

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**AIGaN İNCE FİLMİNİN ISIL İŞLEM SONRASI
YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasemin DİNÇ

Balıkesir, Ağustos - 2007

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

AIGaN İNCE FİLMİNİN ISIL İŞLEM SONRASI
YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

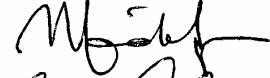
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasemin DİNÇ

Tez Danışmanı: Yar. Doç. Dr. Orhan ZEYBEK

Sınav Tarihi: 17 . 08 . 2007

Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Mustafa GÖKTEPE (BAÜ)



Yrd. Doç. Dr. Erol ASKER (BAÜ)



Yrd. Doç. Dr. Orhan ZEYBEK (Danışman-BAÜ)



Balıkesir, Ağustos - 2007

ÖZET

AlGaN İNCE FİLMİNİN ISIL İŞLEM SONRASI YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yasemin DİNÇ

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı
(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Orhan Zeybek)

Balıkesir, 2007

Bu çalışmada Metal Organik Kimyasal Buhar Birikim (MOCVD) tekniğiyle safir alttaş üzerine büyütülen çoklu yapılu $Al_xGa_{1-x}N$ ($x=0.43$) yarıiletken ince filmlerin ısıtılma sonrası yapısal ve optik özellikleri incelendi. Malzemenin yapısal ve optiksel özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı, atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) sistemleri kullanılarak belirlendi. Örneklerin, farklı sıcaklıklarda hızlı ısıtılma (RTA) işlemine tabi tutularak, kristal yapısı, luminesans özellikleri ve yüzey morfolojisi ısıtılma sıcaklığına göre incelendi. Yapının yüzey morfolojisi $2 \times 2 \mu m^2$ ve $5 \times 5 \mu m^2$ lik yüzeyleri için oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında AFM tekniği ile incelendi. Yüzey pürüzlülüğünün cihaz uygulamaları açısından kabul edilebilir ölçekte olduğu gözlemlendi. PL ölçümleri ile malzemenin optik özellikleri incelendi. XRD ile örneklerdeki Al yüzdesi ve kristal kaliteleri belirlendi. Ulaşılan sonuçların literatürdeki benzer çalışmalarla uyum içinde olduğu gözlemlendi.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: AlGaN / AlN / X-ışınları / AFM / Fotoluminesans / Elipsometri / Yarıiletken

ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF AlGaN THIN FILMS AFTER THERMAL PROCESSING

Yasemin DİNÇ

Balıkesir University, Institute of Science, Department of Physics

(Ms. Thesis / Supervisor: Assist. Prof. Dr. Orhan ZEYBEK)

Balıkesir, 2007

In this study, optical and structural properties of superlattice $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ semiconductor thin films grown on A_2O_3 substrate after thermal processing have been investigated. The quality and surface morphology of the semiconductor thin films by using high resolution X-ray diffraction (HR-XRD), atomic force microscopy (AFM) and photoluminescence (PL) have been determined. Under rapid thermal annealing (RTA) process at various temperatures, crystal structure, properties of luminescence, surface morphology of the samples have been investigated against annealing temperatures. Under room temperature and atmospheric pressure, surface morphology for the $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ and $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ surfaces has been studied using AFM technique. It has been observed that surface roughness can be acceptable for device practice. Optical properties of the superlattice have been investigated using PL measurements. The crystal quality and Al percentages of the samples have been determined with XRD. The obtained results are in good agreement with similar studies in the literature.

KEY WORDS : AlGaN / AlN / XRD/ AFM / Photoluminescence / Semiconductor / Superlattice

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No.</u>
ÖZET,ANAHTAR SÖZCÜKLER	ii
ABSTRACT,KEY WORDS	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KRİSTAL YAPI VE MATERYAL ÖZELLİKLERİ	5
2.1 Katkılama	5
2.2 Düşük Boyutlu Yarıiletkenler	6
2.3 Kristal Yapı	9
2.4 AlGaN Alaşımının Özellikleri	11
2.5 Büyütme ve materyal kalitesi	14
2.6 AlGaN Alaşımının Bazı Uygulama Alanları	15
2.6.1 Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) Yapı	15
2.6.2 Fotodiyot Yapı	15
3. DENEYSEL SİSTEMLER VE YÖNTEMLER	17
3.1 Hızlı Termik Tavlama İşlemi	17
3.2 Yüksek Çözünürlüklü X-Işınları Difraksiyonu (HR-XRD)	18

3.3 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	19
3.4 Fotolüminesans (PL)	22
4. DENEYSEL SONUÇLAR	24
4.1 Giriş	24
4.2 Materyal Büyütme Süreçleri	24
4.2.1 Çoklu Yapı-1 Numunesinin Büyütme Süreci	24
4.2.2 Çoklu Yapı-2 Numunesinin Büyütme Süreci	25
4.3 Karakterizasyon Deneyleri	26
4.3.1 Çoklu Yapı-1 Numunesinin Karakterizasyonu	27
4.3.1.1 Çoklu Yapı-1 Numunesinin HR-XRD ile Karakterizasyonu	27
4.3.1.2 Çoklu Yapı-1 Numunesinin AFM ile Yüzey Karakterizasyonu	31
4.3.1.3 Çoklu Yapı-1 Numunesinin PL ile Karakterizasyonu	41
4.3.2 Çoklu Yapı-2 Numunesinin Karakterizasyonu	46
4.3.2.1 Çoklu Yapı-2 Numunesinin HR-XRD ile Karakterizasyonu	46
4.3.2.2 Çoklu Yapı-2 Numunesinin AFM ile Karakterizasyonu	51
4.3.2.3 Çoklu Yapı-2 Numunesinin PL ile Karakterizasyonu	59
5.SONUÇLAR	61
6.KAYNAKLAR	65

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Adı</u>	<u>Sayfa No.</u>
Şekil 2.1	Bir yarıiletkendeki katkılıma: (a) saf yarıiletken; burada elektron ve deşik miktarı biri birine eşittir. (b) p-tipi yarıiletken; burada deşik sayısı elektron sayısından fazladır. (c) n-tipi bir yarıiletken; burada elektron sayısı deşik sayısından fazladır.	6
Şekil 2.2	Çoklu bir yapıda oluşan kuyu sistemi	7
Şekil 2.3	Bir süperörgüdeki bant yapısının grafiği	8
Şekil 2.4	Süperörgülerdeki miniband ve mini boşluklar Burada π/a kristalin temelini oluşturan Brillouin- Bölge sınırlarını gösteriyor	8
Şekil 2.5	Wurtzite yapıda birim hücre	9
Şekil 2.6	GaN wurtzite HCP kristal yapı	10
Şekil 2.7	HCP yapının istif düzeni	10
Şekil 2.8	Zinblendede yapıda birim hücre	11
Şekil 2.9	Yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitleri ve enerji bant aralıkları	12

Şekil 2.10	Wurtzite GaN'ün enerji bant diyagramı	13
Şekil 2.11	Fotodiyotun şematik gösterimi	16
Şekil 3.1	Hızlı ısıtılma sistemi	17
Şekil 3.2	HR-XRD Sistemi	19
Şekil 3.3	AFM'nin şematik diyagramı	20
Şekil 3.4	AFM (Omicron-Variable Temperature STM/AFM) cihazı	21
Şekil 3.5	PL aygıtının ana hatları	22
Şekil 3.6	Yarıiletkenlerde görülen PL geçişleri	23
Şekil 3.7	PL cihazının görünümü	23
Şekil 4.1	$Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ çoklu yapı-1 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri	25
Şekil 4.2	$Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ çoklu yapı-2 numunesinin büyütme şartları ile yapısal özellikleri	26
Şekil 4.3	Çoklu yapı-1 numunesinin 2θ grafiği	27
Şekil 4.4	Çoklu yapı-1 numunesinin AlGaN (0002) yöneliminin rocking (döndürme) taraması	28
Şekil 4.5	AlGaN'a ait $(\theta = 35,28^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi.	29

Şekil 4.6	AlN'a ait $(\theta = 36,16^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi	29
Şekil 4.7	AlGaN'a ait $(\theta = 74,40^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi	30
Şekil 4.8	Çoklu yapı-1 numunesinin 1050°C tavlama işleminden sonraki 2θ grafiği	31
Şekil 4.9	Çoklu yapı-1 numunesinin tavlamadan önce $4 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri. a) Yanal step büyüklüğü $\sim 100 \text{ nm}$, b) Step yükseklik farkı $\sim 0,22 \text{ nm}$ 'dir.	32
Şekil 4.10	Çoklu Yapı-1 numunesinin $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ (rms değeri $0,793 \text{ nm}$) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	32
Şekil 4.11	Çoklu yapı-1 numunesinin 200°C 'de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (rms değeri $0,137 \text{ nm}$) tarama alanlı AFM görüntüleri	33
Şekil 4.12	Çoklu yapı-1 numunesinin 200°C 'de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (rms değeri $0,137 \text{ nm}$) tarama alanlı AFM görüntüleri	33
Şekil 4.13	Çoklu yapı-1 numunesinin 900°C 'de tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (rms değeri $0,104 \text{ nm}$) tarama alanlı AFM görüntüleri	34
Şekil 4.14	Çoklu yapı-1 numunesinin 900°C 'de tavlandıktan sonra görüntülenen $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ (rms değeri $0,708 \text{ nm}$) tarama alanlı AFM görüntüleri	34

Şekil 4.15	Çoklu yapı-1 numunesinin 960°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,292 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	35
Şekil 4.16	Çoklu yapı-1 numunesinin 960°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 0,497 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	35
Şekil 4.17	Çoklu yapı-1 numunesinin 1000°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,326 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	36
Şekil 4.18	Çoklu yapı-1 numunesinin 1000°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 0,899 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	36
Şekil 4.19	Çoklu yapı-1 numunesinin 1050°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,256 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	37
Şekil 4.20	Çoklu yapı-1 numunesinin 1050°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 0,985 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	37
Şekil 4.21	Çoklu yapı-1 numunesinin 1150°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 1,949 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	38
Şekil 4.22	Çoklu yapı-1 numunesinin 1150°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 2,194 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	38

Şekil 4.23	Çoklu yapı-1 numunesinin 1200°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 µm ² (rms değeri 1,746 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	39
Şekil 4.24	Çoklu yapı-1 numunesinin 1200°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 µm ² (rms değeri 2,254 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri	39
Şekil 4.25	Çoklu Yapı-1 numunesi için yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre grafiği	40
Şekil 4.26	Çoklu yapı-1 numunesinin oda sıcaklığından 960°’ye kadar tavlama sonucu ölçülen PL spektrumları	41
Şekil 4.27	Çoklu Yapı-1 numunesinin ara yüzeylerinde gözlenen girişim saçakları(fringe)	42
Şekil 4.28	1000°’de tavlama sonucu ölçülen çoklu yapı-1 numunesinin 12K’den oda sıcaklığına kadar şiddet-dalga boyu grafiği	43
Şekil 4.29	1050°’de tavlama sonucu ölçülen çoklu yapı-1 numunesinin 14K’den oda sıcaklığına kadar şiddet-dalga boyu grafiği	44
Şekil 4.30	Çoklu yapı-1 numunesinin tavlama sıcaklıklarına göre girişim saçaklarının genlik değerleri değişimi grafiği	45
Şekil 4.31	Çoklu yapı-1 numunesinin tavlama sıcaklıklarına göre oda sıcaklığında şiddet-dalga boyu grafiği	45
Şekil 4.32	Çoklu yapı-2 numunesinin 2θ grafiği	47

Şekil 4.33	Çoklu yapı-2 numunesinin GaN (0002) yöneliminin rocking (döndürme) taraması	47
Şekil 4.34	GaN'a ait $(\theta = 34,72^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi	48
Şekil 4.35	AlN'a ait $(\theta = 36,27^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi	49
Şekil 4.36	GaN'a ait $(\theta = 72,98^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi	49
Şekil 4.37	Çoklu yapı-2 numunesinin 1100°C tavlama işleminden sonraki 2θ grafiği	50
Şekil 4.38	Çoklu yapı-2 numunesinin tavlamadan önce $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 5,518 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	51
Şekil 4.39	Çoklu yapı-2 numunesinin tavlamadan önce $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 5,796 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	52
Şekil 4.40	Çoklu yapı-2 numunesinin 400°C tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 2,157 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	52
Şekil 4.41	Çoklu yapı-2 numunesinin 400°C tavlandıktan sonra görüntülenen $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 3,383 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	53

Şekil 4.42	Çoklu yapı-2 numunesinin 800°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 1,716 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	53
Şekil 4.43	Çoklu yapı-2 numunesinin 800°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 3,982 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	54
Şekil 4.44	Çoklu yapı-2 numunesinin 900°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 1,525 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	54
Şekil 4.45	Çoklu yapı-2 numunesinin 900°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 3,254 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	55
Şekil 4.46	Çoklu yapı-2 numunesinin 960°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,226 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	55
Şekil 4.47	Çoklu yapı-2 numunesinin 960°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 4,357 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	56
Şekil 4.48	Çoklu yapı-2 numunesinin 1000°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 2,359 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	56
Şekil 4.49	Çoklu yapı-2 numunesinin 1000°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 4,573 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	57

Şekil 4.50	Çoklu yapı-2 numunesinin 1150°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 5,156 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	57
Şekil 4.51	Çoklu yapı-2 numunesinin 1150°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 7,104 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri	58
Şekil 4.52	Çoklu Yapı-2 numunesi için yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre grafiği	58
Şekil 4.53	Çoklu yapı-2 numunesinin tavlamadan önce oda sıcaklığında (300 K) ölçülen Pl grafiği	59
Şekil 4.54	Çoklu yapı-2 numunesinin tavlama sıcaklıklarına göre oda sıcaklığında şiddet-dalga boyu grafiği	60

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bana baştan sona kadar her aşamada yardımcı olan, bilimsel çalışmalarımnda geniş vakit ayıran ve yeni ufukları görmemi sağlayan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Orhan ZEYBEK'e teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması, sorumluluğunu Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'in yaptığı 2001K120590 no'lu DPT tarafından desteklenen “İleri Araştırma ve Eğitim Programları” proje kapsamında G.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde kurulan Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma (STARLAB) laboratuvarlarında gerçekleştirildi; bu itibarla DPT'ye minnettarım.

Bana sunduğu deneysel imkânlar ve iki üniversite arasındaki kalıcı bilimsel katkılarından dolayı saygıdeğer hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürü bir borç bilirim. Hızlı (Rapid) tavlama işlemini bana öğreten Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV'a, elipsometri ölçümlerinde bize zaman ayıran hocamız Dr. Barış AKOĞLU'na, fotolüminesans ölçümlerinde bana yardımcı olan ve yorumlarını esirgemeyen sevgili arkadaşım Aylin BENGİ'ye, bilgi ve yorumlarını benimle paylaşan S.Bora LİŞESİVDİN ve Demet USANMAZ'a, uzun ve zahmetli bir süreçten sonra AFM sonuçlarını almamıza yardımcı olan Süleyman ÇÖREKÇİ'ye çok teşekkür ediyorum.

Son olarak bu günlere gelmemde benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bana sabrın tükendiği noktada birbirimize duyduğumuz sevgiyle ayakta durmayı öğreten sevgili aileme teşekkür ediyorum. Bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum.

1. GİRİŞ

Günümüzde nano ölçeklerde yapılan birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar yeni kavramlar değildir. Kimyacılar yüzyıllardır nanobilim ile uğraşmaktadırlar. Ancak son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda keşfedilen yeni yöntemler ile bu çalışmalar uygulamalı teknolojiye odaklanmıştır. Uygulamaya dönük nanobilime nanoteknoloji denmektedir. Nanoteknoloji, nanometre ölçeğindeki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olayların anlaşılması, kontrolü ve üretimi amacıyla, fonksiyonel materyallerin, cihazların ve sistemlerin geliştirilmesidir. Nanoteknolojinin endüstriyel alanda kullanım alanları, mikrosensörlerin, mikromakinaların, optoelektronik elemanların imalatı ve uygun şekilde bir araya getirilmesidir. Günümüz teknolojisine sahip elektronik cihazlarda kullanılan aygıtlar diyotlar, transistörler ve mikro işlemcilerdir. Bu aygıtlarda yarıiletkenler kullanılır. Optoelektronik aygıtlar morötesinden kızılötesine kadar çok daha geniş bir aralıktadırlar.

III-V Nitrür yarıiletkenler günümüzde birçok uygulama alanlarına sahiptir. III-Nitrür yarıiletkenler arasındaki mevcut olan her enerji bant aralığı (1,9–6,2 eV) üçlü alaşımların geniş bir serisini oluşturur [1,2]. Bu özellik yardımıyla ışık yayan diyotlar (Light Emitting diyote – LED), lazer diyotlar ve ultraviyole (gözle görünen ışınlar - UV) fotodedektörler gibi optoelektronik cihazlar yapılmaktadır.

Işık yayan flamansız yarıiletken (diyot) lambalara LED denir. LED'ler yarıiletken malzemeler olup ana maddeleri silikondur. Üzerinden akım geçtiğinde foton açığa çıkararak ışık verirler. 2-20 mA gibi çok az bir akımla çalıştılarından ve sarsıntılara dayanıklı olduklarından her türlü elektronik devrede karşımıza çıkarlar. Işık, bir yarı iletkende, p tipi madde içine enjekte edilen bir elektronun oyukla birleşmesi ya da n tipi madde içine enjekte edilen bir oyuğun elektronla birleşmesi sonucunda oluşur. Bu olaydaki temel esas, elektronların enerji kaybının ışımaya olarak ortaya çıkmasıdır. LEDlerin yaydığı ışınların renkleri kırmızı, sarı, yeşil, turuncu,

mavi, pembe vb. şeklindedir. Bunlardan kırmızı LED en yüksek verimli olan tiptir. Ayrıca LED'ler normal koşullarda yaklaşık 100.000 saat boyunca ışık verebilirler. LED diyodların yapısında kullanılan galyum arsenik (GaAs), galyum arsenik fosfat (GaAsP), galyum fosfat (GaP), çinko, azot vb. gibi maddelere göre ortaya çıkan ışığın rengi de farklı olmaktadır. Yani yarı iletken içine konan elementler LED'in yaydığı ışığın rengini belirlemektedir. Yeşil renk veren LED'lerin içinde nitrojen bulunmaktadır. Nitrojen miktarı artırıldıkça ışık sarı olmaktadır. Kırmızı renk elde etmek için ise çinko ve oksijen kullanılmaktadır. Potansiyel olarak LED'lerin gelecekteki gelişimleri daha geniş enerji tutabilen lamba uygulamalarına doğru genişleyecektir ve bu LED'ler parlak ampullerden daha etkilidir [3].

III-Nitrür sistemler (InN, GaN ve AlN) geniş bant aralıklı yarıiletkenler olarak bilinir. Bu gruptaki yarıiletkenler 1,9–6,2 eV aralığında direkt bant aralığına sahip olduğundan önemli materyal sistemlerdir [3]. Nitrürlerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine kayda değer çalışmalar (yüzey akustik dalga aygıtları, mavi lazerler ve ışık yayan diyotlar (LED) üretmek için) AT&T Bell laboratuvarları, IBM Thomas J. Watson araştırma merkezi ve RCA gibi merkezlerde uygun araştırma teknikleri kullanılarak 30 yıl öncesinde yapıldı. Ancak bu çalışmaların çoğu çeşitli temel teknolojik problemlerin çözümlerinin yetersiz olması nedeniyle başarılı olamadı. Uygun büyütme şartlarının olmaması nedeniyle filmler kötü bir yüzey morfolojisine sahipti [4].

1980 ortalarına kadar üstesinden gelinemeyen problemlerin büyük bir kısmı Nagoya ve Meijo Üniversitelerindeki Isamu Akasaki ve Nichia Chemical Company'daki Shuji Nakamura tarafından yönetilen grubun çalışmalarıyla başarıldı. Düşük sıcaklıklı AlN ve sonraları yüksek kaliteli GaN filmlerin safir altaş üzerine büyütülmesi ve bu ince yapıların kullanılması metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) sistemi ile gerçekleşti [5,6]. Eş zamanlı olarak elektrik ve optik özelliklere ait kayda değer gelişmeler ortaya kondu. Diğer bir muazzam buluş düşük elektron enerjili demet ışınlaması (LEEBI) kullanılarak ilk defa bir p tipi GaN üretilmesidir [7]. Sonuç olarak ilk p-n eklem temelli GaN aygıt geliştirildi.

III-Nitrür yarıiletkenler optoelektronik cihaz uygulamaları (yayıcı, dedektör) ve yüksek güç/sıcaklık şartları altında çalışan elektronik cihazlar için ümit vericidir [8]. Geniş bant aralıklı yarıiletkenlerin kullanımı cihaz uygulamalarının yıpranma etkilerini azaltması açısından önemlidir. Ayrıca bu yarıiletkenler kimyasal ve termal olarak daha kararlıdır ve zor uygulama şartları (yüksek güç ve yüksek sıcaklık) için bir avantajdır. Geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler; elmas, SiC, III-Nitrürler ve II-IV grup materyalleridir. III-Nitrürler diğer geniş bant aralıklı yarıiletkenlere göre bazı önemli avantajlara sahiptir:

- Direkt bant aralığına sahip olmalarından dolayı yüksek soğurma sabitleri ve daha keskin kesilim dalga boyuna sahiptir,
- Üçlü alaşımların mol kesrinin değiştirilmesi ile dalga boyu kesilmesi ayarlanabilir,
- Geniş bant aralığı mühendisliği ile çoklu eklem cihazların kapasitesi artırılır,

Bütün bu avantajları ile III-Nitrür yapılar mavi ve ultraviyole (UV) spektrum bölgelerinde optoelektronik cihazların fabrikasyonu için en uygun materyallerdir [9,10].

Günümüzde moleküler demet epitaksi (MBE), metal organik buhar fazı epitaksi (MOVPE) ve metal organik kimyasal buhar birikim (MOCVD) gibi modern kristal büyütme teknikleri ile yüksek kalitede III-Nitrür epitaksiyel tabakalar büyütebilmek mümkündür [9]. AlGa_N, InGa_N ve InAl_N üçlü bileşiklerinin gelecekte Nitrür tabanlı optik araçların temelini oluşturması umulmaktadır. Fakat bileşiklerin optoelektronik cihazlar için gerekli fiziksel özellikleri yeterince araştırılmamıştır. UV fotodedektörler ve LED'ler gibi optoelektronik uygulamalar için, AlGa_N'ın bant aralığının bileşim yüzdelerine bağlı değişim bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. İstenilen kalınlıkta çoklu epitaksiyel katmanları büyütebilmek için AlGa_N/InAl_N çoklu yapı sistemlerinin örgü yapılarından faydalanmamız gerekebilir. AlGa_N bileşik sistemlerinin tüm serisi, düşük In mol kesirli InGa_N ve InAl_N kadar iyi olmasına karşın temel fiziksel özelliklerinin belirlenmesi de bir o kadar önemlidir [9].

Yarıiletkenler elektronik teknolojisinin temelidir. Bu tezde yarıiletkenler ve tavlama yöntemiyle meydana gelen değişiklikler hakkında bilgi vermeye çalıştım. Nitrat bazlı malzeme üretim ve karakterizasyonu araştırma alanına katkı sağlayacağı düşünölen bu tez çalışmasında, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde MOCVD tekniğiyle safir alttaş üzerine büyütölen iki farklı süperörgü $Al_{0,43}Ga_{0,57}N/Al_2O_3$ yarıiletken ince filmlerin ısıt işlemlerinde yapısal ve optik özellikleri Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Faköltesi Fizik Bölümü'ne bağlı STARLAB Laboratuvar'ında bulunan yüksek çözünürlöklü X-ışınları difraksiyon cihazı (HR-XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotölüminesans (PL) sistemleri kullanılarak incelendi.

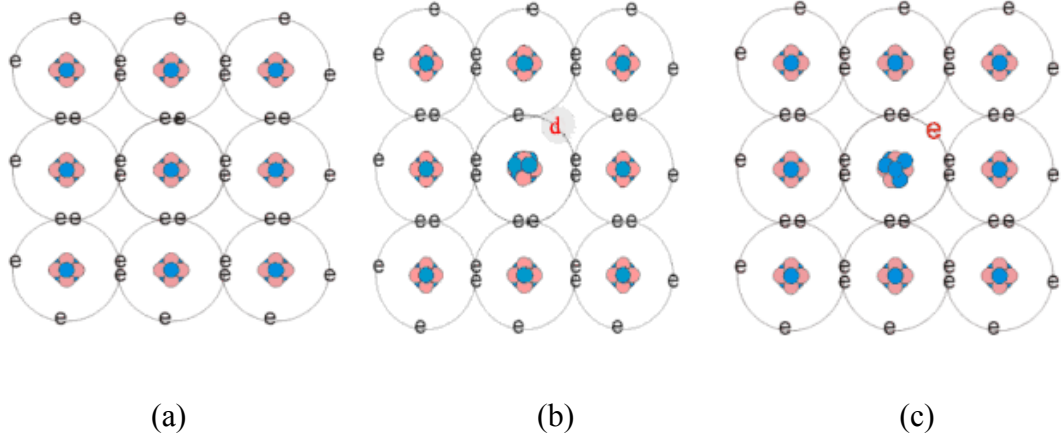
Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde kristal yapı ve materyal özellikleri ana başlığı altında düşük boyutlu yarıiletkenler, kuantum kuyuları, süperörgüler, hakkında genel bir bilgi verildi. Ayrıca AlGaN, GaN ve AlN yapılarının temel özellikleri açıklandı ve yapısal parametreleri ile bazı cihaz uygulamaları sunuldu. Ek olarak büyütme ve materyal kalitesi incelendi. Üçüncü bölümünde deneysel sistemler ve kullanılan yöntemler açıklandı. Dördüncü bölümde MOCVD tekniği ile büyütölen, çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 olarak adlandırılan iki adet $Al_{0,43}Ga_{0,57}N$ yapının materyal büyütme süreçleri incelenip karakterizasyon deneylerinin ölçüm ve analiz sonuçları literatürle karşılaştırmalı olarak sunuldu. Beşinci bölümde ise yapılan bu çalışmalarla ilgili bir değerlendirme yapıldı.

2. KRİSTAL YAPI VE MATERYAL ÖZELLİKLERİ

2.1 Katkılama

Kristal saf yarıiletken, safsızlık veya örgü kusuru içermeyen yapılara denir. Buna bağlı olarak, bir malzemede mutlak sıfır sıcaklığında yük taşıyıcıları yoktur, fakat sıcaklık yükseldikçe elektron-deşik çiftleri oluşur. Taşıyıcılar çift olarak üretildiklerinden iletkenlik bandındaki elektronların n yoğunluğu, değerlik bandındaki deşiklerin p yoğunluğuna eşit ($n = p = n_i$) olur. Burada n_i saf taşıyıcı yoğunluğudur. n_i 'nin değeri sıcaklıkla üstel olarak değişmesine rağmen oda sıcaklığında bile genelde çok büyük değerlere sahip değildir.

Oda sıcaklığında bulunan bir saf yarıiletken, iletim elektronlarının çok az oluşu nedeniyle nispeten hayli yüksek bir dirence sahiptir. Oda sıcaklığında bulunan bir yarıiletkenin iletkenliği, bu yarıiletkenin kristal kafesine çok küçük bir miktarda yabancı madde katkısı ile yükseltilebilir. Bu işleme katkılama denir. Katkılama yapılmış bir yarıiletkene dışardan gerilim uygulandığında serbest kalacak elektronların sayısı normal duruma göre çok artar. Eğer bu katkı, serbest kalan elektronların sayısını arttırıyorsa n-tipi katkı; yok eğer serbest elektronların sayısı azaltıp, deşiklerin (holes) sayısını arttırıyorsa p-tipi katkı denir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi kristal ya n-tipi (çoğunluk taşıyıcılarının negatif elektronlar ve azınlık taşıyıcılarının deşikler olduğu) veya p-tipi (çoğunluk taşıyıcıları pozitif deşikler azınlık taşıyıcıların negatif elektronların olduğu) yapılabilir. Böylece, katkılanmış yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunlukları eşit olmayacak ve malzeme saf olmayan olarak adlandırılacaktır [11].



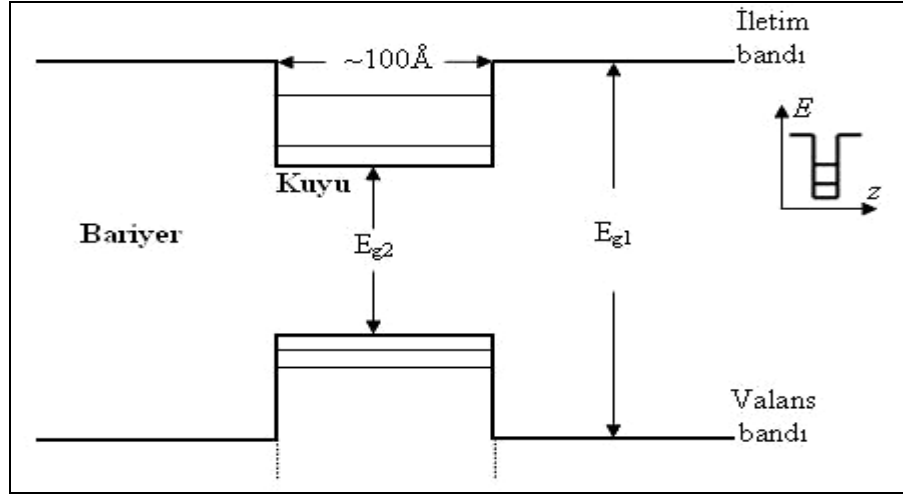
Şekil 2.1 Bir yarıiletkendeki katkıma: (a) saf yarıiletken; burada elektron ve deşik miktarı biri birine eşittir. (b) p-tipi yarıiletken; burada deşik sayısı elektron sayısından fazladır. (c) n-tipi bir yarıiletken; burada elektron sayısı deşik sayısından fazladır.

2.2 Düşük Boyutlu Yarıiletkenler

Moleküler Demet Epitaksi (MDE) ve Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi (MOCVD) gibi epitaksiyel büyütme tekniklerinden yararlanarak, farklı bant aralığına sahip olan yarıiletkenlerin atomik tabakalar halinde birbirini ardına büyütülmesi ile elde edilen yapılar, düşük boyutlu ya da iki boyutlu olarak adlandırılmaktadır. Bu yapılar, yarıiletkenlerde elektron ve deşiklerin büyütme doğrultusunda kuantize olduğu ve diğer iki boyutta serbest olarak hareket edebildiği yapılardır [12].

Farklı tipteki yarıiletken yapıları birbirinin üzerine büyüterek heteroeklemler yapılar veya kuantum kuyulu yapılar üretilebilir. Düşük boyutlu yarıiletken yapılar, büyütülen tabaka sayısına, kalınlığına ve büyütülen yapıların özelliklerine göre, tekli/çoklu kuantum kuyuları ya da süperörgüler olarak adlandırılırlar. Tekli kuantum kuyusu yapılarının ard arda büyütülmesi ile çoklu kuantum kuyusu yapıları elde edilmektedir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi çoklu kuantum kuyusu yapılarında, potansiyel bariyerinin genişliği, kuyu genişliğinden büyüktür. Süperörgülerde ise, bariyer genişliği kuantum kuyularına göre daha dar olduğundan, yüklü parçacıklar

bir kuyudan diğer kuyuya tünellenebilmektedir, yani kuantum kuyusu içerisindeki elektron ve deşiklerin dalga fonksiyonlarının kuyukları ince bariyerleri rahatlıkla aşabilmekte ve komşu kuyulara ulaşabilmektedir [13].



Şekil 2.2 Çoklu bir yapıda oluşan kuyu sistemi [14]

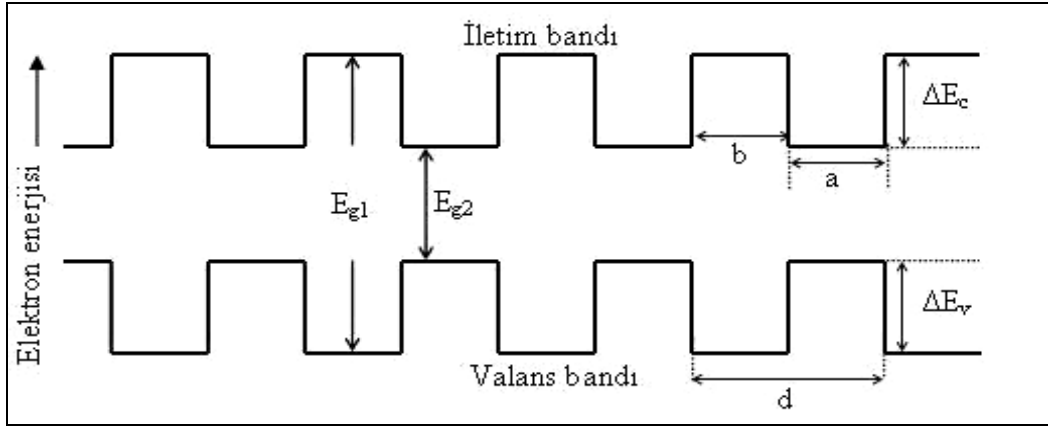
Bariyer ve kuyu materyallerin bileşen bağımlılığının tam bir bilgisi genellikle kuantum kuyuları ya da süperörgü çoklu yapıları analiz etmeyi gerektirir. Nitrür sistemlerde opsiyonların fazlalığı böyle sistemleri yapılandırmak için kullanışlıdır. Bu yapılarda bariyerler AlGaN ya da GaN ile biçimlendirilebilir. Bariyer bu materyallere bağlı iken kuyular GaN ya da InGaN tabakaları ile yapılandırılır [3].

Bir kuantum kuyu yapısı, dar bant aralıklı ultra ince tabakanın, geniş bant aralıklı tabakalar arasına sandviçlenerek yapılandırıldığı çoklu yapılardır. Geniş bant aralıklı yapılar genellikle aynı yapıda yarıiletkenlerle biçimlenir. Böyle bir yapının iletim ve valans bandı içerisinde bir boyutta kuantum kuyusu oluşur.

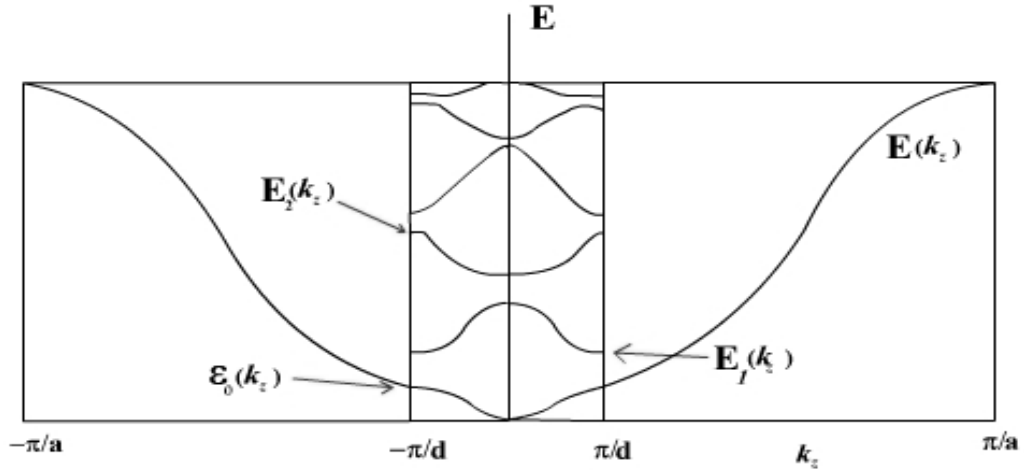
Bir süperörgü kuantum kuyuları serisine sahiptir. Şekil 2.3'da gösterildiği gibi, kuyular arası taşıyıcıların tünelleme yapabilmesi için süperörgülerde kuantum kuyuları birbirine çok yakın yerleştirilmiştir. Bu durum sıkı-bağlanma (tight-binding) veya Kronig-Penney bant modellerine benzerdir; buradaki alt bantlar küçük

boşluklu küçük bantlar arasında genişleyerek şekillenecektir. Şekil 2.4'de gösterildiği gibi süperörgülerin periyodikliği Brillouin-bölge sınırları ve bundan dolayı oluşan enerji boşlukları vardır.

Süperörgülerin rezonans tünelleme yapılarında ve uzak-kızılötesi detektörlerinde çok geniş uygulama alanları vardır [15].



Şekil 2.3 Bir süperörgüdeki bant yapısının grafiği [14]

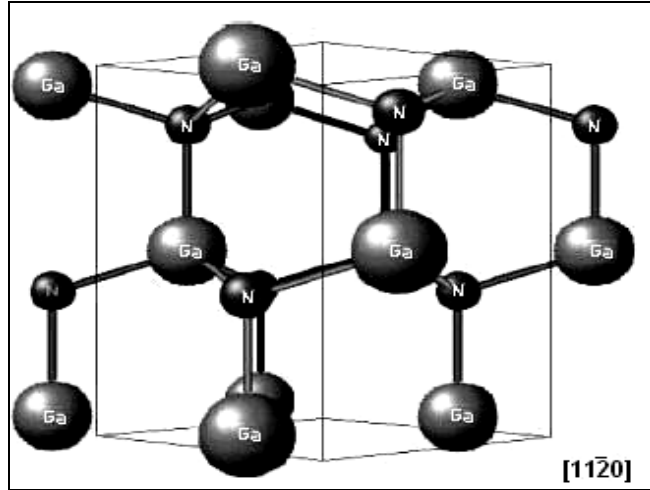


Şekil 2.4 Süperörgülerdeki miniband ve mini boşluklar. Burada π/a kristalin temelinin oluşturduğu Brillouin- Bölge sınırlarını gösteriyor [14].

2.3 Kristal yapı

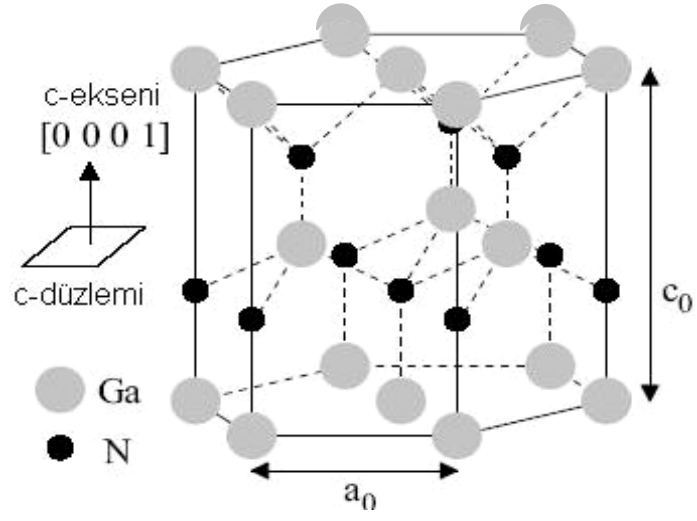
III-Nitrür yapılar tarafından paylaşılan üç farklı kristal yapısı vardır. Bunlar; wurtzite (GaN), Zincblende (ZnS) ve kaya tuzu (NaCl) yapılarıdır. Normal şartlar altında, bulk AlN, GaN ve InN için termodinamik olarak kararlı yapı wurtzite yapısıdır. Si, MgO ve GaAs gibi (011) kristal düzlemlili kübik alttaşların üzerine büyütülen GaN ve InN ince filmleri için zincblende yapı kararlı olmaktadır. Zincblende ve wurtzite yapılar benzerdirler. Her iki yapı da, 4 tane grup-III atomu ile 4 tane nitrojen atomlarından oluşur. Kaya tuzu ya da NaCl yapı ise AlN, GaN ve InN için çok yüksek basınç altında gerçekleşebilir [3].

Şekil 2.5’de wurtzite kristal yapının birim hücresi verilmiştir. Wurtzite yapı hekzagonal birim hücreye sahiptir, c ve a olmak üzere iki örgü sabiti vardır ve her biri 6 atom içerir. Bu yapının uzay grubu P6₃mc (C4_{6v})’dir. Atomların biri ile diğer tipi, hücre yüksekliği (5c/8) olacak şekilde c eksenine boyunca dengelenir. Wurtzite yapı için (0001) düzleminin istif düzeni <0001> yönünde ABABAB’dır [3].



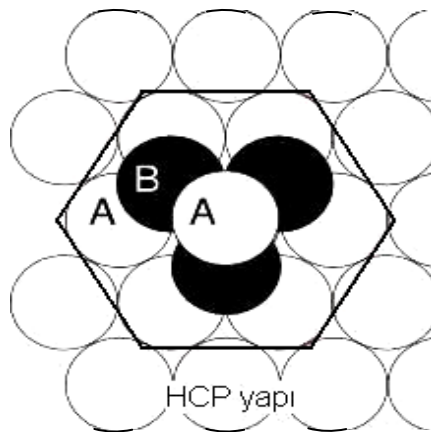
Şekil 2.5 Wurtzite yapıda birim hücre [14]

Wurtzite yapı, iç içe geçmiş iki hekzagonal sıkı paket yapıdan (HCP) oluşmaktadır [3]. Böyle bir yapı wurtzite GaN için Şekil 2.6’da verilmiştir.



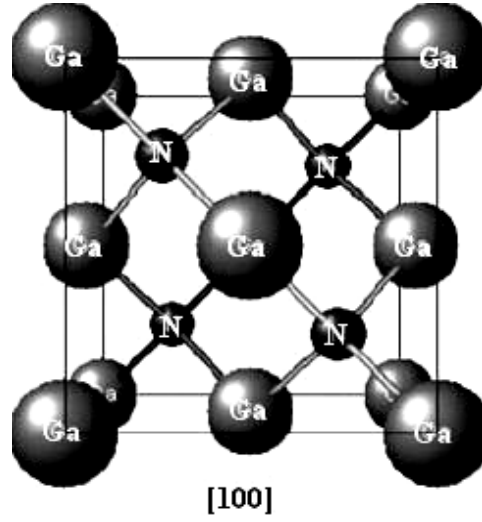
Şekil 2.6 GaN wurtzite HCP kristal yapı [14]

HCP yapı basit hekzagonal yapıya benzemekle birlikte kristal geometrisinde oluşan kürelerin uzayda mümkün olan en büyük yoğunlukla paket edilmesi ve aynı zamanda periyodik bir düzen oluşturarak yapılanmasıyla farklılık gösterir [16]. Şekil 2.7’de HCP wurtzite yapının istif düzeni gösterilmiştir.



Şekil 2.7 HCP yapının istif düzeni [14]

Zinblende yapı kübik birim hücreye sahiptir ve dört tane grup-III, dört tane de nitrojen atomları içerir (Şekil 2.8). Birim hücre içindeki atomların durumu elmas kristal yapıya benzer [3]. Yalnız Ga atomları küpün köşe ve yüz merkezlerinde, N atomları ise cisim köşegeninde yer almaktadır [16]. Zinblende yapı için (111) düzleminin istif düzeni $\langle 111 \rangle$ yönünde ABCABC'dir [3].



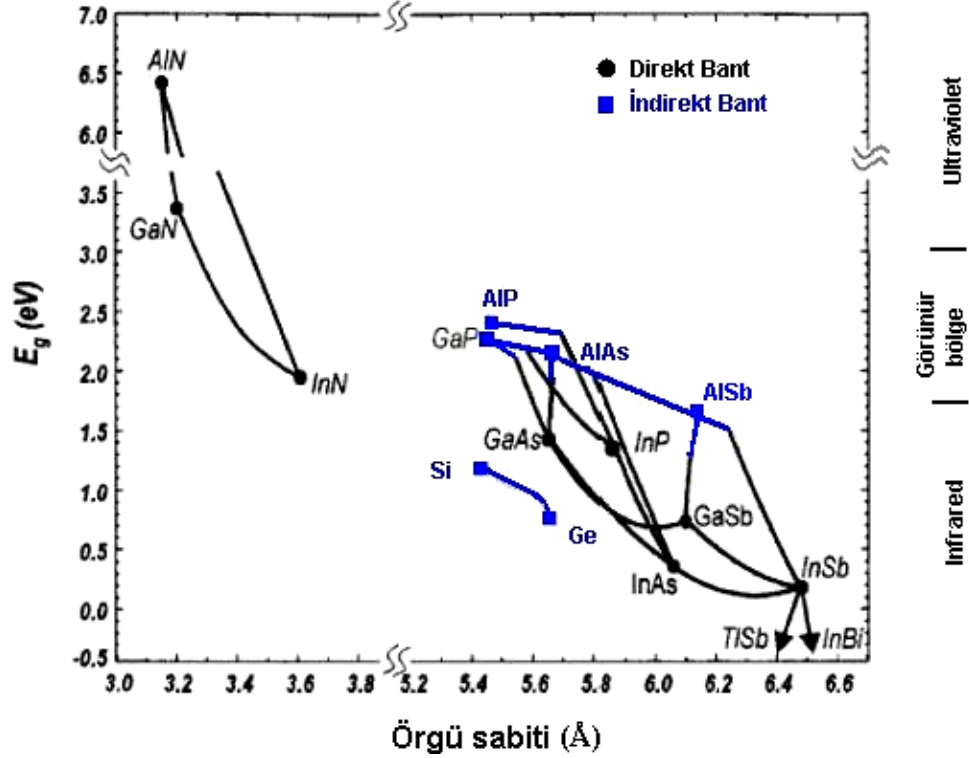
Şekil 2.8 Zinblende yapıda birim hücre

Zinblende ve wurtzite yapılar benzerdirler. Her iki yapıda da, her bir grup-III atomu, dört nitrojen atomuyla koordine edilir. Aynı şekilde, her bir nitrojen atomu, dört tane grup-III atomları tarafından çevrelenebilir. Bu iki yapı arasındaki fark, sıkı paketlenmiş iki atomlu düzlemlerinin ardı ardına istiflenmesidir [3].

2.4 AlGaN Alaşımının Özellikleri

Geniş bant aralıklı AlGaN materyali spektrumun UV kısmında optoelektronik uygulamalar için önemlidir. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ bant aralığı enerjisi 3,4 eV'dan ($x=0$, GaN) 6,2 eV'a ($x=1$, AlN) değişir. Bu enerji değişimi 200–365 nm dalga uzunlukları

arasında UV bölgesi ile uyumludur. Şekil 2.9 yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitlerini ve enerji bant aralıklarını gösterir.



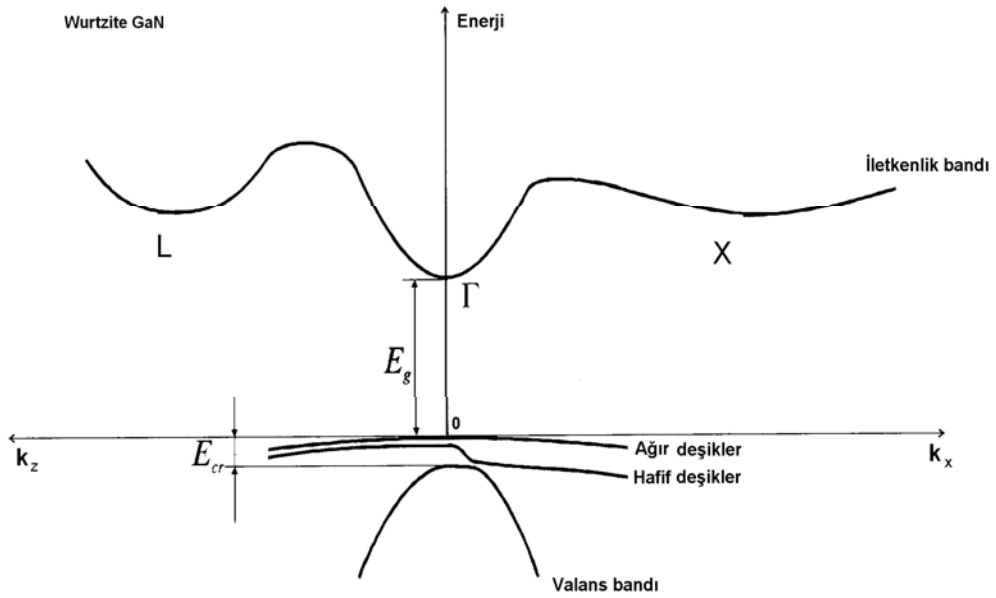
Şekil 2.9 Yaygın III-V yarıiletkenler ve bazı ilgili alaşımlarının örgü sabitleri ve enerji bant aralıkları [17]

III-Nitrür materyallerin bant yapısının bilinmesi önemlidir. Opsiyonların fazlalığı böyle sistemleri yapılandırmak için birçok fırsat sunar. Bu çoklu yapılarda kuyular GaN ya da InGaN, bariyerler ise AlGaN ya da GaN ile yapılandırılabilir. $Al_xGa_{1-x}N$ materyali $AlN(x)$ ve $GaN(1-x)$ 'ün kompozisyonu gibi düşünülebilir. Bu iki materyalin oluşturduğu bileşiğin yapısı ise kullanılan materyallerin yüzdeleri ile belirlenir. $Al_xGa_{1-x}N$ enerji bant aralığı Eş. 2.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$E_g(x)(AlGaN) = xE_g(AlN) + (1-x)E_g(GaN) - bx(1-x) \quad (2.1)$$

Burada $E_g(GaN) = 3,4eV$, $E_g(AlN) = 6,2eV$ ve x , AlN'ün molar kesridir. b ise tartışılabilir değerlere sahip eğilme (bowing) parametresidir.

Bant yapısı kristal simetrisinin temel bir fonksiyonudur. Örnek olarak Şekil 2.10'de wurtzite GaN'ün enerji bant grafiği verilmiştir. Burada Γ , X ve L Brillouin bölgelerindeki önemli simetri noktalarıdır. Bant yapılarının en belirleyici özelliği valans ve iletkenlik bantlarının konumudur. Brillouin bölgesinde, valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu aynı noktada ise (Γ) yarıiletken direkt bant aralıklı, aksi durumda ise indirekt bant aralıklı yarıiletken olarak adlandırılır. Bu nedenle Brillouin bölgesinin merkezindeki Γ noktası, direkt bant aralıklı yarıiletkenler için en önemli noktadır. Düşük alan iletimi hesaplamalarında genellikle valans bandı maksimumu ile iletkenlik bandı minimumunun göz önüne alınması yeterli olmaktadır. Bu noktalar, yarıiletkenin gözlenebilir özelliklerinin belirlenmesinde etkin bir rol üstlenmektedir. Bunun yanı sıra X ve L noktaları düşük alan iletim hesaplamalarında önemsiz bir rol üstlenmelerine rağmen yüksek basınç ve yüksek sıcaklığa bağımlı yüksek alan elektron iletim hesaplarında önemli rol oynamaktadırlar.



Şekil 2.10 Wurtzite GaN'ün enerji bant diyagramı [14]

2.5 Büyütme ve materyal kalitesi

AlGaN materyal sisteminin önemli yetersizliklerden birisi uygun alttaş materyale duyulan ihtiyaçtır. Bu konu üzerinde yapılan birçok araştırma yüksek kaliteli bulk GaN ya da AlN alttaşların üretilmesinin başarılmasına rağmen asıl III-Nitrür alttaşlar henüz başarısızdır. Hakiki bulk GaN / AlN kristallerin büyütülmesi sırasında oldukça yüksek nitrojen basıncından dolayı üretilmesi çok zordur [18,19]. AlGaN kristaller ideal alttaşa olan ihtiyaçtan dolayı, yapısal yetersizliği ve termal olarak uyuşmamasına rağmen (0001) safir alttaşları üzerine büyütülmektedir. Safirin seçiminde düşük maliyeti, yüksek kalitedeki geniş kullanışlılığı, görünür ve UV spektrum bölgelerinde optiksel saydamlığı ve sıcaklıklardaki kararlılığı etkilidir. AlGaN filmler MOCVD tekniği ile yaygın olarak büyütülür. Düzgün filmler başarmak, Nitrür yarıiletken filmler ile safir alttaşlar arasındaki büyük örgü uyumsuzluğunu azaltmak için büyütme süreci ince, düşük sıcaklıkta GaN ya da AlN amorf tampon tabaka ile başlatılır [20]. İnce tampon tabaka başlangıç çekirdeklenmesini (nucleation) geliştirir ve iki boyutlu büyümeyi artırır. Ayrıca büyütme sıcaklıkları çok yüksektir (900–1100 °C). AlGaN ve safir arasındaki örgü uyumsuzluğunun bir sonucu olarak AlGaN filmler çok büyük kusur yoğunluğu sergiler (tipik olarak 10^8 – 10^9 cm⁻²). Optoelektronik cihazların performansının önemli ölçüde azalması bu gibi yüksek kusurlu tabakalara dayanır. Birçok teknik, safir alttaş üzerine büyütülen GaN'ün kusur yoğunluğunu azaltmak için geliştirilmiştir. Son zamanlarda, yanal epitaksiyel üst üste büyütme (Lateral Epitaxial Overgrowth) tekniği GaN'de kusur yoğunluğunun önemli ölçüde azaldığını başarıyla gösterdi [21–22]. Pseudo-bulk-GaN ve SiC içeren alternatif alttaşlar, III-Nitrür film büyütmesi için kullanılır ve safir alttaş (n-tipi iletkenlik, daha iyi termal iletkenlik) üzerine birçok önemli faydalar sağlar [23,24]. Ancak alternatif alttaşın yüksek maliyetinden dolayı safir alttaş olarak hala yaygın olarak kullanılır. Birçok araştırma grubu AlGaN materyal büyütme teknolojisine katkı sağlamaktadır. Örneğin GaN filminin ilk başarılı MOCVD büyütmesi 1986'da Amora ve arkadaşları tarafından gösterildi [25]. Nitrür temelli cihazlar için büyük bir buluş III-Nitrür mavi LED'ler ve lazer diyotların çalışmasını ilk olarak gösteren Nakamura ve arkadaşları tarafından başarıldı [26,27]. Son on yılda birçok katkı, düşük dislokasyon yoğunluklu AlGaN tabakaları büyütme için yapıldı [28].

2.6 AlGaN Alaşımının Bazı Uygulama Alanları

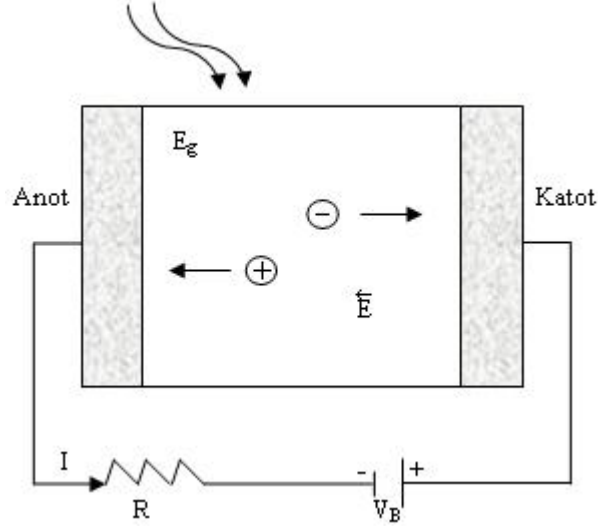
2.6.1 Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (HEMT) Yapı

Nitrür temelli yarıiletken materyaller fiziksel özellikleri nedeni ile elektronik cihaz uygulamaları açısından yoğun ilgi görmüştür [29]. Örneğin AlGaIn/GaN çoklu yapılar geniş bant aralıkları, yüksek pik ve doyum elektron hızları ve yüksek iki boyutlu elektron gazı yoğunlukları gibi üstün materyal özelliklerinden dolayı yüksek güç ve yüksek frekans elektronik cihazların gerçekleştirilmesi için bir materyal olarak çok dikkat çekmiştir [30]. Bu uygulamalardan AlGaIn/GaN-HEMT, yüksek güç ve yüksek sıcaklık şartları altında çalışan elektronik cihazların gerçekleştirilmesi için beklenen avantajlarından dolayı ümit verici bir araştırmadır [31]. Bu durumda standart büyütme prosedürü herhangi bir cihaz yapmadan önce GaN tampon tabaka büyütülmesidir. GaN ve safir arasındaki aşırı büyük örgü uyumsuzluğunu engellemek için yüksek sıcaklıklı GaN tampon tabaka büyütülmeden önce başlangıçta ince ve düşük sıcaklıklı GaN veya AlN çekirdek (nucleation) tabaka büyütülmelidir. Ancak, AlN çekirdek tabaka kullanıldığında bu alttaşlar üzerinde (Al_2O_3 ve SiC) GaN epi-tabakaların kristal kalitesi çok daha gelişmiştir. Çünkü AlN tabaka çekirdek merkezleri sağlar ve GaN filmlerin yanal büyümesini geliştirir. AlN çekirdek tabakalar yaygın olarak kullanılmasına rağmen AlN tabaka ve GaN veya AlGaIn / GaN tabakalar arasındaki ilişki açısından hala pek çok sorun vardır [29]. Örneğin, HEMT temelli cihazların karakterizasyonu için önemli bir parametre olan elektron mobilitesi, yüzey / ara yüzey kusurları ve pürüzlülük ile ilişkilidir [30].

2.6.2 Fotodiyot Yapı

Fotodiyot, aydınlatıldığında akım geçiren bir yarıiletken diyot türüdür. İki elektriksel temas (anot ve katot) sahip yarıiletkenden oluşur. Temel fotodiyot şematiği Şekil 2.11'de gösterildi. Fotonun enerjisi yarıiletkenin bant aralığı enerjisinden yüksek ($h\nu > E_g$) ise foton soğurur. Başarılı soğurma süreci serbest elektron-deşik çiftinin üretimi ile sonuçlanır. Eğer anottan daha düşük potansiyele sahip olmasını sağlayan ters besleme voltajı uygulanırsa, yarıiletken boyunca elektriksel alan meydana gelir. Elektriksel alan altında anot ve katot çevresinde foto taşıyıcılar toplanır. Pozitif yük anot ¹⁵ negatif yükler katotta toplanır. Bu iletim

süreci dış devre içinde elektrik akımına neden olur. Bu akıma da fotoakımı denir. Burada fotoakım; yarıiletken içerisinde fotonun soğurulması ve taşıyıcı üretimi ile bölgesel elektrik alan altında taşıyıcıların anot ve katoda toplanmasını sağlar.



Şekil 2.11 Fotodiyotun şematik gösterimi [14]

Fotodiyotların en önemli avantajları yüksek hızlarıdır. Çoğunun tepki süresi 200 ns'nin altındadır. Bu yüksek hız, fotodiyotların yüksek hızlı devrelerle birlikte kullanılabilmelerini sağlar. Yüksek hızlı teyp okuyucularında ve opto-izolatörlerde sıkça kullanılırlar. Fotodiyotlar, kontak tipine ve diyot yapısına bağlı olarak Schottky (bariyer) fotodiyot, metal-yarıiletken-metal fotodiyot, p-i-n fotodiyot, çığ fotodiyotu vb. sınıflandırılırlar [32].

3. DENEYSEL SİSTEMLER VE YÖNTEMLER

3.1 Hızlı Termik Tavlama İşlemi

LC-3-SY061 model numarasına sahip hızlı termik tavlama sistemi, azot gazı atmosferinde ultra yüksek vakum (UHV) basınç altında 3 inç'lik plakaların ısı davranışı için kullanılmıştır. Hızlı termik tavlama işleminde kullanılan deneysel düzenek Şekil 3.1'de gösterilmiştir. UHV bölmesi paslanmaz çelikten yapılmıştır.



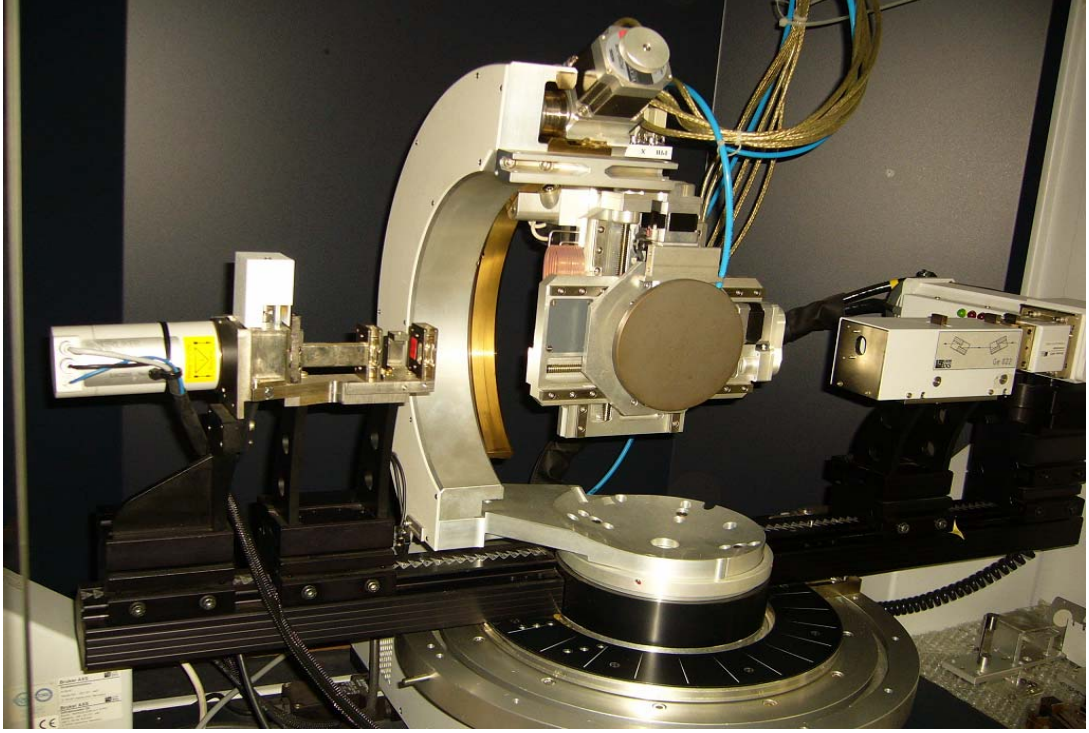
Şekil 3.1 Hızlı ısı tavlama sistemi

Plakaları yerleştirme yerine, ısı ünitesine, pompa sistemine ve kolay açılıp kapanan, vakumlu ortamı koruyan kapıya sahiptir. Isı ünitesi altı yüksek güç IR kuvars lambalardan oluşur. Plakaların bulunduğu bölge transfer seviyesindeki Kademeli plaka, sıcaklık ünitesinin hemen altında, transfer seviyesinde şarj olmuş plaka hareketine izin veren bir ünedir. Pompa ünitesi ön pompa olan membrane pompa ile turbo moleküler pompa ile yapılandırılır. Hızlı şarj kapısı sistemin hızlı bir şekilde açılıp kapanmasına izin verir. Sıcaklık ünitesi, IR kuvarts lambaları koruyan su soğutma sisteminden oluşur. Güç ihtiyacı sıcaklık davranışı sırasında doğru sıcaklık düzeylerine izin veren tam PID denetleyiciden oluşur.

3.2 Yüksek Çözünürlüklü X-Işınları Difraksiyonu (HR-XRD)

X-ışınları elektromagnetik dalgalarıdır. Görünür ışıktan farklı olarak, bu ışınlar görünür değildir; düz bir doğrultu boyunca ilerlerler ve fotoğraf filmine etki ederler. Ayrıca normal ışıktan daha çok giricilik özelliğine sahiptirler. X-ışınları yüksek hızlı elektronların bir metal hedefe çarptırılmasıyla oluşur. Bu nedenle, x-ışınlarının üretildiği herhangi bir x-ışını tüpü **a)** elektron kaynağı **b)** yüksek bir hızlandırma voltajı ve **c)** bir metal hedef içermelidir. Ayrıca elektronların kinetik enerjilerinin büyük kısmı hedefte ısıya dönüştüğünden, hedefin aşırı ısınma sonucunda erimesini önlemek için, su soğutma sistemi bulunmalıdır.

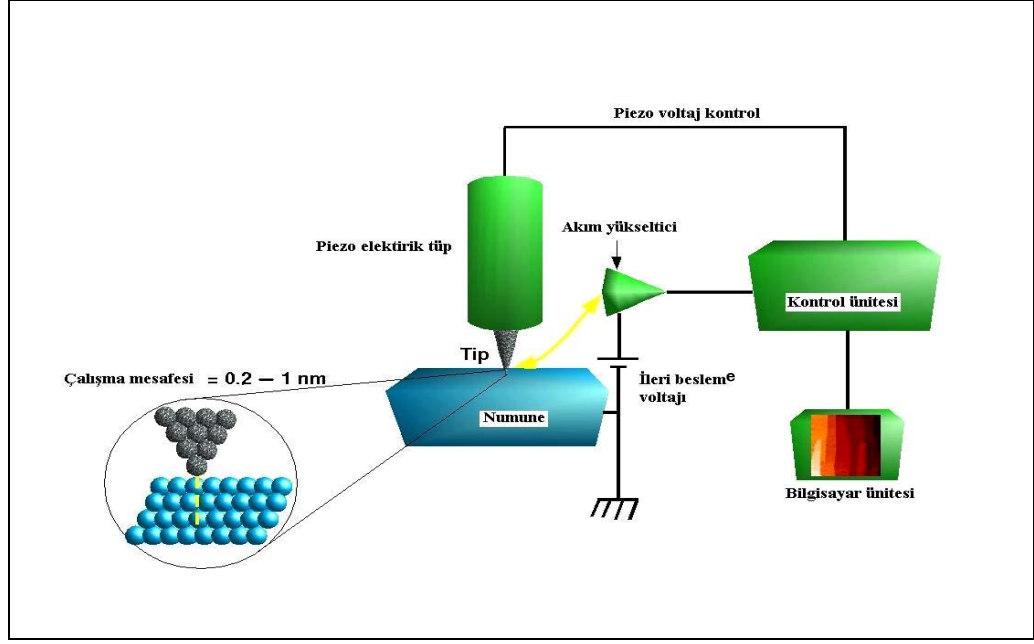
Yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HR-XRD) alttaş üzerine büyütülen ince filmlerin karakterizasyonu için kullanılan bir tekniktir. X-ışınları, epitaksiyel tabakaları delip geçer ve böylece hem filmin hem de alttaşın özelliklerini belirlemek için bilgi verebilir. Şekil 3.2’de gösterilen X-ışınları diffraktometresinin dizaynı; difraktometre; goniometre, tüp, tüp duruşu, ölçümler için gerekli slit sistem, numune taşıyıcı ve dedektörden oluşur. Bu birim dikey ve yatay olarak radyasyon koruması yerleşmesinde veya ayırma masasında yüklenir. HR-XRD deneyinde yüksek çözünürlükte ölçüm için Ge (022) yönelimli dört kristal monochromator, X-ışını kaynağı olarak KFLCu₂K kullanıldı.



Şekil 3.2 HR-XRD Sistemi

3.3 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Taramalı Tünelleme Mikroskobu (Scanning Tunelling Microscopy-STM)'nun başarıları yeni taramalı araştırma mikroskop metotlarının geliştirilmesine esin kaynağı oldu. Bunlardan biri olan atomik kuvvet mikroskobu (Atomic Force Microscopy-AFM) ile malzeme yüzeyi analizleri yapılmaktadır. AFM örnek yüzeyi tarayan ve uzaysal bilgi toplayan esnek bir kola monte edilmiş çok ince bir iğne (prob) kullanılır. İğne ve yüzey atomları arasında atomik boyutta bir uzaklık bulunmaktadır ve iğne yüzey üzerinde hareket ettikçe atomlar arası potansiyeller yüzünden denge çubuğu aşağı ve yukarı doğru hareket eder. Böylelikle atomlar arası potansiyel kuvvetlerin denge çubuğu tarafından ölçülmesi ile yüzey topografisi angstrom seviyesinden 100 mikrona kadar ölçebilmektedir. Bazı durumlarda AFM tek bir molekülün hatta tek bir atomun iki veya üç boyutlu görüntüsünü alabilir. Atomik kuvvet mikroskobunun şematik diyagramı ve Cantilever (Denge çubuğu) iğnesi Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



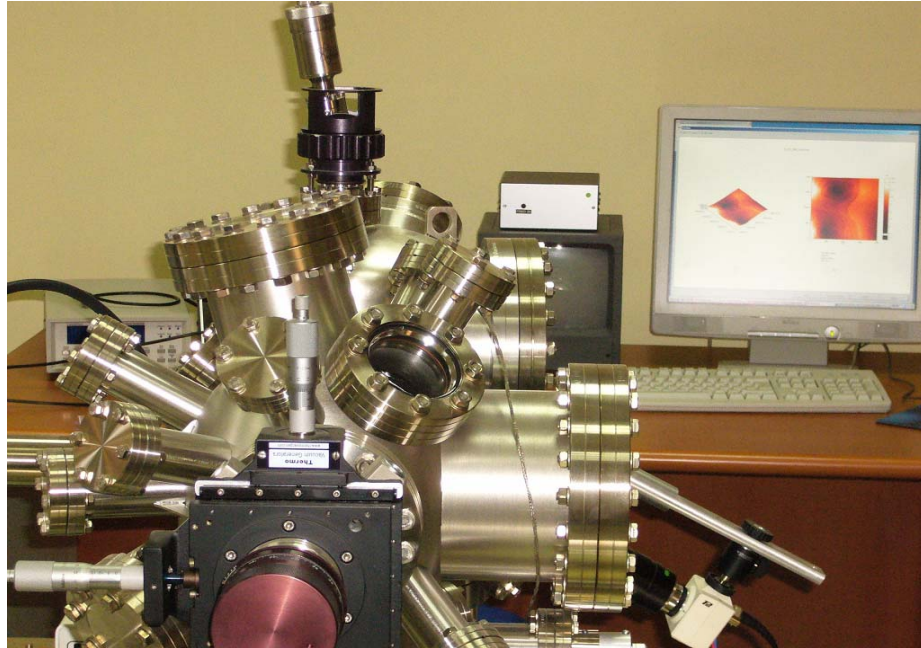
Şekil 3.3 AFM'nin şematik diyagramı [33]

Örnek ve iğne arasındaki moleküler kuvvetler denge çubuğunun hareketi için kullanılacak bir dedektör ve lazer kullanılarak ölçülür. Geri besleme devresi örneği bir piezoelektrik tüp ile yukarı ve aşağıya hareket ettirir. Denge çubuğu küçük değişimler için Hooke Yasası'na uyduğu için, iğne ile örnek arasındaki kuvvet hesaplanabilir. Üç boyutlu görüntü denge çubuğunun hareketi x, y, ve z doğrultusunda kaydedilerek elde edilir. İğnenin veya örneğin hareketi piezo-elektrik seramikten yapılan tarama ünitesi tarafından incelenir. Z-ekseni örneğe dik olan eksen olmak üzere tarama ünitesi x, y ve z yönlerinde Å mertebesinde çözünürlüğe sahiptir.

Atomik Kuvvet Mikroskobu kullanılarak birçok özellik hakkında bilgi edinilebilir. Bunlardan biri, örneğin yüzeyinin nasıl görüldüğü, yüzey üzerinde bulunan moleküler yapılar arasındaki ilişkiler ve sertlik, yansıma gibi maddesel özellikler hakkında fikir edinilmesini sağlayan yüzey topografisidir. Diğer bir dal olan yüzey morfolojisi ise maddeyi oluşturan parçacıkların büyüklükleri ve şekli, bu parçacıkların birbirleriyle etkileşmeleri ile ilgili bilgi, yüzey etkileşim özellikleri, elektriksel yük, manyetiklik, nanomekanik özellikler; aşınma, korozyon,

pürüzlendirme, sürtünme, kayganlaştırma, kaplama ve cilalama ile ilgili bilgileri sağlar. Ayrıca atomik kuvvet mikroskobu kullanılarak örneği oluşturan molekül ve elementlerin bileşimi, bunların relatif miktarları ve maddelerin erime noktaları ve sertliği gibi bazı maddesel özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Bunların yanında atomların madde içinde nasıl düzenlendikleri, bu düzenler arasındaki ilişkiler ve örneği oluşturan maddelerin elektriksel özellikleri (örneğin iletkenlik) gibi kristalografik bilgi de veren AFM görüntüleri elde edilebilir.

Bu tez çalışmasında çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 numunelerinin yüzey özellikleri Şekil 3.4’de fotoğrafı görülen AFM (Omicron-Variable Temperature STM/AFM) cihazı ile elde edilmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında yapıldı. Numuneler ölçüm öncesi etil alkol ve saf azot kullanılarak ultrasonik temizleme cihazında temizlendi.

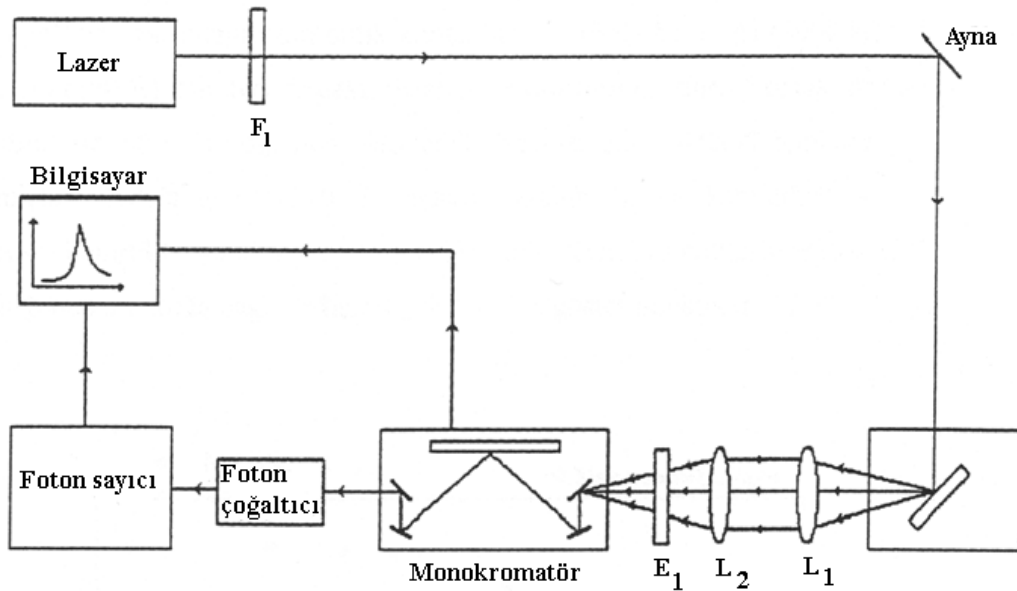


Şekil 3.4 AFM (Omicron-Variable Temperature STM / AFM) cihazı

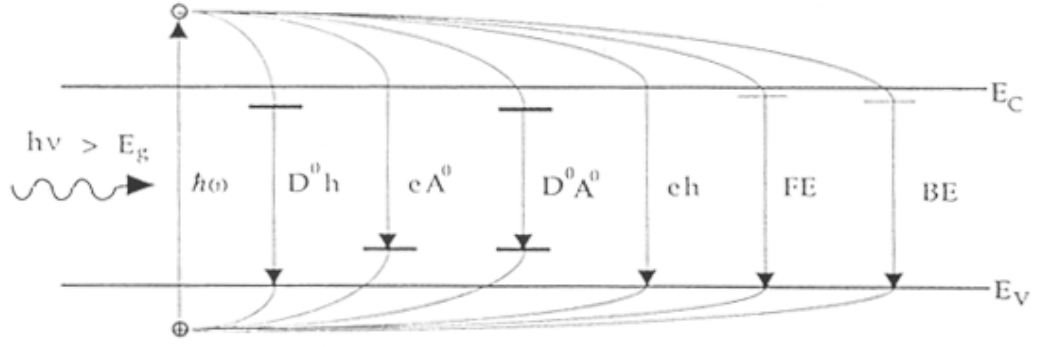
3.4 Fotolüminesans (PL)

Fotolüminesans (PL) spektroskopisi yapıların karakterizasyonu için güçlü bir optiksel metottur. Fotolüminesans silikon ve III-V gurubu yarıiletken elementlerdeki safsızlık ve kusurları bulmak için kullanılabilir. PL optiksel özellik taşıdığı için yarıiletkenlerdeki bant aralığını belirlemede de kullanılır.

PL'nin çalışma prensibi uyarılma ve tekrar birleşmeye dayanır. Işığın absorplayan yapıda bir elektron-deşik çifti oluşur. Çünkü gelen ışığın elektronu uarmasıyla elektron değerlik banttan iletkenlik bandına sıçrar. Bu sıçrama sırasında ardında bir deşik bırakır, bir süre sonra elektron geri döner ve elektron deşik tekrar birleşir. Sonuçta foton oluşur; bu fotonun enerjisi bant aralığına eşittir. Tüm bunlardan sonra yapıdan yayınlanan fotonlar bilgisayara bağlı detektör tarafından toplanır ve enerjileri belirlenir [34]. Bu enerjilerin grafiğinin çizimi yapımız hakkında önemli bilgiler verir. Şekil 3.5'da PL'nin ana hatları görünüyor. Lazer uyarma için gerekli lazeri üretir. Monokromatör belirli dalga boylarında çalışmamızı sağlar. Şekil 3.6'da ise yarıiletkenlerde görülen PL geçişleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5 PL aygıtının ana hatları



Şekil 3.6 Yarıiletkenlerde görülen PL geçişleri

Şekil sırasıyla (D^0 , h) vericilerden değerlik banda geçişleri, (e , A^0) iletkenlik bandından alıcılara, (D^0 , A^0) vericilerden alıcılara, (e , h) banttan banda, (FE) ve (BE) serbestlik ve geçiş ışınımsal geçişlerini gösteriyor.

Deneylerin yapıldığı PL cihazı Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında PL ölçümleri oda sıcaklığında (300K), 325nm dalga boylu, 55mW güç çıkışlı He-Cd lazer kullanılarak yapıldı. Ölçümlerden önce numuneler etil alkol ile temizlendi.



Şekil 3.7 PL cihazının görünümü

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Giriş

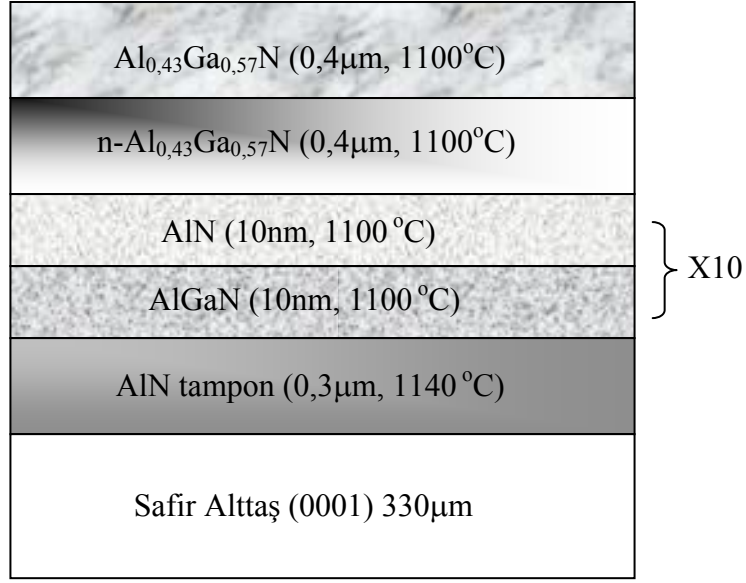
Bu bölümün ilk kısmında MOCVD tekniği ile büyütülen iki adet $Al_{0.43}Ga_{0.57}N$ çoklu yapıların büyütme süreçleri tabaka kalınlıkları ile birlikte sunuldu. Şematik gösterimleri Şekil 4.1 ve 4.2’de verilen bu yapılardan 10 periyotlu olan yapı-1 ve üst tabakası GaN olan diğer numune çoklu yapı-2 olarak isimlendirildi. Bu numuneler Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi’nde büyütüldü. Numunelerin yapısal ve optiksel özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışınları difraksiyonu (HR-XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) cihazları kullanılarak incelendi.

4.2 Materyal Büyütme Süreçleri

MOCVD sisteminde büyütme sırasında Al, Ga ve N kaynakları olarak TrimethylGallium (TMG), TrimethylAluminum (TMA) ve Ammonia kullanıldı. Her iki örnek de (0001) yönelimli (330µm) safir (Al_2O_3) altaşlar üzerine büyütüldü. Epitaksiyel büyüme başlamadan önce safir altaşlar, yüzey kirliliklerini kaldırmak için 10’ar dakika 1100°C’de tavlandı.

4.2.1 Çoklu Yapı–1 Numunesinin Büyütme Süreci

Şekil 4.1’de çoklu yapı–1 numunesinin büyütme şartları ve tabaka kalınlıkları verildi. Büyütme yüksek sıcaklıkta (1140°C) 0,3 µm kalınlıkta AlN tampon (buffer) tabaka ile başlatıldı. AlN tampon tabaka üzerine 1100°C’de 10’ar nm kalınlıklarda 10 periyot AlGaN ve AlN tabakalar büyütüldü. Son adımda aynı sıcaklıkta (1100°C) sırayla 400 nm kalınlıkta $Al_{0.43}Ga_{0.57}N$ tabaka büyütüldü.



Şekil 4.1 $Al_{0,43}Ga_{0,57}N / Al_2O_3$ çoklu yapı-1 numunesinin şematik gösterimi

4.2.2 Çoklu Yapı-2 Numunesinin Büyütme Süreci

Çoklu yapı-2 numunesinin büyütme şartları ve tabaka kalınlıkları Şekil 4.2’de verildi. Büyütme işlemi 11,2 nm kalınlıkta AlN çekirdek (nucleation) tabaka ile başlatıldı. Bu AlN çekirdek tabaka üzerine yüksek sıcaklık (1135°C) düşük basınçta (25 mbar) 0,72 µm kalınlıklı AlN tampon tabaka biriktirildi. AlN tampon tabakadan sonra sırasıyla 1045°C’de (200 mbar) 2,77 µm kalınlıkta GaN ve 1086 °C’de (50 mbar) 1 nm kalınlıkta AlN tabakası büyütüldü. Son aşamada büyütme, aynı sıcaklık ve basınçta (1086 °C ve 50 mbar) 18,8 nm kalınlıklı $Al_{0,43}Ga_{0,57}N$ ve bu tabakanın üzerine 10,6 nm GaN üst tabakası ile sonlandırıldı.

GaN cap(10,6 nm, 1086°C,p=50mbar)
Al _{0,43} Ga _{0,57} N (18,8nm, 1086°C,p=50mbar)
AlN (1nm, 1086 °C, p=50mbar)
GaN (2,77µm, 1045 °C, p=200mbar)
AlN tampon (0,72µm,1135 °C, p=200 mbar)
AlN nucleation (11,2 nm, t=2,15 s)
Safir Alttaş (0001) 330µm

Şekil 4.2 Al_{0,43}Ga_{0,57}N /Al₂O₃ çoklu yapı-2 numunesinin şematik gösterimi

4.3 Karakterizasyon Deneylei

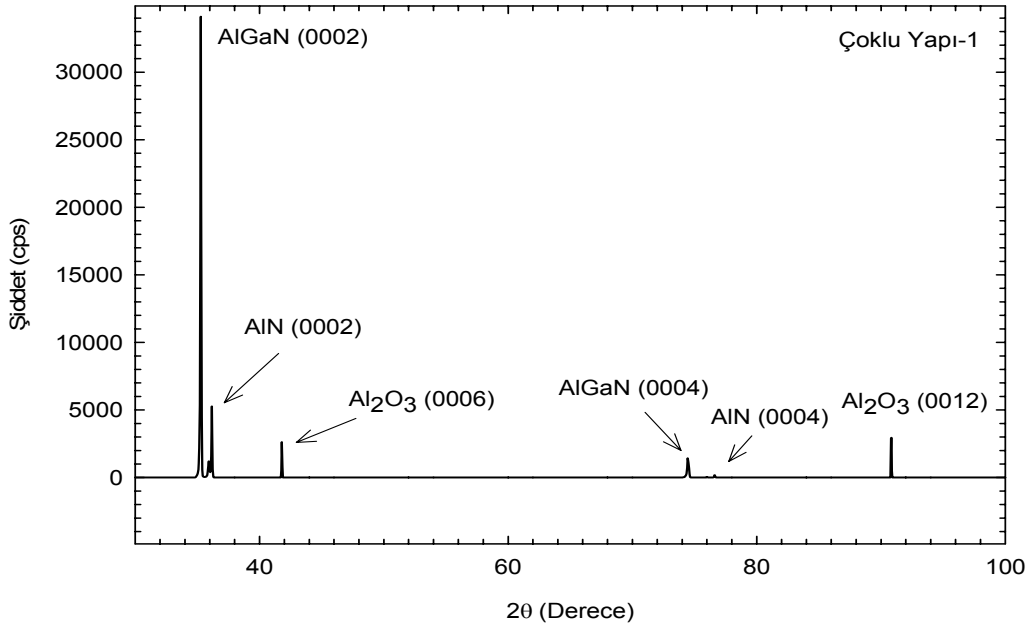
Bu çalışmada incelenen çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 örnekleri 200°C'den 960°C'ye 100°C'lik periyotlarla hızlı termik tavlama sisteminde 20 dakika tavlandı. Kullanılan hızlı termik tavlama sisteminin maksimum sıcaklığı 960°C olduğu için 1000°C'den sonraki tavlamlar Lenton marka Furnace (fırın) sisteminde gerçekleştirildi. Çoklu yapı-1 numunesi 1000°C'den 1200°C'ye 50°C'lik artışlarla fırın sisteminde 30 dakika tavlandı. Çoklu yapı-2 numunesi ise 1000°C'den 1150°C'ye 50°C'lik periyotlarla fırın sisteminde 30 dakika tavlandı. Son tavlama sıcaklığı iki numunenin büyütme şartları dikkate alınarak belirlendi. Her iki numune için tavlama öncesi ve sonrasındaki her periyot için karakterizasyon ölçümleri yapılarak analiz edildi.

4.3.1 Çoklu Yapı-1 Numunesinin Karakterizasyonu

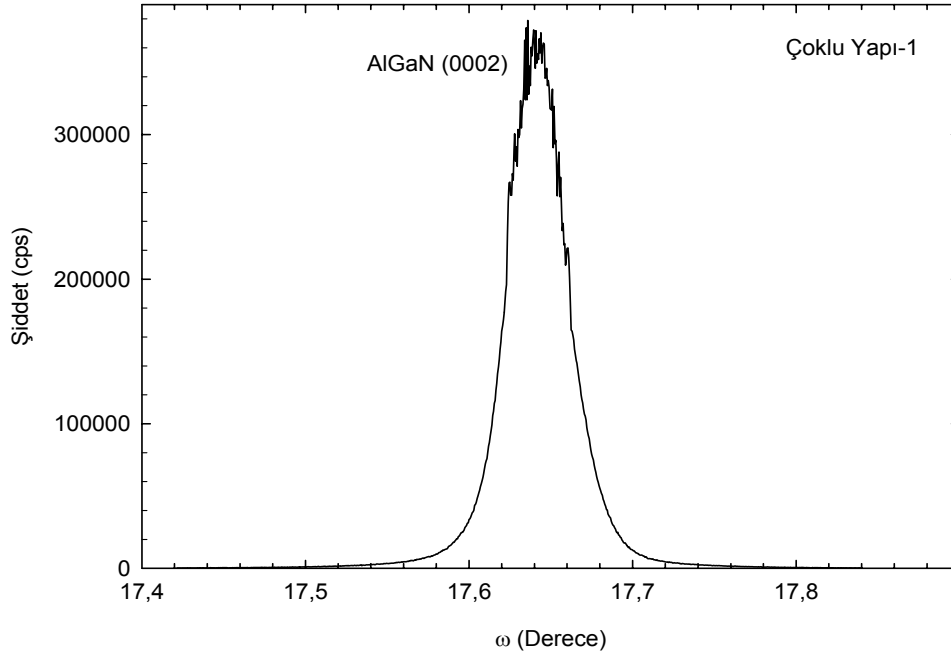
4.3.1.1 Çoklu Yapı-1 Numunesinin HR-XRD ile Karakterizasyonu

Çoklu yapı-1 numunesinin tavlama öncesi yüksek çözünürlüklü XRD taraması sonucu elde edilen 2θ grafiği Şekil 4.3'de verildi. Her pikin tabaka yansımaları, yüzey yönelimi ve yapıdaki bileşimlere ait pikler isimleriyle etiketlendi. Bu göre yapının literatürdeki yapılan çalışmalar dikkate alınarak değerlendirildiğinde büyümenin uygun olarak gerçekleştiği söylenebilmektedir.

Çoklu yapı-1'in 2θ grafiğinin en yüksek piki (0002) AlGaN'dan gelmektedir (Şekil 4.3). (0002) ve (0004) düzlemlerinin yönelimlerine sırasıyla baktığımızda AlGaN ve AlN pikleri $35,280^\circ$, $36,160^\circ$ ve $74,400^\circ$, $76,560^\circ$ açılarda gözlemlendi. Al_2O_3 pikleri ise (0006) ve (0012) yönelimlerinde sırasıyla $41,800^\circ$ ve $90,800^\circ$ açılarda gözlemlendi. Örnek olarak yapıdaki bu (0002) AlGaN pik açısı literatürle uyumludur [35].



Şekil 4.3 Çoklu yapı-1 numunesinin 2θ grafiği

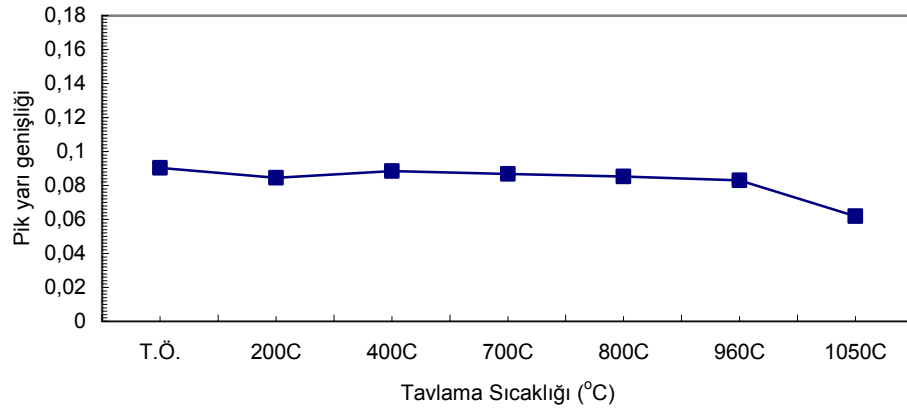


Şekil 4.4 Çoklu yapı-1 numunesinin AlGaIn (0002) yöneliminin rocking (döndürme) taraması

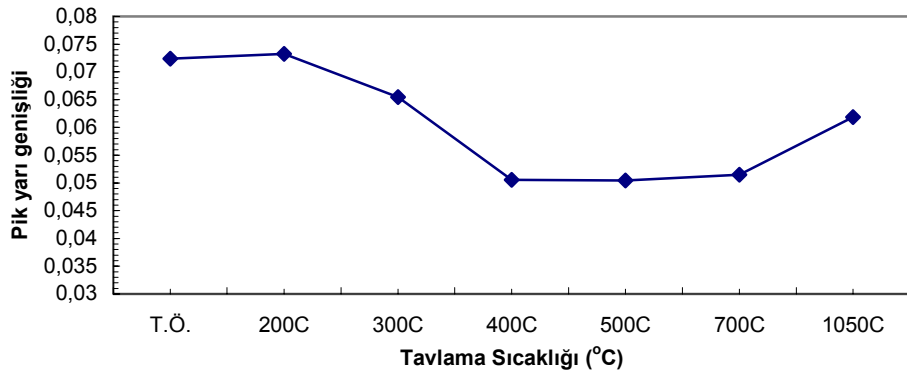
Şekil 4.4’de çoklu yapı-1’in yüksek çözünürlüklü XRD taramasının döndürme (rocking) grafiği sunuldu. Böyle bir ölçümde numune ve dedektör birlikte hareket eder. Numunenin ayarlanmasında (0002) yönelimine dik (100) Azimut ayarlandı. Bu ayarlama sadece numune veya dedektör döndürülerek, döndürme (rocking) tarama ölçümü ile kontrol edilmektedir. Bu taramanın en yüksek şiddette ayarlanması numune yüzeyinin, gelen X-ışınına paralel ayarlandığını gösterir. Ayrıca döndürme pikinin yüksekliğinin yarı genişliği (full width half maximum, FWHM), pik yüksekliği ve pik alanı literatürde yaygın olarak bilinen yüzey kalitesini gösteren özelliklerdir. Örneğin ölçümlerimizde AlGaIn’a ait olan $(35,28^\circ)$ pikin FWHM değeri 0,09044’dür. Literatürde Al katkılı yapıların yarı genişliği 200 arcsec değerinin aşağısında başarılı bir büyütme olarak değerlendirilmektedir. Bizim ölçümlerimizde arcsec biriminde çoklu yapı-1’in AlGaIn piki için bu değer 121,18 arcsec olarak bulundu. Bu değere göre yapının (0002) yüzeylerinin kaliteli bir yapıya sahip olduklarını söyleyebiliriz. FWHM değeri ne kadar küçük olursa

yapının yüzey kalitesi o kadar iyi olur. Bu bilgi göz önüne alınarak yapılan tavlama deneylerinde FWHM değerleri incendi.

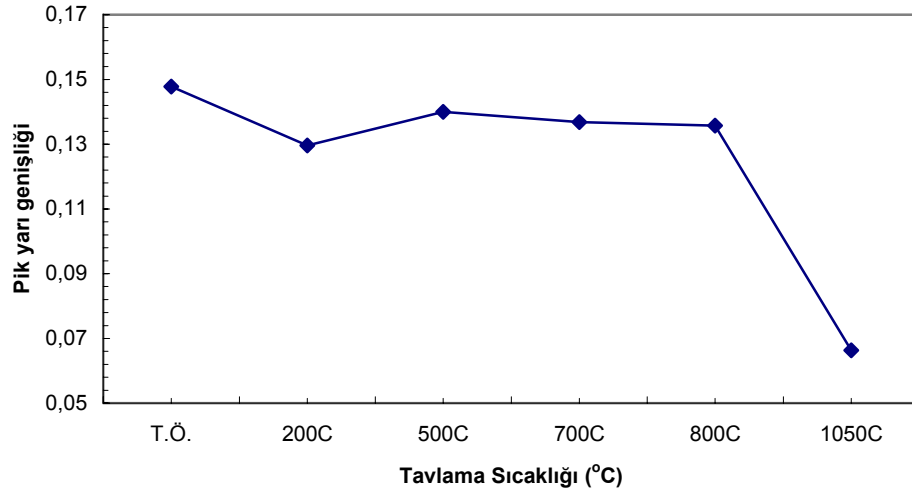
Farklı tavlama sıcaklıklarına göre elde edilen pik yarı genişliklerinin (FWHM) değişimi Şekiller 4.5, 4.6 ve 4.7’de verildi. Tavlama sonucunda kristal yapının daha iyiye doğru seyir takip etmesi beklentisine uygun olarak FWHM değerlerinin tavlama sıcaklığındaki artışa paralel olarak azaldığı tespit edildi. Bu ise yapının kristal kalitesinin iyileştiği anlamında değerlendirilmektedir.



Şekil 4.5 AlGaIn'a ait $(\theta = 35,28^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi

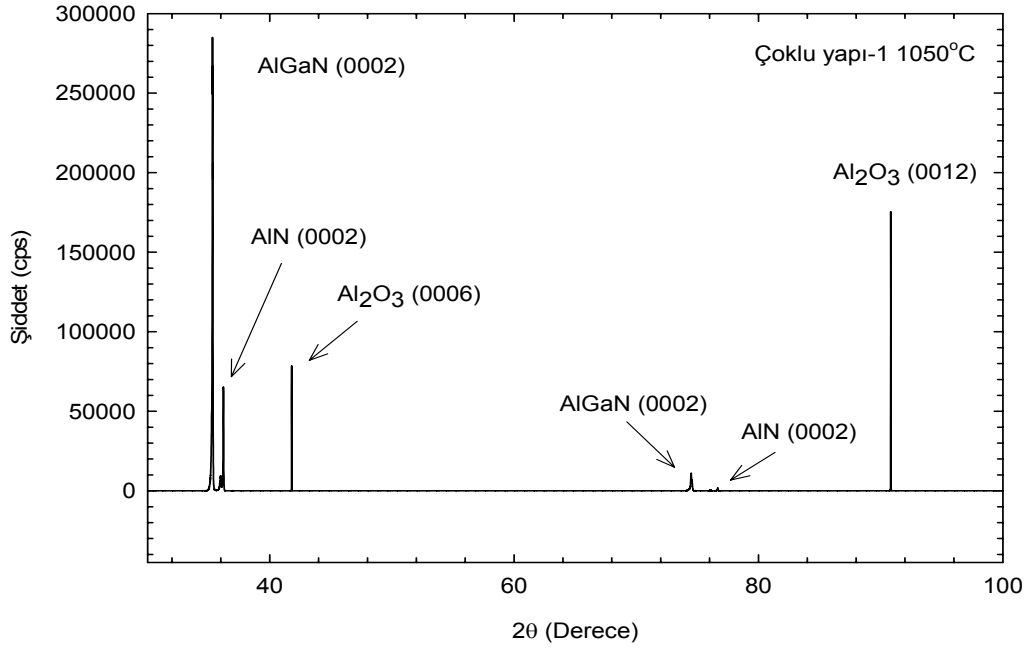


Şekil 4.6 AlIn'a ait $(\theta = 36,16^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi



Şekil 4.7 AlGaIn'a ait ($\theta = 74,40^\circ$) pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi

Farklı tavlama sıcaklıklarına göre elde edilen pik yarı genişliklerinin (FWHM) grafikleri doğrultusunda en düşük FWHM değerleri, AlGaIn'a ait ($\theta = 35,28^\circ$) pikin yarı genişliği tavlama öncesi 0,09044 iken 1050°C'de tavlandıktan sonra 0,06188, AlN'a ait ($\theta = 36,16^\circ$) pikin yarı genişliği tavlama öncesi 0,0724 iken 1050°C'de tavlandıktan sonra 0,06188 ve AlGaIn'a ait ($\theta = 74,40^\circ$) pikin yarı genişliği tavlama öncesi 0,14783 iken 1050°C'de tavlandıktan sonra 0,06634 olarak bulunmuştur. Pik genişlikleri azalırken 1050°C tavlama sonucunda Şekil 4.8'de de görüldüğü gibi pikler daha belirgin olarak gözlenmektedir.



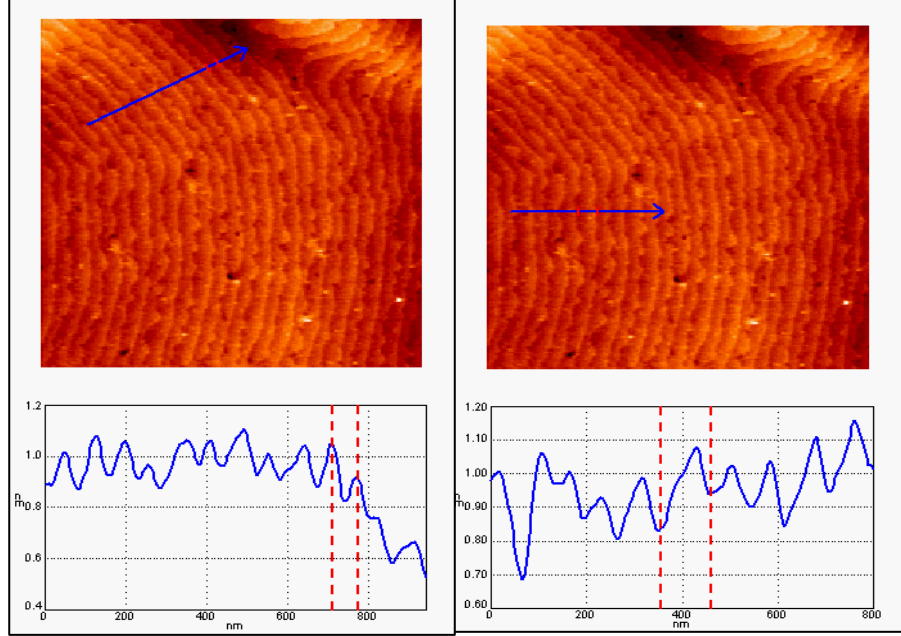
Şekil 4.8 Çoklu yapı-1 numunesinin 1050°C tavlama işleminden sonraki 2θ grafiği

XRD ölçümleri sonucunda düşük tavlama sıcaklıklarında belirgin bir fark gözlenemezken yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça yani yapının büyütme sıcaklıklarına yaklaştıkça malzeme kalitesini attıran etkiler gözlenmektedir. Çoklu yapı-1 numunesi için 1050°C'lik tavlama işlemi malzeme kalitesini arttırmaktadır. Bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda yapılan tavlama işlemleri yapıdaki bileşimlere ait piklerin daha zor gözlenmesine sebep olmuştur.

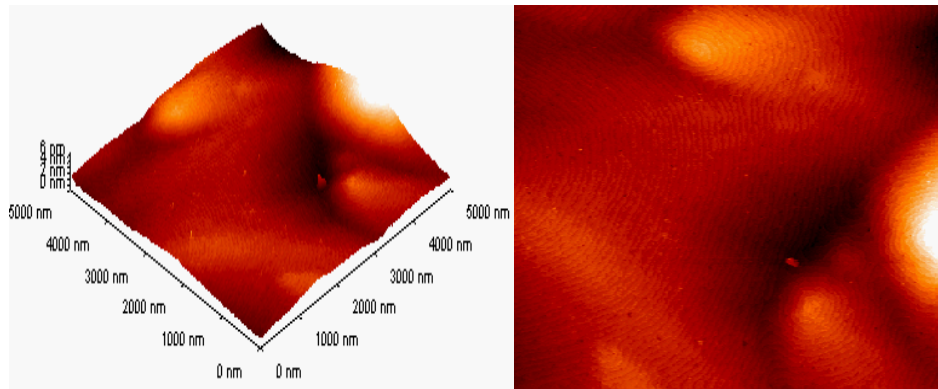
4.3.1.2 Çoklu Yapı-1 Numunesinin AFM ile Yüzey Karakterizasyonu

AFM ölçümleri için 4 ve 25 μm^2 tarama alanları tercih edildi. Bunun nedeni AFM ölçümlerinden, küçük tarama alanlarında (4 μm^2) yüzey üzerindeki kusur çeşitlerinin ve morfolojinin daha iyi belirlenebilmesi, büyük tarama alanlarının da (25 μm^2) ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerinin numuneyi daha iyi temsil etmesidir. Numunelerin AFM görüntülerinde açık renk yükseltiyi, koyu renk ise derinliği göstermektedir. Örneğin tavlama öncesi yüzeyi üzerindeki 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama

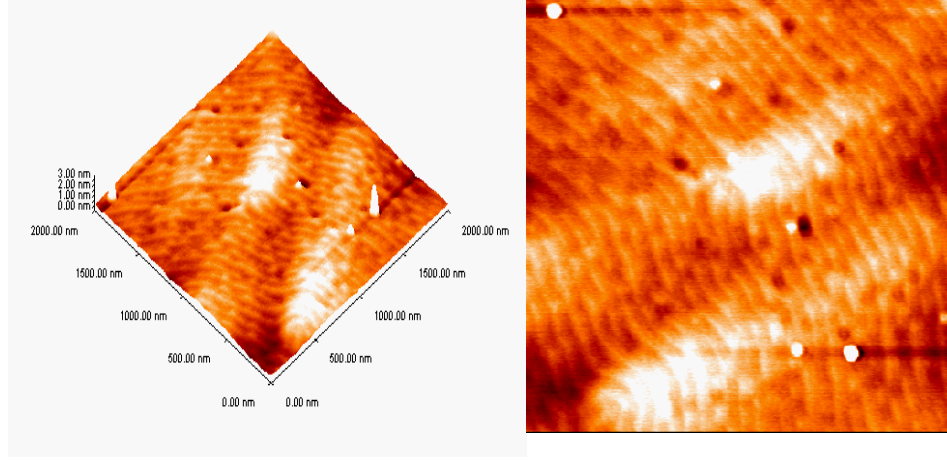
alanlı AFM ölçümlerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğünün bir göstergesi olan RMS değerleri sırasıyla 0,141 nm ve 0,793 nm'dir. Şekiller 4.11-4.24'de farklı sıcaklıklarda tavlanan çoklu yapı-1 numunesinin $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ve $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri verilmektedir.



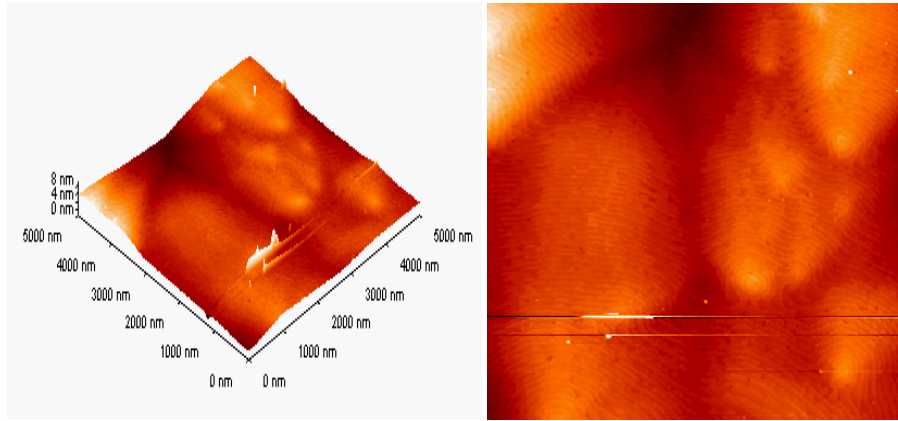
Şekil 4.9 Çoklu yapı-1 numunesinin tavlamadan önce $4 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri. a) Yanal step büyüklüğü ~ 100 nm, b) Step yükseklik farkı $\sim 0,22$ nm'dir.



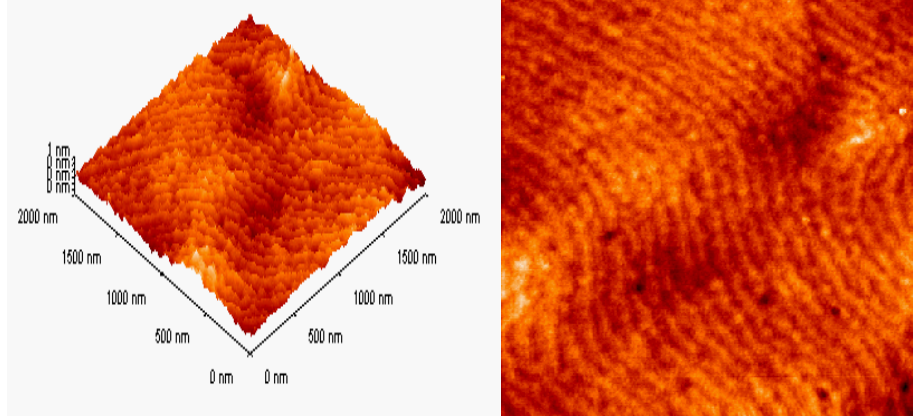
Şekil 4.10 Çoklu Yapı-1 numunesinin $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 0,793 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



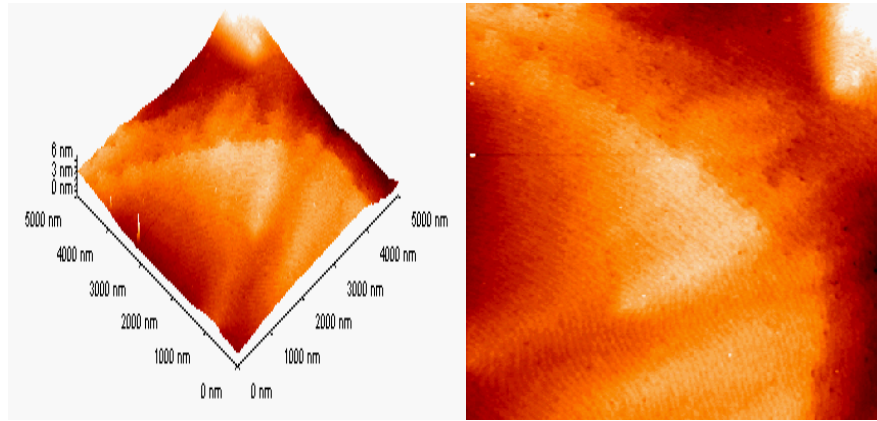
Şekil 4.11 Çoklu yapı-1 numunesinin 200°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,137 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



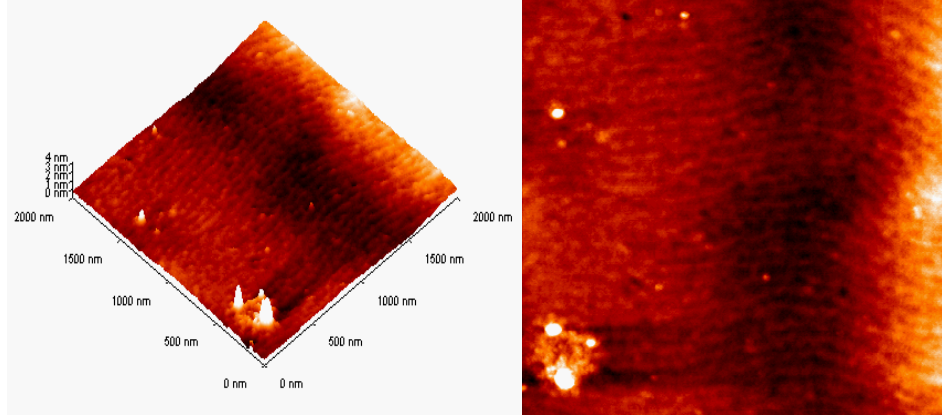
Şekil 4.12 Çoklu yapı-1 numunesinin 200°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 0,691 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



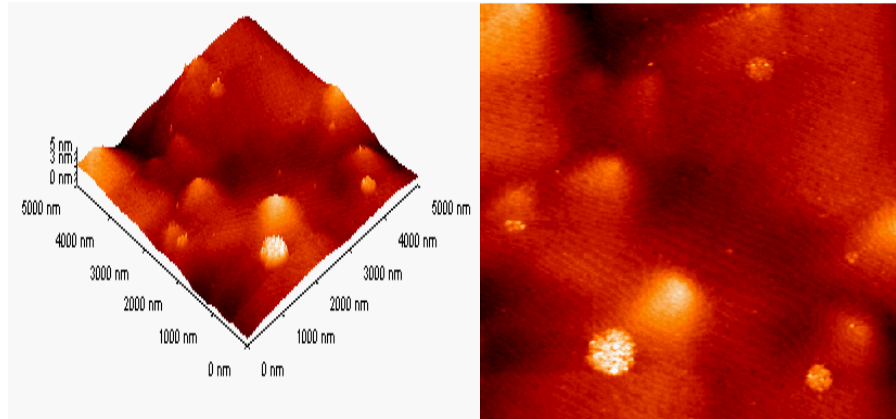
Şekil 4.13 Çoklu yapı-1 numunesinin 900°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,104 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



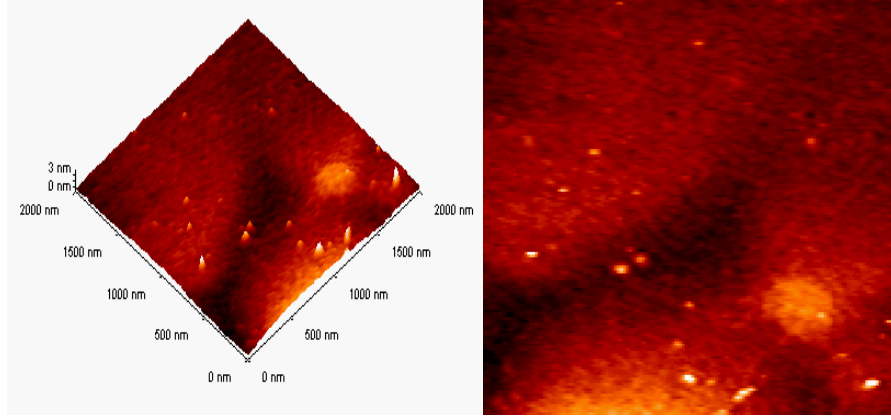
Şekil 4.14 Çoklu yapı-1 numunesinin 900°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 0,708 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



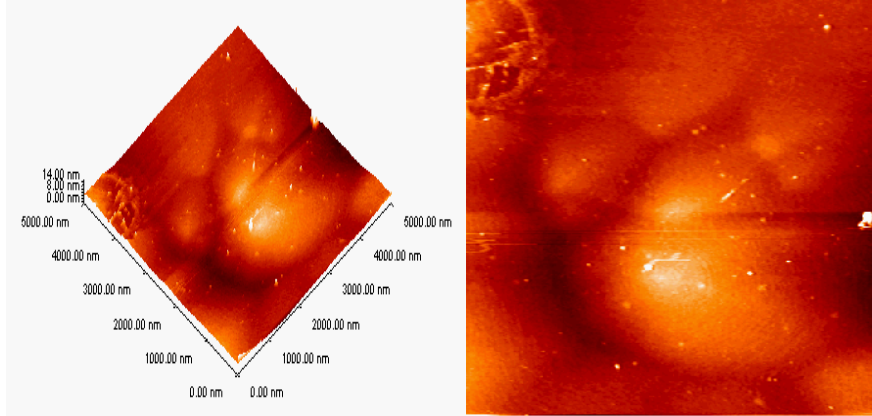
Şekil 4.15 Çoklu yapı-1 numunesinin 960°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,292 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



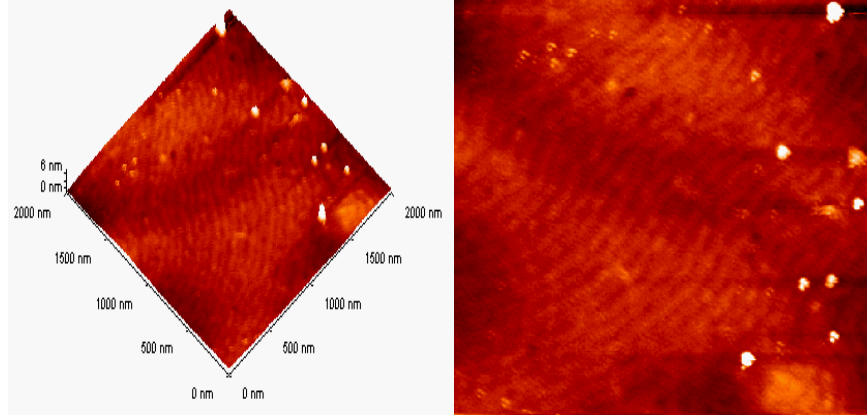
Şekil 4.16 Çoklu yapı-1 numunesinin 960°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 0,497 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



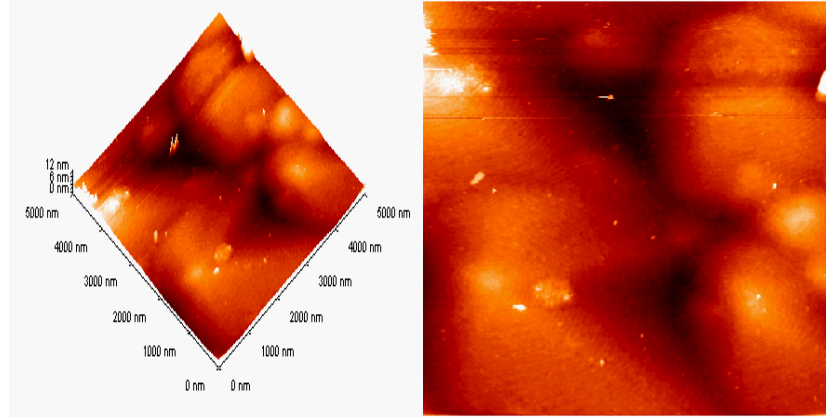
Şekil 4.17 Çoklu yapı-1 numunesinin 1000°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,326 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



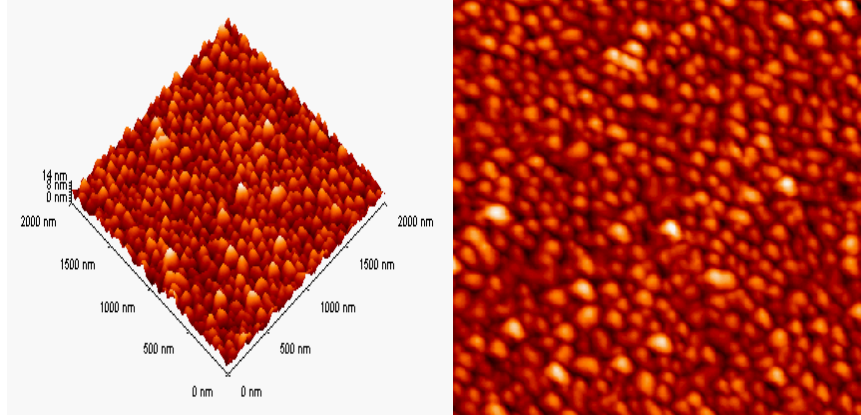
Şekil 4.18 Çoklu yapı-1 numunesinin 1000°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 0,899 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



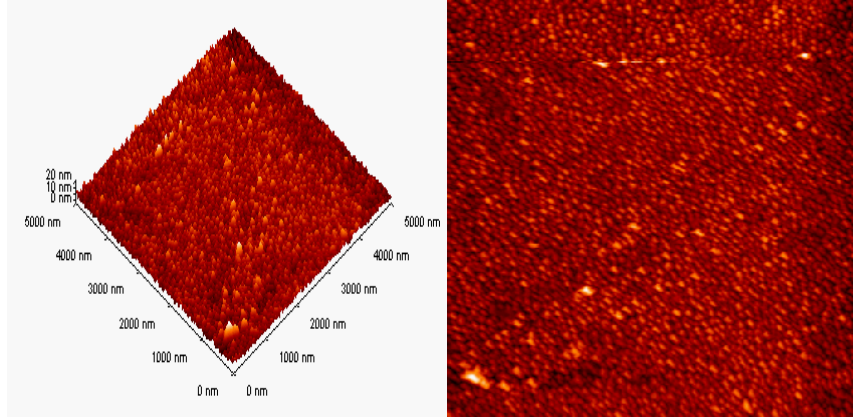
Şekil 4.19 Çoklu yapı-1 numunesinin 1050°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm² (rms değeri 0,256 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



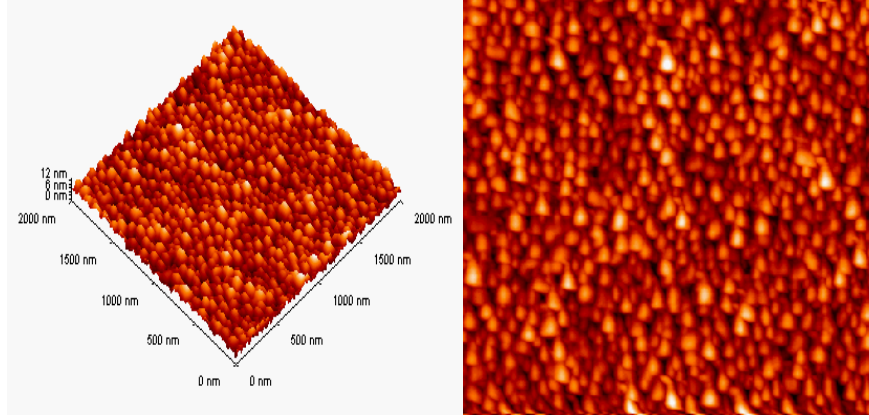
Şekil 4.20 Çoklu yapı-1 numunesinin 1050°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm² (rms değeri 0,985 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



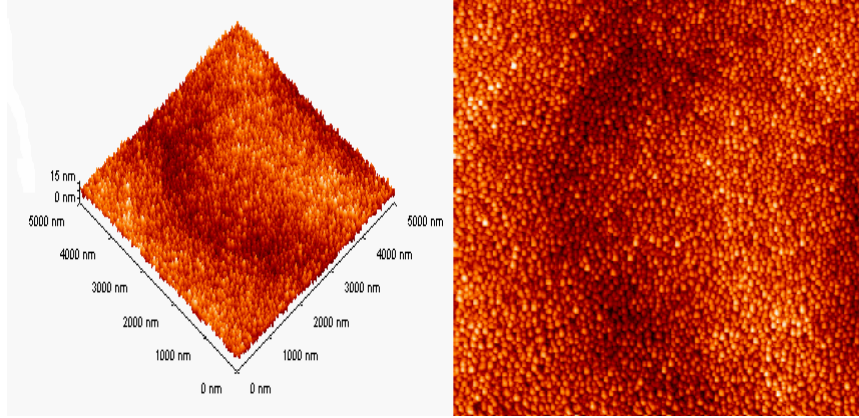
Şekil 4.21 Çoklu yapı-1 numunesinin 1150°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 1,949 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



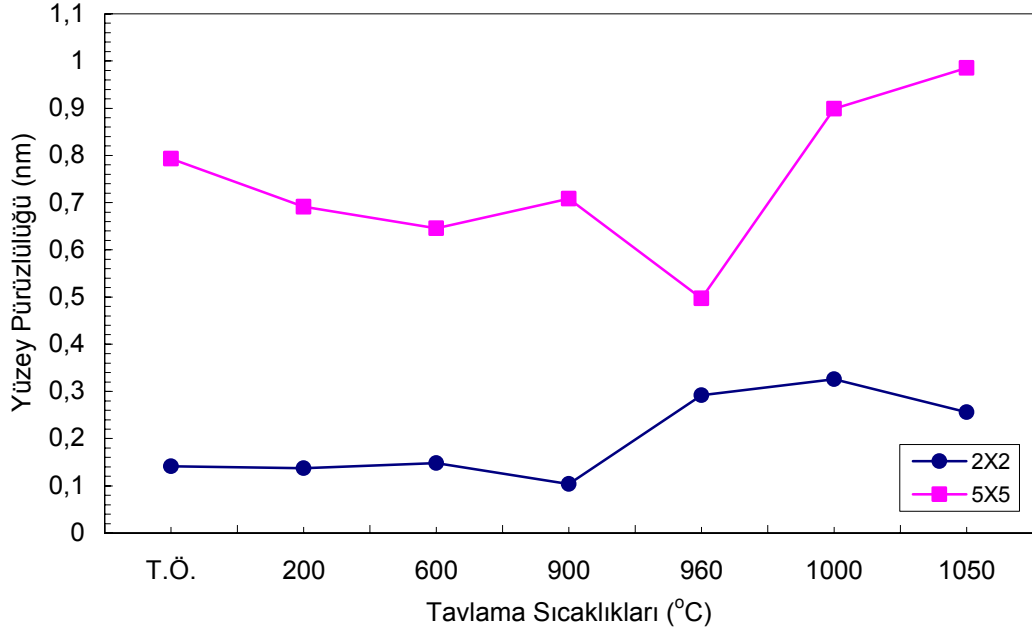
Şekil 4.22 Çoklu yapı-1 numunesinin 1150°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 2,194 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



Şekil 4.23 Çoklu yapı-1 numunesinin 1200°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 1,746 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



Şekil 4.24 Çoklu yapı-1 numunesinin 1200°C’de tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 2,254 nm) tarama alanlı AFM görüntüleri



Şekil 4.25 Çoklu Yapı-1 numunesi için yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre grafiği

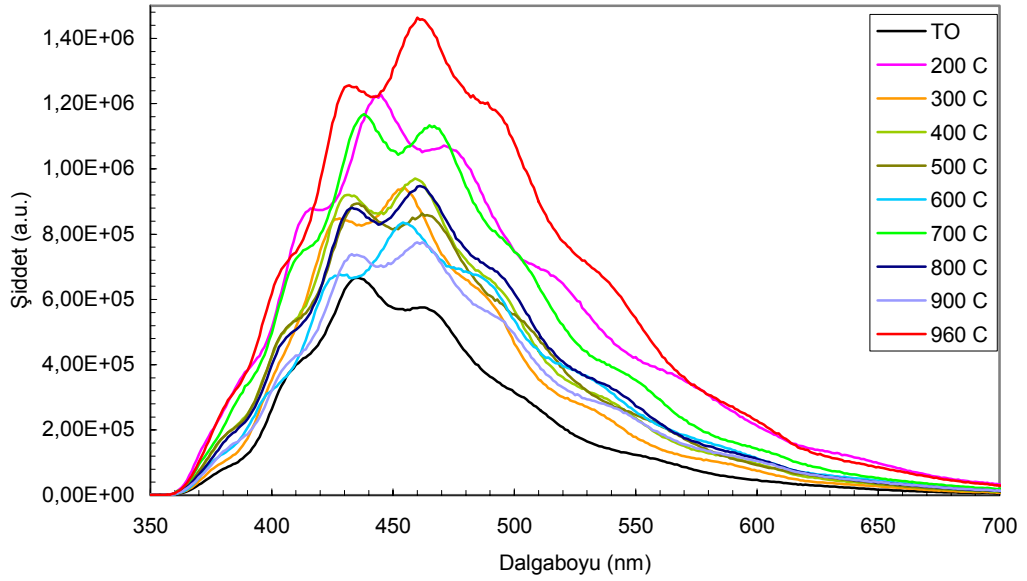
Literatürde yapılan benzer bir çalışmada da N_2 ve argon (Ar) ortamında tavlanan GaN filmlerin yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre monomatik olarak azaldığı belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu değişim örneğin termal dayanıklılığın ve yüzey kusurlarının azalmasına atfedilmektedir [36]. Bu tür özellikler, önceki araştırmalardan da bilindiği üzere daha iyi elektriksel ve optiksel özelliklere (sızıntı veya kaçak akımlarının azalması, yüksek mobilite, iletim ve duyarlılık) yol açmaktadır. Daha iyi elektriksel ve optiksel özellikler ise cihaz performansını olumlu yönde etkilemektedir.

Yüzey pürüzlülüğünün diğer bir göstergesi de step genişliğidir. Buna göre yüzey üzerindeki dar stepler yüzeyin daha pürüzlü, geniş stepler ise yüzeyin daha pürüzsüz olduğu anlamına gelir. Çoklu yapı-1 numunesinde 960°C 'ye kadar beklenildiği gibi rms değerleri düşüş göstermiştir. 960°C 'den sonraki tavlamalarda

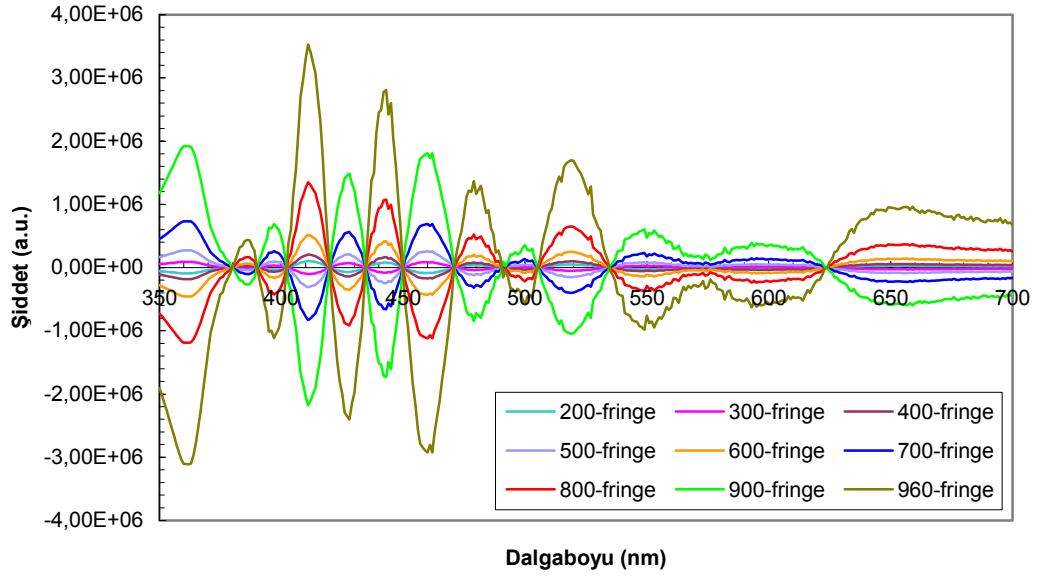
ise yüzeydeki pürüzlülük artış göstermiştir. 1200°C'deki görüntülerde ise mozaik bir yapı gözlenmektedir.

4.3.1.3 Çoklu Yapı-1 Numunesinin PL ile Karakterizasyonu

Şekil 4.26'de çoklu yapı-1 numunesinin oda sıcaklığından 960°'ye kadar tavllanması sonucu ölçülen PL spektrumları verilmiştir. Yapıdaki her bir materyalin yasak enerji aralığı, uyarılma foton enerjisinden (~4,8 eV) yüksek olduğundan PL spektrumunda banttan-banda geçişlere ilişkin herhangi bir ışımaya gözlemlenememiştir. Bu sistemimizde bulunan uyarıcı ışık kaynağının uygun dalga boyunda olmamasından kaynaklanmaktadır. Dolayısı ile gözlemlenen ışımalar çoklu yapıdaki çeşitli kusurlardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.26 Çoklu yapı-1 numunesinin oda sıcaklığından 960°'ye kadar tavllanması sonucu ölçülen PL spektrumları



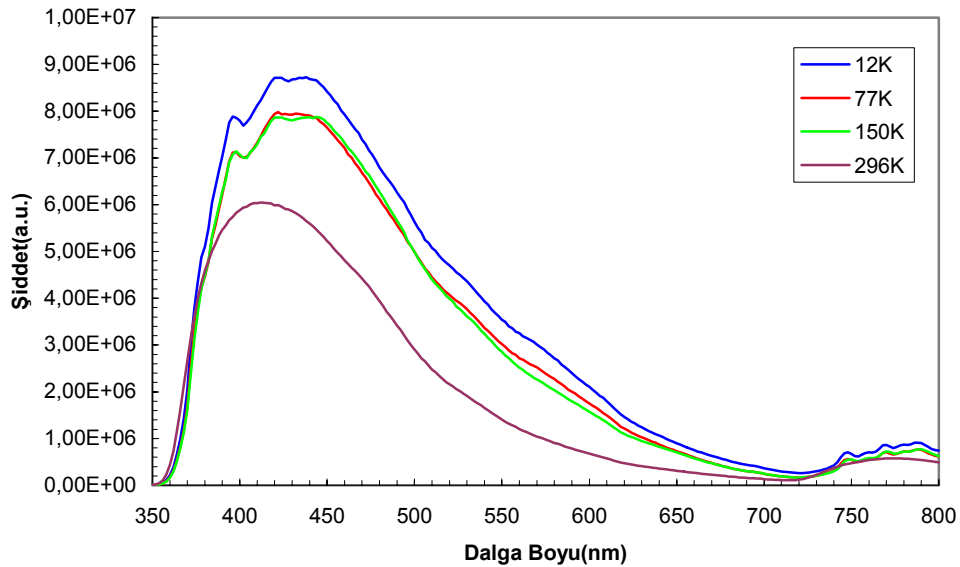
Şekil 4.27 Çoklu Yapı-1 numunesinin ara yüzeylerinde gözlenen girişim saçakları

Şekil 4.27’de ara yüzeylerdeki girişim saçakları görülmektedir. Yani bu girişim saçakları ara tabakalardaki pürüzlülüğten kaynaklanmaktadır. Sağa gittikçe (dalga boyu artıkça) girişim saçaklarının periyodunun arttığı görülmektedir. Bu olay düşük enerjilere doğru gidildikçe filmin kırılma indisinde bir azalma olduğunu göstermektedir. Kırılma indisi yüksek olduğunda yani dalga boyu artıkça girişim saçakları daha sık görülmektedir.

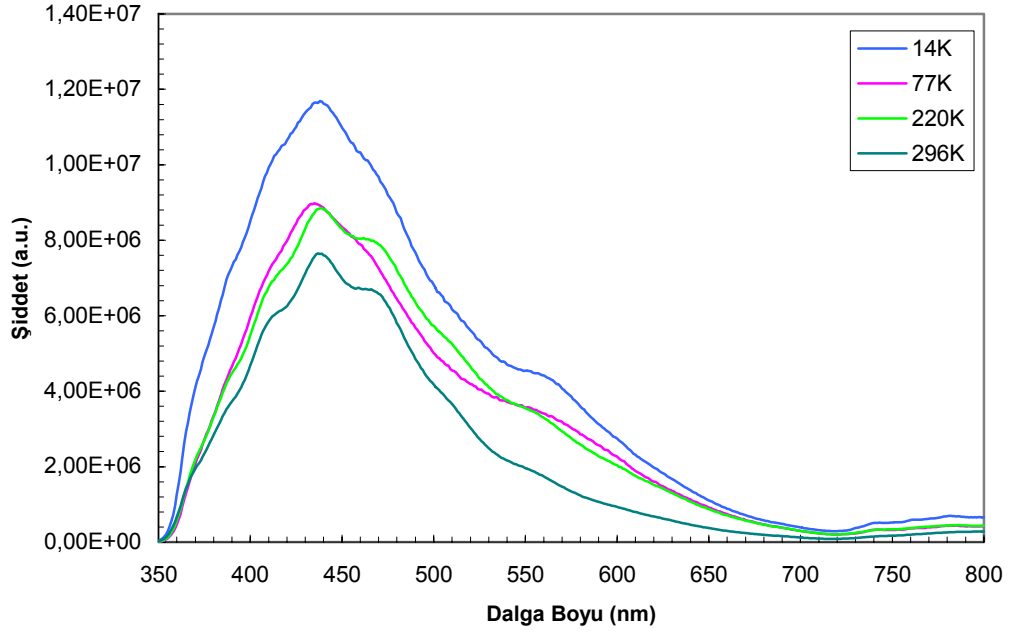
PL ölçümünde kullanılan He-Cd lazer, dalga boyu 325 nm ($\lambda = 1240 / eV$ ise $eV = 1240 / \lambda = 1240 / 325 = 3.81$ eV) yani band genişliği 3.81 eV civarında olan malzemeleri uyarmaktadır ama burada AlN ve AlGaIn’ın yasak band aralıkları 3.8 eV den büyük olduğu için numuneler banttan banta uyarılamamıştır. Sadece ara durum (acceptor ve doner yada derin tuzak seviyeleri) geçişlerini gözlenebilmiştir. Işımanın maksimum olduğu enerjinin 2,72 eV (~455 nm) olması derin tuzak seviyelerini işaret etmektedir. Dislokasyon, adacıklı yapı ve boşluk (void) yoğunluğunun genellikle lüminesansa önemli etki yapmadığı düşünülürse, elde edilen ışımın yapıdaki kusurlardan kaynaklandığı söylenebilmektedir [37]. Öte yandan, dislokasyon yoğunluğunun ışım şiddetine etki ettiği tespit edilmiştir [38]. Oluşması muhtemel kusurlardan bir tanesi N boşluğu (V_N)’dir ve daha çok alıcı

özelliği taşır. En yakın komşu Ga atomu N boşluğuna sıçrayabilir ve V_N kusuru V_{Ga} kompleksine dönüşür ve bu kompleks, verici özelliği taşır [39]. Gözlemlenen ışımaya çoklu yapı-1 yapısında olması muhtemel oksijen kaynaklı bir bileşeninden meydana gelebilmektedir. Ayrıca, ara yüzlerde oluşan kusurların da bu PL spektrumuna etkisi göz ardı edilmemelidir.

Çoklu yapı-1 numunesinin içerdiği kusurların PL spektrumu ile tartışmasız ilişkilendirilebilmesi için 960° 'den sonraki tavlama sıcaklıklarında ölçümler düşük sıcaklıklarda yapılmış ve lüminesans karakterinin sıcaklıkla değişimi gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda numunedeki fononların hareketleri yavaşlar. Fononların etkileşimi minimuma inerken sahip oldukları enerji ışımaya için harcanır ve ışımayı daha da şiddetlendirir. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda daha yüksek şiddette ışımaya gözlenmektedir. Şekiller 4.28-4.29'da 1000°C ve 1050°C ' tavlama işlemleri sonucunda düşük sıcaklıklarda yapılan ölçümler beklenildiği gibi gözlenmiştir. Düşük sıcaklıkta yüksek olan şiddet, sıcaklık arttıkça azalmaktadır.

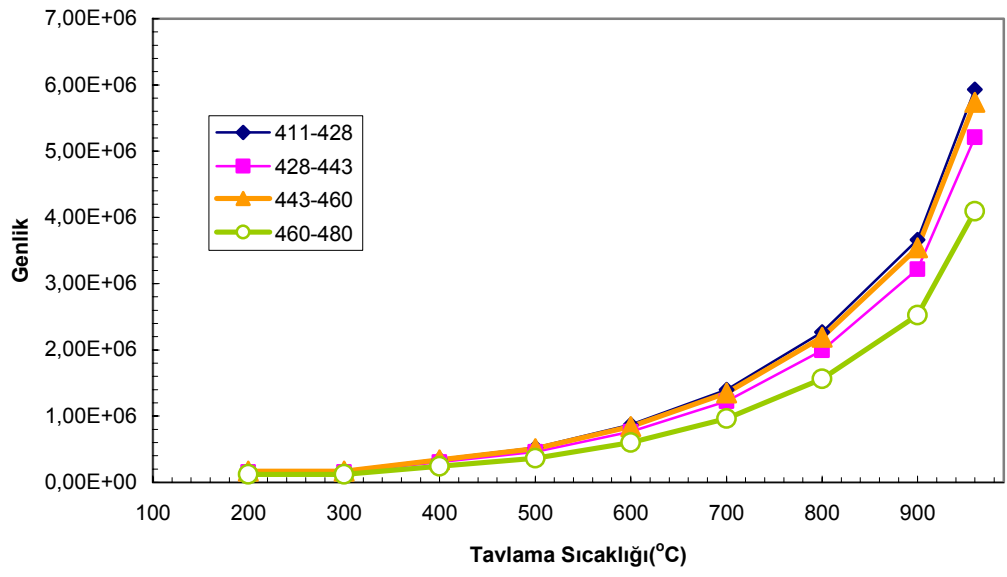


Şekil 4.28 1000° 'de tavlanan çoklu yapı-1 numunesinin 12K'den oda sıcaklığına kadar şiddet-dalga boyu grafiği

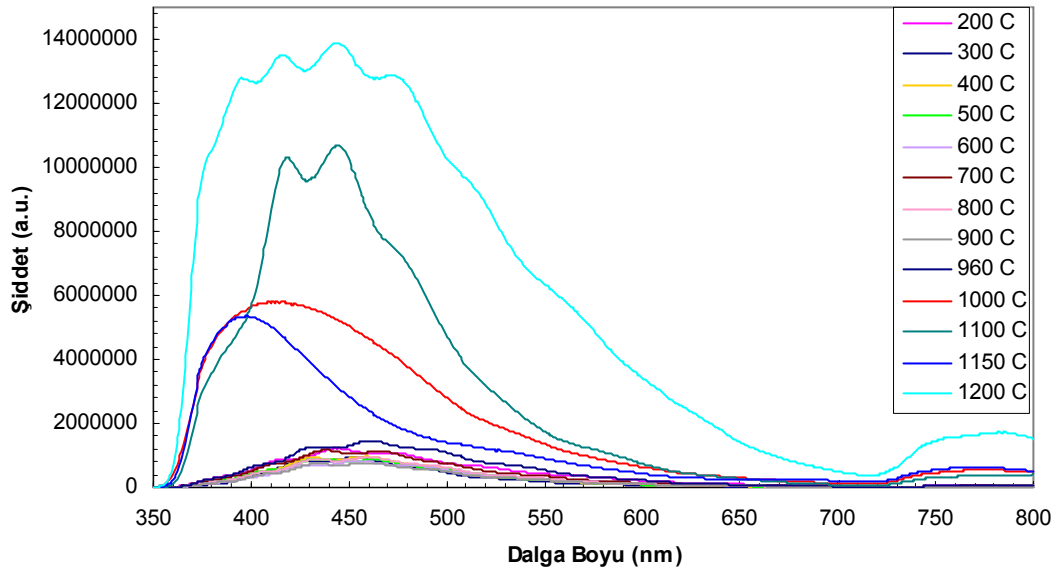


Şekil 4.29 1050° de tavlanan çoklu yapı-1 numunesinin 14K'den oda sıcaklığına kadar şiddet-dalga boyu grafiği

Şekil 4.30'da farklı dalga boyları arasında girişim saçaklarının incelenmesi sonucu elde edilen veriler gösterilmektedir. Girişim saçaklarında genlik önemlidir. Şekil 4.30 her tavlama sıcaklığında meydana gelen girişim saçaklarının genlik değerleri alınarak çizilmiştir. Girişim saçaklarının gözlenmesi tabakaların yeterli incelikte ve homojen olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak sıcaklık arttıkça girişim saçaklarının şiddetlerindeki artış ara yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığı arttıkça azaldığını göstermektedir. 460 nm-480 nm dalga boyu aralığının tavlama sıcaklığına göre değişimini gösteren eğride sıcaklık arttıkça şiddetin arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.30 Çoklu yapı-1 numunesinin tavlama sıcaklıklarına göre girişim saçaklarının genlik değerleri değişimi grafiği



Şekil 4.31 Çoklu yapı-1 numunesinin tavlama sıcaklıklarına göre oda sıcaklığında şiddet-dalga boyu grafiği

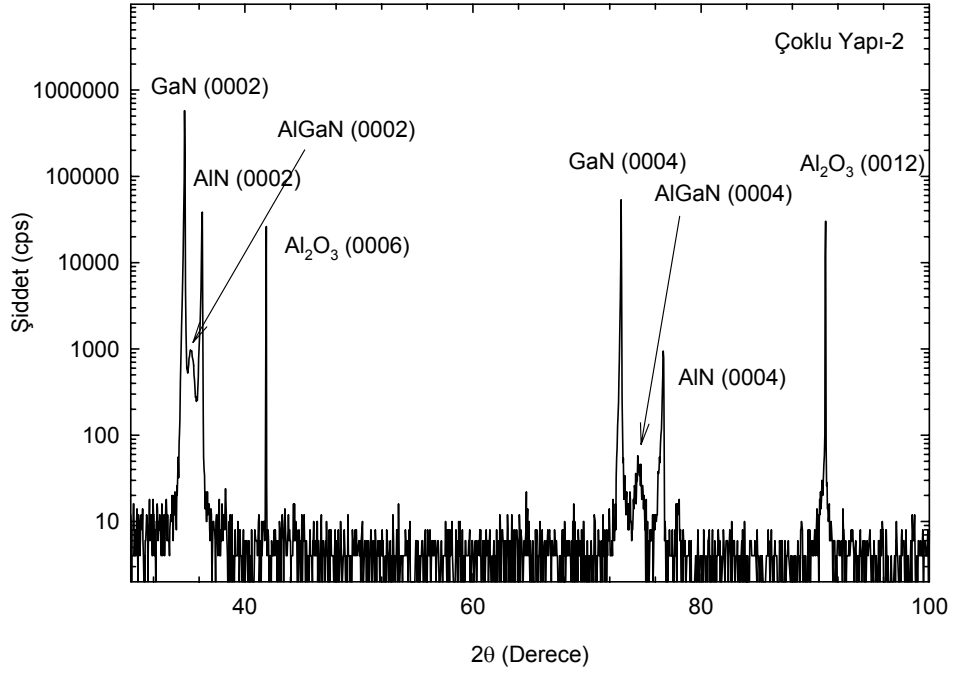
Pl ölçümlerinde tavlama işlemi süresince şiddetin her tavlama sonunda daha da arttığı Şekil 4.31’de görülmektedir. 200°C’den 1000°C’ye kadar şiddet artmış ve elde edilen pik yarılma göstermemiştir. Ancak yüksek sıcaklıklarda tavlama işlemleri sonucunda elde edilen piklerde Şekil 4.31’de görüldüğü gibi yarılmalar meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, numunenin yapısındaki kusurların 1000°C tavlama işlemine kadar azaldığını ancak daha yüksek sıcaklıklarda tekrar ortaya çıkıp arttığını göstermektedir.

4.3.2 Çoklu Yapı–2 Numunesinin Karakterizasyonu

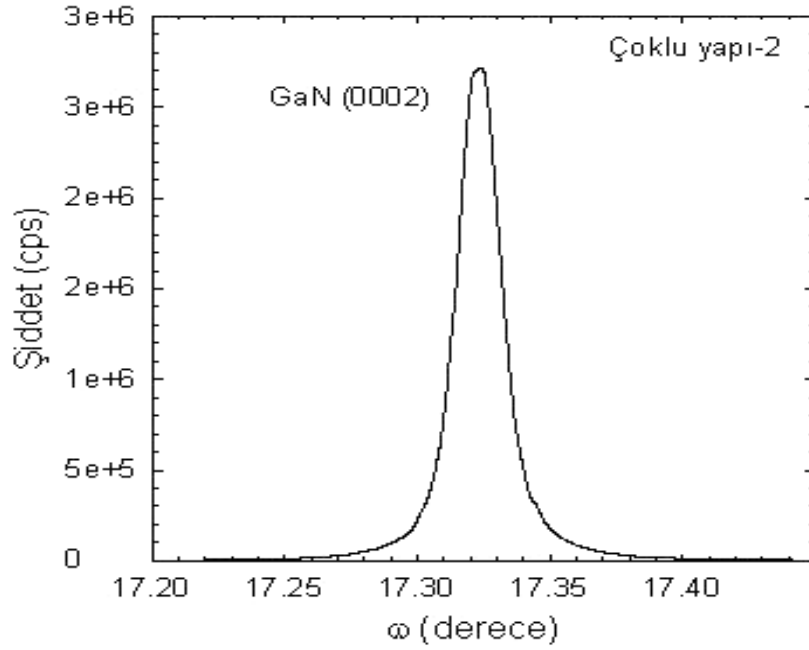
4.3.2.1 Çoklu Yapı–2 Numunesinin HR-XRD ile Karakterizasyonu

Çoklu yapı–2 numunesinin tavlama öncesi yüksek çözünürlüklü XRD taraması sonucu elde edilen 2θ grafiği Şekil 4.32’de verildi. Her pikin tabaka yansımaları, yüzey yönelimi ve yapıdaki bileşimlere ait pikler isimleriyle etiketlendi. Bu göre yapının literatürdeki yapılan çalışmalar dikkate alınarak değerlendirildiğinde büyümenin uygun olarak gerçekleştiği söylenebilir.

Çoklu yapı–2’in 2θ grafiğinin en yüksek piki (0002) GaN’dan gelmektedir (Şekil 4.32). (0002) ve (0004) düzlemlerinin yönelimlerine sırasıyla baktığımızda GaN, AlGa₃N, AlN pikleri 34,725°, 35,285°, 36,272° ve, 72,98367°, 74,280°, 76,674° açılarda gözlemlendi. Al₂O₃ pikleri ise (0006) ve (0012) yönelimlerinde sırasıyla 41,874° ve 90,891° açılarda gözlemlendi.



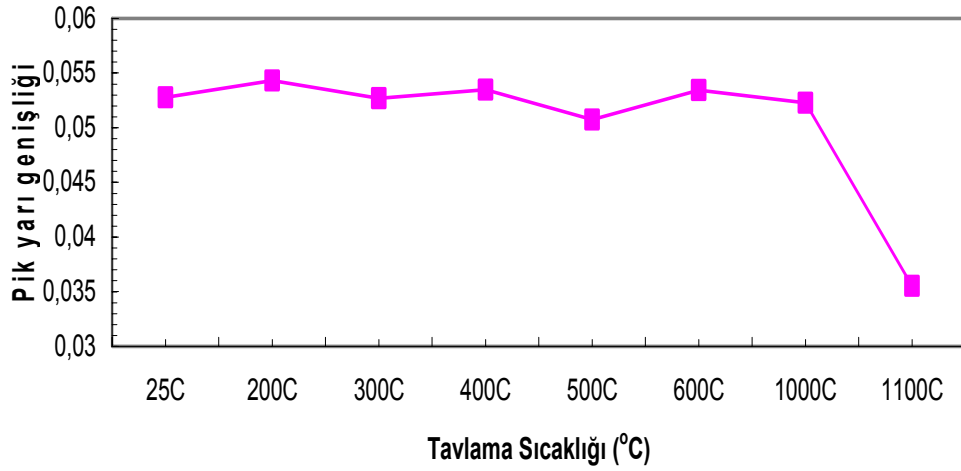
Şekil 4.32 Çoklu yapı-2 numunesinin 2θ grafiği



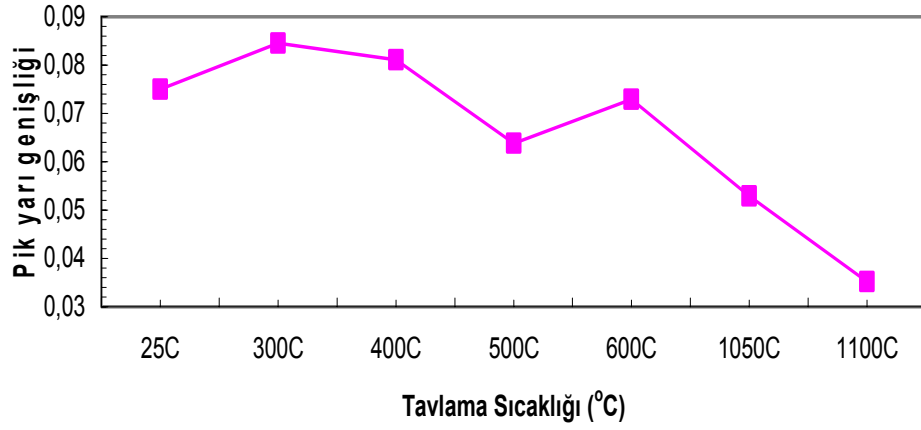
Şekil 4.33 Çoklu yapı-2 numunesinin GaN (0002) yöneliminin rocking (döndürme) taraması

Şekil 4.33’de çoklu yapı-2’nin yüksek çözünürlüklü XRD taramasının döndürme (rocking) grafiği verildi. Ölçümlerimizde pik yüksekliğinin yarı genişliği (FWHM) çoklu yapı-2’nin (0002) yönelimli GaN piki için $0,05279^\circ$ yani $70,7$ arcsec’dir. Literatürde GaN tabakalarının (0002) yönelimli döndürme eğrileri sonucu elde edilen tipik FWHM değeri $250\text{--}300$ arcsec civarındadır [40]. Bu değerlere göre numunenin (0002) yönelimli GaN yüzeylerinin kaliteli olduğu sonucuna varıldı.

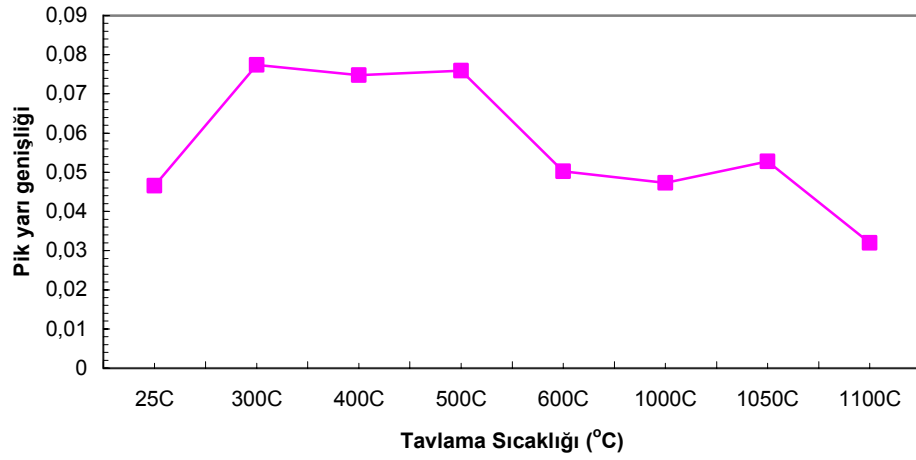
Farklı tavlama sıcaklıklarına göre elde edilen pik yarı genişliklerinin (FWHM) değişimi Şekiller 4.34, 4.35 ve 4.36’de verildi. Tavlama sonucunda kristal yapının daha iyiye doğru seyir takip etmesi beklentisine uygun olarak FWHM değerlerinin tavlama sıcaklığındaki artışa paralel olarak azaldığı tespit edildi. Bu ise yapının kristal kalitesinin iyileştiği anlamında değerlendirilmektedir.



Şekil 4.34 GaN’a ait $(\theta = 34,72^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi



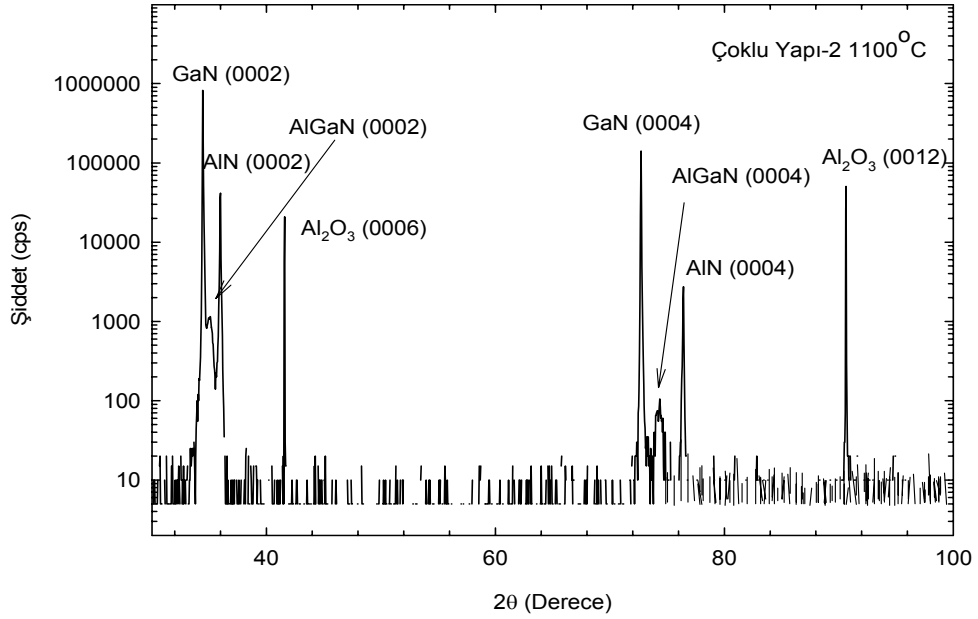
Şekil 4.35 AlN'a ait $(\theta = 36,27^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi



Şekil 4.36 GaN'a ait $(\theta = 72,98^\circ)$ pik yarı genişliğinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimi

Farklı tavlama sıcaklıklarına göre elde edilen pik yarı genişliklerinin (FWHM) grafikleri doğrultusunda en düşük FWHM değerleri, GaN'a ait $(\theta = 34,72^\circ)$ pikin yarı genişliği tavlama öncesi 0,05279 iken 1100°C'de tavlandıktan sonra

0,0355, AlN'a ait $(\theta = 36,27^\circ)$ pikin yarı genişliği tavlama öncesi 0,07503 iken 1100°C'de tavlandıktan sonra 0,0352 ve GaN'a ait $(\theta = 72,98^\circ)$ pikin yarı genişliği tavlama öncesi 0,04654 iken 1100°C'de tavlandıktan sonra 0,03196 olarak bulunmuştur. Pik genişlikleri azalırken 1100°C tavlama sonucunda Şekil 4.37'de de görüldüğü gibi pikler daha belirgin olarak gözlenmektedir.

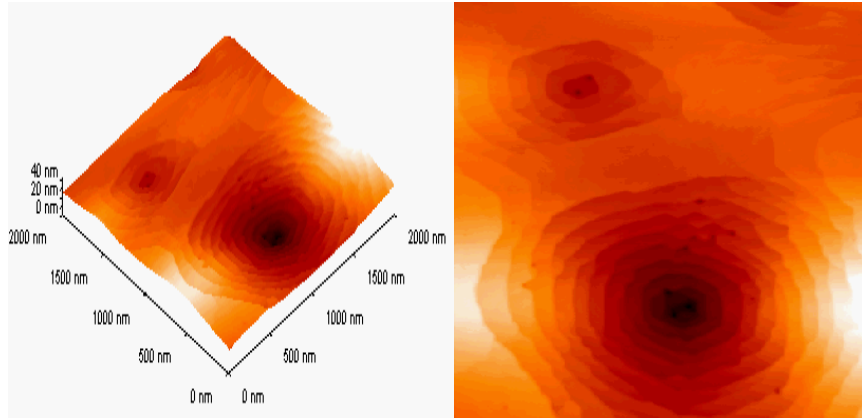


Şekil 4.37 Çoklu yapı-2 numunesinin 1100°C tavlama işleminden sonraki 2θ grafiği

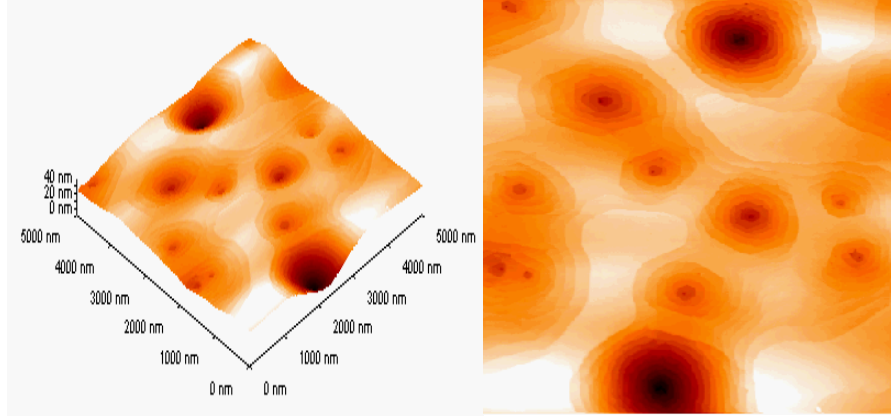
XRD ölçümleri sonucunda düşük tavlama sıcaklıklarında belirgin bir fark gözlenemezken yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça yani yapının büyütme sıcaklıklarına yaklaştıkça malzeme kalitesini attıran etkiler çoklu yapı-2'de de gözlenmektedir. Çoklu yapı-2 numunesi için 1100°C'lik tavlama işlemi malzeme kalitesini arttırmaktadır. Bu sıcaklıktan sonra 1150°C'de yapılan tavlama işlemi yapıdaki bileşimlere ait piklerin daha zor gözlenmesine sebep olmuştur.

4.3.2.2 Çoklu Yapı-2 Numunesinin AFM ile Karakterizasyonu

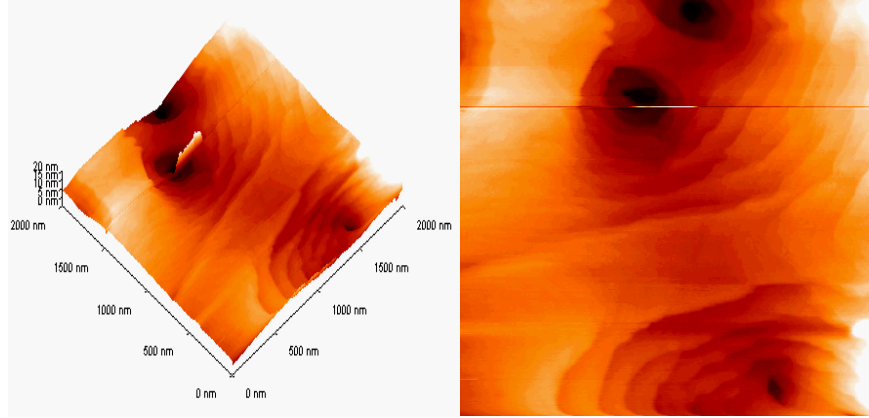
Şekil 4.38 ve Şekil 4.39 sırasıyla çoklu yapı-2 numunesinin en üst GaN tabakasının $4 \mu\text{m}^2$ ve $25 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntülerini göstermektedir. Her iki görüntüde de yüzey üzerinde stepler ve terasların yanı sıra derin çukurların olduğu gözlemlendi. Küçük tarama alanlı ($4 \mu\text{m}^2$) görüntülerde bu stepler ve çukurlar daha belirgin bir biçimde görüldü. Yüzey üzerindeki yaklaşık 60–80 nm genişlikli bu stepler ve teraslar temelde step-flow büyüme modunun baskın olduğunu öne sürmesine rağmen derin çukurlar büyümenin tam anlamıyla step-flow olmadığını açık bir biçimde göstermektedir. Büyük tarama alanlı görüntünün yüzey pürüzlüğünün büyük olması yüzey üzerindeki çukur yoğunluklarıyla ilişkilidir. Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da çoklu yapı-2 numunesinin tavlama işlemi öncesi AFM görüntüleri gösterilmektedir. Şekiller 4.40-4.51’de ise farklı sıcaklıklarda tavlanan çoklu yapı-2 numunesinin $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ ve $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ tarama alanlı AFM görüntüleri verilmektedir.



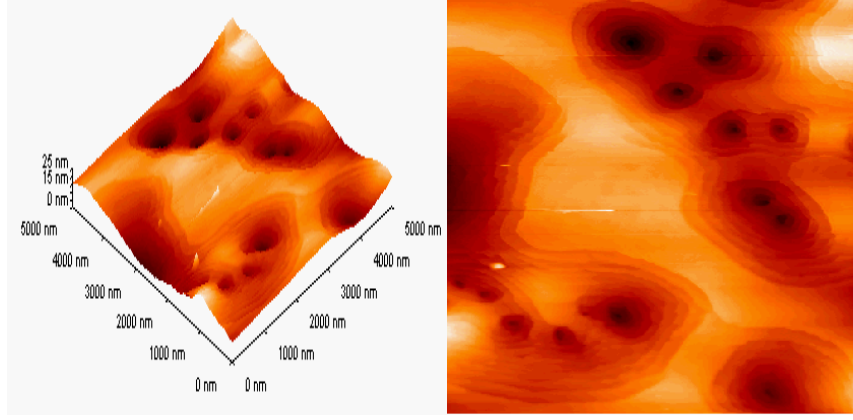
Şekil 4.38 Çoklu yapı-2 numunesinin tavlamadan önce $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 5,518 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



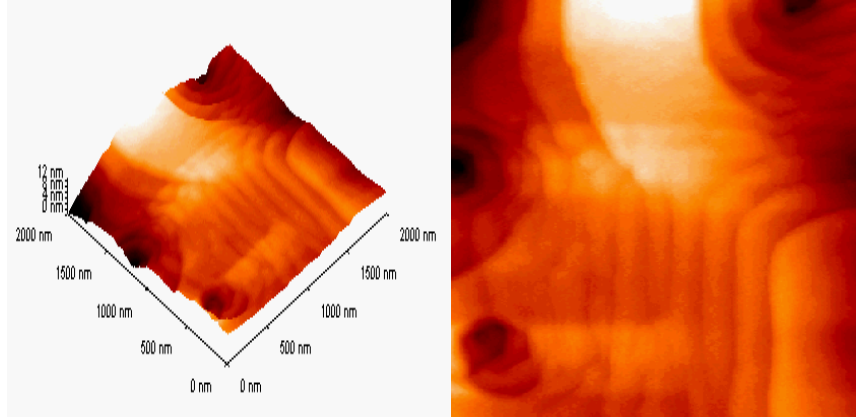
Şekil 4.39 Çoklu yapı-2 numunesinin tavlamadan önce $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 5,796 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



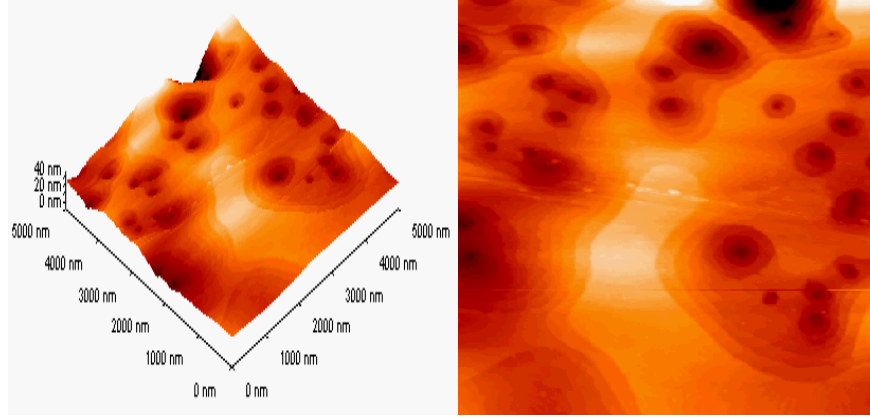
Şekil 4.40 Çoklu yapı-2 numunesinin 400°C tavlandıktan sonra görüntülenen $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ (rms değeri 2,157 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



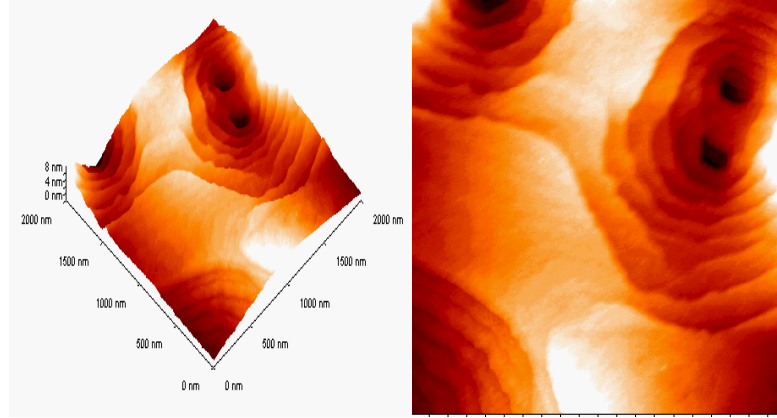
Şekil 4.41 Çoklu yapı-2 numunesinin 400°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 3,383 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



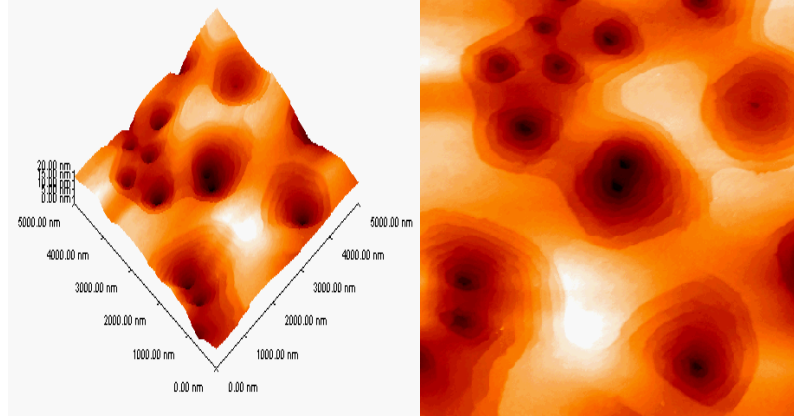
Şekil 4.42 Çoklu yapı-2 numunesinin 800°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 1,716 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



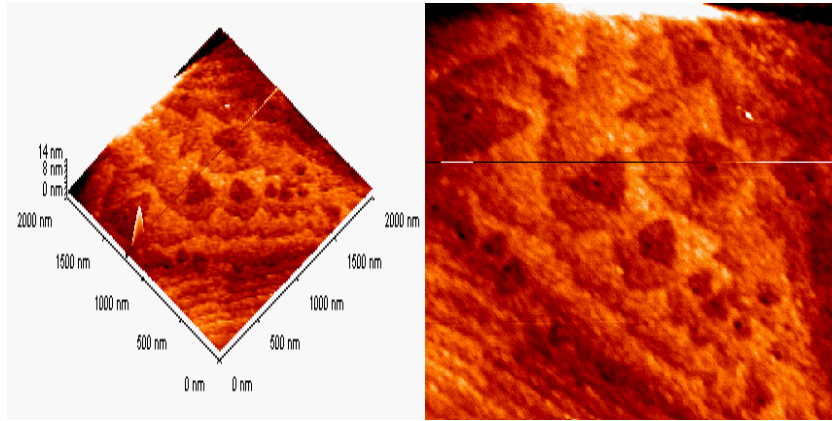
Şekil 4.43 Çoklu yapı-2 numunesinin 800°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 3,982 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



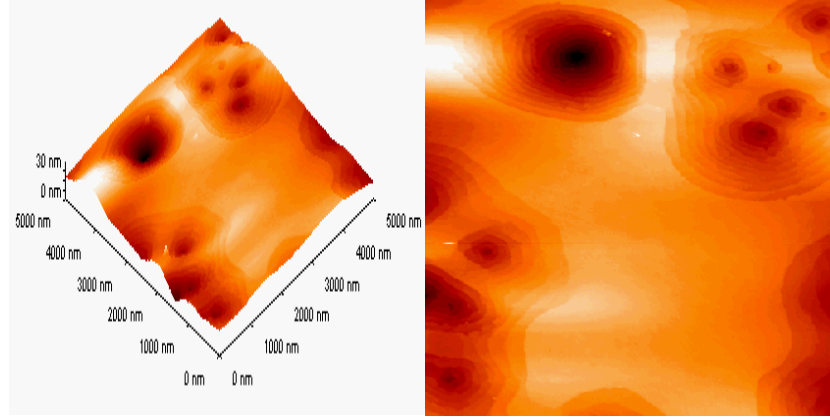
Şekil 4.44 Çoklu yapı-2 numunesinin 900°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 1,525 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



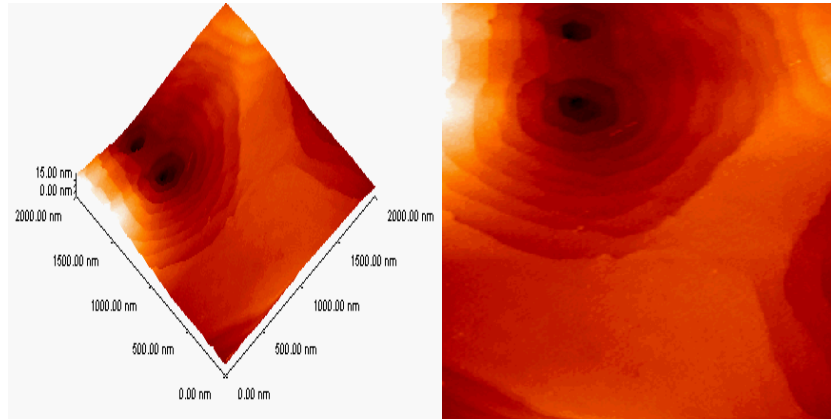
Şekil 4.45 Çoklu yapı-2 numunesinin 900°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 3,254 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



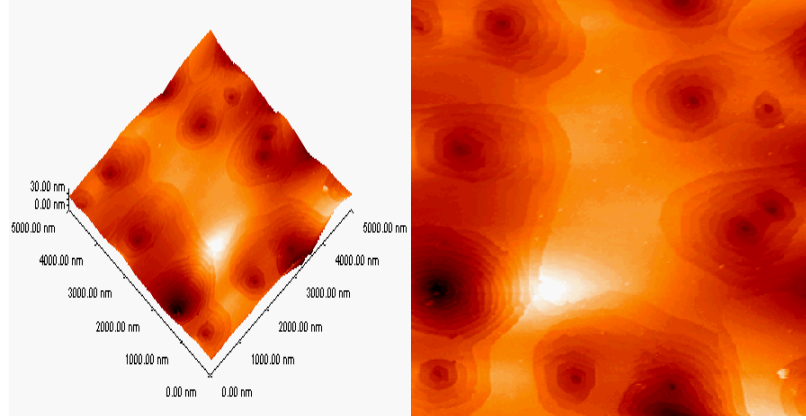
Şekil 4.46 Çoklu yapı-2 numunesinin 960°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 0,226 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



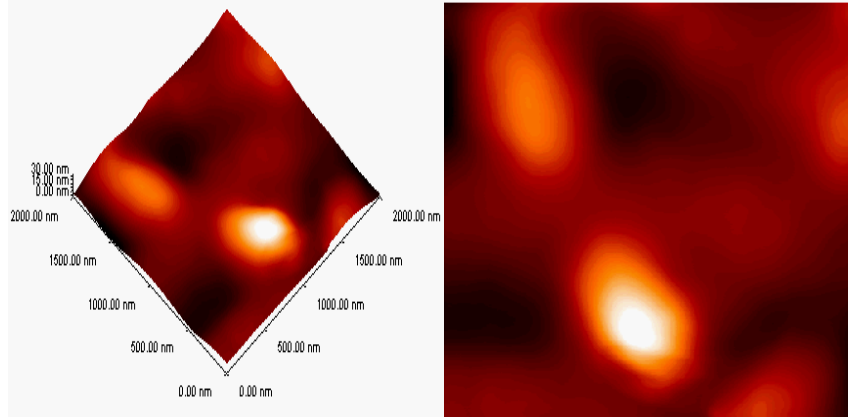
Şekil 4.47 Çoklu yapı-2 numunesinin 960°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 4,357 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



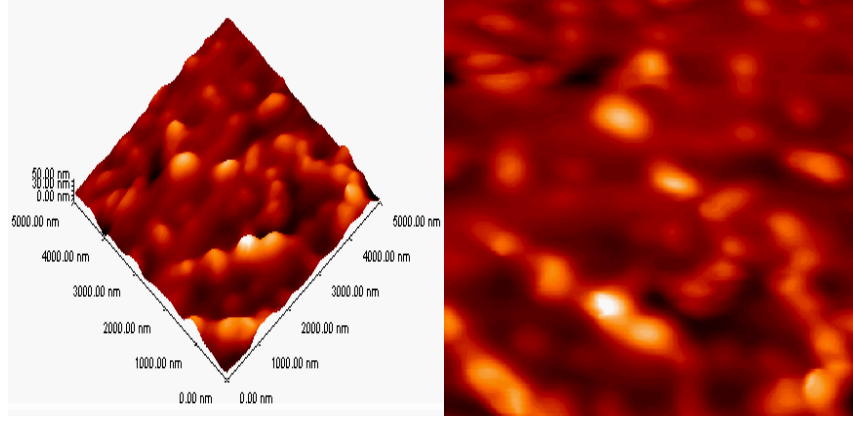
Şekil 4.48 Çoklu yapı-2 numunesinin 1000°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 2,359 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



Şekil 4.49 Çoklu yapı-2 numunesinin 1000°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 4,573 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri

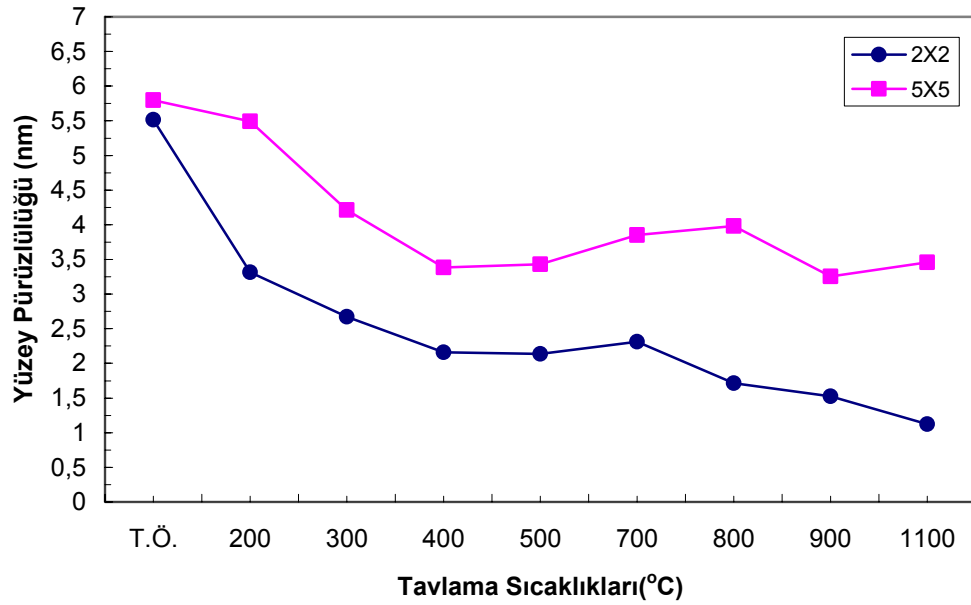


Şekil 4.50 Çoklu yapı-2 numunesinin 1150°C tavlandıktan sonra görüntülenen 2x2 μm^2 (rms değeri 5,156 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri



Şekil 4.51 Çoklu yapı-2 numunesinin 1150°C tavlandıktan sonra görüntülenen 5x5 μm^2 (rms değeri 7,104 nm) tarama alanlı AFM yüzey görüntüleri

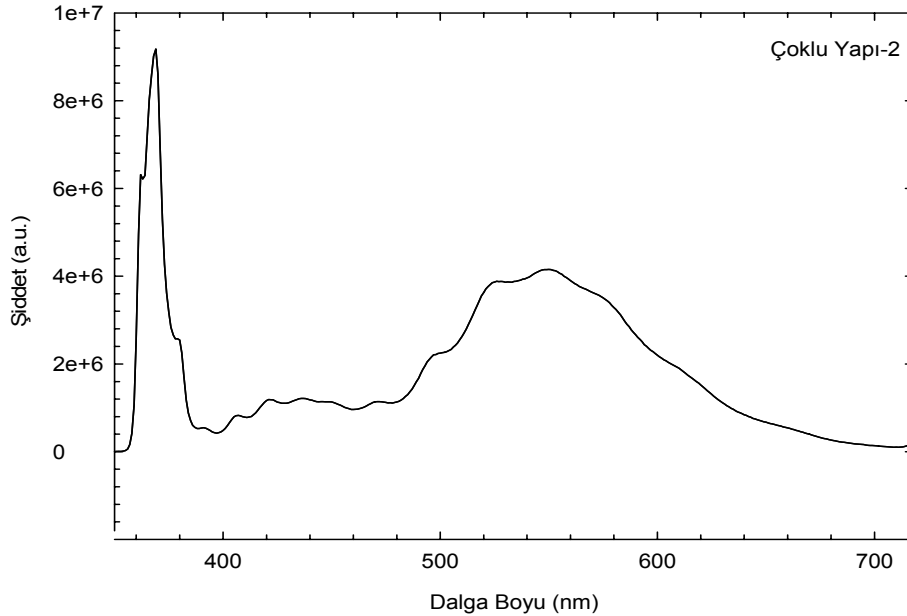
Yüzey pürüzlülüğünün bir göstergesi olan rms değerleri, çoklu yapı-2'nin AFM ölçümleri sonucunda elde edilen 4 μm^2 ve 25 μm^2 tarama alanlı görüntülerde verilmiştir.



Şekil 4.52 Çoklu Yapı-2 numunesi için yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre grafiği

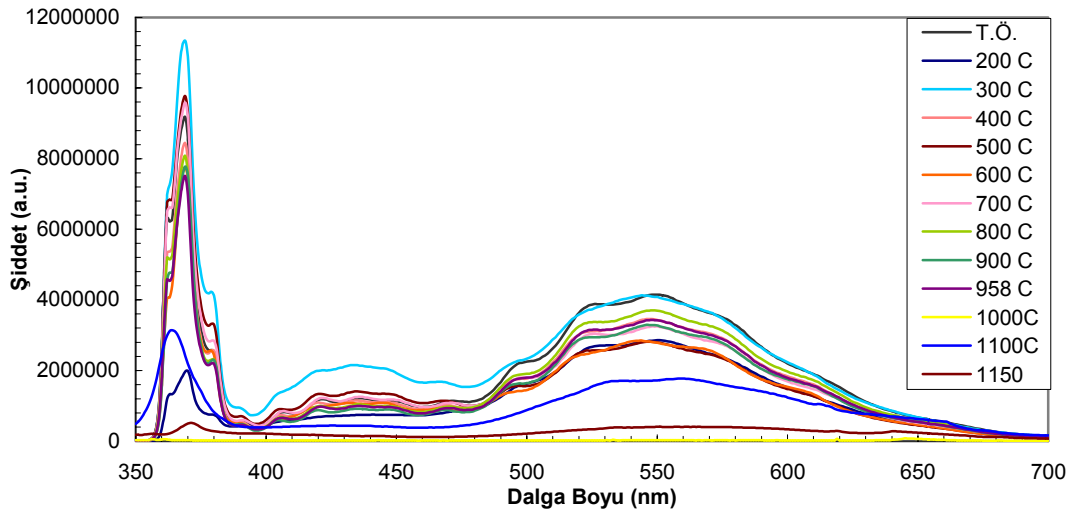
Şekil 4.52’de yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre azaldığı gözlenmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalarda önceden de belirtildiği gibi N₂ ve argon (Ar) ortamında tavlanan GaN filmlerin yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre monomatik olarak azaldığı belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu değişim örneğin termal dayanıklılığına ve yüzey kusurlarının azalmasına atfedilmektedir [36]. Bu tür özellikler, önceki araştırmalardan da bilindiği üzere daha iyi elektriksel ve optiksel özelliklere (sızıntı veya kaçak akımlarının azalması, yüksek mobilite, iletim ve duyarlılık) yol açmaktadır. Daha iyi elektriksel ve optiksel özellikler ise cihaz performansını olumlu yönde etkilemektedir. Çoklu yapı-2 numunesinde 1100°C’ye kadar beklenildiği gibi rms değerleri düşüş göstermiştir. 1100°C’den sonraki tavlamada ise yüzeydeki pürüzlülük artış göstermiştir. Son tavlama sıcaklığı olan 1150°C’deki görüntülerde ise pürüzlü bir yapı gözlenmektedir.

4.3.2.3 Çoklu Yapı-2 Numunesinin PL ile Karakterizasyonu



Şekil 4.53 Çoklu yapı-2 numunesinin tavlamadan önce oda sıcaklığında (300 K) ölçülen PL grafiği

Yaklaşık 3,4 eV'daki (~365 nm) keskin pik, çoklu yapı-2 numunesindeki wurtzite GaN tabakasının enerji bant aralığına karşılık geldiği görüldü. Elde edilen bu sonuç literatürdeki wurtzite GaN'ün 3,42 eV (300 K) bant aralığı enerjisi ile uyumludur [3]. Yaklaşık 550 nm'de görülen sarı-yeşil emisyon piki iletim bant kenarının aşağısında yaklaşık 2,25 eV'ta derin akseptör seviyeleri ile ilişkilendirilebilir [3].



Şekil 4.54 Çoklu yapı-2 numunesinin tavlama sıcaklıklarına göre oda sıcaklığında şiddet-dalga boyu grafiği

Şekil 4.54'de çoklu yapı-2 numunesinin oda sıcaklığından 1150°C'ye kadar tavlama sonucu ölçülen PL spektrumları verilmiştir. 200°C'den 960°C'ye kadar yapılan tavlama işlemlerinde PL ölçümlerinde elde edilen pikler yüksek şiddete sahipken, 1000°C'den sonraki PL ölçümlerinde oldukça düşük değerler elde edilmiştir. Çoklu yapı-2 numunesinin içerdiği kusurların PL spektrumu ile tartışmasız ilişkilendirilebilmesi için 960°'den sonraki tavlama sıcaklıklarında ölçümler düşük sıcaklıklarda yapılmış ancak lüminesans karakterinin sıcaklıkla değişimi beklenildiği gibi gözlenememiştir. Düşük sıcaklıkta yüksek şiddetli pikler gözlenememiştir. Bunun sebebi olarak numunenin yüksek sıcaklıklarda fonon yapısında meydana gelen değişimler gösterilebilmektedir.

5.SONUÇLAR

Bu çalışmada Metal Organik Kimyasal Buhar Birikim (MOCVD) tekniğiyle safir alttaş üzerine büyütülen çoklu yapılı $Al_xGa_{1-x}N$ ($x=0.43$) yarıiletken ince filmlerin ısı işlem altında yapısal ve optik özellikleri incelendi. Malzemenin yapısal ve optiksel özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı (XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve fotoluminesans (PL) sistemleri kullanılarak belirlendi.

İncelenen çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 örnekleri $200^{\circ}C$ 'den $960^{\circ}C$ 'ye $100^{\circ}C$ 'lik periyotlarla hızlı termik tavlama sisteminde 20 dakika tavlandı. Kullanılan hızlı termik tavlama sisteminin maksimum sıcaklığı $960^{\circ}C$ olduğu için $1000^{\circ}C$ 'den sonraki tavlama Lenton marka Furnace (fırın) sisteminde gerçekleştirildi. Çoklu yapı-1 numunesi $1000^{\circ}C$ 'den $1200^{\circ}C$ 'ye $50^{\circ}C$ 'lik artışlarla fırın sisteminde 30 dakika tavlandı. Çoklu yapı-2 numunesi ise $1000^{\circ}C$ 'den $1150^{\circ}C$ 'ye $50^{\circ}C$ 'lik periyotlarla fırın sisteminde 30 dakika tavlandı. Son tavlama sıcaklığı iki numunenin büyütme şartları dikkate alınarak belirlendi. Her iki numune için tavlama öncesi ve sonrasındaki her periyot için karakterizasyon ölçümleri yapılarak analiz edildi.

Yüksek çözünürlüklü XRD taraması sonucu elde edilen her pikin tabaka yansımaları, yüzey yönelimi ve yapıdaki bileşimlere ait pikler isimleriyle etiketlendi. Buna göre yapıların, literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak değerlendirildiğinde büyümelerinin uygun olarak gerçekleştiği söylenebilmektedir. XRD taramasının döndürme (rocking) pikinin yüksekliğinin yarı genişliği (full width half maximum, FWHM), pik yüksekliği ve pik alanı literatürde yaygın olarak bilinen yüzey kalitesini gösteren özelliklerdir. FWHM değeri ne kadar küçük olursa yapının yüzey kalitesi o kadar iyi olur. Bu bilgi göz önüne alınarak yapılan tavlama deneylerinde FWHM değerleri incelendi.

Farklı tavlama sıcaklıklarına göre elde edilen pik yarı genişliklerinin (FWHM) değişimi şekillerde gösterildi. Tavlama sonucunda kristal yapının daha iyiye doğru seyir takip etmesi beklentisine uygun olarak FWHM değerlerinin tavlama sıcaklığındaki artışa paralel olarak azaldığı tespit edildi. Bu ise yapının kristal kalitesinin iyileştiği anlamında değerlendirilmektedir.

XRD ölçümleri sonucunda düşük tavlama sıcaklıklarında belirgin bir fark gözlenemezken yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça yani yapının büyütme sıcaklıklarına yaklaştıkça malzeme kalitesini attıran etkiler gözlenmektedir. Çoklu yapı-1 numunesi için 1050°C'lik tavlama işlemi malzeme kalitesini arttırmaktadır. Çoklu yapı-2 numunesi için ise 1100°C'lik tavlama işlemi malzeme kalitesini arttırmaktadır. Bu sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıklarda yapılan tavlama işlemleri yapılarıdaki bileşimlere ait piklerin daha zor gözlenmesine sebep olmuştur.

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) sonuçları ile çoklu yapı-1 numunesinin AlGaN yüzeyinin step-flow büyümeye ve atomiksel düzlükte bir yüzeye sahip olduğunu, çoklu yapı-2 yüzeyinin de pürüzsüz olduğu, fakat bunun yanında yapının yüzeyinde ve ara tabakalardan kaynaklanan bazı kusurların da mevcut olduğu gözlemlendi.

Literatürde yapılan benzer bir çalışmada da N₂ ve argon (Ar) ortamında tavlanan GaN filmlerin yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığına göre monolitik olarak azaldığı belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen bu değişim örneğin termal dayanıklılığına ve yüzey kusurlarının azalmasına atfedilmektedir [35]. Bu tür özellikler, önceki araştırmalardan da bilindiği üzere daha iyi elektriksel ve optiksel özelliklere (sızıntı veya kaçak akımlarının azalması, yüksek mobilite, iletim ve duyarlılık) yol açmaktadır. Daha iyi elektriksel ve optiksel özellikler ise cihaz performansını olumlu yönde etkilemektedir.

Çoklu yapı-1 numunesinde 960°C'ye kadar beklenildiği gibi rms değerleri düşüş göstermiştir. 960°C'den sonraki tavlamalarda ise yüzeydeki pürüzlülük artış göstermiştir. 1200°C'deki görüntülerde ise mozaik bir yapı gözlenmektedir. Çoklu yapı-2 numunesinde 1100°C'ye kadar beklenildiği gibi rms değerleri düşüş

göstermiştir. 1100°C'den sonraki tavlama da ise yüzeydeki pürüzlülük artış göstermiştir. Son tavlama sıcaklığı olan 1150°C'deki görüntülerde ise pürüzlü bir yapı gözlenmektedir.

Çoklu yapı-1 ve çoklu yapı-2 numunelerinin oda sıcaklığında (300K) ölçülen fotoluminesans (PL) spektrumları, yapılarıdaki AlGaN yasak enerji bant aralığı uyarılma foton enerjisinden (~4,8 eV) yüksek olduğundan çoklu yapı-2'nin GaN tabakası hariç PL spektrumunda banttandır-geçişlere ilişkin herhangi bir ışımaya gözlemlenemedi. Ayrıca çoklu yapı-2'nin yaklaşık 3,4 eV enerjili GaN PL spektrumu ise literatürdeki wurtzite GaN'ün enerji bant aralığına karşılık geldiği görüldü [3]. Farklı dalga boyları arasında girişim saçaklarının incelenmesi sonucu elde edilen veriler gösterilmektedir. Girişim saçaklarında genlik önemlidir. Her tavlama sıcaklığında girişim saçaklarının gözlenmesi tabakaların yeterli incelikte ve homojen olduğunu göstermektedir. Sıcaklık arttıkça girişim saçaklarının şiddetlerindeki artış ara yüzey pürüzlülüğünün tavlama sıcaklığı arttıkça azaldığını göstermektedir.

Çoklu yapı-1 numunesinin Pl ölçümlerinde tavlama işlemi süresince şiddetin her tavlama sonunda daha da arttığı görülmektedir. 200°C'den 1000°C'ye kadar şiddet artmış ve elde edilen pik yarılma göstermemiştir. Ancak yüksek sıcaklıklarda tavlama işlemleri sonucunda elde edilen piklerde yarılmalar meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, numunenin yapısındaki kusurların 1000°C tavlama işlemine kadar azaldığını ancak daha yüksek sıcaklıklarda tekrar ortaya çıkıp arttığını göstermektedir. Çoklu yapı-2 numunesinin oda sıcaklığından 1150°C'ye kadar tavlama işlemi sonucunda elde edilen PL spektrumları incelendiğinde 200°C'den 960°C'ye kadar yapılan tavlama işlemlerinde Pl ölçümlerinde elde edilen pikler yüksek şiddete sahipken, 1000°C'den sonraki Pl ölçümlerinde oldukça düşük değerler elde edilmiştir. Aynı zamanda düşük sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde de beklenen sonuçlar elde edilememiştir.

Yapılan bu karakterizasyonlardan;

- Her iki AlGaIn süperörgü yapılarının iyi kalitede ve cihaz uygulamalarına uygun yapıda büyütüldüğü,
- Düşük tavlama sıcaklıklarında belirgin farklar gözlenemezken yüksek sıcaklıklarda yapıda değişimler meydana geldiği,
- Isıl işlem altında yapısal ve optiksel özelliklerde büyütme sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda iyileşme gözleendiği,
- Büyütme sıcaklığından yüksek tavlama sıcaklıklarında yapıda bozulmalar meydana geldiği,

sonuçlarına varıldı.

6.KAYNAKLAR

- [1] Strite, S., Morkoç, H., “GaN, AlN and InN: A Review”, *Journal of Vacuum Science and Technology*, B10: 1237 (1992).
- [2] Orton, J. W., Foxon, C. T., “Group III Nitride Semiconductors for Short Wavelength Light-Emitting Devices”, *Rep. Prog Phys.*, 61: 1-75 (1998).
- [3] Morkoç, H., “ Nitride semiconductors and devices”, Hull, R., Osgood, Jr., R.M., Sakaki, H., Zunger, A., *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Germany, 1-39, 45-80, 83-141, 163, 332-336 (1999).
- [4] Pankove, J.I., Miller, E.A., Berkeyheiser, J.E., “GaN electroluminescent diodes”, *RCA Rev.*, 32: 383 (1971).
- [5] Amano, H. et. al., “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer”, *Appl. Phys. Lett.*, 48: 353 (1986).
- [6] Nakamura, S., “GaN growth using GaN buffer layer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30: L1705 (1991).
- [7] Amano H. et al., “P-type conduction in Mg-doped GaN treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28: L2112 (1989).
- [8] Morkoç, H., Cingolani, R., Gil, B., “Polarization effects in nitride semiconductor and device structures”, *Springer-Verlag*, Germany, 3: 97 (1999).
- [9] Strite, S., Morkoç, H., “GaN, AlN and InN: A Review”, *Journal of Vacuum Science and Technology*, B10: 1237 (1992).

- [10] Omnès, F., Marenco, N., Beaumont, B., Ph. de Mierry, Monroy, E., Calle, F., Muñoz, E., “Metalorganic vapor-phase epitaxy-grown AlGa_N materials for visible-blind ultraviolet photodetector applications,” *J. Appl. Phys.*, 86: 5286-5292 (1999).
- [11] Wilson J., Hawkes J. F. B., “Optoelectronics”, Türkçesi Okur İ., Değişim Yayınları, Adapazarı, 2000
- [12] Morgan D. V., Moses A. J. , “III-V Quantum System Research”, Peter Peregrinus Ltd, London, 1995
- [13] <http://www.istanbul.edu.tr/fen/fizik/ssp/calismakonulari/lds/lds.htm>
- [14] Tecimer, H. “Al_{0,43}Ga_{0,57}N Süperörgülerinin Yapısal Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi“, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Ankara, (2007)
- [15] SINGLETON J. , “bant Theory and Electronic Properties of Solids“, Oxford University Press, Great Britain, 2003
- [16] Gezci S., “Katıhal fiziği”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, Gümüşsuyu, 32-38 (1992).
- [17] Razeghi, M., “Optoelectronic devices based on III–V compound semiconductors which have made a major scientific and technological impact in the past 20 years”, *IEEE J.Select. Topics Quant. Electron.*, 6: 1344-1354 (2000).
- [18] Pankove, J. I., “Ga_N: from fundamentals to applications”, *Mat. Sci. Engin.*, B61-62: 305-309 (1999).
- [19] Morkoç, H., Strite, S., Gao, G. B., Lin, M. E., Sverdlov, B., Burns, M., “Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies”, *J. Appl. Phys.*, 76: 1363-1398 (1994).

- [20] Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y., “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer”, *Appl. Phys. Lett.*, 48: 353-355 (1986).
- [21] Kato, Y., Kitamura, S., Hiramatsu, K., Sakai, N., “Selective growth of wurtzite GaN and $Al_xGa_{1-x}N$ on GaN/sapphire substrates by metalorganic vapor phase epitaxy”, *J. Cryst. Growth*, 144: 133-140 (1994).
- [22] Kung, P., Walker, D., Hamilton, M., Diaz, J., Razeghi, M., “Lateral epitaxial overgrowth of GaN films on sapphire and silicon substrates”, *Appl. Phys. Lett.*, 74: 570-572 (1999).
- [23] Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S., Iwasa, N., Yamada, T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto, Y., “Characteristics of InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes” *Appl. Phys. Lett.*, 68: 3269-3271 (1996).
- [24] Kuramata, A., Kubota, S., Soejima, R., Domen, K., Horino, K., Tanahashi, T., “Room-temperature continuous wave operation of InGaN laser diodes with vertical conducting structure on SiC substrate”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37: L1373-1379 (1998).
- [25] Amano, H., Sawaki, N., Akasaki, I., Toyoda, Y., “Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer”, *Appl. Phys. Lett.*, 48: 353-355 (1986).
- [26] Nakamura, S., Mukai, T., Senoh, M., “Candela-Class High-Brightness InGaN/AlGaN Double-Heterostructure Blue-Light-Emitting Diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 64: 1687–1689 (1994).
- [27] Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S., Iwasa, N., Yamada, T., Matsushita, T., Kiyoku, H., Sugimoto Y.,”Characteristics of InGaN Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 68: 3269–3271 (1996).

- [28] Morkoç, H. Botchkarev, A., Salvador, A. et. al., “GaN based III-V nitrides by molecular beam epitaxy”, *J. Cryst. Growth*, 150: 887-891 (1995).
- [29] Zhou, L., Smith, J. D., Storm, D. F., Katzer, D. S., Binari, S. C., and Shanabrook, B. V., “Effect of Al/N flux ratio during nucleation layer growth on the microstructure of GaN films grown by MBE”, *Appl. Phys. Lett.*, 88: 011916 (2006).
- [30] Miyoshi, M., Egawa, T., Ishikawa, H., Asai, A. I., Shibita, T., Tanaka, M., and Oda, O., “Nanostructural characterization and two-dimensional electron-gas properties in high-mobility AlGa_N/AlN/GaN heterostructures grown on epitaxial AlN/sapphire templates”, *J. Appl. Phys.*, 98: 063713 (2005).
- [31] Arulkumaran, S., Egawa, T., Ishikawa, H., and Jimbo, T., “Characterization of different-Al-content Al_xGa_{1-x}N/GaN hetrostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire”, *J. Vac. Sci. Technol.*, B21: 2 (2003).
- [32] Wilson J., Hawkes, J.F.B., “Optoelektronik”, Okur İ., *Değişim yayınları*, Adapazarı, 311-325 (2000).
- [33] Cheal, R.L., Yong, J.P., “Characteristics of UV photodetector fabricated by Al_{0,3}Ga_{0,7}N/ GaN heterostructure”, *J. Cryst. Growth*, 252: 51-57 (2003).
- [34] http://www.jobinyvon.com/usadivisions/OSD/applications/104_PL_of_Semiconductors.pdf
- [35] Gong, J. R., Liao, W. T., Hsieh, S. L., Lin, P. H., Tsai, Y. L., “Strain-induced effect on the Al incorporation in AlGa_N films and the properties of AlGa_N/GaN heterostructures grown by metalorganic chemical vapor deposition”, *Journal of Crystal Growth*, 249: 32 (2003).
- [36] J. C. Zolper, M. Hagerott Crawford, and A. J. Howard, J. Ramer and S. D. Herse, “Morphology and photoluminescence improvements from high-temperature rapid thermal annealing of GaN”, *Appl. Phys. Lett.*, 68, 2 (1996)

- [37] Reshchikov, M. A., Morkoç H., “Luminescence properties of defects in GaN”, *J. Appl. Phys.*, 97 (061301): 6-7 (2005).
- [38] Fälth, J. F., Gurusinghe, M. N., Liu X. Y., Andersson T. G., Ivanov, I. G., Monemar, B., Yao, H. H., Wang, S. C., “Influence of dislocation density on photoluminescence intensity of GaN”, *J. Cryst. Growth*, 278: 406-410 (2005).
- [39] Look, D. C., Reynolds, D. C., Jones, K. L., Kim, W., Aktaş, Ö., Botchkarev, A., Salvador, A., Morkoç, H., “Electrical and optical properties of semi-insulating GaN”, *Materials Science and Engineering*, B44: 423-426 (1997).
- [40] Bai, J., Wang, T., Comming, P., Parbrook, P. J., David, J. P. R., Cullis, A. G., “Optical properties of AlGaN/GaN multiple quantum well structure by using a high-temperature AlN buffer on sapphire substrate”, *J. Appl. Phys.*, 99 (023513): 2-3 (2006).