

## In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN Heteroyapılarının Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD) Yöntemiyle Yapısal Karakterizasyonu

Sabit KORCAK<sup>1\*</sup>, Süleyman ÖZÇELİK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Temel Bilimler Bölümü, 08, Artvin

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Fotonik Bölümü, 06, Ankara

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-1140-6391>,

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-3761-371>

\*Sorumlu yazar: skorcak@artvin.edu.tr

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 24.07.2025

Kabul tarihi: 23.11.2025

Online Yayınlanma: 15.06.2026

#### Anahtar Kelimeler:

MOCVD

Yarıiletken büyütme

InGaN/GaN

GaN

X-Işını kırınımı

Kristal kusurlar

### ÖZ

Bu çalışmada; elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde yaygın olarak kullanılan In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN çoklu kuantum kuyu (MQWs) LED kristal yapısının büyütülmesi hedeflenmiştir. Yapı, LED uygulamalarında kullanılmak üzere Bilkent Üniversitesi laboratuvarlarında, metal organik buhar fazı biriktirme (MOCVD) yöntemi ile bir safir (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüştür. Büyütülen yapı; 100 nm kalınlığında, düşük sıcaklıkta büyütülen GaN nucleation tabakası, 700 nm kalınlığında yüksek sıcaklıkta büyütülmüş GaN tampon tabakası, 250 nm kalınlığında n-tipi GaN tabakası, 5 çift (In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN) MQW yapısı ve 200 nm kalınlığında p-tipi GaN üst tabakadan oluşmaktadır. Bu katmanlar, c-düzlemine (0001) hizalanmış, 330 µm kalınlığındaki safir alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüştür. Büyütülen yapı; 100nm kalınlığında düşük sıcaklıklı GaN nucleation tabaka, 700nm kalınlığında yüksek sıcaklıklı GaN tampon tabaka, 250nm kalınlığında n-tipi GaN tabaka, 5x(In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN) MQW tabaka ve 200nm kalınlığında p-tipi GaN üst tabakadan oluşmaktadır. Bu katmanlar (0001) c-düzlemleri 330µm kalınlıklı safir alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüştür. Yapının yapısal karakterizasyonu yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alttaşın simetrik (002) ve (004) yansımaları üzerine ölçülen Rocking eğrileri, hem dinamik hem de kinematik kırınım teorileri temelinde LEPTOS simülasyon programı kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca ters uzay haritalama (Reciprocal Space Mapping, RSM) analizi de gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, yapıdaki tabakaların gerilim (strain) altında olduğu hem rocking eğrileri hem de ters uzay haritası ile doğrulanmıştır. Katmanların çok ince olması nedeniyle asimetrik düzlem yansımaları gözlenememiş, ancak simetrik (002) ve (004) düzlem yansımaları net bir şekilde elde edilmiştir.

## Structural Characterization of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN Heterostructures by High-Resolution X-Ray Diffraction (HR-XRD)

### Research Article

#### Article History:

Received: 24.07.2025

Accepted: 23.11.2025

Published online: 15.06.2026

#### Keywords:

MOCVD

Semiconductor growth

InGaN/GaN

GaN

### ABSTRACT

In this study, the growth of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN multiple quantum well (MQW) LED crystal structures, which are widely used in the fabrication of electronic and optoelectronic devices, was targeted. The structure was epitaxially grown on a sapphire (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) substrate using the metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) method at the laboratories of Bilkent University for potential LED applications. The grown structure consists of a 100 nm thick low-temperature GaN nucleation layer, a 700 nm thick high-temperature GaN buffer layer, a 250 nm thick n-type GaN layer, five pairs of

( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ) MQW layers, and a 200 nm thick p-type GaN top layer. These layers were epitaxially grown on a 330  $\mu\text{m}$  thick sapphire substrate oriented along the c-plane (0001). The structural characterization of the grown sample was carried out using high-resolution X-ray diffraction (HR-XRD). Rocking curves measured around the symmetric (002) and (004) reflections of the substrate were modeled using the LEPTOS simulation software, based on both dynamic and kinematic diffraction theories. Additionally, reciprocal space mapping (RSM) analysis was performed. The results confirmed that the layers within the structure are under strain, as verified by both the rocking curves and the reciprocal space maps. Due to the very thin nature of the layers, asymmetric plane reflections could not be observed; however, clear symmetric (002) and (004) reflections were obtained.

**To Cite:** Korcak S., Özçelik S.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  Heteroyapılarının Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı (HR-XRD) Yöntemiyle Yapısal Karakterizasyonu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2026; 9(3): 1585-1600

## 1. Giriş

Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge), doğada bulunan temel elementer yarıiletkenlerdir ve özellikle microchip üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanısıra ikili bileşik yarıiletkenler (örneğin indiyum fosfat-InP ve galyum arsenik-GaAs), üçlü (örneğin AlGaAs) ve dörtlü alaşımlar (örneğin InGaAlAs) da elektronik ve optoelektronik cihazların üretilmesinde önemli yapıtaşlarıdır. Ancak bu yarıiletkenlerin doğada saf halde bulunmaları mümkün değildir. Bu nedenle, yüksek teknoloji gerektiren yapay kristal büyütme teknikleri kullanılarak laboratuvar ortamında üretilmeleri gerekmektedir.

Günümüzde epitaksiyel olarak tabaka-tabaka büyütülmüş yarıiletken ince filmler, mikro elektronik teknolojisinde, üniversite ve diğer araştırma birimlerinde teknolojik uygulamalara sahiptirler. Bu tür yarıiletken kristalleri yüksek kalitede büyütme, üretme ve geliştirmek; Moleküler Demetle Kristal Büyütme (MBE), Kimyasal Buhar Birikim (CVD) ve Metal Organik Buhar Faz Birikimi (MOCVD) sistemi ile mümkündür. MBE tekniği, büyütme sırasında kimyasal reaksiyon gerçekleşmemesi ve yüksek kontrol imkânı sunması nedeniyle en gelişmiş ve hassas tekniklerden biri olarak kabul edilmektedir (Cho, 1971). Bununla birlikte, özellikle GaN tabanlı yarıiletken yapıların büyütülmesinde, kristal yapının hekzagonal olması ve yüksek büyütme sıcaklıkları gerektirmesi nedeniyle MOCVD yöntemi daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Türkiye’de MOCVD yöntemi ilk olarak Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde kurulmuş ve kullanılmaya başlanmıştır.

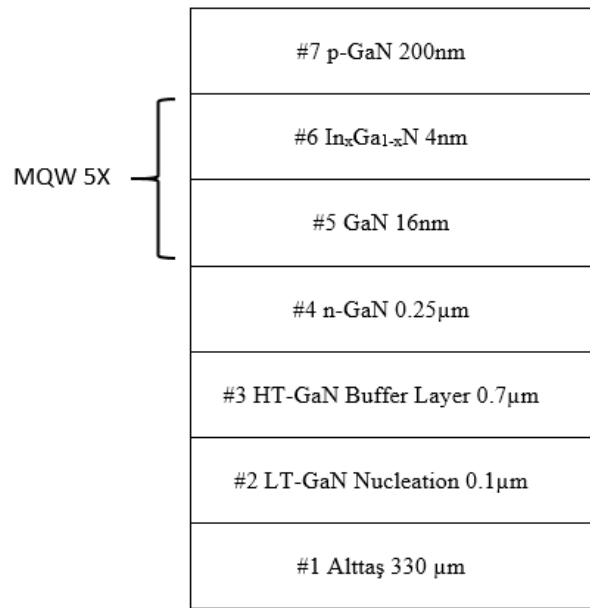
Yapay kristal büyütme tekniklerinin kullanılmasıyla birlikte yarıiletken malzeme çeşitliliği önemli ölçüde artmış; GaAs tabanlı kristallerin yanı sıra GaN, InGaN, AlGaN, SiC gibi malzemelerde geliştirmiş ve bu malzemelerle mavi ışık yayan diyotlar elde edilmiştir (Morkoç ve ark., 1994; Nakamura ve ark., 1994; Foxon, ve ark., 1995; Akasaki ve ark., 1996). Bu gelişmeler kuantum kuyuları, kuantum telleri ve kuantum noktaları gibi nano yapıların üretimini de mümkün kılmıştır (Bantien ve Weber, 1987; Strite ve Morkoç, 1992). Benzer yapılar, diğer yarıiletken cihaz teknolojilerinde de başarıyla uygulanabilmektedir. Örneğin, mikrodalga frekans aralığında ve dijital

devrelerde kullanılan SiGe alaşımı, heteroyapılı çift kutuplu transistörlerin üretilmesinde tercih edilmektedir (Fukatsu ve ark., 1992; Schuppen ve ark., 1994). Ayrıca, InGaAlAs alaşımı; optik yayıcılar, optik dalga kılavuzları, dedektörler, optiksel iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Borroff ve ark., 1988). GaAs ve Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As yapıları ise LED üretiminde önemli yarıiletken malzemeler arasında yer almaktadır (Siegle ve ark., 1995; Rosa ve ark., 1998). Günümüzde, yarıiletken kuantum kuyu ve kuantum nokta yapıları, lazer teknolojilerinde kritik rol oynamakta olup, bu yapılara yönelik en yüksek kalitedeki üretim, MBE ve MOCVD teknikleri ile sağlanmaktadır (Araçawa ve Sakaki, 1995; Mirin ve ark., 1995; Bloch ve ark., 1999; Ghosh ve ark., 2001). Uzun dalga boylarında iletişiminin daha hassas ve kararlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi nedeniyle, bu tür gelişmiş yarıiletken malzemelerin kullanımı özellikle tercih edilmektedir.

Yapay büyütme teknikleriyle elde edilen yarıiletken malzemelerin kullanıldığı yerler: bilgisayar, uzay araçları, TV ler, radyolar, seyir sistemleri, telefonlar, cevaplama makineleri, aletlerde, araba ve diğer araçlarda, hava araçlarında, gemilerde, trenlerde, çamaşır makinelerinde, mikrodalga fırınlarda, görüntü oynatıcı aletlerde vb gibi (Mirin ve ark., 1995). Aynı teknikle elde edilen Lazer diyotlar ise tıpta (terapi, ameliyat, onkoloji, göz bilimi), malzeme üretiminde, baskıda, serbest uzayda yerel iletişim sistemlerinde, sensör ve alarm sistemlerinde, otomasyon ve robot biliminde, spektroskoplarda, araştırmalarda kullanılmaktadır (Bloch ve ark., 1999).

## 2. Materyal ve Metot

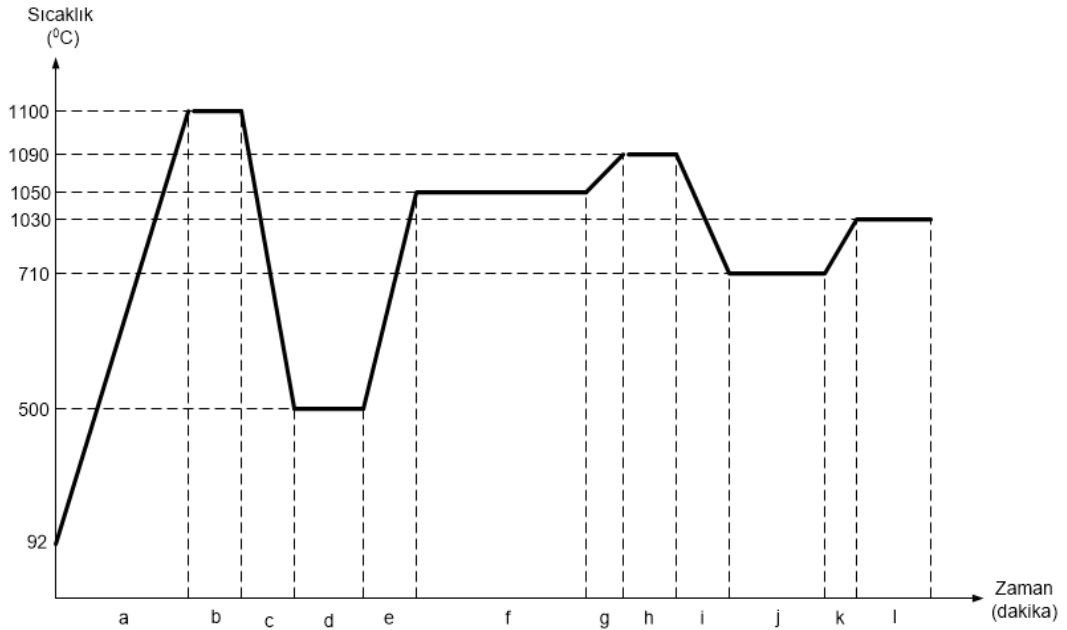
Bu çalışmada yapısal ve optik özellikleri belirlenen, Bilkent Üniversitesi Laboratuvarında MOCVD sistemi kullanılarak LED uygulamaları amacıyla büyütülen In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN MQW LED yapısı Şekil 1’de sunulmaktadır. Yapının büyütme sürecine ilişkin zaman-sıcaklık değişimi ise Şekil 2’de verilmiştir (Korcak ve ark., 2007).



Şekil 1. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN LED yapısı

Şekil 2’de verilen LED yapısının büyütme süreci, farklı sıcaklık ve işlem koşullarına göre on iki ana bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgeler ve ilgili süreçler aşağıda sıralanmıştır (Bour ve ark., 1999; Korcak ve ark., 2007):

- a Bölgesi: Sistemin büyütme sıcaklığına ulaşabilmesi için gerçekleştirilen ısıtma evresidir.
- b Bölgesi: Nitridasyon işlemi, 1100 °C sıcaklıkta uygulanmıştır.
- c Bölgesi: Nitridasyon sonrası büyütme sıcaklığına uygun koşulları sağlamak amacıyla gerçekleştirilen soğutma evresidir.
- d Bölgesi: Düşük sıcaklıkta (500 °C) GaN nükleasyon (çekirdeklenme) tabakasının büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.
- e Bölgesi: Nükleasyon tabakasının ardından, sıcaklık kademeli olarak tampon tabaka büyütme sıcaklığına çıkarılmıştır.
- f Bölgesi: Yüksek sıcaklıkta (1050 °C) GaN tampon tabakanın büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.
- g Bölgesi: Takip eden evrede, sıcaklık n tipi GaN tabakanın büyütme sıcaklığına artırılmıştır.
- h Bölgesi: Yüksek sıcaklıkta (1090 °C) n tipi GaN tabakasının büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.
- i Bölgesi: LED aktif bölgesinin büyütülmesine geçilmeden önce, sıcaklık 710 °C’ye düşürülmüştür.
- j Bölgesi: 710 °C sıcaklıkta LED aktif bölgesi büyütülmüştür.
- k Bölgesi: Büyütme sürecinin son aşamasında, GaN üst tabakanın büyütülmesine geçmeden önce sıcaklık tekrar artırılmıştır.
- l Bölgesi: Yüksek sıcaklıkta (1030 °C) GaN üst tabakanın büyütülmesi gerçekleştirilmiştir.



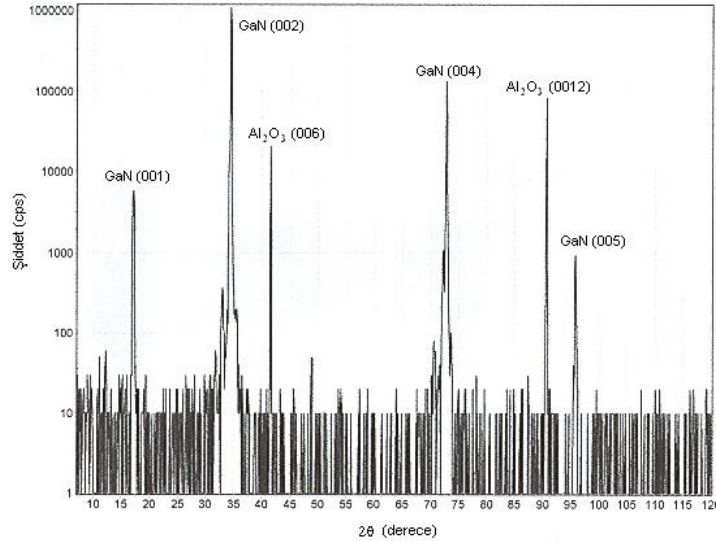
Şekil 2. MOCVD yöntemi ile safir alttaş üzerinde mavi LED yapısının büyütme sürecine ait zaman-sıcaklık diyagramı

Herhangi bir yöntemle sentezlenen kristalin karakterizasyonunda yapılması gereken ilk adım, kristalin birim hücre simetrisinin ve boyutlarının belirlenmesidir. Bu amaçla sıklıkla kullanılan X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemi ile birim hücrenin şekli, simetrisi ve boyutları otomatik olarak tayin edilebilmektedir. Buna ek olarak, numune kusursuz kristal yapıda veya tabakalı bir yapıya sahipse, X-ışınları demeti yalnızca belirli, dar açılarla saçılacaktır. Bu difraksiyon verileri kullanılarak, numunenin kimyasal bileşimi, kristal tabaka kalınlığı, örgü kusurları ve örgü uyumsuzlukları gibi yapısal özellikler de otomatik olarak belirlenebilmektedir (Korcak ve ark., 2005; Kaganer ve ark., 2005; Korcak, 2007; Booker ve ark., 2010).

HR-XRD ölçümleri, Gazi Üniversitesinde Fotonik Laboratuvarında bulunan Bruker AXS-D8-Discover difraktometresi ile yapılmıştır

### 3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1'de şematik yapısı sunulan  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  çoklu kuantum kuyusu (MQW) LED yapısına ait  $\omega-2\theta$  tarama sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Ölçümde gözlenen en yüksek yoğunluklu pik, (002) düzlemine karşılık gelmekte olup GaN tabakasına aittir.

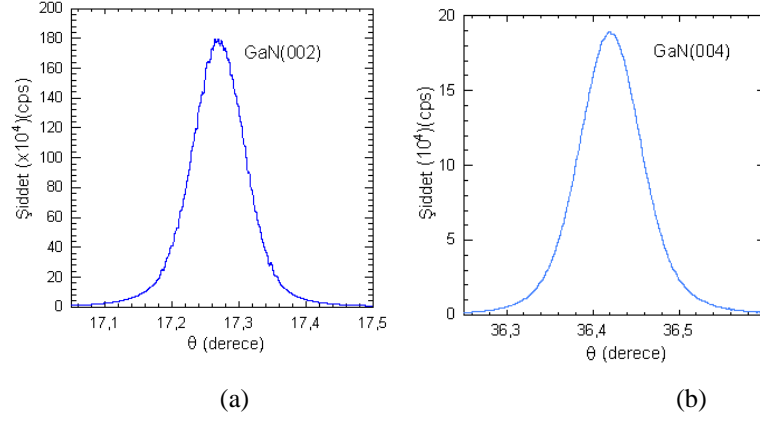


Şekil 3.  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  LED yapısının  $\omega-2\theta$  grafiği

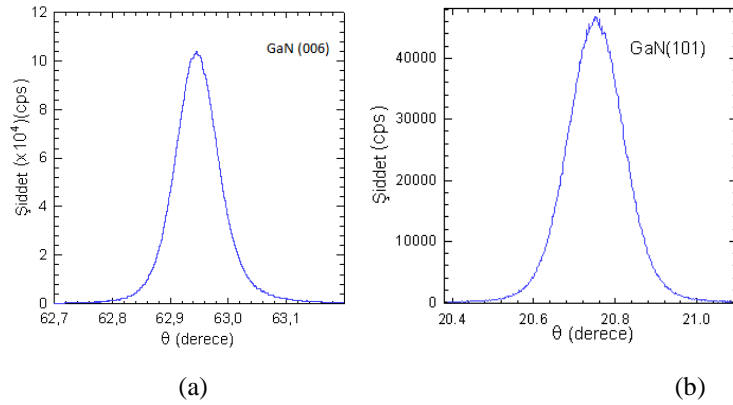
**Tablo 1.** InGaN tabakasına ait XRR ve HRXRD analizlerinden elde edilen karakterizasyon sonuçları

	$\rho_{sim}$	$\rho_{theo.}$	$T(nm)$		$\sigma(nm)$	X
	$\pm 0,03g/cm^2$	$g/cm^2$	$\pm 1\%$		$\pm 0,1$	
	XRR	-	XRR	HXRD	XRR	HXRD
<b>p-GaN</b>	5,02863	6,08840	193,5594	192,7642	0,14070	-
<b><math>In_xGa_{1-x}N</math></b>	5,14251	6,50361	2,2327	2,2330	1,47601	9,60
<b>n-GaN</b>	5,05121	6,08840	15,6551	-	0,54799	-

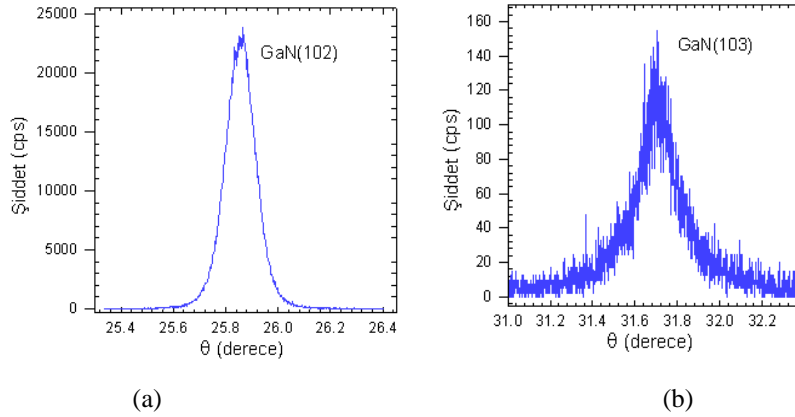
Tablo 1’de InGaN tabakasına ait XRR ve HRXRD analizlerinden elde edilen karakterizasyon sonuçları verilmektedir (Korcak, 2005; Korcak ve ark., 2006). Tüm yapıların yapısal parametrelerinin (örneğin, kalınlık, konsantrasyon, yoğunluk, gerinim vb.) belirlenebilmesi amacıyla yüksek çözünürlüklü monokromatörler kullanılmıştır.



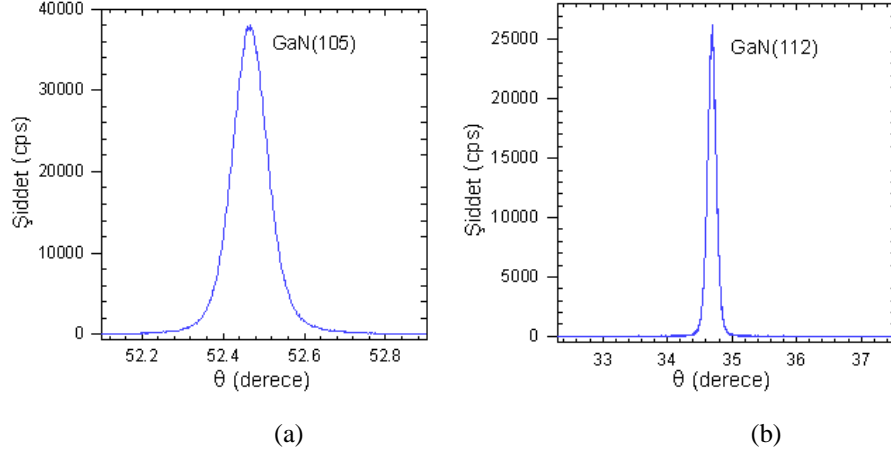
**Şekil 4.** Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (002) ve b) (004) düzlemlerine ait simetrik rocking eğrileri



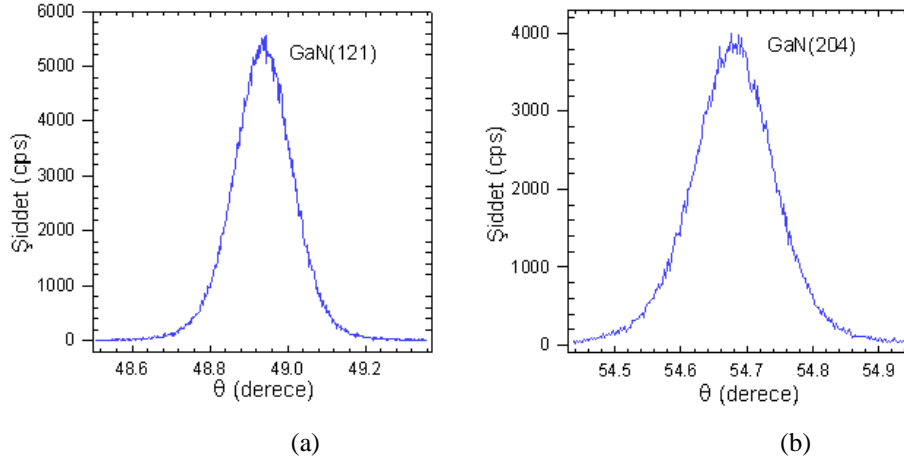
**Şekil 5.** Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (006) ve b) (101) düzlemlerine ait asimetrik rocking eğrileri



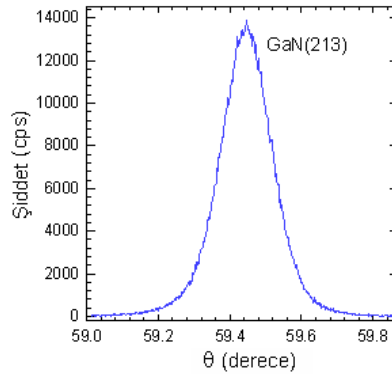
**Şekil 6.** Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (102) ve b) (103) düzlemlerine ait asimetrik rocking eğrileri



**Şekil 7.** Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (105) ve b) (112) düzlemlerine ait asimetric rocking eğrileri



**Şekil 8.** Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için; GaN a) (121) ve b) (204) düzlemlerine ait asimetric rocking eğrileri



**Şekil 9.** Safir (0001) yönelimli alttaş üzerinde büyütülen GaN filimleri için, GaN (213) düzlemine ait asimetric rocking eğrisi

Safir (0001) yönelimli alttaş üzerine büyütülmüş GaN filmleri için X-ışını kırınımı (XRD) ile elde edilen Şekil 4-5'de simetrik ve Şekil 6-9'da ise asimetrik rocking eğrileri sunulmaktadır (Korcak ve ark., 2007; Korcak, 2007; Öztürk ve ark., 2010). Şekil 4.a'da yer alan simetrik (002) ve Şekil 6.a'da verilen asimetrik (102) rocking eğrileri birlikte değerlendirildiğinde (Ekinci ve ark., 2018), XRD karakterizasyonunun GaN filmlerinin kristal kalitesini değerlendirmede güvenilir bir yöntem olduğu görülmektedir. Filmdeki kristal kusurlar, hem simetrik (002) hem de asimetrik (102) rocking eğrilerinde pik genişlemelerine neden olmaktadır (Hu ve ark., 2019). Yapılan ölçümler sonucunda, GaN (002) pikinin yarı genişlik (FWHM) değeri 309,6arcsec, GaN (102) pikinin ise 450arcsec olarak bulunmuştur. Diğer GaN piklerine ait FWHM ve  $\theta$  (Bragg açısı) değerleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Burada Theta açı değerlerinin virgülden sonra üç ondalık hassasiyetle verilmesi, GaN gibi kristal yapısı hassas malzemelerde: Daha doğru örgü sabiti hesaplaması, daha düşük hata payı ile dislokasyon yoğunluğu analizi, gerilme ve kusur analizinin güvenilirliği ve simetrik/asimetrik piklerin doğru karşılaştırılması gibi kritik avantajlar sağlar.

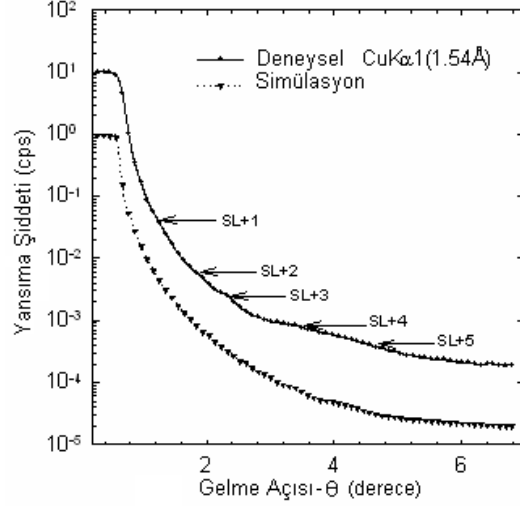
**Tablo 2.** GaN simetrik ve asimetrik yansıma piklerine ait FWHM ve  $\theta$  (Theta) değerleri

	FWHM(degree)	FWHM(arcsec)	Theta(degree)
<b>GaN(002)</b>	0,086	309	17,268
<b>GaN(004)</b>	0,081	291	36,120
<b>GaN(006)</b>	0,083	298	62,946
<b>GaN(101)</b>	0,144	518	20,753
<b>GaN(102)</b>	0,125	450	25,853
<b>GaN(103)</b>	0,101	363	31,702
<b>GaN(105)</b>	0,097	349	52,463
<b>GaN(121)</b>	0,160	576	48,937
<b>GaN(204)</b>	0,128	460	54,679

Literatürde de (Öztürk ve ark., 2010) belirtildiği üzere, asimetrik rocking eğrilerinin yarı genişliği genellikle simetrik eğrilere kıyasla daha fazladır; bu durum çalışmamızda elde edilen sonuçlarla da örtüşmektedir. Rocking eğrilerindeki yarı genişliklerindeki genişlemeler; saf kenar (edge), saf dönme (screw) ve karışık (mixed) dislokasyonlardan kaynaklanmaktadır. Simetrik GaN (002) eğrisindeki genişleme screw dislokasyonlara işaret ederken, asimetrik GaN (102) eğrisindeki genişleme daha çok karışık dislokasyon tiplerini yansıtmaktadır.

Şekil 10'da ise  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  LED yapısına ait X-ışını yansıma eğrileri sunulmaktadır. Bu eğriler, tabaka kalınlıkları, kimyasal bileşim ve ara yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin belirlenmesine olanak sağlar.  $0-0,7^\circ$  aralığında gözlenen plato bölgesi, yüzeyin oldukça düzgün ve üniform olduğunu göstermektedir. Yansıma eğrileri üssel azalma davranışı sergilemekte olup, Şekil 10'da SL+5 düzeyine kadar sıralı uydu pikleri net bir şekilde gözlemlenmiştir. Uydu piklerinin yüksekliği, ara

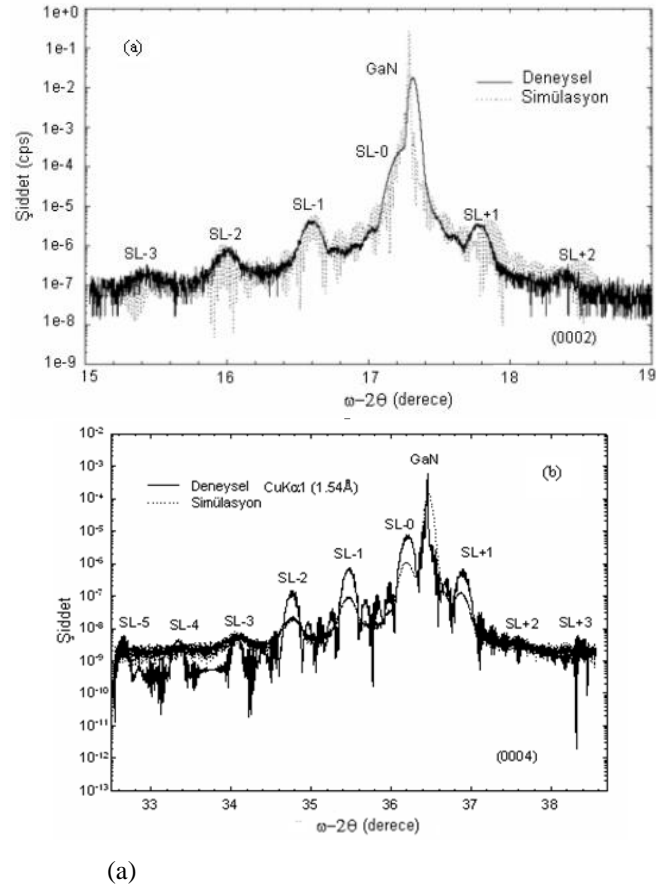
yüzey pürüzlülüğü ile tabakalar arası yoğunluk farkına bağlı, piklerin periyotları ise bireysel tabaka kalınlıkları ile ilişkilidir (Ekinci ve ark., 2018). Uydu piklerinin belirginliği, numunenin kristal yönelimi ve yapısal kalitesi hakkında da bilgi vermektedir.



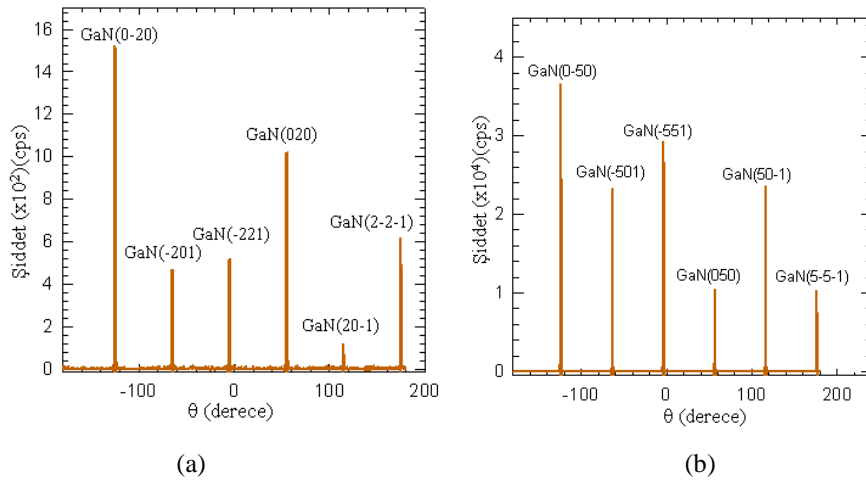
Şekil 10.  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  LED yapısının yansımaya grafiği

Şekil 11’de, GaN tabanlı yapıların (002) ve (004) düzlemlerine ait simetrik  $w-2q$  taramaları gösterilmektedir. Bu taramalara ait simülasyon eğrileri LEPTOS programı kullanılarak elde edilmiştir. (002) düzlemine ait taramada SL+2 ve SL-3, (004) düzlemine ait taramada ise SL+3 ve SL-5 uydu pikleri açıkça ayırt edilebilmektedir. Bu uydu piklerinin belirginliği,  $InGaN/GaN$  ara yüzeylerinin yüksek kalitede olduğunu göstermektedir. Ayrıca  $36,410^\circ$ ’de gözlemlenen GaN ana piki oldukça keskindir ve tüm uydu piklerinin band genişliklerinin dar olması, yapının yüksek kristal kaliteye sahip olduğunu kanıtlamaktadır (Feaster, 2000). Ancak, uydu pikleri ile saçaklar arasında net bir ayırım oluşmaması durumunda, tabaka pürüzlülüğü hakkında kesin bilgi elde edilemeyebilir. Normal örgü hatası oranı GaN ve InN kristal parametreleri kullanılarak  $2,367 \times 10^{-3}$  olarak hesaplanmıştır. Ayrıca LEPTOS simülasyonları aracılığı ile kuyu genişliği yaklaşık 2,2nm, bariyer genişliği 15,7nm ve In konsantrasyonu ise yaklaşık % 9,6 olarak hesaplanmıştır.

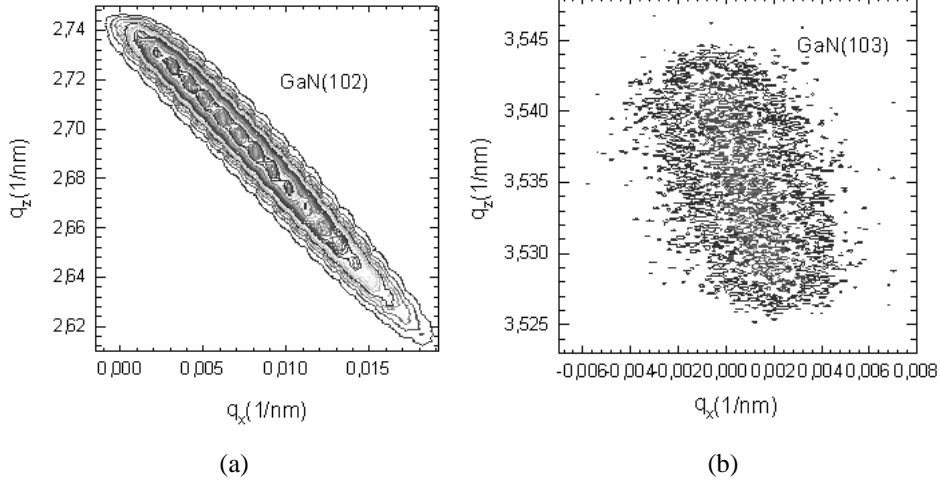
Şekil 12.a’da safir alttaş üzerine büyütülen GaN filminin (102) düzlemine ait asimetric  $\theta$  taraması, Şekil 12.b’de ise GaN (105) düzlemine ait  $\theta$  taraması gösterilmiştir. Şekil 12.b’de numune, (105) düzlemi etrafında döndürülerek analiz elde edilmiştir. Bu taramada, X-açısı  $62^\circ$  açısında, numune  $17,739^\circ$  açısında ve dedektör ise  $36,963^\circ$  açısında sabitlenmiştir. Taramada toplamda altı farklı pik gözlemlenmiştir. Bu pikler, (105) ve (102) düzlemlerinin döndürülmesiyle elde edilen hegzagonal yapının, düzlemleri dik ( $90^\circ$ ) açılarla kesmesi sonucu oluşan 6 simetri düzlemini temsil etmektedir. Bu verilerden, ince film yapısının hegzagonal simetriye sahip olduğu ve kristal yapının yüksek derecede düzenli (mükemmel) olduğu sonucu çıkarılabilir.



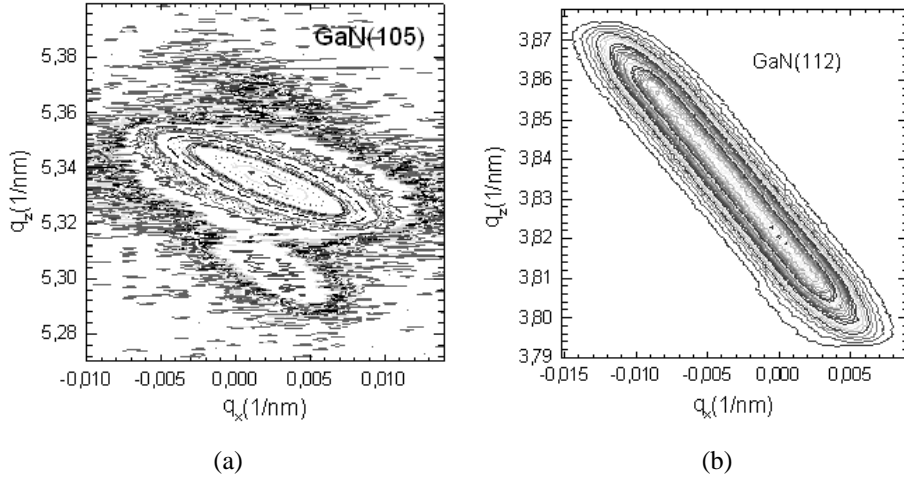
**Şekil 11.**  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  LED yapısına ait a) (002) ve b) (004) düzlemlerinin  $\omega$ - $2\theta$  simetrik taramaları gösterilmektedir. Noktalı eğriler deneysel eğriye uyumlu bir şekilde fit edilerek bulunan eğriyi göstermektedir



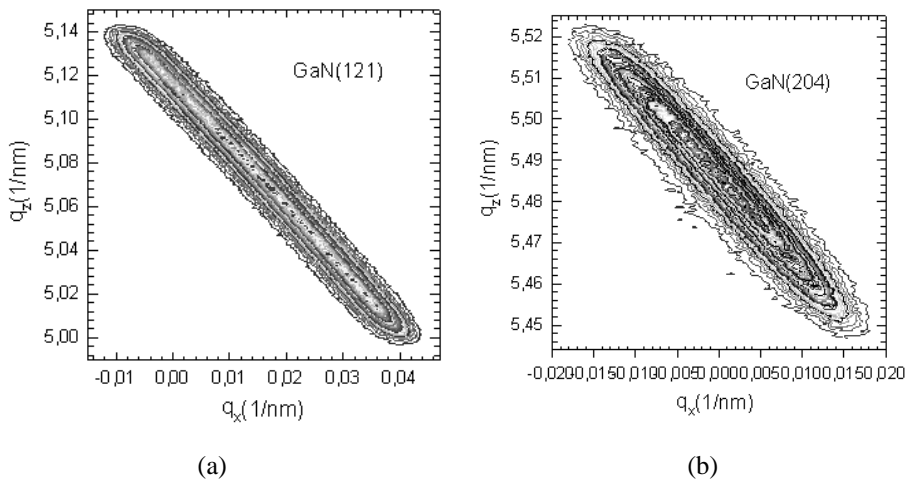
**Şekil 12.** Safir alttaş üzerine büyütülen GaN filmine ait: a) GaN (102) düzleminin asimetrik  $\theta$  açıları ve pik değerleri, b) GaN (105) düzleminin asimetrik  $\theta$  açıları ve pik değerleri görülmektedir



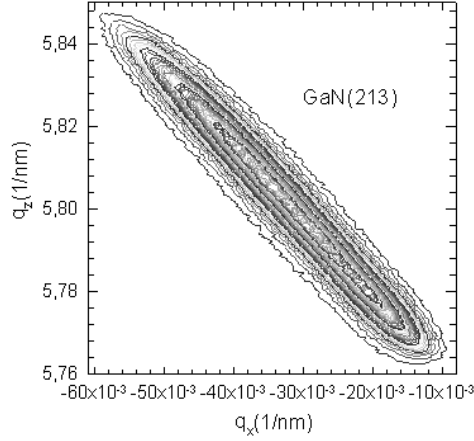
**Şekil 13.**  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  MQW yapısının, alttaşın a) (102), b) (103) yönelimlerinde elde edilen ters uzay haritaları



**Şekil 14.**  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  MQW yapısının, alttaşın a) (105), b) (112) yönelimlerinde elde edilen ters uzay haritası

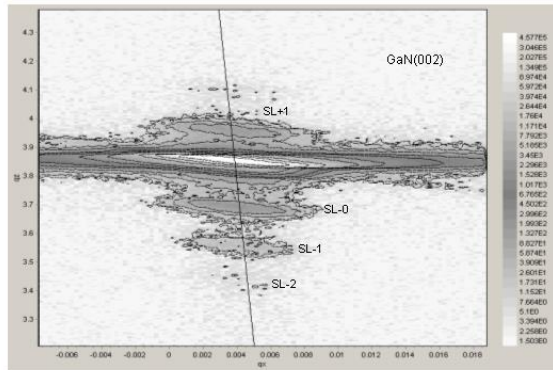
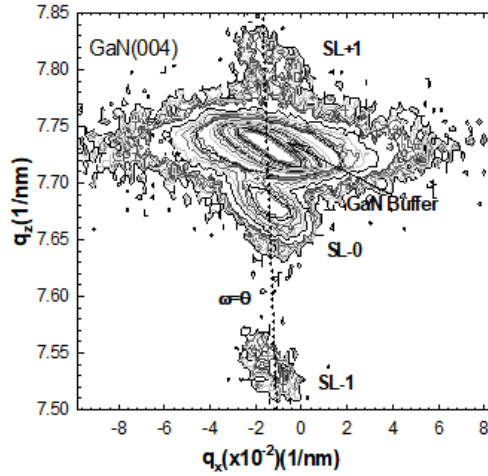


**Şekil 15.**  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  MQW yapısının, alttaşın a) (121) ve b) (204) yönelimlerinde elde edilen ters uzay haritası



Şekil 16.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  MQW yapısının, alttaşın (213) yöneliminde elde edilen ters uzay haritası

Şekil 13-16'da görselleştirilen ters uzay haritalarında, asimetric kırınım piklerinin benzer (aynı yönlü) yönelimlere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum numunenin kristal kalitesinin yüksek olduğuna işaret etmektedir. Zira düşük kristal kalitesine sahip numunelerde asimetric kırınım piklerinin ters uzay haritasında belirgin bir şekilde gözlemlenmesi genellikle zordur. Ayrıca, kristal kalitesi düşük olan yapılarda büyüme yönü tek yönlü olmayabilir ve bu da yapısal bozulmalara yol açabilir.



(a)

(b)

Şekil 17.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  MQW yapısının, alttaşın, (a) (004), (b) (002) yöneliminde elde edilen ters uzay haritası

Şekil 17-(a)'da (In, Ga) N kuantum kuyulu yapıya ait (004) yansımasının ters uzay haritası gösterilmektedir. Haritada, GaN tampon tabakasına ait piki ile birlikte, kuantum kuyusu yapısına ait uydu pikleri net bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Ters uzay haritasında, GaN tampon tabakası ve MQW sisteminin maksimum şiddeti  $w=q$  olarak ayarlanmıştır. Elde edilen veriler, MQW yapısının GaN tampon tabakaya göre oldukça üniform bir büyüme sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, XRR ve HXRD analizlerinden elde edilen sonuçlarla da uyum içerisindedir. Şekil 17-(b)'de ise alttaşın (002) yönelimine karşılık gelen  $In_xGa_{1-x}N/GaN$  MQW yapısına ait ters uzay haritası görülmektedir. Bu haritada da GaN tampon tabakasına ait ana pik ile uydu pikleri açıkça gözlemlenmektedir. Elde edilen bu RSM verileri, XRR ve HRXRD analizlerinden elde edilen grafiklerle yüksek düzeyde örtüşmekte olup, yapının kristal kalitesini ve tabakalar arası yapısal uyumu doğrulamaktadır.

## 5. Sonuçlar

Metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemiyle büyütülen  $In_xGa_{1-x}N$  çoklu kuantum kuyusu (MQW) yapısı, yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD) yöntemi kullanılarak ayrıntılı biçimde karakterize edilmiştir. Yapılan XRD analizleri sonucunda, yapının periyot kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve aktif tabakadaki indiyum (In) konsantrasyonu belirlenmiştir. HR-XRD verilerinden elde edilen bulgular, yapının altıgen kristal sistemine sahip olduğunu ve zayıf dik gerinime (zorlamaya) maruz kaldığını göstermektedir. Bu bağlamda,  $InGaN/GaN$  MQW yapısında dik gerinim oranı  $2,367 \times 10^{-3}$  olarak, In bileşen oranı ise yaklaşık %9,60 olarak hesaplanmıştır. Ters uzay haritası (RSM) sonuçları, MQW yapısının yüksek düzeyde düzgün ve üniform olarak büyütüldüğünü ortaya koymuştur. Bu bulgular, XRR ve HRXRD ölçümleri ile de tutarlılık göstermektedir. Sonuç olarak, yüksek sıcaklıkta büyütülen Si-katkılı GaN tampon tabakası üzerine büyütülen  $InGaN/GaN$  MQW yapısı, safir alttaş kullanımı ile birlikte yüksek kristal kalitesine sahip yapılara ulaşmak açısından uygun bir büyütme stratejisi sunmaktadır. Ayrıca, yapılan yapısal analizler doğrultusunda, karakterize edilen  $InGaN$  numunesinin LED tabanlı optoelektronik cihaz üretiminde kullanılmaya uygun olduğu belirlenmiştir. Bu doğrultuda, benzer yapıların yerli yöntemlerle üretilmesi, ülkemizin ileri teknolojiye dayalı ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir katkı sağlayacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine katkılarından dolayı, Gazi Üniversitesi Yarıiletken Fiziği ve Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı'nda görev yapan Prof. Dr. Mustafa Kemal Öztürk'e ve 2001K120590 numaralı proje kapsamında sağladığı destek için Devlet Planlama Teşkilatı'na teşekkür ederim.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Çalışmanın Tasarlanması	Yazar-1 (%55) - Yazar-2 (%45)
Veri Toplanması	Yazar-1 (%70) - Yazar-2 (%30)
Veri Analizi	Yazar-1 (%55) - Yazar-2 (%45)
Makalenin Yazımı	Yazar-1 (%90) - Yazar-2 (%10)
Makale Gönderimi ve Revizyonu	Yazar-1 (%95) - Yazar-2 (%05)

Yazarlar makaleye yukarıdaki oranlarda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

### **Kaynakça**

- Akasaki I., Detchprohm T., Hiramatsu K. Observation of resonant raman lines during the photoluminescence. *Applied Physics Letters* 1996; 68(9): 1265-1267.
- Arakawa Y., Sakaki H. Structural and optical properties of semiconductor superlattices. *Applied Physics Letters* 1995; 40(4): 3795-3797.
- Bantien F., Weber J. Manganese luminescence in AlGaAs-alloys and AlGaAs/GaAs quantum wells. *Solid State Communications* 1987; 61(7): 423-426.
- Bloch J., Shah J., Hobson WS., Lopata J., Chu SNG. Room-temperature 1.3  $\mu\text{m}$  emission from InAs quantum dots grown by metal organic chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters* 1999; 75(15): 2199-2201.
- Booker ID., Khoshroo L.R., Woitok JF., Jansen RH., Kaganer V., Mauder C., Behmenburg H., Gruis J., Hauken M., Kalisch H. Dislocation density assessment via X-ray GaN rocking curve scans. *Physica Status Solidi (C) Current Topic in Solid State Physics* 2010; 7(7-8): 1787-1789.
- Bour DP., Kneissl M., Hofstetter D., Romano LT., McCluskey M., Van de Walle CG., Krusor BS., Dunnrowicz C., Dolaldson R., Johnson NM. MOCVD growth and characterization of AlGaInN multiple quantum well heterostructures and laser diodes. *Materials Science and Engineering*. 1999; B59 (1-3): 33-38.
- Borroff R., Merlin R., Chin H., Bhattacharya PK. Raman scattering by optical phonons in In<sub>1-y</sub>-zAl<sub>y</sub>Ga<sub>z</sub>As lattice matched to InP. *Applied Physics Letters* 1998; 53(17): 1652-1653.
- Cho A. Film deposition by molecular beam technique. *Journal of Vacuum Science and Technology* 1971; 8(5): 31-38.
- Ekinci H., Kuryatkov VV., Fotgey C., Dabiran A., Jorgenson R., Nikishin SA. Properties of InGaN/GaN MQW LEDs grown by MOCVD with and without hydrogen carrier gas. *Journal of Vacuum Science and Technology* 2018; 148: 168-172.
- Feaster PF. X-Ray scattering from semiconductors. London: Imperial College Press; 2000.
- Foxon CT., Cheng TS., Novikov SV. The growth and properties of group III nitrides. *Journal of Crystal Growth* 1995; 150(2): 892-898.

- Fukatsu S., Yoshida H., Fujiwara A., Takahashi Y., Shiraki Y., Ito R. Spectral blue shift of photoluminescence in strained layer  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$  quantum well structure grown by gas source Si MB. *Applied Physics Lett.* 1992; 61(7): 804-806.
- Hu H., Zhou S., Wan H., Liu X., Xu H. Effect of strain relaxation on performance of InGaN/GaN green LEDs grown on 4-inch sapphire substrate with sputtered AlN nucleation layer. *Scientific Reports* 2019; 9, Article number: 3447.
- Ghosh S., Lenihan AS., Dutt G., Qasaimeh O., Steel DG., Bhattacharya P. Nonlinear optical and electro-optic properties of InAs/GaAs self-organized quantum dots. *Journal of Vacuum Science & Technology B* 2001; 19(4): 1455-1458.
- Kaganer, VM., Brandt O., Ploog KH. X-ray diffraction peaks from threading dislocations in GaN epitaxial films. *Physical Review B.* 2005: 72(4): 045423.
- Korcak S., Öztürk MK., Özçelik S.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  yapısının yüksek çözünürlükte yapısal analizi. 12. Yoğun Madde Fiziği Toplantısı 2005; 51, Ankara Üniversitesi, Türkiye.
- Korcak S., Öztürk MK., Çörekçi S., Akaoglu B., Yu H., Çakmak M., Sağlam S., Özçelik S., Özbay E. Structural and optical properties of an  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  nanostructure. *Surface Science* 2007; 601(18): 3892-3897.
- Korcak S.,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ve  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  tabakalı yarıiletken yapıların optik ve yapısal özelliklerinin tayini (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 49, Ankara, Türkiye, 2007.
- Leonard D., Krishnamurthy M., Reavers CM., Denbaars SP., Petroff PM. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. *Applied Physics Letters* 1993; 63(23): 3203-3205.
- Mirin PP., Ibbetson JP., Nishi K., Gossard AC., Bowers JE. 1.3  $\mu\text{m}$  photoluminescence from InGaAs quantum dots on GaAs, *Applied Physics Letters* 1995; 67(25): 3795-3797.
- Morkoç H., Strite S., Gao GB., Lin ME., Sverdlov B., Burns M. Large band-gap SiC, III-V nitride and II-VI ZnSe based semiconductor device Technologies. *Journal of Applied Physics* 1994; 76 (3): 1363-1398.
- Nakamura S., Mukai T., Senoh M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-hetero structure blue-light-emitting diodes. *Applied Physics Letters* 1994; 64(13): 1687-1689.
- Öztürk MK., Yu H., Sarıkavak B., Korcak S., Özçelik S., Özbay E. Structural analysis of an InGaN/GaN based light emitting diode by X-ray diffraction. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2010; 21(2): 185-191.
- Rosa FR., Antonio M., Juan CM. Determination of the origin of the series resistance through electroluminescence measurements of GaAs and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  solar cells and LEDs. *Solid-State Electronics* 1998; 42 (4): 567-571.
- Schuppen A., Gruhle A., Kibbel H., Erben U., Koing U. SiGe-HBTs with high  $f_T$  at moderate current densities. *Electronics Letters* 1994; 30(14): 1187-1188.

Siegle H., Eckey L., Hoffmann A., Thomsen C., Meyer BK., Schikora D., Hankeln M., Lischka K.  
Quantitative determination of hexagonal minority phase in cubic GaN using Raman spectroscopy. *Solid State Communications* 1995; 96(12): 943-949.

Strite S., Morkoç H. GaN, AlN and InN: A review. *Journal of Vacuum Science & Technology B* 1992; 10 (4): 1237-1266.