer alan 16,06 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.40 ile PET alttaş üzerine üretilen katkısız GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafiği verilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen GaN ince film için görüntüler daha az inişli çıkışlı görülmektedir. Şekil 7.40 da yer alan 16,53 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.



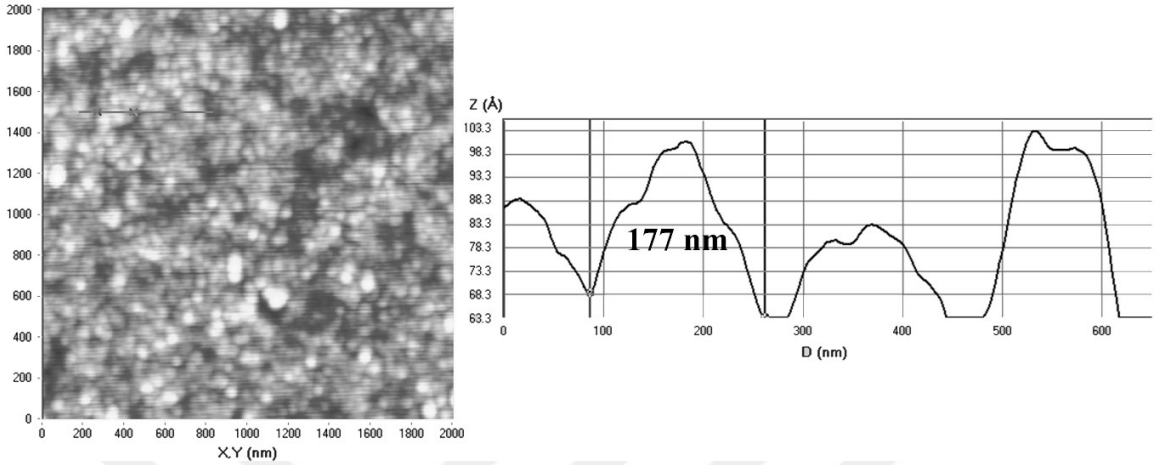
Şekil 7.39 Cam alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü



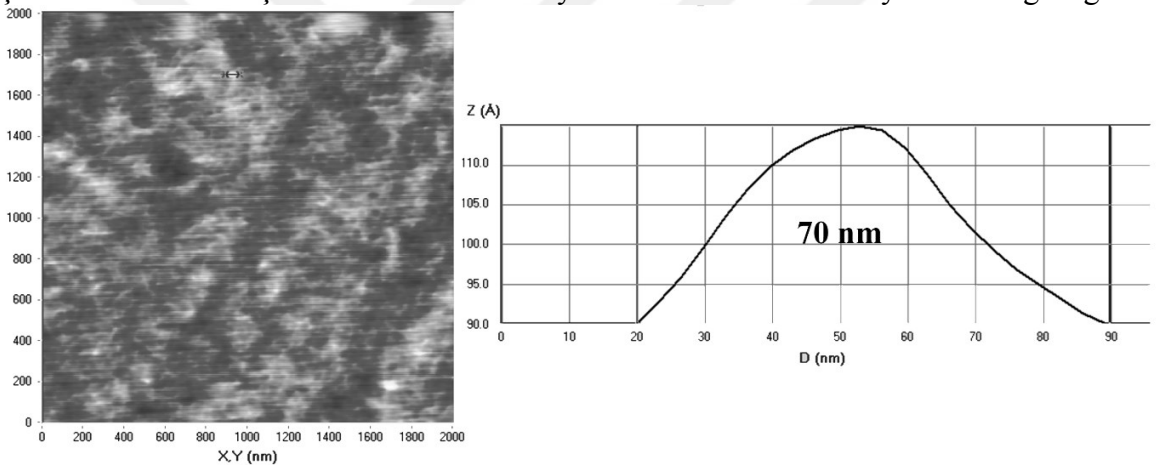
Şekil 7.40 PET alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen katkısız GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 7,3 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,2 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 1,5 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,16; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,9; pik yüksekliği 8,8 nm ve çukur derinliği 7,3 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen katkısız GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 6,0 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,2 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 1,5 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,13; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,25; pik yüksekliği 10,52 nm ve çukur derinliği 6,0 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri PET alttaş üzerine üretimin cam alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.41 ile cam alttaş üzerine Şekil 7.42 ile de PET alttaş üzerine üretilen katkısız GaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 177 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 70 nm olarak tespit

edilmiştir. Cam üzerine üretilen ince filmde tanecikler üzerinde yine farklı boyutlarda taneciklerin oluştuğu görülmüştür.



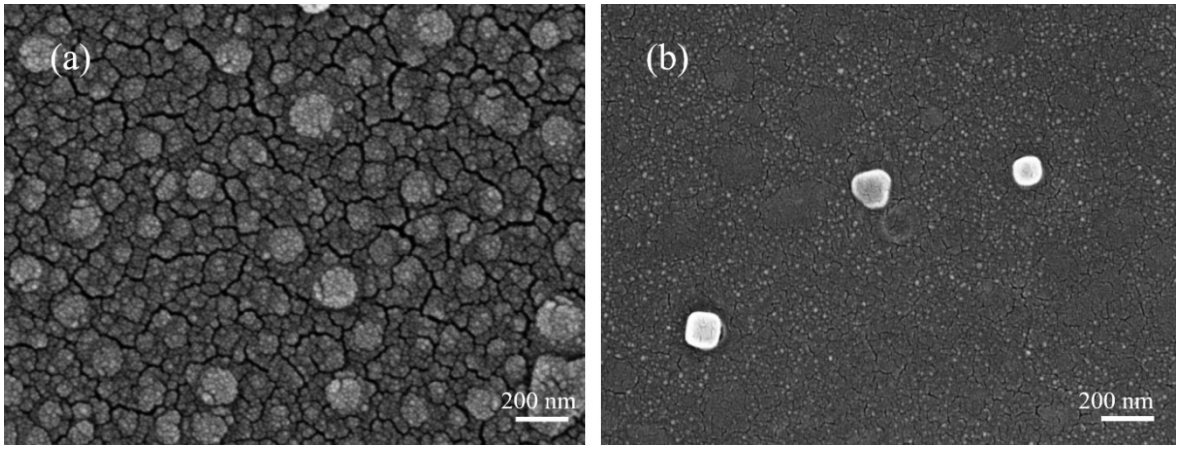
Şekil 7.41 Cam alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



Şekil 7.42 PET alttaş üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

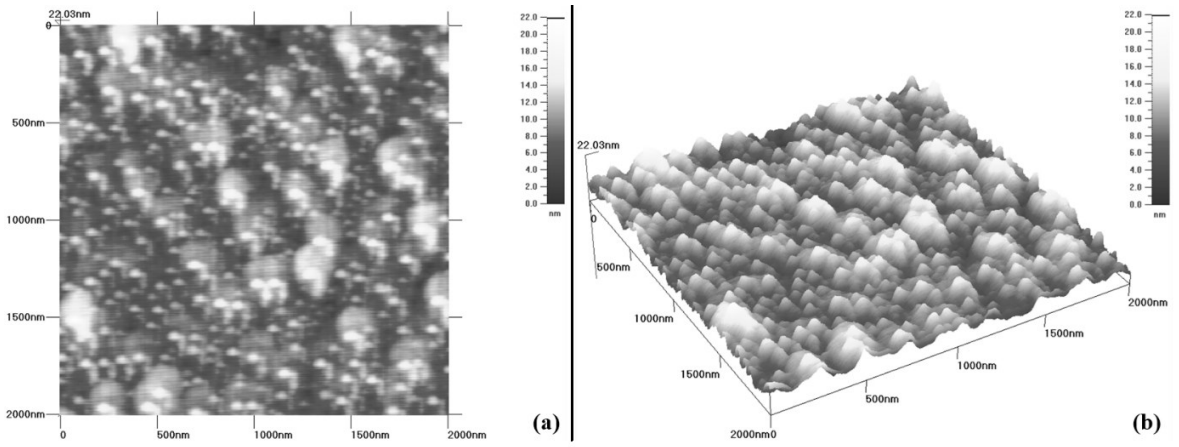
7.3.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin yüzey özellikleri

Cam ve PET alttaşlar üzerine B katkılama ile üretilen BGaN ince filmin FESEM görüntüsü Şekil 7.43'te verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin yaklaşık 150-200 nm genişliğe sahip büyük yuvarlak taneciklerden ve aralarında 40-50 nm genişliğe sahip küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Şekil 7.43 (a) da yer alan FESEM görüntüsünde çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin az sayıda yaklaşık 150-200 nm genişliğe sahip büyük yuvarlak taneciklerden ve çok büyük bir bölümünün 20-30 nm genişliğe sahip küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların BGaN ince film ile homojen bir şekilde tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

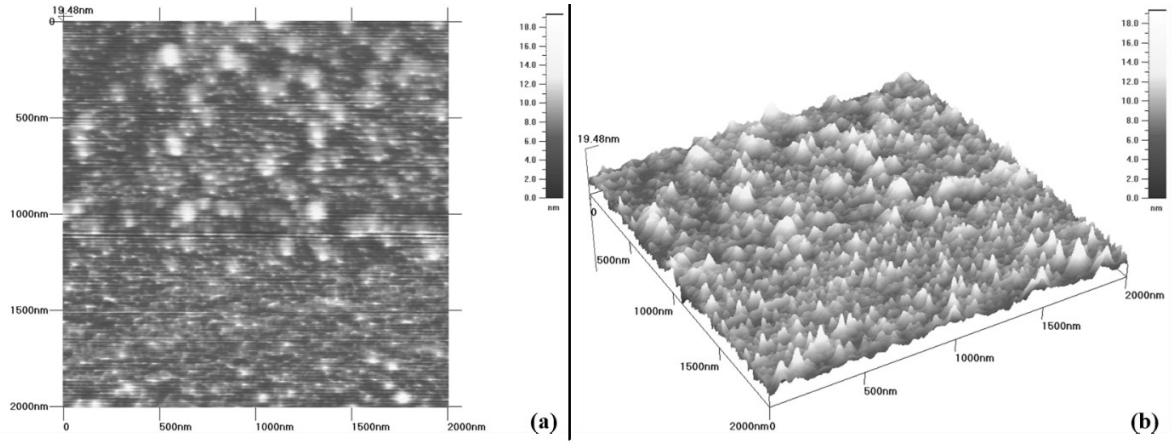


Şekil 7.43 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.44 ile cam alttaş üzerine üretilen BGaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında birkaç yerde koyu siyah bölgeler birkaç yerde de nispeten daha geniş açık siyah bölgeler görünmektedir. Koyu siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını temsil etmektedir. Şekil 7.44 de yer alan 22,03 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.45 ile PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince film için görüntülerde renk farkları daha az görülmektedir. Şekil 7.45 de yer alan 19,48 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

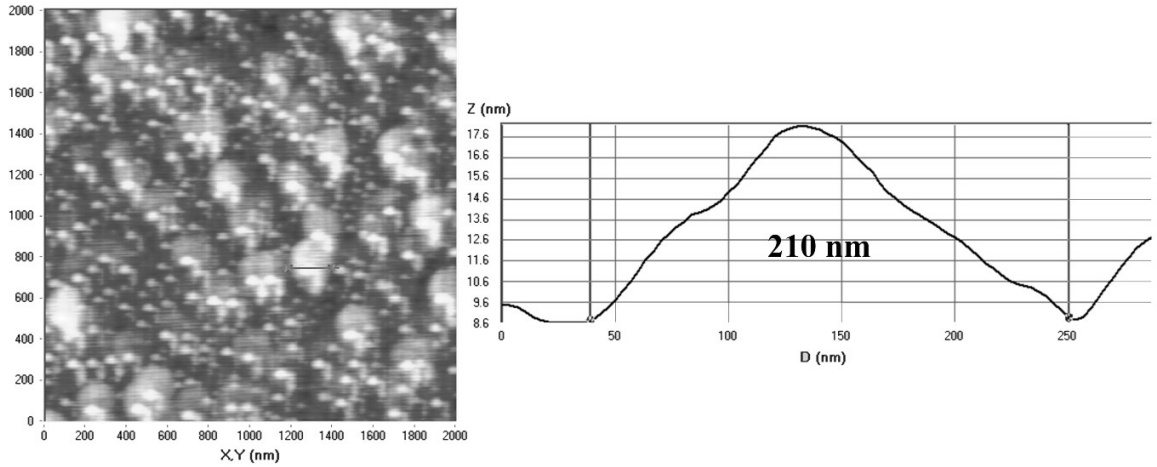


Şekil 7.44 Cam alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

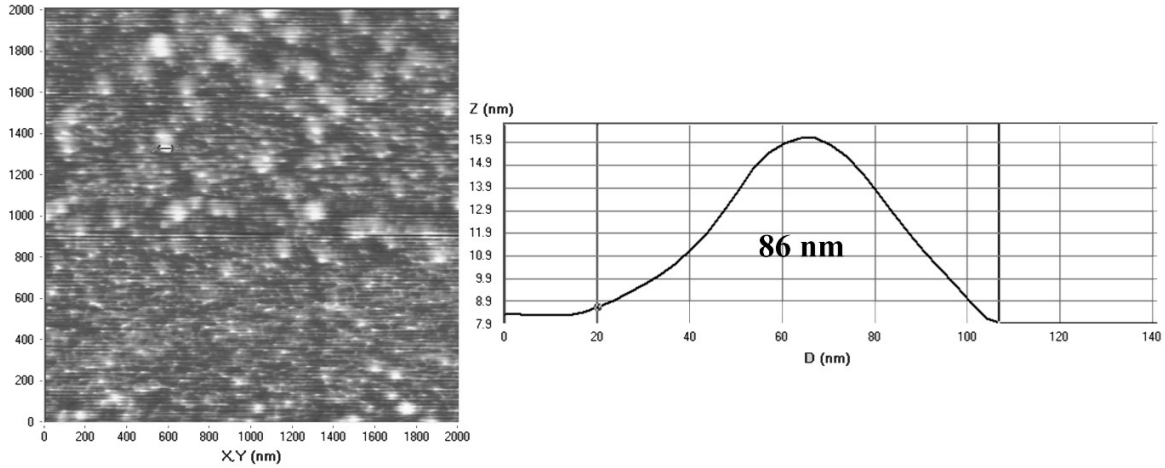


Şekil 7.45 PET alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen BGaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 9,0 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,1 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 2,6 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,56; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,43; pik yüksekliği 13,0 nm ve çukur derinliği 9,0 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 7,3 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,3 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 1,7 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,76; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 1,60; pik yüksekliği 11,9 nm ve çukur derinliği 7,3 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri cam alttaş üzerine üretimin PET alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.46 ile cam alttaş üzerine ve Şekil 7.47 ile de PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 210 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 86 nm olarak tespit edilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen ince filmde tanecikler üzerinde yine farklı boyutlarda taneciklerin oluştuğu görülmüştür. PET alttaş üzerine üretilen ince filmde bu durumun çok az sayıda olduğu görülmüştür.

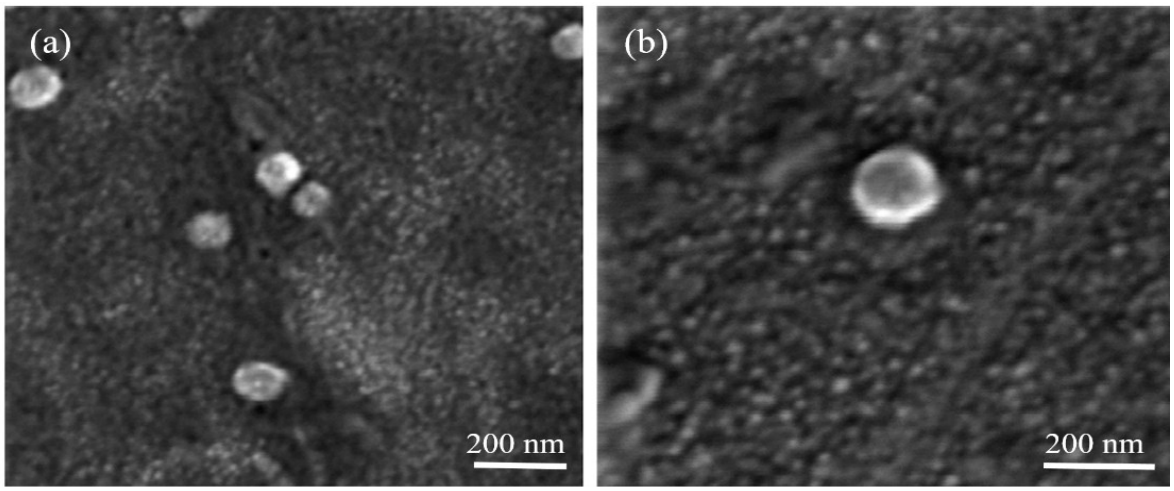


Şekil 7.46 Cam alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



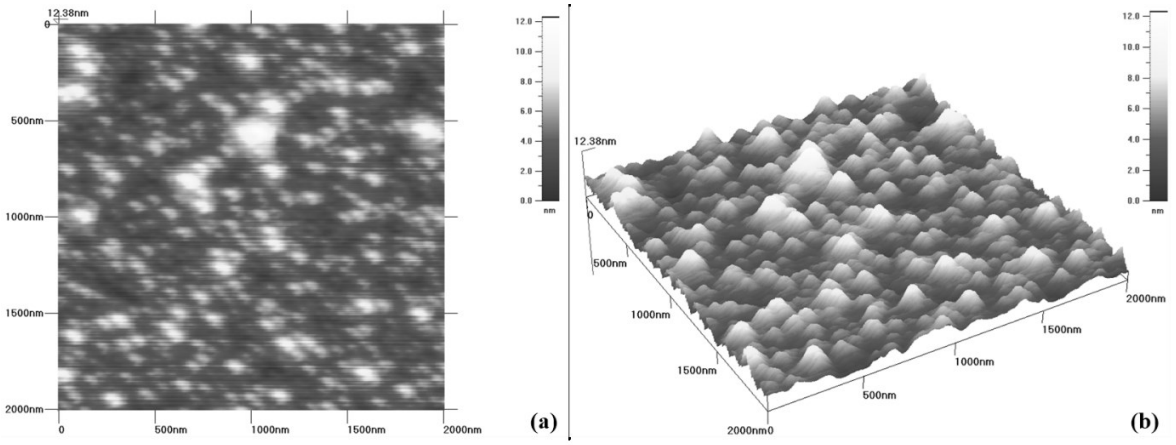
Şekil 7.47 PET alttaş üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine Al katkılama ile üretilen AlGaN ince filmin FESEM görüntüsü Şekil 7.48 de yer almaktadır. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmde yaklaşık 100-150 nm genişliğinde yuvarlak büyük taneciklerin ve aralarında 20-30 nm genişliğe sahip küçük taneciklerin yer aldığı görülmüştür. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmde yaklaşık 200 nm genişliğe sahip büyük yuvarlak bir tanecik ve çok sayıda 30-40 nm genişliğe sahip küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların AlGaN ince film ile tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

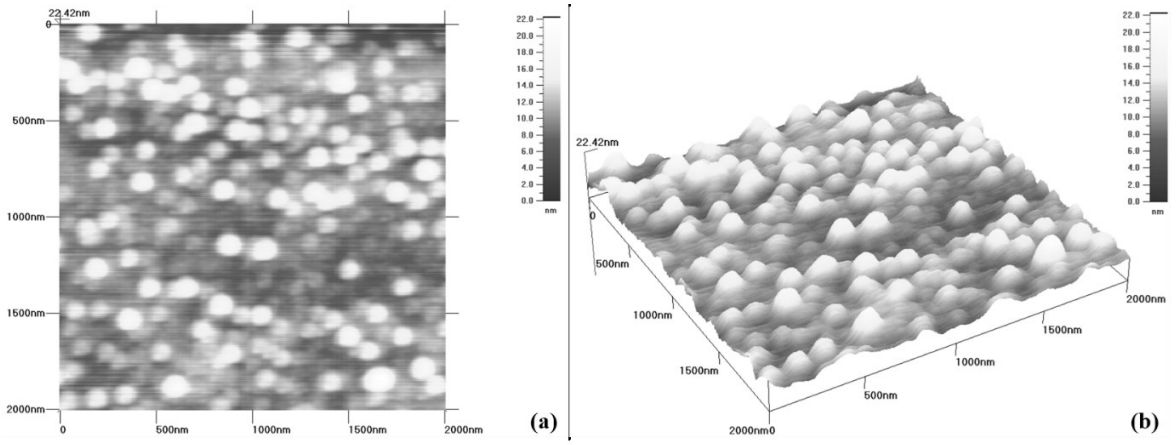


Şekil 7.48 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.49 ile cam alttaş üzerine üretilen AlGaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen numunenin AFM görüntülerine bakıldığında birkaç yerde koyu siyah bölge görünmektedir. Siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını temsil etmektedir. Şekil 7.49 da yer alan 12,38 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.50 ile PET alttaş üzerine üretilen AlGaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında siyah bölgenin yer almadığı görülmüştür. PET alttaş üzerine üretilen AlGaN ince film için görüntülerde renk farkları daha az görülmektedir. Şekil 7.50 de yer alan 22,42 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

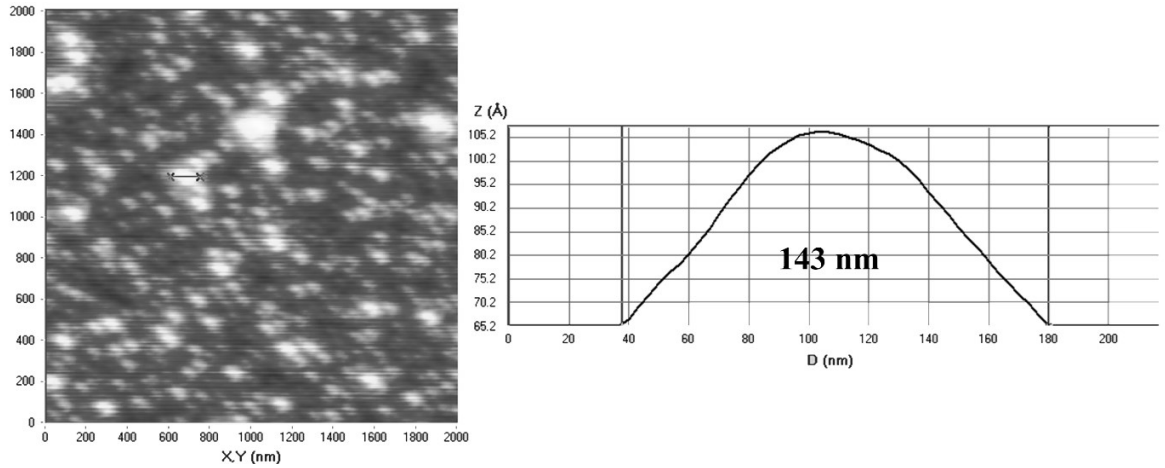


Şekil 7.49 Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

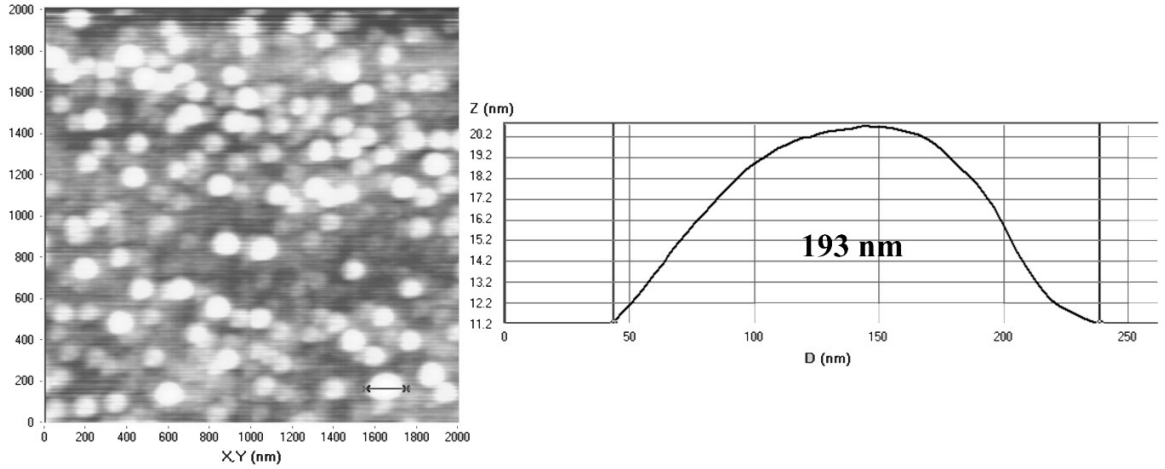


Şekil 7.50 PET alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 4,3 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,2 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 1,5 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,72; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,96; pik yüksekliği 8,1 nm ve çukur derinliği 4,3 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen AlGaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 11,1 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,1 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 2,6 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,58; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,50; pik yüksekliği 11,3 nm ve çukur derinliği 11,1 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri PET alttaş üzerine üretimin cam alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.51 ile cam alttaş üzerine ve Şekil 7.52 ile de PET alttaş üzerine üretilen AlGaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 143 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 193 nm olarak tespit edilmiştir.

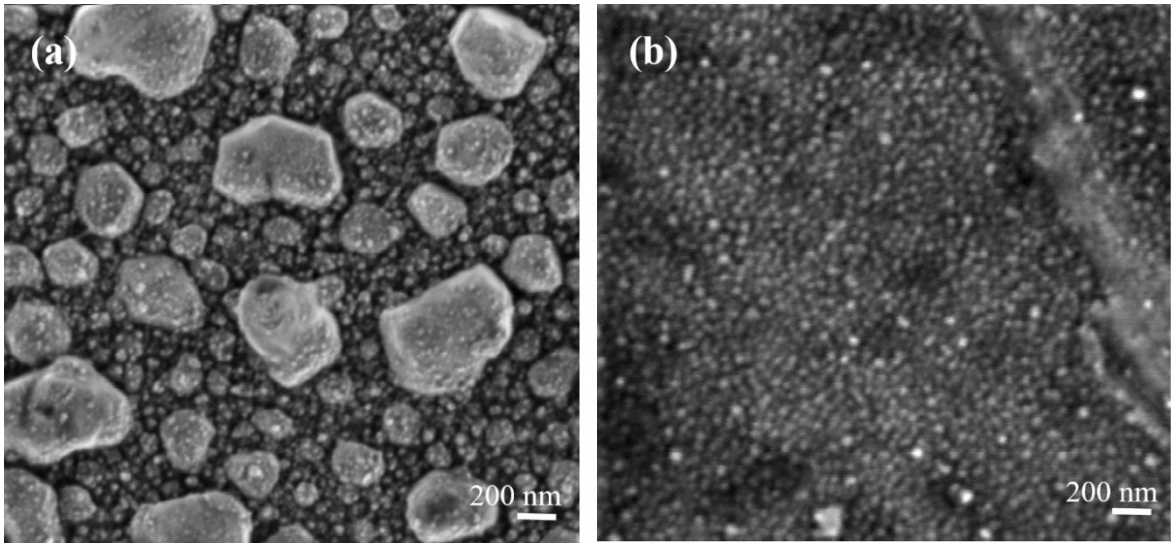


Şekil 7.51 Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



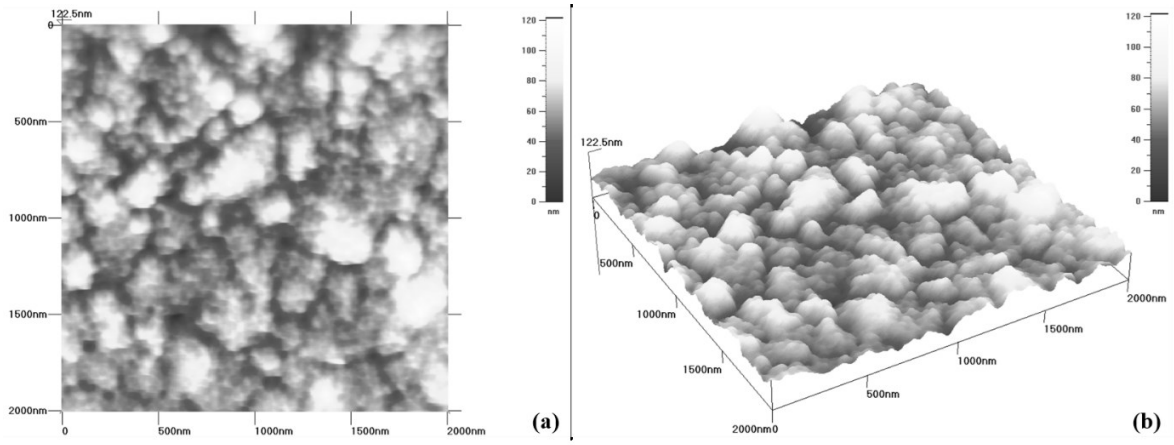
Şekil 7.52 PET alttaş üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine In katkılama ile üretilen InGaN ince filmin FESEM görüntüsü Şekil 7.53 de yer almaktadır. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmde yaklaşık 400-600 nm genişliğinde yuvarlak olmayan çeşitli şekillerde büyük makro parçacıklar ve bu makro parçacıkların üzeri de dahil olmak üzere filmin her yerinde 20-30 nm genişliğe sahip küçük taneciklerin yer aldığı görülmüştür. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin 20-50 nm aralığında genişliğe sahip çok sayıda küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların InGaN ince film ile tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

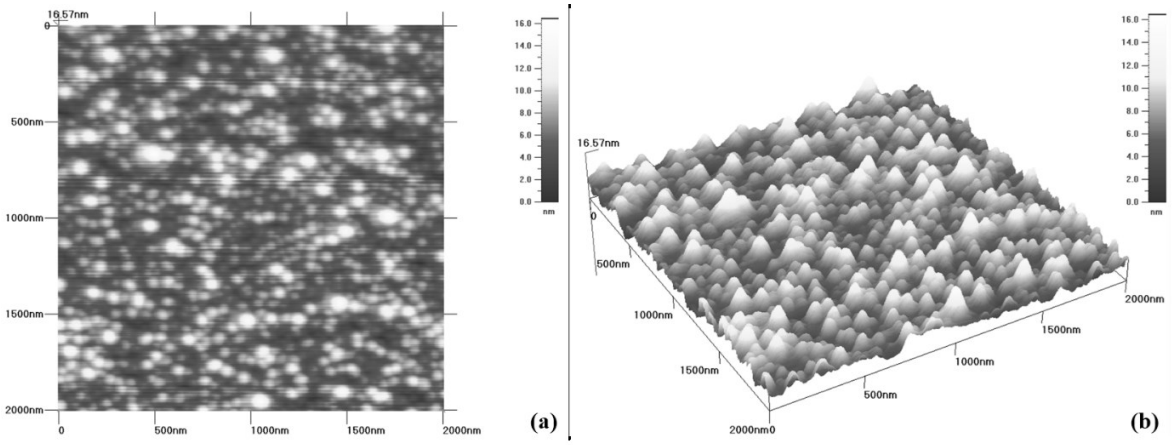


Şekil 7.53 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.54 ile cam alttaş üzerine üretilen InGaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen numunenin AFM görüntülerine bakıldığında bazı yerlerde koyu siyah bölgelerin olduğu görünmektedir. Koyu siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını temsil etmektedir. Şekil 7.54 de yer alan 122,5 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.55 ile PET alttaş üzerine üretilen InGaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında baskın siyah bölgeler olduğu görülmüştür. Şekil 7.55 de yer alan 16,57 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

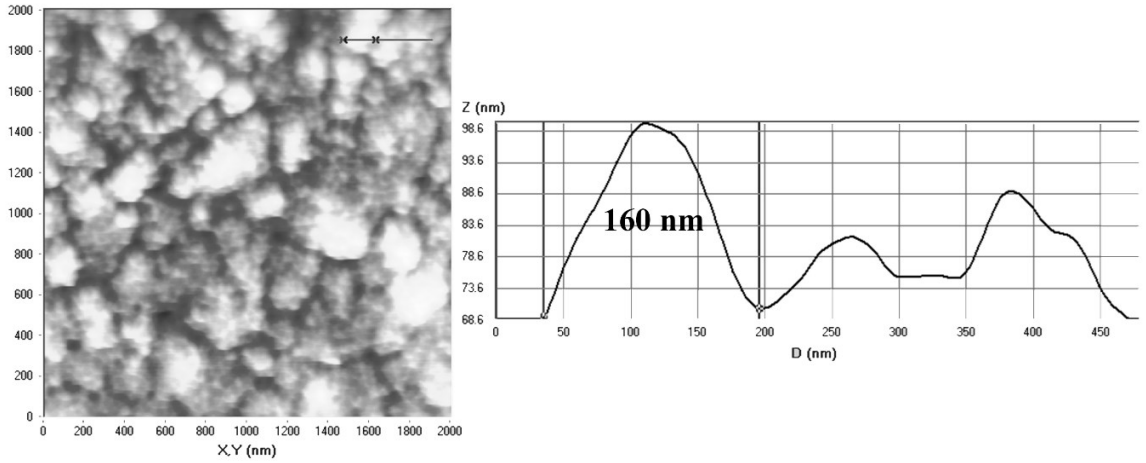


Şekil 7.54 Cam alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

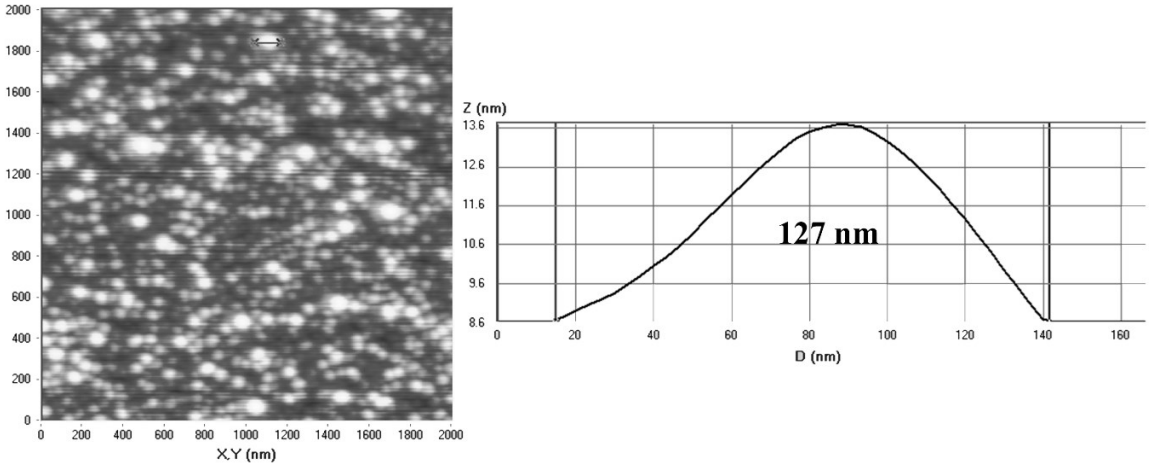


Şekil 7.55 PET alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen InGaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 59,7 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 12,71 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 16,05 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,29; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,18; pik yüksekliği 62,7 nm ve çukur derinliği 59,7 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen InGaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 6,4 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,7 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 2,1 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,53; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,33; pik yüksekliği 10,2 nm ve çukur derinliği 6,4 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri cam alttaş üzerine üretimin PET alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.56 ile cam alttaş üzerine Şekil 7.57 ile de PET alttaş üzerine üretilen InGaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 160 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 127 nm olarak tespit edilmiştir.



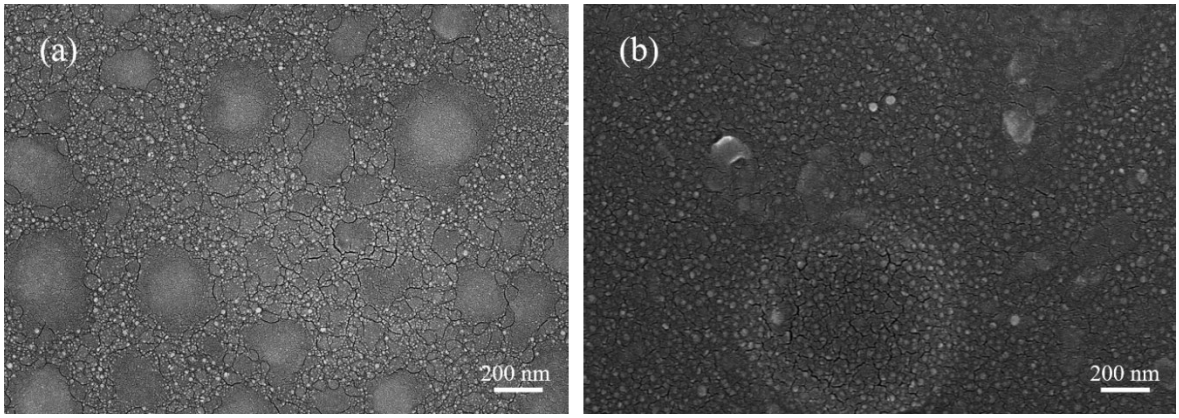
Şekil 7.56 Cam alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



Şekil 7.57 PET alttaş üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

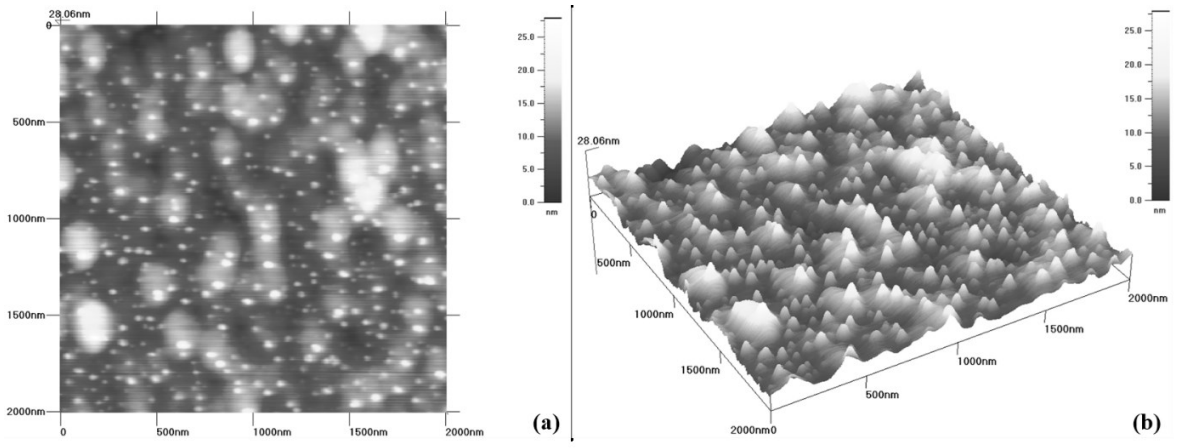
7.3.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin yüzey özellikleri

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin FESEM görüntüleri Şekil 7.58 de yer almaktadır. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmde yaklaşık 200-300 nm genişliğinde yuvarlak iz oluşturmuş yapılar görülmektedir ve bu yapılar haricindeki filmin her yerinde 15-20 nm genişliğe sahip küçük taneciklerin yer aldığı görülmüştür. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmde yaklaşık 900 nm genişliğinde cam alttaş üzerine üretimde görüldüğü gibi tek bir yerde yuvarlak iz oluşturmuş yapı görülmektedir. Ayrıca ince filmin 15-30 nm aralığında genişliğe sahip çok sayıda küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların çatlaklara sahip ince film ile kaplandığı gözlemlenmiştir.

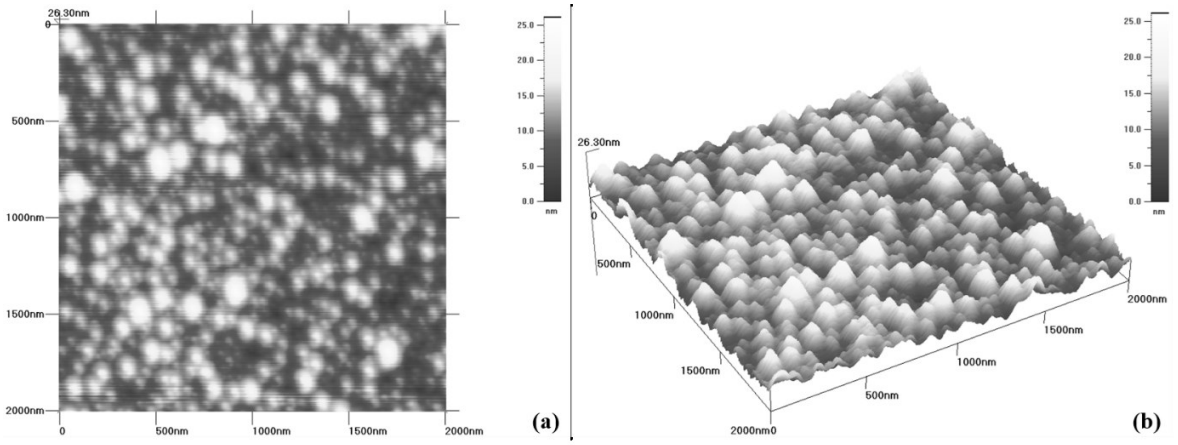


Şekil 7.58 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.59 ile cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen numunenin AFM görüntülerine bakıldığında bazı yerlerde koyu siyah bölgelerin oluştuğu görünmektedir. Koyu siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını göstermektedir. Şekil 7.59 da yer alan 28,06 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.60 ile PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında koyu siyah bölgelerin bazı yerlerde bulunduğu görülmüştür. Şekil 7.60 da yer alan 26,30 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

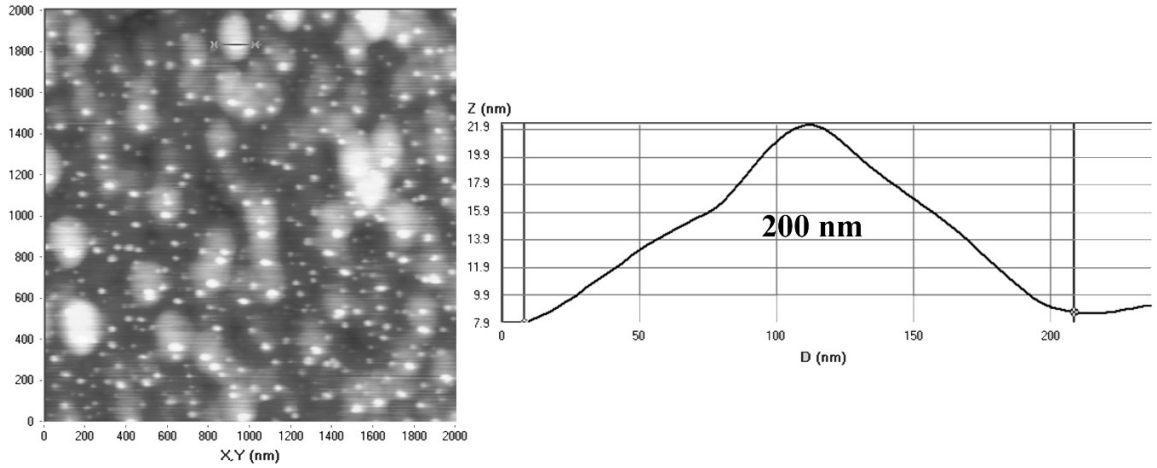


Şekil 7.59 Cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

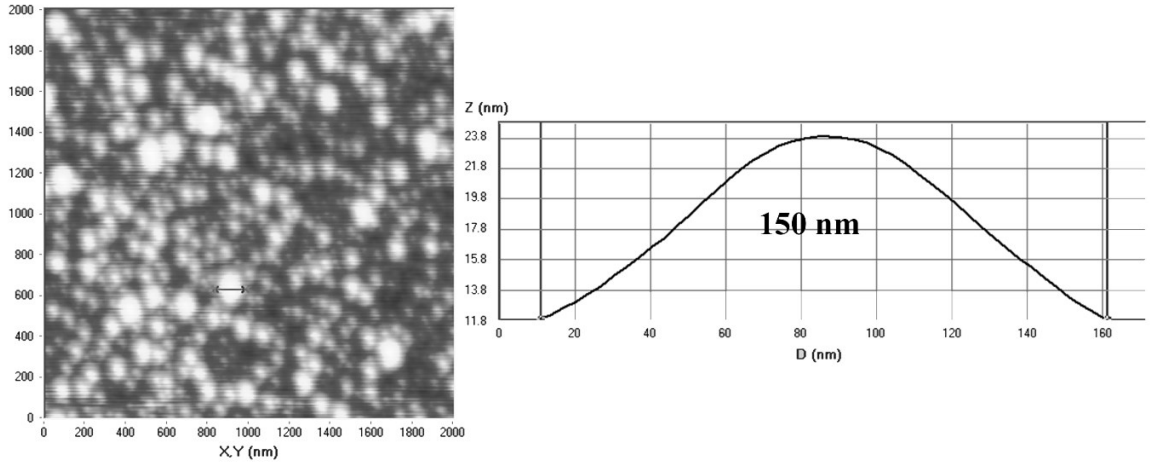


Şekil 7.60 PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 10,8 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,6 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 3,3 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,57; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,77; pik yüksekliği 17,3 nm ve çukur derinliği 10,8 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 10,9 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,7 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 3,5 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,49; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,29; pik yüksekliği 15,4 nm ve çukur derinliği 10,9 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri PET alttaş üzerine üretimin cam alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.61 ile cam alttaş üzerine Şekil 7.62 ile de PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 200 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 150 nm olarak tespit edilmiştir.

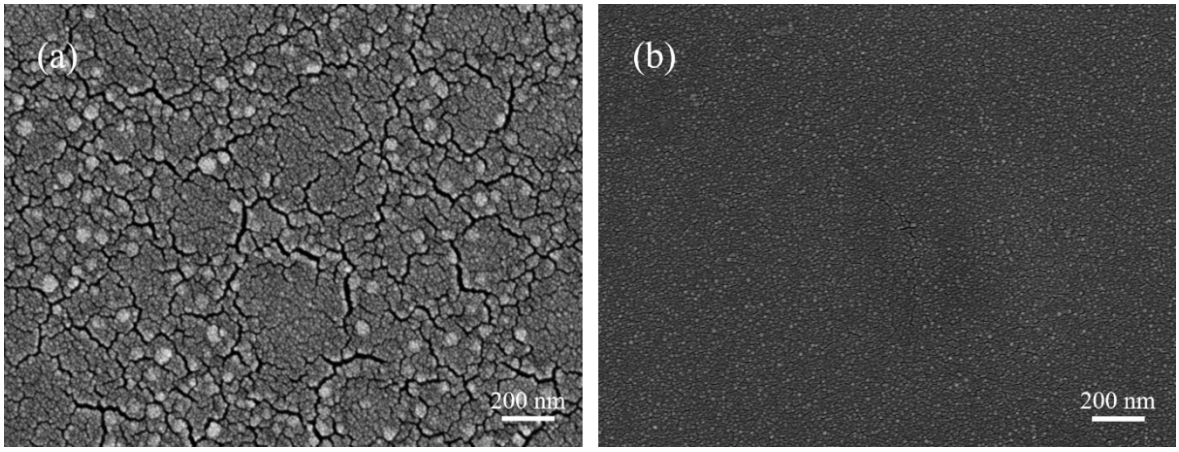


Şekil 7.61 Cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



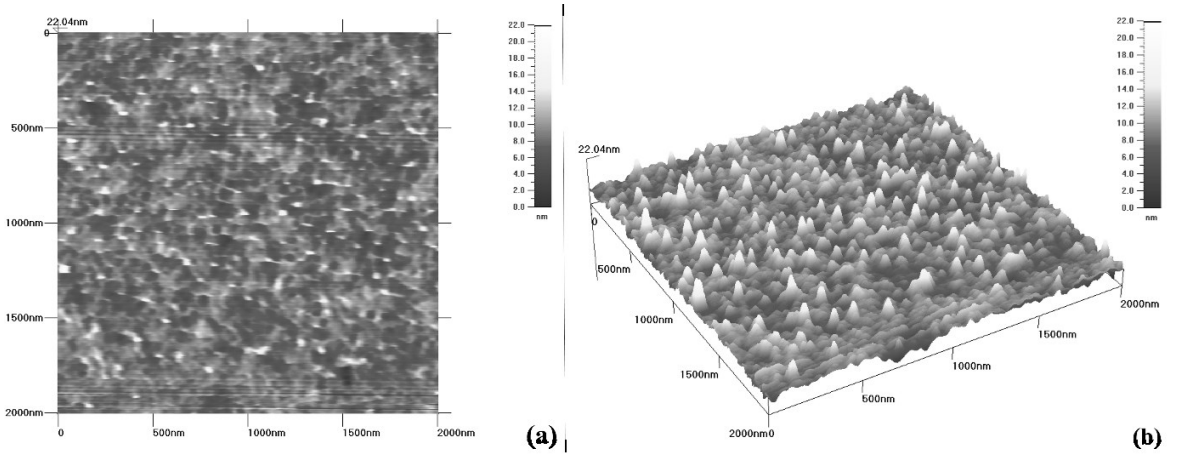
Şekil 7.62 PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin FESEM görüntüleri Şekil 7.63 de verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin yaklaşık 20-25 nm genişliğe sahip taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Bu taneciklerin alttaş üzerinde homojen bir dağılıma sahip olmadığı görülmüştür. Şekil 7.63 (a) da yer alan FESEM görüntüsünde çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin tamamının yaklaşık 10 nm genişliğe sahip çok küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların Si katkılı GaN ince film ile tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

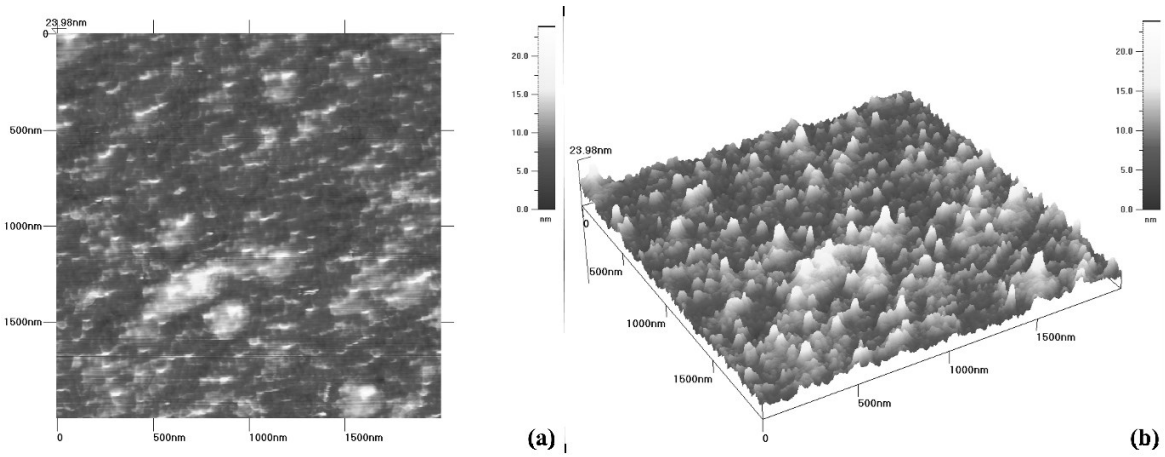


Şekil 7.63 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.64 ile cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen numunenin AFM görüntülerine bakıldığında bazı yerlerde koyu siyah bölgelerin oluştuğu görülmüştür. Koyu siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını göstermektedir. Şekil 7.64 de yer alan 22,04 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.65 ile PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında PET alttaş üzerine üretime nispeten daha açık renkte bölgelerin bulunduğu görülmüştür. Şekil 7.65 de yer alan 23,98 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

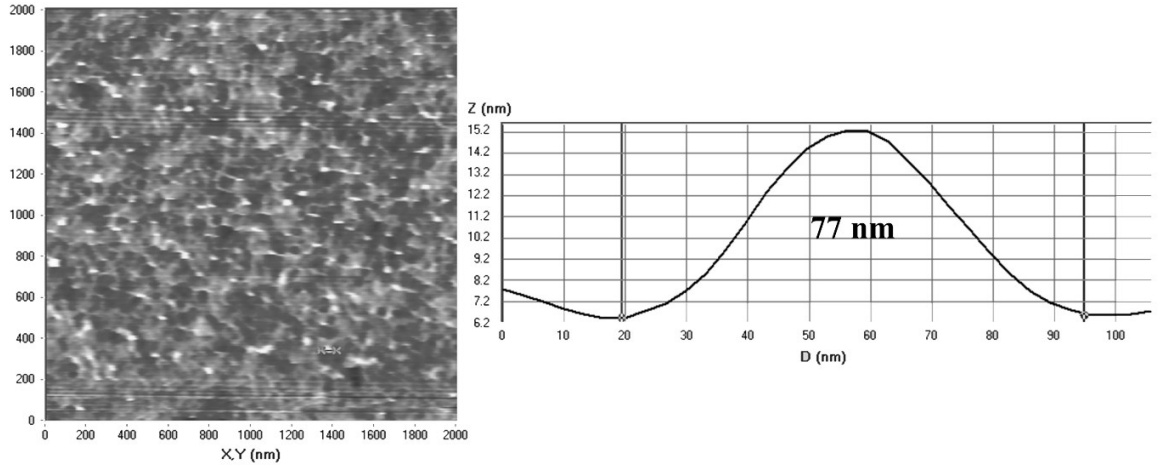


Şekil 7.64 Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

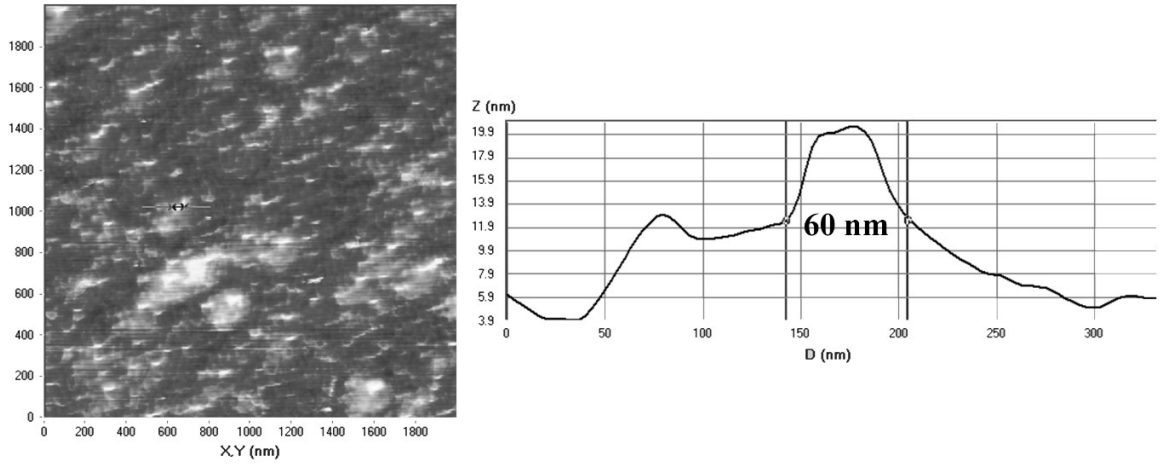


Şekil 7.65 PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 8,4 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,3 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 1,7 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,70; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 2,49; pik yüksekliği 13,7 nm ve çukur derinliği 8,4 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 7,8 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,0 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 2,5 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,91; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 1,60; pik yüksekliği 16,2 nm ve çukur derinliği 7,8 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri PET alttaş üzerine üretimin cam alttaş üzerine üretimden daha asimetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.66 ile cam alttaş üzerine Şekil 7.67 ile de PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 77 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 60 nm olarak tespit edilmiştir.

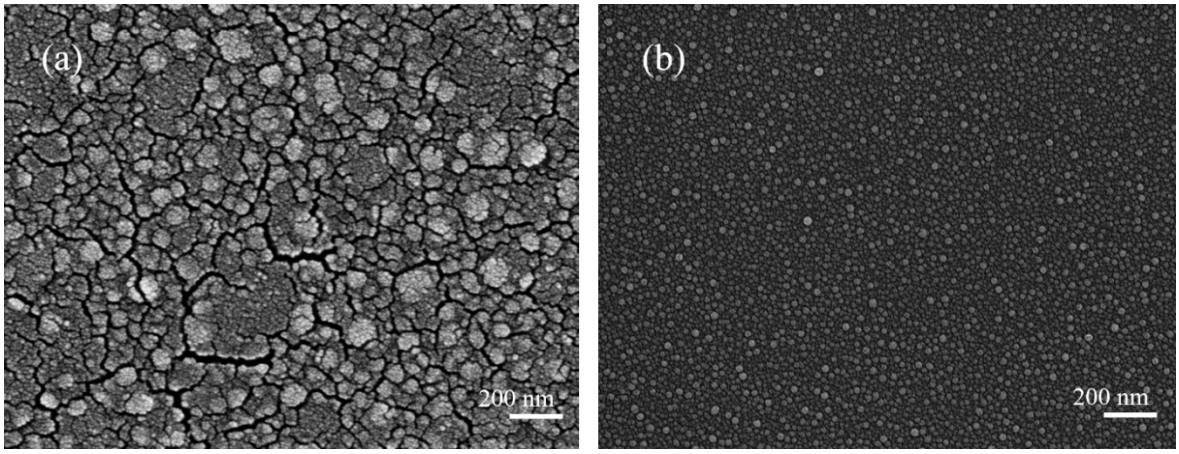


Şekil 7.66 Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



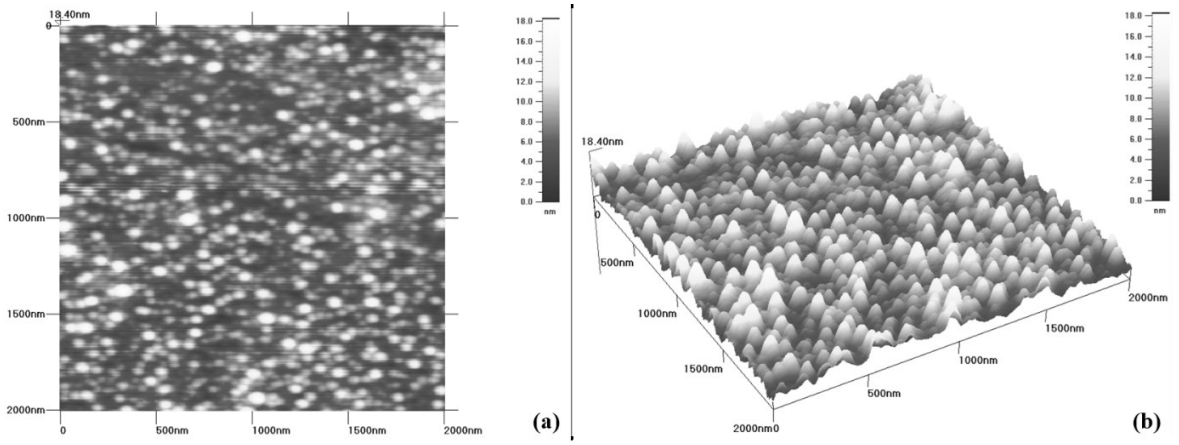
Şekil 7.67 PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin FESEM görüntüleri Şekil 7.68 de verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin yaklaşık 60-80 nm genişliğe sahip taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Bu taneciklerin alttaş üzerinde nispeten homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Şekil 7.68 (a) da yer alan FESEM görüntüsünde çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin tamamının yaklaşık 15-20 nm genişliğe sahip çok küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların Ge katkılı GaN ince film ile homojen bir şekilde tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

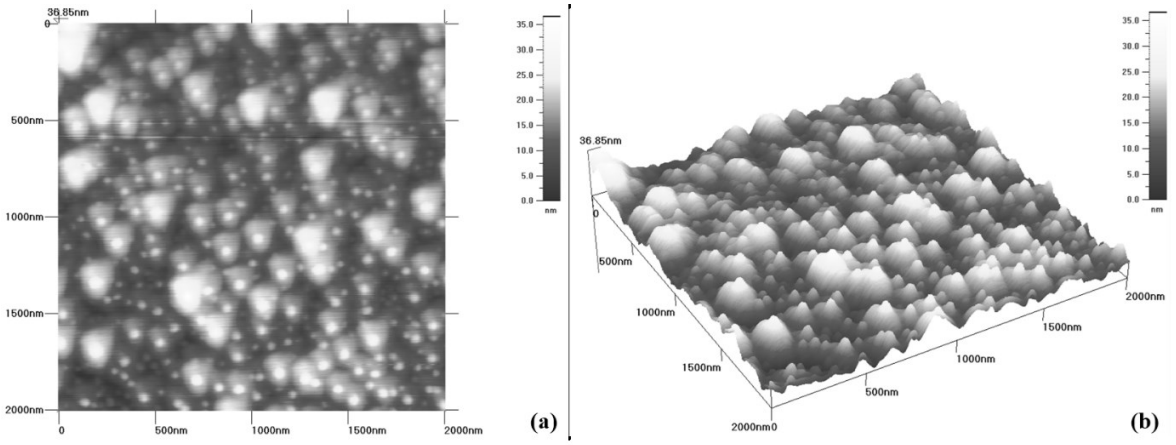


Şekil 7.68 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.69 ile cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen numunenin AFM görüntülerine bakıldığında bir iki yerde geniş koyu siyah bölgelerin oluştuğu görülmüştür. Koyu siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını göstermektedir. Şekil 7.69 da yer alan 18,40 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.70 ile PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında cam alttaş üzerine üretime nispeten daha açık renkte bölgelerin bulunduğu görülmüştür. Şekil 7.70 de yer alan 36,85 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

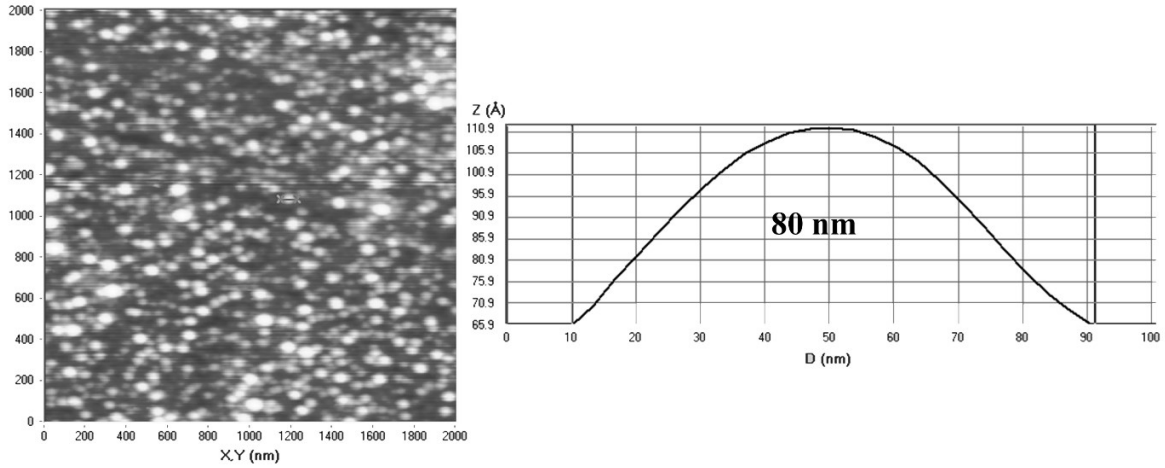


Şekil 7.69 Cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

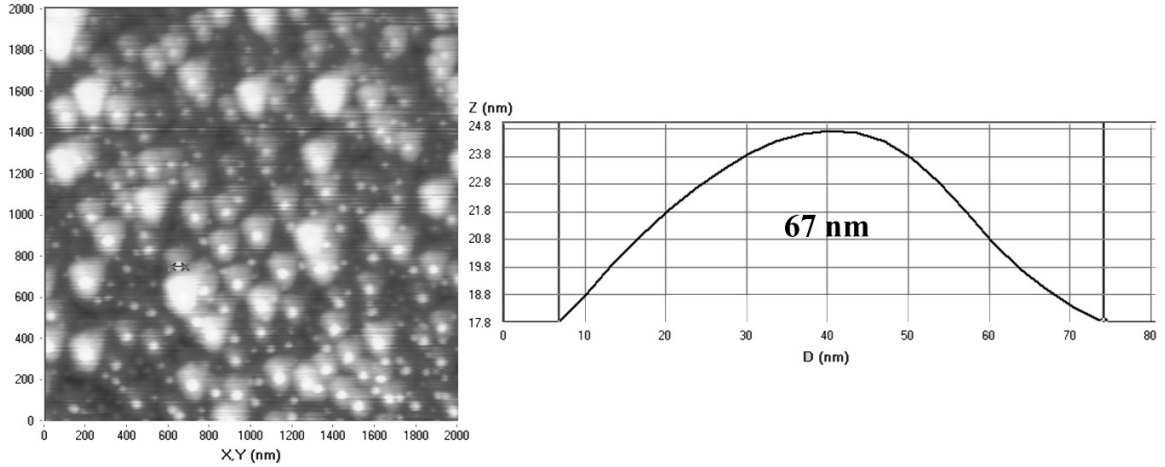


Şekil 7.70 PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 7,2 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,8 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 2,3 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,75; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,91; pik yüksekliği 11,2 nm ve çukur derinliği 7,2 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 14,4 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 4,0 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 5,0 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,56; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,39; pik yüksekliği 22,5 nm ve çukur derinliği 14,4 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri PET alttaş üzerine üretimin cam alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.71 ile cam alttaş üzerine ve Şekil 7.72 ile de PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 80 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 67 nm olarak tespit edilmiştir.

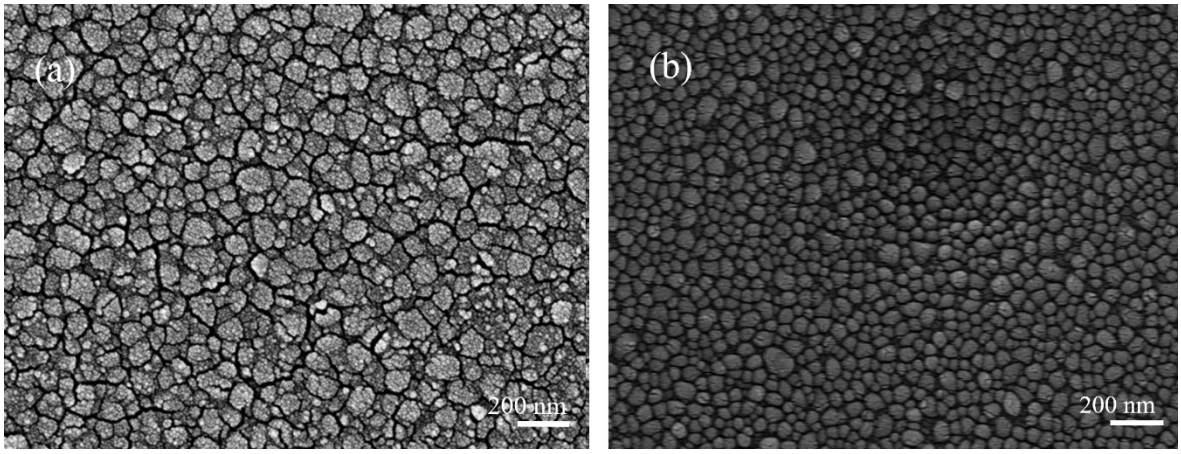


Şekil 7.71 Cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



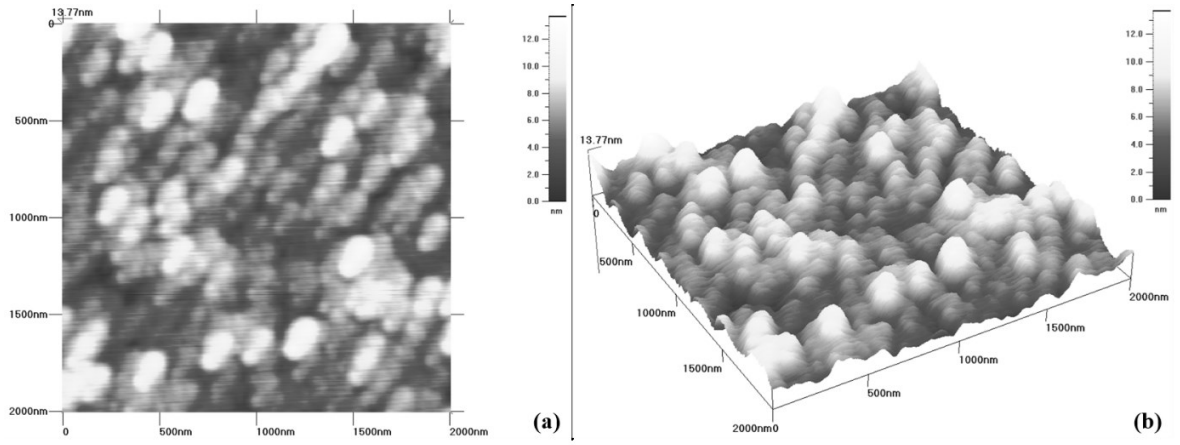
Şekil 7.72 PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin FESEM görüntüleri Şekil 7.73 de verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin yaklaşık 60-120 nm genişliğe sahip taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Bu taneciklerin alttaş üzerinde nispeten homojen bir dağılıma sahip olduğu görülmüştür. Şekil 7.73 (a) da yer alan FESEM görüntüsünde çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin tamamının yaklaşık 30-80 nm genişliğe sahip küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların Sn katkılı GaN ince film ile homojen bir şekilde tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

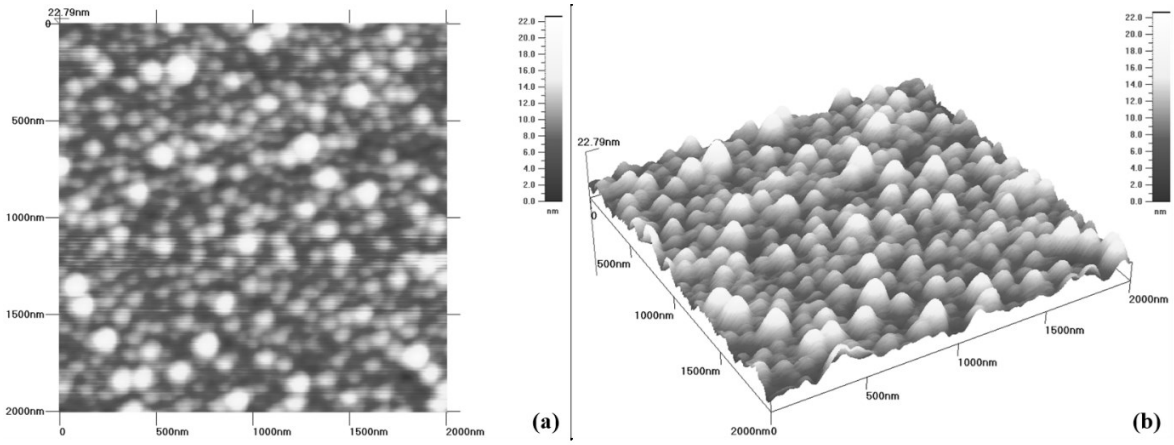


Şekil 7.73 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.74 ile cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen numunenin AFM görüntülerine bakıldığında bazı yerlerde koyu siyah bölgelerin oluştuğu görülmüştür. Koyu siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını göstermektedir. Şekil 7.74 de yer alan 13,77 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.75 ile PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında cam alttaş üzerine üretime nispeten daha az alanda siyah bölgelerin oluştuğu görülmüştür. Şekil 7.75 de yer alan 22,79 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

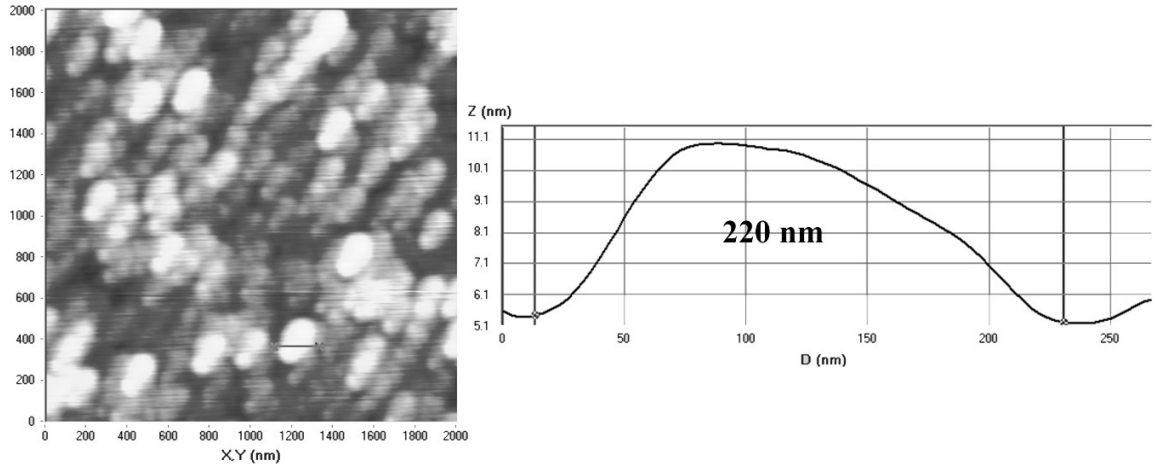


Şekil 7.74 Cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

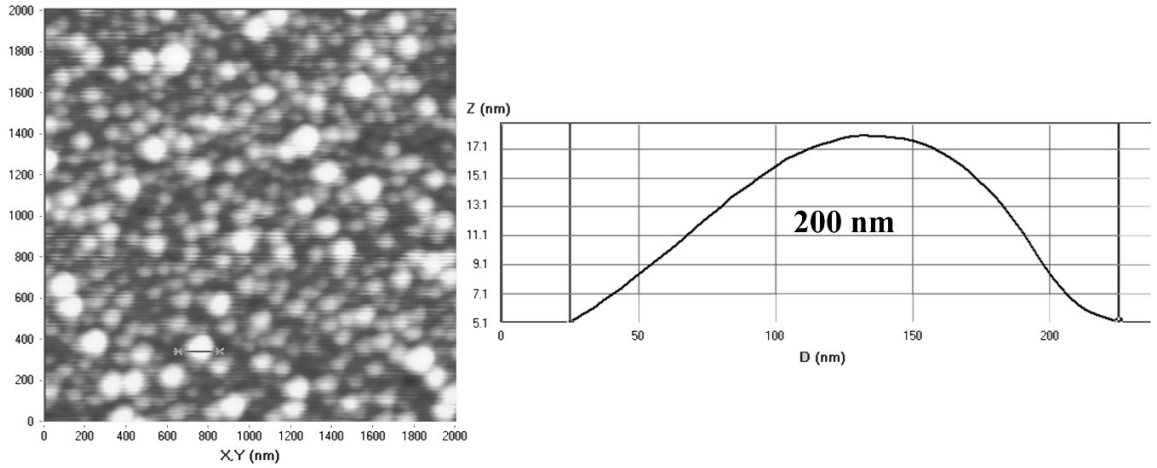


Şekil 7.75 PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 7,8 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,4 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 1,7 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,24; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,03; pik yüksekliği 8,2 nm ve çukur derinliği 7,8 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 9,6 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 2,2 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 2,8 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,7; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,6; pik yüksekliği 13,2 nm ve çukur derinliği 9,6 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri cam alttaş üzerine üretimin PET alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.76 ile cam alttaş üzerine ve Şekil 7.77 ile de PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 220 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 200 nm olarak tespit edilmiştir.

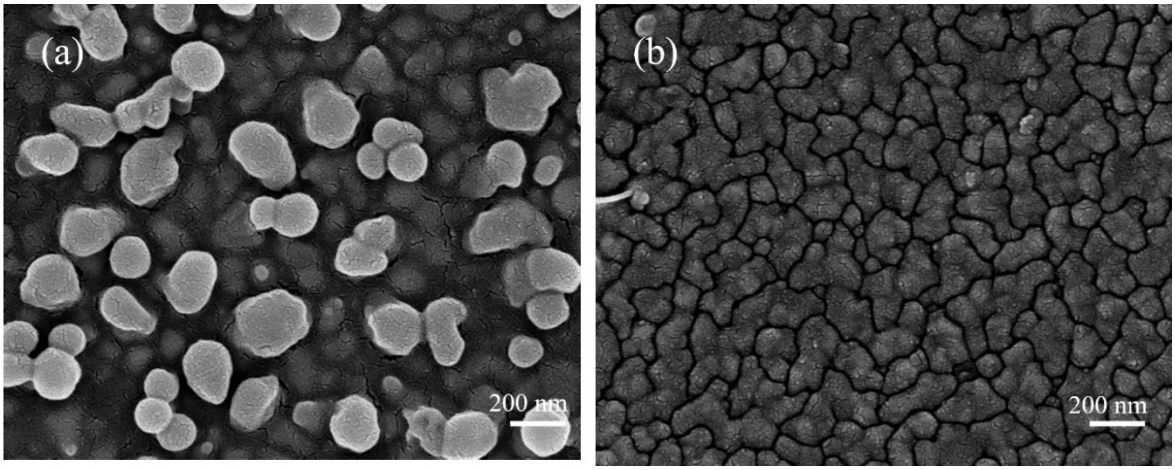


Şekil 7.76 Cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



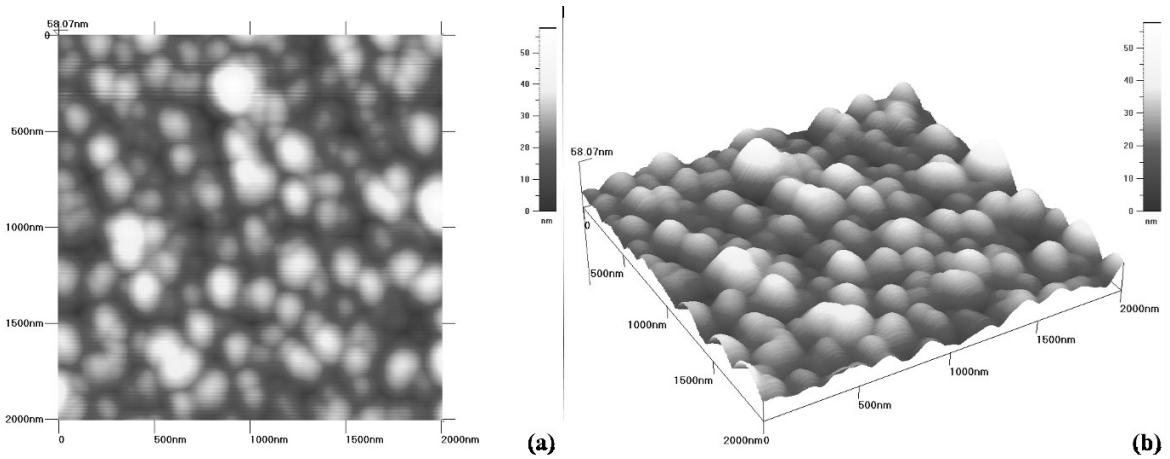
Şekil 7.77 PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin FESEM görüntüleri Şekil 7.78 de verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin yaklaşık 180-200 nm genişliğe sahip tanecikler ile geri planda kalan 60-80 nm genişliğe sahip taneciklerden oluştuğu görülmüştür. PET alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmin tamamının yaklaşık 60-90 nm genişliğe sahip çok küçük taneciklerden oluştuğu görülmüştür. FESEM görüntülerinden cam ve PET alttaşların Pb katkılı GaN ince film ile tamamen kaplandığı gözlemlenmiştir.

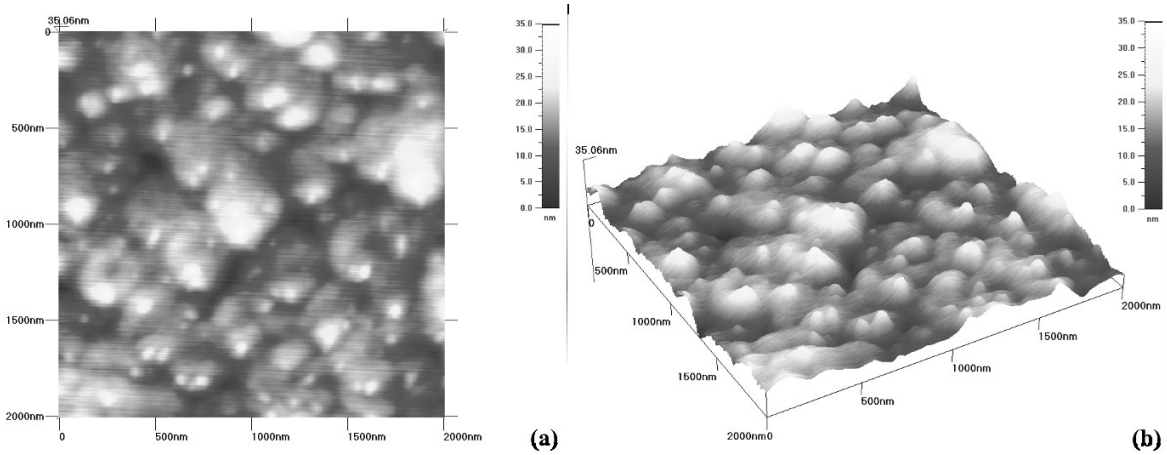


Şekil 7.78 (a) Cam alttaş üzerine ve (b) PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin 100kx büyütmeli FESEM görüntüsü

Şekil 7.79 ile cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen numunenin AFM görüntülerine bakıldığında az bir kısımda koyu siyah bölge oluştuğu görülmüştür. Koyu siyah bölgeler yüzeydeki çukurlukları temsil ederken, beyaz renge doğru yükseltinin arttığını ve pik yaptığını göstermektedir. Şekil 7.79 da yer alan 58,07 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafeyi verir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır. Şekil 7.80 ile PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmin 2 boyutlu ve 3 boyutlu AFM grafikleri verilmiştir. AFM görüntülerine bakıldığında cam alttaş üzerine üretime nispeten daha açık renkte bölgelerin oluştuğu görülmüştür. Şekil 7.80 de yer alan 35,06 nm değeri taranan alandaki en dip nokta ile en yüksek nokta arasındaki mesafedir ve yükseklik ölçeği de şekilde yer almaktadır.

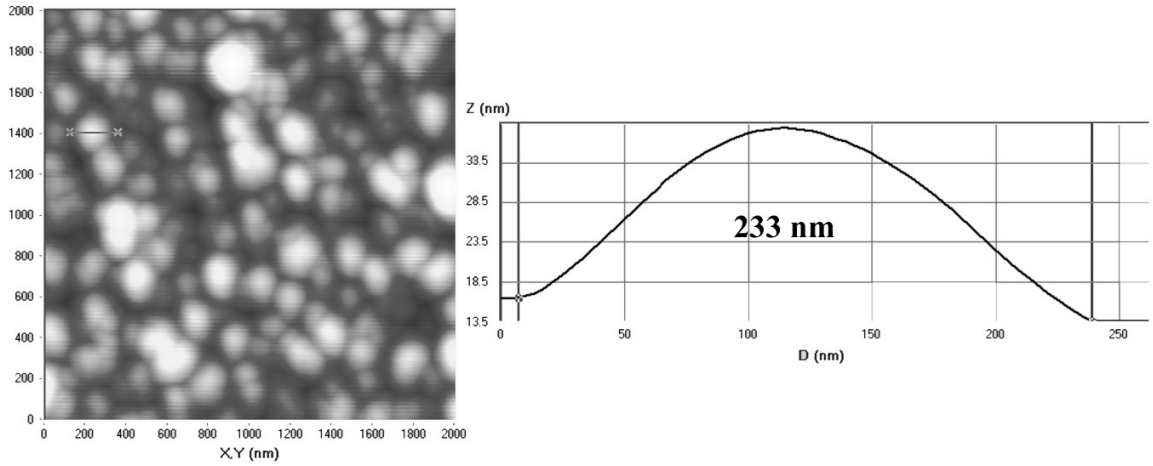


Şekil 7.79 Cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

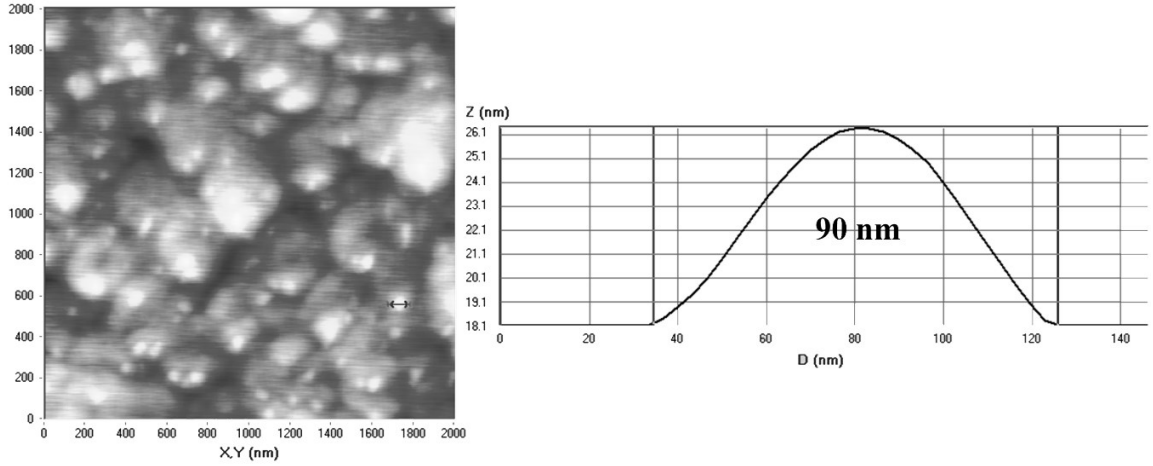


Şekil 7.80 PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin (a) 2 boyutlu AFM ve (b) 3 boyutlu AFM görüntüsü

Cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 22,8 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 6,4 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 8,1 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,45; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,46; pik yüksekliği 35,3 nm ve çukur derinliği 22,8 nm olarak tespit edilmiştir. PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmin AFM yüzey analizi sonucunda; ortalama yüksekliği 14,9 nm, ortalama yüzey pürüzlülüğü 3,4 nm, ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü 4,4 nm, simetrinin ölçüsü olan skewness değeri 0,30; basıklığın ölçüsü olan kurtosis değeri 0,27; pik yüksekliği 20,1 nm ve çukur derinliği 14,9 nm olarak tespit edilmiştir. Analiz verileri PET alttaş üzerine üretimin cam alttaş üzerine üretimden daha simetrik ve keskin piklere sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 7.81 ile cam alttaş üzerine ve Şekil 7.82 ile de PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince filmlerin boyut analizi grafikleri verilmiştir. Boyut analizi sonucunda; cam alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri yaklaşık 233 nm ve PET alttaş üzerine üretilen ince filmin tanecik genişlikleri 90 nm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.81 Cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği



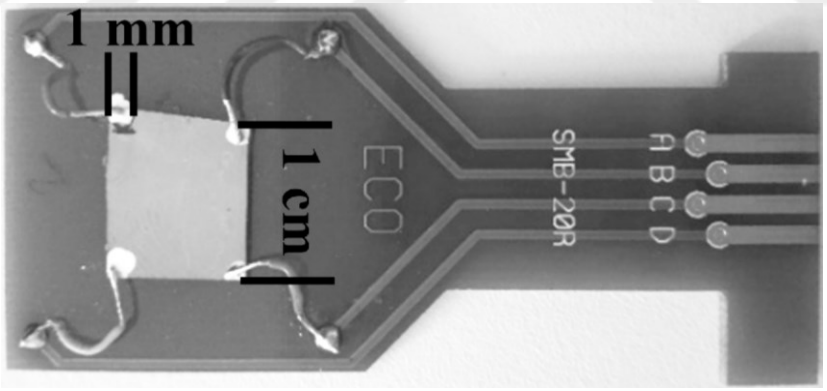
Şekil 7.82 PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin boyut analizi grafiği

7.4. GaN Temelli İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

TVA yöntemi ile cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen katkılı ve katkısız GaN ince filmlerin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için Ecopia HMS 3000 Hall Ölçüm Sistemi cihazı kullanılmıştır. GaN tabakaların Van Der Pauw tekniği kullanılarak oda sıcaklığında Hall etkisi ölçüm sistemi ile kütlesel ve tabaka serbest taşıyıcı yoğunlukları, taşıyıcı hareketliliği (mobilite), özdirenç, iletkenlik, Hall katsayıları, manyetik direnç incelemesi yapılmıştır. Doğru ölçümler için ya alttaş elektriksel olarak yalıtkan olmalıdır ya da GaN tabaka ile alttaş arası elektriksel olarak yalıtılmış olmalıdır (Wong, 2000b). GaN ince filmlerin üretiminde alttaş olarak ticari amaçlı cam ve PET kullanıldığı için elektriksel ölçümler başarılı olarak gerçekleştirilmiştir. Hall ölçümü öncesinde numuneler hazırlanırken metal kontak olarak gümüş boya kullanılmıştır. Alınan kontak uzunlukları yaklaşık 1 mm

olarak belirlenmiştir. Dört uçtan alınan kontaklar arası mesafe ise 1 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Van Der Pauw tekniği kullanılarak ölçüm alınan numunenin bir fotoğrafı Şekil 7.83 de yer almaktadır. Hall etkisi ölçümleri oda sıcaklığında, 20 nA akım değerinde, 0,556 T manyetik alan etkisi altında her bir ölçümde cihazın ölçüm sayısı 1000 kez giriş değerleri girilerek gerçekleştirilmiştir. Üretilen her bir numune için aynı başlangıç parametreleri kullanılarak 10 ayrı ölçüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen 10 ayrı ölçümün sonuçlarının ortalaması alınarak elektriksel veriler sunulmuştur.

Çizelge 7.1 de Hall etkisi ölçüm sonuçları verilmiştir. Yarıiletken ince filmler özdirençleri 10^{-3} Ω.cm mertebesinde iken düşük dirençli yarıiletken, 10^{9} Ω.cm mertebesinde iken yüksek dirençli yarıiletken olarak adlandırılmaktadır (Jien vd., 2013; Stepanov vd., 2016; U.S. Patent No. 13/753,867, 2013; Yang vd., 2014). Elde edilen elektriksel sonuçlar doğrultusunda üretilen tüm numunelerin yarıiletken özellik gösterdikleri sonucuna varılmıştır. Üretilen numunelerin elektriksel özelliklerinin sonuçları katkısız GaN ince filmler, üç atomlu GaN ince filmler ve 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmler olarak 3 ayrı alt başlık altında detaylı olarak verilecektir.



Şekil 7.83 Van Der Pauw tekniği ile kontak alınan numunenin fotoğrafı

Çizelge 7.1 Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmlerin Hall ölçüm sonuçları

		Kütlesel Taşıyıcı Konsantrasyonu (cm^{-3})	Tabaka Taşıyıcı Konsantrasyonu (cm^{-2})	Mobilite ($cm^2/V.s$)	Özdirenç (Ω.cm)	Manyetik Direnç (Ω)	İletkenlik ($\Omega^{-1}.cm^{-1}$)	Ortalama Hall Katsayısı (cm^3/C)
Cam Alttaş Üzerine Üretilen	GaN	2,4E+18	9,6E+12	449,6	1,2E-02	5,5E+02	1,6E+02	-4,4E-00
	BGaN	6,2E+18	2,5E+13	18,3	7,4E-02	5,5E+01	1,4E+01	1.4E+00
	AlGaN	1,8E+16	7,2E+10	6,9	9,5E+01	3,3E+05	1,0E-02	6,5E+02
	InGaN	2,8E+16	1,1E+11	36,3	1,5E+01	1,6E+05	6,6E-02	-5,6E+02
	C:GaN	1,5E+19	5,9E+13	19,3	5,6E-02	3,5E+01	1,8E+01	-1,1E+00
	Si:GaN	4,8E+20	1,9E+15	0,8	6,1E-02	6,2E+00	1,6E+01	5,3E-02
	Ge:GaN	6,7E+18	4,4E+13	21,8	7,3E-02	1,2E+02	1,4E+01	-1,4E+00
	Sn:GaN	1,2E+18	5,5E+12	5,8	1,4E+00	8,7E+02	7,4E-01	-6,9E+00
	Pb:GaN	1,4E+22	5,7E+16	0,8	7,2E-04	5,6E-02	1,4E+03	-5,8E-04
PET Alttaş Üzerine Üretilen	GaN	4,1E+18	1,6E+13	238	1,9E-02	2,0E+02	1,6E+02	-2,2E+00
	BGaN	9,3E+17	3,7E+12	15,4	1,2E+00	7,8E+02	8,0E-01	1,9E+01
	AlGaN	3,2E+16	1,3E+11	25,1	9,0E+00	2,1E+04	1,1E-01	2,3E+02
	InGaN	1,8E+16	6,1E+10	42,1	1,7E+01	2,1E+05	5,8E-02	-5,3E+02
	C:GaN	1,3E+19	5,8E+13	5,3	9,0E-02	6,5E+01	1,1E+01	-2,6E-01
	Si:GaN	5,1E+19	2,1E+14	2,4	5,4E-02	6,5E+00	1,8E+01	1,3E-01
	Ge:GaN	9,7E+17	6,3E+12	47,2	3,5E-02	9,1E+01	2,9E+01	-6,5E-01
	Sn:GaN	5,2E+17	2,1E+12	3,5	3,7E+00	1,4E+03	2,7E-01	-1,3E+01
	Pb:GaN	5,6E+22	2,2E+17	0,5	2,9E-04	1,2E-02	3,5E+03	-1,6E-04

7.4.1. GaN ince filmlerin elektriksel özellikleri

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen GaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla -4,4 cm^3/C ve -2,2 cm^3/C dir. Negatif Hall katsayısı numunelerin n-tipi yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir. Cam alttaş üzerine üretilen GaN ince film için özdirenç $1,2x10^{-2}$ Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen GaN ince film $1,9x10^{-2}$ Ω.cm özdirenç değeri ile birbirine yakın değerler göstermiştir. n-tipi GaN numuneler literatürde

10^{1}-10^{-3} Ω.cm mertebesinde özdirenç değerleri göstermektedir (Garbe vd., 2015; Wang vd., 2016; Richter vd., 2016). 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için 5,5x10^{2} Ω, PET alttaş üzerine üretim için 2,0x10^{2} Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen GaN ince film 2,4x10^{18} cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen GaN ince film 4,1x10^{18} cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonu ile birbirlerine yakın değerler göstermişlerdir. Literatürde yer alan makalelerde taşıyıcı konsantrasyonları 10^{15}-10^{19} cm^{-3} mertebelerinde değerler sergilemektedir (Xiong vd., 2014; Garbe vd., 2015; Richter vd., 2016; Svitasheva ve Gilinsky, 2013). İnce filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri cam üzerine üretim için 449,6 cm^{2}/V.s ve PET üzerine üretim için 238 cm^{2}/V.s değeri göstermiştir. Bu taşıyıcı hareketliliği değerlerinin literatürdeki 70-1400 cm^{2}/V.s arasında değişen değerlere uygun olduğu tespit edilmiştir (Xiong vd., 2014; Garbe vd., 2015; Wang vd., 2016; Richter vd., 2016).

7.4.2. Üç atomlu GaN ince filmlerin elektriksel özellikleri

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen BGaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla 1,4 cm^{3}/C ve 19 cm^{3}/C dir. Pozitif Hall katsayısı numunelerin p-tipi yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir. Cam alttaş üzerine üretilen BGaN ince film için özdirenç 7,4x10^{-2} Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince film 1,2 Ω.cm özdirenç değeri ile daha yüksek özdirenç değeri göstermiştir. B elementinin alaşım miktarı özdirenci belirleyen faktörlerdendir. Literatürdeki çalışmalarda bor oranı arttıkça özdirencin 10^{-2} mertebesinden 10^{5} mertebesine yükseldiği belirtilmektedir (Baghdadli vd., 2009; Ravindran vd., 2012). Bu açıdan PET alttaş üzerine üretimde B oranının daha yüksek olması muhtemeldir. 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için 5,5x10^{1} Ω, PET alttaş üzerine üretim için 7,8x10^{2} Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen BGaN ince film 6,2x10^{18} cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen BGaN ince film 9,3x10^{17} cm^{-3} değeri ile daha düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. BGaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 18,3 cm^{2}/V.s ve PET üzerine üretim için 15,4 cm^{2}/V.s değeri göstermiştir. Alaşıma katılan bor elementinin miktarı arttıkça taşıyıcı konsantrasyonu düşerken taşıyıcı hareketliliği azalmaktadır (Baghdadli vd., 2009).

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen AlGaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla $6,5x10^2$ cm^3/C ve $2,3x10^2$ cm^3/C dir. Pozitif Hall katsayısı numunelerin p-tipi yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir (Özen vd., 2015c). Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN ince film için özdirenç 95 Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen AlGaN ince film 9 Ω.cm değerleri göstermiştir. AlGaN alaşımlar genellikle yüksek özdirence sahip yarıiletkenlerdir (Kim vd., 2011; Wang vd., 2015). 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için $3,3x10^5$ Ω, PET alttaş üzerine üretim için $2,1x10^4$ Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN ince filmin taşıyıcı konsantrasyonu $1,8x10^{16}$ cm^{-3} iken, PET alttaş üzerine üretilen AlGaN ince film $3,2x10^{16}$ cm^{-3} değeri ile yaklaşık 2 kat daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. n-tipi yarıiletken özelliği gösteren AlGaN filmler 10^{17}-10^{19} cm^{-3} mertebesinde taşıyıcı konsantrasyonları sergilemektedirler (Kim vd., 2011; Wang vd., 2015; Kakanakova-Georgieva vd., 2013). Kim ve arkadaşları 2011 makalesinde Al konsantrasyonunda %1 artış ile taşıyıcı konsantrasyonunda 7 kat artışa neden olduğunu belirtmişlerdir (Kim vd., 2011). Bu çalışmada üretilen AlGaN ince filmlerin literatürün aksine p-tipi yarıiletken özelliklere sahip oldukları tespit edilmiştir. AlGaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 6,9 $cm^2/V.s$ ve PET üzerine üretim için 25,1 $cm^2/V.s$ değeri göstermiştir. Literatürde yer alan taşıyıcı hareketliliği değerleri 5-115 $cm^2/V.s$ arasında değişmektedir (Kim vd., 2011; Wang vd., 2015).

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen InGaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla $-5,6x10^2$ cm^3/C ve $-5,3x10^2$ cm^3/C dir. Negatif Hall katsayısı numunelerin n-tipi yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir. Cam alttaş üzerine üretilen InGaN ince film için özdirenç $1,5x10^1$ Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen InGaN ince film $1,7x10^1$ Ω.cm özdirenç değeri göstermiştir. 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için $1,6x10^5$ Ω, PET alttaş üzerine üretim için $2,1x10^5$ Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen InGaN ince film $2,8x10^{16}$ cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen InGaN ince film $1,8x10^{16}$ cm^{-3} değeri ile daha düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. Üretilen ince filmlerin özdirenç ve taşıyıcı konsantrasyonları literatür ile uyumlu sonuçlar göstermiştir (Hennig vd., 2015; Zhang vd., 2015). InGaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 36,3 $cm^2/V.s$ ve PET üzerine üretim için 42,1 $cm^2/V.s$ değeri göstermiştir. Numunelerin taşıyıcı

hareketlilikleri Hennig ve arkadaşlarının belirttikleri değerlerden daha düşük (Hennig vd., 2015), Pantha ve arkadaşlarının ve Güneş ve arkadaşlarının makalelerinde belirtilen değerlerden daha yüksek (Pantha vd., 2008; Gunes vd., 2009), Papadomanolaki ve arkadaşlarının makalesi ile uyumlu değerler göstermiştir (Papadomanolaki vd., 2015). Literatürde yer alan InGaN filmlerin elektriksel ölçüm sonuçları yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahip numunelerin düşük taşıyıcı hareketliliğine, düşük taşıyıcı yoğunluğuna sahip numunelerin daha yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahip olduklarını göstermektedir.

7.4.3. 4A grubu elementlerle katkılanan GaN ince filmlerin elektriksel özellikleri

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen C katkılı GaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla -1,1 cm^3/C ve $-2{,}6x10^{-1}$ cm^3/C dir. Her iki alttaş üzerine üretimde ince filmler n-tipi yarıiletken özelliği göstermiştir. Cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince film için özdirenç $5{,}6x10^{-2}$ Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince film $9{,}0x10^{-2}$ Ω.cm özdirenç değeri göstermiştir. 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için $3{,}5x10^{1}$ Ω, PET alttaş üzerine üretim için $6{,}5x10^{1}$ Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen C katkılı GaN ince film $1{,}5x10^{19}$ cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen numune $1{,}3x10^{19}$ cm^{-3} değeri ile daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. Numunelerin taşıyıcı konsantrasyonları literatürde belirtilen 10^{18}-10^{21} cm^{-3} uyumlu değerler göstermiştir (Hirota vd., 2004; Gogova vd., 2011). C katkılı GaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 19,3 $cm^2/V.s$ ve PET üzerine üretim için 5,3 $cm^2/V.s$ değeri göstermiştir. Üretilen numunelerin elektriksel karakteristikleri, Armitage ve arkadaşlarının 2004 yılı makalesinde belirttikleri taşıyıcı konsantrasyonu değerinden daha yüksek ve taşıyıcı hareketliliği değerinden daha düşük değerler göstermiştir (Armitage vd., 2004).

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Si katkılı GaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla $5{,}3x10^{-2}$ cm^3/C ve $1{,}3x10^{-1}$ cm^3/C dir. Pozitif Hall katsayısı numunelerin p-tipi yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir. 4A grubu elementlerinin amfoterik doğasından ötürü bu elementler GaN yapısı içinde Ga elementine yada N elementine bağlanarak iletkenlik tipi n veya p olabilmektedir (Pat vd., 2016b; Gogova vd., 2011; Hirota vd., 2004; Lopatiuk vd., 2005; Kato vd., 2007; Cui vd., 2014; Liu vd., 2016). Bu nedenle 4A

grubu elementlerin katkılanması ile her iki iletkenlik tipinde GaN yarıiletken ince film üretmek mümkündür. Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film için özdirenç $6,1x10^{-2}$ Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film $5,4x10^{-2}$ Ω.cm değeri ile iletkenliğin çok az miktarda arttığına işaret eden özdirenç değeri göstermiştir. 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için 6,2 Ω, PET alttaş üzerine üretim için 6,5 Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film $4,8x10^{20}$ cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen Si katkılı GaN ince film $5,1x10^{19}$ cm^{-3} değeri ile 10 kat daha az taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. GaN ince filmlerin Si elementi ile katkılanmasıyla 10^{18}-10^{20} mertebelerinde taşıyıcı konsantrasyonu gösterdiği literatürde belirtilmektedir (Wang vd., 2016; Svitasheva ve Gilinsky, 2013). Si katkılı GaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 0,8 $cm^2/V.s$ olarak tespit edilirken, PET üzerine üretim için 2,4 $cm^2/V.s$ değeri göstermiştir. Taşıyıcı konsantrasyonundaki azalışla beraber taşıyıcı hareketliliğinde artış görülmesi olağan bir durumdur.

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Ge katkılı GaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla -1,4 cm^3/C ve $-6,5x10^{-1}$ cm^3/C dir. Negatif Hall katsayısı numunelerin n-tipi yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir. Cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film için özdirenç $7,3x10^{-2}$ Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film $3,5x10^{-2}$ Ω.cm özdirenç değeri göstermiştir ve literatür ile de uyumludur (Young vd., 2016). 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için $1,2x10^2$ Ω, PET alttaş üzerine üretim için $9,1x10^1$ Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film $6,7x10^{18}$ cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen Ge katkılı GaN ince film $9,7x10^{17}$ cm^{-3} değeri ile biraz daha düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. Her iki alttaş üzerine üretilen yarıiletken ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonları literatürdeki 10^{17}-10^{20} arasında değişen değerler ile uyumludur (Hofmann vd., 2016; Young vd., 2016). Ge katkılı GaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 21,8 $cm^2/V.s$ ve PET üzerine üretim için 47,2 $cm^2/V.s$ değeri göstermiştir. Üretilen ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri literatürde yer alan değerlerden daha düşük değerler göstermiştir (Hofmann vd., 2016; Young vd., 2016).

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Sn katkılı GaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla -6,9 cm^3/C ve -13 cm^3/C dir. Negatif Hall katsayısı numunelerin n-tipi

yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir. Cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film için özdirenç 1,4 Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film 3,7 Ω.cm özdirenç değeri göstermiştir. 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için $8,7x10^{2}$ Ω, PET alttaş üzerine üretim için $1,4x10^{3}$ Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film $1,2x10^{18}$ cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen Sn katkılı GaN ince film $5,2x10^{17}$ cm^{-3} değeri ile daha düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. Sn katkılı GaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 5,8 cm^{2}/V.s ve PET üzerine üretim için 3,5 cm^{2}/V.s değeri göstermiştir.

Cam ve PET alttaşlar üzerine üretilen Pb katkılı GaN yarıiletken ince filmin Hall katsayıları sırasıyla $-5,8x10^{-4}$ cm^{3}/C ve $-1,6x10^{-4}$ cm^{3}/C dir. Negatif Hall katsayısı numunelerin n-tipi yarıiletken özellik gösterdiğine işaret etmektedir. Cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film için özdirenç $7,2x10^{-4}$ Ω.cm iken, PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film $2,9x10^{-4}$ Ω.cm özdirenç değeri göstermiştir. 0,556 T manyetik alan etkisi altında gösterdiği manyetik dirençleri ise cam alttaş üzerine üretim için $5,6x10^{-2}$ Ω, PET alttaş üzerine üretim için $1,2x10^{-2}$ Ω'dur. Cam alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film $1,4x10^{22}$ cm^{-3} taşıyıcı konsantrasyonuna sahipken, PET alttaş üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film $5,6x10^{22}$ cm^{-3} değeri ile daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir. Pb katkılı GaN ince filmlerin taşıyıcı hareketlilikleri ise cam üzerine üretim için 0,8 cm^{2}/V.s ve PET üzerine üretim için 0,5 cm^{2}/V.s değeri göstermiştir. Taşıyıcı konsantrasyonundaki artış ile beraber taşıyıcı hareketliliğinde azalış görülmesi olağan bir durumdur.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında GaN temelli ince filmler termiyonik vakum ark yöntemi ile ilk kez tarafımızdan cam ve PET alttaşlar üzerine tek katman olarak üretilmiştir. Üretilen ince filmlerin yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özellikleri uygun analiz cihazları tarafından tespit edilerek sonuçları raporlanmıştır. GaN ince film, 3 atomlu GaN ince film ve 4A grubu elementler ile katkılanan GaN ince filmlerin ayrı ayrı yapısal, optiksel, yüzeysel ve elektriksel özellikleri uygun başlıklar altında gruplanarak verilmiştir.

Üretilen katkılı GaN ince filmlerin yapısal analizleri sonucunda; PET alttaş üzerine üretimlerin cam alttaş üzerine üretimlere göre daha küçük boyutlu kristal yapılar gösterdiği görülmüştür. In elementi ile oluşturulan alaşım ince filmlerde (113) yönelimli hekzagonal wurtzite piki ile beraber (002) yönelimli hekzagonal wurtzite XRD pikide görülmüştür. In elementi ile GaN ince filmin kristal yapısı polikristal yapıya dönüşmüştür. Alaşıma katılan elementlerin (B, Al, In) atom numarası arttıkça daha küçük kristal boyutlu yapılar oluştuğu tespit edilmiştir. Cam alttaş üzerine üretilen GaN ince filmin Si elementinin katkılanması ile C elementine göre kristal boyutunda artış gözlenerek 45 nm kristal boyutlu (113) yönelimli hekzagonal wurtzite yapı, PET alttaş üzerine üretim için ise C elementine göre kristal boyutunda ufak bir azalış ile 10 nm kristal boyutlu (113) yönelimli hekzagonal wurtzite yapısı göstermiştir. Ge elementinin katkılanması ile cam alttaş üzerine üretimde (113) yönelimli kristal yapıya ek (002) yönelimli hekzagonal wurtzite gözlemlenerek polikristal yapı oluştuğu tespit edilmiştir. Ge elementinin katkılanması ile PET alttaş üzerine üretimde sadece (113) yönelimli hekzagonal wurtzite yapı oluşmuştur. Cam ve PET üzerine Ge katkılı GaN üretiminde kristal boyutlarında C ve Si elementlerine göre artış gözlemlenmiştir. PET üzerine üretilen Pb katkılı GaN ince film diğer tüm PET üzerine üretilen 4A katkılamalarda olduğu gibi (113) yönelimli hekzagonal wurtzite yapısına sahip olduğu görüldü. PET alttaşlar üzerine 4A grubu elementlerin katkılanması ile üretilen GaN ince filmlerin PET alttaşın quasi kristal olarakta adlandırılan yarıkristal yapıda olmasından dolayı tek bir yerde pik gösterdiği düşünüldü. Katkılı GaN ince filmlerin dislokasyon yoğunluklarının (Al ve In elementlerinin katkılanması haricinde) AFM tarafından tespit edilen PET alttaşlar üzerine üretimlerin cam alttaşlar üzerine üretimlere göre tanecik boyutlarının azalması ile arttığı belirlendi. Bunun sebebi olarak; Al katkısı ile PET alttaşlar üzerinde kümelenmelerin yüksek

oluşu ve In katkısı ile her iki alttaşta kristal yapılarında değişim görülmesi olarak görüşe varıldı.

Üretilen numunelerin yüzey özellikleri incelendiğinde AlGaN, Ge katkılı ve Pb katkılı ince filmler haricinde diğer tüm numunelerde cam alttaşlar üzerine üretilen ince filmlerin tanecik boyutlarının PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmlerin tanecik boyutlarından daha büyük olduğu görüldü. Cam alttaş üzerine üretilen AlGaN, Ge katkılı GaN ve Pb katkılı GaN ince filmler PET alttaş üzerine üretilenden farklı kristal yapılar içerdiğinden dolayı AFM görüntülerinde tanecik boyutlarının daha küçük değerler verdiği tespit edilmiştir. Cam alttaşlar üzerine üretilen ince filmler yaklaşık 20-230 nm tanecik boyutlarına sahip iken, PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmler yaklaşık 20-200 nm tanecik boyutlarına sahiptir. Cam alttaşlar üzerine üretilen ince filmler yaklaşık 1-12 nm yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip iken, PET alttaşlar üzerine üretilen ince filmler yaklaşık 1-4 nm yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahiptir. AFM yüzey analizi sonucu ince filmlerin ortalama yükseklikleri cam alttaş üzerine üretimler için yaklaşık 4-60 nm arasında değiştiği, PET alttaş üzerine üretimler için ise yaklaşık 6-15 nm arasında değiştiği görüldü. PET alttaş üzerine katkılı GaN ince film üretimler daha düzlemsel dağılım göstermiştir. Farklı değerlerde yükseklik ve tanecik boyutlarının bazı küçük boyutlu taneciklerin birbirleri ile yığılma şeklinde birleşerek daha büyük boyutlu tanelere dönüşmesi ile ince film biriktirme ada tipi büyüme şeklinde oluşmuştur. Tüm bu tespitler doğrultusunda kullandığımız üretim yöntemi ile PET alttaşlar üzerine üretimler cam alttaşlar üzerine üretimlerden daha küçük tanecik boyutlu ve düşük pürüzlülüklü yüzeyler göstermiştir. Üretilen ince filmlerin tamamının skewness ve kurtosis analizleri yapıldığında yüzey dağılımlarının piklerin çukurlardan daha fazla ve keskin oluştuğu tespit edilmiştir.

Yasak enerji aralıkları B, Al ve C (karbon elementi nispeten) elementleri ile morötesi belgeye, In elementi ile kızılötesi bölgeye kaymıştır. Pb elementinin katkılanması ile kristal yapıda baskın Pb piklerinin varlığı yasak enerji aralığının kızılötesi bölgeye kaymasına neden olmuştur. Üretilen tüm GaN tek katman ince filmlerin yasak enerji aralıkları ile kırılma indisleri arasında ters orantılı bağıntı olduğu tespit edilmiştir. Yani yapıya giren element katkısıyla yasak enerji aralığında artış olduğunda kırılma indisinde azalış, yasak enerji aralığında azalış olduğunda da kırılma indisinde artış olduğu görülmüştür.

Oda sıcaklığında belirlenen klasik Hall etkisi sonuçlarına göre BGaN, AlGaN ve Si katkılı GaN ince filmlerin her iki alttaş üzerine üretimleride p-tipi taşıyıcı özelliğine, diğer tüm ince filmlerin n-tipi taşıyıcı özelliğe sahip oldukları tespit edilmiştir. Cam ve PET üzerine ince film üretimleri karşılaştırıldığında; tanecik boyutları ile taşıyıcı konsantrasyonu arasında doğru orantılı ve özdirenç arasında ise ters orantılı bir bağıntı olduğu görülmüştür. 10^{-2} Ωcm mertebesinde özdirence sahip olan GaN numuneler 3A ve 4A grubu elementlerin yapıya girmesiyle Pb haricinde daha düşük iletkenlik göstermişlerdir. Yüksek özdirençli malzeme olan BGaN ince filmler PET alttaş üzerine üretimde 16 kat daha yüksek özdirenç değeri göstermiştir. Diğer bir yüksek özdirençli malzeme olan AlGaN ince filmlerde ise cam üzerine üretimde 10 kat daha yüksek özdirenç değeri göstermiştir. 3A grubu elementler ile oluşturulan alaşımların katkısız GaN ince filmlere göre daha düşük taşıyıcı yoğunluğuna sahip olduğu görülmüştür. 4A grubu elementlerle yapılan katkılama çalışmalarında ise beklendiği gibi 10^4 kata varan artışta taşıyıcı yoğunluğu değerleri göstermiştir. Alttaşın taşıyıcı konsantrasyonu üzerine etkisi incelendiğinde ise katkısız GaN, AlGaN ve Pb katkılı GaN numunelerin cam üzerine üretimlerinde daha yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahip oldukları görülmüş, diğer numunelerde ise daha düşük değerler tespit edilmiştir. Katkısız GaN ince filmlerin diğer numunelere göre yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahip oldukları görülmüştür. 3A grubu elementlerle üretilen alaşımlarda InGaN ince filmlerin diğerlerine göre daha yüksek taşıyıcı hareketliliğine sahip olduğu belirlenmiştir. 4A grubu elementleri ile katkılama yapıldığında ise Ge katkılama numuneleri daha yüksek taşıyıcı hareketliliği değerleri göstermiştir. Birbirine yakın özdirence sahip numunelerde (en fazla 1.5 kat) taşıyıcı hareketliliği ve taşıyıcı yoğunluğu arasındaki ters bağıntı her iki alttaş üzerine üretilen ince filmlerde kendisini göstermiştir. Aynı üretimlerin farklı alttaşlarda farklı özdirenç (5-10 kat) gösterdiği numunelerde özdirenç artış gösterdiğinde taşıyıcı yoğunluğu ve hareketliliğinin azaldığı, özdirencin azalış gösterdiği üretimlerde taşıyıcı yoğunluğu ve hareketliliğinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Üretilen GaN ince filmlerin manyetik dirençleri 10^{-2}-10^5 Ω mertebeleri arasında değişmektedir. Katkısız GaN ince filmlerin manyetik direnci 10^2 Ω mertebesinde ölçülmüştür. Pb katkılı GaN numuneler 10^{-2} Ω mertebesinde en düşük manyetik dirence sahip iken, InGaN ve AlGaN numunelerin 10^5 Ω mertebesinde en yüksek manyetik dirence sahip oldukları tespit edilmiştir. Tüm numunelerin manyetik direnç/özdirenç oranları karşılaştırıldığında katkısız GaN numuneler yaklaşık 30000 kat iken alaşımlarda atom numarası arttıkça 7000 kattan 10000 kata yükselen bir oran vermiştir. 4A grubu elementler ile katkılama da ise 60-200 katlık bir oran hesaplanmıştır. Katkısız GaN

numunelere göre daha düşük oranlarla karşılaşılmasında taşıyıcı hareketliliği faktörü etkin rol almıştır.

Bu çalışma ile katkılı ve katkısız GaN ince filmler esnek PET alttaşlar ile cam alttaşlar üzerine hızlı, pürüzlülüğü oldukça düşük, elektriksel özellikleri literatür ile kıyaslandığında oldukça iyi ince filmler üretilmiş ve fiziksel karakteristikleri çıkarılmıştır. Sonuç olarak; küçük kristal yapılı nano boyuta sahip ince filmler TVA yöntemi ile ilk kez başarılı şekilde cam ve PET alttaşlar üzerine biriktirilmiştir. Üretilen tek katman ince filmlerin optiksel özellikleri ayarlanabilen yasak enerji aralıklarından ötürü LED üretimine imkân tanımaktadır. Cihaz tasarımlarında performans arttırıcı özelliğe sahip düşük yüzey pürüzlülüklü ince filmler TVA tekniği ile düşük erime sıcaklıklı esnek PET alttaşlar üzerine üretilmiştir. Dört uç methodu ile elektriksel özellikleri belirlenen GaN ince filmlerin özdirenç değerleri yarıiletken ince filmlerin değerlerine uygun değer göstermiştir. Cihaz tasarımlarında p-tipi iletkenlikli tabakalarda kullanılabilecek GaN nitrat temelli ince filmler bor, alüminyum ve silisyum katkısı ile üretilmiştir. TVA tekniği ile cam ve PET alttaşlar üzerine doğrudan üretilen katkılı GaN ince filmlerin fiziksel özellikleri incelendiğinde LED tasarımları için PET alttaşlar üzerine üretimlerin daha uygun olduğu görülmüştür. Bundan sonraki çalışmalarımızda çok katmanlı film üretimi için uygun bir yöntem olan TVA yöntemi kullanılarak katkılı ve katkısız GaN ince filmlerden farklı alttaşlar üzerine p-n eklemi üretmeyi veya LED tasarımı için çalışmalar yapmayı hedeflemekteyiz.

Bu amaç doğrultusunda bundan sonraki çalışmalarda; termiyonik vakum ark sisteminde anot potasına konulan katkı elementleri ve GaN materyali stokiyometrisini koruyacak şekilde homojen bir karışım elde edilerek ince film üretimleri gerçekleştirilebilir. GaN temelli ince filmlerin optiksel geçirgenlik değerlerinde daha fazla artış sağlanabilirse LED verimi artacaktır. LED tasarımlarında taşıyıcı hareketliliği değerlerinin yüksek olması verimi artıran bir neden olduğu için tanecik boyutlarının 10-20 nm seviyelerine çekilmesi uygun olacaktır. HEMT cihazlarda bariyer tabaka olarak kullanılan yüksek özdirençli BGaN ince film üretimi için anot potasına konulan bor miktarının arttırılması yararlı olacaktır. PET üzerine üretimin yüzey pürüzlüğü değerlerinin daha düşük ve özdirencinin daha yüksek olmasından dolayı alttaş olarak PET kullanılması daha uygun olacaktır. Tüm GaN ince film üretimlerinde yarı kristal yapıda olan PET alttaş, cam alttaşa göre daha iyi fiziksel özellikler göstermiştir. Bu açıdan kristal yapıda alttaşlar kullanılması GaN ince filmlerin daha homojen

ve simetrik yerleşimli olmasına yol açacaktır. Cihaz tasarımında tabakaların pürüzlülüğü, simetrik ve gaussiyan dağılımı elektriksel özellikleri olumlu yönde etkilemektedir. Tabakalar arası taşıyıcı hareketliliğini sınırlayan yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi için tavlama yapılması bu sorunu önemli ölçüde azaltabilir. GaN materyaller için tavlama yapmak yüksek sıcaklıklara dayanma özelliğine sahip olmasından dolayı yapısının bozulmasına da engel olacaktır ve daha kaliteli materyal için avantaj sağlayacaktır. Ayrıca sisteme bir alttaş ısıtıcı konularak farklı sıcaklıklarda özelliklerdeki değişim incelenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Adachi, S., 1992, Physical properties of III-V semiconductor compounds, John Wiley & Sons, p.318.

Addemir, O., Tavşanoğlu, T., 2009, Tek Ve Çok Katmanlı Bor Karbür Ve Bor Karbonitrür İnce Filmlerinin Farklı Sıçratma Teknikleriyle Biriktirilmesi Ve Karakterizasyonu, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 235 (yayımlanmamış).

Akasaka, T., Makimoto, T., 2005, BGaN Micro-Islands as Novel Buffers for GaN Hetero-Epitaxy, Japanese Journal of Applied Physics, 44, L1506–L1508.

Akasaki, I., Amano, H., Kito, M., Hiramatsu, K., 1991, Photoluminescence of Mg-doped p-type GaN and electroluminescence of GaN pn junction LED, Journal of luminescence, 48, 666-670.

Allen, S. D., 1984, Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD), Emergent Process Methods for High-Technology Ceramics, 397-413.

Altuner, E., 2009, Al-Sn ve Ag-Sn ikili metalik alaşımlarında kristolografik örgü parametreleri, ısı iletkenliği ve elektriksel iletkenlik katsayılarının tayini, Yükseklisans tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 91 (yayımlanmamış).

Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y., 1986, Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, Applied Physics Letters, 48(5), 353-355.

An, H., Zhao, X., Jia, Z., Wu, C., Wang, Y., 2009, Synthesis of magnetic Pb/Fe3O4/SiO2 and its catalytic activity for propylene carbonate synthesis via urea and 1, 2-propylene glycol, Frontiers of Chemical Engineering in China, 215-218.

Anani, M., Abid, H., Chama, Z., Mathieu, C., Sayede, A., Khelifa, B., 2007, InxGa 1− xN refractive index calculations, Microelectronics Journal, 262-266.

Armitage, R., Yang, Q., Feick, H., Weber, E., 2004, Evaluation of CCl4 and CS2 as carbon doping sources in MBE growth of GaN, Journal of Crystal Growth, 263, 132–142.

Arora, N., ve Jagirdar, B. R., 2014, From (Au5Sn + AuSn) physical mixture to phase pure AuSn and Au5Sn intermetallic nanocrystals with tailored morphology: digestive ripening assisted approach, Physical Chemistry Chemical Physics, 16, 11381-11389.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bae, S. Y., Song, Y. H., Jeon, S. R., Kim, D. M., Jho, Y. D., Lee, D. S., 2014, Pseudomorphic thick InGaN growth with a grading interlayer by metal organic chemical vapor deposition for InGaN/GaN p–i–n solar cells, Journal of Crystal Growth, 23-28.

Bae, S.-Y., Song, Y.-H., Jeon, S.-R., Kim, D.-M., Jho, Y.-D., Lee, D.-S., 2014, Pseudomorphic thick InGaN growth with a grading interlayer by metal organic chemical vapor deposition for InGaN/GaN p–i–n solar cells, Journal ofCrystalGrowth, 387, 23–28.

Baghdadli, T., Hamady, S., Gautier, S., Moudakir, T., Benyoucef, B., Ougazzaden, A., 2009, Electrical and structural characterizations of BGaN thin films grown by metal-organic vapor-phase epitaxy, physica status solidi (c), 6, S1029-S1032.

Bairamov, B. H., Gürdal, O., Botchkarev, A., Morkoc, H., Irmer, G., Monecke, J., 1999, Direct evidence of tensile strain in wurtzite structure n− GaN layers grown on n− Si (111) using AlN buffer layers, Physical Review B, 60(24), 16741.

Balbağ, M. Z., 2009, Termiyonik vakum ark (TVA) tekniği ile magnezyum, bor ve magnezyum borür ince filmlerinin üretilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 122 (yayımlanmamış).

Baliga, B. J., 2013, Gallium nitride devices for power electronic applications, Semiconductor Science and Technology, 28, 074011.

Bao, K., Shi, L., Liu, X., Chen, C., Mao, W., Zhu, L., Cao, J., 2010, Synthesis of GaN nanorods by a solid-state reaction, Journal of Nanomaterials, 6.

Basilio, A. M., Hsu, Y. K., Tu, W. H., Yen, C. H., Hsu, G. M., Chyan, O., ... & Chen, K. H., 2010, Enhancement of the energy photoconversion efficiency through crystallographic etching of a c-plane GaN thin film, Journal of Materials Chemistry, 20(37), 8118-8125.

Bharatan, S., Jones, K. S., Pearton, S. J., Abernathy, C. R., Ren, F., 1994, Structural Characterization of GaN Grown By Electron Cyclotron Resonance-Metalorganic Molecular Beam Epitaxy (ECR-MOMBE), Cambridge University Press, 339, 491.

Blatt, F. J., 1968, Physics of electronic conduction in solids, McGraw-Hill, p.464.

Bolat, S., Ozgit-Akgun, C., Tekcan, B., Biyikli, N., Okyay, A. K., 2014, Low temperature thin film transistors with hollow cathode plasma-assisted atomic layer deposition based GaN channels, Applied Physics Letters, 243505.

Brewer, A. K., 1928, The Electrodynamics of Surface Catalysis, The Journal of Physical Chemistry, 32, 1006-1017.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bunshah, R. F., 2001, Handbook of Hard Coatings, Published in the United States of America by Noyes Publications, William Andrew Publishing, p.560.

Cao, X. A., Pearton, S. J., Singh, R. K., Abernathy, C. R., Han, J., Shul, R. J., ... & Sekhar, J. A., 1998, Rapid thermal processing of implanted GaN up to 1500 C, In MRS Proceedings, Cambridge University Press, 537, G6-33.

Chakraborty, T., Ledwani, L., 2016, Research Methodology in Chemical Sciences: Experimental and Theoretical Approach, Taylor&Francis Group, CRC Press, p.374.

Chandra, A., Wood, C. E., Woodard, D. W., Eastman, L. F., 1979, Surface and interface depletion corrections to free carrier-density determinations by Hall measurements, Solid-state electronics, 22(7), 645-650.

Chen, R., Zhou, W., Kwok, H. S., 2012, Top-gate thin-film transistors based on GaN channel layer, Applied physics letters, 022111.

Cheng, B., Choi, S., Northrup, J. E., Yang, Z., Knollenberg, C., Teepe, M., . . . Johnson, N. M., 2013, Enhanced vertical and lateral hole transport in high aluminum-containing AlGaN for deep ultraviolet light emitters, Applied Physics Letters, 231106.

Chiu, H. C., Chiang, C. H., Chen, C. M., Yu, C. Y., 2013, U.S. Patent No. 13/753,867.

Choy, K. L., 2003, Chemical vapour deposition of coatings, Progress in Materials Science, 57-170.

Coughlan, C., Schulz, S., Caro, M. A., O'Reilly, E. P., 2015, Band gap bowing and optical polarization switching in Al1− xGaxN alloys, physica status solidi (b), 879-884.

Cui, J., Wong, Y. L., Zeller, M., Hunter, A. D., Xu, Z., 2014, Pd Uptake and H2S Sensing by an Amphoteric Metal–Organic Framework with a Soft Core and Rigid Side Arms, Angewandte Chemie International Edition, 63, 14438-14442.

Çabuk, N., 2012, Sıcak Filament Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi İle Süper Su İtici Nano Kaplama Sentezi, Yükseklisans tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 97 (yayımlanmamış).

Çakıcı, T., 2014, In2S3 ince filminin n–InP altlık üzerine kimyasal püskürtme metoduyla büyütülmesi ve üretilen Au/n–InP/In ve Au/In2S3/n–InP/In yapıların numune sıcaklığına bağlı olarak elektriksel karakteristiklerinin karşılaştırılması, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 202 (yayımlanmamış).

Danışman, M., 2011, Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle üretilen ni-cr alaşımlarının gerinim ölçerlerde kullanımı ve uygulaması, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 145 (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Das, A., Das, A., Chang, L. B., Lai, C. S., Lin, R. M., Chu, F. C., . . . Jeng, M. J., 2013, GaN Thin Film Based Light Addressable Potentiometric Sensor for pH Sensing Application, Applied Physics Express, 6, 036601.

Dean, P., 1977, III–V compound semiconductors, Electroluminescence, 63, 132.

Deligöz, H., 2006, Termiyonik vakum ark yöntemi ile nano katmanlı kompozit üretimi, Yükseklisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 94 (yayımlanmamış).

Demir, S. F., 2007, CrN Kaplamalara Antibakteriyel Özellik Kazandırmak Amacıyla Ag Ve AgPd Katkılandırılması, Yükseklisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 66 (yayımlanmamış).

Derendorf, K., Essig, S., Oliva, E., Klinger, V., Roesener, T., Philipps, S. P., . . . Dimroth, F., 2013, Fabrication of GaInP/GaAs//Si Solar Cells by Surface Activated Direct Wafer Bonding, IEEE Journal of Photovoltaics, 1423-1428.

Di Quarto, F., Santamaria, M., 2008, Semiempirical correlation between optical bandgap and electronegativities in group III nitride alloys, Electrochemical and Solid-State Letters, H313-H315.

Dunnill, C. W., Aiken, Z. A., Pratten, J., Wilson, M., Morgan, D. J., Parkin, I. P., 2009, Enhanced photocatalytic activity under visible light in N-doped TiO2 thin films produced by APCVD preparations using t-butylamine as a nitrogen source and their potential for antibacterial films, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 244-253.

Fang, M., X-ray in Characterization Techniques, Science 2.0, http://www.science20.com/mei/blog/xray_characterization_techniques erişim tarihi: 16.08.2016.

Fernandez, S., A. Martinez-Steele, J. G., Naranjo, F., 2009, Radio frequency sputter deposition of high-quality conductive and transparent ZnO: Al films on polymer substrates for thin film solar cells applications, Thin Solid Films, 3152-3156.

Filmetrics, 2011, Operations Manual for the FILMETRICS F20 Thin-Film Analyzer, https://cmi.epfl.ch/metrology/files/F20_UV/F20_User_Manual.pdf erişim tarihi: 18.08.2016.

Fong, C. Y., Ng, S. S., Yam, F. K., Hassan, H. A., Hassan, Z., 2014, Synthesis of wurtzite GaN thin film via spin coating method, Materials Science in Semiconductor Processing, 63-66.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Fritze, S., Dadgar, A., Witte, H., Bügler, M., Rohrbeck, A., Bläsing, J., . . . Krost, A., 2012, High Si and Ge n-type doping of GaN doping - Limits and impact on stress, Applied Physics Letters, 122104.

Garbe, V., Abendroth, B., Stöcker, H., Gavrilov, A., Cohen-Elias, D., Mehari, S., . . . Meyer, D. C., 2015, Oxygen and hydrogen profiles and electrical properties of unintentionally doped gallium nitride grown by hydride vapor phase epitaxy, Crystal Research and Technology, 50,425-431.

Georgakilas, A., Ng, H. M., Komninou, P., 2003, Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy of III–V Nitrides, Nitride Semiconductors, Handbook on Materials and Devices, 107-222.

Gogova, D., Rudko, G., Siche, D., Albrecht, M., Irmscher, K., Rost, H., Fornari, R., 2011, A new approach to grow C-doped GaN thick epitaxial layers, physica status solidi C, 8, 2120–2122.

Gołombek, K., Dobrzański, L. A., Soković, M., 2004, Properties of the wear resistant coatings deposited on the cemented carbides substrates in the cathodic arc evaporation process, Journal of Materials Processing Technology, 157, 341-347.

Goyal, S. C., 1976, Dielectric behaviour of solids, Solid State Communications, 20(3), 269-270.

Green, M. A., 2006, Consolidation of thin-film photovoltaic technology: the coming decade of opportunity, Progress in photovoltaics, 383-392.

Güneş, M., Balkan, N., Zanato, D., Schaff, W. J., 2009, A comparative study of electrical and optical properties of InN and In 0.48 Ga 0.52 N, Microelectronics Journal, 40, 872-874.

Güzeloğlu, E. B., 2012, Nanoteknolojik ürünlerin tüketimine yönelik toplumsal farkındalık yaratma sürecinde halkla ilişkilerin rolü, Doktora tezi, Ege Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, s. 268 (yayımlanmamış).

Hall, E. H., 1929, On electrons that are “pulled out” from metals. Proceedings of the National Academy of Sciences, 15, 241-251.

Halsall, M. P., Harmer, P., Parbrook, P. J., Henley, S. J., 2004, Raman scattering and absorption study of the high-pressure wurtzite to rocksalt phase transition of GaN, Physical Review B, 69(23), 235207.

Hamady, S. O., 2012, Simulation of AlGaN and BGaN metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors, physica status solidi (c), 9, 1099-1104.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hamaguchi, C., 2009, Basic Semiconductor Physics. New York: Springer Science & Business Media, p.570.

Hennig, J., A., D., H., W., J., B., Lesnik, A., Strittmatter, A., Krost, A., 2015, Enhanced sheet carrier densities in polarization controlled AlInN/AlN/GaN/InGaN field-effect transistor on Si (111), AIP Advances, 5, 077146.

Hirota, R., Kushida, K., Takahashi, J., Kuriyama, K., 2004, Carbon doping by ion implantation and C2H6 gas in GaN: Rutherford backscattering/channeling, Raman scattering and photoluminescence studies, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 219, 792-797.

Hofmann, P., Krupinski, M., Habel, F., Leibiger, G., Weinert, B., Eichler, S., Mikolajick, T., 2016, Novel Approach for n-Type Doping of HVPE Gallium Nitride with Germanium, Journal of Crystal Growth, 450, 61-65.

Honda, T., Shibata, M., Kurimoto, M., Tsubamoto, M., Yamamoto, J., Kawanishi, H. 2000, Band-gap energy and effective mass of BGaN, Japanese Journal of Applied Physics, 2389.

Hong, Y. J., Lee, C. H., Park, J. B., An, S. J., Yi, G. C., 2013, GaN nanowire/thin film vertical structure p–n junction light-emitting diodes, Applied Physics Letters, 261116.

Huang, H.-Y., Li, Z.-Y., Lu, J.-Y., Wang, Z.-J., Wang, C.-S., Lau, K.-M., . . . Zhang, T.-Y., 2009, Microbridge tests on gallium nitride thin films, Journal of Micromechanics and Microengineering, 095019.

Ikeda, M., Uchida, S., 2002, Blue–Violet Laser Diodes Suitable for Blu-ray Disk, physica status solidi (a), 194, 407-413.

Ikeda, Y., Numasawa, Y., Sakamoto, M., 1969, Ozone/Organic-Source APCVD... Films, Development Div., NEC Res. & Dev, 84.

Ishida, M., Kuroda, M., Ueda, T., Tanaka, T., 2012, Nonpolar AlGaN/GaN HFETs with a normally off operation, Semiconductor Science and Technology, 024019.

Jacobs, R. L., 1968, The theory of transition metal band structures, Journal of Physics C: Solid State Physics, 492.

Jiang, W., Ehrentraut, D., Downey, B. C., Kamber, D. S., Pakalapati, R. T., Do Yoo, H., D'Evelyn, M. P., 2014, Highly transparent ammonothermal bulk GaN substrates, Journal of Crystal Growth, 403, 18-21.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Jie, Y., Gang, P., Cai-Long, L., Han, L., Yong-Hao, H., Chun-Xiao, G., 2013, The Effect of By-pass Current on the Accuracy of Resistivity Measurement in a Diamond Anvil Cell, Chinese Physics Letters, 060701.

Jung, W. S., Ra, C. S., Min, B. K., 2005, Synthesis and Characterization of Gallium Nitride Powders and Nanowires Using Ga (S 2 CNR 2) 3 (R= CH 3, C 2 H 5) Complexes as New Precursors, Bulletin of the Korean Chemical Society, 26(1), 131-135.

Kakanakova-Georgieva, A., Nilsson, D., Trinh, X. T., Forsberg, U., Son, N. T., Janzen, E., 2013, The complex impact of silicon and oxygen on the n-type conductivity of high-Al-content AlGaN, Applied Physics Letters, 102, 132113.

Kanga, D.-W., Kwonb, J.-Y., Shim, J., Lee, H.-M., Han, M.-K., 2012, Highly conductive GaN anti-reflection layer at transparent conducting oxide/Si interface for silicon thin film solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 317–321.

Karpiński, J., Jun, J., Porowski, S., 1984, Equilibrium pressure of N2 over GaN and high pressure solution growth of GaN, Journal of Crystal Growth, 66(1), 1-10.

Kato, S., Satoh, Y., Sasaki, H., Masayuki, I., Yoshida, S., 2007, C-doped GaN buffer layers with high breakdown voltages for high-power operation AlGaN/GaN HFETs on 4-in Si substrates by MOVPE, Journal of Crystal Growth, 831–834, 298.

Kazmi, S., Kovalgin, A., Aarnink, A., Salm, C., Schmitz, J., 2012, Low-stress highly-conductive in-situ boron doped Ge0. 7Si0. 3 films by LPCVD, ECS journal of solid state science and technology, P222-P226.

Kelekçi, Ö., 2011, GaN Temelli Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (Hemt) Tasarımı, Fabrikasyonu Ve Karakterizasyonu, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 184 (yayımlanmamış).

Khanna, V. K., 2014, Fabrication Of Inorganic Leds. V. K. Khanna içinde, Fundamentals of Solid-State Lighting: LEDs, OLEDs, and Their Applications in Illumination and Displays, Taylor&Francis Group, CRC Press, p.191-208.

Kılıç, B., 2010, Çinko oksit (ZnO) nanoyapılar üzerinde boya ile duyarlı hale getirilmiş güneş pillerinin üretilmesi, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi: Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 135 (yayımlanmamış).

Kim, J. G., Kimura, A., Kamei, Y., Hasuike, N., Harima, H., Kisoda, K., . . . Hiramatsu, K., 2011, Observation of longitudinal-optic-phonon-plasmon-coupled mode in n-type AlGaN alloy films, Applied Physics Letters, 99, 251904.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kim, J., Ji, M. H., Detchprohm, T., Dupuis, R. D., Ryou, J. H., Sood, A. K., . . . Lewis, J., 2015, Comparison of AlGaN p–i–n ultraviolet avalanche photodiodes grown on free-standing GaN and sapphire substrates, Applied Physics Express, 8, 122202.

Kim, K., Choi, J., Jung, M., Ha Woo, D., 2010, Effect of a nanoporous surface on photoluminescence from nanopatterned GaN thin films fabricated by anodic alumina templates, Philosophical Magazine Letters, 83-92.

Kınacı, B., 2013, III-V grubu güneş hücre yapılarının epitaksiyel büyütülmesi ve karakterizasyonu, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 119 (yayımlanmamış).

Kittel, C., 1996, Introduction to Solid State Physics. USA: John Wiley&Sons, p.673.

Koelmans, H., 1971, Application of semiconducting thin films, Thin Solid Films, 19-33.

Konca, E., Cheng, Y. T., Weiner, A. M., Dasch, J. M., Erdemir, A., Alpas, A. T., 2005, Transfer of 319 Al alloy to titanium diboride and titanium nitride based (TiAlN, TiCN, TiN) coatings: effects of sliding speed, temperature and environment, Surface and Coatings Technology, 200(7), 2260-2270.

Kutz, M., 2015, Volume 3: Manufacturing and Management. Mechanical Engineers' Handbook. John Wiley & Sons, 242-247.

Lawaetz, P., 1972, Stability of the wurtzite structure, Physical Review B, 5(10), 4039.

Levashov, E. A. ve Shtansky, D. V., 2007, Multifunctional nanostructured films, Russian Chemical Reviews, 76(5), 463.

Li, J., Zhao, M., Wang, X., 2010, High performance Schottky UV photodetectors based on epitaxial AlGaN thin film, Physica B, 996–998.

Lişesivdin, S. B., 2008, AlGaN/GaN Temelli Yüksek Elektron Hareketlilikli Transistörlerin (HEMT) Elektron ve Manyeto İletim Özellikleri, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 184 (yayımlanmamış).

Liu, L. ve Edgar, J. H., 2002, Substrates for gallium nitride epitaxy, Materials Science and Engineering: R: Reports, 37(3), 61-127.

Liu, C., Xie, Z., Han, P., Liu, B., Li, L., Zou, J., ... & Zheng, Y., 2007, Two-step growth of m-plane GaN epilayer on LiAlO 2 (100) by metal-organic chemical vapor deposition, Journal of crystal growth, 298, 228-231.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Liu, J., Guo, X., Liu, Y., Jiang, X., Huang, G., 2016, Effects of alkali-salt fusion process on recovery of amphoteric metals from waste printed circuit boards, Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1-5.

Lopatiuk, O., Osinsky, A., Dabiran, A., Gartsman, K., Feldman, I., Chernyak, L., 2005, Electron trapping effects in C- and Fe-doped GaN and AlGaN, Solid-State Electronics, 49, 1662–1668.

Mayer, J. W., Marsh, O. J., Shifrin, G. A., Baron, R., 1967, Ion implantation of silicon: II. electrical evaluation using hall-effect measurements, Canadian Journal of Physics, 45(12), 4073-4089.

Mayoral, B., Hornsby, P. R., McNally, T., Schiller, T. L., Jack, K., Martin, D. J., 2013, Quasi-solid state uniaxial and biaxial deformation of PET/MWCNT composites: structural evolution, electrical and mechanical properties, Rsc Advances, 5162-5183.

Mbaye, A. A., Zunger, A., Wood, D. M., 1986, Structural stability and selectivity of thin epitaxial semiconductors, Applied physics letters, 49(13), 782-784.

McGuire, G., Hofmann, S., Sartwell, B., 2012, Metallurgical Coatings and Thin Films, Elsevier, p.343.

Mckelvey, J. P., 1966, Solid State and Semiconductor Physics, Harper&Row, p.209.

Measurer, H. E. (1930). Novel microwave device for nondestructive electrical characterization of semiconducting layers. Rev. Sci. fnsfrum, 61(11).

Morkoc, H., 2013, Nitride semiconductors and devices, Springer Science & Business Media, 32, 1-488.

Moses, P. G., Van de Walle, C. G., 2010, Band bowing and band alignment in InGaN alloys, Applied Physics Letters, 021908.

Movchan, B. A., 2006, Inorganic materials and coatings produced by EBPVD, Surface Engineering, 22, 35-46.

Musa, G., Betiu, N., Mustata, I., Baltog, A., Popescu, A., 1983, Low-Voltage Arc-Welding in Vacuum, Revue Roumaine de Physique, 907-908.

Muth, J. F., Brown, J. D., Johnson, M. A. L., Yu, Z., Kolbas, R. M., Cook, J. W., Schetzina, J. F., 1999, Absorption coefficient and refractive index of GaN, AlN and AlGaN alloys, Materials Research Society Internet Journal of Nitride Semiconductor Research, 4(S1), 502-507.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Muziol, G., Turski, H., Siekacz, M., Wolny, P., Grzanka, S., Grzanka, E., . . . Skierbiszewski, C., 2015, Enhancement of optical confinement factor by InGaN waveguide in blue laser diodes grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy, Applied Physics Express, 8, 032103.

Nakamura, S., Senoh, M., Mukai, T., 1993, P-GaN/N-InGaN/N-GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes, Japanese Journal of Applied Physics, 32, L8.

Namkoong, G., Doolittle, W. A., Brown, A. S., Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., 2002, Role of low-temperature (200° C) nitridation in the growth of GaN by plasma-assisted molecular-beam epitaxy, Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 20(3), 1221-1228.

Narin, P., 2014, InGaN ve GaN Kuantum Kuyulu InAlN/GaN Yüksek Elektron Hareketliliğine Sahip Transistörlerin Elektron İletim Özellikleri, Yükseklisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 88 (yayımlanmamış).

Naser M, A., Zaliman, S., Uda, H., Yarub, A. D., 2009, Investigation of the absorption coefficient, refractive index, energy band gap, and film thickness for $Al_{0.11}Ga_{0.89}N$, $Al_{0.03}Ga_{0.97}N$, and GaN by optical transmission method, Int. J. Nanoelectronics and Materials, 2, 189-195.

Nayak, S. K., Shamoon, D., Ghatak, J., Shivaprasad, S. M., 2017, Nanostructuring GaN thin film for enhanced light emission and extraction, physica status solidi (a), 214(1), 1600300.

Ohring, M., 2001, Materials Science of Thin Films, 2nd Edition, Academic Press, p.794.

Ong, W. L., Low, Q. X., Huang, W., Van Kan, J. A., Ho, G. W., 2012, Patterned growth of vertically-aligned ZnO nanorods on a flexible platform for feasible transparent and conformable electronics applications, Journal of Materials Chemistry, 8518-8524.

Orhon, N., 2012, Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi İle Tantal Katkılı Elmas Benzeri Karbon Film Üretimi Ve Karakterizasyonu, Yükseklisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, s. 71 (yayımlanmamış).

Orton, J. Foxon, C., 1998, Group III nitride semiconductors for short wavelength light-emitting devices, Reports on progress in physics, 1.

Ougazzaden, A., Gautier, S., Sartel, C., Maloufi, N., Martin, J., Jomard, F., 2007, BGaN materials on GaN/sapphire substrate by MOVPE using N 2 carrier gas, Journal of crystal growth, 316-319.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015a, Deposition of a Mo doped GaN thin film on glass substrate by thermionic vacuum arc (TVA), Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26, 5060-5064.

Özen, S., Pat, S., Şenay, V., Korkmaz, Ş., Geçici, B., 2015b, Some physical properties of the SiGe thin film coatings by thermionic vacuum arc (TVA), Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 10, 56-60.

Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2015c, Investigation on the morphology and surface free energy of the AlGaN thin film, Journal of Alloys and Compounds, 653, 162–167.

Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2016a, Optical, morphological properties and surface energy of the transparent Li4Ti5O12 (LTO) thin film as anode material for secondary type batteries, Journal of Physics D: Applied Physics, 49, 105303.

Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2016b, Morphological and optical comparison of the Si doped GaN thin film deposited onto the transparent substrates, Materials Research Express, 3, 045012.

Özen, S., Korkmaz, Ş., Şenay, V., Pat, S., 2016c, The substrate effect on Ge doped GaN thin films coated by thermionic vacuum arc, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 1-6.

Özen, S., Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., 2016d, The influence of voltage applied between the electrodes on optical and morphological properties of the InGaN thin films grown by thermionic vacuum arc, Scanning, 38, 14–20.

Özen, S., Pat, S., Şenay, V., Korkmaz, Ş., 2017, The surface morphology research of the BGaN thin films deposited by thermionic vacuum arc, Vacuum, 135, 50–54.

Özen, Y., 2015, III-V Grubu Güneş Hücresi Geliştirilmesi ve Prototip Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Modül Üretimi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 169 (yayımlanmamış).

Özkan, M., 2010, Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği ile II-VI Grubu Bazı Yarıiletken Bileşiklerin İnce Filmlerinin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 137 (yayımlanmamış).

Pankove, J. I., 2012, Optical Processes in Semiconductors, Courier Corporation, p.448.

Pantha, B. N., Li, J., Lin, J. Y., Jiang, H. X., 2008, Single phase InxGa1− xN ($0.25 \leq x \leq 0.63$) alloys synthesized by metal organic chemical vapor deposition, Applied Physics Letters, 93, 182107.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Papadomanolaki, E., Bazioti, C., Kazazis, S., Androulidaki, M., Dimitrakopulos, G., Iliopoulos, E., 2015, Molecular beam epitaxy of thick InGaN(0001) films: Effects of substrate temperature on structural and electronic propertiesMolecular beam epitaxy of thick InGaN(0001) films: Effects of substrate temperature on structural and electronic properties, Journal of Crystal Growth, 437, 20-25.

Park, J. Y., Song, K. M., Min, Y. S., Choi, C. J., Kim, Y. S., Lee, S. N., 2015, Nanostructures of Indium Gallium Nitride Crystals Grown on Carbon Nanotubes, Scientific reports, 5.

Park, S. E., Lee, H.-J., Cho, Y. C., Jeong, S.-Y., Cho, C. R., Cho, S., 2002, Room-temperature ferromagnetism in Cr-doped GaN single crystals, Applied Physics Letters , 4187.

Park, Y., Choi, S. H., King, G. C., 2011, ABD Patent No. 7,906,358.

Pat, S., 2007, Çoklu gaz karışımı plazmalarının optik emisyon spektroskopisi, Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 149 (yayımlanmamış).

Pat, S., Korkmaz, Ş., Özen, S., Şenay, V., 2015a, GaN thin film deposition on glass and PET substrates by thermionic vacuum arc (TVA), Materials Chemistry and Physics, 159, 1-5.

Pat, S., Özen, S., Şenay, V., Korkmaz, Ş., 2015b, Optical and surface properties of optically transparent Li3PO4 solid electrolyte layer for transparent solid batteries, Scanning, 38, 317-321.

Pat, S., Şenay, V., Özen, S., Korkmaz, Ş., 2016a, Surface, Nanomechanical, and Optical Properties of Mo-Doped GeGaAs Thin Film Deposited by Thermionic Vacuum Arc, Journal of Electronic Materials, 45, 255-261.

Pat, S., Özen, S., Şenay, V., Korkmaz, Ş., 2016b, Comparisons of surface and optical properties of the heavily carbon-doped GaN nanocrystalline films deposited by thermionic vacuum arc method, Vacuum, 133, 38-42.

Peter, G. B., 1997, Solid state electrochemistry, Cambridge University Press, p.360.

Pierson, H. O., 1992, Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD), Noyes Publications, p.506.

Ravindran, V., Boucherit, M., Soltani, A., Gautier, S., Moudakir, T., Dickerson, J., . . . Ougazzaden, A., 2012, Dual-purpose BGaN layers on performance of nitride-based high electron mobility transistors, Applied Physics Letters, 100, 243503.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Richardson, O. W., 1909, Thermionics, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 17, 813-833.

Richter, E., Gridneva, E., Weyers, M., Tränkle, G., 2016, Fe-doping in hydride vapor-phase epitaxy for semi-insulating gallium nitride, Journal of Crystal Growth, 456, 97-100.

Roco, M. C., 2011, The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years, Journal of Nanoparticle Research, 427-445.

Roy, S., 1988, Laser chemical vapour deposition, Bulletin of Materials Science, 129-135.

Rudden, M. N., Wilson, J., 1980, Elements of solid state physics, John Wiley & Sons Ltd, p.186.

Sakai, S., Ueta, Y., Terauchi, Y., 1993, Band gap energy and band lineup of III-V alloy semiconductors incorporating nitrogen and boron, Japanese journal of applied physics, 4413.

Salomon, D., Dussaigne, A., Lafossas, M., Durand, C., Bougerol, C., Ferret, P., Eymery, J., 2013, Metal organic vapour-phase epitaxy growth of GaN wires on Si (111) for light-emitting diode applications, Nano Express, 8, 61.

Satō, T., 1967, Spectral emissivity of silicon, Japanese Journal of Applied Physics, 339.

Scanning Electron Microscope, http://www.semitracks.com/reference-material/failure-and-yield-analysis/failure-analysis-die-level/scanning-electron-microscope.php erişim tarihi: 18.08.2016

Selvaraj, S. L., Watanabe, A., Egawa, T., 2011, Influence of deep-pits on the device characteristics of metal-organic chemical vapor deposition grown AlGaN/GaN high-electron mobility transistors on silicon substrate, Applied Physics Letters, 252105.

Şenay, V., Pat, S., Korkmaz, Ş., Aydoğmuş, T., Elmas, S., Özen, S., . . . Balbağ, M. Z., 2014, ZnO thin film synthesis by reactive radio frequency magnetron sputtering Applied Surface Science, 318, 2-5.

Seo, T. H., Park, A. H., Park, S., Kim, Y. H., Lee, G. H., Kim, M. J., . . . Suh, E.-K., 2015, Direct growth of GaN layer on carbon nanotube-graphene hybrid structure and its application for light emitting diodes, Scientific Reports, 5, 7747.

Shen, K.-C., Wang, T.-Y., Wuu, D.-S., Horng, R.-H., 2012, High indium content InGaN films grown by pulsed laser deposition using a dual-compositing target, Optics express, 15149-15156.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Siefert, W., 1993, Anodic arc evaporation—a new vacuum-coating technique for textiles and films, Journal of Coated Fabrics, 23, 30-33.

Singh, R. K., Holland, O. W., Narayan, J., 1990, Theoretical model for deposition of superconducting thin films using pulsed laser evaporation technique, Journal of applied physics, 68, 233-247.

Singh, R., Narayan, J., 1990, Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: Physics and theoretical model, Physical Review B, 8843.

Şit, Z., 2014, AlxGa1-xN/GaN çoklu kuantum kuyularının optiksel özellikleri, Yükseklisans tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 45 (yayımlanmamış).

Sogabe, T., Ogura, A., Okada, Y., 2014, Analysis of bias voltage dependent spectral response in Ga0. 51In0. 49P/Ga0. 99In0. 01As/Ge triple junction solar cell, Journal of Applied Physics, 074503.

Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S., 2012, İnce film üretim teknikleri, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 389-401, (yayımlanmamış).

Stepanov, N., Sidorov, V., Mikhailin, N., Shamshur, D., Kaminskii, V., 2016, Study of Electrical Resistivity of Semiconductor SmS, Physics of the Solid State, 58, 915–918.

Stolz, A., Ko, S.-M., Patriarche, G., Dogheche, E., Cho, Y.-H., Decoster, D., 2013, Surface plasmon modulation induced by a direct-current electric field into gallium nitride thin film grown on Si(111) substrate, Applied Physics Letters, 102, 021905.

Strehlow, W., Cook, E., 1973, Compilation of energy band gaps in elemental and binary compound semiconductors and insulators, Journal of Physical and Chemical Reference Data, 163-200.

Svitasheva, S. N., Gilinsky, A. M., 2013, Influence of doping level on shift of the absorption edge of gallium nitride films (Burstein-Moss effect), Applied Surface Science, 281, 109-112.

Swift, P. D., 1996, Macroparticles in films deposited by steered cathodic arc, Journal of Physics D: Applied Physics, 2025.

Szabo, Z. G., Lakatos, B., 1957, A periodic table and new periodic functions, J. Chem. Educ, 34, 429.

Tachan, Z., Shalom, M., Hod, I., Ruhle, S., Tirosh, S., Zaban, A., 2011, PbS as a highly catalytic counter electrode for polysulfide-based quantum dot solar cells, The Journal of Physical Chemistry C, 6162-6166.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Tamer, M., 2013, Nitratlı fonksiyonel malzemelerin (GaN/AlN/alInN/InGaN) mozaik kusurlarının incelenmesi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 111 (yayımlanmamış).

Taniguchi, N., 1974, On the basic concept of nanotechnology, Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 18-23.

Taşlı, P. T., 2010, InAlN/GaN temelli yüksek elektron mobiliteli transistörlerin (HEMT) elektron ve magneto iletim özellikleri, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 175 (yayımlanmamış).

Tchoulfian, P., Donatini, F., Levy, F., Amstatt, B., Dussaigne, A., Ferret, P., . . . Pernot, J., 2013, Thermoelectric and micro-Raman measurements of carrier density and mobility in heavily Si-doped GaN wires, Applied Physics Letters, 103, 202101.

Tian, Y., Shao, Y., Wu, Y., Hao, X., Zhang, L., Dai, Y., Huo, Q., 2015, Direct growth of freestanding GaN on C-face SiC by HVPE, Scientific reports, 5.

Tour, J. M., 2007, Transition to organic materials science. Passive, active, and hybrid nanotechnologies, The Journal of organic chemistry, 7477-7496.

Tozlu, N., 2011, ZnO Tabanlı Yarıiletken Metal Kontak Özelliklerinin Araştırılması, Yükseklisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 88 (yayımlanmamış).

Tsai, D. C., Chang, Z. C., Kuo, B. H., Liu, Y. C., Chen, E. C., Shieu, F. S., 2016, Structural, electro-optical, and mechanical properties of reactively sputtered (TiZrHf) N coatings, Ceramics International, 42(12), 14257-14265.

Tsuboi, N., Takahashi, Y., Kobayashi, S., Shimizu, H., Kato, K., Kaneko, F., 2003, Delafossite CuAlO 2 films prepared by reactive sputtering using Cu and Al targets, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 64, 1671-1674.

Tülek, R., 2010, Yüksek Performanslı Al(In)GaN/AlN/(In)GaN Heteroeklem Yapıların İletim Özellikleri, Doktora tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 144 (yayımlanmamış).

Türküz, M. C., 2006, Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrür ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 290 (yayımlanmamış).

Tut, T., 2008, GaN/AlGaN-based UV photodetectors wıth performances exceedıng the pmts, Doktora tezi, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi: Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, p. 96 (yayımlanmamış).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Usanmaz, D., 2009, III-V yariiletken yüzeylerine atom tutunmasinin yapisal ve elektronik özellikleri, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 149 (yayımlanmamış).

Van der Pauw, L., 1958, A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape, Philips Res. Rep, 13, 1-9.

Van Hove, J. M., Cosimini, G. J., Nelson, E., Wowchak, A. M., Chow, P. P., 1995, GaN growth by a controllable RF-excited nitrogen source, Journal of crystal growth, 150, 908-911.

Waite, M., Shah, S., Glocker, D., 2007, 50 Years of Vacuum Coating Technology and the Growth of the Society of Vacuum Coaters, Society of Vacuum Coaters, p.42-50.

Wang, J., Shi, X., Zhu, J., 2013, Low-temperature growth of InxGa1−xN films by radio-frequency magnetron sputtering, Applied Surface Science, 265, 399–404.

Wang, R., 1999, Investigation of the properties of an anodic vacuum arc, Vacuum, 315-319.

Wang, S., Zhang, L., Sun, C., Shao, Y., Wu, Y., Lv, J., Hao, X., 2016, Gallium Nitride Crystals: Novel Supercapacitor Electrode Materials, Advanced Materials, 28, 3768-3776.

Wang, W., Gan, X., Xu, Y., Wang, T., Wu, H., Liu, C., 2015, High-quality n-type aluminum gallium nitride thin films grown by interrupted deposition and in-situ thermal annealing, Materials Science in Semiconductor Processing, 30, 612-617.

Wang, X., Summers, C. J., Wang, Z. L., 2004, Mesoporous Single-Crystal ZnO Nanowires Epitaxially Sheathed with Zn2SiO4, Advanced Materials , 1215-1218.

Wang, Y., AlOtaibi, B., Chowdhury, F. A., Fan, S., Kibria, M. G., Li, L., . . . Mi, Z., 2015, Photoelectrochemical reduction of carbon dioxide using Ge doped GaN nanowire photoanodes, APL Materials, 116106.

Wen, F., Huang, L., Tong, L., Liu, D., 2010, Experimental Optimization of growth Parameters of High Quality Green GaN Multiple Quantum Well by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, Modern Applied Science, 4(6), 49.

Wieneke, M., Witte, H., Lange, K., Feneberg, M., Dadgar, A., Bläsing, J., . . . Krost, A., 2013, Ge as a surfactant in metal-organic vapor phase epitaxy growth of a-plane GaN exceeding carrier concentrations of 1020 cm− 3, Applied Physics Letters, 012103.

Willmott, P. Huber, J., 2000, Pulsed laser vaporization and deposition, Reviews of Modern Physics, 315.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wilmsen, C. W., 2013, Physics and chemistry of III-V compound semiconductor interfaces, Springer Science & Business Media, p.465.

Wong, M. S., Hsiao, G. Y., Yang, S. Y., 2000a, Preparation and characterization of AlN/ZrN and AlN/TiN nanolaminate coatings, Surface and Coatings Technology, 133, 160-165.

Wong, R. K., 2000b, P-type doping of GaN, Yükseklisans tezi, Kaliforniya Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mineral Mühendisliği Bölümü, (yayımlanmamış).

Wu, P., Du, N., Zhang, H., Yu, J., Qi, Y. ve Yang D., 2011, Carbon-coated SnO2 nanotubes: template-engaged synthesis and their application in lithium-ion batteries, Nanoscale, 3, 746-750.

Xie, Y., Qian, Y., Zhang, S., Wang, W., Liu, X., Zhang, Y., 1996, Coexistence of wurtzite GaN with zinc blende and rocksalt studied by x-ray power diffraction and high-resolution transmission electron microscopy, Applied physics letters, 69(3), 334-336.

Xiong, K., Park, S. H., Song, J., Yuan, G., Chen, D., Leung, B., Han, J., 2014, Single Crystal Gallium Nitride Nanomembrane Photoconductor and Field Effect Transistor, Advanced Functional Materials, 24, 6503-6508.

Yalçın, B. G., 2014, Bizmut ve Azot İçeren III-V Grubu Yarıiletken Alaşımların Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, s. 141 (yayımlanmamış).

Yang, J. Y., Lee, J. M., Oh, B. S., Kim, C. S., Kim, J. K., Hong, S. J., Yoon, J. S., 2013, Characteristics of GaN Nanowires Produced Using VLS Method on the Growth Temperatures, ECS Transactions, 50(3), 469-477.

Yang, X., Yang, K., Cui, Y., Peng, Y., Chen, X., Xie, X., . . . Xu, X., 2014, Anomalous Resistivity in Vanadium-Doped Semi-Insulating 4H-SiC Wafers, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 27, 1083–1087.

Yee, K. K., 1978, Protective coatings for metals by chemical vapour deposition, International Metals Reviews, 23(1), 19-42.

Yi, Z., Jin-Cheng, Z., Jun-Shuai, X., Xiao-Wei, Z., Sheng-Rui, X., Yue, H., 2014, Influence of compressive strain on the incorporation of indium in InGaN and InAlN ternary alloys, Chinese Physics B, 017302.

Yongxin, L. Q., 1980, Fabrication and Investigation of PECVD Silicon Nitride Film, Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Young, N., Farrell, R., Iza, M., Nakamura, S., DenBaars, S., Weisbuch, C., Speck, J., 2016, Germanium doping of GaN by metalorganic chemical vapor deposition for polarization screening applications, Journal of Crystal Growth, 455, 105-110.

Zhang, L., Lieten, R. R., Zhu, T., Leys, M., Jiang, S., Borghsab, G., 2013, Optical and structural characterization of N-face GaN epilayers grown on Ge (111) by plasma assisted molecular beam epitaxy, CrystEngComm, 10590-10596.

Zhang, S., Xu, Q., Tu, R., Goto, T., Zhang, L., 2014, High-Speed Preparation of< 111>-and< 110>-Oriented β-SiC Films by Laser Chemical Vapor Deposition, Journal of the American Ceramic Society, 97, 952-958.

Zhang, Y., Chen, B., Guo, Z., 2014, Electrochemical properties and microstructure of Al/Pb–Ag and Al/Pb–Ag–Co anodes for zinc electrowinning, Acta Metallurgica Sinica (English Letters) , 331-337.

Zhang, Y., Zhou, X., Xu, S., Wang, Z., Zhao, Y., Zhang, J., . . . Hao, Y., 2015, Effects of interlayer growth condition on the transport properties of heterostructures with InGaN channel grown on sapphire by metal organic chemical vapor deposition, Applied Physics Letters, 106, 152101.

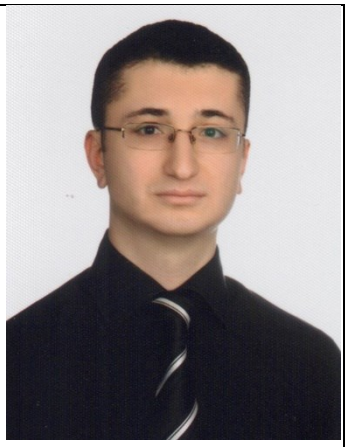
Zhang, Y.-G., Li, C., Gu, Y., Wang, K., Li, H., Shao, X.-M., Fang, J.-X., 2010, GaInP–AlInP–GaAs Blue Photovoltaic Detectors With Narrow Response Wavelength Width, IEEE Photonics Technology Letters, 944-946.

Zsebök, O., Thordson, J. V., Gunnarsson, J. R., Zhao, Q. X., Ilver, L., Andersson, T. G., 2001, The effect of the first GaN monolayer on the nitridation damage of molecular beam epitaxy grown GaN on GaAs(001), Journal of Applied Physics, 89, 3662-3667.

ÖZGEÇMİŞ

1.GENEL

DÜZENLEME TARİHİ	13.04.2017
T.C. KİMLİK NO	49309684788
ÜNVANI ADI SOYADI	Soner ÖZEN
YAZIŞMA ADRESİ	Osmangazi Mahallesi Basın Şehitleri Caddesi No:156/A D:5 Odunpazarı/ESKİŞEHİR
DOĞUM YILI	1986
YABANCI DİL	İngilizce (ÜDS: 67,50)
TELEFON	+90 (222) 226 8802
GSM	+90 (505) 355 6963
E-POSTA	sonerozen55@yahoo.co.uk



2. EĞİTİM

EĞİTİM TARİHİ	**DERECE**	**ÜNİVERSİTE-FAKÜLTE-BÖLÜM/ANABİLİM DALI**
2015-2017	Önlisans	Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Optisyenlik Programı
2012-2017	Doktora	ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
2007-2009	Yüksek Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı
2003-2007	Lisans	Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Yüksek Lisans Tez Başlığı

Tuzaklanmış iyonda negativity ve concurrence hesaplarıyla kuantum dolaşıklık. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı. Afyonkarahisar, Haziran 2009. Danışman: Yrd.Doç.Dr. Rasim DERMEZ

3. PROJE DENEYİMİ

- LiPON ve LTO İnce Filmlerin Çeşitli Alt Taşlar Üzerine Üretilmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 20.04.2016- (Devam Ediyor), Eskişehir.

- Yüksek Şeffaflığa Sahip Uzun Devir Ömür Özellikli Şarj Edilebilir Lityum Pil Geliştirilmesi ve Çeşitli Gaz Atmosferleri İçin Test İstasyonu Tasarımı. 115E331 no'lu TUBITAK 1005 Projesi, Bursiyer, 01.10.2015-01.04.2017 (Tamamlandı), Eskişehir.

- Katkılı ve Katkısız Nitratlı İnce Film Bileşiklerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 20.04.2016- (Devam Ediyor), Eskişehir.

- Katkılı III-Nitrat Grubu Bileşiklerin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 20.02.2015- (Tamamlandı), Eskişehir.

- Plazma Destekli Teknolojiler ile Üretilen İleri Teknoloji Malzemelerinin Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 25.07.2014-16.06.2015 (Tamamlandı), Eskişehir.

- Ortaöğretim Öğrencileri için Maddenin Dördüncü Hali, Plazma ve Genel Özelliklerinin Açıklanması için Yeni Bir Deney Sistemi Tasarımı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 19.06.2014-19.06.2016 (Tamamlandı), Eskişehir.

- İkincil Tip Piller için Elektrolit ve Elektrot Üretimleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 06.12.2013-06.12.2014 (Tamamlandı), Eskişehir.

- Kuantum Bilgi Teorisinde Kuantum Dolaşık Durumların Teorik Kuantum Ölçümler İle Belirlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonu, Araştırmacı, 17.09.2007-17.09.2009 (Tamamlandı), Afyonkarahisar.

4. YAYINLAR

SCI, SSCI, AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz, Suat Pat, H.Hakan Yudar. A new technique for transparent solid state Li3PO4 electrolyte layer growth: thermionic vacuum arc technique. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 1-6, 2017 (online).
2. Suat Pat, ***Soner Özen***, H.Hakan Yudar, Şadan Korkmaz, Zerrin Pat. The transparent all-solid-state rechargeable micro-battery manufacturing by RF magnetron sputtering. Journal of Alloys and Compounds, 713, 64-68, 2017.
3. H.Hakan Yudar, Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz, Zerrin Pat. Effect of XRD relative intensities of the Li (002) on surface, optical and electrochemical impedance spectroscopy analyses of the deposited LiCoO2 thin film. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 1-6, 2017 (online).

4. Suat Pat, Reza Mohammadigharehbagh, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, H.Hakan Yudar, Şadan Korkmaz. The Al doping effect on the surface, optical, electrical and nanomechanical properties of the ZnO and AZO thin films prepared by RF sputtering technique. Vacuum, 141, 210-215, 2017.

5. Reza Mohammadigharehbagh, ***Soner Özen***, H.Hakan Yudar, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Investigation on the physical properties of C-doped ZnO thin films deposited by the thermionic vacuum arc. Eur. Phys. J. Plus, 132, 28, 2017.

6. ***Soner Özen***, Suat Pat, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz. The surface morphology research of the BGaN thin films deposited by thermionic vacuum arc. Vacuum, 135, 50–54, 2017.

7. H.Hakan Yudar, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay. Comparisons of surface and optical properties of the heavily carbon-doped GaN nanocrystalline films deposited by thermionic vacuum arc method. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 1-5, 2016.

8. Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz. Comparisons of surface and optical properties of the heavily carbon-doped GaN nanocrystalline films deposited by thermionic vacuum arc method. Vacuum, 133, 38–42, 2016.

9. ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz Volkan Şenay, Suat Pat. The substrate effect on Ge doped GaN thin films coated by thermionic vacuum arc. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28, 1288-1293, 2017.

10. Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz. Optical and Surface Characteristics of Mg-Doped GaAs Nanocrystalline Thin Film Deposited by Thermionic Vacuum Arc Technique. Journal of Electronic Materials, 1-5, 2016.

11. H.Hakan Yudar, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat. Surface and optical properties of indium tin oxide layer deposition by RF magnetron sputtering in argon atmosphere. Applied Physics A, 122, 748, 2016.

12. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Morphological and optical comparison of the Si doped GaN thin film deposited onto the transparent substrates, Materials Research Express, 3(4), 045012, 2016.

13. Şadan Korkmaz, Birol Geçici, Saadet Deniz Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh, Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, H.Hakan Yudar. Morphology, composition, structure and optical properties of CuO/Cu2O thin films prepared by RF sputtering method. Vacuum, 131, 142–146, 2016.

14. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Optical, morphological properties and surface energy of the transparent $Li_4Ti_5O_{12}$ (LTO) thin film as anode material for secondary type batteries, Journal of Physics D: Applied Physics, 49, 105303, 2016.

15. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. The Influence of Voltage Applied Between the Electrodes on Optical and Morphological Properties of the InGaN Thin Films Grown by Thermionic Vacuum Arc. Scanning, 38(1), 14-20, 2016.

16. Suat Pat, Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz. Surface, nanomechanical and optical properties of Mo doped GeGaAs thin film deposited by thermionic vacuum arc. Journal of Electronic Materials, 45 (1), 255-261, 2016.

17. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Optical, structural, morphological and compositional characterization of a Co-doped GaAs semiconducting thin film produced by thermionic vacuum arc, Journal of Alloys and Compounds, 663, 829-833, 2016.

18. Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay. The Effects of Boron Alloying on the Structural and Optical Properties of GaAs Deposited by a Thermionic Vacuum Arc Method. Materials Focus, 5(1), 1-4, 2016.

19. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Optical, Morphological and Mechanical Properties of an Al-Al2O3 Nanocomposite Thin Film Grown by Thermionic Vacuum Arc. Optik, 127(6), 3383-3387, 2016.

20. Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay. Heavily carbon doped GaAs nanocrystalline thin film deposited by thermionic vacuum arc method. Journal of Alloys and Compounds, 657, 711-716, 2016.

21. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Optical, Structural and Morphological Characterization of a Zn-Doped GaAs Semiconducting Thin Film Produced by Thermionic Vacuum Arc. Materials Focus, 4(6), 397-402, 2016.

22. Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz, Veli Şimşek. Optical and surface properties of the In doped GaAs layer deposition using thermionic vacuum arc method. Scanning, 38(4), 297-302, 2016.

23. Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz. Optical and Surface Properties of Optically Transparent Li3PO4 Solid Electrolyte Layer for Transparent Solid Batteries. Scanning, 38(4), 317-321, 2016.

24. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz. A new method for titania thin film production: Thermionic vacuum arc method. Journal of Thermoplastic Composite Materials, online published, 2015.

25. Birol Geçici, ***Soner Özen***, Suat Pat, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz. Influence of Oxygen Partial Pressure on the Metastable Copper Oxide Thin Films. Modern Physics Letters B, 1530012, 2016.

26. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Characterization of a fast grown GaAs: Sn thin film by thermionic vacuum arc. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26(11), 8983-8987, 2015.

27. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Investigation on the Morphology and Surface Free Energy of the AlGaN Thin Film. Journal of Alloys and Compounds, 563, 162-167, 2015.

28. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Some physical properties of a Si-doped nano-crystalline GaAs thin film grown by thermionic vacuum arc. Vacuum, 119, 228-232, 2015.

29. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. AlGaAs film growth using thermionic vacuum arc (TVA) and determination of its physical properties. Eur. Phys. J. Plus, 130, 108, 2015.

30. Suat Pat, Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz, Birol Geçici. Influence of RF Power on Optical and Surface Properties of the ZnO Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering, J. Nanoelectron. Optoelectron., 10(2), 183-186, 2015.

31. Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay. GaN thin film deposition on glass and PET substrates by thermionic vacuum arc (TVA). *Materials Chemistry and Physics*, 159, 1-5, 2015.

32. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Deposition of a Mo doped GaN thin film on glass substrate by thermionic vacuum arc (TVA). Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26(7), 5060-5064, 2015.

33. ***Soner Özen***, Suat Pat, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz, Birol Geçici. Some Physical Properties of the SiGe Thin Film Coatings by Thermionic Vacuum Arc (TVA). J. Nanoelectron. Optoelectron., 10(1), 56-60, 2015.

34. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Optical and surface properties of LiFePO4 thin films prepared by RF magnetron sputtering. Eur. Phys. J. D, 69, 76, 2015.

35. Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay. Direct and fast growth of GaAs thin films on glass and polyethylene terephthalate substrates using a thermionic vacuum arc. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26(4), 2210-2214, 2015.

36. Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Tuna Aydoğmuş, Saliha Elmas, Şadan Korkmaz, Naci Ekem, M. Zafer Balbağ. A Study on Optical, Morphological and Mechanical Properties of Al_2O_3 Ultra-thin Films Deposited by RF Reactive Magnetron Sputtering. International Journal of Surface Science and Engineering, 9(5), 415-424, 2015.

37. Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Tuna Aydoğmuş, Saliha Elmas, ***Soner Özen***, Naci Ekem, M. Zafer Balbağ. ZnO Thin Film Synthesis by Reactive Radio Frequency Magnetron Sputtering. Applied Surface Science, 318, 2-5, 2014**.**

38. Rasim Dermez and ***Soner Özen***. Maximum quantum entanglement and linearity in the second-order terms of the Lamb–Dicke parameter. Phys. Scr., 85, 055009, 2012.

39. Rasim Dermez and ***Soner Özen*****.** Higher dimensional entangled qudits in a trapped three-level ion. Eur.Phys. J. D, 57, 431-437, 2010.

SCI, SSCI, AHCI İndeksleri Dışındaki Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. ***Soner Özen***, Eyüp Bilgiç, Gülay Gülmez, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh. Investigation of the thickness effect to impedance analysis results AlGaN acoustic sensor. AIP Conference Proceedings, 1722, 240004, 2016.

2. ***Soner Özen***, Eyüp Bilgiç, Gülay Gülmez, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh. Investigation Impedance analysis of nano thickness layered AlGaN acoustic sensor deposited by thermionic vacuum arc. AIP Conference Proceedings, 1722, 240005, 2016.

3. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh. Some physical properties of Co-doped GaAs thin films grown by thermionic vacuum arc. AIP Conference Proceedings, 1722, 290016, 2016.

4. ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz. Investigation of the surface free energy of the ITO thin films deposited under different working pressure. AIP Conference Proceedings, 1722, 290010, 2016.

5. ***Soner Özen*** and Rasim Dermez. Negativity and Concurrence Computation of 4 EPR-BELL States Two Qubits. Balkan Physics Letters, 16, 161046, 2009.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

1. Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, H.Hakan Yudar, Zerrin Pat (2016). Surface and Optical Properties of the Transparent Cathode Materials. Turkish Physical Society 32th International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, Muğla, Turkey (Oral Presentation).

2. ***Soner Özen,*** Şadan Korkmaz, Suat Pat, H.Hakan Yudar, Volkan Şenay (2016). The Physical Properties of the ZnO Thin Film Prepared by RF Magnetron Sputtering Method. IV. YUKPOP Winter School International Vacuum Workshop, 28 – 30 March, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey (Poster Presentation).

3. Reza Mohammadigharehbagh, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, H.Hakan Yudar, Mehdi Meskini Heydarlou (2016). Antibacterial Activities of Deposited Thin Films by RF Magnetron Sputtering Technique. IV. YUKPOP Winter School International Vacuum Workshop, 28 – 30 March, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey (Poster Presentation).

4. Volkan Şenay, ***Soner Özen,*** Suat Pat, Şadan Korkmaz, H.Hakan Yudar, Reza Mohammadigharehbagh (2016). Optical and Surface Properties of an AZO Thin Film Synthesized by RF Magnetron Sputtering. IV. YUKPOP Winter School International Vacuum Workshop, 28 – 30 March, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey (Poster Presentation).

5. ***Soner Özen,*** Saadet Deniz Korkmaz, Eren Can Aybek, Suat Pat (2015). A New Plasma System For Student And Teacher Education. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24 – 27 August, Istanbul University, Istanbul, Turkey (Poster Presentation).

6. ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). Investigation of the Surface Energy of the ITO Thin Films Deposited Under Different Working Pressure. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24 – 27 August, Istanbul University, Istanbul, Turkey (Poster Presentation).

7. Suat Pat, ***Soner Özen,*** Eyüp Bilgiç, Gülay Gülmez, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz (2015). Impedance Analysis of Nano Thickness Layered AlGaN Acoustic Sensor

Deposited by Thermionic Vacuum Arc. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24 – 27 August, Istanbul University, Istanbul, Turkey (Poster Presentation).

8. ***Soner Özen,*** Eyüp Bilgiç, Gülay Gülmez, Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). Investigation of the Thickness Effect to Impedance Analysis Results AlGaN Acoustic Sensor. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24 – 27 August, Istanbul University, Istanbul, Turkey (Poster Presentation).
9. Volkan Şenay, ***Soner Özen,*** Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). Some Physical Properties of a Co-Doped GaAs Thin Film Grown by Thermionic Vacuum Arc. 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union (BPU9), 24 – 27 August, Istanbul University, Istanbul, Turkey (Poster Presentation).
10. ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). The ITO Thin Film Production Adjustable Surface Resıstance and Transparency. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), July 2-4, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).
11. Volkan Şenay, ***Soner Özen,*** Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). An Investıgation on Surface Properties of a Sn-Doped GaAs Thin Film Produced By TVA. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), July 2-4, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).
12. Volkan Şenay, ***Soner Özen,*** Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). Optical, Morphologıcal and Surface Free Energy Characterization of an Al-Doped GaAs Semiconductıng Film. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), July 2-4, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).
13. ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). The Influence on Surface Properties of Mo Doping in GaN Growth Process. The 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (IBWAP 2015), July 2-4, Ovidius University, Constanta, Romania (Poster Presentation).
14. ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). Some Physical Properties of an AlGaN Thin Film Grown By Thermionic Vacuum Arc (TVA). 11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).
15. Şadan Korkmaz, ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, Suat Pat (2015). Investigation of the Optical and Surface Properties of InGaN Semiconductor. 11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).
16. Volkan Şenay, ***Soner Özen,*** Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). Some Physical Properties a Ge-Doped GaAs Thin Film Grown by Thermionic Vacuum Arc. 11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).
17. Suat Pat, Volkan Şenay, ***Soner Özen,*** Şadan Korkmaz (2015). Morphological and Optical Investigations of an InGaAs Thin Film Grown by Thermionic Vacuum Arc.

11th NanoTR Conference (Nanotr-11), 22-25 June 2015, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (Poster Presentation).

18. Suat Pat, ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, Şadan Korkmaz, Zerrin Pat (2015). Solid state battery manufacturing with thermionic vacuum ARC and RF sputtering. Plasma Sciences (ICOPS), 2015 IEEE International Conference on, 1-1, 24-28 May 2015, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

19. ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Volkan Şenay (2015). Mo doped GaN thin film growth using Thermionic Vacuum Arc (TVA). Plasma Sciences (ICOPS), 2015 IEEE International Conference on, 1-1, 24-28 May 2015, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

20. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz (2015). Direct and fast growth of a SI: GAAS thin film by means of thermionic vacuum arc (TVA). Plasma Sciences (ICOPS), 2015 IEEE International Conference on, 1-1, 24-28 May 2015, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

21. Hasan Satılmış, Mehmet Özkan, Şükrü Taktak, Ö.Faruk Emrullahoğlu, Suat Pat, ***Soner Özen*** (2014). AlN Thin Films Deposition on Glass Substrate by Radio Frequency Magnetron Sputtering. Science and Applications of Thin Films, Conference & Exhibition, 15-19 September 2014, Çeşme, Izmir, Turkey (Poster Presentation).

22. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Birol Geçici, Şadan Korkmaz (2014). TiO_2 Thin Film Production by Thermionic Vacuum Arc. 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

23. Suat Pat, Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz, Birol Geçici (2014). The Effects of RF Input Power on the Optical and Structural Properties of Sputtered ZnO Thin Films. 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

24. ***Soner Özen***, Suat Pat, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz, Birol Geçici (2014). Characterization of SiGe Structures Deposited by Thermionic Vacuum Arc (TVA). 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

25. Birol Geçici, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Tuna Aydoğmuş, Suat Pat (2014). Copper Oxide Thin Film Production by Reactive RF Magnetron Sputtering. 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, 18-20 June 2014, Uşak, Turkey (Oral Presentation).

26. ***Soner Özen***, Suat Pat, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz (2014). Some Physical Properties of the $BaTiO_3$ Thin Films Coated by TVA Plasma Production Technique. International Middle East Plasma Science (IMEPS) Conference, 23-25 April 2014, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

27. Suat Pat, Naci Ekem, M. Zafer Balbağ, Şadan Korkmaz, Tuna Aydoğmuş, ***Soner Özen***, Volkan Şenay (2014). Reactive Thermionic Vacuum Arc (R-TVA) System. International Middle East Plasma Science (IMEPS) Conference, 23-25 April 2014, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

28. Volkan Şenay, Suat Pat, ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz (2014). Deposition of Al_2O_3 Ultra-thin Layers by Radio-Frequency Magnetron Sputtering and Study of Their Optical, Morphological and Mechanical Properties. International Middle East Plasma Science (IMEPS) Conference, 23-25 April 2014, Antalya, Turkey (Poster Presentation).

29. Tuna Aydoğmuş, Naci Ekem, Suat Pat, Şadan Korkmaz, M. Zafer Balbağ, Saliha Elmas, ***Soner Özen***, Volkan Şenay (2013). Cr_2O_3 Thin Film Synthesized by Reactive Magnetron Sputtering. Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey (Poster Presentation).

30. Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Tuna Aydoğmuş, Saliha Elmas, ***Soner Özen***, Naci Ekem, M. Zafer Balbağ (2014). ZnO Thin Film Synthesis by Reactive Radio Frequency Magnetron Sputtering. 9th NanoTR Conference (Nanotr-9), 24-28 June 2013, Atatürk University, Erzurum, Turkey (Oral Presentation).

31. ***Soner Özen*** and Rasim Dermez (2008). Negativity and Concurrence Computation of 4 EPR-BELL States Two Qubits. Turkish Physical Society 25th International Physics Congress, 25-29 August 2008, Bodrum, Muğla, Turkey (Oral Presentation).

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

1. Mustafa Erol, ***Soner Özen,*** Suat Pat (2016). AZO İnce Filmlerin Atomik Kuvvet Mikroskobu ile İncelenmesi. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Sözlü Sunum).

2. ***Soner Özen,*** Şadan Korkmaz, Suat Pat, Volkan Şenay (2016). RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile Üretilen ZnO İnce Filmin Bazı Fiziksel Özellikleri. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

3. H. Hakan Yudar, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen,*** Volkan Şenay, Zerrin Pat, Reza Mohammadigharehbagh (2016). İnce Film Piller için RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile Üretilen $LiCoO_2$ Katı Katot Arayüzünün İncelenmesi. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

4. Reza Mohammadigharehbagh, Suat Pat, ***Soner Özen,*** Şadan Korkmaz, Volkan Şenay, H. Hakan Yudar, Zerrin Pat (2016). RF Magnetron Püskürtme Tekniği Kaplanan ITO İnce Filmlerin Özelliklerinin İncelenmesi. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

5. İnanç Erdoğan, ***Soner Özen,*** Suat Pat (2016). RF Magnetron Saçtırma Yöntemi ile ZnO İnce Film Üretimi ve Karakterizasyonu. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

6. Volkan Şenay, Suat Pat, ***Soner Özen,*** Şadan Korkmaz (2016). RF Magnetron Sıçratma Tekniği ile Cam Alttaş Üzerine Biriktirilen AZO İnce Filmin Bazı Fiziksel Özellikleri. V. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 12-13 Mayıs 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

7. H.Hakan Yudar, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay (2016). RF Magnetron Püskürtme Tekniği ile İnce Film Lityum Piller İçin Li3PO4 Katı Elektrolit Arayüzünün İncelenmesi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Sözlü Sunum).

8. Reza Mohammadigharehbagh, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, H.Hakan Yudar, Mehdi Meskini Heydarlou (2016). RF Manyetik Püskürtme Tekniği Üretilen ITO İnce Filmlerin Antibakteriyel Özelliklerinin İncelenmesi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Sözlü Sunum).

9. Volkan Şenay, ***Soner Özen***, Suat Pat, Şadan Korkmaz, Reza Mohammadigharehbagh, H.Hakan Yudar (2016). TVA ile Üretilen Kurşun Katkılı Galyum Arsenik İnce Filmin Optik ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunum).

10. ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz, Volkan Şenay, H.Hakan Yudar, Reza Mohammadigharehbagh, Suat Pat (2016). Nano Tabakalı AlGaN Akustik Sensörün Empedans Analizi. ADIM Fizik Günleri V, 21-23 Nisan 2016, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunum).

11. Birol Geçici, Suat Pat, M. Zafer Balbağ, ***Soner Özen***, Volkan Şenay, Naci Ekem (2014). Mineral Gözlük Camı Üzerine Çok Katmanlı SiO_2-ITO-CaF_2 Kaplama. I. Ulusal Optisyenlik Sempozyumu, 30-31 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

12. ***Soner Özen***, Suat Pat, M. Zafer Balbağ, Volkan Şenay, Birol Geçici, Naci Ekem (2014). SiO_2-ITO-BaF_2 Çok Katmanlı Anti-Refle (AR) Kaplamanın Analizi. I. Ulusal Optisyenlik Sempozyumu, 30-31 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

13. Volkan Şenay, Suat Pat, M. Zafer Balbağ, ***Soner Özen***, Birol Geçici, Naci Ekem (2014). TVA Tekniği ile Çok Katmanlı SiO_2-TiO-MgF_2 Anti-Refle (AR) Kaplama. I. Ulusal Optisyenlik Sempozyumu, 30-31 Mayıs 2014, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

14. ***Soner Özen***, Şadan Korkmaz, Suat Pat, Birol Geçici, Volkan Şenay (2014). RF Manyetik Saçtırma ile Üretilen Çinko Oksit Yapıların Analizi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

15. Volkan Şenay, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Birol Geçici (2014). Si-Ge İnce Filmlerin Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniği ile Üretilmesi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

16. Birol Geçici, Şadan Korkmaz, Suat Pat, ***Soner Özen***, Volkan Şenay (2014). RF Manyetik Saçtırma ile Bakır Oksit Filmlerin Sentezi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

17. Koray Köseoğlu, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Birol Geçici (2014). Güneş Enerjisi Depolama Sistemlerinde Kullanılan LiFePO4 İnce Filmlerin Üretilmesi ve

Özelliklerinin Belirlenmesi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

18. Fikri Kurt, Şadan Korkmaz, Suat Pat, Çiğdem Keser, ***Soner Özen***, Birol Geçici, Volkan Şenay (2014). Termiyonik Vakum Ark ile ITO İnce Filmlerin Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).
19. Sinem Akkabak, Naci Ekem, Suat Pat, ***Soner Özen***, Birol Geçici, Volkan Şenay, Şadan Korkmaz (2014). Plazma Yöntemi ile Ni/C Kompozit İnce Film Yapısının Özelliklerinin İncelenmesi. IV. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).
20. Serap Yücesan, Suat Pat, Şadan Korkmaz, ***Soner Özen***, Birol Geçici (2014). İnce Film Güneş Pilleri İçin AlN Kaplamalarının Cam ve PTFE Üzerine Yapılması. IV. Ulusal Güneş Hidrojen Enerjisi Kongresi, 22-23 Mayıs 2014, Eskişehir, Türkiye (Poster Sunumu).

5. DİĞER ETKİNLİKLER

1. ***Soner Özen.*** Yüklü Parçacık Analizörlerinin Simülasyonu, Dizaynı ve Uygulamaları. II. Yüklü Parçacık Optiği Kış Okulu (YÜKPOP 2014), 24-26 Mart 2014, Afyonkarahisar, Türkiye (Katılımcı)

6. ULUSLARARASI DERGİLERDE (SCIENCE CITATION INDEX) YAPILAN HAKEMLİKLER

1. Nature Publishing Group - Scientific Reports
2. Elsevier Inc. - Materials Science & Engineering
3. Elsevier – Thin Solid Films
4. Elsevier – Vacuum

7. SERTİFİKALAR

- İş Güvenliği - İş Güvenliği Uzmanlığı Sertifikası (C Sınıfı) - ÇSGB - 09.2013

- Yönetici Adayları için Kalite Eğitimleri – Başarı ve Katılım Sertikaları - KalDer - 12.2012

- Park System Corp. Atomik Kuvvet Mikroskobu – Eğitim Sertifikası – Tekno-Tıp Analitik Sistemler – 03.2013

- OptoSense Elipsometre – Eğitim Sertifikası – OptoSense LLC. – 05.2014

- Filmetrics İnterferometre – Eğitim Sertifikası – Tekno-Tıp Analitik Sistemler – 07.2014

- UV-VIS Spektrometre – Eğitim Sertifikası – Tekno-Tıp Analitik Sistemler – 07.2014

- Ecopia HMS 3000 serisi Hall Etkisi Ölçüm Sistemi – Eğitim Sertifikası – Teknis İleri Araştırma Sistemleri – 12.2016