



**T. C.  
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**9xx-10xx nm DALGA BOYUNDA İŞIYAN YÜKSEK GÜÇLÜ LAZER  
DİYOT YAPISININ TASARIMI VE MOCVD YÖNTEMİ  
KULLANILARAK EPİTAKSİYEL TABAKALARIN BÜYÜTÜLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Aliye Alev KIZILBULUT  
(201492032044)**

**Fizik Ana Bilim Dalı  
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ**

**SIVAS  
OCAK 2020**

**Aliye Alev KIZILBULUT**'un hazırladığı ve “**9xx-10xxnm DALGA BOYUNDA IŞIYAN LAZER DİYOT YAPISININ TASARIMI VE MOCVD YÖNTEMİ KULLANILARAK EPİTAKSİYEL TABAKALARIN BÜYÜTÜLMESİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK ANA BİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

<b>Tez Danışmanı</b>	<b>Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ</b> Aselsan MGEO .....
<b>Jüri Üyesi</b>	<b>Prof. Dr. Atilla AYDINLI</b> Uludağ Üniversitesi .....
<b>Jüri Üyesi</b>	<b>Prof. Dr. Hüseyin SARI</b> Cumhuriyet Üniversitesi .....
<b>Jüri Üyesi</b>	<b>Prof. Dr. Esin Kasapoğlu</b> Cumhuriyet Üniversitesi .....
<b>Jüri Üyesi</b>	<b>Doç. Dr. Sabit HOROZ</b> Siirt Üniversitesi .....

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Özlem Pelin Can**  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Aliye Alev KIZILBULUT, 2020





Çalışma sırasında bana destek olan aileme ve tüm arkadaşlarıma...

## ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

15.01.2020

Aliye Alev KIZILBULUT

## KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Gerek doktora tez çalışmalarımın her aşamasında gerekse iş hayatımda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, engin tecrübelerinden ve bilgi birikiminden faydalandığım danışman hocam Prof. Dr. Sezai Elagöz' e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Doktora dersleri için her hafta Ankara'ya beraber yolculuk yaptığım, tüm ders aşaması boyunca birlikte çalıştığım Behçet Özgür ALAYDIN' a çok teşekkür ederim.

Tüm yüksek lisans doktora sürecini birlikte geçirdiğim, aynı zamanda iş arkadaşım olan Barış BULUT' a çalışmalarımın her aşamasında yanımda olduğu, yardım ve desteklerini esirgemediği için teşekkür ederim.

Tez süresince yardım ve desteklerini esirgemeyen ERMAKSAN Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanları; Mehmet ERKUŞ, Ali Osman ÇETİNKAYA, Cüneyt MEMİŞ ve Seçkin AKINCI' ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanları; Dr. Didem Altun, Prof. Dr. Pınar Başer, Prof. Dr. Ebru Şenadım Tüzemen, Dr. İlkay Demir, Dr. İsmail Altuntaş, Deniz Kartal, Fikret Akkuş, Cihan Şahin ve Ünal Yılmaz'a teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin her aşamasını destekleyen, çalışmalarım boyunca tüm alt yapı ve maddi imkânlarından yararlandığım ERMAKSAN AŞ.' ye tüm desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatımda her zaman destekçim olan annem, babam ve canımdan çok sevdiğim kardeşlerim Fethi Onur KIZILBULUT ve Fatih Can KIZILBULUT'a teşekkür ederim.

## ÖZET

# 9xx-10xx nm DALGA BOYUNDA IŞIYAN YÜKSEK GÜÇLÜ LAZER DİYOT YAPISININ TASARIMI VE MOCVD YÖNTEMİ KULLANILARAK EPİTAKSİYEL TABAKALARIN BÜYÜTÜLMESİ

Aliye Alev KIZILBULUT

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

2020, 149+xxiii sayfa

Bu doktora tezi 9xx-10xx nm dalga boyunda kenar ışınması yapan lazer yapılarının büyütülmesi ve büyütülen yapıların çeşitli karakterizasyon yöntemleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmesiyle ilgilidir. Kontak tabakası, dalga kılavuzu ve kılıf tabakaları için kullanılan GaAs ve AlGaAs tek tabakaları büyütme parametrelerini elde etmek ve zamanı optimize etmek için GaAs alttaşlar üzerine büyütüldü. Sonra bütün tek katmanlar n-tipi ve p-tipi olarak katkılandı. Büyütme ve tek tabakaların optimizasyonundan sonra, büyütülen katmanların yapısal, optik ve elektriksel özellikleri yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınımı, fotoluminesans, hall ve ECV-profiler kullanılarak belirlendi. Ayrıca 900 nm, 915 nm, 967 nm ve 1050 nm dalga boylarında ışınması yapan lazer yapılarının aktif bölgesini oluşturmak için farklı indiyum alaşımına sahip InGaAs/AlGaAs çoklu kuantum kuyu yapıları büyütüldü ve karakterize edildi.

Tek tabaka ve çoklu kuantum kuyu büyütme ile optimize edilen büyütme parametreleri kullanılarak, farklı p-tipi katkı malzemelerinin kullanıldığı iki farklı InGaAs/AlGaAs tek kuantum kuyulu lazer diyot yapısı büyütüldü. Bu lazer diyotlardan bir tanesinde p-tipi katkı malzemesi olarak çinko (Zn) kullanıldı. Diğer lazer diyot yapısında ise p-tipi katkı malzemesi olarak karbon (C) kullanılmıştır. Bu çalışmadaki ana amaç, tavlamanın karbon ve çinko katkılı lazer yapıları üzerindeki atomik iç difüzyonu nasıl etkilediğini görmektir. Bu amaçla büyütülen her iki lazer diyot yapısı, 60 saniyede 850°C ve 925°C sıcaklık aralığında hızlı

termal tavlama (RTA) ile azot akışı altında tavlama yapıldı. Tavlama işleminden sonra fotoluminesans kullanılarak enerji bant aralığındaki kayma miktarı belirlendi ve X-ışını eğri ölçümleri, örgü yapısındaki değişimi belirlemek amacıyla uygulandı. Lazer yapılarının elektriksel özellikleri üzerine termal tavlamanın etkisini belirlemek için elektrokimyasal kapasitans voltaj ölçümleri uygulandı.

Son olarak 900nm dalga boyunda ışık yapan lazer yapısı büyütüldü. Bu yapıya ERMAKSAN AŞ.'de fabrikasyon işlemleri uygulandı. Büyütülen yapının eğri verimi, iç kuantum verimi, dış kuantum verimi gibi karakteristik özellikleri belirlendi.

**Anahtar kelimeler:** Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama Sistemi, Kenar Işıması Yapan Lazer, GaAs, AlGaAs, InGaAs/AlGaAs

## **ABSTRACT**

# **DESIGN AND EPITAXIAL LAYER GROWTH OF 9xx-10xx nm WAVELENGTH HIGH POWER LASER DIODES BY USING MOCVD SYSTEM**

**Aliye Alev KIZILBULUT**

**PhD Thesis**

**Department of Physics**

**Supervisor: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ**

**2020, 149+xxiii pages**

This doctoral thesis deals with the epitaxially growth of high-power semiconductor lasers emitting light at 9xx-10xx nm wavelength by using Metal Organic Vapor Deposition system and comprehensively characterization of grown structure by means of state of the art techniques. Single layer of GaAs and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  which are used for contact layers, waveguide layer, cladding layer were grown on GaAs substrates to optimize the growth parameters and times. Then all single layers doped as n-type and p-type. After the growth and optimization of single layers, structural, optical and electrical properties of grown layers determined respectively by using high resolution x-ray diffraction, photoluminescence, hall and ECV profiler. Also, we have grown InGaAs/AlGaAs multi quantum well with different indium alloys to create the active region of light emitting laser structure at 900 nm, 915 nm, 967 nm and 1050 nm wavelengths.

Using optimized growth parameters with single layer and multi quantum well growth; we have grown two different InGaAs/AlGaAs single quantum well laser diode (SQW-LD) structures as used with different dopant materials. One of these laser diode (LD) structures, carbon was used as p type dopant material. For other LD structure, zinc was used as p type dopant material. In this study, our main aim is determinethe effect of atomic interdiffusion for carbon and zinc doped laser structures after annealing. After growth, LD structures were annealed under the nitrogen flow in a rapid thermal annealer (RTA) in the temperature range

of 850°C to 925°C for 60 sec. After the annealing procedure, these samples measured by photoluminescence for investigate the energy shift and X-ray rocking curve measurements were performed to determine the amount of lattice contraction. Electrochemical capacitance-voltage measurements were performed to determine the effect of annealing temperature on the electrical properties of laser structures.

Finally, the laser structure which is light emitting at 900 nm wavelength was grown. Fabricated this structure in ERMAKSAN AŞ. Characteristic properties such as slope efficiency, internal quantum efficiency and external quantum efficiency of grown structure were determined.

**Key Words:** Meatal Organic Chemical Vapor Deposition System, Edge Emitting Laser, GaAs, AlGaAs, InGaAs/AlGaAs

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ETİK</b> .....	vi
<b>KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR</b> .....	vii
<b>ÖZET</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xx
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xxi
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xxiii
<b>1 GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Lazerlerin Tarihi Gelişimi.....	3
<b>2 YARIİLETKEN LAZERLER</b> .....	8
2.1 Alt Bantlar Arası Geçişli Lazerler.....	10
2.1.1 Kuantum Çağlayan Lazerler .....	10
2.2 Bantlar Arası Geçişlerden Oluşan Lazerler.....	11
2.2.1 Homoeklem Lazerler .....	11
2.2.2 Heteroeklem Lazerler .....	12
2.2.3 Dikey Kaviteli Işık Yayan Lazerler .....	13
2.2.4 Dağıtılmış Geri Beslemeli Lazerler .....	15
2.2.5 Bantlar Arası Çağlayan Lazerler.....	15
2.2.6 Kenar Işıması Yapan Lazerler .....	17
2.2.6.1 Kenar ışıması yapan diyot lazer tasarımı .....	19
<b>3 LAZER DİYOTLARIN TEST VE KARAKTERİZASYONLARI</b> .....	22
3.1 Giriş akımına karşı ışık çıkış eğrisi: .....	22
3.2 Eşik Akım Yoğunluğu .....	23
3.3 Dış Diferansiyel Kuantum Verimi .....	23
3.4 İç Kuantum Verimi .....	24
3.5 İç kayıp.....	25
3.6 Geçirgenlik Akım Yoğunluğu.....	26
<b>4 METOD</b> .....	28
4.1 Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama Sistemi (MOCVD) .....	28



4.1.1	Temel Reaksiyon Kinetikleri.....	30
4.1.2	Öncüller: .....	33
4.2	Yerinde Karakterizasyon Yöntemleri .....	34
4.2.1	Yerinde (in-situ) yansıma ve sıcaklık ölçümü .....	34
4.2.2	Büyütme Oranı ve Tabaka Kalınlığı .....	37
4.2.3	İkili Bileşiklerin Kompozisyonu.....	39
4.2.4	Yüzey Kalitesi.....	40
4.3	Harici Karakterizasyon Yöntemleri .....	40
4.3.1	Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırımı (HR-XRD) .....	40
4.3.1.1	$\Theta/2\Theta$ Ölçümü .....	43
4.3.1.2	Salıntı Eğrileri Ölçümü ( $\omega$ ölçümü).....	44
4.3.1.3	Ters Uzay Haritalandırma Ölçümü .....	45
4.3.2	Fotoluminesans Ölçüm Sistemi .....	45
4.3.3	Elektriksel Karakterizasyon.....	47
4.3.3.1	Hall etkisi prensibi .....	47
4.3.3.2	Elektrokimyasal Kapasitans Voltaj Ölçümü .....	49
<b>5</b>	<b>KENAR İŞİMASI YAPAN LAZER DİYOT YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU.....</b>	<b>52</b>
5.1	Katkısız GaAs Büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	52
5.1.1	Ara tabaka üzerine büyütülen GaAs yapısının büyüme oranını belirleme .....	57
5.1.2	TMGa Akışının GaAs Büyüme Oranına Etkisini İnceleme .....	63
5.1.3	GaAs/AlAs Yapısı için Ara Yüzey Keskinliği Belirleme .....	69
5.2	p-tipi Katkılı GaAs Büyütülmesi .....	72
5.2.1	MOCVD Büyütme Yöntemi ile p-GaAs Katkılama Çalışmaları .....	74
5.2.1.1	GaAs Tabakasının p-tipi Katkılanmasında AsH <sub>3</sub> Akış Değişiminin Etkisi .....	76
5.2.1.2	CBr <sub>4</sub> Akış Değişiminin GaAs Tabakasını p-tipi Katkılama Üzerine Etkisi .....	78
5.2.1.3	GaAs Tabakasının p-tipi Katkılanmasında Sıcaklık Değişiminin Etkisi .....	80
5.2.2	MOCVD Büyütme Yöntemi ile p-GaAs Soğutma Çalışması .....	82
5.3	Katkısız Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As Büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	83
5.4	Katkılı AlGaAs Büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	89
5.4.1	Karbon katkılı AlGaAs Büyütmeleri ve Karakterizasyonları .....	90
5.4.2	Çinko katkılı AlGaAs Büyütmeleri ve Karakterizasyonları .....	99
5.4.3	n tipi katkılı AlGaAs Büyütmeleri ve Karakterizasyonları .....	103
5.5	InGaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyu.....	109

5.6	LD Termal Dayanıklılık Çalışması.....	120
5.7	LD Karakterizasyon .....	132
<b>6</b>	<b>SONUÇ</b> .....	<b>138</b>
<b>7</b>	<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>140</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>146</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1 Kuzey Amerika’da Fiber Optik Pazarında Beklenen Büyüme .....	3
Şekil 2.1 Yarıiletken lazerlerin sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.2 Genel QCL yapısının iletim bant diyagramı .....	11
Şekil 2.3 GaAs homoeklem lazer diyotun şematik gösterimi (Kasap S. , 2001).....	12
Şekil 2.4 GaAs/AlGaAs heteroeklem lazer diyotun şematik gösterimi (Erol, 2013).....	13
Şekil 2.5 VCSEL yapısının şematik gösterimi (Zhao, 2018) .....	14
Şekil 2.6 Bantlar arası çağlayan lazerin genel yapısı (Vurgaftman, 2015; Höfling, 2012)..	16
Şekil 2.7 Bir lazer diyot yapısının kesitsel gösterimi ve çift sınırlamalı heteroyapı lazer diyot için şematik epitaksiyel tabaka görünümü (Meney, 1995) .....	17
Şekil 2.8 Kenar ışınması yapan lazer diyotun şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.9 Tipik bir lazer diyot yapısının optik mod şekli, kırılma indisi değişimi ve katkı profili verilmiştir (Kanskar, 2005) .....	19
Şekil 2.10 900nm dalga boyunda ışınyan lazer diyot yapısının simülasyonu .....	20
Şekil 2.11 915nm dalga boyunda ışınyan lazer diyot yapısının simülasyonu .....	20
Şekil 2.12 970nm dalga boyunda ışınyan lazer diyot yapısının simülasyonu .....	21
Şekil 2.13 1053nm dalga boyunda ışınyan lazer diyot yapısının simülasyonu .....	21
Şekil 3.1 Lazer diyota uygulanan akıma karşı ışık çıkış gücü (L-I) grafiği .....	22
Şekil 3.2 Dış kuantum veriminin tersinin kavite uzunluğuna bağlı değişim grafiği .....	25
Şekil 3.3 Kavite uzunluğunun tersine karşı eşik akım yoğunluğunun değişim grafiği .....	27
Şekil 4.1 Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu olan hem AsH <sub>3</sub> -PH <sub>3</sub> tabanlı hemde Nitrat tabanlı MOCVD sistemi.....	29
Şekil 4.2 ERMAKSAN Optoelektronik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu olan AsH <sub>3</sub> -PH <sub>3</sub> tabanlı MOCVD sistemi .....	29
Şekil 4.3 GaAs’ ın epitaksiyel olarak depolanması sürecinde yaşanan en önemli buhar faz ve reaksiyon adımları (Capper, 2006) .....	30
Şekil 4.4 Tipik bir kimyasal buhar biriktirme reaksiyonuna ait adımlar. Burada A gaz fazı, B sınır tabakası (boundary layer), C ise alttaşı göstermektedir.....	32
Şekil 4.5 Büyütme sıcaklığının tersine karşı büyütme oranının değişim grafiği.....	33
Şekil 4.6 Yerinde yansıma ölçümünde alttaş, epitaksiyel tabaka ve ortamın kırılma indisi farkından dolayı gelen ve yansıyan ışığın şiddet değişiminin şematik gösterimi	36
Şekil 4.7 Yerinde yansıma ölçümünde yüzeyden ve arayüzlerden yansıyan ışıkların oluşturduğu girişim deseninin zamana göre şiddet grafiği. Burada T tam bir osilasyon oluşması için geçen zamanı belirtmektedir. ....	38
Şekil 4.8 (a) Aynı yapıda büyütme oranı büyük olanın periyodik olarak tekrar etme süresi daha kısadır, (b) Farklı kompozisyondaki yapıların periyodik tekrar süresinde çok az bir değişim olurken, yansıma eğrisinin salınım genliği tamamen değişir.....	39
Şekil 4.9 Yansıma eğrileri (a) ideal büyütme, (b) artan optiksel dalgalanma, (c) artan yüzey pürüzlülüğü.....	40
Şekil 4.10 a-SmartLab 9 kW gücünde yüksek çözünürlüklü XRD sistemi, b-915 nm ışınma pikene sahip Lazer yapısının XRD karakterizasyonu, c- XRD sisteminin optik	

argümanları, d- 915 nm ışına pikine sahip 10 tekrardan oluşan kuantum kuyunun 224 düzlemine ait RSM taraması .....	41
<b>Şekil 4.11</b> Bragg yasasının şematik gösterimi. Burada d kristal düzlemleri arasındaki mesafe, $\Theta$ gelen x-ışını ile yüzey arasındaki açı $2\Theta$ ise gelen ve yansıyan xışınları arasındaki açıyı temsil etmektedir.....	42
<b>Şekil 4.12</b> (a) Dik (out-plane) tarama, (b) Paralel (in-plane) tarama geometrik gösterimleri .....	43
<b>Şekil 4.13</b> w ve $\phi$ taramasının şematik gösterimi.....	44
<b>Şekil 4.14</b> A) Yüksek Çözünürlükte Haritalama Yapabilen Fotolumünisans Ölçüm Sistemi, B) 10 Tekrardan oluşan kuantum kuyu yapısının PL Haritalaması D) Tek Nokta Ölçümü, C) Vakumlu Numune Tutucu .....	46
<b>Şekil 4.15</b> A-Düşük Sıcaklıklarda Ölçüm Alabilen Hall olayı ölçüm sistemi (LakeShore), B-GaAs Alttaş üzerine büyütülen katkısız AlGaAs yapısının sıcaklık bağımlı taşıyıcı konsantrasyonu değişimi, C-Sıcaklık Bağımlı Mobilite değişimi, D-Numune tutucu üzerinde Van Der Pauw yöntemi ile alınmış indiyum kontaklar.....	48
<b>Şekil 4.16</b> Hall etkisi prensibi (Razeghi, 2011).....	49
<b>Şekil 4.17</b> A-ECV-Profil Ölçüm Sistemi, B-karbon katkılı GaAs tabakasının $AsH_3$ akışı değişimi ile Taşıyıcı konsantrasyonunun değişim profili .....	50
<b>Şekil 5.1</b> N1 numaralı örneğin GaAs büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	54
<b>Şekil 5.2</b> N1 numaralı büyütme için HRXRD taraması.....	56
<b>Şekil 5.3</b> N1 numaralı büyütme için PL ölçümü .....	57
<b>Şekil 5.4</b> N2 numaralı örneğe ait b) N3 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	60
<b>Şekil 5.5</b> N2 ve N3 numaralı örnekler için yerinde 915 nm dalgaboylu lazer kullanılarak ölçülen yansıma eğrisi (mavi) ve fit (kırmızı) sonuçları .....	61
<b>Şekil 5.6</b> a) N1 ve b) N2 numaralı numunelere ait HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	63
<b>Şekil 5.7</b> N4 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri .....	65
<b>Şekil 5.8</b> a) GaAs1 b)GaAs2 c)GaAs3 epitaksiyel katmanlarına ait 915 nm dalgaboylu lazer kullanılarak ölçülen yerinde yansıma eğrisi (mavi) ve fit (kırmızı) sonuçları.....	66
<b>Şekil 5.9</b> N1 numaralı numuneye ait HR-XRD ölçüm sonuçları .....	67
<b>Şekil 5.10</b> N4 numaralı örnek için hem yerinde yansıma hem de XRD ölçümü kullanılarak belirlenen büyüme oranı değişimine karşı Toplam/III molar akışının değişimi ..	68
<b>Şekil 5.11</b> N4 numaralı örneğe ait SEM ölçüm sonucu .....	69
<b>Şekil 5.12</b> N5 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri .....	70
<b>Şekil 5.13</b> N5 numaralı numuneye ait HR-XRD ölçüm sonuçları .....	71
<b>Şekil 5.14</b> N5 numaralı örneğe ait SEM ölçüm sonucu .....	72
<b>Şekil 5.15</b> p-GaAs katkılama çalışması kapsamında büyütülen N8 numaralı örneğe ait yerinde yansıma ölçüm sonucu .....	75

<b>Şekil 5.16</b> AsH <sub>3</sub> akış değişiminin GaAs tabakasını p-tipi katkılama üzerine etkisini gösteren ECV ölçüm sonuçları .....	77
<b>Şekil 5.17</b> AsH <sub>3</sub> akışına karşı p-GaAs taşıyıcı konsantrasyonunun değişimi .....	78
<b>Şekil 5.18</b> CBr <sub>4</sub> akış değişiminin GaAs tabakasını p-tipi katkılama üzerine etkisini gösteren ECV ölçüm sonuçları .....	79
<b>Şekil 5.19</b> CBr <sub>4</sub> akışına karşı p-GaAs taşıyıcı konsantrasyonunun değişimi .....	80
<b>Şekil 5.20</b> Reaktör sıcaklığındaki değişimin GaAs tabakasını p-tipi katkılama üzerine etkisini gösteren ECV ölçüm sonuçları .....	81
<b>Şekil 5.21</b> Reaktör sıcaklığındaki değişimin p-GaAs taşıyıcı konsantrasyonu üzerine etkisi .....	82
<b>Şekil 5.22</b> N23, N24 ve N25 numaralı örneklerin aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonu değişimi .....	83
<b>Şekil 5.23</b> N4 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri .....	84
<b>Şekil 5.24</b> N9, N10 ve N11 numaralı örnekler üzerine uygulanan XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	85
<b>Şekil 5.25</b> N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için PL ölçüm sonuçları .....	86
<b>Şekil 5.26</b> N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için haritalanmış PL ölçüm sonuçları .....	87
<b>Şekil 5.27</b> a) N9 b) N10 ve c) N11 numaralı örnekler için elipsometre ölçüm ve modelleme sonuçları .....	88
<b>Şekil 5.28</b> N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için dalgaboyuna karşı kırılma indisi ve sönüm katsayısı .....	89
<b>Şekil 5.29</b> N13 ve N14 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri .....	92
<b>Şekil 5.30</b> a) N13 için b) N14 için CBr <sub>4</sub> akışındaki değişime karşı büyüme oranındaki değişim grafikleri .....	93
<b>Şekil 5.31</b> N12, N13 ve N14 numaralı örnekler için HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	94
<b>Şekil 5.32</b> N12, N13 ve N14 numaralı numunelere ait PL ölçüm sonuçları .....	95
<b>Şekil 5.33</b> N12 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi .....	96
<b>Şekil 5.34</b> N13 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi .....	96
<b>Şekil 5.35</b> N14 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi .....	97
<b>Şekil 5.36</b> N12 numaralı örnek için CBr <sub>4</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi .....	98
<b>Şekil 5.37</b> N13 numaralı örnek için CBr <sub>4</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi .....	98
<b>Şekil 5.38</b> N14 numaralı örnek için CBr <sub>4</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi .....	99
<b>Şekil 5.39</b> N15 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri .....	100
<b>Şekil 5.40</b> N15 numaralı numuneye ait HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	101
<b>Şekil 5.41</b> N15 numaralı örneğe ait PL ölçüm sonuçları .....	101

<b>Şekil 5.42</b> N15 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi .....	102
<b>Şekil 5.43</b> N15 numaralı numune için DMZn akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi	103
<b>Şekil 5.44</b> Farklı alimünyum alaşım oranlarına sahip örneklere ait yerinde yansıma eğrileri .....	104
<b>Şekil 5.45</b> Farklı alimünyum alaşım oranlarına sahip numunelere ait HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	105
<b>Şekil 5.46</b> Farklı Alimünyum alaşım oranlarına sahip nummunelerin oda sıcaklığındaki PL ölçüm sonuçları .....	106
<b>Şekil 5.47</b> Farklı alimünyum alaşım oranına sahip numuneler için SiH4 akışına ait n-tipi katkı seviyesi ölçümü .....	107
<b>Şekil 5.48</b> N19 ve N21 numaralı numuneler için ölçüm sıcaklığına bağlı olarak n-tipi taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değişimi .....	108
<b>Şekil 5.49</b> MQW3 isimli örneğin büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	109
<b>Şekil 5.50</b> MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapılarının HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	113
<b>Şekil 5.51</b> MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapıları üzerine (224) düzlemine göre GaAs referans piki etrafında uygulanmış RSM taramaları .....	117
<b>Şekil 5.52</b> MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapılarının PL ölçüm sonuçları.....	118
<b>Şekil 5.53</b> MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 için PL ölçümü ile belirlenen dalga boyuna karşı FWHM değişim grafiği .....	119
<b>Şekil 5.54</b> MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 için PL ölçümü ile belirlenen dalga boyuna karşı XRD simülasyonu sonucunda belirlenen InGaAs kuantum kuyusundaki indiyum alaşım oranı .....	119
<b>Şekil 5.55</b> LD1 ve LD2 isimli örneklere ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri .....	122
<b>Şekil 5.56</b> LD1 ve LD2 yapılarının PL ölçüm sonuçları.....	123
<b>Şekil 5.57</b> LD1 ve LD2 yapılarına ait XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	124
<b>Şekil 5.58</b> Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD1 numaralı örneğin XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	125
<b>Şekil 5.59</b> Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD2 numaralı örneğin XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları .....	126
<b>Şekil 5.60</b> Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD1 numaralı örneğin PL ölçüm sonuçları .....	127
<b>Şekil 5.61</b> Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD2 numaralı örneğin PL ölçüm sonuçları .....	128
<b>Şekil 5.62</b> LD1 ve LD2 yapıları için tavlama sıcaklığına bağlı PL pik konumundaki kayma miktarı .....	129
<b>Şekil 5.63</b> a)LD1 ve b)LD2 numaralı numunelerin aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonu değişimi .....	131
<b>Şekil 5.64</b> LD3 numaralı örneğin yapısı.....	132

<b>Şekil 5.65</b> LD3 yapısı için a) HR-XRD ölçüm sonuçları b) p tipi katkılı bölge için ECV ölçüm sonuçları ve c) ışın dalga boyunu gösteren PL ölçüm sonuçları mevcuttur.....	133
<b>Şekil 5.66</b> LD3 numaralı örnek için kavite uzunluğuna karşı dış kuantum veriminin tersinin değişimi .....	135
<b>Şekil 5.67</b> LD3 numaralı lazer diyot için kavite uzunluğunun tersine bağlı olarak eşik akım yoğunluğundaki değişim .....	136
<b>Şekil 5.68</b> LD3 yapısı için a)yakın ve uzak alan diverjans açılarının ölçümü b)8A yayının piki.....	137
<b>Şekil 5.69</b> LD3 yapısının L-I-V ölçümü.....	137
<b>Şekil 6.1</b> Tez çalışması kapsamında büyütülen lazer diyot yapısı ile iki farklı ticari firmadan alınan lazer diyot yapılarının karşılaştırılması.....	139

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 5.1</b> N1 numaralı numuneye ait MOCVD büyütme parametresi.....	53
<b>Çizelge 5.2</b> Bazı araştırma grupları tarafından belirlenen mobilite ve arka plan taşıyıcı değerleri.....	55
<b>Çizelge 5.3</b> N1 numaralı örnek için hall sistemi kullanılarak ölçülen mobilite ve arka plan taşıyıcı değerleri .....	55
<b>Çizelge 5.4</b> N2 ve N3 numaralı örneklere ait MOCVD büyütme parametreleri.....	59
<b>Çizelge 5.5</b> N4 numaralı örneğe ait MOCVD büyütme parametreleri.....	64
<b>Çizelge 5.6</b> N1 numaralı örneğe ait XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları.....	67
<b>Çizelge 5.7</b> N5 numaralı örneğe ait MOCVD büyütme parametreleri.....	70
<b>Çizelge 5.8</b> MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapılarının dinamik XRD simülasyonuyla belirlenen parametreleri.....	111
<b>Çizelge 5.9</b> LD1 numaralı örneğin için RTA tavlama sıcaklığına bağlı olarak PL pik kayması .....	129
<b>Çizelge 5.10</b> LD2 numaralı örneğin için RTA tavlama sıcaklığına bağlı olarak PL pik kayması .....	129
<b>Çizelge 5.11</b> Kavite uzunluğuna bağlı olarak eğri verimi, dış kuantum verimi.....	134
<b>Çizelge 5.12</b> Farklı kavite uzunluklarında tasarlanan LD3 numaralı lazer diyotun eşik akımı ve eşik akım yoğunluğu.....	136



## SİMGELER DİZİNİ

<b>a</b>	Örgü sabiti, nm
<b>A</b>	Kesit alanı, cm <sup>2</sup>
<b>d<sub>hkl</sub></b>	hkl miller indisleri ile tanımlanan düzlemler arası mesafe, nm
<b>e</b>	Elektron yükü, C
<b>E<sub>g</sub></b>	Yarıiletkenin bant aralığı, eV
<b>λ</b>	Dalgaboyu, nm
<b>h</b>	Plank sabiti
<b>hkl</b>	miller indisleri
<b><math>\vec{k}_s</math></b>	Giden x-ışını dalga vektörü, nm <sup>-1</sup>
<b><math>\vec{k}_o</math></b>	Giden x-ışını dalga vektörü, nm <sup>-1</sup>
<b>L</b>	Kesit Uzunluğu
<b>n</b>	Elektron taşıyıcı yoğunluğu
<b>p</b>	Boşluk taşıyıcı yoğunluğu
<b><math>\vec{q}</math></b>	Momentum geçiş vektörü, nm <sup>-1</sup>
<b>R</b>	Direnç, ohm
<b>s</b>	saniye
<b>Θ</b>	Bragg açısı, derece
<b>μm</b>	Mikrometre
<b>nm</b>	Nanometre
<b>Å</b>	Angstrom
<b>μ<sub>n</sub></b>	Elektron mobilitesi, cm <sup>2</sup> /Vs
<b>μ<sub>p</sub></b>	Boşluk mobilitesi, cm <sup>2</sup> /Vs
<b>V</b>	Uygulanan potansiyel fark, V
<b>Λ</b>	XRD taramasından elde edilen periyot, nm
<b>ΔΘ</b>	XRD taramasında süper örgü pikleri arasındaki uzaklık, derece
<b>δΘ</b>	XRD taramasında kalınlık pikleri arasındaki uzaklık, derece
<b>Λ</b>	X-ışını dalga boyu
<b>W</b>	Watt
<b>T</b>	Tesla
<b>c</b>	Işık hızı
<b>C</b>	Coulomb
<b>J</b>	joule
<b>V<sub>H</sub></b>	Hall voltajı
<b>w</b>	Malzeme genişliği
<b>d</b>	Malzeme kalınlığı
<b>n</b>	Kırılma indisi
<b>k</b>	Sönüm katsayısı
<b>w<sub>d</sub></b>	Deplesyon genişliği
<b>C°</b>	Santigrat derece
<b>V</b>	Uygulanan besleme voltajı
<b>I</b>	Akım
<b>N</b>	Taşıyıcı konsantrasyonu
<b>ε<sub>0</sub></b>	Vakumun dielektrik sabiti

$\epsilon_r$	Yarı iletkenin dielektrik sabiti
$\Phi$	Schottky bariyer yüksekliği
$\eta_d$	Dış kuantum verimi
$\eta_i$	İç kuantum verimi
$\eta_{Egim}$	Eğri verimi
$I_{th}$	Eşik akımı
$\alpha_i$	İç kayıplar
$J_0$	Geçirgenlik akım yoğunluğu
$J_{th}^0$	Sonsuz kavite uzunluğundaki eşik akım yoğunluğu
$g'$	Diferansiyel kazanç
$\tau$	Taşıyıcıların yarı ömrü
$\Gamma$	Optik sınırlama faktörüdür



## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>k.b.</b>	: Keyfi Birim
<b>AlGaAs</b>	: Aliminyum Galyum Arsenik
<b>AsH<sub>3</sub></b>	: Arsin
<b>CBr<sub>4</sub></b>	: Carbon Tetrabromide
<b>CUNAM</b>	: Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi
<b>DMZn</b>	: Dimethylzinc
<b>FWHM</b>	: Yarı yükseklik tam genişliği
<b>LD</b>	: Lazer Diyot
<b>GaAs</b>	: Galium Arsenic
<b>GaSb</b>	: Galium Antimonide
<b>HR-XRD</b>	: Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı
<b>InGaAs</b>	: Indium Gallium Arsenic
<b>InSb</b>	: Indium Antimonide
<b>MO</b>	: Metal Organik
<b>MBE</b>	: Moleküler demet epitaksi
<b>MFC</b>	: Kütle akış kontrolörü
<b>MO</b>	: Metal organik
<b>MOCVD</b>	: Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama
<b>MSE</b>	: Ortalama Karesel Hata
<b>MQW</b>	: Çoklu Kuantum Kuyusu
<b>PH<sub>3</sub></b>	: Phosphine
<b>PL</b>	: Fotoluminesans
<b>SQW</b>	: Tekli kuantum kuyu
<b>QCL</b>	: Kuantum Çağlayan Lazer
<b>QW</b>	: Kuantum kuyu
<b>QWI</b>	: Kuantum kuyu iç karışımı
<b>RSM</b>	: Ters Uzay Haritalama
<b>VCSEL</b>	: Düşey kavite ışması yapan lazerler
<b>DPSS</b>	: Diyot pompalı katı hal lazerler
<b>LİDAR</b>	: Işık algılama ve uzaklık belirme
<b>LAZER</b>	: Uyarılmış yayınım ile ışığın güçlendirilmesi
<b>LPE</b>	: Sıvı Faz Epitaksi
<b>CW</b>	: Sürekli akım
<b>COD</b>	: Lazerin ölümcül optik hasarı
<b>DBR</b>	: Dağınımlı Bragg yansıtıcıları
<b>DFB</b>	: Dağıtılmış geri beslemeli lazerler
<b>ICL</b>	: Bantlar arası çağlayan lazerler
<b>DCH</b>	: Çiftlenim frekanslı heteroyapı
<b>ADCH</b>	: Asimetrik çiftlenim frekanslı heteroyapı
<b>HEMT</b>	: Yüksek elektron mobiliteli transistör
<b>BA</b>	: Geniş alan
<b>RW</b>	: Köprü tipi
<b>ECV</b>	: Elektrokimyasal kapasitans voltaj
<b>RTA</b>	: Hızlı termal tavlama

# 1 GİRİŞ

Katıhal lazer diyot yapısı yarıiletken malzemelerden oluşan çoklu tabaka dizilimlerinin epitaksiyel olarak büyütülmesiyle oluşur. Bir diyot lazer üretilirken lazer demetinin yayıldığı aktif bölgede direk bant aralıklı yarıiletken malzemeler kullanılır. Genel olarak bir yarıiletken lazer yapısı aktif tabaka boyunca ileri besleme voltajının uygulandığı ve biri n tipi diğeri p tipi olmak üzere iki kılıf (cladding) tabakasından oluşan bir yapıdır. n tipi kılıf tabakasındaki elektronlar ve p tipi tabakadaki holler ileri beslemeyle aktif tabakaya enjekte edilirler ve burada oluşan elektron hol çiftinin birleşmesi sonucunda ışık yayılımı gerçekleşir. Eğer lazer diyot eşik akım değerinin üstündeki bir akımla uyarılırsa “uyarılmış yayılım” oluşur ve ışık demetinin oldukça yüksek derecede yönlendiği, monokromatik bir ışık aktif tabakadan yayılır. Lazer diyotun her iki tarafına da yüksek derecede ve kısmen yansıtma özelliğine sahip olan aynalar kullanılarak bir rezonans kavitesi oluşturulurak ortamdaki foton yoğunluğunun artması sağlanır. Burada kavite Fabry-Perot rezonatörü olarak da adlandırılır. Genellikle kılıf tabakasının kırılma indisi aktif tabakanın kırılma indisinden daha düşüktür. Lazer ışığını aktif bölgede enine sınırlamayı sağlayan dalga kılavuzu (waveguide) yapısı da malzemeye eklenebilir. Bu lazer diyotu diğer lazer yapılarına göre daha avantajlı kılan birçok yönü vardır. Diğer lazerlerin aksine diyot lazerler elektriksel olarak pompalandıklarından bir dış ışık kaynağına gerek yoktur.

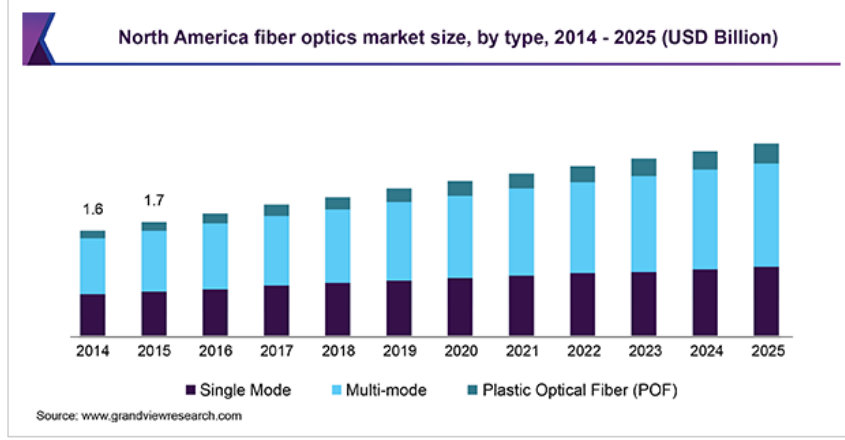
Yüksek güçlü lazer diyot kaynaklar lojik devreler, fiber optik iletişim sistemleri ve optik olarak pompalanan katı hal lazerler gibi çeşitli optik sistemler için gereklidir. Yarıiletken lazer diyotlar küçük boyutları, yüksek güç verimlilikleri, güvenilirlikleri, cam fiber optiklerdeki düşük iletim ve dağınım (transmission and dispersion) kaybına sahip dalga boylarında çalışmaları gibi özelliklerinden dolayı lazer ışık kaynağı olarak uygundur. Yüksek güçte yarı iletken lazer yapıları uzay- uydu iletişimleri, ısı da dâhil olmak üzere doğrudan diyot malzeme işleme uygulamaları, metal yüzeylerin ısıl işlenmesi, metal kesme, foto dinamik tedavi, epilasyon ve tıp alanında çeşitli tedavi yöntemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca diyot pompalı katı hal lazerler (DPSS) elektronik paketlerde işaretleme, ofset baskı uygulamaları için plakalar üzerine termal veya ablatif baskı, sabit disk ve yarı iletken endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Diğer bir uygulama alanı ise DPSS' in çıktısını, ışığa duyarlı materyallere uygulamak için verimli bir şekilde yeşile ve UV' ye

dönüştürme yeteneğinin kullanımınıdır ki, bu işlem 980nm dalga boyunda ışık yayan lazer kullanılarak Er katkılı fiber doğrultucu içeren DPSS lazerin frekansı ikiye katlanmasıyla yapılır. Atmosferik su buharının optik algılanması, sera gazının belirlenmesinde de InGaAs/GaAs lazer yapıları kullanılmaktadır. Ayrıca gelişmiş silahların önemli bir kısmında da lazer yapıları işaretleyici olarak kullanılmaktadır (Kölbl, 2008). Diğer taraftan, özellikle son yıllarda Endüstri 4.0'a dayalı üretim ve kontrol hatları, insansız hava araçları, dronlar ve otonom araçlar gibi sistemlerin gelişmesine paralel olarak, bu tip sistemlerde kullanılan Lazerli Mesafe Ölçme (Rangefinder) ve LİDAR teknolojilerinin de gelişmesiyle kaynak olarak kullanılan lazerlere olan ilgi daha da artmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında aktif bölgede InGaAs/AlGaAs kuantum kuyu ve bariyer tabakalarının kullanıldığı; 9xx-10xx nm dalga boyu aralığında ışık yayan lazer diyot yapısı kuantum kuyu tabakası olarak kullanılan InGaAs epitaksiyel katmanındaki indiyum alaşım oranı değiştirilerek büyütülecektir. Çalışmalar esnasında üretilecek olan 915 nm dalga boyunda ışık yayan yüksek güçlü (>8 W) katıhal lazer yapısı ERMAKSAN Optoelektronik Ar&Ge Merkezinde kurulu olan, bir büyütme de 14x3" numune büyütme kapasitesine sahip olan ve robotik birimi sayesinde tek bir reçete ile 28 adet numune büyütme imkânı sunan MOCVD sistemine aktarılacaktır. ERMAKSAN AŞ'de büyütülen yapıların fabrikasyonu ve paketlemesi tamamlandıktan sonra üretilen çipler firmanın ürettiği sac kesme tezgahlarında kullanılmak üzere bir fibere akuple edilecektir. Bu tez sonucunda ortaya çıkan milli ürün BRMAKSAN'ın sac kesme tezgahlarında kullanmak için ithal ettiği lazer diyotların yerini alacağından, katı hal lazer diyot alanında ülkemizin dışa bağımlılığını azaltacaktır. Böylece, diyot pompalamak için kullanılan katı hal lazer diyot yapılarının giderek artan milyon dolarlık büyük pazarında ülke olarak bizim de yer almamız sağlanacaktır.

Çeşitli araştırma gruplarının giderek artan lazer diyot piyasası hakkında yaptığı öngörülerden bazıları şunlardır. Markets and Markets Research Private Ltd.'nin yapmış olduğu öngörüye göre 2015 ve 2020 yılları arasında lazer diyot pazarında %13 oranında bir cari artış olacağını tahmin etmektedir (Marketsandmarkets, 2019). Allied Market Research'ün yaptığı öngörüye göre 2017 yılında 1,782 milyar dolar olan küresel fiber lazer piyasasının 4,403 milyar dolara çıkacağı ve 2018 yılından 2020 yılına kadar olan süreçte ise %11,9 cari büyüme olacağını öngörmektedir (Allied, 2019). Başka bir araştırmada da Grand View Research grubu; 2018

yılında fiber lazer piyasasının 6,5 milyar dolar olduğunu ve 2019'dan 2025 yılına kadar bu pazarın %4,6'lık bir cari büyüme göstereceğini tahmin etmektedir (Grand View, 2019). Şekil 1.1'deki Grand View Research tarafından yayınlanan grafik fiber optik piyasadaki yıllara göre beklenen artışı açıkça göstermektedir.



**Şekil 1.1** Kuzey Amerika'da Fiber Optik Pazarında Beklenen Büyüme

Lazer diyot uygulamalarında; güç, parlaklık ve güvenilirlik olmak üzere üç kritik özellik önem kazanır. Bu üç özelliğin hepsini aynı anda sağlamak çok zordur. Özellikle de ticari uygulamalarda kullanılan yüksek parlaklık ve güvenilirlikte çalışan lazeri üretmek oldukça zordur. Ticari uygulamalarda kullanılan lazer diyotların güç ve verimini artırmak, eşik akım yoğunluğunu düşürmek için aktif tabakaya göre dalga kılavuzu ve kılıf tabalarının aynı kalınlık ve kompozisyonda sıralandığı simetrik lazer yapılarının yanı sıra, asimetrik yapıları lazer diyotların mevcut olduğu görülmüş; bu yapıların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, bu tez çalışmasında yüksek güçlere çıkmak için asimetrik yapı tasarımına sahip lazer diyot yapısı epitaksiyel olarak büyütülmesine karar verilmiştir.

### 1.1 Lazerlerin Tarihi Gelişimi

Lazer kelimesinin anlamı, İngilizce LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) yani "uyarılmış yayınım ile ışığın güçlendirilmesi" tanımlamasının kısaltılmış halidir. Lazer yapıları ışımının gerçekleştiği aktif ortamlara göre gaz, katı, sıvı ve yarıiletken lazerler olarak sınıflandırılırlar. 1917 yılında Einstein'ın uyarılmış ışımaya sürecinin varlığını

öne sürmesi ile başlayan süreci, 1953 yılında Amerikalı fizikçiler, C.H. Towness ve A.L. Schawlow ışık şeklinde LAZER kavramını teorik olarak savunmaları izledi (Schawlow, 1958). 1960 yılında yine bir Amerika' lı fizikçi olan T.H. Maiman tarafından Ruby kristalinden oluşan çubuk kullanılarak ilk katı hal Lazeri üretildi (Maiman, 1960). 1961 yılında He ve Ne gazlarının aktif bölgeyi oluşturduğu ilk sürekli dalga gaz lazer yapıldı (Javan, 1961). 1962 yılında GaAs p-n eklemi kullanılarak oluşturulan yarıiletken lazer diyotların ilk keşfedilmesi; endüstride devrim etkisi yaratacak bir buluş olarak düşünülmüştür (Hall, 1962). 1962 yılında keşfedilen bu lazer yapısı günümüzde kompakt disk oynatıcılarda, çoğu fiber iletişim sistemlerinde ve birçok optik iletişim sistemde kullanılmaktadır (Nathan, 1962).

1960'ların sonları ve 1970'lerin başında bu teknolojinin optik veri depolama, fiber optik ve serbest alan iletişim uygulamalarında kullanılabileceğini ilan eden çeşitli patentler ve makaleler yayınlanmıştır. Ancak ilk icat edilen lazer yapısı basit bir homo-eklem biçimindedir ve bahsedilen alanlarda kullanılması için üzerinde daha uzun yıllar çalışılması gerekmiştir. Özellikle yüksek güçlü yarıiletken lazerlerin güç kapasitelerini artırmak, ancak epi-kristal büyütme teknolojilerinin geliştirilmesiyle hetero-yapılı lazerler ve daha sonra kuantum kuyulu lazerlerin gelişimi, litografi tekniklerinin iyileştirilerek pasivasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve diyotun soğutucu/radyatör (heatsink) kullanılarak soğutulması ile mümkün olmuştur. Tüm bu geliştirmeler tek modlu lazerler, lazer dizileri, dağıtılmış geri besleme lazerleri, fiber amplifikatörleri ve fiber lazerler için nadir bulunan katkılı toprak elementi kullanım teknolojilerinin eşzamanlı olarak geliştirilmesi ile birlikte cihaz tasarımlarındaki atılımların hepsi günümüzdeki yüksek teknoloji yarı iletken lazerlerin teknolojik endüstrilerine olanak sağlamıştır.

1970'lerin sonuna gelindiğinde, hetero eklem biçimindeki yarı iletken lazer yapılarının geliştirilmesiyle, sürekli enjeksiyon modunda (CW) yayılım (emisyon) yapan lazer diyot elde edilmiştir (Hayashi, 1970). Lazer yapılarının tasarımındaki ilerlemeler sonucunda geri besleme lazer yapılarının icadı da lazer teknolojisinin gelişmesinde atılan en önemli adımlardan bir tanesidir. İlk üretilen geri besleme lazer yapıları sıvı faz epitaksi (LPE) tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Ancak kullanılan LPE tekniğiyle üniform bir şekilde ince epitaksiyel tabakalar büyütülememesi, istenilen katkılama (doping) profilininin elde

edilememesi ve aktif tabaka kalınlığını 0,1-0,5µm mertebesinde sınırlı olması gibi etkenler üretilen lazerin verimliliğini sınırlamaktadır. Lazer yapılarında aktif tabakanın kalın olması sonucunda aktif bölgedeki serbest taşıyıcılı optik modlar üst üste gelir. Aktif bölgedeki serbest taşıyıcıların soğurulmasının sonucunda doğal olarak lazerde yayılım kayıpları oluşur ve bunun sonucunda eşik akımı yükselir ve lazerin verimliliği kavite uzunluğu sınırlandırılır. Lazer boşluğundaki yüksek yayılma kaybının sonucu sadece lazer verimliliğini etkilemekle kalmaz aynı zamanda uzun kavite boylu lazerlerin fabrikasyonunu da etkiler ve bu yüzden lazerin termal direncini de etkiler. Lazerin termal direnci, yüksek güçlü lazerlerin tasarımı için oldukça önemlidir. LPE tekniği ile büyütülen lazerlerin kavite uzunluğu genellikle 250 µm' den azdır. Kavite uzunluğunun kısa olması lazerin termal direncini artırır, dolayısıyla gücünü azaltır ve sonunda lazerin çıkış gücünü dağıtma kabiliyetini sınırlanır. Tüm bu sebeplerden dolayı LPE tekniği ile üretilen lazer yapılarından sadece birkaç miliwatt mertebesinde güvenilir çıkış gücü elde edilebilmiştir (Butler, 1980).

Uniform malzemelerin büyütülmesi hem lazer performansı hem de lazer yapısının verimi için oldukça önemlidir. Yüksek güçlü lazer diyotların ilk temel teknolojik ilerlemesi metal organik kimyasal buhar depolama (MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (MBE) büyütme tekniklerinin geliştirilmesiyle başlamıştır. Bu iki temel büyütme tekniğinin geliştirilmesi homojen bir şekilde epitaksiyel tabakaların büyütülmesi, büyütülen atomik katmanların kalınlıklarının kontrol edilebilmesi ve ince kuantum kuyu yapılarının elde edilmesi mümkün olmuştur. Daha düzgün epitaksiyel katmanların büyütülmesi, büyük açıklıklı lazer yapılarının geliştirilmesine olanak sağlamıştır ve bu olayı takip eden sonraki 10 yılda 200µm lik bir lazer kaynağından 10W sürekli dalga çıkış gücü elde edildi (Scifres, 1983), (Sakamoto, 1990).

MOCVD ve MBE'nin ortaya çıkması, araştırmacıların lazer tasarımları hakkında düşünme biçimini değiştirdi. Düzgün bir epitaksiyel büyüme ile atomik boyutta kristal birikimini kontrol etme yeteneği, yüksek güçlü lazerlerin geliştirilmesi için ilk büyük gelişmedir. Bu yeni büyütme yöntemlerinin gelişimi sonrasında lazer araştırmacılarının ortaya attıkları ilk kavramsal atılım kuantum kuyularıdır. Yüksek verimli ve düşük sürüklenme akımlı bir lazer diyot yapısı üretmek için aktif tabaka kalınlığının 20 nm'den daha az olduğu bir kuantum kuyu yapısı oluşturmak gerektiği düşünülmüştür (Sang). Optimum katman kalınlıkları 10 nm



olan kuantum-kuyulu lazer yapılarının büyütülmesi eşik akım değerlerinde belirgin bir azalmaya, serbest taşıyıcı kayıpları ile eşik akımının sıcaklık duyarlılığında bir azalmaya neden oldu (David, 2000). Bu katkıların tümü lazerin verimliliğini artırmayı ve daha uzun kaviteli dolayısıyla daha düşük ısı dirençli lazer yapılarının üretimini mümkün kılar. Dahası, aktif tabakadaki optik modların çakışması daha az olduğundan, lazerin ölümcül optik hasarından (catastrophic optical damage, COD) kaynaklanan güç sınırlaması önemli ölçüde geliştirildi. Sonuç olarak daha yüksek çıkış gücüne sahip lazer yapılarının büyütülmesi mümkün oldu (Gaoy, 2007), (United States Patent No. US20070298531A1, 2003).

Yarıiletken lazerlerin özellikle de yüksek güçlü yarı iletken lazer yapılarının icadındaki bir diğer önemli teknolojik atılım ise pseudomorfik malzemelerin kavramsal gelişimi ve deneysel olarak büyütülebilmesidir (Agrawal, 1986), (Waters, 1990). 1980' li yıllara kadar yarıiletken endüstrisinde kullanılan yarı iletken lazer cihazlar, sadece örgü uyumlu epitaksiyel büyütmeleler kullanılarak yapılıyordu. En eski ve muhtemelen en iyi geliştirilen heteroyapı lazer sistemi AlGaAs-GaAs lazer sistemidir. AlGaAs-GaAs heteroyapı sisteminin en çekici özelliği neredeyse örgü uyumlu olmasıdır (örgü uyumsuzluğu yaklaşık  $0,12^\circ$  dir). Örgü uyumlu GaAs-AlGaAs kullanılarak elde edilen geleneksel çift hetero-yapılı kuantum kuyu lazer uygulamalarının dalga boyu 650-800 nm arasında değişmektedir (Coleman, 2000). 1980' lerin ortalarında büyütülen tabakanın kalınlığının kritik kalınlıktan az olduğu durumlarda kuantum kuyu yapısını, üzerine büyütüldüğü katmanla aralarında örgü uyumu olmasa bile misfit dislokasyonları oluşmadan büyütmenin mümkün olduğu kavramsal kuramını ileri sürülmüştür (Matthews, 1974), (Frank, 1949). Bu kuram ile AlGaAs-GaAs kuantum kuyulu lazer yapılarının yanı sıra InGaAs kuantum kuyusu içeren lazer yapıları da üretilmeye başlanmıştır.

AlGaAs tabaka yapılarında aktif bölge olarak InGaAs yapısını kullanmanın temel faydaları: daha düşük eşik akımında çalışan, yüksek verimli, daha yüksek dalga boylarında yayınım yapan, yüksek güvenilirlikli ve daha yüksek kazançlı lazer yapıları üretmeye olanak sağlamasıdır. GaAs alttaş üzerine büyütülen AlGaAs tabakalı lazer yapılarında yayınım dalga boyu 780nm' den 1100nm' ye kadar değişmektedir, böylece daha sonra detaylı olarak tartışılacak olan Er katkılı fiber doğrultucuların pompalanması için gerekli yayınım dalga boyuna ulaşmak AlGaAs yapıları içeren lazerlerin büyütülmesi ile mümkün olmuştur

(Coleman J. , 2000). Tüm bunlara ek olarak AlGaAs lazer yapılarında aktif bölgede In bileşiği içeren yapının kullanılmasının kusurların yer değişimini engellediği böylece malzemenin güvenilirliğini geliştirdiği görülmüştür (David, 2000). Tüm bu gelişmelerden sonra iletişim sistemleri için gerekli olan uzun ömürlü, 980nm dalga boyunda çalışan oldukça yüksek güvenilirlikte lazer yapıları geliştirilmiştir.

MOCVD ve MBE'nin ilk kullanımı ile 780 ile 860 nm dalga boyları arasında çalışan lazer yapıları üretildi. AlGaAs kullanılarak üretilen 810nm dalga boylu lazer yapısı kullanılarak Nd:YAG lazerin pompalanması yüksek güç yarıiletken lazer yapısının ilk uygulanma alanlarındanndır. Nd: YAG lazerlerinin diyot pompalama işleminde kullanılması flaş lamba pompalı katı hal lazerlere kıyasla boyutlarda belirgin bir azalma ve işletim verimliliğinde önemli bir artış sağlamıştır. Tüm bu özelliklerinden dolayı diyot pompalı katı hal (DPSS) lazerler çoğu bilimsel uygulamalarda iyon lazer ve flaş lamba pompalı lazer yapılarının yerini almıştır (Garrec, 2009). Daha sonraki yıllarda yarı iletken lazerler gibi katıhal lazerler de güvenilir hale gelmiştir. DPSS lazerler kesme ve eritme uygulamalarında CO2 lazerlerle rekabet etmeye başladı ve pazarların önemli bir kısmında DPSS lazerler satılmaya başlandı. 1984 yılında ilk ticari olarak yüksek güçlü yarı iletken lazer yapıları Nd:YAG pompalı lazerlerde kullanılmış ve 100mW sürekli dalga gücü elde edilmiştir.

Pseudomorfik malzemeler 630-680 arasında yayılım yapan AlInGaP içeren diğer yüksek güçlü lazerin gelişimi için de kritik öneme sahiptir (Major, 1995). Fotodinamik terapi ve epilasyon uygulamalarında kullanılan 635 nm dalgaboylu kırmızı renkli AlGaInP lazer diyot yapıları, örgü uyumlu olarak 680nm dalga boylu bölgede çalışacak şekilde büyütüldüklerinde yüksek eşik akımlı ve birkaç miliwatt çıkış gücü ile sınırlı lazer yapıları üretmek mümkünken, AlGaInP yapılarının pseudomorfik malzemelerle tasarlanan lazer yapılarının büyütülmesiyle önemli derecede yüksek kazanç ve daha düşük eşik akım yoğunluklu lazerler elde edildi (Alam, 2014). Sonuç olarak 630 ve 680nm dalgaboyu aralığında çalışan yüksek güç yüksek verimli lazerler elde etmek mümkün oldu (Meney, 1995). Pseudomorfik kavramlar verim, güç ve polarizasyon etkilerinin optimize edildiği GaInAsP/InP içeren yarı iletken lazer yapılarına, 380-470nm dalgaboyu aralığında ışımaya yapan AlGaInN lazer yapılarına ve orta infrared bölgede ışımaya yapan AsSb tabanlı malzemeleri içeren lazer yapılarına da uygulanmıştı.

## 2 YARIİLETKEN LAZERLER

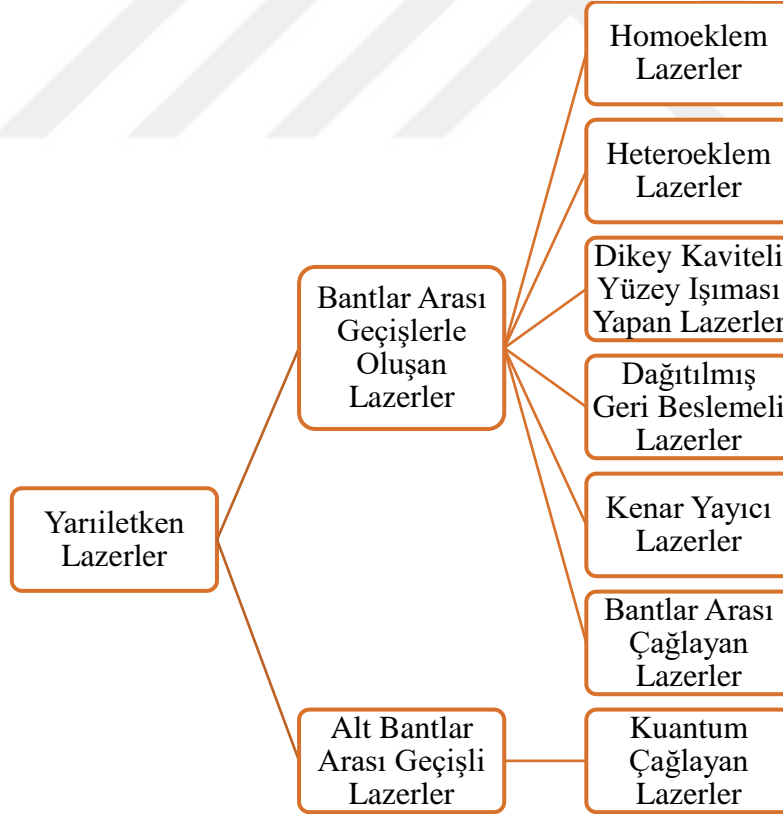
Lazerler ışımının gerçekleştiği aktif ortamlarına göre katı, sıvı, gaz ve yarıiletken lazerler olmak üzere dört farklı şekilde gruplandırılırlar. Yarıiletken lazerler bilim dünyasına 1962 yılında Hall tarafından GaAs p-n eklemine oluşturulması ile girmiştir. Bu yarıiletken temelli lazer kızıl ötesi bölgede ışımaya yaparken ilk görünür bölgede ışımaya yapan lazer Holonyak ve Bevacque tarafından üretilmiştir. İlk lazerin gösteriminin ardından lazer teknolojisi büyük bir hızla gelişmiştir ve yarıiletken lazerler günümüz teknolojisinin pek çok alanda kullanılan önemli bir lazer türü olarak diğer lazerlerin önüne geçmiştir. (Erol, 2013). Günümüz teknolojisinde yarıiletken lazerlerin kullanıldığı uygulama alanlarından bazıları şunlardır; askeri, tıp, telekomünikasyon, sanayi, bilgisayar ve bilimsel araştırmalar.

Lazerler uyarılmış yayınım ve optik geri beslemeyle çalışan aygıtlardır. Valans bandındaki bir elektronun enerji kazanması ile iletim bandına geçmesi soğurma olarak tanımlanmaktadır. İletim bandındaki bu elektron fazla enerjisini foton olarak vererek valans bandına dönebilir. Bu olaya kendiliğinden yayınım veya doğal ışımaya denir. Kendiliğinden yayınım sonucu ortaya çıkan fotonun iletim bandındaki diğer elektronları tetikleyerek tüm elektronların valans bandına düşmesi sonucu koherent (eş fazlı) fotonların oluşması ile gerçekleşen olaya ise uyarılmış yayınım denilmektedir. Doğal ışımaya süreci soğurmanın tersi olan bir süreçtir ve LED yapıları bu sürece bağlı olarak çalışır. Uyarılmış ışımaya ise lazerlerin çalışmasındaki temel süreçtir. Uyarılmış ışımaya süreci nüfus terslenmesinin oluşturulmasıyla elde edilir. Lazerlerde nüfus terslenmesi pompalama olarak adlandırılan dış bir enerji kaynağının kullanılmasıyla sağlanır. Pompalama elektriksel ya da optik olabilir.

Lazer emisyonu için lazer ortamında faz uyumlu fotonların yaratılması başka bir ifade ile uyarılmış yayınımın oluşturulması ve ortamdaki foton yoğunluğunun artırılması gerekir. Ortamdaki foton yoğunluğunun artırılma süreci optik kavite olarak adlandırılan bir hacim içerisinde gerçekleşir. Optik kavite temel olarak fotonların çoklu yansımalar yaparak lazer ortamına geri dönderip fotonları hapseden ve foton yoğunluğunun artmasını sağlayan bir rezonatördür. Kavitenin her iki tarafında bulunan aynalar ortama geri yansıtılarak yeni fotonların oluşmasına katkıda bulunur. Kavite pozitif geri beslemeyi sağladığı için optik sinyal defalarca kavite içerisinde gidip gelir ve bunun sonucunda ışığın kavitede yükselmesi

sağlanmış olur. Optik kavite, Fabry Perot rezonatorü olarak adlandırılır. Kaviteyi oluşturan aynalardan biri kısmen geçirgen olarak tasarlanırsa, üretilen fotonlar belirli bir kazanç değerine ulaştığında kaviteden çıkar ve böylece lazer ışması elde edilmiş olur. Optik kazanç; yükseltici ortam içindeki elektronların termal hareketi, kusur düzeyleri arasında gerçekleşen ışmasız geçişler gibi etkenlerden dolayı oluşan, soğurma, saçılma ve aynalardaki yansıma kayıplarının üstesinden gelindiğinde elde edilir.

Yarı iletken lazerler çalışma şekillerine göre, bantlar arası geçişli (interband transition) ve alt bantlar arası geçişli (intraband transition) olmak üzere iki farklı grupta incelenebilir (Şekil2.1). Bantlar arası geçişli lazerler elektron boşluk çiftinin birleşmesiyle yarıiletken malzemenin enerji bant aralığı ile ilişkili olarak lazer ışını yayarlar. Alt bantlar arası geçişli lazerler ise iletkenlik bandındaki elektronların alt bantlar arası geçişi prensibini kullanarak lazer ışığı elde ederler.

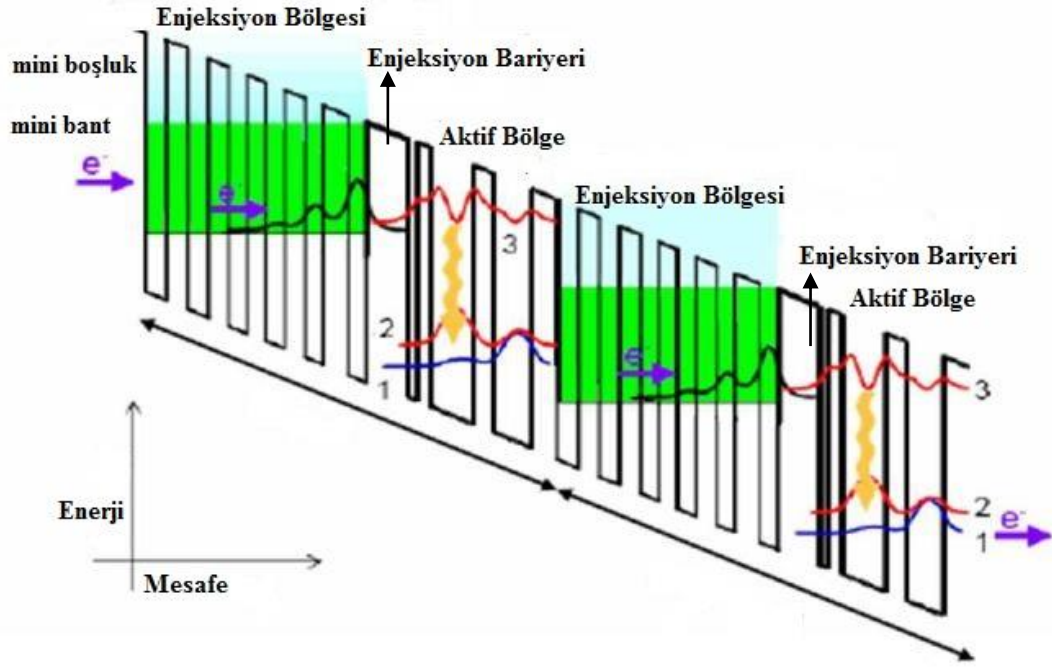


Şekil 2.1 Yarıiletken lazerlerin sınıflandırılması

## 2.1 Alt Bantlar Arası Geçişli Lazerler

### 2.1.1 Kuantum Çağlayan Lazerler

Teorik olarak kuantum çağlayan lazerlerin kapsadığı dalga boyu aralığı  $\sim 3-200 \mu\text{m}$ 'dir (DEMİR, 2017). Kuantum çağlayan lazerler (quantum cascade laser (QCL)); aktif bölgedeki kuantum kuyu veya kuyuların kalınlığının ayarlanması ile ışınım dalga boyunun kontrolünün sağlandığı, iletkenlik bandındaki elektronların alt bantlar arası geçiş prensibini kullanmasıyla lazer ışığının elde edildiği lazer yapılarıdır. Genel bir kuantum çağlayan lazer yapısı enjektör bölgesi ve aktif bölge olarak adlandırılan iki ana bölgeden oluşmaktadır. Aktif bölge kuantum çağlayan lazer ışığı demetinin elde edildiği bölgedir. Enjektör bölgesi ise elektronların çağlama prosesini sağlayan kısımdır ve aktif bölgenin en yüksek enerji seviyesi için elektron rezervi olarak görev yapmaktadır. Şekil 2.2, 3 tane kuantum kuyusundan (QW) oluşan genel QCL yapısını göstermektedir. Enjektör bölgesi şekilden de görüldüğü gibi mini bantlar ve mini boşluklardan oluşmaktadır. Mini bantlar elektronların fonon yayarak hızlı bir şekilde yeniden kullanım için taban duruma iletilmesi amacıyla çeşitli enerji seviyelerinden oluşur. Mini boşluklar ise elektronların sürekli seviyelere veya sonraki enjektör bölgesine herhangi bir foton salınımı olmadan geçmesini engeller. Bu tasarımda nüfus terslenmesi ve kazancın olduğu aktif bölge üç enerji düzeyinden oluşmaktadır. Yapılan tasarıma göre elektronlar soldan sağa doğru akmaktadır. Aktif bölgeye enjekte edilen elektronlar, 3 numaralı yüksek enerji seviyesinden 2 numaralı düşük enerji seviyesine geçmesi durumunda foton açığa çıkar. Daha sonra fononlar vasıtasıyla elektronlar gevşeme mekanizması ile 1 numaralı taban duruma geri geçerler. Aktif bölge dışında oluşacak olan ışımsız geçişleri minimize etmek amacıyla enjeksiyon bölgesi ile aktif bölge arasında enjeksiyon bariyeri de eklenebilir. Elektronun enjeksiyon bariyeri boyunca tünellemesi enjeksiyon veriminin artmasını sağlarken kalın enjeksiyon bariyeri üst enerji seviyelerinde elektronun daha uzun süreli yaşam ömrüne sahip olmasını sağlar. Böyle bir tasarımla n bölgeden oluşan aktif bölgede bir elektronla n tane foton elde edilir. Bu nedenle elektron-deşik birleşme prensibine dayanan lazer yapılarına oranla kuantum çağlayan lazerlerinde verim oldukça yüksektir.



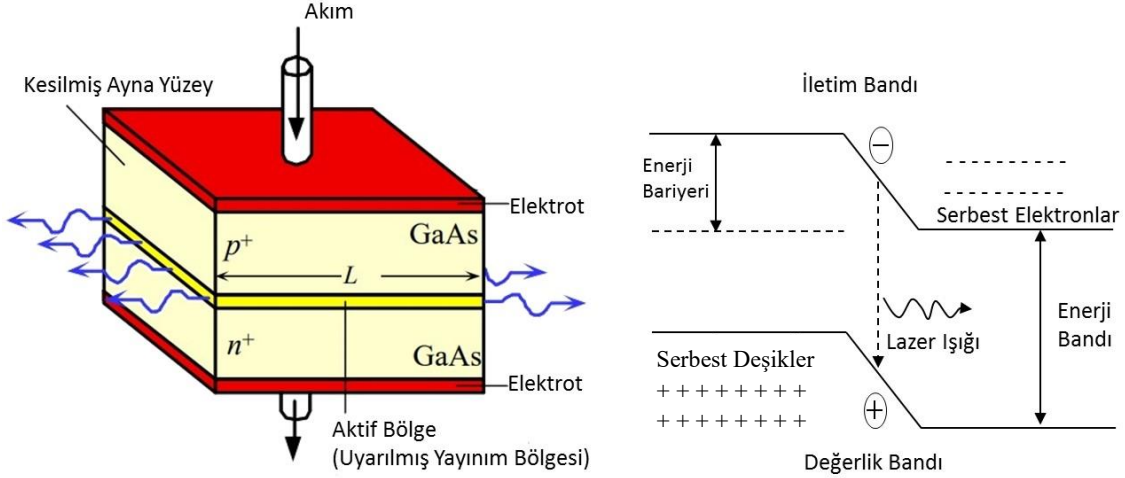
Şekil 2.2 Genel QCL yapısının iletim bant diyagramı

## 2.2 Bantlar Arası Geçişlerden Oluşan Lazerler

### 2.2.1 Homoeklem Lazerler

LED gibi ileri yönde beslenen bir p-n ekleminden oluşan homoeklem lazerler en basit yarıiletken lazer yapılarıdır. LED yapısından farklı olarak eklem p- ve n- bölgeleri aşırı katkılanır (dejenere durum). Akseptör atomları ile aşırı p-tipi katkılama fermi seviyesinin valans bandının içine kaymasına neden olurken, aşırı n-tipi katkılama ise fermi seviyesinin iletkenlik bandının üst tarafına ilerlemesini sağlar. Aşırı katkılı p-n eklemine uygulanan ileri besleme voltajı yüksek enjeksiyon sağladığından lazer ışınının oluşması için gereken nüfus terslenmesi şartı sağlanmış olur. Optik geri besleme, başka bir ifade ile kavite ara yüzeyinde foton yoğunluğunun artırılması ise lazer diyotun her iki yüzünün yansıtıcı ayna kullanmak yerine kısmen parlatılmasıyla oluşan yarı iletken hava arayüzeyinde fotonların bir kısmının ortama geri yansıtılması ile elde edilir (Erol, 2013). Böylece koherent ve aynı dalga boylu lazer ışınları elde edilir. p ve n katkılı bölgelerden oluşan bir homoeklem lazerde ışınımın

oluştugu aktif bölge p-n eklemine arınmış bölgesi civarındadır. Arınmış bölge belli bir eşik değerinin üstünde beslendiğinde, lazer ışınının elde edilme şartı olan uyarılmış ışım oranı artar ve kavitede lazer ışığı oluşmaya başlar. Bir homoeklem lazerde foton ve taşıyıcı sınırlaması oldukça zayıf olduğundan, eşik akım yoğunluğu da oldukça yüksektir. Şekil 2.3 aşırı n tipi ve p tipi katkı atomları kullanılarak oluşturulan bir homoeklem lazer yapısının şematik gösterimi ve ileri besleme uygulandığı zamanki p-n eklemine durumu gösterilmiştir.



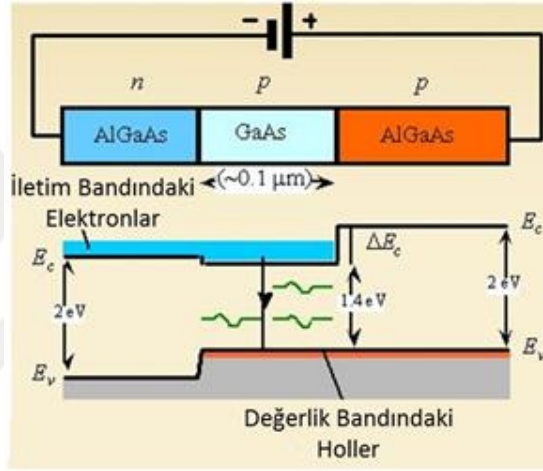
Şekil 2.3 GaAs homoeklem lazer diyotunun şematik gösterimi (Kasap S. , 2001)

### 2.2.2 Heteroeklem Lazerler

Aktif bölge kalınlığının taşıyıcıların difüzyon hızı ile tanımlandığı homoeklem lazerlerde ışımın olduğu bölge, difüzyon uzunluğu ile belirlendiğinden homoeklem lazerlerde aktif bölge çok iyi tanımlı değildir ve eşik akım yoğunlukları oldukça yüksektir. Bu tip lazerler ısınma etkilerinden dolayı oda sıcaklığında sürekli enjeksiyon modunda (cw) çalışmazlar. Lazerin eşik akımını düşürmek için hem taşıyıcı hem de optik modların çok iyi sınırlandırılması gerekir ve sınırlandırma heteroeklem lazerler ile sağlanır (Erol, 2013).

Heteroeklem yarıiletken lazer başlıca üç katmandan oluşmaktadır. Orta katmanda bulunan tabakanın kalınlığı diğer tabakalara göre daha incedir, enerji bant aralığı biraz daha küçük ve kırılma indisi diğer katmanlara göre biraz daha yüksektir (Erol, 2013). Lazerlerin günümüzdeki haline gelmesi için bir dönüm noktası olan heteroeklem lazerler iletim

bandındaki elektronlarla valans bandındaki boşlukların ve enjekte edilmiş taşıyıcıların ışımalı birleşmelerinin dar bir tabaka içine hapsedilmelerini sağlayan bir dizayna sahiptir. Şekil 2.4 n-tipi AlGaAs malzemesinden enjekte edilen elektronların yasak enerji bant aralığı daha düşük olan GaAs malzemesi içine hapsedilip birleştirildiği tek heteroeklemden oluşan bir yarıiletken lazer diyot yapısı verilmiştir. Bu yapıda GaAs'ın kırılma indisinin AlGaAs'ın kırılma indisinden biraz büyük olması, iç tam yansıma sebebiyle lazer modunun hapsedilmesine yol açar başka bir ifade ile dalga kılavuzu oluşturur. Buda büyük bir optik genliğin kazancın meydana geldiği bölgenin içine hapsedilmesine neden olur.



Şekil 2.4 GaAs/AlGaAs heteroeklem lazer diyotun şematik gösterimi (Erol, 2013)

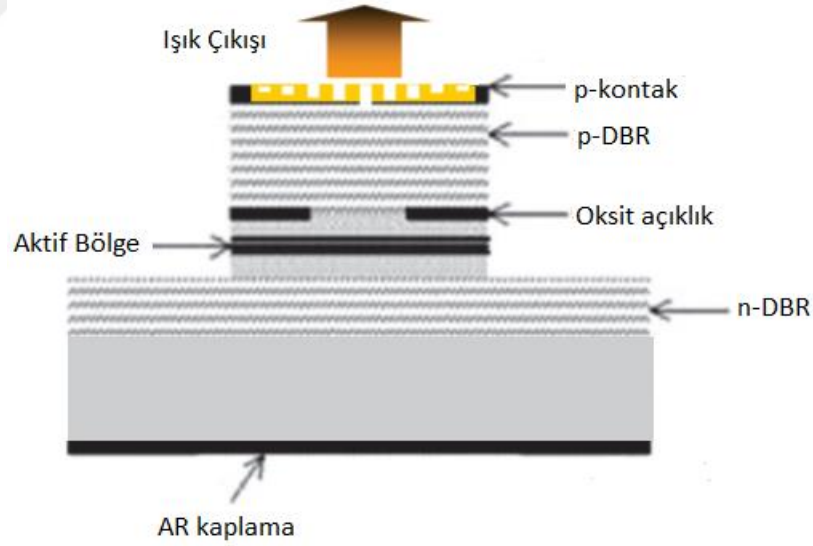
### 2.2.3 Dikey Kaviteli Işık Yayan Lazerler

Dikey kaviteli yüzey ışıması yapan lazerler (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) büyütme düzlemine paralel yansıtıcılara sahip oldukları için yüzey ışıması yaparlar. Şekil 2.5' de gösterdiği gibi tipik bir VCSEL yapısı üst DBR ayna, alt DBR ayna ve kuantum kuyulu aktif bölge olmak üzere üç bölümden oluşur (Bashir, 2009). Dikey kaviteli yüzey ışıması yapan lazer (VCSEL) yapılarında kullanılacak olan DBR aynaların tasarlanması ve tasarlanan katmanların tabaka tabaka büyütülmesi oldukça önemlidir. VCSEL yapılarının performansı büyük ölçüde büyütülen tabakaların düzgünlüğüne bağlıdır. Başka bir ifadeyle süper örgü yapılarının büyütme kalınlıklarının kesin bir şekilde kontrol edilmesi DBR yapılarının istenilen optik özelliklerinin başarılı bir şekilde elde edilmesi için çok önemlidir (Rebey, 2004). DBR, kısa kavite uzunluğundan ortaya çıkacak olan açığı kapatmak için



yüksek yansıtmayı sağlayacak şekilde kavitenin her iki ucunda yer alan yüksek ve alçak kırılma indisli dielektrik yansıtıcıların çeyrek dalga boyu kalınlığında birbiri ardına büyütülmesi ile elde edilir. Yüksek ve düşük kırılma indise sahip olan çeyrek dalga tabakaların tekrarlanan çiftlerinden oluştuğundan DBR yapılarına çeyrek dalga yığını veya Bragg yığını (stack) da denir. DBR'lar bazen iki katmanlı bir yığını veya ikili bir yığın olarak adlandırılır (Mogg, 2002). DBR yapıları sadece yansıtıcı aynalar olarak kullanılmaz, aynı zamanda kazanç bölgesine metal kontaklardan taşıyıcıların taşınmasını da sağlar. Dolayısıyla tasarlanan DBR aynalarının yüksek yansıtıcılık özelliğinin yanı sıra, kazanç bölgesine akım taşıdığından düşük seri dirençli ve yüksek termal iletkenlikli olması gerekir (Mogg, 2002)

VCSEL' ler onların şiddeti, düşük güç tüketimi, dairesel ışık çıkışı ve geleneksel diğer yüzey yayıcı lazerlere göre düşük üretim maliyeti ve fiber optik iletişim için oldukça çekici bir potansiyele sahiptir.



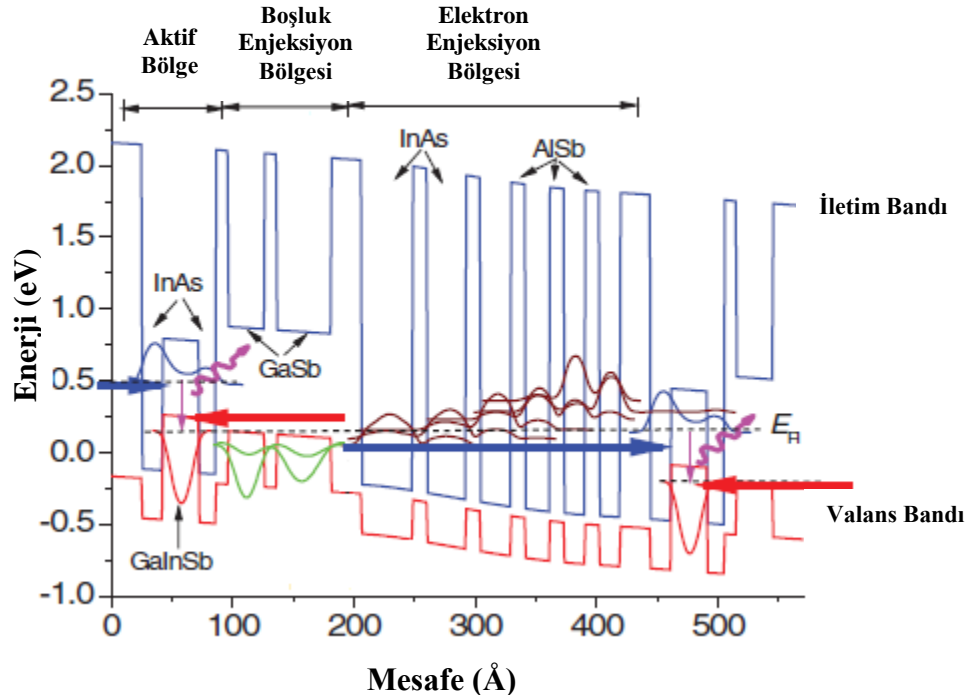
Şekil 2.5 VCSEL yapısının şematik gösterimi (Zhao, 2018)

#### 2.2.4 Dağıtılmış Geri Beslemeli Lazerler

Dağıtılmış geri beslemeli (distributed feedback laser, DFB) lazerler tek modda çalışan lazerlerdir. Çok modlu lazerlerle fiber boyunca veri aktarılırken sinyal genişlediğinden erişim mesafesini düşürürken, lazerin tek modda çalışması fiber içindeki veri transferinin daha uzun mesafelere ulaşmasını mümkün kılar. Bu lazer türlerinin diğer bir özelliği ise sıcaklığa olan bağlılığının Fabry-Perot kavitesinininkine göre düşük olmasıdır, dolayısıyla DFB lazerlerin eşik akım yoğunlukları daha düşüktür. Bir DFB lazerde yansıtıcı DBR yapıları kırınım ağı gibi tasarlanır ve periyodik bir yapıya sahiptir. Oluklu yapıyı oluşturacak olan tabaka büyütülür, litografi işlemi uygulanarak periyodik olarak oluklar elde edilecek şekilde yapı biçimlendirilir. Sonrasında bu oluklu tabakanın üzerine kırılma indisi farklı bir katman büyütülür. Böylece oluklu yapı boyunca kırılma indisinin periyodik olarak değiştiği bir kavite yapısı elde edilmiş olur. Aktif bölgede üretilip kırınım ızgarasına yönelen ışığın tek modda sadece belirli bir dalga boyunda osilasyon yaparak yansıdığı bu tür lazer yapıları DFB lazerler olarak adlandırılır.

#### 2.2.5 Bantlar Arası Çağlayan Lazerler

Bantlar arası çağlayan lazerler (interband cascade laser, ICL) elektromanyetik spektrumun orta kızılötesi ( $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$  dalga boyu aralığında) bölgesinde ışımaya yapan lazerlerdir. InAs, GaSb, AlSb gibi malzeme grupları ve onların alaşımlarının heteroepitaksiyel olarak büyütülmesiyle elde edilir. Bu lazer yapıları bir çok yönüyle alt bantlar arası ışımaya yapan lazer yapılarına benzer. QCL yapılarında olduğu gibi ICL yapılarında da bant aralığı mühendisliği oldukça önemlidir. QCL yapılarında ışımaya geçişler kuantize enerji düzeyleri arasında olurken ICL yapılarında ışımaya geçişler aktif bölgedeki bantlar arası geçişler sonucunda sağlanır.

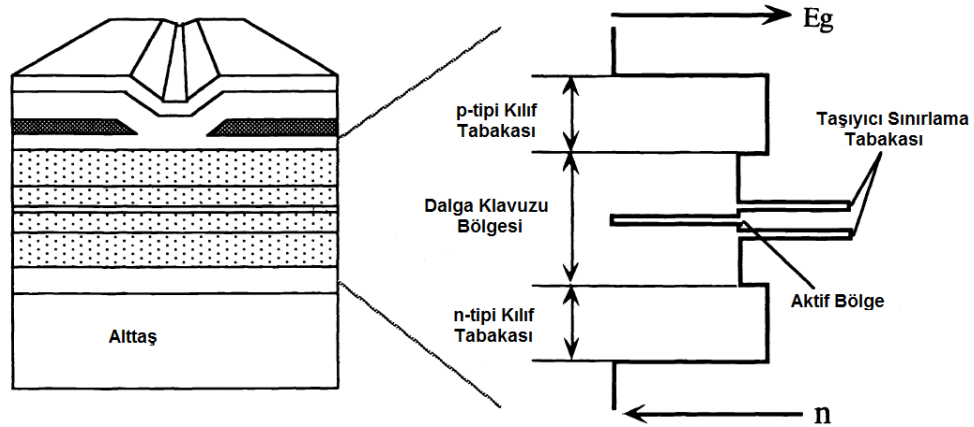


Şekil 2.6 Bantlar arası çağlayan lazerin genel yapısı (Vurgaftman, 2015; Höfling, 2012)

Şekil 2.6' da verilen tipik bir ICL yapısından da görüldüğü gibi, ICL lazerlerde kazanç aktif kuyu bölgesinde elektron ve hollerin birleşmesiyle sağlanır. ICL yapısında klasik lazer diyot yapılarından farklı olarak yük taşıyıcıları aktif bölge etrafındaki p-n eklemiyle enjekte edilmez. Işıma elektron ve hol enjeksiyon tabakalarının özel bir şekilde tasarlanması sonucu aktif bölgede oluşur. Şekil 2.6'daki tasarım üzerinden elektron ve hol oluşumu kısaca özetlenecek olursa; GaSb katmanından InAs katmanına elektronların tünellemesi ile holler oluşmaktadır. Yapıdaki elektronlar elektron enjeksiyon bölgesine giderken, hol aktif kuantum kuyu bölgesine enjekte edilir. Elektron enjeksiyon bölgesi kuantum kuyu kalınlığının giderek azaltıldığı InAs/GaSb süperörgü yapısından oluşur. Elektron enjeksiyon bölgesindeki kuantum kuyu kalınlığının giderek azaltılması ile enerji seviyesinin iletim bandına göre artması sağlanır. Böylece elektron enjeksiyon bölgesinden gelen elektronların bir sonraki aktif kuantum kuyu bölgesine enjekte edilmesi sağlanır.

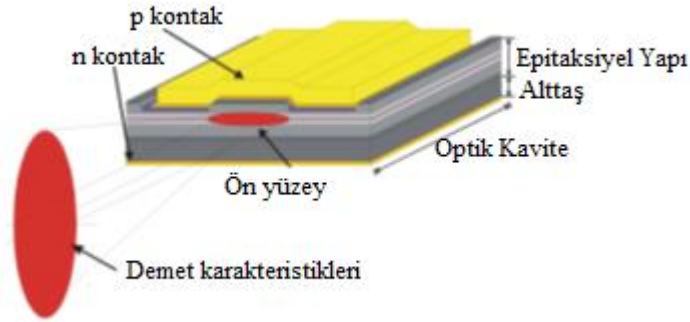
## 2.2.6 Kenar Işıması Yapan Lazerler

Yarı iletken epitaksiyel tabakaların üst üste büyütülmesi ile elde edilen bir lazer diyot yapısında aktif bölge p ve n tipi katkıli tabakaların arasına gömülmüş durumdadır, başka bir ifade ile bir lazer diyot yapısı klasik bir p-i-n diyot yapısıdır ve tipik olarak n-tipi katkıli alıtış üzerine büyütülür. Hem n tipi katkıli dalga kılavuzunun kullanıldığı hem de p tipi katkıli dalga kılavuzu yapısının kullanıldığı çiftlenim sınırlamalı heteroyapı (DCH) lazerler mevcut olduğu gibi (Yamada), sadece n tipi dalga kılavuzuyla sınırlandırılan asimetrik çiftlenim sınırlamalı (ADCH) lazer yapıları da mevcuttur (Yamagataa). Şekil2.7 de bir lazer diyot yapısının kesitsel gösterimi mevcuttur. Optik alan dağılımını maksimuma doğru çekip, sınırlama faktörünün değerini azaltmak için lazer yapısına kırılma indisinin aktif tabaka hariç diğer bölgelerden (dalga kılavuzları ve kılıf tabakalarından) daha büyük olduğu denge bölgesi de n tipi dalga kılavuzu ve n tipi kılıf tabakası arasına eklenebilir (Patent No. US6522677B1, 2003). Denge bölgesinin enerji bant aralığı aktif bölgede yayılan ışığın denge bölgesinde soğurulmasını engellemek için aktif bölgenin bant aralığından büyük olması gerekir. Ayrıca lazer diyot dalga kılavuzları arasına düşük kırılma indisli bir mod ayırma tabakasının da eklendiği yüksek güçlü lazer diyot çalışmaları da mevcuttur (Patent No. US7830938B2, 2010).



Şekil 2.7 Bir lazer diyot yapısının kesitsel gösterimi ve çift sınırlamalı heteroyapı lazer diyot için şematik epitaksiyel tabaka görünümü (Meney, 1995)

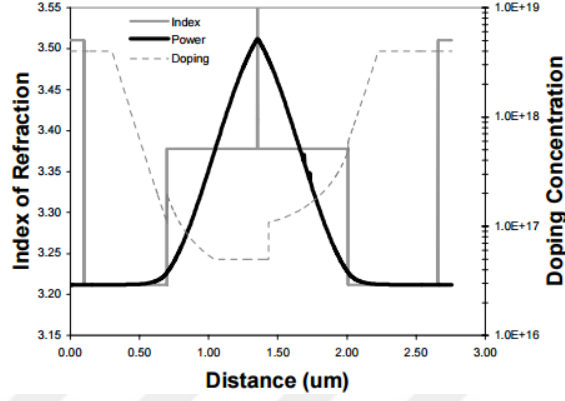
Diyot lazer yapılarını diğer lazer yapılarından daha avantajlı yapan çeşitli özellikleri vardır. Diğer tip lazerlerin aksine diyot lazerlerde dış ışık kaynağına gerek kalmadan pompalama elektriksel olarak yapılabilir. Optik kazanç aynalar tarafından yansıtılan doğrultulmuş ışığın olduğu aktif bölgedeki elektron ve hollerin uyarılmış rekombinasyon süreci ile elde edilir. Yarı iletkenlerdeki uyarılmış rekombinasyon ve ışık doğrultma sürecinde aktif bölgedeki enerji bantları temeldir ve plazma lazerlerdeki gibi uyarılmış tek atom, iyon ya da moleküllerin elektronik geçişi söz konusu değildir. Enerji bantlarındaki durum yoğunluğu nedeniyle yarıiletken lazerler, diğer katı-hal veya gaz lazerlere kıyasla çok daha yüksek kazanç ve elektro-optik verimlilik sağlar. Bir lazer diyotta yayılan ışığın dalga boyu aktif bölge olarak kullanılan yarı iletkenin direk bant aralığı ile ilişkilidir. Böylece geniş bir dalga boyu aralığında lazer diyot yapıları geliştirilebilir. Yarıiletken kristal lazer prosesini başlatmak ve devam ettirmek için iki paralel ayna arasına gömülür. Optik kavite Fabbry-Perot rezonatörü olarak adlandırılır. Modern lazer diyot teknolojilerinde yanal taşıyıcılara ek olarak ışık sınırlaması da sağlanır. Yanal sınırlama geniş alan (BA (broad area)), köprü tipi ((RW) ridge waveguide) ya da gömülü heteroyapılar ((buried heterostructures (BH)) gibi çeşitli dizaynlar kullanılarak da yapılır. Geniş alan cihaz olarak üretilen lazer diyotların şematik çizilimi Şekil2.8 de verilir.



**Şekil 2.8** Kenar ışınması yapan lazer diyotun şematik gösterimi

Bir lazer yapısında dalga kılavuzunun kırılma indisi  $n$  tipi sınırlama bölgesinin kırılma indisine göre sürekli olarak ya da adım adım düşer, bu azalma  $p$  tipi sınırlama bölgesi ve  $n$  tipi sınırlama bölgesi arasındaki ayırım limitinde daha fazladır. Aktif bölgenin kırılma indisi ise dalga kılavuzu ve kılıf tabakalarının kırılma indisinden çok daha büyüktür. Şekil2.9 de

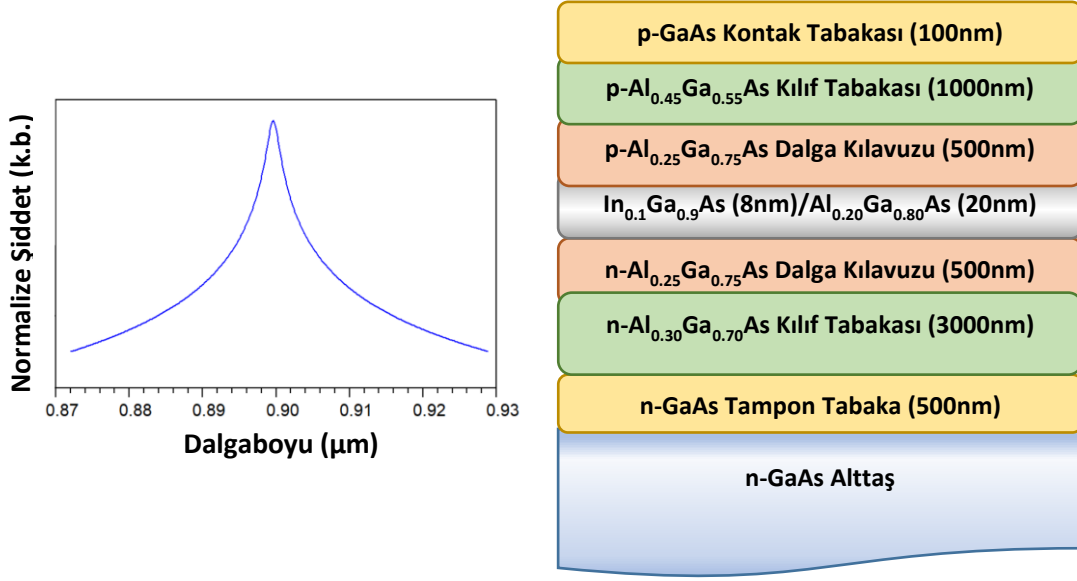
ise tipik bir lazer diyot yapısının optik mod şekli, kırılma indisi değişimi ve katkı profili verilmiştir.



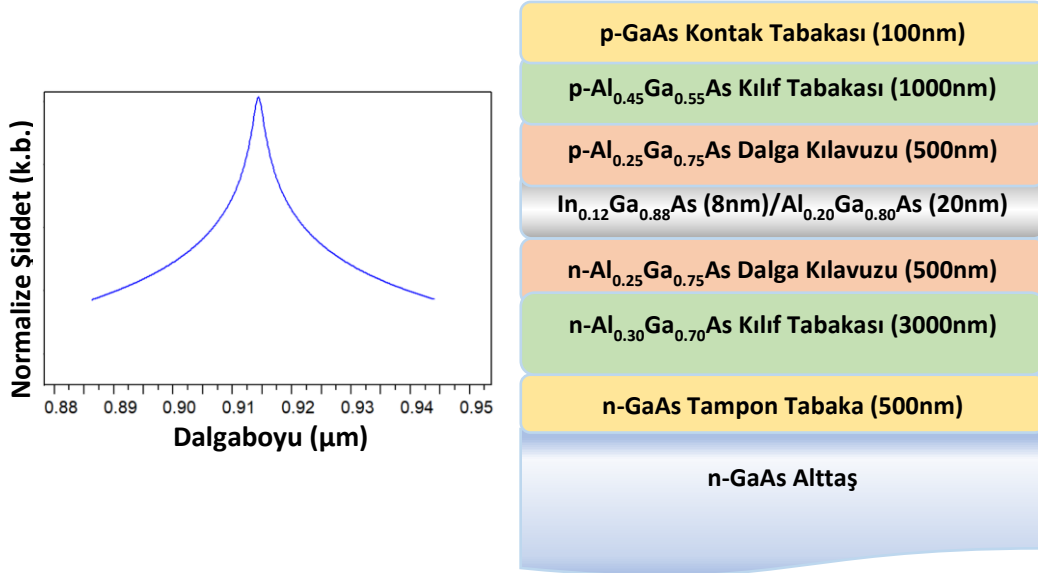
**Şekil 2.9** Tipik bir lazer diyot yapısının optik mod şekli, kırılma indisi değişimi ve katkı profili verilmiştir (Kanskar, 2005)

### 2.2.6.1 Kenar ışıması yapan diyot lazer tasarımı

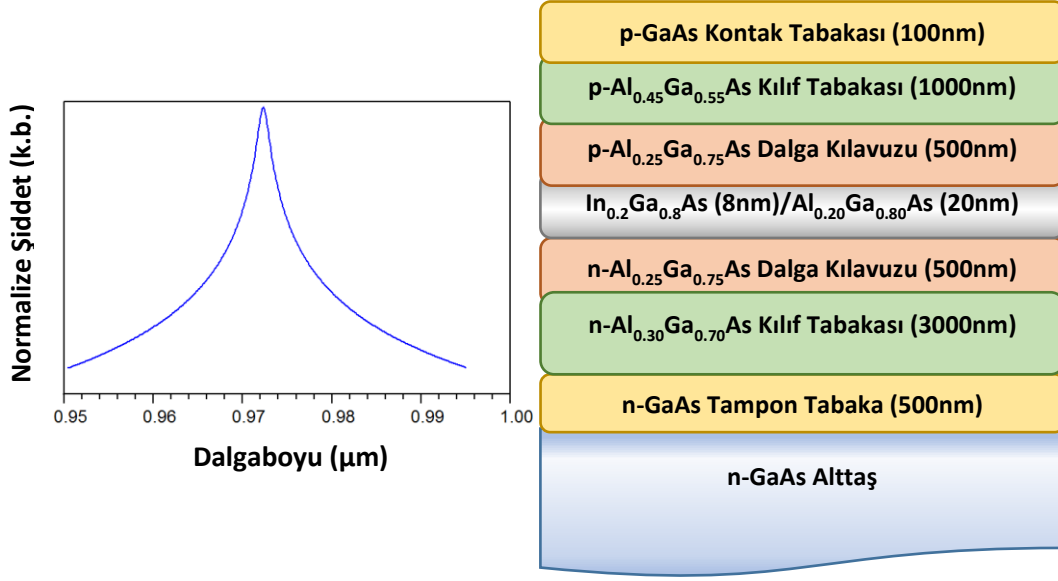
Çalışma kapsamında büyütülen 900nm, 915nm, 970nm ve 1055nm dalga boylarında ışık yayan kuantum kuyu ve bariyer katmanlarının oluşturulması için gerekli olan tabakaların alaşım oranları ve kalınlıkları LaserMOD simülasyon programı kullanılarak belirlendi. Simülasyonlar yapılırken kullanılan emitter genişliği 5µm, akımın uygulandığı p kontak petinin uzunluğu ise 0,6µm' dir. Yapılan simülasyonlar; bariyer olarak kullanılan  $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$  katmanı değiştirilmeden, kuantum kuyu katmanındaki indiyum alaşım oranı 0,1'den 0,29'a aralığında değiştirilerek ışık yayan lazer yapılarını dalgaboyu 900nm' den 1055nm' ye kadar değişimin mümkün olduğunu gösterir (Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13).



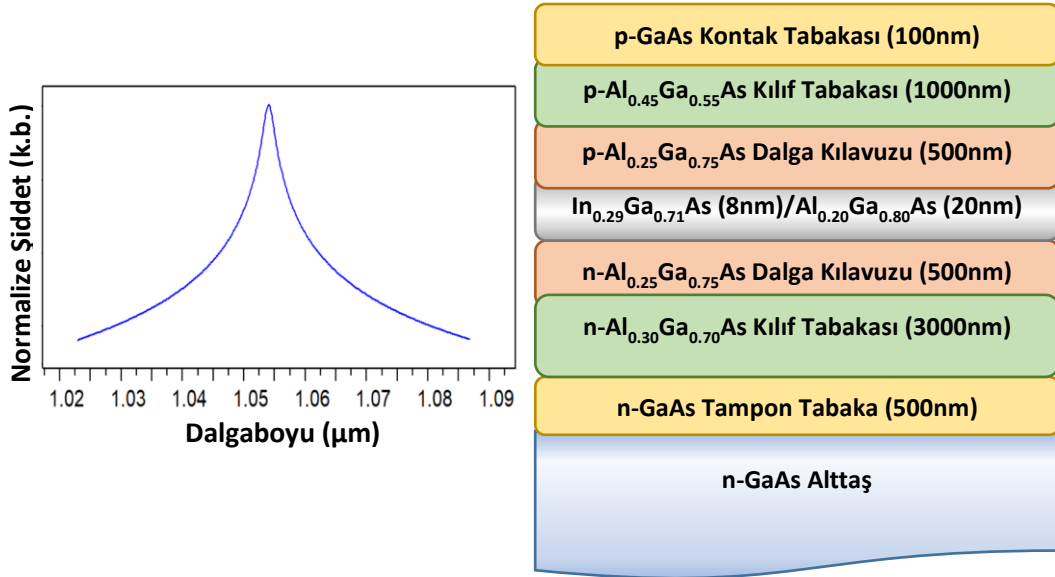
Şekil 2.10 900nm dalga boyunda ışınyan lazer diyot yapısının simülasyonu



Şekil 2.11 915nm dalga boyunda ışınyan lazer diyot yapısının simülasyonu



Şekil 2.12 970nm dalga boyunda ışınıyan lazer diyot yapısının simülasyonu



Şekil 2.13 1053nm dalga boyunda ışınıyan lazer diyot yapısının simülasyonu

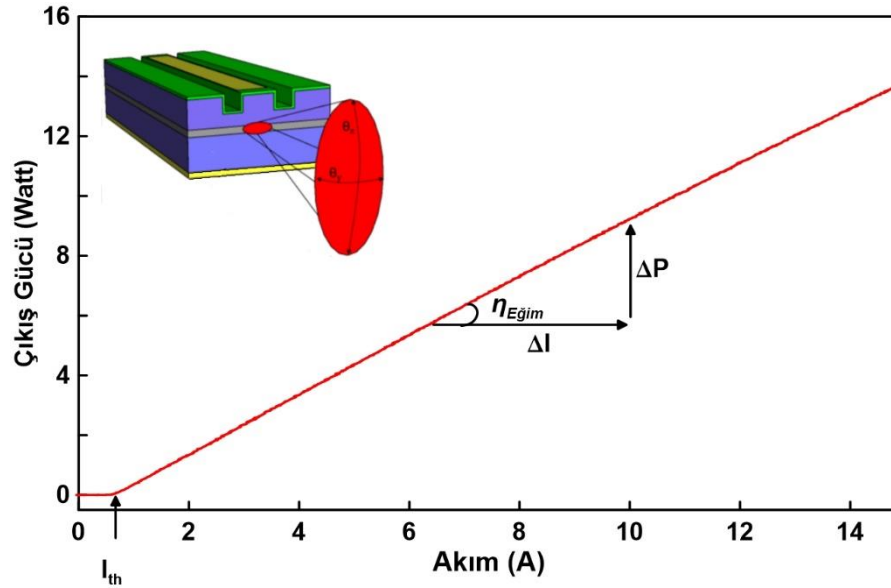


### 3 LAZER DİYOTLARIN TEST VE KARAKTERİZASYONLARI

#### 3.1 Giriş akımına karşı ışık çıkış eğrisi:

Bir lazer diyotun ölçülen en önemli parametrelerinden bir tanesi cihaza enjekte edilen akıma karşı cihazın yaydığı ışık miktarının belirlenmesidir. Bir yarıiletken lazer diyota enjekte edilen akım arttıkça diyot ilk olarak kendiliğinden yayınım (spontaneous emission) gösterir. Kendiliğinden yayınım süreci lazer diyotun aktivasyona başladığı uyarılmış yayınım (stimulated emission) başlayana kadar aşamalı bir şekilde artar. Şekil3.1 giriş akımına karşı ışık çıkış miktarını gösteren L-I eğrisini göstermektedir. Bu eğride ilgilenilen ilk parametre  $I_{th}$  ile simgelenen; lazer diyotun uyarılmış yayınım yapmaya başladığı eşik akım değeridir.

Bir diyot lazerin olabildiğince düşük eşik akım değerinde lazer aktivasyonuna geçmesi yani uyarılmış yayınım yapması istenildiği gibi, diyota mümkün olduğu kadar az akım uygulayarak çok daha yüksek güç değerlerine ulaşmak istenir. Bir lazer diyotun uygulanan akıma karşı verdiği ışık çıkış gücünün değişimi yani eğri verimi (slope efficiency,  $\eta_{Eğim}$ ) üretilen lazerin performansını gösteren en önemli parametrelerden bir tanesidir ve eşik akımın ( $I_{th}$ ) üstündeki akım değerlerinde L-I grafiğinin eğiminden elde edilir.



Şekil 3.1 Lazer diyota uygulanan akıma karşı ışık çıkış gücü (L-I) grafiği

### 3.2 Eşik Akım Yoğunluğu

Eşik akım değeri lazer diyotun üretildiği yarıiletken malzemenin kalitesine, dalga kılavuzu yapısının genel dizaynına ve lazer yapısının boyutlarına bağlıdır. Bir lazer diyotun genişliği veya uzunluğu arttıkça uyarılmış yayınıma geçmesi için gereken eşik akım değeri de artar. Bundan dolayı da iki farklı lazer diyot kıyaslanırken eşik akım değerlerinden ziyade yapıların eşik akım yoğunlukları arasındaki farkı kıyaslamak daha uygundur. Eşik akım yoğunluğu  $J_{th}$  ile gösterilir ve deneysel olarak elde edilen eşik akımı değerinin lazerin alanına bölünmesiyle belirlenir. Eşik akım yoğunluğu, iç kuantum verimi gibi cihazın üretildiği yarıiletken malzemenin kalitesini doğrudan gösteren parametrelerden biridir.

### 3.3 Dış Diferansiyel Kuantum Verimi

L-I eğrisinin eğiminin deneysel ölçümünden doğrudan çıkarılan sonuçlardan birtanesi de  $\eta_d$  ile gösterilen dış diferansiyel kuantum verimidir (external differential quantum efficiency). Dış diferansiyel kuantum verimi yüzde olarak, lazer diyota enjekte edilen akımın (elektron hol çiftinin) lazer diyottan yayılan fotona (çıkan ışığa) dönüştürmede lazerin veriminin bir göstergesidir.

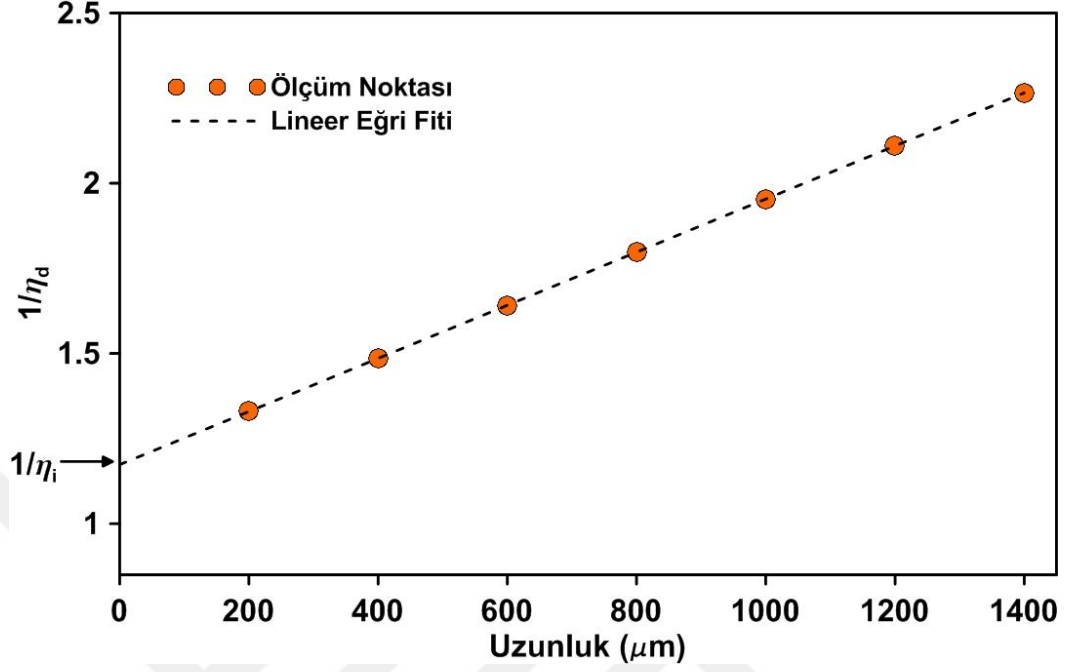
İdeal bir lazer diyotta, her bir elektron hol çiftinin rekombinasyonu sonucunda bir foton üretilir ve cihazdan ışık yayılır. Ancak gerçek bir cihazda ısı gibi istenmeyen enerji dönüşümlerinden dolayı bazı elektron hol çiftlerinin rekombinasyonlarından foton elde edilmez. Buna ek olarak lazerin içinde üretilen fotonların hepsi cihazdan yayılmaz. Bunlardan bazıları lazer yapısı tarafından soğurulur. Sonuç olarak ideal bir lazer diyotta  $q$  elektrik yükü (C),  $hc/\lambda$  değerindeki optik çıkış (J) enerjisiyle sonuçlanır.  $\lambda$  dalga boyunda ışık yayan ideal bir lazer diyotun L-I eğrisinin eğimi teorik olarak  $hc/(q\lambda)$  boyutundadır. Burada daha önce bahsedildiği gibi  $\lambda$  ışığın dalga boyu,  $q$  ise tek bir elektronun elektrik yüküdür. Giren akımı çıkan ışığa dönüştüren gerçek bir lazer diyotun dış kuantum verimi  $\Delta p/\Delta I$  değerinin  $hc/(q\lambda)$  ya oranı ile ilişkilidir Denklem [3.1].

$$\eta_d = \frac{\Delta p / \Delta I}{hc / (q\lambda)} \quad [3.1]$$

Dış diferansiyel kuantum verimini hesaplariken farklı dalga boyuna sahip olan fotonların enerjilerinin farklı olduğunu unutmamak gerekir. Buna ek olarak Şekil3.1 de görüldüğü gibi bir lazer diyot ya hem ön hem de arka yüzeyden ışık yayar ya da arka yüzeyi yüksek yansıtıcılıklı kaplama ile kaplanarak sadece ön yüzeyden ışık yayar. Bunun anlamı, L-I' nın eğimi yani  $\Delta p / \Delta I$  oranından ya da diferansiyel dış kuantum verimi  $\eta_d$  hakkında konuşulduğu zaman ya tek bir ayna yüzeyi başınadır ya da iki ayna yüzeyi başınadır.

### 3.4 İç Kuantum Verimi

$\eta_i$  sembolüyle gösterilen iç kuantum verimi (internal quantum efficiency); bir lazer diyota enjekte edilen akımın (elektron hol çiftinin) ışığa dönüşüm veriminin bir ölçümüdür. Örneğin lazer diyot için belirlenen iç kuantum verimi %75 ise enjekte edilen elektron hol çiftinin %75 i ışığa dönüşürken kalan %25 i ısı gibi farklı bir enerji formuna dönüşmüştür. Dış diferansiyel kuantum veriminin aksine iç kuantum verimi lazer diyotun kavite uzunluğu ya da çizgi genişliği gibi geometriksel özelliklerine bağlı değildir. Bu özelliğinden dolayı farklı yarı iletken malzemeler kullanılarak üretilen lazer yapılarının malzeme kalitesini kıyaslamak için uygun bir parametredir (Kamran, 2000). Bir lazer diyotun iç kuantum verimini belirlemek için çeşitli kavite uzunluklu lazerlerin dış diferansiyel kuantum verimi belirlenir. Daha sonra Şekil3.2' de gösterildiği gibi kavite uzunluğuna karşı dış diferansiyel kuantum veriminin tersinin çizilmesiyle elde edilen eğriden yararlanılarak iç kuantum verimi belirlenir. Eğri üzerinde uygulanan lineer çizgi fitinin düşey eksenindeki kesişim noktasının tersi iç kuantum verimini gösterir. İç kuantum verimi yarıiletken lazer diyotun üretildiği yarı iletken numunenin kalitesini değerlendirmek için kullanılan ana değerlerden biridir. Şekil3.2 iç kuantum veriminin dış kuantum verimiyle ilişkisini göstermektedir.



Şekil 3.2 Dış kuantum veriminin tersinin kavite uzunluğuna bağlı değişim grafiği

İç kuantum verimi  $\eta_i$  ve dış kuantum verimi  $\eta_d$  arasında bir fark olduğuna dikkat etmek gerekir. İç kuantum verimi lazer diyot yapısına enjekte edilen akımın (elektron hol çiftinin) ışığa (fotona) dönüşmesi olayında lazerin verimini doğrudan gösterir. Üretilen fotonların hepsinin cihazın çıkış yolunda olmadığını, çeşitli iç kayıp mekanizmalarından dolayı yeniden soğurulduğunu unutmamak gerekir. Dış diferansiyel kuantum verimi lazer diyota enjekte edilen akımın (elektron hol çiftinin) lazer cihazdan yayılan fotona (çıkan ışığa) dönüştürmede lazerin veriminin bir göstergesidir. Dış diferansiyel kuantum veriminin değeri her zaman iç kuantum verimin değerinden düşüktür.  $\eta_d/\eta_i$  oranı ise bize lazerden yayılan fotonların sayısının lazerde üretilen fotonların sayısına oranını gösterir.

### 3.5 İç kayıp

İç kuantum verimi (internal loss); lazer kavitesinde optik fotonların oluştuğu, elektron hol yeniden birleşme (rekombinasyon) kesrinin bir ölçüsüdür. Fakat  $\alpha_i$  ile gösterilen iç kayıplardan dolayı, lazer kavitede üretilen fotonların hepsi lazer diyotun ayna yüzeylerinden dışarı yayılmaz. Bu yüzden herhangi bir lazer diyotun dış diferansiyel kuantum verimi her zaman onun iç kuantum veriminden daha düşüktür. İç kayıp optik dalga kılavuzunun

kaybıyla ilişkilendirilen bir parametredir. Şekil3.3 de gösterildiği gibi kavite uzunluğuna karşı çizilen dış diferansiyel kuantum veriminin tersi çizildiği eğriye uygulanan lineer çizgisel fitin eğiminin ölçülmesiyle deneysel olarak elde edilir. Dış diferansiyel kuantum verimi ve iç diferansiyel kuantum verimi belirlenen lazer diyot yapılarının iç kayıpları [3.2] denklemi kullanılarak belirlenir.

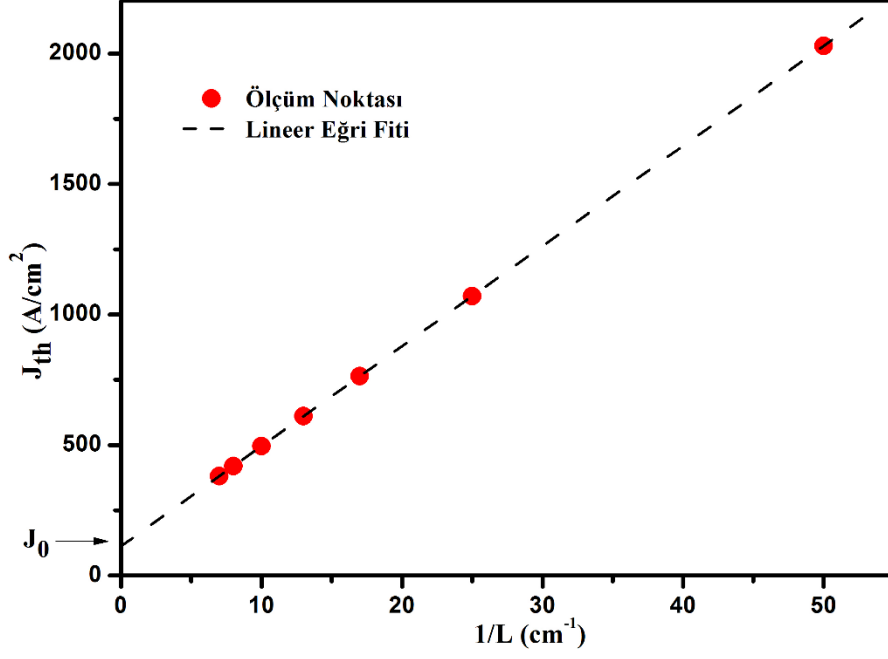
$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left[ 1 + \frac{\alpha_i L}{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)} \right] \quad [3.2]$$

### 3.6 Geçirgenlik Akım Yoğunluğu

Geçirgenlik akım yoğunluğu (transparency current density)  $J_0$  sembolüyle gösterilmektedir ve deneysel ölçüm sonuçlarından yararlanılarak hesaplanmaktadır. Yarıiletken lazerler için eşik akım yoğunluğu denklem [3.3]'deki gibi ifade edilir (Chen, 1990).

$$J_0 = J_{th}^0 - \frac{\alpha_i d e}{g' \tau \Gamma} = J_{th}^0 - 2\alpha_i \tan\Theta / \ln(1/R_1 R_2) \quad [3.3]$$

Bu denklemde;  $J_{th}^0$  sonsuz kavite uzunluğundaki eşik akım yoğunluğu,  $\alpha_i$  iç kayıp faktörü,  $g'$  diferansiyel kazanç,  $\tau$  taşıyıcıların yarı ömrü,  $d$  aktif tabaka kalınlığı,  $e$  elektron yükü, ve  $\Gamma$  optik sınırlama faktörüdür.  $J_{th}^0$  kavite uzunluğunun tersinin eşik akım yoğunluğuna karşı değişiminin çizildiği eğriden yararlanılarak belirlenir. Bu eğrideki veriler üzerinde yapılan lineer çizgi fitinin dikey kesişim noktası bize  $J_{th}^0$ 'ı verir ve grafiğin eğimi de  $\tan\Theta$ 'dır. Eşik akım yoğunluğu yarıiletken örneğin diğerine göre olan kalitesi belirlenemez. Ancak eşik akım yoğunluğu, kavite uzunluğu ve diyota akım uygulanan bölgenin genişliği kullanılarak belirlenen geçirgenlik akım yoğunluğu değeri kullanılarak çeşitli lazer diyot yapılarını kıyaslamak mümkündür.



Şekil 3.3 Kavite uzunluğunun tersine karşı eşik akım yoğunluğunun değişim grafiği

## 4 METOD

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında üretilen ince filmlerin büyütülmesi ve karakterize edilmesi sürecinde kullanılan cihazlardan bahsedilecektir. Ayrıca, epitaksiyel katmanların üretim tekniği, üretim esnasında kullanılan yerinde karakterizasyon yöntemleri ile üretim işlemi bittikten sonra ince filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin incelendiği cihazlar ve bu cihazların çalışma prensiplerinden bahsedilecektir.

### 4.1 Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama Sistemi (MOCVD)

MOCVD tekniği ile yarıiletken bileşiklerin depolanmasına ilk olarak Didchenko tarafından III-V yarıiletkenlerinden olan InP tabakasının 1960 yılında büyütülmesi ile başlanmıştır (Didchenko, 1960). 1969 yılında Manasevit ve Simpson, GaAs ve çeşitli yalıtkan (spinel ve safir) alttaşlar üzerine GaAs, GaP, GaAsP ve GaAsSb gibi yarı iletken malzemelerin depolanmasıyla ilgilenmişlerdir (Manasevit, 1939). 1980'li yılları sonuna doğru ise hidrit ve metal organik öncüllerin saflıklarının geliştirilmesiyle örgü uyumlu alttaşlar üzerine yüksek kalitede epitaksiyel tabakalar büyütülerek ve bunun sonucu olarak MOCVD büyütme tekniği bir üretim tekniği haline dönüştürülmüştür. MOCVD yöntemini kullanarak ince filmlerin epitaksiyel olarak büyütülmesi mümkün olduğu gibi polikristal büyütme yapmak da mümkündür. MOCVD yönteminin ilk uygulama alanları; GaAs fotokatotlar, GaAs HBT lazerler ve fiber optik iletişim için GaInAsP tabanlı lazerler ve detektörlerdir (Kasap).

Alaşım oranı, katkı profili ve büyütülen epitaksiyel katmanların kalınlığını değiştirme ve kontrol etme imkânı sunan MOCVD büyütme yöntemi kullanılarak dar bant aralıklı CdHgTe ve GaInSb malzemelerini içeren bir infrared dedektör yapmak mümkün olduğu gibi GaN ve ZnO gibi geniş bant aralıklı malzemeleri büyütmede mümkündür. 1990'lı yıllarda MOCVD yöntemi ile GaInN' in epitaksiyel olarak büyütülmesi ile aydınlatma için yüksek parlaklıkta beyaz LED'lerin üretimi sağlanmıştır. LED yapılarının üretilmesinde MOCVD büyütme yöntemini kullanmanın en güçlü yönü Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si ve SiC gibi farklı alttaşlar kullanarak hetero-epitaksiyel büyütme yapma imkânı sunmasıdır (Kasap).

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de bu tez çalışması kapsamında kullanılan sırasıyla Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu olan nitrat ve As/P büyütme sistemi yapabildiği araştırma sisteminin resmi ile Ermaksan Optoelektronik Ar&Ge’ de kurulu olan As/P büyütme sistemi yapabildiği seri üretim sisteminin resimleri mevcuttur.



**Şekil 4.1** Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu olan hem  $AsH_3-PH_3$  tabanlı hemde Nitrat tabanlı MOCVD sistemi

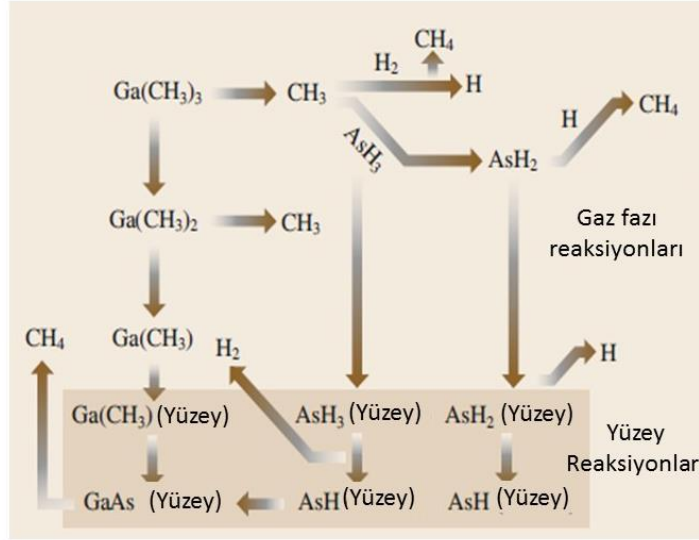


**Şekil 4.2** ERMAKSAN Optoelektronik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu olan  $AsH_3-PH_3$  tabanlı MOCVD sistemi



#### 4.1.1 Temel Reaksiyon Kinetikleri

III-V bileşenlerini içeren tipik bir MOCVD sisteminde büyütme işlemi oldukça yüksek saflıktaki hidrojen ya da azot gibi taşıyıcı gazlar aracılığı ile öncül olarak III grubu alkiler ile V grubu hidritlerin reaktör içine kontrollü bir şekilde alınmasıyla başlar. Reaktöre taşınan bu öncüller reaksiyon çemberinin dışında karıştırılarak, sıcak altaşa doğru yönlendirilir. Altaşlar reaktör içerisinde bulunan yüksek sıcaklıklara dayanıklı karbondan yapılmış grafit altaş tutucuların üzerine yerleştirilir ve genellikle radyo frekansları (RF) kullanılarak ısıtılır. Isının etkisi ile piroliz (termal ayrışma) olan öncüller ısıtılan altaş yüzeyi üzerinde depolanır. GaAs büyütmesi için stokiyometrik reaksiyon denklem 3.1 da verilmiştir.



**Şekil 4.3** GaAs' ın epitaksiyel olarak depolanması sürecinde yaşanan en önemli buhar faz ve reaksiyon adımları (Capper, 2006)

Şekil 4.3' de GaAs tabakasının epitaksiyel olarak depolanması sırasında yaşanabilecek olan buhar faz ve reaksiyon adımları gösterilmiştir. Şekildeki reaksiyon sürecini anlatan diyagramdan da görüldüğü gibi reaksiyon dimetilgalyum ( $Ga(CH_3)_2$ ) ve metil radikallerini

sağlamak için TMGa'un ( $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$ ) gaz fazının ayrışması ile başlar. III-V yarıiletkenlerin MOCVD ile depolanması sürecinde metil radikallerinin iki önemli rolü vardır.

- i) Metil radikalleri ortamdaki hidrojen taşıyıcı gazı ile reaksiyona girebilir ve böylece açığa metan gazı ve hidrojen radikali çıkar.
- ii) Metil radikallerinin  $\text{AsH}_3$  ile etkileşmesinin sonucunda  $\text{AsH}_2$  ve metan gazı oluşabilir.

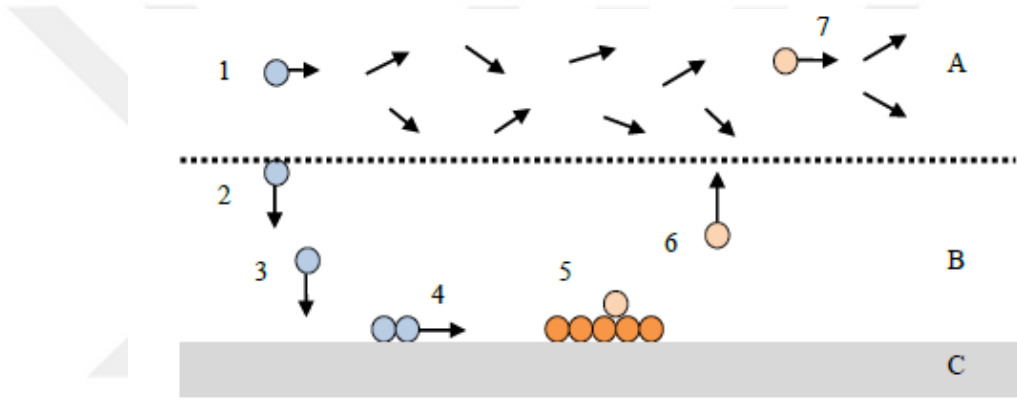
Bu adımların her ikisinde de arsinin dekompozisyonu ya metil radikalleriyle ya da arsinden bir hidrojen atomunun uzaklaştırılarak hidrojen radikalinin oluşturulmasıyla sağlanır; tüm bu reaksiyon adımları Şekil 4.3' de verilmiştir.

Bu ilk reaksiyon adımlarının bazı önemli sonuçları vardır, bunlardan birincisi hidrojen taşıyıcı gazının stokiyometrik reaksiyona dahil edilmemesine rağmen reaksiyon işleminde önemli rol oynamasıdır. Diğer bir sonuç ise yüksek olasılıkla aynı termal dekompozisyon karakteristiklerine sahip olmayan iki öncül maddenin, aynı sıcaklıkta radikal reaksiyon mekanizmalarıyla reaksiyona girmek için birlikte kullanılabilecekleridir. Örnek olarak GaAs için  $500^\circ\text{C}$ 'de piroliz olayı gerçekleşirken  $\text{AsH}_3$ ' ün pirolizi  $700^\circ\text{C}$ 'de gerçekleşmesi verilebilir.

TMGa'dan ve arsinden ligandların (merkezi atoma bağlı atom, molekül veya iyon) kademeli olarak uzaklaştırılması buharda ya da yüzey üzerinde olabilir. Şekil 4.3'de hem yüzey sıcaklığına bağlı olacak şekilde hem de alttaş üzerindeki buhar sıcaklığına bağlı olacak şekilde hem alternatif hem de baskın yollar gösterilmiştir. Genel bir kural olarak, buhar reaksiyon oranı daha yavaş olduğu zaman reaksiyon sürecinin daha düşük sıcaklıklarda yüzey üzerinde oluşacağıdır ve yüzey adsorpsiyonu daha etkin olacaktır. Yüzeyde anyon türlerini alacak olan Ga durumları ve katyon türlerini alacak olan As durumları olmak üzere iki farklı adsorpsiyon durumu olduğunu da unutmamak gerekir. Bu kısımda anlatılanlardan yola çıkarak tipik bir GaAs büyütme süreci şematik olarak Şekil 4.4' deki gibi verilebilir ve gerçekleşen başlıca reaksiyon adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

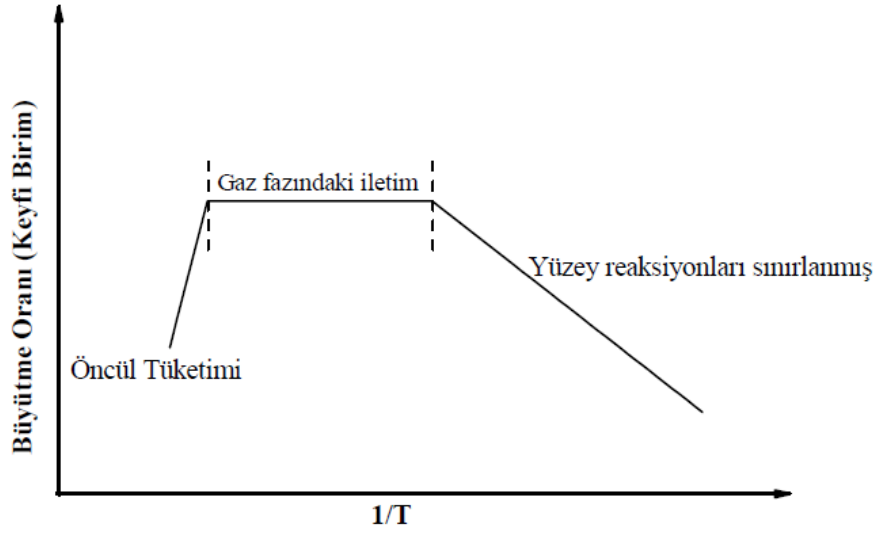
- 1) Gaz fazındaki reaktifler  $\text{H}_2$  veya  $\text{N}_2$  gibi taşıyıcı gazlar aracılığı ile reaktöre taşınır.
- 2) Reaktöre taşınan moleküller reaksiyon ortamına difüz eder.

- 3) Alttaş yüzeyi üzerinde moleküllerin temas ettikleri yüzey üzerindeki çekme kuvvetlerine bağlı olarak o yüzeyle birleşir başka bir ifade ile adsorpsiyon olayı gerçekleşir.
- 4) Moleküller kristalleşme bölgelerine doğru hareket eder.
- 5) Kimyasal ayrışma olayı gerçekleşir.
- 6) Kimyasal ayrışma sonucu oluşan yan ürünlerin desorpsiyonu ve reaksiyon ortamından difüzyon ve konveksiyonu gerçekleşir.
- 7) Yan ürünlerin reaktörden uzaklaştırılır.



**Şekil 4.4** Tipik bir kimyasal buhar biriktirme reaksiyonuna ait adımlar. Burada A gaz fazı, B sınır tabakası (boundary layer), C ise alttaşı göstermektedir

Reaksiyon kinetiğinin detayları (büyütme hızı, desorpsiyonu) alttaş sıcaklığına bağlı olarak değişir. Şekil 4.5' de reaksiyon sıcaklığının tersine bağlı olarak büyüme oranının değişimini gösteren grafik mevcuttur. Kütle taşınımı yüksek sıcaklıkta tepkimeleri sınırlar, böylece büyüme hızı tepkimeye giren bileşenlerin kısmi basınçları ile artar ancak sıcaklıkla sabit kalır. Yüzey reaksiyon kinetiği, düşük sıcaklık bölgesinde gözlemlenir. Bu bölgede büyüme hızı sıcaklık arttıkça artar ancak reaktiflerin basıncı ile sabit kalır. Gaz faz geçişi ya da besleme oranının sınırlandırıldığı bölgede reaksiyonlar sıcaklıktan bağımsızdır, reaksiyon gaz dağıtım hızı ile sınırlandırılır.



Şekil 4.5 Büyütme sıcaklığının tersine karşı büyütme oranının değişim grafiği

#### 4.1.2 Öncüller:

TMIn, TMGa, TMAI MOCVD büyütme sisteminde en çok kullanılan III gurubu kaynaklardır. Bu metal organik kaynakların buhar basıncı, piroliz sıcaklığı, toksikliği ve fazı (katı veya sıvı) epitaksiyel büyütme için oldukça önemlidir. Metil tabanlı malzemeler yüksek buhar basıncı, saflığı ve hidritlerle azaltılmış ön reaksiyon gibi özelliklerinden dolayı diğer metal organik kaynaklara göre (ethyl, butyl, propyl) daha avantajlıdır. Yüksek buhar basıncı büyütme oranını artırır bu da MOCVD sistemini daha verimli ve ekonomik yapar. Genelde daha hafif elementler daha yüksek buhar basıncına sahiptir. Metal organiklerin buhar basıncı denklem 3.2' deki gibi ifade edilir. Bu denklemde  $P_{MO}$ : metal organiklerin buhar basıncı  $T$ : metal organiklerin tutulduğu sıcaklık,  $a$  ve  $b$  ise satıcı firmanın verdiği sabit değerlerdir.

$$\log(P_{MO}[Torr]) = a - \frac{b}{T} \quad [3.2]$$

MOCVD sisteminde öncüller reaktöre elektronik kontrolör ve valfler yoluyla belirli akışlarda ayarlanılarak taşınır. Metalorganik kaynaklar buhar basıncını kontrol etmek ve stabilize etmek için sıcaklığı ayarlanabilen termal banyo içinde tutulurlar. Taşıyıcı gaz (H<sub>2</sub> veya N<sub>2</sub>) kütle akış kontrolöründen (MFC) istenilen miktar ayarlanarak MO kabarcıklandırıcısına girer. MO kaynağına giren taşıyıcı gazın baloncuk biçimindeki çeperine buhar fazındaki MO

kaynağı yapıştır. Böylece katı veya sıvı fazda olan metalorganik kaynaklar haznenin dışına taşınır. Baloncuktaki basınç, bir basınç kontrolörü tarafından kontrol edilir. Reaktöre gönderilen kaynağının molar akış oranı, MO kaynağının buhar basıncı  $P_{MO}$ , kaynak basıncı  $P_c$  ve taşıyıcı gaz akış miktarı MFC  $Q_s$  ile belirlenir ve reaktöre gönderilecek gazların molar akış oranları denklem [3.3] kullanılarak hesaplanır.

$$X_{MO} \left[ \frac{mol}{min} \right] = \frac{Q_s [sccm]}{22400 \left[ \frac{sccm}{mol} \right] x \left\{ \frac{P_{MO}}{P_c - P_{MO}} \right\}} \quad [3.3]$$

Reaktöre taşınacak gazın yeterli hıza ulaşmasını sağlamak için, molar akış oranını etkilemeyen bir başka itme (PUSH) MFC  $Q_p$  vardır. Reaktör (run) hattı ve egzoz (vent) hattı, büyüme arayüzünde keskin bir geçiş olmasını sağlamak için kullanılır. Büyüme aşaması başlamadan önce, gazların stabilize olması için belli bir süre vent hattı üzerinden geçirilerek egzozla doğru akıtılır. Büyüme aşamasına geçildiğinde, vana run hattına döner ve reaktifler reaktöre gönderilir. Reaktör / egzoz valfleri, gaz anahtarlama geçişini kısaltmak için reaktöre mümkün olduğunca yakın yerleştirilir. Bu hatlar arasındaki basınç, valf değiştirildikten sonra salınımın önüne geçmek için aynı seviyeye ayarlanır. MOCVD sisteminin bu özelliği sayesinde çok ince ve keskin arayüzlere sahip çoklu tekrarlı yapıları büyütme mümkün olur.

## 4.2 Yerinde Karakterizasyon Yöntemleri

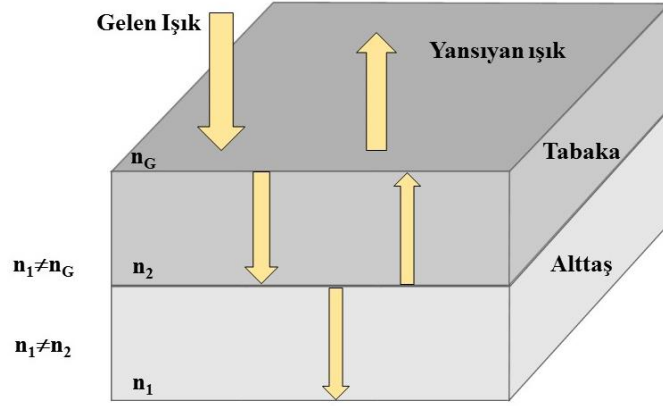
### 4.2.1 Yerinde (in-situ) yansıma ve sıcaklık ölçümü

Epitaksiyel büyüme çalışmalarında büyütülen tabakanın istenilen özelliklere sahip olup olmadığını belirlemek başka bir ifade ile karakterize etmek oldukça önemlidir. Temelde iki farklı karakterizasyon yöntemi vardır. Bunlardan bir tanesi büyüme esnasında yapılan yerinde (in-situ) karakterizasyonlar diğeri ise büyüme bittikten sonra yapılan harici (ex-situ) karakterizasyonlardır. Büyüyen tabakalardan doğrudan bilgi alabilmek için kullanılan en yaygın yöntem; bir ışık kaynağından örnek yüzeyine gönderilen ışığın geri yansıyıp dedektör tarafından algılanmasına dayanan yöntemdir. Bu yöntem büyüme süreci boyunca büyüme oranı, tabaka kalınlığı, ikili bileşenlerin kompozisyonu ve yüzey pürüzlülüğü gibi tabaka

büyütme özelliklerinin karakteristiklerini verir. MOCVD, MBE gibi epitaksiyel büyütme tekniklerinde kullanılan yerinde karakterizasyon yöntemlerinden bir tanesi de EpiTT' dir. EpiTT hem sıcaklık ölçümü için kullanılacak pirometre özelliğine sahiptir hem de iki farklı dalgaboyunda yansıma ölçümü yapan bir refractometredir. Bu tez çalışmasında MOCVD sistemi kullanılarak üretilen tüm numunelerin büyütme esnasındaki kontrolleri yerinde yansıma ölçümü kullanılarak yapıldığından bu bölümde çalışma prensibi detaylı olarak anlatılacaktır.

Yansıma ölçümü belirli dalga boylarındaki monokromatik ışığın (bu çalışmada monokromatik ışık olarak kullanılan lazerin dalga boyu 632 ve 951nm' dir) katmanlar üzerine gönderilmesiyle başlar. Numune üzerine gönderilen bu ışık demeti altaşa doğru ilerlerken ortamın kırılma indisi, büyütülen epitaksiyel tabakanın kırılma indisi ve altaşın kırılma indisi birbirinden farklı olduğundan her bir ara yüzeyde belirli bir kısmı geri yansır (Şekil 4.6). Fotodiyot ya da CCD diziden oluşan ölçüm ünitesi gelen ışığın yansıma ( R ) diye adlandırılan şiddet kesrini ölçer. Denklem 3.4' de yansıma ölçümünün formülü verilmiştir. Bu denklemde n ve k sırasıyla gelen ışığın dalga boyuna bağlı kırılma indisi (refractive index) ve soğurma (extinction/ absorption index) indisidir. n ve k değerleri katmanların kompozisyonu ve altaşın gerçek sıcaklığına göre değişir (Bennet, 1961).

$$R = \frac{I_{yansiyen}}{I_{gelen}} = (n - 1)^2 + \frac{k^2}{(n+1)^2} + k^2 \quad [3.4]$$



**Şekil 4.6** Yerinde yansıma ölçümünde alttaş, epitaksiyel tabaka ve ortamın kırılma indisi farkından dolayı gelen ve yansıyan ışığın şiddet değişiminin şematik gösterimi

Büyütme sıcaklığı büyütülen tabakaların kalitesini ve doğrudan etkilediğinden tüm büyütme prosedürü boyunca örneğin sıcaklığı birkaç farklı yöntemle kontrol edilmektedir. Sıcaklık ölçümünde kullanılan yöntemlerden bir tanesi termokupl (thermocouple) ya da ışık boru pirometresi (light pipe pyrometer) kullanılarak büyütülen alttaşın üzerine yerleştirildiği tutucunun arka tarafından sıcaklığın ölçülmesidir. Büyütme esnasında termokupl ya da ışık boru pirometresi kullanılarak ölçülen sıcaklık reaktör sıcaklığı olarak adlandırılır. Bu sıcaklık ölçümünü alttaş ve numune tutucu arasındaki termal etkileşim ile sınırlandırıldığından ölçülen sıcaklık değeri ile yüzey sıcaklığı arasında fark oluşabilir. Büyütme esnasında kullanılan alttaşın tipine, alttaşın dönme hızına ve reaktöre giren toplam gaz akışına bağlı olarak bu sıcaklık farkı değişebilir.

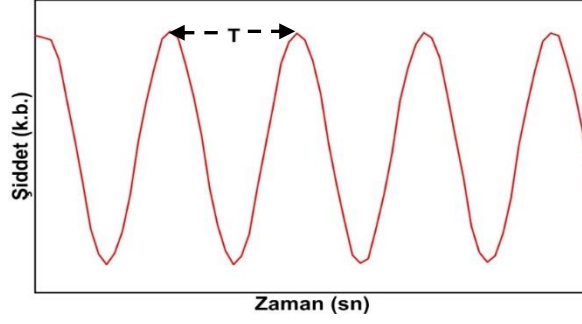
Termokupl ya da ışık boru pirometresinin aksine, EpiTT ya da LUXTRON gibi optik pirometreler kullanılarak alttaş (opak olmayan) yüzeyinin ya da büyütülen tabakanın sıcaklığını doğrudan ölçmek mümkündür. Optik pirometre kullanılarak sıcaklığın ölçümü yöntemi mutlak sıfırın üzerindeki herhangi bir sıcaklıkta elektromanyetik ışın yayımına yani termal yayımına bağlıdır. Bu yöntemde cisimden (büyütülen numuneden) yansıyan ışığın şiddetinin ölçülmesiyle sıcaklığı belirlenir.

#### 4.2.2 Büyütme Oranı ve Tabaka Kalınlığı

Epitaksiyel büyütme boyunca numune üzerine gönderilen monokromatik ışığın yansıma ve geçiş geometrisine bağlı olarak büyütülen tabakalardan bilgi alınır. Alttaş ve tabakalardan yansıyan ışığın şiddeti zamana bağlı olarak tek dalga boyunda ölçülür. Büyütülen tabaka gelen ışığın dalga boyuna göre geçirgense, lazer demetinin alt katmanlara geçişi esnasında girişim etkisiyle ilişkili olarak ışık şiddetinde değişimler olur. Bu değişimin periyodu tabaka kalınlığının ve büyütme oranının belirlenmesinde kullanılır (Suihkonen, 2008). Işık şiddetindeki değişimler kullanılan lazere göre büyütülen katmanın geçirgen olmasına bağlı olduğundan yerinde yansıma ölçümü yapılırken büyütülen katmanlardan en doğru sonuçları almak için kullanılacak lazerin dalga boyu seçimi oldukça önemlidir. AlGaAs, GaAs, InGaAs, InP yapılarının yerinde yansıma ölçümü ile analizlenmesinde genellikle 633 nm, 808 nm, 951 nm dalga boylu lazerler kullanılmaktadır.

Yerinde yansıma ölçümü esnasında numune yüzeyine gelen ışık demetinin bir kısmı yüzeyden yansırken diğer bir kısmı da tabaka içine girer. Tabaka içine giren ışığın bir kısmı da tabaka ve alttaş arasındaki ara yüzeyden kısmen yansır. Bu yansıyan ışın demeti tabaka yüzeyine tekrar geri döner, tabaka yüzeyine geri dönen ışın demetinin bir kısmı yüzeye geçerek örnekten ayrılırken diğer bir kısmı ise tekrar yansır ve bu süreç böyle devam eder (Şekil 4.6). Yansıyan ışınlar bir önceki ışına göre bir optik yol farkı ile yüzeyi terk eder. Yansıyan ışın demetlerinin üst üste binmesi (super pozisyonu) yansıyan ışının toplam şiddetini verir. Yansıyan ışık demetleri arasında optik yol farkına bağlı olarak bir faz farkı olacağından ışık demeti yapıcı ve yıkıcı girişimler oluşturacaktır. Buda Fabry-Perot salınımı olarak adlandırılan, zamana bağlı olarak yansıyan ışığın şiddetinde osilasyonlar meydana getirir (Şekil 4.7). Yansıtılan ışığın şiddeti ve faz farkı malzemenin optik sabitleri ve ışığın dalga boyunun yanı sıra büyütülen tabakanın kalınlığına da bağlıdır (Fabry ve Perot, 1899). Büyütülen tabakanın ve alttaşın kırılma indisi biliniyorsa bu girişim deseninden yararlanılarak büyütülen epitaksiyel tabakaya ait büyüme oranı (hızı) ve toplam film kalınlığı belirlenir. Film kalınlığı ve büyütme oranını belirlemek için kullanılan denklemler sırasıyla [3.5] ve [3.6]





**Şekil 4.7** Yerinde yansıma ölçümünde yüzeyden ve arayüzlerden yansıyan ışıkların oluşturduğu girişim deseninin zamana göre şiddet grafiği. Burada T tam bir osilasyon oluşması için geçen zamanı belirtmektedir.

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2n} \quad [3.5]$$

$$r = \frac{\Delta d}{T} \quad [3.6]$$

Burada;

$\Delta d$ : T osilasyon zamanı boyunca büyütülen filmin kalınlığı

$\lambda$ : Kullanılan ışık kaynağının dalga boyu

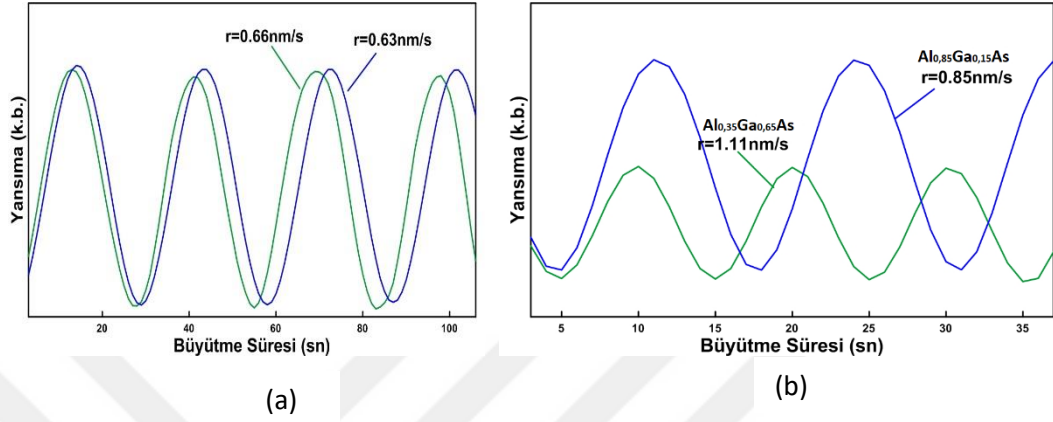
$n$ : Büyütülen tabakanın kırılma indisi

$T$ : Osilasyon için geçen süre

$r$ : büyütme oranı

Farklı büyütme parametreleri kullanıldığı zaman Fabry-Perot osilasyonlarındaki şiddet maksimum veya minimumları arasındaki mesafe değişmektedir. Örneğin daha yüksek enerji bant aralığına sahip (optik olarak kalın) malzemeler daha büyük periyotlarla tekrar ederken daha düşük bant aralığına sahip (optik olarak ince) malzemeler daha kısa periyotlarla tekrar eder. Yüksek büyütme oranı şiddet değişiminde kısa periyotlar verirken düşük büyütme oranı uzun periyotlara sebep olur. Büyütme esnasında katman kompozisyonları değişirse  $n$  ve  $k$  değerleri de değişir. Bu durumda osilasyon maksimum ve minimumları da değişecektir (LayTec, 2008).

Farklı büyütme oranı ve kompozisyonlardaki malzemelerin yansıma eğrileri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.8** (a) Aynı yapıda büyütme oranı büyük olanın periyodik olarak tekrar etme süresi daha kısadır, (b) Farklı kompozisyondaki yapıların periyodik tekrar süresinde çok az bir değişim olurken, yansıma eğrisinin salınım genliği tamamen değişir

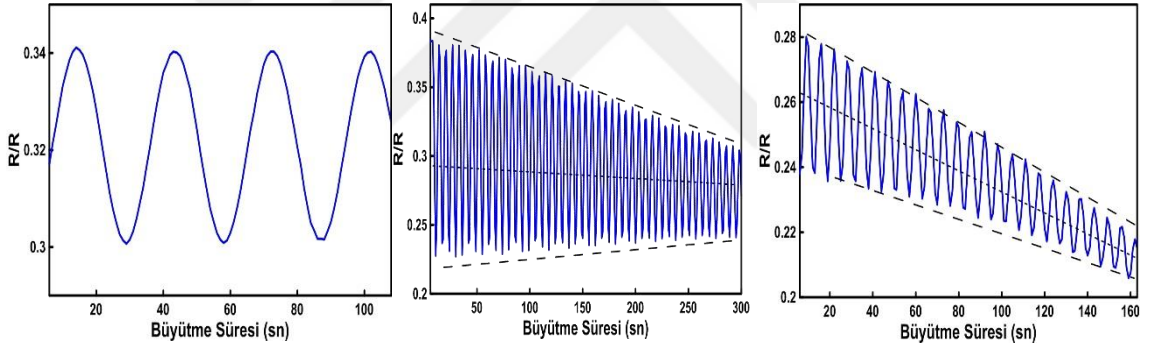
Yansıyan ışığın şiddetindeki değişikliklerin sebebi farklı etkilerden kaynaklanabilmektedir. Büyüyen katman, gelen ışığın dalga boyunda soğuruyorsa, girişimin genliğinde azalma olacak ve artan katman kalınlığı ile lazer ışığı difüzyonla diğer katmana ulaşamayacağından giderek sönmünecektir.

### 4.2.3 İkili Bileşiklerin Kompozisyonu

İkili bileşiklerde alaşım oranına bağlı olarak  $n$  ve  $k$  değerleri değişeceğinden yerinde yansıma eğrisinde gözlemlenen osilasyonların genliğinde gözlenebilir bir değişim olacaktır. Bu yüzden büyütülen tabakanın kırılma indisi büyütme esnasında ölçülen Fabry-Perot Osilasyonlarının genliğinden yararlanılarak bulunur. İkili bileşenlerin alaşım oranları ise yerinde yansıma ölçüm sisteminin AlGaAs, InGaAs, AlGaN gibi çeşitli bileşik yarı iletkenlerin büyütme sıcaklığına bağlı tüm kompozisyon değişimini içeren veri tabanındaki kırılma indisi değerlerinin kıyaslanmasıyla belirlenir.

#### 4.2.4 Yüzey Kalitesi

Yüzey pürüzlülüğü, nano ölçeklerde kalınlık dalgalanmalarıdır. Optiksel dalgalanmalar ise tabaka kalınlığındaki ya da kırılma indisindeki bölgesel dalgalanmaların sonucunda oluşan mikron ölçeğindeki dalgalanmalardır. Bunların dışında malzemedeki bölgesel kompozisyon değişikliğinden ya da gerilme (strain) etkisinden de mikron ölçeğindeki dalgalanmalar oluşabilir. Yerinde yansıma ölçüm sistemi kullanılarak yansıma eğrisindeki osilasyonların şekline bakılarak büyütülen yapının yüzey pürüzlülüğü ve optiksel dalgalanmaları büyütme anında hassas bir şekilde gözlemlenir (Şekil 4.9). Bu eğrilere büyütme anında takip edilerek gerekli durumlarda büyütmeye anlık müdahaleler yapılarak örneğin kalitesinin bozulması engellenir (LayTec, 2008).



Şekil 4.9 Yansıma eğrileri (a) ideal büyütme, (b) artan optiksel dalgalanma, (c) artan yüzey pürüzlülüğü

### 4.3 Harici Karakterizasyon Yöntemleri

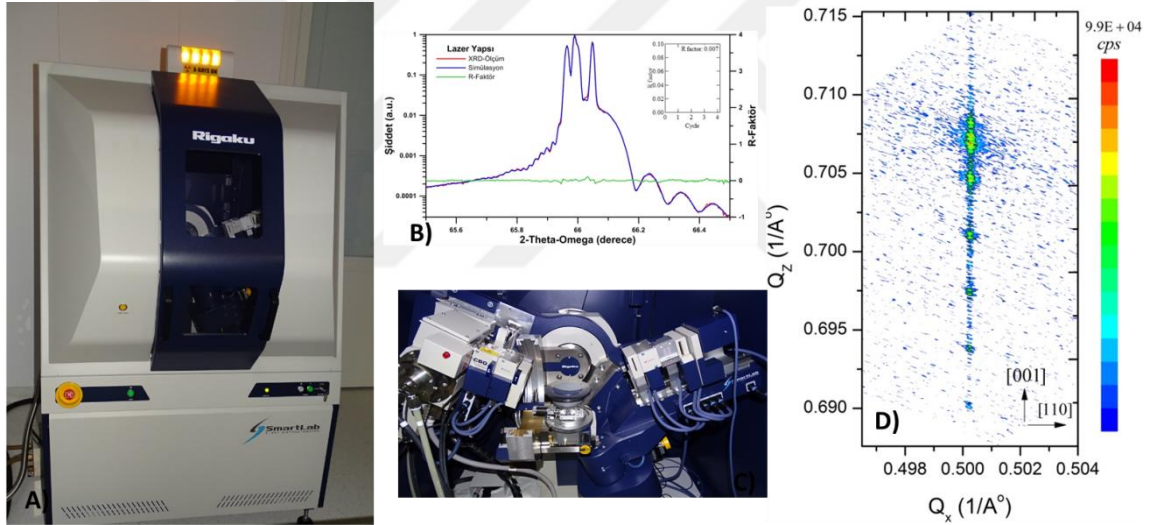
#### 4.3.1 Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD)

X-ışını kırınım (XRD) yöntemi yarıiletken malzemeye zarar vermeden ince filmlerin kristal kalitesini, üçlü veya dörtlü bileşiklerin alaşım oranlarını ve örgü sabitlerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. XRD ölçüm tekniği kullanılarak büyütülen epitaksiyel katmanların kimyasal bileşim oranları, kalınlıkları, tabaka yönelimleri, dislokasyon yoğunlukları, arayüzey pürüzlülükleri ve heteroepitaksiyel olarak büyütülen yapılardaki gerilme ve

gevşeme etkileri hakkında bilgi edinilir. XRD ölçümlerinde koherent X-ışını dalgaları incelenecek olan numune üzerine düşürülür. XRD ölçüm yöntemi ışığın numuneye geliş açısı sürekli değiştirilerek kristal düzlemlerinden saçılan X-ışınlarının dedekte edilmesi prensibine dayanır. Örnekteki periyodik kristal yapının X-ışını ile etkileşimi sonucunda kristalin örgü yapısına bağlı olarak belirli açılarda X- ışını kırınım deseninin oluşmasına neden olur. Bu kırınım deseni Denklem [3.7] ile verilen Bragg şartı ile açıklanmaktadır. Bragg şartı;

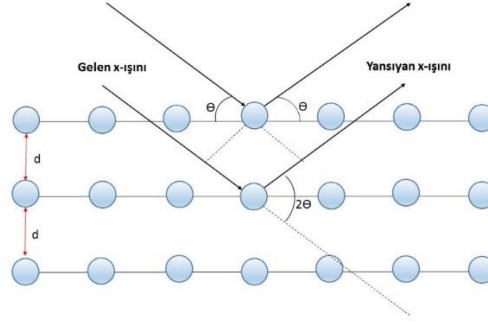
$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad [3.7]$$

eşitliği ile verilir.



**Şekil 4.10** a-SmartLab 9 kW gücünde yüksek çözünürlüklü XRD sistemi, b-915 nm ışığa pikene sahip Lazer yapısının XRD karakterizasyonu, c- XRD sisteminin optik argümanları, d- 915 nm ışığa pikene sahip 10 tekrardan oluşan kuantum kuyunun 224 düzlemine ait RSM taraması

Olarak verilmekte, burada  $\lambda$  ölçüm esnasında kullanılan x-ışınının dalga boyu,  $d_{hkl}$  örgü düzlemleri arasındaki uzaklık,  $h k l$  Miller indisleri,  $n$  yansıma mertebesi ve  $\theta$  Bragg açısıdır. Bragg yasası yalnızca  $d$  düzlemler arası mesafe  $\lambda \leq 2d$  olması halinde söz konusudur. Ardışık iki kristal düzleminden yansıyan X-ışınlarının aldıkları yollar arasındaki uzaklık, kullanılan X-ışınının dalga boyunun tam katına eşit ise yapıcı girişim (maksimum kırınım), yarım katlarına eşitse yıkıcı girişim (minimum kırınım) oluşmaktadır (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11** Bragg yasasının şematik gösterimi. Burada  $d$  kristal düzlemleri arasındaki mesafe,  $\theta$  gelen x-ışını ile yüzey arasındaki açı  $2\theta$  ise gelen ve yansıyan x-ışınları arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Kübik kristal düzlemleri için örgü düzlemleri arasındaki uzaklık;

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad [3.8]$$

denklemleri ile bulunur, burada  $a$  incelenen yarıiletkenin örgü sabitidir. Örgü sabiti ikili bir bileşikten oluşan üçlü alaşım için alaşım oranı Vegard yasası kullanılarak belirlenir. Denklem [3.9] da AB ve AC bileşiklerinin belirli alaşım oranlarıyla bir araya gelerek  $A_xB_{1-x}C$  üçlü alaşımını oluşturduğu yapının örgü sabitini hesaplamak için kullanılan Vegard yasası verilmiştir.

$$a_{A_xB_{1-x}C} = xa_{AC} + (1-x)a_{BC} \quad [3.9]$$

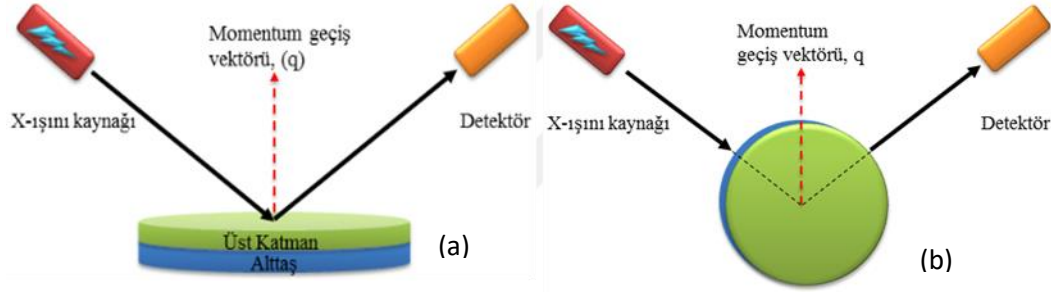
Bu denklemde  $x$  AC bileşiğinin,  $(1-x)$  ise BC bileşiğinin oranıdır.

Bu tez çalışmasında MOCVD büyütme yöntemi kullanılarak üretilen ince filmlerin yapısal analizleri Rigaku SmartLab HR-XRD cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan cihaz; döner anotlu bakır (Cu) hedef kullanarak 9kW güce ulaşmaktadır (maks. Voltaj 45kV, maks. akım 200mA) ve üretilen karakteristik x-ışınının dalga boyu ise  $K_{\alpha 1} = 0.154059 \text{ nm}$ ' dir.

Tez çalışmasında büyütülen numunelerin kristal kalitesini araştırmak, örgü sabitini ve alaşım oranlarını bulmak için  $\theta / 2$ ,  $\omega$  ve RSM (reciprocal spacing mapping-ters uzayın haritalandırılması) taramaları yapılmıştır.

### 4.3.1.1 $\Theta/2\Theta$ Ölçümü

X-ışınlarının bir düzlemden yansımalarını ölçmek için kullanılan en yaygın ölçüm tekniklerinden bir tanesi  $\Theta/2\Theta$  ölçümüdür.  $\Theta/2\Theta$  ölçümünde Şekil 4.12’de görüldüğü gibi incelenecek örneğin üzerine numune yüzeyi ile  $\Theta$  açısı yapacak şekilde gönderilen X-ışınının numune yüzeyi ile aynı  $\Theta$  açısını yapan dedektör tarafından algılandığı tarama şeklindedir. Ölçüm boyunca gelen ve yansıyan  $\Theta$  açıları eşit kalmak şartı ile belirli adım ve tarama hızıyla açı değerleri sürekli olarak değiştirilir. Gelen x-ışınının uzantısının örnek ile yaptığı açıda  $\Theta$  olduğundan gelen x-ışınının uzantısı ile dedektör arasındaki açı  $2\Theta$ ’ dir. Bu ölçüm bu nedenle  $\Theta/2\Theta$  taraması olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4.12 (a) Dik (out-plane) tarama, (b) Paralel (in-plane) tarama geometrik gösterimleri

Hem büyütme düzlemine dik (yüzey normaline paralel-out plane) yönde hem de büyütme düzlemine paralel (yüzey normaline dik-in plane) yönelimde de  $\Theta/2\Theta$  taramasını uygulamak mümkündür. Büyütme düzlemine dik yönelimde uygulanan  $\Theta/2\Theta$  ölçümünde kırınım vektörü  $q$  yüzey normaline paralelken, büyütme düzlemine paralel yönelimde uygulanan  $\Theta/2\Theta$  ölçümünde kırınım vektörü  $q$  yüzey normaline diktir. Kırınım vektörü  $q$ ’ nun boyu  $\Theta$  açısının değerine bağlı olduğu için büyütme düzlemine paralel yönde uygulanan  $\Theta/2\Theta$  ölçümlerinde ters örgü noktası etrafında dikey doğrultu boyunca ölçüm yapılırken, büyütme düzlemine dik yönde uygulanan  $\Theta/2\Theta$  ölçümlerinde ters örgü noktası etrafında yatay doğrultu boyunca ölçüm alınır.

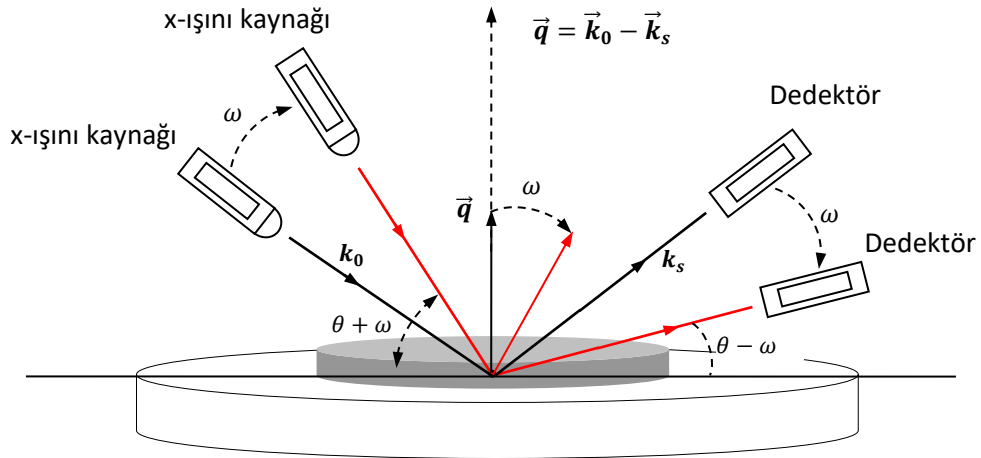
Numuneden maksimum x-ışını şiddeti almak için taramanın yapıldığı eksen düzlemlerinde bazen  $\Theta$  açısı  $2\Theta$  açısının yarısına eşit olmayabilir ve başlangıç olarak  $\Theta$  açısına çok küçük

bir fark eklenip çıkarılabilir. Bu tür taramalar  $\Theta/2\Theta$  taraması ile tamamen aynı özellikte olup  $2\Theta/\omega$  taraması olarak adlandırılırlar.

#### 4.3.1.2 Salıntı Eğrileri Ölçümü ( $\omega$ ölçümü)

Salıntı eğrileri ölçümünde x-ışını kaynağı ile dedektör arasındaki açı sabit tutulur. Dolayısı ile tarama boyunca kırınım vektörü  $q$ 'nun büyüklüğü sabit kalır. Ölçüm boyunca kırınım vektörü  $q$  ölçülen düzlem etrafında  $\omega$  açısı kadar eğimle salıntı şeklinde hareket ettiğinden bu tür taramalara salıntı eğrileri ölçümü denir. Salıntı eğrileri ölçümü de  $\Theta/2\Theta$  taramasında olduğu gibi hem büyütme düzlemine dik hem de büyütme düzlemine paralel yönelimde uygulanır.

Büyütme düzlemine paralel yönde yapılan salıntı eğrileri taramalarında kırınım vektörü  $q$ 'nun  $q_z$  ile simgelenen yüzey normaline paralel kırınım vektörü bileşeninin yanı sıra eğimli ölçüm tekniğinden dolayı  $q_x$  ile simgelenen yüzey normaline dik kırınım vektörü bileşeni de vardır. Bundan dolayı salıntı eğrileri ölçümleri kristal içerisindeki düzlem düzensizliklerine oldukça duyarlıdır ve bu özelliğinden dolayı incelenen örneğin yarı maksimum genişliği (FWHM- Full Width at Half Maximum) genelde salıntı eğrisi taramalarından yararlanılarak belirlenir.



Şekil 4.13  $\omega$  ve  $\phi$  taramasının şematik gösterimi

### 4.3.1.3 Ters Uzay Haritalandırma Ölçümü

X-ışını kırınım yöntemini kullanarak ters uzayın haritalaması büyütülen epitaksiyel katmanlar ve hetero yapıların yapısal özelliklerini ve üzerinde oluşan gerilmeyi belirlemek için kullanılan oldukça güçlü bir yöntemdir. RSM taramaları yapılırken kusurlar ters uzayda koherent Bragg yansıma piki civarında dağınık saçılmaya neden olacağından, RSM taraması yapılarak kristal kalitesinde oluşabilecek kusurlar hakkında bilgi edinmek mümkündür.

RSM taramaları farklı  $\omega$  açılarında çeşitli simetrik ve asimetrik  $2\theta/\omega$  taramalarının yapılmasıyla elde edilir. Genellikle alttaş referans piki civarında  $\pm 1.5^\circ$  açı aralığında uygulanarak, pikler arasındaki açısal ayırım belirlenir. Bir RSM' de açısal artımın  $q_z$  ve  $q_x$  bileşenleri sırasıyla büyütme düzlemine dik (out-plane) ve büyütme düzlemine paralel (in-plane) örgü sabitini hesaplamak için kullanılır. Denklem [3.10] ve [3.11] kullanılarak yapının büyütme düzlemine paralel ve dik örgü sabiti hesaplanabilir. Alttaşa göre filmin ekseninde hiçbir eğimin (tilt) olmadığı varsayılırsa ve paralel yönde herhangi bir anizotropi yoksa filmin bütün yönlerindeki örgü sabiti tek bir asimetrik RSM taraması yapılarak belirlenebilir.

$$q_z = R(\sin\omega + \sin(2\theta - \omega)) = \frac{l}{a_z} \quad [3.10]$$

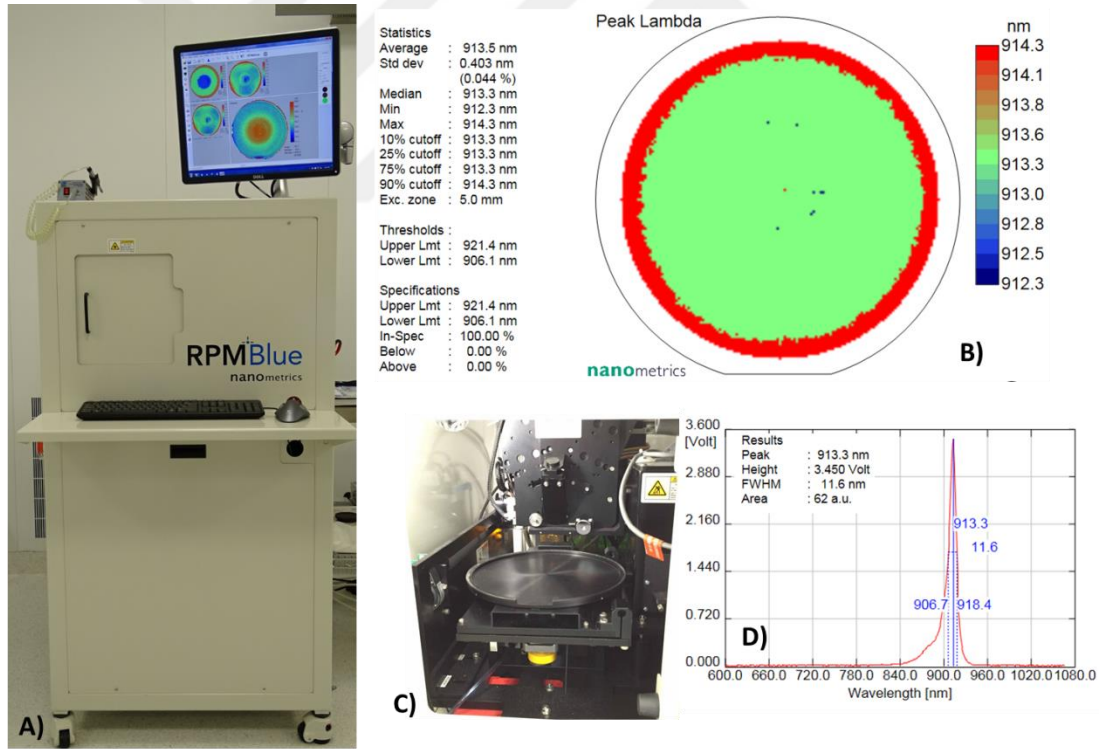
$$q_x = R(\cos\omega - \cos(2\theta - \omega)) = \frac{\sqrt{h^2 + k^2}}{a_x} \quad [3.11]$$

### 4.3.2 Fotolüminesans Ölçüm Sistemi

Bir numune üzerine, yasak bant aralığına eşit ya da daha yüksek enerjili bir optik kaynak (lambda, lazer vb.) kullanılarak uyarıldığında, malzeme üzerine gelen fotonlar malzeme tarafından soğurulur. Numunenin uyarılması sonucunda, valans bandında bulunan elektron yeterli enerjiyi alarak iletim bandına geçer ve yerinde bir boşluk bırakır. Böylece elektron-boşluk çifti (e-h) oluşmuş olur. Uyarılma neticesinde üst enerji seviyelerine çıkan elektronlar, temel enerji seviyelerine dönerken bir foton yayarak (ışımalı geçiş) geçiş yaptığında bu olaya "fotolüminesans" adı verilir. Fotolüminesans olayında numune uygun bir kaynak



kullanılarak aydınlatılır, daha sonra numuneden çıkan ışık (foton) ışına spektrometresi tarafından toplanarak dedektöre aktarılır. Dedektöre gelen optik sinyal, elektriksel sinyale çevrilir ve bilgisayar tarafından değerlendirilir. Numuneden gelen ışığın bu şekilde toplanarak, ışık şiddetinin dalgaboyuna ya da foton enerjisine karşı grafiği çizilerek analiz edilir. Fotolüminesans spektrumundan yararlanılarak direk bant aralığına sahip numunenin yasak enerji bant aralığı (Eg), elektronik durumları, alaşım yarıiletkenler için alaşım kompozisyonu, numune kalitesi, katkı ve safsızlık atomlarının türü ile ilgili bilgi elde edilebilir. Fotolüminesans olayında numunenin uyarılması için kullanılan kaynaklar numunenin özelliklerine göre seçilir. Kaynak seçiminde asıl önemli olan parametre kaynağın numuneyi uyaracak enerjiye ve şiddete sahip olmasıdır.



**Şekil 4.14** A) Yüksek Çözünürlükte Haritalama Yapabilen Fotolüminesans Ölçüm Sistemi, B) 10 Tekrardan oluşan kuantum kuyu yapısının PL Haritalaması D) Tek Nokta Ölçümü, C) Vakumlu Numune Tutucu

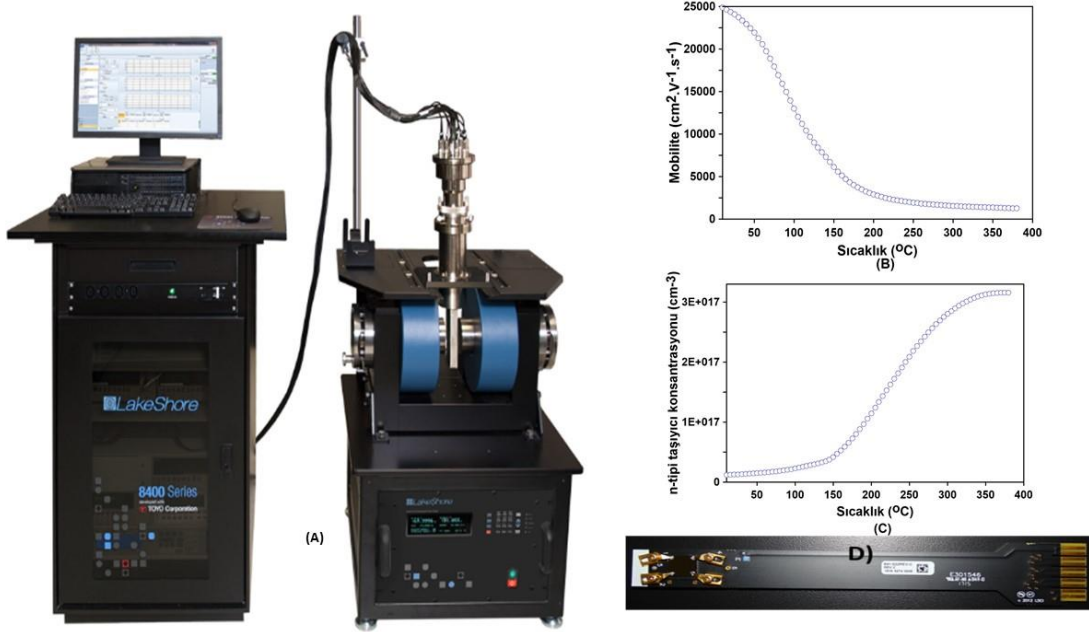
Fotolüminesans ölçümü sağladığı avantajlardan ötürü, numunelerin optik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte, numune

boyutu ve kalınlığı için bir sınırlama olmadığından ölçüm için numune hazırlanması gerekmez. Bundan dolayı da bu teknik incelenecek numuneye ve numune yüzeyine zarar vermez, hızlı bir tekniktir. Fotolüminesans ölçümleri sıcaklığa karşı oldukça duyarlıdır. Ölçümler düşük ve yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Düşük sıcaklıklarda yapılan fotolüminesans ölçümlerinde fonon ve saçılma etkileri daha az olacağından daha temiz bir spektrum elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde de malzemenin devrede kullanımı sırasında ısınmaya bağlı performans değişimini anlamak amacıyla inceleme yapılır. Buna karşın oda sıcaklığında yapılan çoğu fotolüminesans ölçümleri pek çok araştırma için yeterlidir. Fotolüminesans tekniğinde; malzemenin yayılan ışık incelendiği için kullanılan yarıiletken malzemeler direkt bant geçişli yarıiletken olmalıdır.

### **4.3.3 Elektriksel Karakterizasyon**

#### **4.3.3.1 Hall etkisi prensibi**

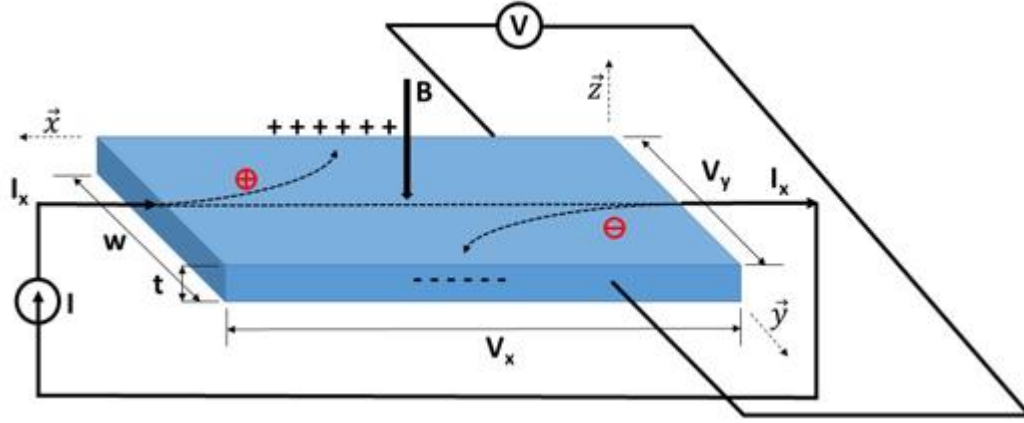
Edwin Hall 1879 yılında akım taşıyan bir iletkeni manyetik alan içerisine yerleştirildiğinde akıma ve manyetik alana dik yönde gerilim farkı oluştuğunu keşfetmiştir ve bunu Hall voltajı olarak tanımlamıştır (Hall E. , 1879).  $B_z$  manyetik alanı altında tutulan bir iletkenin veya yarıiletkenin üzerinden manyetik alan yönüne dik olacak şekilde  $I_x$  akımı geçirilirdiğini varsayalım. Manyetik alan hareket eden yüklü parçacıklara parçacıkların hareket doğrultusuna ve manyetik alana dik olacak şekilde bir  $F_B$  kuvveti uygular. Şekil 4.14' da görüldüğü gibi  $F_B$  kuvvetinin etkisi ile yük taşıyıcısının cinsine bağlı olarak yükler yarı iletkenin bir kenarında toplanır. Bu yük dağılımı sonucunda oluşan kutuplaşmaya bağlı olarak bir E elektrik alanı oluşur. Yük dağılımı devam ettikçe elektrik alan çoğalır ve manyetik kuvvetin tersi yönünde bir kuvvet uygular. Bu durum elektrik alanının oluşturduğu kuvvet manyetik alan kuvvetini dengelediğinde durur ( $F_B=F_E$ ). Bu denge pozisyonunda yarıiletken malzemedeki yük farkından dolayı malzemenin genişliği ( $w$ ) boyunca oluşan voltaja, Hall Voltajı ( $V_H$ ) denir.



**Şekil 4.15** A-Düşük Sıcaklıklarda Ölçüm Alabilen Hall olayı ölçüm sistemi (LakeShore), B-GaAs Alttaş üzerine büyütülen katkısız AlGaAs yapısının sıcaklık bağımlı taşıyıcı konsantrasyonu değişimi, C-Sıcaklık Bağımlı Mobilite değişimi, D-Numune tutucu üzerinde Van Der Pauw yöntemi ile alınmış indiyum kontaklar

Hall Voltajı ( $V_H$ ), yarıiletken malzemenin kalınlığı ( $d$ ), yarıiletkene uygulanan  $I_x$  akımı ve  $B_z$  manyetik alan değerleri yardımıyla hall etkisini kullanarak numuneye ait taşıyıcı yoğunluğu Denklem [3.12] ile belirlenir.

$$n = \frac{I_B B_z}{edV_H} \quad [3.12]$$

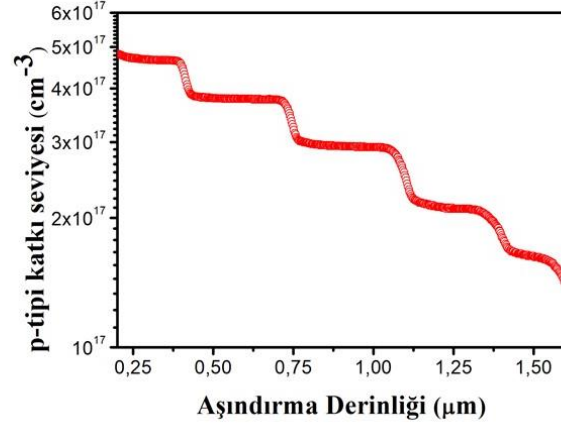


**Şekil 4.16** Hall etkisi prensibi (Razeghi, 2011)

Üzerine hall ölçümü uygulanacak olan numunelerden  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  boyutunda bir kesit alınmıştır. Kesilen örnek üzerine indiyum kullanılarak Van der Pauw geometrisine uyacak şekilde ohmik kontaklar alınarak numuneler hall ölçümüne hazırlanmıştır. Çalışmalar kapsamında Cumhuriyet Üniversitesinde Kurulu olan HEMS model 2T (tesla) manyetik alan şiddetine sahip hall sistemi (a) ile Ermaksan'da kurulu olan sıcaklığa bağlı ölçüm alındığında 0.8T, sıcaklıktan bağımsız ölçüm alındığında 1.6T manyetik alana sahip Lakeshore hall ölçüm sistemi (b) kullanılmıştır.

#### 4.3.3.2 Elektrokimyasal Kapasitans Voltaj Ölçümü

Elektro kimyasal kapasitans voltaj (electro chemical capacitance voltage-ECV) ölçüm sistemi kullanılarak yarıiletken filmlerin aktif taşıyıcı yoğunluğu aşındırma derinliğinin fonksiyonu olarak kullanılır. Hall ölçümünde olduğu gibi bu teknikte numuneye zarar veren bir yöntemdir. Tez çalışması kapsamında bütün ECV ölçümleri Ermaksan Optoelektronik Ar&Ge Merkezinde bulunan Nanometrics marka ECV PRO model cihazı kullanılarak alınmıştır.



**Şekil 4.17A**-ECV-Profil Ölçüm Sistemi, B-karbon katkılı GaAs tabakasının  $AsH_3$  akışı değişimi ile Taşıyıcı konsantrasyonunun değişim profili

C-V ölçümü kalınlığın fonksiyonu olarak taşıyıcı konsantrasyonunu belirlemek için kullanılan önemli tekniklerden bir tanesidir ve C-V ölçümü yarıiletken alından bir ohmik ve bir shottky kontak ile başlar. Yarıiletken/elektrolit ara yüzeyi Schottky eklem gibi davranırken metal/yarıiletken arasında ohmik kontak oluşur. Metal yarıiletken eklem deplesyon genişliği ( $W_d$ ), kapasitansı ( $C$ ) ve taşıyıcı konsantrasyonu ( $N$ ) ile ilgili formüller sırasıyla Denklem [3.13], [3.14] ve [3.15] de verilmiştir.

$$W_d = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{C} \quad [3.13]$$

$$C = A \left[ \frac{qN\epsilon_0\epsilon_r}{2(\phi - V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [3.14]$$

$$N = \frac{C^3}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2 (dC/dV)} \quad [3.15]$$

Burada  $A$  eklem alanı,  $N$  tüketim bölgesi dışındaki taşıyıcı konsantrasyonu,  $\epsilon_0$  vakumun dielektrik sabiti,  $\epsilon_r$  yarıiletkenin dielektrik sabiti,  $\phi$  Schottky bariyer yüksekliği,  $V$  uygulanan besleme voltajı ve  $q$  elektronun üzerindeki yüküdür.

Bir yarıiletken elektrolit ile kontak oluşturduğunda, yük değişimi olur. Bir ECV sisteminde yük transferi yarıiletkenin valans bandındaki hollerin yardımıyla, yarıiletken elektrolite yük geçişi sağlanır. Yaygın olarak kullanılan III-V bileşiklerinden biri olan GaAs için ayrışma reaksiyonu Denklem [3.16]'da verilmiştir.



C-V ölçüm tekniğinde uygulanan besleme ve ölçülen malzemeye göre hazırlanmış bir elektrolit yardımı ile yarıiletkenin yüzeyi elektrokimyasal olarak aşındırılır. Birbirini izleyen aşındırma ve C-V ölçümlerinden yararlanılarak derinliğe bağlı katkı seviyesi belirlenir. Yarıiletkenlerin aşındırılması hollerin varlığına bağlıdır. p-tipi katkı malzemesinde holler çoğunlukta olduğundan aşındırma işlemi yarı iletken elektrolit ileri beslemesiyle kolaylıkla oluşur. Elektronların çoğunluk taşıyıcısı olduğu n-tipi katkı malzemelerde ise aşındırma işlemi için holler oluşturulur. Bu amaçla yarıiletken/elektrolit elektron hol çifti oluşturmak amacıyla yeterince kısa dalga boylu ışıkla aydınlatılır. Aydınlatma için kullanılan ışığın dalga boyu denklem [3.17] ile verilir. N-tipi malzemenin aşındırılması ters besleme koşulları altında verilir. Aydınlatma ile oluşturulan holler arındırma bölgesi boyunca sızıntı akımını oluşturur. Bu akım azınlık taşıyıcı yoğunluğunun bir fonksiyonudur ve bu yüzden sadece aydınlatma seviyesi ile kontrol edilir (Nanometrics, USA).

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad [3.17]$$

## 5 KENAR IŞIMASI YAPAN LAZER DİYOT YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Katı hal lazer diyot yapısı; yarıiletken malzemelerden oluşan çoklu tabaka dizilimlerinin epitaksiyel olarak büyütülmesiyle oluşur. Lazer yapısında büyütülen katmanların her birinin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üretilen lazer ışığının aktif bölgede sınırlandırılmasını, ışımalı ya da ışısız rekombinasyon süreçlerini, karanlık akımını ve eşik akımını doğrudan etkileyen parametrelerdir. Bu bölümde 9xx-10xxnm dalga boyu aralığında ışıyan kenar yayıcı lazer diyot yapılarının aktif bölgesini, kılıf (cladding), dalga kılavuzu (waveguide) ve kontak tabakasını oluşturan InGaAs, AlGaAs ve GaAs tek tabakalarının MOCVD ile büyütülme aşamaları ve karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Yapılan tek tabaka büyütme çalışmaları ve çoklu kuantum kuyu büyütme çalışmalarıyla üretilecek olan lazer yapısının her bir katmanının büyütme parametreleri ayrı ayrı belirlendi. Lazer yapısının aktif bölgesini elde etmek amacı ile 900nm, 915nm, 967nm ve 1052nm’ de ışıyan 10 tekrarlı çoklu kuantum kuyu yapıları büyütüldü. Tüm bu çalışmaların sonucunda belirlenen büyütme parametreleri kullanılarak 900nm ve 915nm dalga boyunda ışıyan tek kuantum kuyulu lazer diyot yapıları büyütüldü. Ayrıca 915nm dalga boyunda ışıyan dalga kılavuzu ve kılıf katmanları için p-tipi katkı malzemesi olarak Zn ve C kullanıldığı, p-tipi katkı malzemesi dışındaki diğer tüm büyütme parametrelerinin sabit tutulduğu iki farklı lazer yapısı büyütülüp bu yapıların yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerine tavlama sıcaklığının etkisi belirlenmiştir.

### 5.1 Katkısız GaAs Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

Epitaksiyel büyütme yapılrken genelde alttaş yüzeyinden gelecek olası istenmeyen, düzenli veya düzensiz yapıların büyütülen tabakaya geçmesini engellemek ve büyütme için esnek bir ortam hazırlamak amacıyla homo-epitaksiyel büyütme yapılmaktadır. Büyütülen bu homo-epitaksiyel katman tampon tabaka diye adlandırılmaktadır. AlGaAs tek tabakalarının ve InGaAs kuantum kuyu büyütme, katkılama ve karakterizasyon çalışmaları yapılmadan önce tampon tabaka olarak kullanılan GaAs katmanının ideal kalitede büyütüldüğünden emin olunması gerekmektedir. Bu amaçla 3” boyutunda (001) büyütme yönelimli [111] yönelimine göre 6° eğik kesimli katkısız GaAs alttaşlar kullanılarak çeşitli

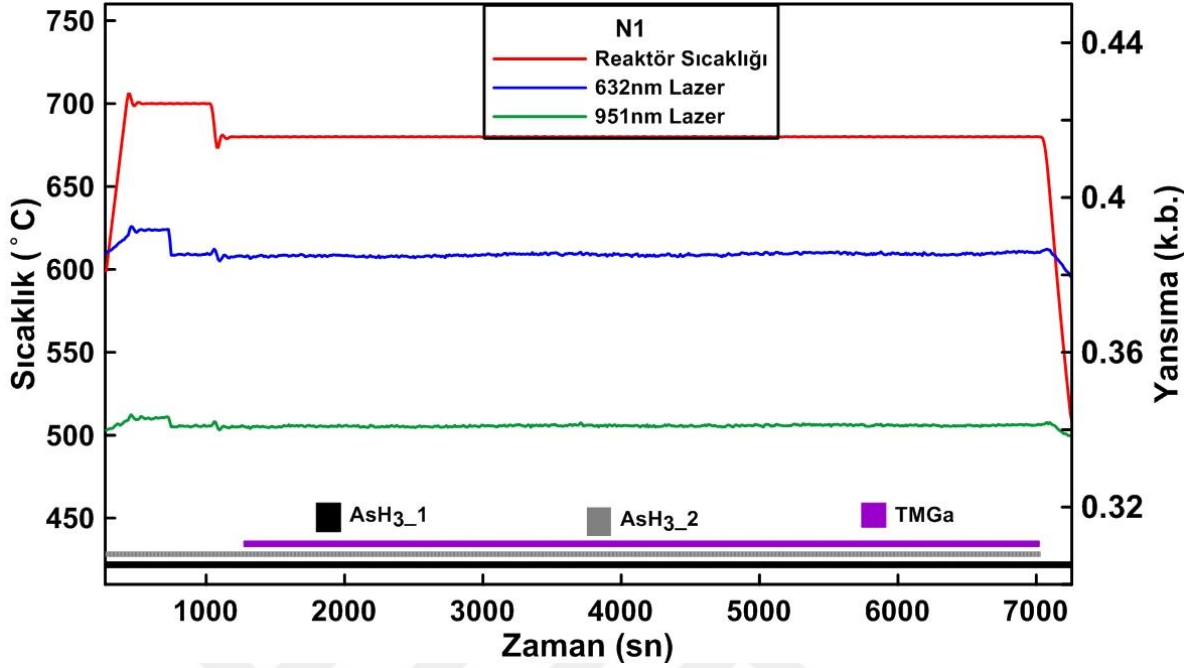
büyütme çalışmaları yapılmış ve büyütülen örneklerin fotoluminesans karakteristiği, kristal kalitesi, mobilitesi ve arka plan taşıyıcı konsantrasyonuna bakılarak ideal kalitede olup olmadığı incelenmiştir. Yapılan katkısız büyütmelemlerden N1 isimli numuneye ait büyütme parametreleri Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

**Çizelge 5.1** N1 numaralı numuneye ait MOCVD büyütme parametresi

<b>N1</b>	<b>Reaktör Sıcaklığı (°C)</b>	<b>AsH<sub>3</sub> Molar Akışı (mol/min)</b>	<b>TMGa Molar Akışı (mol/min)</b>	<b>Reaktör Basıncı (mbar)</b>
<b>Oksit Kaldırma</b>	700	4,46E-02	-	50
<b>Katkısız GaAs Tampon Tabaka</b>	675	4,46E-02	9,27E-04	50

Şekil 5.1 N1 numaralı örneğe ait katkısız GaAs alttaş üzerine kendiliğinden katkılı (intrinsic) GaAs’ ın homoepitaksiyel olarak büyütülmesi esnasında yerinde yansıma ölçüm sistemiyle gözlemlenen büyütme zamanına bağlı sıcaklık ve yansıma eğrisini göstermektedir. 632nm ve 951nm dalga boylu lazer kullanılarak büyütme zamanına bağlı olarak gözlemlenen yansıma eğrisinde herhangi bir osilasyonun gözlemlenmemesinin nedeni büyütülen katman ile kullanılan alttaşın kırılma indislerinin eşit olmamasından kaynaklanmaktadır.





**Şekil 5.1** N1 numaralı örneğin GaAs büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

Günümüze kadar birçok araştırmacı GaAs malzemesinin safsızlık düzeyini düşürmeye başka bir ifade ile arka plan taşıyıcı konsantrasyonunu düşürüp, mobilitesini artırmaya yönelik çalışmalar yapmıştır. Yapılan bu çalışmalarda sıcaklık (Manasevit, 1969; Ozeki, 1977), reaktör basıncı (Ozeki, 1977), metal organik kaynaklar (trietyl galyum yerine trimetil galyum) (Nakanisi, 1981; Modak, 1997; Ozeki, 1977) ve taşıyıcı gazlar ( $N_2$  veya  $H_2$ ) (Dapkus, 1981; Modak, 1997; Modak, 1997) gibi büyütme parametrelerini değiştirilerek safsızlık düzeyi düşürmeye çalışılmıştır. Çizelge 5.2 GaAs malzemesinin safsızlığını azaltmak için yapılan bu araştırmalardan elde edilen arka plan taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerlerini göstermektedir.

**Çizelge 5.2** Bazı araştırma grupları tarafından belirlenen mobilite ve arka plan taşıyıcı değerleri

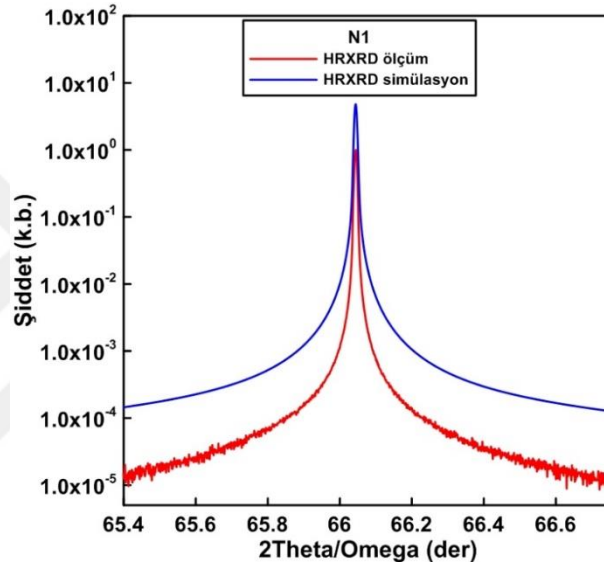
	77K	300K	
	Mobilite [cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]	Arka Plan Taşıyıcı Konsantrasyonu [cm <sup>-3</sup> ]	Mobilite [cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
H. M. Manasevit		1x10 <sup>16</sup>	5000
M. Ozeki		2.9x10 <sup>13</sup>	7300
T. Nakanisi	139000	3.69x10 <sup>14</sup>	
P.D. Dapkus	125000	5x10 <sup>14</sup>	
P. Modak	90000	1x10 <sup>15</sup>	6000

Katkısız GaAs tek tabaka büyütme çalışmasında üretilen N1 numaralı GaAs örneğinden kesilen 1x1 cm<sup>2</sup> boyutunda kare şeklindeki parça üzerine, Van der Pauw geometrisine uyacak şekilde indiyum kontaklar alınarak numune hall ölçümüne hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekten 300K (oda sıcaklığı) ve 77K' de (sıvı nitrojen sıcaklığı) hall ölçümü alınmıştır. N1 numaralı örnek büyütülürken herhangi bir katkı malzemesi kullanılmadığı için ölçülen taşıyıcı konsantrasyonu değeri arka plan taşıyıcı konsantrasyonu (background doping) değerini göstermektedir. Ölçümlerden elde edilen mobilite ve arka plan taşıyıcı konsantrasyonu değerleri Çizelge 5.3 de verilmiştir. Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3' deki arka plan taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değerleri kıyaslandığımızda; bu çalışmada büyütülen N1 numaralı GaAs tabakasının safsızlık düzeyinin yeterince düşük olduğunu ve büyütülen GaAs tabakasının oldukça kaliteli olduğunu söylenebilir.

**Çizelge 5.3** N1 numaralı örnek için hall sistemi kullanılarak ölçülen mobilite ve arka plan taşıyıcı değerleri

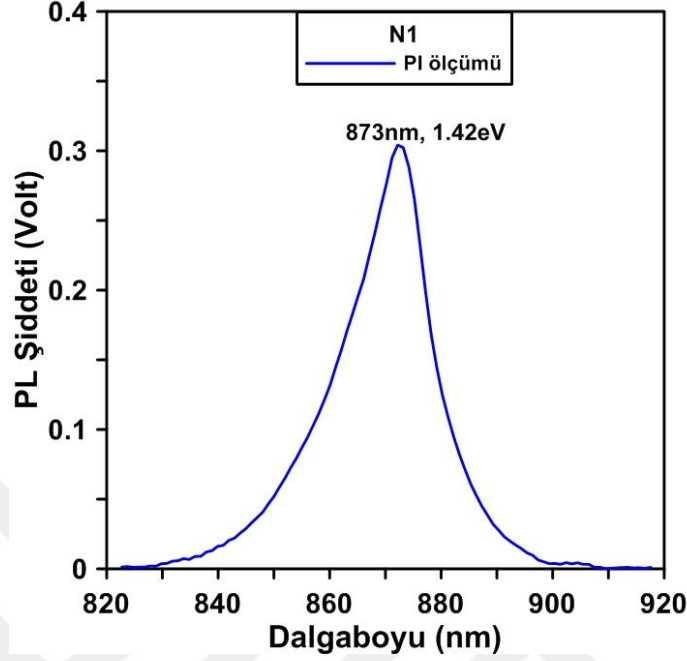
		77K	300K
$\mu_H$	Hall mobilitesi [cm <sup>2</sup> /V.s]	123000	6400
	Taşıyıcı tipi	N	N
n	Taşıyıcı konsantrasyonu [1/cm <sup>3</sup> ]	2.194E14	4.127E14

Üzerine N1 katkısız GaAs tabakasının büyütüldüğü 6° eğik kesimli GaAs alttaşa ve büyütülen GaAs epitaksiyel katmanına ayrı ayrı uygulanan 2Theta/Omega HRXRD taramaları Şekil 5.2’ de verilmiştir. HRXRD Omega taramasıyla belirlenen FWHM değeri alttaş için 15 arcsec iken GaAs alttaş üzerine büyütülen katkısız kalınlığının yaklaşık 10µm olduğu tahmin edilen GaAs tabakası için 18 arcsec’ dir. Her iki yapının da FWHM değerinin hemen hemen aynı olması büyütülen GaAs tabakasının kalitesinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.2 N1 numaralı büyütme için HRXRD taraması

N1 numaralı numunenin PL ölçümü oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm, maksimum çıkış gücü 55 mW olan 532nm dalga boyundaki NdYAG lazeri ile yapılmış ve algılayıcı olarak ise CCD512-BT-TE dedektör kullanılmıştır. Ölçüm esnasında kullanılan lazerin gücü 45.9mW ve ölçümün alındığı tarama aralığı 5pts/s’dir. Numuneden elde edilen PL ölçüm sonucu incelendiğinde örneğin 873nm (1.42eV) değerinde GaAs bant kenarına ait pik verdiği ve bu pikin FWHM değerinin 15meV civarında olduğu görülmüştür (Şekil5.3).



Şekil 5.3 N1 numaralı büyütme için PL ölçümü

### 5.1.1 Ara tabaka üzerine büyütülen GaAs yapısının büyüme oranını belirleme

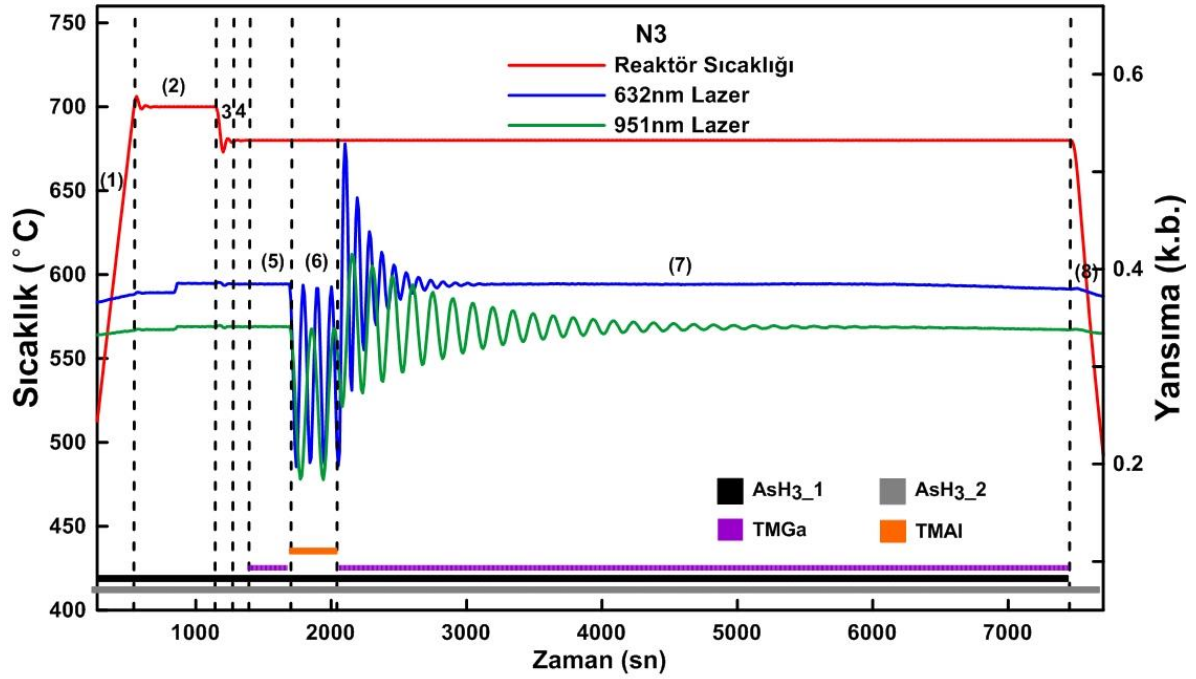
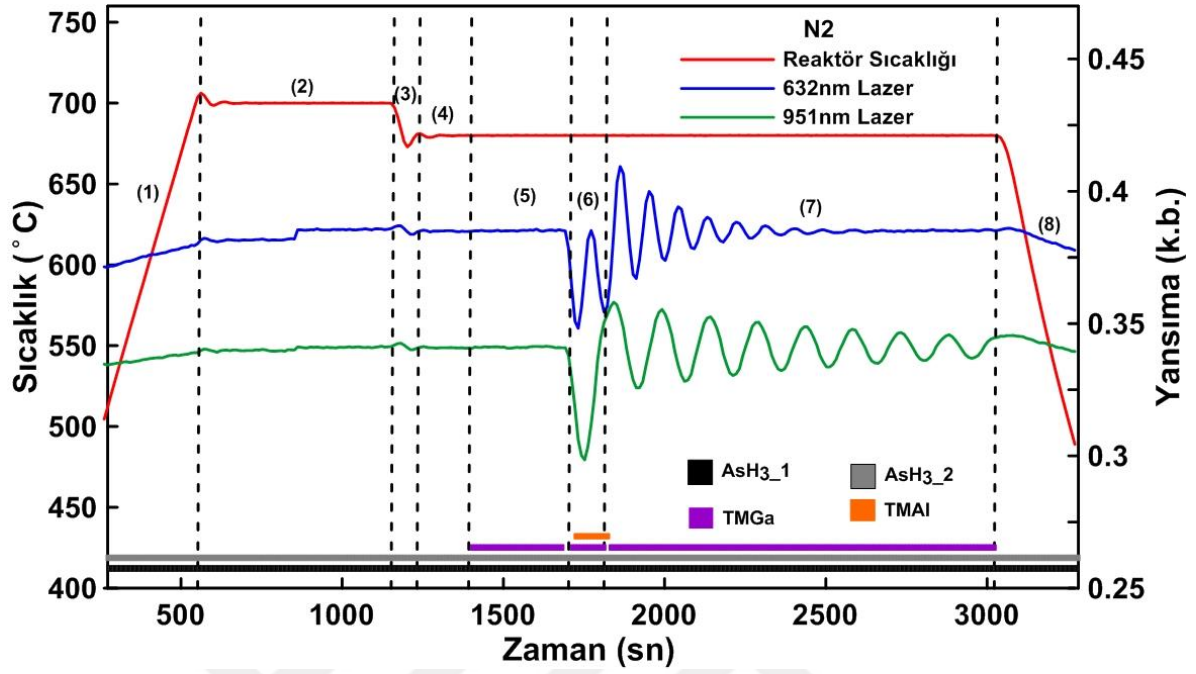
GaAs alttaş üzerine büyütülen GaAs yapısında daha önce de bahsedildiği gibi materyal grupları arasında herhangi bir kırılma indisi farkı olmadığından yerinde yansıma ölçümüyle büyüme oranını belirlemek mümkün değildir. Bu çalışmada GaAs yapısının büyüme oranını belirlemek için GaAs alttaşlar üzerine ara katman (N2 numunesi için AlGaAs ve N3 numunesi için AlAs) ve onun üzerine de GaAs epitaksiyel tabakası büyütülerek numunelerin büyüme oranı belirlenmiştir. Ara tabaka büyütülmesinin nedeni katmanlar arasındaki kırılma indisi farkından dolayı oluşan Fabry-Perot kalınlık osilasyonlarından (fringe) yararlanarak hem ara katmanın hem de ara katman üzerine büyütülen GaAs tabakasının büyüme oranını belirlemektir.

Şekil 5.4a ve 4b sırasıyla N2 ve N3 numaralı örnekler için yerinde yansıma ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu şekillerde kırmızı eğri gerçek zamanda reaktör sıcaklığını, mavi ve yeşil eğriler ise sırasıyla 632nm ve 951nm dalga boylu lazer kullanılarak gözlemlenen yerinde yansıma ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Bu büyütme başlıca 8 ana adımda yapılır. Aşağıda adım adım anlatılan ana süreçler şekiller üzerinde de numaralandırılarak

gösterilmiştir. Büyütmeye başlamadan önce GaAs alttaş yüzeyi 700°C' ye kadar oldukça yavaş bir şekilde ısıtılır (1°C/s) (1) ve 700°C' de AsH<sub>3</sub> akışı altında 10 dakika beklenir (2), AsH<sub>3</sub> akışı altında yüksek sıcaklıkta bekleme süreci oksit kaldırma veya kusturma diye adlandırılmaktadır. Isıtılan GaAs alttaş yüzeyi üzerinden AsH<sub>3</sub> kaçışını engellemek için ısıtma boyunca reaktöre AsH<sub>3</sub> gaz akışı sağlanır. Şekil 5.4a ve 4b' de siyah ve gri renkli bar şeklindeki çizgiler AsH<sub>3</sub> valflerinin açık olduğunu reaktöre iki farklı hattan AsH<sub>3</sub> girişi olduğunu göstermektedir. Mor ve turuncu renkli barlar ise sırasıyla TMGa ve TMAI valflerinin açık olduğunu reaktöre galyum ve alüminyum akışının sağlandığını gösterir. Oksit kaldırma süreci tamamlandıktan sonra reaktör sıcaklığı GaAs tampon tabaka büyütmeye sıcaklığına (675 °C) 30 saniyede düşürülür (3), GaAs tampon tabaka büyütmeye başlamadan önce büyütmeye sıcaklığının dengeye gelmesi için 3 dakika beklenir (4). Sıcaklık stabilizasyonu sağlandıktan sonra TMGa valfi açılır ve yaklaşık olarak 250nm kalınlığında olduğu düşünülen GaAs tampon tabaka büyütmeye yapılı (5). GaAs tampon tabaka büyütmeye tamamlandıktan sonra ara tabaka büyütmeye geçmeden önce TMGa valfi kapatılır ve AsH<sub>3</sub> akışı altında reaktöre gidecek gaz miktarının dengesi ve büyütilen GaAs yüzeyinin dengesi için 5 saniye beklenir. Bekleme süresinin ardından N2 numaralı örnek için AsH<sub>3</sub> valfine ek olarak TMGa ve TMAI valfleri aynı zamanda açılarak AlGaAs ara tabaka büyütmeye (6), N3 numaralı örnek için ise AsH<sub>3</sub> valfinin yanında TMAI valfi açılarak AlAs ara tabaka büyütmeye gerçekleştirilir (6). Ara tabaka büyütmeye tamamlandıktan sonra AsH<sub>3</sub> valfleri hariç tüm valfler kapatılır ve 5 dakika boyunca AsH<sub>3</sub> akışı altında bekletilir numune. Bekleme süresinin ardından TMGa valfi açılarak GaAs büyütmeye gerçekleştirilir (7). GaAs büyütmeye tamamlandıktan sonra oldukça yavaş bir şekilde büyütilen numune AsH<sub>3</sub> gaz akışı altında soğutulur (8). N2 ve N3 numaralı örneklere ait MOCVD büyütmeye parametreleri Çizelge 5.4' de özetlenmiştir.

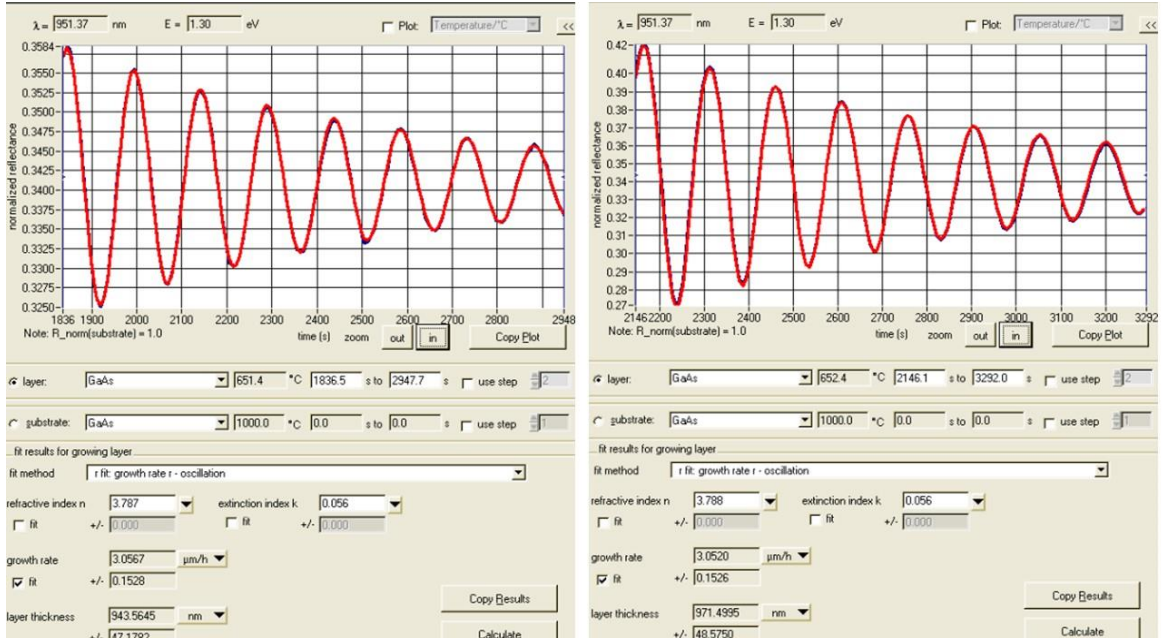
**Çizelge 5.4** N2 ve N3 numaralı örneklere ait MOCVD büyütme parametreleri

Numune İsmi	Tabaka İsmi	Reaktör Sıcaklığı	AsH <sub>3</sub> Molar Akışı	TMGa Molar Akışı	TMAI Molar Akışı	Reaktör Basıncı
		(°C)	(mol/min)	(mol/min)	(mol/min)	(mbar)
N2	<b>Oksit Kaldırma</b>	700	4.46E-02	-	-	50
	<b>GaAs tampon tabaka</b>	675	4.46E-02	8.351E-04	-	50
	<b>AlGaAs ara tabaka</b>	675	4.46E-02	7.424E-04	1.867E-04	50
	<b>GaAs tabakası</b>	675	4.46E-02	8.351E-04	-	50
N3	<b>Oksit Kaldırma</b>	700	4.46E-02	-	-	50
	<b>GaAs tampon tabaka</b>	675	4.46E-02	8.351E-04	-	50
	<b>AlAs ara tabaka</b>	675	4.46E-02	-	9.336E-04	50
	<b>GaAs tabakası</b>	675	4.46E-02	8.351E-04	-	50



Şekil 5.4 N2 numaralı örneğe ait b) N3 numaralı örneğe ait yerinde yansımaya (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

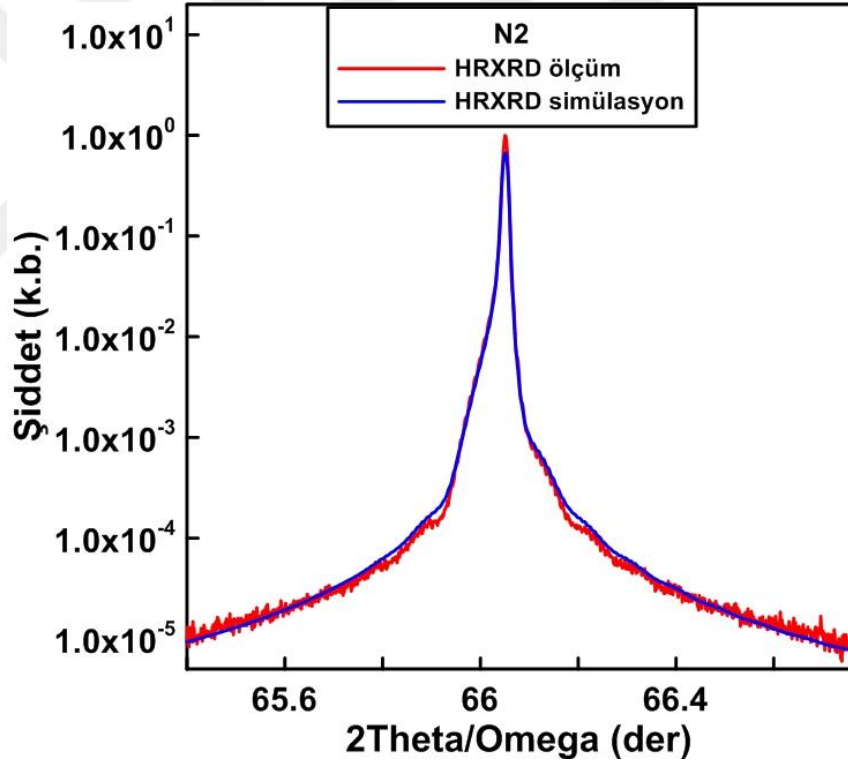
Çizelge 5.4’ de verilen MOCVD büyütme parametrelerinden de açıkça görüldüğü gibi N2 ve N3 numaralı örneklerde katkısız GaAs tabakası büyütülürken tüm büyütme parametreleri aynı tutulmuştur. Numuneler arasındaki fark; büyütülen ara tabakaların (AlGaAs – N2, AlAs – N3) farklı olması ile birlikte büyütme sürelerinin de farklı olmasıdır. AlAs ve AlGaAs gibi iki farklı ara tabaka kullanılmasındaki amaç ise farklı ara tabakalar üzerine büyütülen GaAs’ın büyüme oranında herhangi bir farkın olup olmadığını gözlemlemektir. N2 numaralı örnek için GaAs büyütme süresi 20 dakika iken, N3 numaralı örnekte ise büyütme süresi 90 dakikadır. Büyütme esnasında 951nm dalga boylu lazer kullanılarak elde edilen yerinde yansıma ölçüm verileri fit edilerek N2 (Şekil 5.5a) ve N3 (Şekil 5.5b) numaralı örneklerin büyütme oranları belirlenmiştir. Şekillerdeki mavi eğri 951nm kullanılarak yerinde yansıma ölçümü ile gözlenen Fabry-Perot osilasyonlarını gösterirken, kırmızı eğri bu osilasyonlara büyütme oranını belirlemek için uygulanan fit sonuçlarını göstermektedir. Yerinde yansıma ölçümü ile belirlenen büyütme oranları N2 ve N3 numaralı örnekler için sırasıyla 3.0567  $\mu\text{m/s}$  (GaAs tabaka kalınlığı 1018nm) ve 3.0520  $\mu\text{m/s}$ ’ dir (GaAs tabaka kalınlığı 4580 nm) (Şekil 5.5). Farklı malzeme grupları üzerine yapılan büyütmelemlerde (AlAs ve AlGaAs) büyüme oranının bir önceki katmana bağlı olarak değişmediğini göstermektedir.



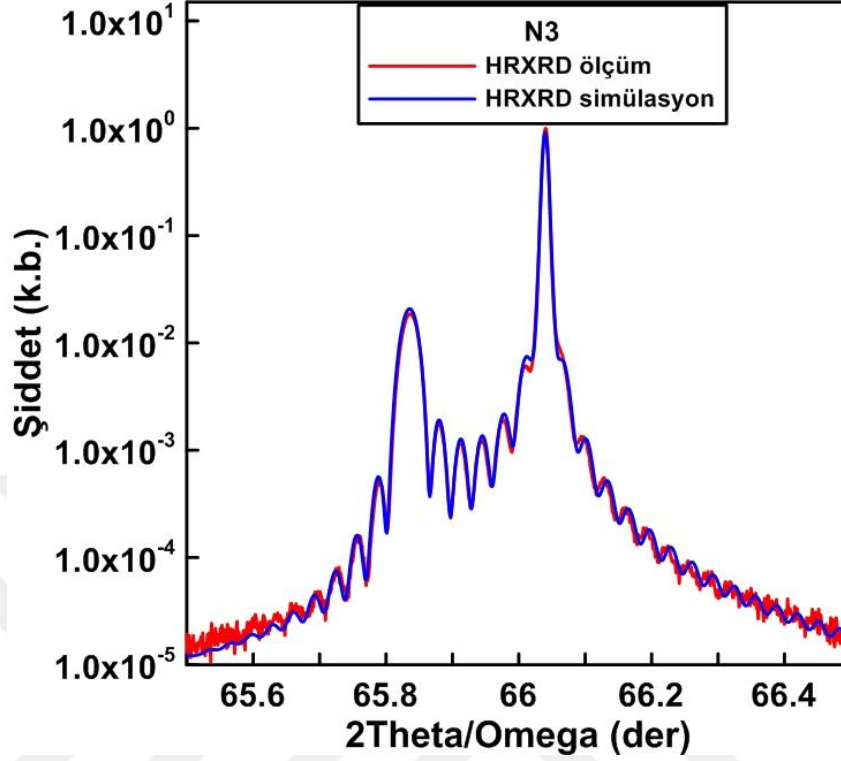
**Şekil 5.5** N2 ve N3 numaralı örneklere ait yerinde 915 nm dalgaboylu lazer kullanılarak ölçülen yansıma eğrisi (mavi) ve fit (kırmızı) sonuçları



Yerinde yansıma ölçümü ile belirlenen numune kalınlıkları XRD karakterizasyon yöntemi kullanılarak kontrol edildi. Sırasıyla N2 ve N3 numaralı örneklere ait 2Theta/Omega HRXRD ölçüm sonuçları ile global fit programı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 5.6a ve Şekil 5.6b' de verilmiştir. Örnek numarası N2 olan numunenin XRD simülasyon sonucunda elde edilen GaAs tampon tabaka, AlGaAs ara tabaka ve GaAs tabaka kalınlıkları sırasıyla 250nm, 120nm ve 1000nm'dir. HRXRD simülasyon sonuçlarına göre N2 numaralı örnekte kullanılan AlGaAs tabakasındaki Al içeriğinin 24% olduğu belirlenmiştir. Örnek numarası N3 olan numunenin XRD simülasyon sonucunda elde edilen GaAs tampon tabaka, AlAs ara tabaka, GaAs tabaka kalınlıkları sırasıyla 250nm, 332nm ve 4500nm'dir.



(a)



Şekil 5.6 a) N1 ve b) N2 numaralı numunelere ait HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

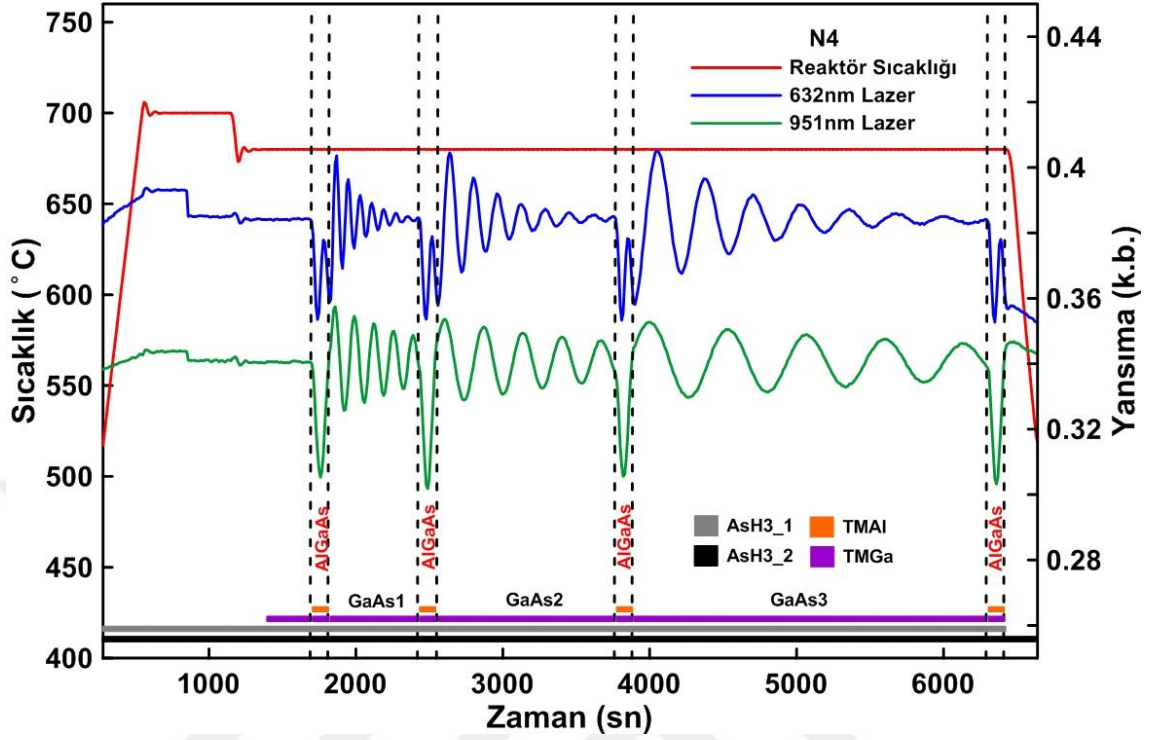
### 5.1.2 TMGa Akışının GaAs Büyüme Oranına Etkisini İnceleme

Epitaksiyel tabakaların kalınlık ve büyüme oranları dolaylı (spectrofotometre, elipsometre, XRD gibi gelen ışığı yansıtma veya geçirme geometrisine dayanan yöntemler) veya direk (taramalı elektron mikroskobu, geçirimli elektron mikroskobu gibi çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibine dayanan yöntemler) olarak nitelendirilen ölçüm teknikleri kullanılarak belirlenir. Bu çalışmada büyütme oranları direk ölçüm tekniklerinden biri olan taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) ve dolaylı ölçüm tekniklerinden XRD ve yansıma ölçümleri kullanılarak belirlenmiştir. TMGa akışının GaAs büyütme oranına etkisinin incelemek amacıyla TMGa molar akışı  $928 \mu\text{mol/dk}$ ,  $464 \mu\text{mol/dk}$  ve  $232 \mu\text{mol/dk}$  olan üç farklı katkısız GaAs tabakası sırasıyla 10dk, 20dk ve 40dk'lık büyütme süreleri kullanılarak büyütülmüştür. Farklı molar akışlarla büyütülen GaAs tabakalarının toplam kalınlığını belirlemek için hem GaAs alttaş hem de farklı TMGa molar akışları kullanılarak büyütülen GaAs tabakaları arasında kırılma indisi farkı (yerinde yansıma ve SEM ölçümü için) oluşturacak uygun bir ara tabaka büyütülmüştür. Bu çalışmada %24 alüminyum içeriğine sahip AlGaAs malzemesi ara tabaka

olarak kullanılmıştır. Çizelge 5.5 de büyüme oranını belirlemek için farklı TMGa molar akışları kullanılarak büyütülen N4 numaralı AlGaAs/GaAs hetero-epitaksiyel yapısının MOCVD büyüme parametreleri verilmiştir. Şekil 5.7’ de ise N4 numaralı örneğin yerinde yansıma ölçüm sonuçları mevcuttur.

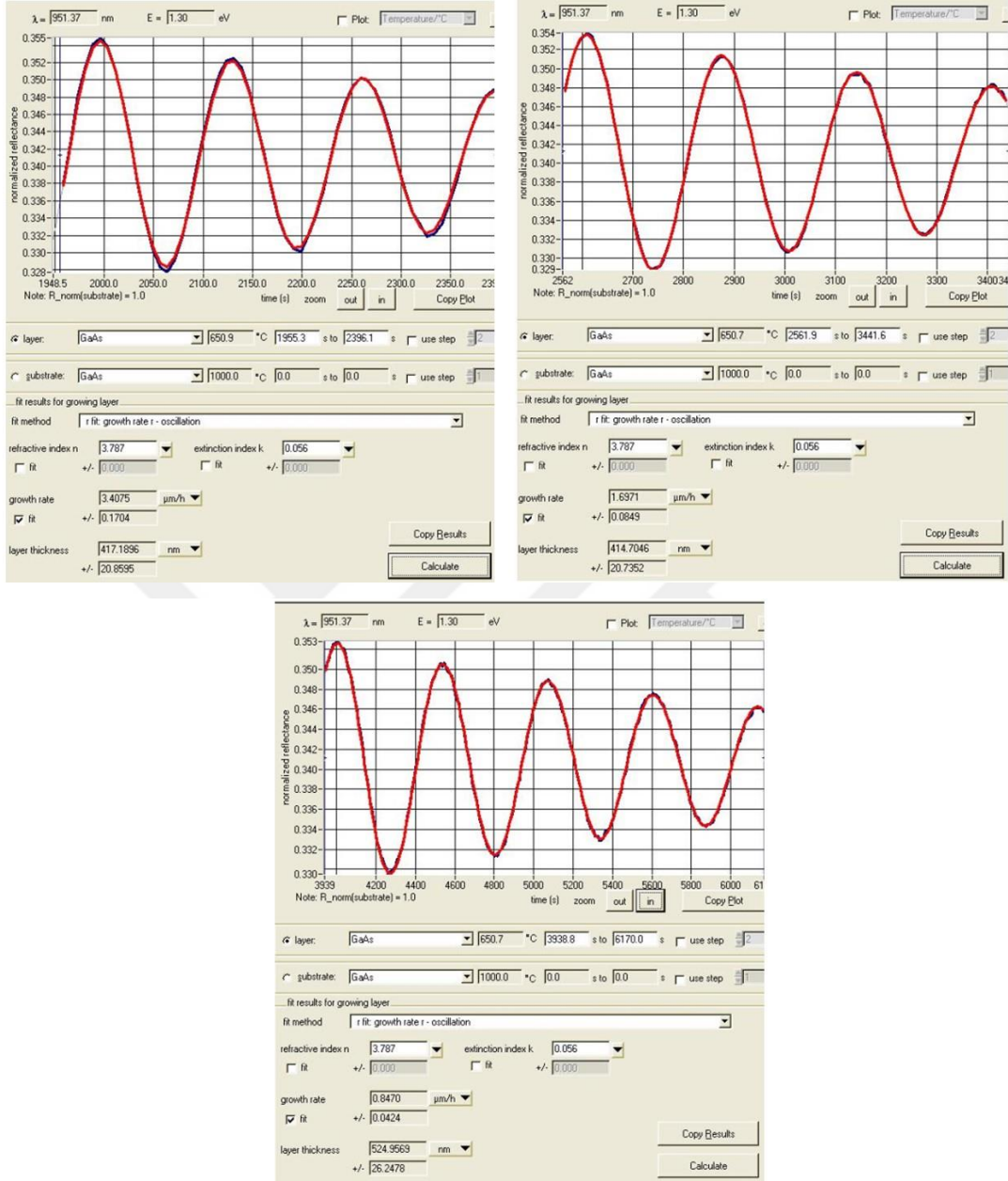
**Çizelge 5.5** N4 numaralı örneğe ait MOCVD büyüme parametreleri

Numune	Tabaka İsmi	Büyütme Süresi (dk)	Reaktör Sıcaklığı (°C)	AsH <sub>3</sub> Molar Akışı (μmol/min)	TMGa Molar Akışı (μmol/min)	TMAI Molar Akışı (μmol/min)	V/III Oranı	Reaktör Basıncı (mbar)
N4	Oksit Kaldırma	10	700	44600			48	50
	GaAs tampon tabaka	5	680	44600	928		48	50
	AlGaAs ara tabaka	2	680	44600	742	186	48	50
	GaAs1 Tabakası	10	680	44600	928		48	50
	AlGaAs ara tabaka	2	680	44600	742	186	48	50
	GaAs2 Tabakası	20	680	44600	464		96	50
	AlGaAs ara tabaka	2	680	44600	742	186	48	50
	GaAs3 Tabakası	40	680	44600	232		192	50
	AlGaAs ara tabaka	2	680	44600	742	186	48	50



Şekil 5.7 N4 numaralı örneğe ait yansıtma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

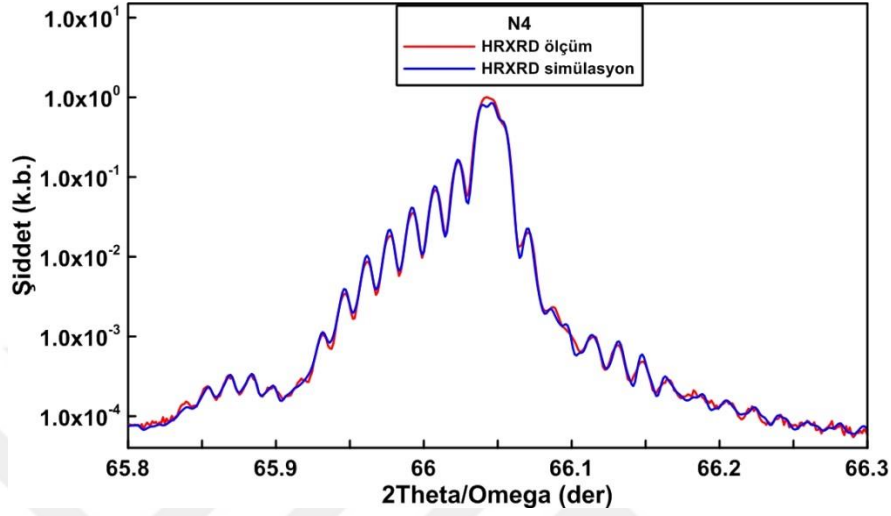
Büyütme esnasında 951nm dalga boylu lazer kullanılarak elde edilen yansıtma ölçümü ile gözlemlenen Fabry-Perot osilasyonları (mavi) ve bu osilasyonlar üzerine her bir GaAs katmanı için (GaAs1, GaAs2, GaAs3) uygulanan fit (kırmızı) sonuçları kullanılarak büyütme oranları belirlenmiştir (Şekil 5.8a, Şekil 5.8b, Şekil 5.8c). TMGa akış oranı hariç diğer tüm büyütme parametreleri sabit tutularak büyütülen V/III oranları 48, 96 ve 192 olarak değişen GaAs tabakaları için gerçek zamanlı yansıtma ölçümü kullanılarak elde edilen büyütme oranları sırasıyla  $3.41\mu\text{m}/\text{sa}$ ,  $1.7\mu\text{m}/\text{sa}$  ve  $0.85\mu\text{m}/\text{sa}$ 'dir.



**Şekil 5.8** a) GaAs1 b)GaAs2 c)GaAs3 epitaksiyel katmanlarına ait 915 nm dalgaboylu lazer kullanılarak ölçülen yerinde yansıma eğrisi (mavi) ve fit (kırmızı) sonuçları

Farklı TMGa akışları kullanılarak büyütülen N4 numaralı örnek için tabaka kalınlıkları XRD ölçüm yöntemi kullanılarak belirlendi. Şekil 5.9' da N4 numaralı örnekten elde edilen XRD ölçüm sonuçları ve bu ölçüm üzerine uygulanan simülasyon sonuçları verilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen kalınlık değerleri Çizelge 5.6' da verilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen kalınlık değerlerinin tabaka büyüme sürelerine oranlanmasıyla elde

edilen büyütme oranları GaAs1, GaAs2 ve GaAs3 katmanları için sırasıyla 3.378  $\mu\text{m}/\text{sa}$ , 1.704 $\mu\text{m}/\text{sa}$ , 0.843 $\mu\text{m}/\text{sa}$ ' dir (R faktör = 0.016).



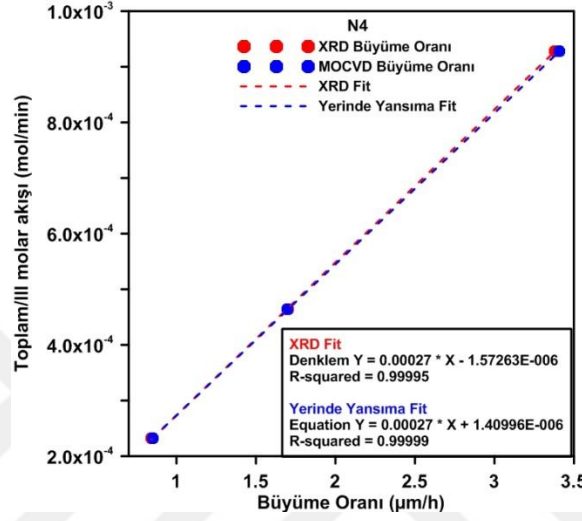
Şekil 5.9 N1 numaralı numuneye ait HR-XRD ölçüm sonuçları

Çizelge 5.6 N1 numaralı örneğe ait XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

Numune İsmi	Tabaka İsmi	Kalınlık (nm)	Al içeriği (%)
N4	GaAs tampon Tabaka	250	
	AlGaAs ara Tabaka	121	24
	GaAs1	563	
	AlGaAs ara Tabaka	126	24
	GaAs2	568	
	AlGaAs ara Tabaka	121	24
	GaAs3	562	
	AlGaAs ara Tabaka	114	24

N4 numaralı örnekteki her bir GaAs katmanı için yerinde yansıma ölçümü ve XRD ölçümü sonucunda belirlenen büyüme oranı değerleri birbirinin neredeyse aynısıdır. Her bir katman için büyüme oranına karşılık reaktöre giren toplam gaz akışının, reaktöre giren toplam III molar akışına oranından elde edilen verilere lineer fit yapılarak TMGa akışının büyüme oranına etkisi hem yerinde yansıma eğrisinden hem de XRD ölçüm sonuçlarından elde edilen

büyütme oranları kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5.10). Daha sonra yapılacak olan tabakalar arasında gaz akışlarının hızlı değişiminin gerektiği çok katmanlı büyütmelerde bu eğriden yararlanılarak reaktöre gönderilecek olan gaz miktarı ve büyütme süreleri hesaplanmıştır.

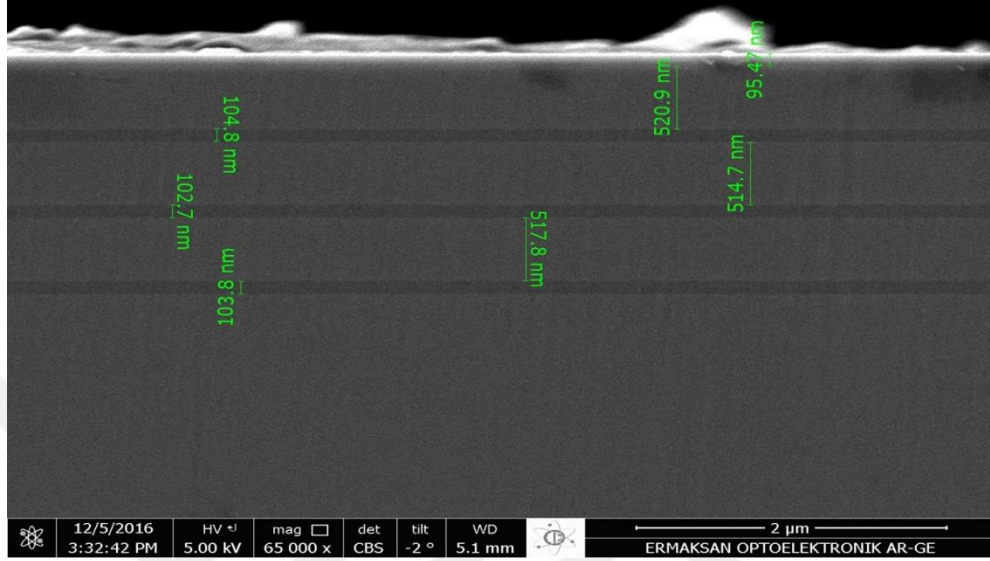


**Şekil 5.10** N4 numaralı örnek için hem yerinde yansıma hem de XRD ölçümü kullanılarak belirlenen büyüme oranı değişimine karşı Toplam/III molar akışının değişimi

Numunenin büyütme oranı yan kesitten alınan (cross-sectional) SEM mikroskobu görüntüleri kullanılarak da belirlendi (Şekil 5.11). SEM ölçümleri N4 numaralı örnekten elmas uçlu kalem kullanılarak kesilen  $0.5 \times 10 \text{ mm}^2$  lik parça üzerine herhangi bir metal kaplama işlemi yapılmadan uygulandı. Ölçüm alınırken 5kV ile hızlandırılmış elektron demeti numune üzerine gönderildi. SEM ölçüm sonuçlarına bakıldığında numune boyunca tabaka kalınlık değerinde herhangi bir varyasyonun olmadığı, katmanlar arasındaki ara yüzeylerin iyi tanımlanabildiği ve ara yüzey geçişlerinin pürüzsüz (keskin) olduğu görülmüştür. Farklı materyal gruplarından oluşan tabakalar arasında gözlemlenen belirgin renk kontrastından yararlanılarak GaAs tabakalarının kalınlıkları belirlendi. Ölçülen GaAs tabakalarının kalınlıkları tabaka büyütme süresine bölünerek her bir GaAs katmanının büyütme oranı belirlenmiştir. GaAs<sub>1</sub>, GaAs<sub>2</sub> ve GaAs<sub>3</sub> katmanları için SEM ölçümünden belirlenen büyütme oranları sırasıyla 3.11 µm, 1.55 µm, 0.78 µm. SEM ölçümü sonucunda belirlenen büyüme oranı değerleri XRD ve yerinde yansıma ölçümleriyle belirlenen büyüme oranlarına oldukça yakındır. Büyütme oranları arasındaki küçük farkın numune üzerine



metal kaplama işlemi uygulanmadığı için yüzeyde oluşan parlamadan ve ölçümleri alan kişinin göz yanılmasıyla kaynaklandığı düşünülmektedir.

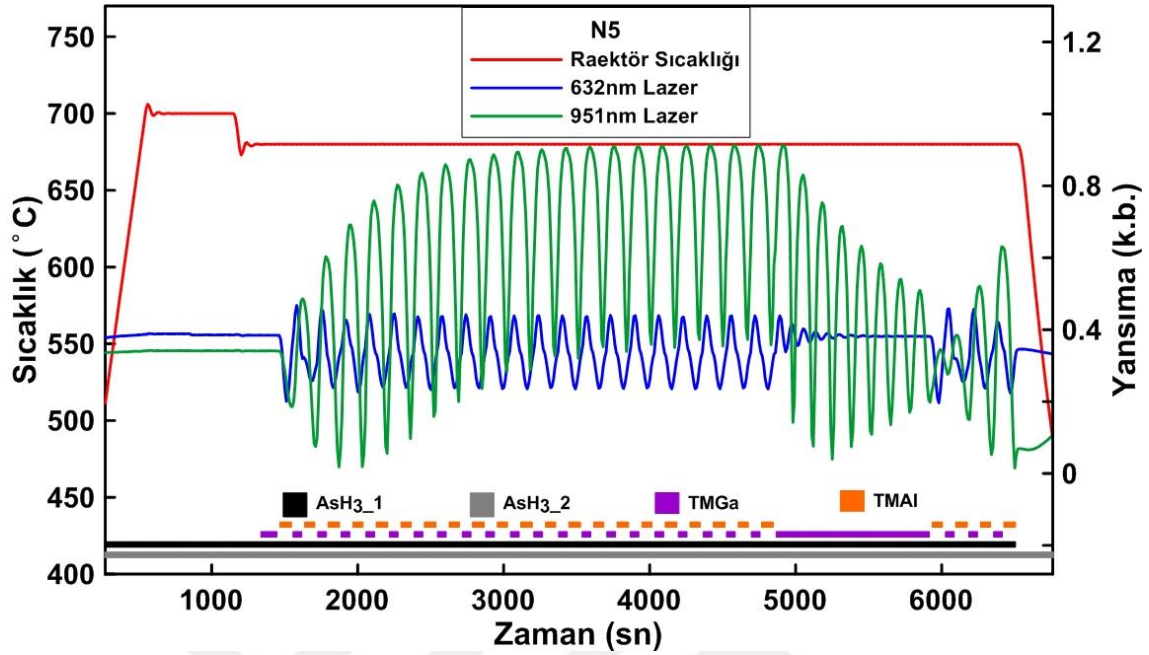


Şekil 5.11 N4 numaralı örneğe ait SEM ölçüm sonucu

### 5.1.3 GaAs/AlAs Yapısı için Ara Yüzey Keskinliği Belirleme

Tabaka geçişleri arasındaki 5 saniyelik stabilizasyon sürecinin, reaktöre gönderilen toplam gaz akışının ve numune üzerindeki homojenliği sağlamak için döndürülen alttaşın dönme hızının keskin ara yüzeyler oluşturmak amacıyla yeterli olup olmadığını görmek için N5 numaralı numune büyütülmüştür. N5 numaralı numune büyütülürken GaAs alttaş üzerine 20 tekrar GaAs/AlAs tabakasından oluşan Bragg aynaları büyütülmüştür. Bragg aynalarının üzerine yaklaşık 984.7 nm kalınlığında bir kovuk (cavity) ve onun da üzerine 3 tekrardan oluşan GaAs/AlAs tekrarlı katmanı büyütülmüştür. Numuneye ait büyütme parametreleri Çizelge 5.7 ve büyütme esnasında yerinde yansıma ölçümünden elde edilen yansıma eğrileri Şekil 5.12’ de mevcuttur. 632 nm dalga boylu lazer kullanılarak yerinde yansıma ölçümü sonunda gözlenen yansıma eğrisinde herhangi bir düşmenin olmaması bize büyütmenin oldukça düzgün gittiğini göstermektedir.



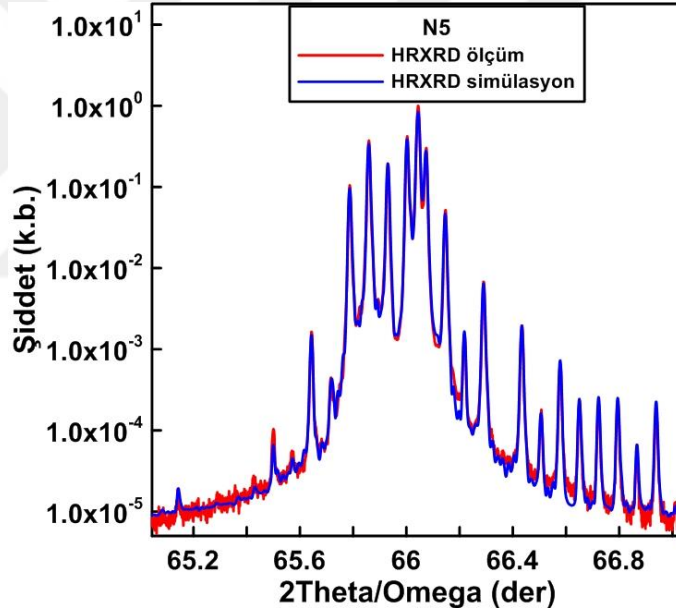


Şekil 5.12 N5 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

Çizelge 5.7 N5 numaralı örneğe ait MOCVD büyütme parametreleri

Numun	Tabaka İsmi	Büyütme Süresi (dk)	Reaktör Sıcaklığı (°C)	AsH <sub>3</sub> Molar Akışı (µmol/min)	TMGa Molar Akışı (µmol/min)	TMAI Molar Akışı (µmol/min)	V/III Oranı	Reaktör Basıncı (mbar)
N5	Oksit Kaldırma	10	700	44600			48	50
	GaAs tampon tabaka	5	680	44600	928		48	50
	AlAs	2	680	44600		934	48	50
	GaAs DBRx20	10	680	44600	928		48	50
	AlAs DBRx20	2	680	44600		934	48	50
	GaAs kavite	20	680	44600	928		96	50
	AlAs			44600		934		
	GaAs DBRx3	2	680	44600	928		48	50
	AlAs3 DBRx3	40	680	44600		934	192	50

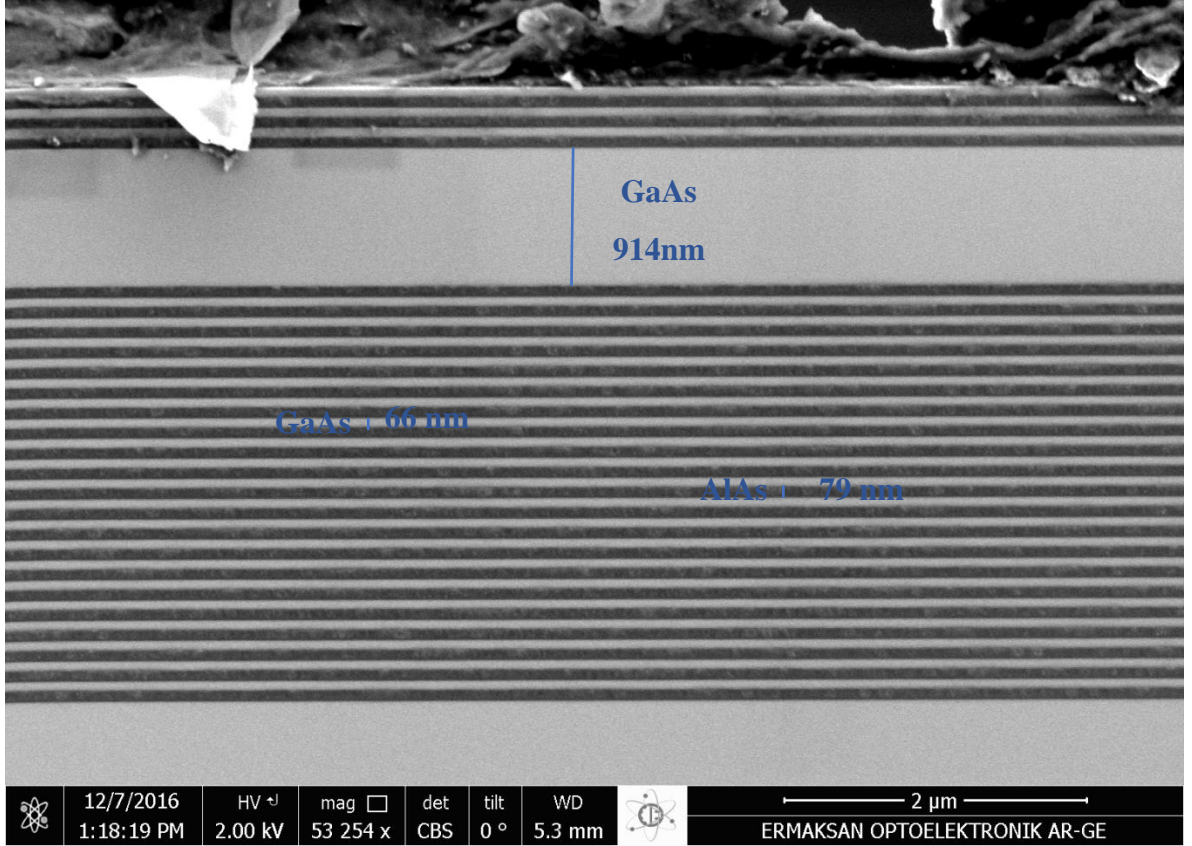
Şekil 5.13 katkısız 20 tekrar alt DBR GaAs/AlAs, GaAs kovuk ve 3 tekrar üst DBR' dan oluşan ara yüzey keskinliğini belirlemek için büyütülmüş N5 numaralı örneğin HRXRD ölçüm (kırmızı) ve ölçüm eğrisi ile hemen hemen üst üste oturmuş olan simülasyon (mavi) sonuçlarını göstermektedir (R faktör 0.025). Yapılan HRXRD ölçümü sonucunda çok yüksek şiddetli süper örgü piklerinin olduğu, bu piklerin periyodik, keskin, belirgin ve oldukça dar bir yapıya görülmektedir. Tüm bu özellikler büyütülen yapının oldukça iyi bir kristal kalitesine sahip olduğunu, ara yüzeylerin oldukça keskin olduğunu ve aynaları oluşturan GaAs/AlAs süperörgü tabakalarının tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Ölçüme uygulanan simülasyon sonuçlarında belirlenen tabaka kalınlıkları üst ve alt DBR yapısındaki GaAs ve AlAs katmanları için sırasıyla 66 ve 80 nm' dir. GaAs kovuk için ise 984 nm' dir.



Şekil 5.13 N5 numaralı numuneye ait HR-XRD ölçüm sonuçları

N5 numaralı numuneden kesilen  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  lik parçanın yan kesitinden alınan (cross-sectional) SEM mikroskobu görüntüleri kullanılarak ara yüzey keskinliği incelenmiştir (Şekil 5.14). Ölçüm alınırken 2kV ile hızlandırılmış elektron demeti numune üzerine gönderilmiştir ve numuneden saçılan elektronlardan CBS dedektör kullanılarak algılanmıştır. SEM ölçüm sonuçları incelendiğinde katmanlar arasındaki ara yüzeylerin oldukça keskin olduğu, numune boyunca tabaka kalınlıklarında herhangi bir değişimin olmadığı görülmektedir. Ara yüzeylerin keskin olması ve numune boyunca tekrarlayan tabaka kalınlıklarında farkın gözlenmemesi bize reaktöre gönderilen toplam gaz miktarının, alttaşın dönme hızının ve

tabaka geçişleri arasındaki bekleme süresinin ideal olduğunu göstermektedir. Her bir tabakanın kalınlığı renk farkının belirgin olması ve ara yüzeylerin oldukça keskin olmasından dolayı doğru bir şekilde ölçüldü. GaAs/AlAs DBR yapısı için belirlenen kalınlık değerleri GaAs ve AlAs tabakaları için sırasıyla 66nm ve 79nm' dir (Şekil 5.14). GaAs kovuk tabakası için ise belirlenen kalınlık değeri 914nm' dir.



Şekil 5.14 N5 numaralı örneğe ait SEM ölçüm sonucu

## 5.2 p-tipi Katkılı GaAs Büyütülmesi

MOCVD veya MBE gibi epitaksiyel tabaka büyütme yöntemlerinde III-V grubu yarıiletkenlerde p tipi katkı malzemesi olarak berilyum (Be) (Kim, 2006), çinko (Zn) (Nelson, 1984), kadmiyum (Cd) (Nelson, 1984) ve magnezyum (Mg) (Timmons, 1986) gibi çeşitli materyal grupları kullanılmaktadır. Ancak MOCVD büyütme yönteminde p-tipi katkı malzemesi olarak kullanılan Zn ve Mg gibi katkı malzemeleri ile MBE yönteminde p tipi katkı malzemesi olarak kullanılan Be yüksek difüzyon katsayısına sahip olan ve hafıza etkisi

(memory effect) gösteren malzemelerdir (Cunningham, 1989; Kim S.-I. , 1993). Bu malzemeler kullanılarak yapılan katkılama çalışmalarında reaktör çeperleri tarafından bu katkı malzemeleri soğurular ve daha sonraki büyütmelerde reaktörün çeperdeki katkı atomlarının kusması sonucu herhangi bir katkılayıcı öncül kullanılmamasına rağmen büyütülen tabakalara katkı atomlarının girmesine neden olur ve bu da hafıza etkisi olarak adlandırılır.

Son zamanlarda karbonun (C) ve optik özellikleri mikro-elektronik ve opto-elektronik uygulamalar için uygun olduğundan dolayı p-tipi katkı malzemesi olarak GaAs, AlGaAs ve InGaAs (Peng, 2015) malzemelerinin p-tipi katkılanması yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbonun p-tipi katkı malzemesi olarak kullanıldığı uygulamalardan bazıları şunlardır; iki boyutlu elektron gazının kullanıldığı HEMT (high electron mobility transistor) (Yang, 1992) ve HBT (heterojunction bipolar transistor) yapıları (Ren, 1992), yarı iletken lazer diyot (Micovic, 1994; Zorn, 2003) ve güneş pili (Kim C. , 2010) gibi optoelektronik cihaz uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra aktivasyon enerjisinin düşük olması ( $\sim 26\text{meV}$ ) (Richter, 1995), difüzyon katsayısının düşük olması (C katkılı GaAs için  $900^\circ\text{C}$  de yaklaşık  $6\text{E}-15\text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ ) (Tateno, 1997), hafıza etkisinin az olması (Cunningham, 1989) ve yüksek katı çözünürlüğünün (high solid solubility) düşük olması (Kuech, 1988) gibi nedenlerden dolayı da yaygın olarak kullanılır.

p-tipi kontak tabakası olarak kullanılan p-GaAs üzerine ohmik kontak için yaklaşık  $10^{19}$ -  $10^{20}\text{ cm}^{-3}$  civarında yüksek katkı konsantrasyonu gerekmektedir. Bir akseptör olarak C aktivitesinin doygunluğa ulaşması hem grup III' deki C'nin artmasına hem de hidrojen pasifleştirme etkisine neden olduğu bilinmektedir (Tateno, 1997; Kozuch, 1993; Hou, 1997; Cunningham, 1990). Ayrıca  $10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ' dan daha yüksek katkı seviyelerine çıkıldığında yüzey üzerinde bozulmaların gerçekleştiği ve tepeciklerin oluştuğu bilinmektedir (Tateno, 1997).

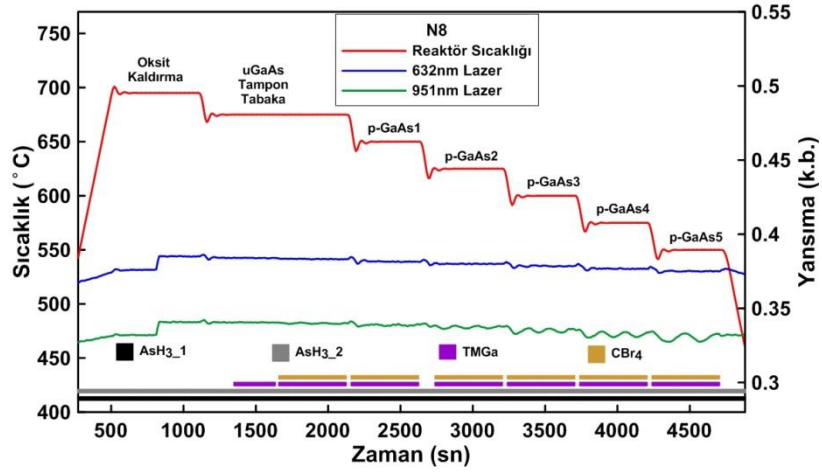
Karbon katkılamada çalışmalarında en önemli durum kendiliğinden katkılama olarak bilinen, kullanılan öncüllerden (Timmons, 1986; Yang, 1992; Cunningham, 1990) kaynaklı etkiden kaçınmaktır. GaAs yapısı büyütülürken TMGa öncüllerinden gelen karbon atomunun örgüye yerleşmesiyle oluşur. Normal büyütme koşulları altında karbon atomları büyük ihtimal ile V grubu malzemesi olan  $\text{AsH}_3$ ' den kaynaklanan atomik hidrojenin varlığından dolayı hidrojenizasyon ile yüzeyden uzaklaştırılır. V/III oranı ve sıcaklığın düşürülmesiyle

hidrojenizasyon baskılanır ve malzeme karbon ile katkılanır (Timmons, 1986; Yang, 1992). Bahsetmiş olduğumuz tüm bu özelliklerden dolayı MOCVD yöntemi ile büyütülen karbon katkılı GaAs malzemesinde yüksek katkı seviyelerine çıkmak için tipik olarak üç farklı yöntem kullanılır. Bunlardan birincisi grup-III ve grup-V kaynaklarındaki alkil radikallerini kullanarak V/III oranını değiştirmektir (Kim S.-I. , 1993; Pristovsek, 2000; Kuech, 1988; Richter, 1995). İkincisi CBr<sub>4</sub> veya CCl<sub>4</sub> gibi halometan akışını değiştirmektir (Tateno, 1997). Üçüncüsü ise büyütme sıcaklığını değiştirmektir (Tateno, 1997; Kuech, 1988; Richter, 1995; Hou, 1997; Pristovsek, 2000). Biz bu çalışmada her üç yöntemi de kullanarak C katkılı p-GaAs katmanları elde ettik.

### 5.2.1 MOCVD Büyütme Yöntemi ile p-GaAs Katkılama Çalışmaları

GaAs tabakasının p-tipi katkılanması üzerine AsH<sub>3</sub>, CBr<sub>4</sub> ve sıcaklık değişiminin etkisini gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilen tüm büyütmelemlerde reaktör basıncı 50mbar' da sabit tutulmuştur. Trimetil Galyum (TMGa), Arsin (AsH<sub>3</sub>) ve Karbon Tetra Bromür (CBr<sub>4</sub>) öncül olarak kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak -110°C nemlilik noktasında (dew point) olan paladyum saflaştırıcı içerisinden geçirilmiş hidrojen gazı kullanılmıştır. GaAs alttaş reaktöre yerleştirildikten sonra, reaktör sıcaklığı yavaş bir şekilde 1 (C° /s) artırılarak 700°C' ye çıkarılmıştır. Isıtılan GaAs alttaş 700°C' de 10 dakika bekletilerek yüzeydeki oksit tabakası kaldırılarak alttaş yüzeyi büyütmeğe hazırlanır. Bu süreç oksit kaldırma/kusturma (desorption) olarak adlandırılmaktadır. Oksit kaldırma sürecinden sonra sıcaklık 675°C' ye düşürülerek tampon tabaka büyütmesine başlamak için reaktöre TMGa ve AsH<sub>3</sub> akışı sağlanır. Tüm p-tipi katkılama çalışmalarında tampon tabaka olarak GaAs büyütülürken kullanılan V/III oranı 53.5 ve büyütme süresi 2 dakikadır. Tampon tabaka büyütmesi tamamlandıktan sonra farklı AsH<sub>3</sub>, CBr<sub>4</sub> akışları ve sıcaklık değerleri kullanılarak p tipi GaAs katmanları büyütülmüştür. Bu tez çalışmasında p-GaAs katkılama üzerine büyütme parametrelerinin etkisinin incelenmesi çalışmasında büyütülen N6, N7 ve N8 numaralı üç farklı örnekten bahsedilecektir. Şekil 5.15' de p-GaAs katkılama çalışmasında büyütülen numunelerden N8 numaralı numuneye ait yerinde yansıma ölçüm sonucu verilmiştir. Bu numune büyütülürken aynı akış parametreleri kullanılarak 6 farklı sıcaklık değerinde p-GaAs katmanı büyütülmüştür. Katmanların büyütülmesi ile ilgili detaylardan 'sıcaklık değişiminin

GaAs tabakasını p-tipi katkılama üzerine etkisi' başlığı altında bahsedilecektir. Yerde yansıma ölçümünden de görüldüğü gibi reaktör sıcaklığı, örnek yüzeyindeki yansımadan ölçülen EpiTT sıcaklığı ve büyütülen malzeme üzerine gönderilen lazer ışığının malzemedeki yayılma özelliği dikkate alınarak hesaplanan doğrultulmuş sıcaklık olmak üzere üç farklı yöntemle numunelerin büyütme esnasındaki sıcaklıkları kontrol edilmektedir. 632 ve 951nm dalga boylu lazerler kullanılarak alınan yerde yansıma ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5.15' deki turuncu ve mavi renkli eğrilerdir. Şekil 5.15' deki yerde yansıma ölçüm sonuçlarından da görüldüğü gibi GaAs alttaş üzerine GaAs tampon tabaka büyütmesinde numune üzerine büyütülen katmanlar arasında herhangi bir kırılma indisi değişimi olmadığı için yansıma eğrilerinde osilasyonlar yoktur. Ancak p tipi katkılama tabakalarına geçildiğinde büyütülen katmanlar arasında katkılamaya bağlı olarak kırılma indisi değişimi olduğu için yansıma şiddetlerinde azalma ve genliği düşük osilasyonlar görülmektedir. Bu etki 951nm dalga boylu lazer kullanılarak alınan yerde yansıma ölçüm sonucunda daha da belirgindir. p-GaAs katmanlarının büyütmesi tamamlandıktan sonra da sıcaklık yavaş bir şekilde 1 (°C /s) azaltılarak örnek yüzeyindeki herhangi bir kırılma veya çatlama (crack) olması engellenir.

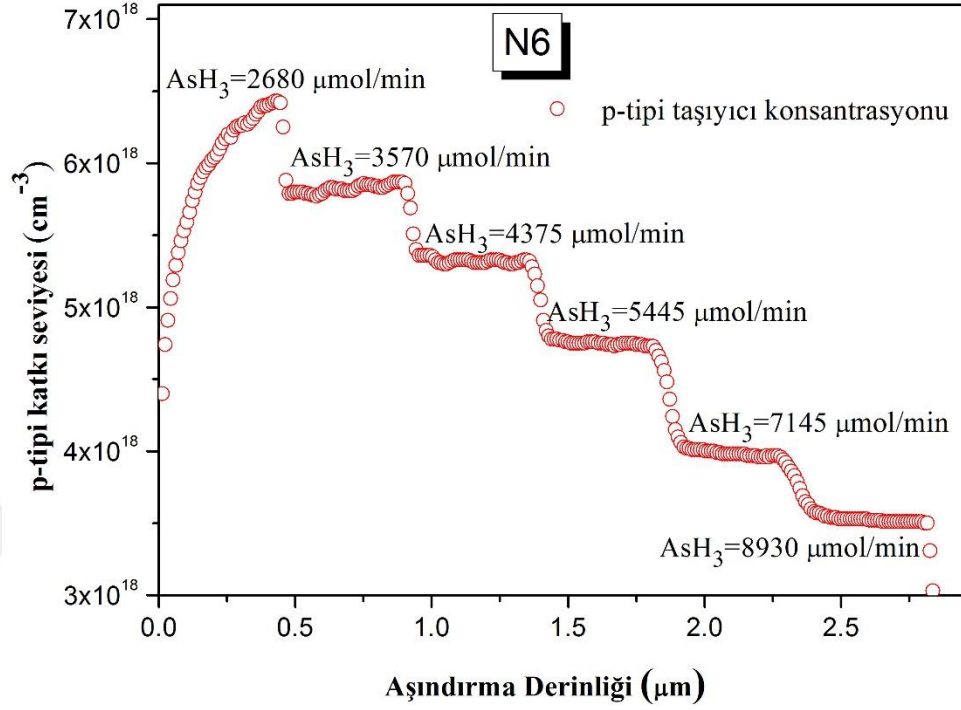


**Şekil 5.15** p-GaAs katkılama çalışması kapsamında büyütülen N8 numaralı örneğe ait yerde yansıma ölçüm sonucu

### 5.2.1.1 GaAs Tabakasının p-tipi Katkılanmasında AsH<sub>3</sub> Akış Değişiminin Etkisi

AsH<sub>3</sub> akış değişimini p-GaAs katılama çalışması üzerine etkisini görmek için yapılan büyütme çalışmalarında alttaş ısıtma, oksit kaldırma, tampon tabaka büyütme ve numune soğutma adımları ‘MOCVD Büyütme Yöntemi ile p-GaAs katılama Çalışmaları’ başlığında bahsedildiği gibi uygulanmıştır. AsH<sub>3</sub> akışının p-GaAs katılama çalışması üzerine etkisini görmek için reaktör sıcaklığı 675°C, CBr<sub>4</sub> akışı ise 48 µmol/min’ de sabit tutulmuştur. TMGa akışı 840 µmol/min iken AsH<sub>3</sub> akışı azaltılarak V/III oranının 10.7’ den 3.2’ ye kadar düşmesi sağlanmıştır ve her bir p-GaAs katmanı 8 dakikalık süre zarfında büyütülmüştür. Büyütülen 6 farklı düzeyde p tipi katkılı katman için kullanılan AsH<sub>3</sub> akış değerleri sırasıyla 8930µmol/min, 7145µmol/min, 5445µmol/min, 4375µmol/min, 3570µmol/min ve 2680µmol/min’dir.

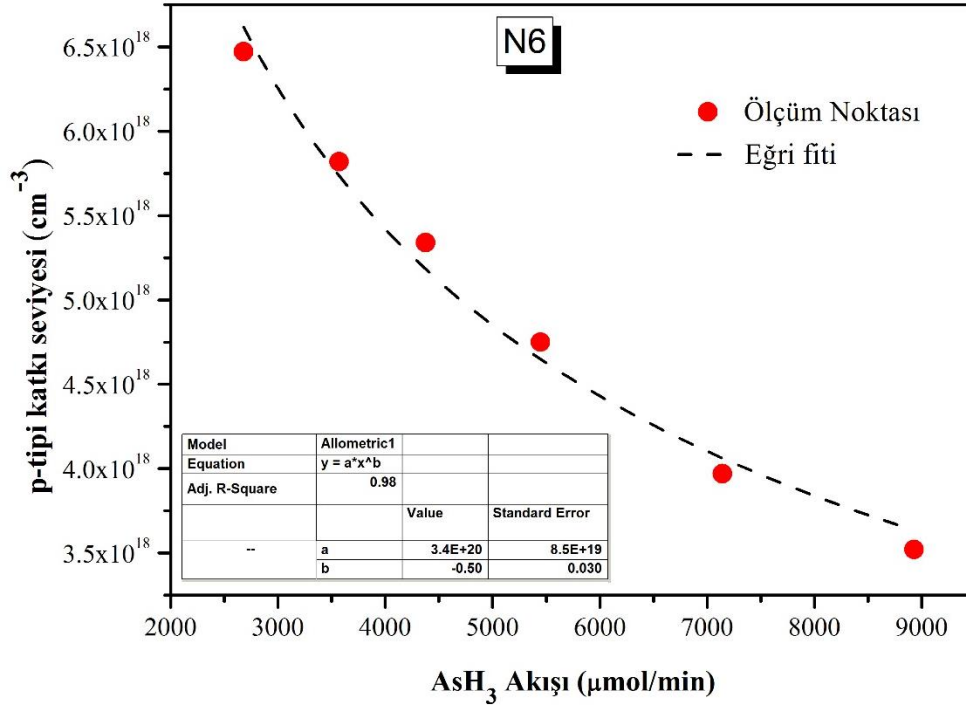
Numune büyütmesi tamamlandıktan sonra büyütülen her bir katmanın tabaka taşıyıcı konsantrasyonunu belirlemek için ECV ölçüm yöntemi kullanılmıştır. ECV ölçümü alınırken de-iyonize su ile hazırlanmış 0.1M (33.2 g/lt) tiron çözeltisi hazırlanmıştır ve ölçümler 2nm adım hassasiyeti ile alınmıştır. Şekil 5.16’ da AsH<sub>3</sub> akış değişiminin GaAs tabakasını p-tipi katılama üzerine etkisini gösteren aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonunun verildiği ECV ölçüm sonuçları verilmiştir.



**Şekil 5.16** AsH<sub>3</sub> akış değişiminin GaAs tabakasını p-tipi katkılama üzerine etkisini gösteren ECV ölçüm sonuçları

Şekil 5.17’ de verilen AsH<sub>3</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişim grafiği N6 numaralı örnek üzerine uygulanan ECV ölçümü sonucunda elde edilen veriler ve bu veriler üzerine uygulanan eğri fiti sonuçlarını göstermektedir. Eğri fiti p tipi katkı seviyesinin AsH<sub>3</sub> akışına bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla uygulanmıştır ve yapılan fit sonucunda p tipi katkı seviyesinin AsH<sub>3</sub> molar akışının tersinin karekökü ile orantılı olduğu başka bir ifade ile  $[AsH_3]^{-0.5}$  ile orantılı olduğu görülmüştür.



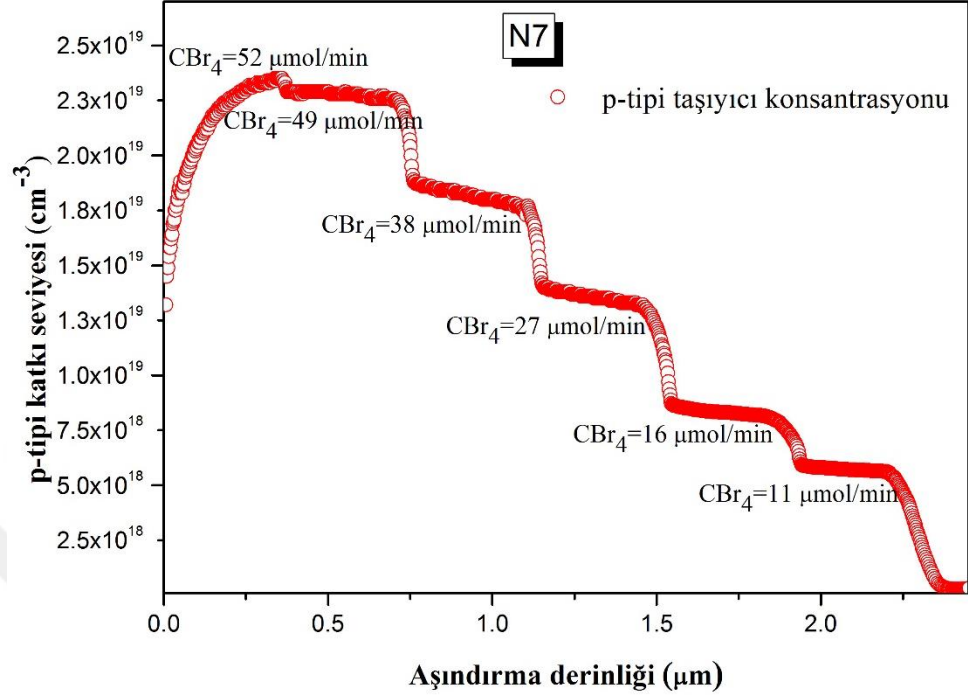


Şekil 5.17 AsH<sub>3</sub> akışına karşı p-GaAs taşıyıcı konsantrasyonunun değişimi

### 5.2.1.2 CBr<sub>4</sub> Akış Değişiminin GaAs Tabakasını p-tipi Katkılamaya Üzerine Etkisi

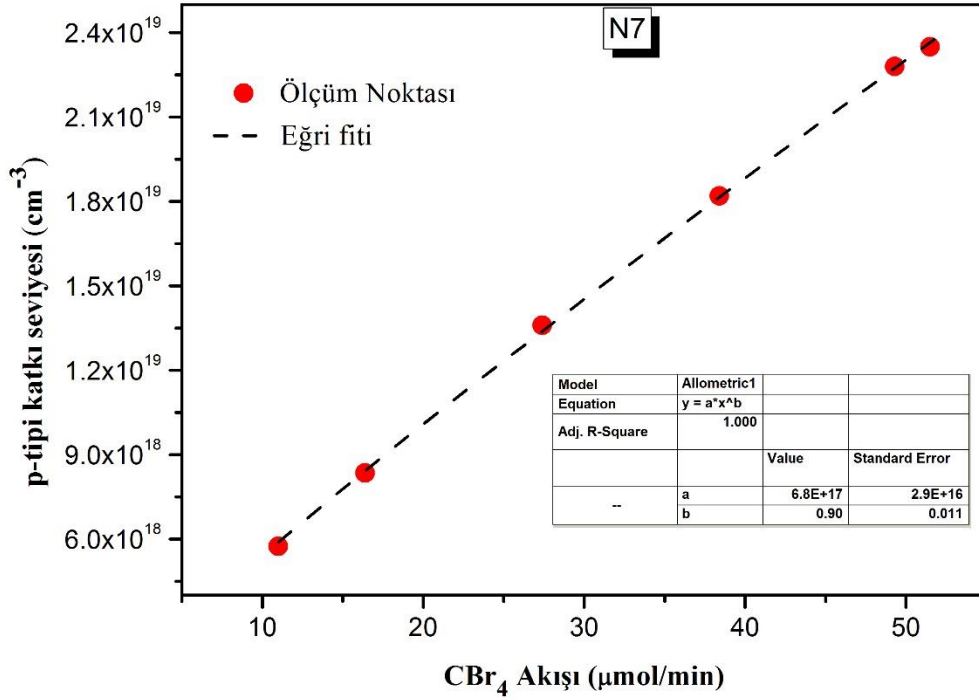
CBr<sub>4</sub> akışının p-GaAs katkılama çalışması üzerine etkisini görmek için N7 numaralı örnek büyütülmüştür. Bu örnek büyütülürken reaktör sıcaklığı 675°C' de, V/III oranı ise 11'de sabit tutulurken; CBr<sub>4</sub> akışı değiştirilerek 6 farklı p-tipi katkı seviyesine sahip GaAs katmanı basamaklı şekilde elde edilmiştir. Her bir katmanı büyütme için kullanılan CBr<sub>4</sub> akış değerleri sırasıyla; 52 µmol/min, 49 µmol/min, 38 µmol/min, 27 µmol/min, 16 µmol/min ve 11 µmol/min'dir. Her bir farklı katkı seviyeli GaAs tabakasının büyütme süresi ise 8 dakikadır.

Numune büyütmesi tamamlandıktan sonra büyütülen her bir katmanın tabaka taşıyıcı konsantrasyonu 0.2M EDTA çözeltisi kullanılarak ECV ölçüm yöntemi ile belirlenmiştir. Şekil 4.18' de CBr<sub>4</sub> akış değişiminin p-GaAs tabakası üzerine etkisini gösteren aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonunun belirlendiği ECV ölçüm sonucu mevcuttur.



**Şekil 5.18** CBr<sub>4</sub> akış değişiminin GaAs tabakasını p-tipi katkılama üzerine etkisini gösteren ECV ölçüm sonuçları

Şekil 5.19’de N7 numaralı örnek üzerine uygulanan ECV ölçümü sonucunda belirlenmiş CBr<sub>4</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişim grafiği ve bu grafik üzerine uygulanan eğri fiti sonuçları verilmiştir. Elde edilen eğri fiti sonucunda karbon akışına bağlı olarak hol konsantrasyonunun  $[CBr_4]^{0.9}$  ile orantılı olduğunu göstermektedir. Bu sonuç bize p-GaAs tabakasındaki hol konsantrasyonunun büyütmede kullanılan karbon akışı ile neredeyse lineer bir şekilde arttığını göstermektedir.

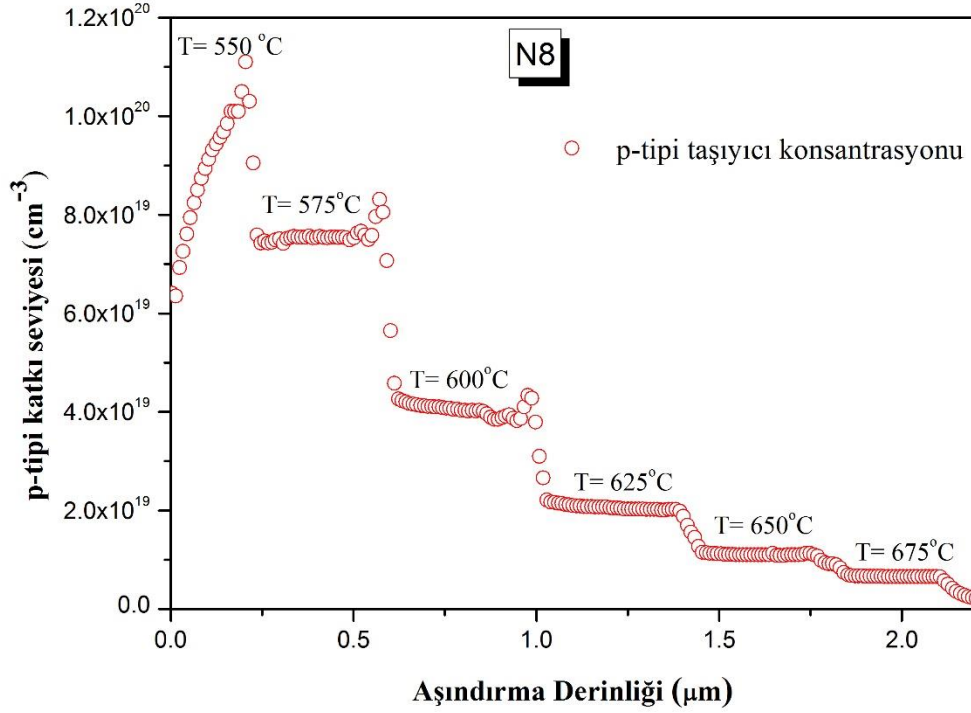


Şekil 5.19 CBr<sub>4</sub> akışına karşı p-GaAs taşıyıcı konsantrasyonunun değişimi

### 5.2.1.3 GaAs Tabakasının p-tipi Katkılanmasında Sıcaklık Değişiminin Etkisi

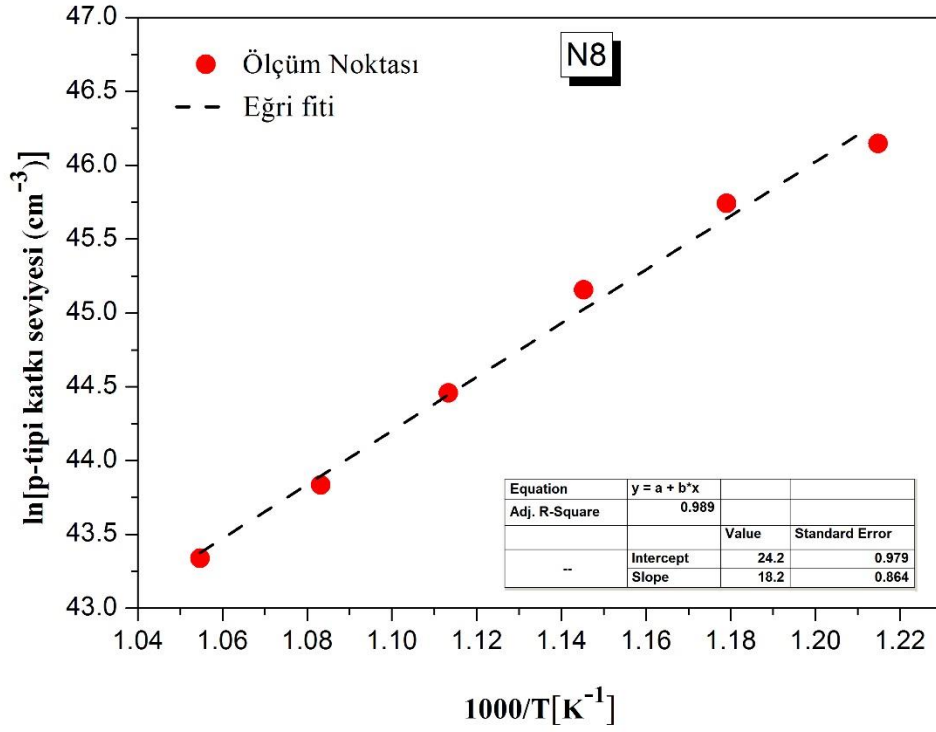
Büyütme sıcaklığındaki değişimin GaAs tabakasını p tipi katkılanması üzerine nasıl bir etkisinin olduğunu gözlemlemek için AsH<sub>3</sub>, TMGa ve CBr<sub>4</sub> akışı sabit tutularak N8 numaralı örnek büyütülmüştür. N8 numaralı örnek büyütülürken AsH<sub>3</sub> akışı 2680 µmol/min, TMGa akışı 840 µmol/min ve CBr<sub>4</sub> akışı ise 48 µmol/min değerinde tutulmuştur. MOCVD reaktörünün sıcaklığı ise 675°C' den başlayarak 550°C' ye kadar 25 °C aralıklarla düşürülmüştür. Numune büyütmesi tamamlandıktan sonra büyütülen her bir katmanın tabaka taşıyıcı konsantrasyonu ECV ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

0.2M EDTA çözeltisi kullanılarak N8 numaralı örneğin ECV ölçümü alınmıştır. Şekil 5.20' de reaktör sıcaklığındaki değişimin p-GaAs tabakası katkılama üzerine etkisini gösteren aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonunun verildiği ECV ölçüm sonuçları mevcuttur.



**Şekil 5.20** Reaktör sıcaklığındaki değişimin GaAs tabakasını p-tipi katkılama üzerine etkisini gösteren ECV ölçüm sonuçları

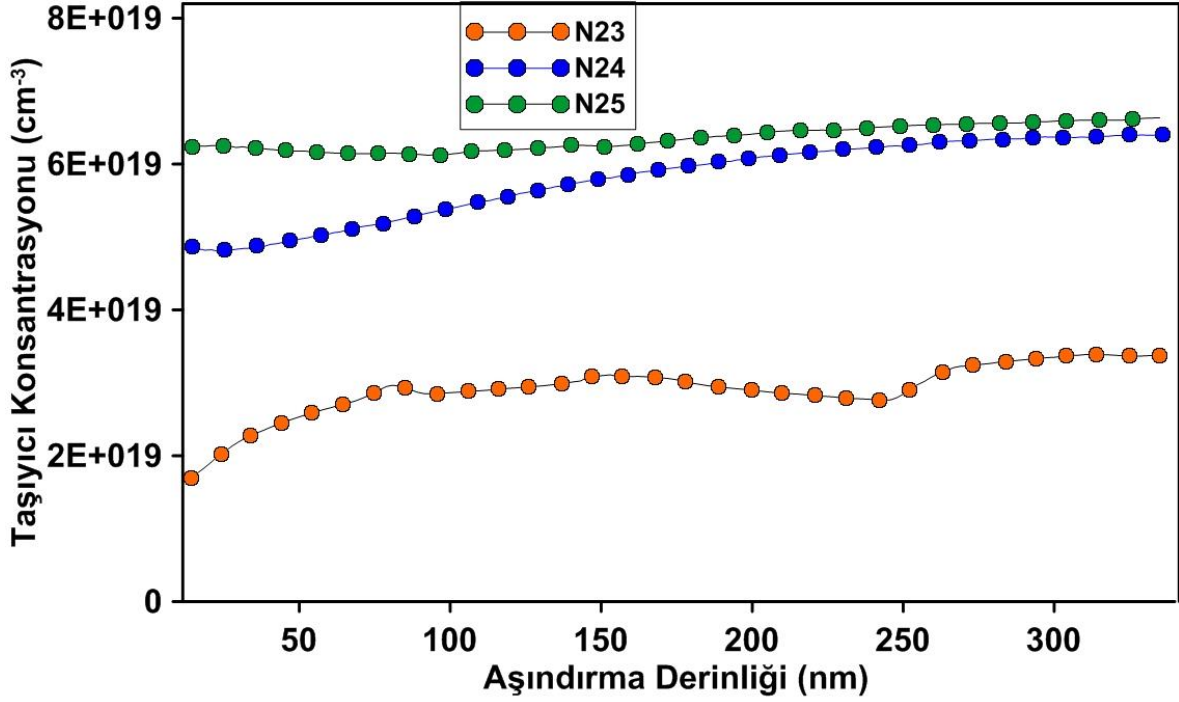
Şekil 5.21’ de reaktör sıcaklığına bağlı olarak GaAs tabakasının p tipi katkı seviyesi değişim grafiği; N8 numaralı örnek üzerine uygulanan ECV ölçümü sonucunda elde edilen veriler kullanılarak çizilmiş ve bu grafik üzerine lineer eğri fiti uygulanarak GaAs tabakası için p-tipi katkı seviyesinin reaktör sıcaklığına bağlılığı belirlenmiştir. Yapılan eğri fiti sonuçları büyütme esnasında kullanılan logaritmik p tipi katkı seviyesinin, reaktör sıcaklığının tersi ( $1/T$ ) ile lineer orantılı olduğunu göstermektedir.



**Şekil 5.21** Reaktör sıcaklığındaki değişimin p-GaAs taşıyıcı konsantrasyonu üzerine etkisi

### 5.2.2 MOCVD Büyütme Yöntemi ile p-GaAs Soğutma Çalışması

Şekil 5.22’ de verilen aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonu ölçümünden de açıkça görüldüğü gibi p-GaAs katmanlarının AsH<sub>3</sub> akışı altında soğutulması esnasında taşıyıcı konsantrasyonunda bir azalma gözlenmektedir. Bu sorun büyütme işlemi bittikten sonra numunenin soğması esnasında reaktöre AsH<sub>3</sub> akışının yanı sıra CBr<sub>4</sub> akışının da sağlanmasıyla giderilmiştir. Şekil 5.22’de reaktöre sadece AsH<sub>3</sub> akışı altında soğutulan N23 numaralı numune ile AsH<sub>3</sub> akışının yanısıra CBr<sub>4</sub> akışının sırasıyla 16.4 µmol/min ve 24.7µmol/min olarak değiştirildiği sırasıyla N24 ve N25 numaralı örneklerin aşındırma derinliğine bağlı olarak taşıyıcı konsantrasyonlarının ölçüm sonuçları mevcuttur.

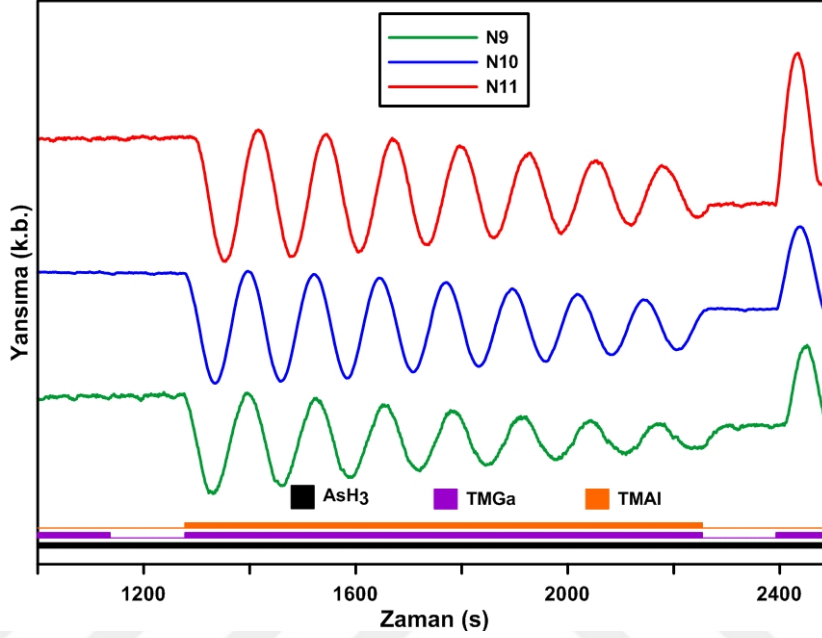


Şekil 5.22 N23, N24 ve N25 numaralı örneklerin aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonu değişimi

### 5.3 Katkısız $Al_xGa_{1-x}As$ Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

9xx-10xx nm dalga boyu aralığında ışık yayan lazer diyot yapılarında dalga kılavuzu ve kılıf tabakasında kullanılacak olan farklı alüminyum içerikli  $Al_xGa_{1-x}As$  katmanlarının MOCVD büyütme parametrelerini belirlemek amacıyla N9, N10 ve N11 numaralı üç farklı katkısız  $Al_xGa_{1-x}As$  numunesi büyütülmüştür. Bu örnekler büyütülürken öncül olarak TMAI, TMGa ve  $AsH_3$  kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak da oldukça yüksek saflıkta hidrojen gazı kullanılmıştır. Numuneler büyütülürken TMAI akışı hariç; büyütme sıcaklığı, reaktör basıncı, toplam reaktöre giren gaz akışları gibi diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur.  $Al_xGa_{1-x}As$  tek tabaka çalışmaları yapılırken büyütme esnasında uygulanan reaktör sıcaklığı, reaktör basıncı, alttaş dönme hızı,  $AsH_3$  akışı ve TMGa akışı sırasıyla; 670 °C, 50 mbar, 60 rpm, 44600  $\mu\text{mol}/\text{min}$  ve 742  $\mu\text{mol}/\text{min}$ ' dir. N9, N10 ve N11 numaralı örneklerin büyütmesinde kullanılan TMAI akışları ise sırasıyla 405  $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 284  $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 173  $\mu\text{mol}/\text{min}$ ' dir. Büyütmeler esnasında her bir örneğin kalınlığı yerinde yansıma eğrisi kullanılarak belirlenmiştir, büyütülen her bir  $Al_xGa_{1-x}As$  yapısının kalınlığı  $\sim 1\mu\text{m}$  olarak

belirlenmiştir (Şekil 5.23). AlGaAs büyütmesi tamamlandıktan sonra numuneler üzerine 100 nm kalınlığında GaAs koruyucu tabaka büyütülerek ölçümler esnasında örneklerde oluşabilecek olan oksitlenmenin önüne geçilmiştir.

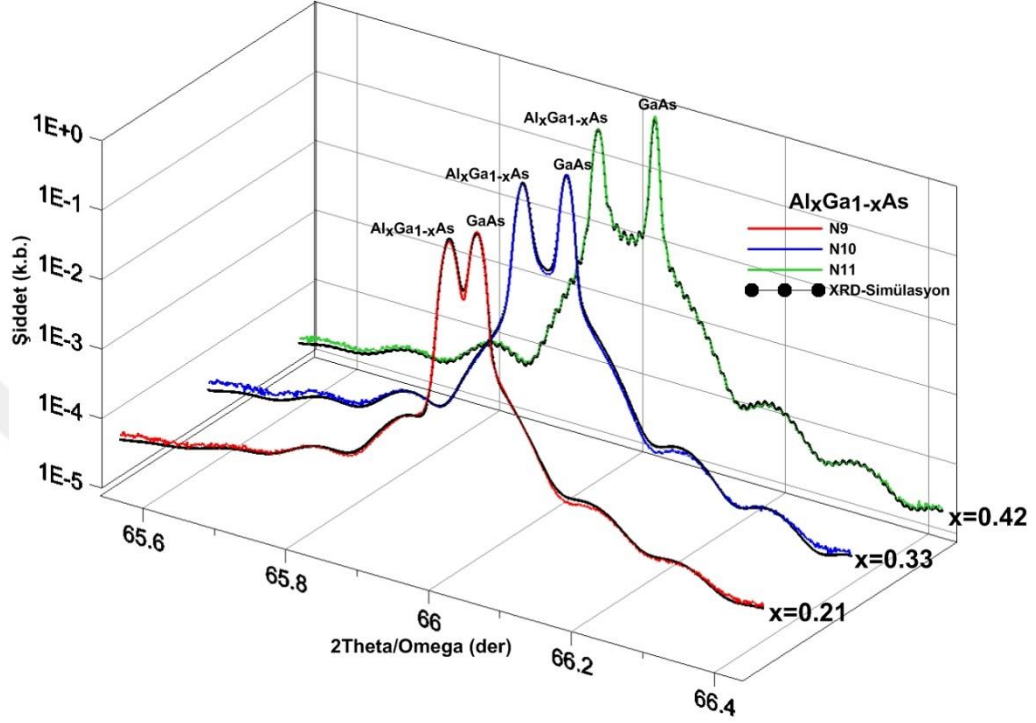


Şekil 5.23 N4 numaralı örneğe ait yerinde yansımalar (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırımı) eğrileri

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi lazer ışığını aktif bölgede sınırlamak için kılıf ya da yelek katmanında kullanılacak materyalin kırılma indisinin aktif bölgeden küçük olması yani enerji bant aralığının aktif bölgede kullanılacak olan yapıdan daha büyük olması gerekmektedir. Bunun için büyütülen her bir  $Al_xGa_{1-x}As$  katmanının alüminyum içeriği ve enerji bant aralığı; XRD, PL ve elipsometre gibi farklı ölçüm yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir.

N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları Şekil 5.24' de verilmiştir. Bu şekildeki kırmızı, mavi ve yeşil eğriler sırasıyla N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için XRD ölçüm sonuçlarıdır. Kesikli siyah eğriler ise global fit programı ile elde edilen simülasyon grafikleridir. Simülasyon sonuçları ölçüm verileriyle oldukça uyumludur (N9 için R faktör:0.012, N10 için R Faktör:0.017, N10 için R Faktör:0.009). Yapılan simülasyonlar sonucunda N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için belirlenen alüminyum alaşım oranları sırasıyla %21, %33 ve %42 iken, numune kalınlıkları 978nm, 972nm ve

918nm'dir. N11 numaralı numunede gözlenen kalınlık osilasyonları (fringe) ara yüzeylerin keskin olduğunu ve yapının kristal kalitesinin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.



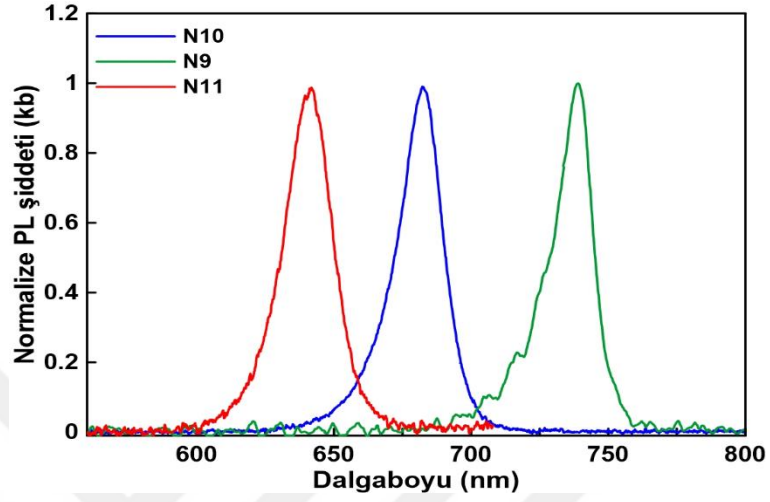
**Şekil 5.24** N9, N10 ve N11 numaralı örnekler üzerine uygulanan XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

Oda sıcaklığında alınan fotoluminesans ölçümlerini kullanarak N9, N10 ve N11 numaralı örneklerin enerji bant aralıkları bileşik yarı iletken olan AlGaAs yapılarının alaşım kompozisyonları ve numune kalitesi gibi özellikleri incelendi. Ölçüm alınırken 532nm dalga boylu NdYAG lazer ve CCD512-BT-TE dedektör kullanıldı. Örnekler üzerine uygulanan PL ölçüm sonuçlarında N9, N10 ve N11 numaralı örneklerin sırasıyla 739nm, 682nm ve 641nm dalga boylarında PL piki verdiği görülmüştür (Şekil 5.25). Bu dalga boylarından yararlanarak numuneler için hesaplanan soğurma bant kenarı aralıkları N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için sırasıyla 1.68eV, 1.83eV, 1.93eV'dur ve bu piklerin FWHM değerleri ise sırasıyla 37meV, 49meV ve 61meV'dur. Adachi tarafından verilen alaşım oranına bağlı olarak enerji band aralığı değişim denkleminde [5.1], PL ölçümünden elde edilen bant aralığı değerleri yerine yazılarak N9, N10 ve N11 numaralı örneklerin alaşım oranları hesaplandı. N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için hesaplanan alaşım oranları değerleri sırasıyla 0.21, 0.33 ve 0.41'dir



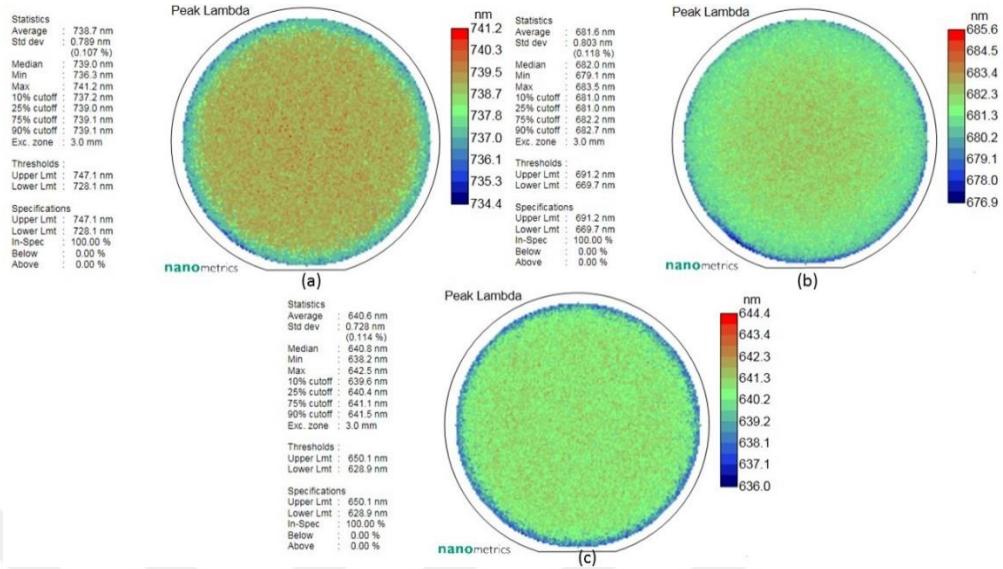
$$E_g(x) = 1.422eV + x1.2475eV$$

[5.1]



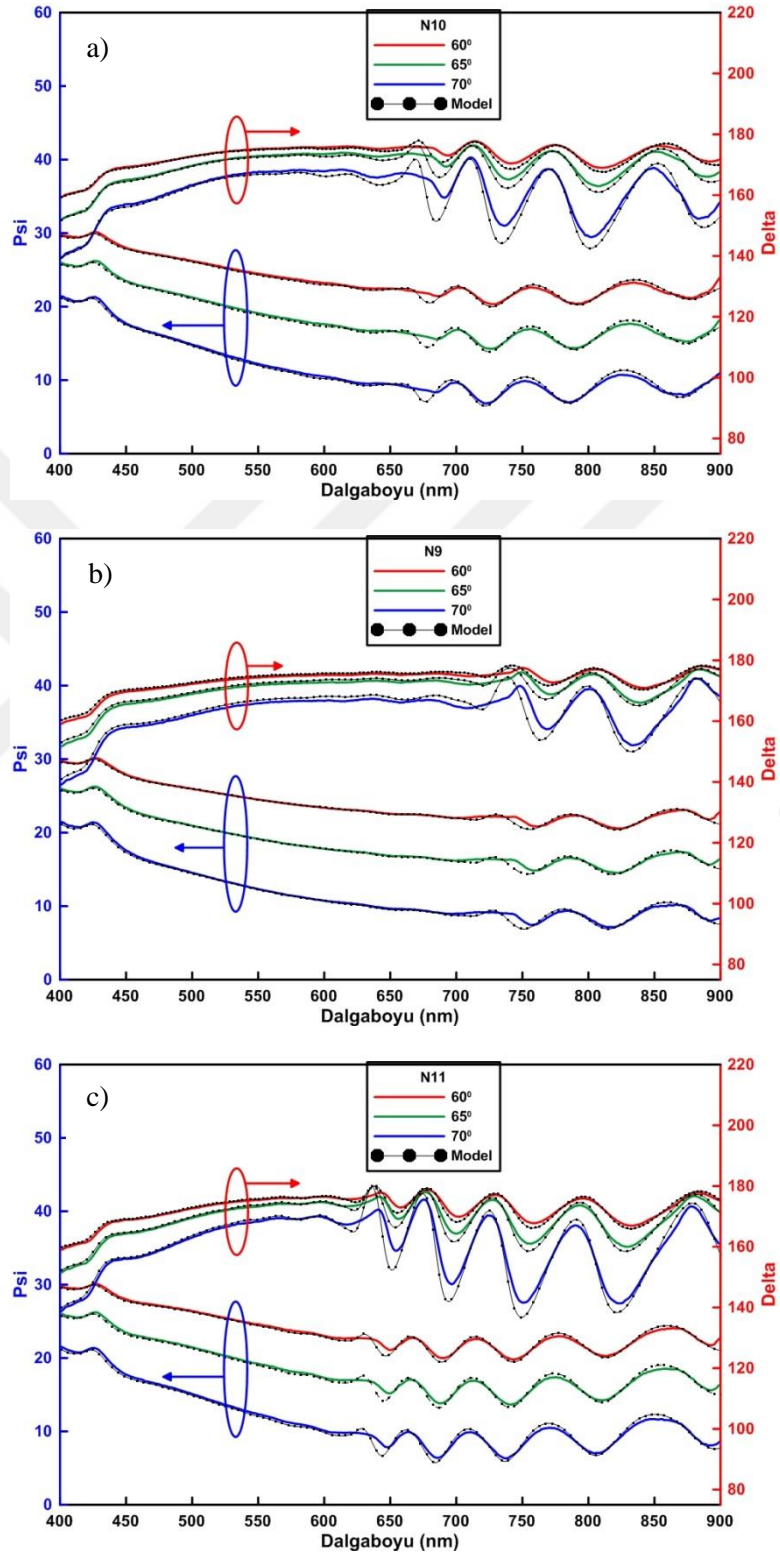
Şekil 5.25 N9, N10 ve N11 numaralı örneklere ait PL ölçüm sonuçları

Ölçümlerde kullanılan RPM-Blue PL sisteminin çizgisel haritalama opsiyonu kullanılarak 3'' boyutundaki katkısız GaAs altaşlar üzerine büyütülen N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için dalga boyunun yüzey boyunca dağılımı incelendi (Şekil 5.26). 3mm kenar çıkarma işlemi uygulandıktan sonra numunelerin her birinin yüzeyi üzerindeki dalga boyu değişiminin standart sapmasının yaklaşık %0.11 civarında olduğu gözlemlendi. Yüzey üzerindeki dalga boyu dağılımının homojen olması bize büyütülen AlGaAs tabakasındaki alüminyum alaşım oranında örnek boyunca bir değişim olmadığını göstermektedir.



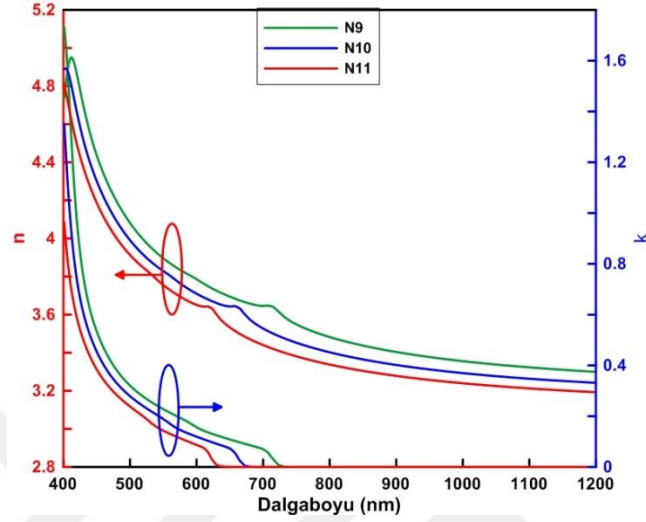
Şekil 5.26 N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için haritalanmış PL ölçüm sonuçları

Büyütülen tek tabaka AlGaAs katmanlarının enerji bant aralıkları ve kalınlık değerleri J.A. Woollam spektroskopik elipsometre kullanılarak da belirlendi. Model olarak Aspnes ve grubu tarafından alüminyum içeriği  $x=0.00-0.80$  aralığında değişen  $Al_xGa_{1-x}As$  katmanları için hazırlanan optik sabitlerden yola çıkarak alaşım oranının belirlenebildiği hazır model kullanılmıştır (Aspnes, 1986). Örnekler üzerine uygulanan spektroskopik elipsometre ölçümünden sonra gözlenen dalga boyuna karşı yansıma ( $\psi$ ) ve faz ( $\Delta$ ) açılarının değişimi ve modellenmesi Şekil 5.27 a),b),c)' de verilmiştir. Yapılan modellemeler sonucunda N9, N10 ve N11 numaralı örnekler için belirlenen alüminyum alaşım oranları sırasıyla 0.21, 0.32, 0.42 ve numune kalınlıkları ise 909.59 nm, 918.55 nm, 964.3 nm' dir. Yansıma açılarındaki değişim referans alınarak elde edilen ortalama karesel hata (MSE) değerleri ise 0.900 (N9), 0.847 (N10), 0.811 (N11)' dir.



Şekil 5.27 a) N9 b)N10 ve c)N11 numaralı örnekler için elipsometre ölçüm ve modelleme sonuçları

N9, N10 ve N11 numaralı örneklerin kırılma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k)' nin dalga boyuna karşı değişim grafikleri Şekil 5.28' de verilmiştir.



Şekil 5.28 N9, N10 ve N11 numaralı örneklere ait dalgaboyuna karşı kırılma indisi ve sönüm katsayısı

#### 5.4 Katkılı AlGaAs Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

Katkılı AlGaAs katmanlarının büyütülmesi çalışmalarında p-tipi katkı malzemesi olarak karbon ve çinko kullanılmıştır. Daha önce GaAs yapısının p-tipi katkılanması kısmında da bahsedildiği gibi karbon düşük difüzyon katsayısına sahip olması gibi birçok özelliğinden dolayı çinkoya alternatif olarak lazer (1), heterobipolar transistör (Ando, 1992), tandem güneş pili (Kim C. , 2010) gibi çeşitli cihaz uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. AlGaAs ve GaAs malzeme grubunda p-tipi katkı malzemesi olan karbon veya çinko kullanılarak  $10^{20}\text{cm}^{-3}$  gibi çok yüksek katkı konsantrasyonlarına MOCVD ile ulaşılmıştır (Deelen J. , 2004 ). Çinko ve karbon katkı konsantrasyonları aynı olsa bile karbon katkılı malzemelerin öz direncinin biraz daha düşük olduğu belirlenmiştir (Enquist, 1990). Karbonun çinkoya göre difüzyon hızının 6 kat daha düşük olması (Kim S. , 1994 ), daha keskin bir katkı profili elde edilmesi (Hardtdegen, 1994) gibi özelliklerinden dolayı tünel eklemlerin (Dimroth, 2000) p tipi katkılanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı alüminyum alaşım oranlarına sahip AlGaAs yapıları, değişik molar akışlarla reaktöre gönderilen farklı p-tipi katkı kaynakları (çinko ve karbon) kullanılarak ayrı ayrı

katkılanmıştır. Büyütme işleminden sonra farklı katkı düzeylerine sahip örneklerin p-tipi taşıyıcı konsantrasyonu düzeyleri, ECV ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

AlGaAs yapılarının n tipi katkılanması çalışmasında ise katkı malzemesi olarak SiH<sub>4</sub> kullanılmıştır. MOCVD ile farklı molar akışlarda SiH<sub>4</sub> kullanılarak katkılanan farklı Al alaşım oranına sahip AlGaAs büyütülmüş, büyütülen yapıların elektriksel özellikleri ise ECV ve Hall ölçüm sistemleri kullanılarak belirlenmiştir.

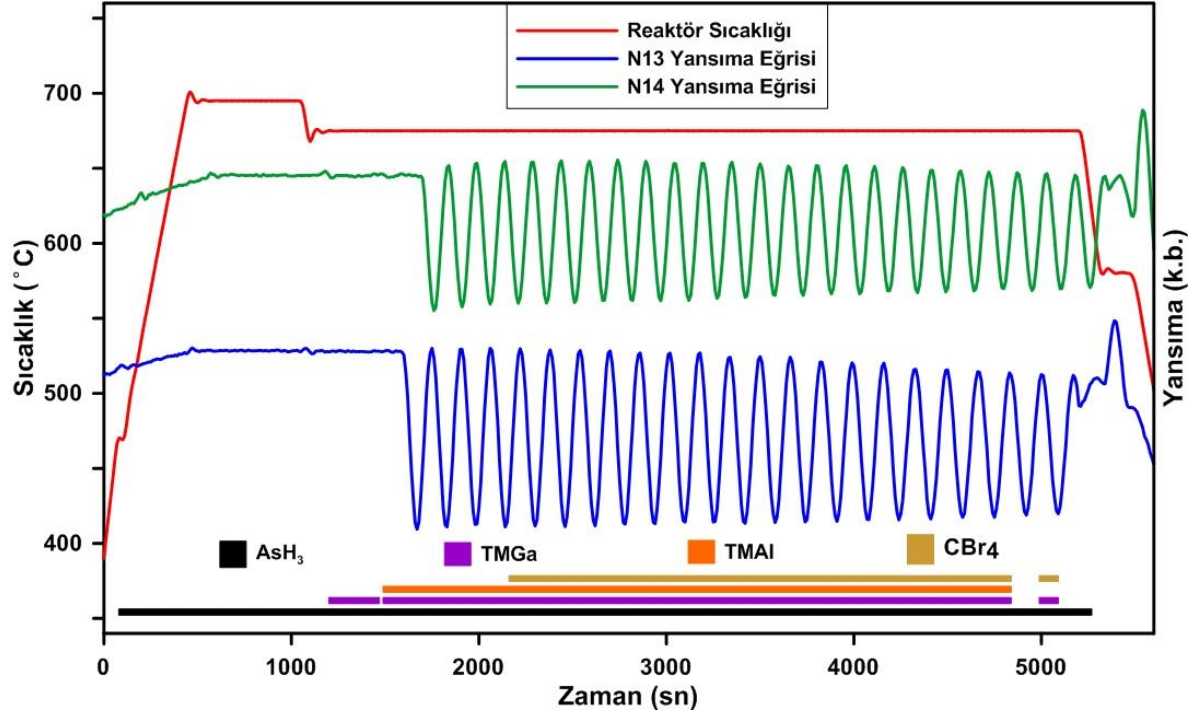
#### 5.4.1 Karbon katkılı AlGaAs Büyütmeleri ve Karakterizasyonları

Literatürde C kullanarak GaAs'ın p-tipi katkılanması ile ilgili çok fazla çalışma varken AlGaAs'ın p-tipi katkılanması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma vardır. C kullanılarak AlGaAs yapılarının p tipi katkılanması çalışmalarından birkaçında C kaynağı olarak CCl<sub>4</sub> kullanılırken bazı çalışmalarda CBr<sub>4</sub> kullanılmıştır. CCl<sub>4</sub> kullanılarak katkılanan Al<sub>0.30</sub>Ga<sub>0.70</sub>As yapısında elde edilen en yüksek taşıyıcı konsantrasyonu 1.36E20 cm<sup>-3</sup> iken CBr<sub>4</sub> kullanılarak elde edilen en yüksek taşıyıcı konsantrasyonu ise 1.3E19 cm<sup>-3</sup>'tür (Deelen, 2004). Ayrıca alüminyum alaşım oranının, büyütme sıcaklığının, V/III oranının katkısız olarak büyütülen AlGaAs üzerine etkisinin incelenip büyütme parametrelerinin kendiliğinden katkılama üzerine etkisinin araştırıldığı çeşitli çalışmalar da mevcuttur. Kendiliğinden katkılama istenmeyen bir durumdur ve TMGa, TMAI gibi büyütme öncüllerindeki karbon atomunun örgüye girmesi ile elde edilir (Fujii, 1999). Normal büyütme koşullarında karbon atomları muhtemelen V grubu kaynak malzemesi olan AsH<sub>3</sub>' den gelen atomik hidrojenin varlığından kaynaklanan hidrojenizasyonla yüzeyden uzaklaşır. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As yapısındaki alüminyum alaşım oranı da kendiliğinden katkılamayı etkileyerek arka plan taşıyıcı konsantrasyonunun değişimini sağlayan diğer bir etkidir. Düşük V/III oranı kullanılarak yüksek katkı seviyelerine ulaşmak mümkündür. Ancak düşük V/III oranında ( $\leq 2.6$ ) C içeren reaktör parçalarından (örnek tutucu gibi) kaynaklandığı düşünülen siyah renkli parçalar da numune yüzeyi üzerinde görülebilir. V/III oranının etkisi kadar karbon katkılamayı etkileyecek diğer bir parametre ise büyütme sıcaklığıdır. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As yapısı büyütme sıcaklığına bağlı olarak üç farklı rejimde büyütülebilir (Kondo, 1994). Bunlardan bir tanesi düşük sıcaklık rejimidir (büyütme sıcaklığı < 626°C). Düşük sıcaklık büyütme rejiminde C birleşimi yüzey reaksiyonları ile sınırlı olduğundan AsH<sub>3</sub> mol kesri C birleşimini

etkilemezken büyütme sıcaklığı C bileşimini etkiler ve daha düşük sıcaklıklarda GaAs yapısında olduğu gibi daha yüksek katkı seviyesi elde edilir.  $Al_xGa_{1-x}As$  yapısının bir diğer büyütme aralığı ise  $626^{\circ}C$  ile  $726^{\circ}C$  arasında değişen ortalama sıcaklık rejimidir ki bu bölgede C konsantrasyonu  $AsH_3$ ' ün bölgesel konsantrasyonu ile orantılıdır ve büyütme sıcaklığından bağımsızdır. Üçüncü büyütme rejimi ise  $726^{\circ}C$ 'den daha yüksek sıcaklıklarda büyütülmesidir. Bu durumda C birleşimi ortalama sıcaklık bölgesindeki benzerdir ancak karbon birleşim  $AsH_3$  akışına bağlıdır. Hol konsantrasyonunun alüminyum alaşım oranına lineer bağlı olduğunu, alüminyum alaşım oranı arttıkça hol konsantrasyonunun da arttığını göstermektedir. Bu olay doğrudan Al-C arasındaki bağ enerjisinin ( $65kcal/mol$ ), Ga-C arasındaki bağ enerjisinden ( $61kcal/mol$ ) daha yüksek olmasıyla açıklanabilir (Kim S. , 1994 ). Dolayısıyla Al içeriği daha yüksek olan  $Al_xGa_{1-x}As$  yapılarında büyütme boyunca hidrojenizasyon ile karbon atomlarının uzaklaşma olasılığı azalmaktadır.

Lazer diyot yapısının p-tipi katkılı bölgesinde dalga kılavuzu ve kılıf tabakası olarak kullanılmak üzere farklı alüminyum alaşım oranlarına sahip üç farklı örnek büyütüldü. Büyütmeler yapılırken C katkı seviyesinin büyütme sıcaklığına bağlı olmadığı, kendiliğinden katkılama etkilerinin minimize olduğu ortalama sıcaklık rejimi tercih edilmiştir ve üç numune de katkısız GaAs altaş üzerine  $675^{\circ}C$  reaktör sıcaklığında büyütülmüştür. Hem kılıf tabakası olarak kullanılacak hem de dalga kılavuzu olarak kullanılacak olan farklı alaşım oranlı  $Al_xGa_{1-x}As$  yapısı için  $E19-E20cm^{-3}$  gibi çok yüksek katkı seviyeleri gerekmediğinden yapılan katkılama çalışmasında düşük V/III oranı kullanılmamıştır. Örnekler büyütülürken büyütme sıcaklığı gibi V/III oranı da her üç örnek için sabit tutulmuştur. p-AlGaAs katkılama çalışmalarında kullanılan V/III oranı değeri 21'dir. Al alaşım oranı III grubu metal organiklerden TMGa ve TMAI akışlarının artırılıp azaltılmasıyla elde edilmiştir. Farklı Al alaşım oranına sahip her bir p- $Al_xGa_{1-x}As$  örneği reaktöre gönderilen farklı akışlardaki taşıyıcı konsantrasyonu yüksekten düşüğe doğru gidecek şekilde farklı C akışları kullanılarak basamaklı şekilde katkılanmıştır. Dalga kılavuzu tabakası için düşük alüminyum alaşım oranı ve kılıf tabakasına göre daha düşük hol konsantrasyonu ( $\sim 5E17cm^{-3}$ ) gerektiğinden N12 ve N13 numaralı örnekler büyütülürken düşük karbon akışları, N14 numaralı örnek için ise hem düşük hem de yüksek karbon akışları kullanılmıştır. N12 numaralı örnek büyütülürken reaktöre gönderilen karbon akış miktarı  $1.5 \mu mol/min$ ,  $2.2 \mu mol/min$ ,  $3.3 \mu mol/min$ ,  $4.4 \mu mol/min$  ve  $5.5 \mu mol/min$  olarak değiştirilirken, N13 numaralı örnekte ise  $2.2 \mu mol/min$ ,

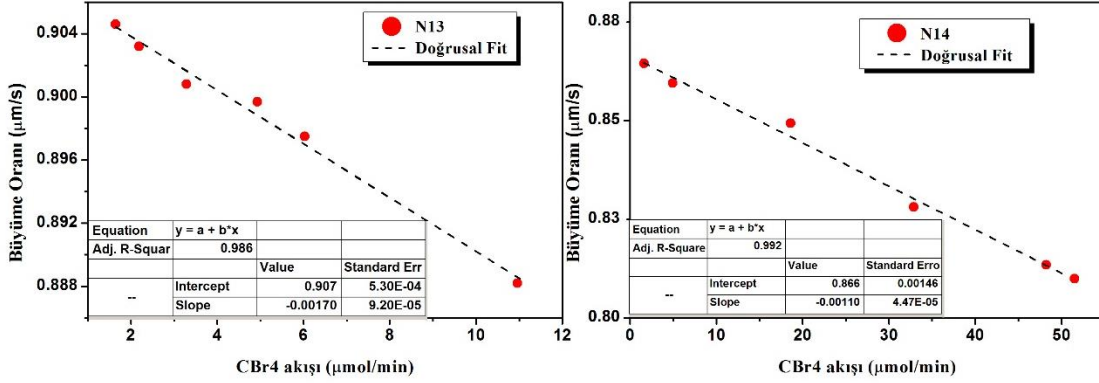
3.3 $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 4.9 $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 6.0 $\mu\text{mol}/\text{min}$  ve 11.0 $\mu\text{mol}/\text{min}$  olarak değiştirilmiştir. N14 numaralı örnek büyütülürken kullanılan C akış miktarı ise 1.6 $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 4.9 $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 18.6 $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 32.9 $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 48.2 $\mu\text{mol}/\text{min}$  ve 51.5 $\mu\text{mol}/\text{min}$ 'dir. N13 ve N14 numaralı numunelere için yerinde yansımaya ölçümlerinden (şekil 5.29) yararlanılarak C akışının büyütme oranını nasıl etkilediği belirlenmiştir.



**şekil 5.29** N13 ve N14 numaralı örneğe ait yerinde yansımaya (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

Basamaklı bir şekilde farklı CBr<sub>4</sub> akışları kullanılarak büyütülen N13 ve N14 numaralı örnekler için yerinde yansımaya ölçüm sistemi yardımıyla her bir CBr<sub>4</sub> akışının değiştiği katman için büyüme oranı değerleri belirlendi. Her iki örnek için de CBr<sub>4</sub> akışındaki değişime karşı büyüme oranındaki değişimin grafiği çizildi (şekil 5.30) ve grafik üzerine uygulanan eğri fiti ile büyüme oranının her iki örnek içinde CBr<sub>4</sub> akışı ile lineer bir şekilde azaldığı gözlemlendi. Ayrıca V/III oranları (21) ve büyüme sıcaklıkları (675°C) aynı Al alaşım oranları farklı olan bu iki rneği kıyaslayacak olursak, Al alaşım oranı arttıķa büyüme oranının azaldığı sonucu çıkarılabilir.

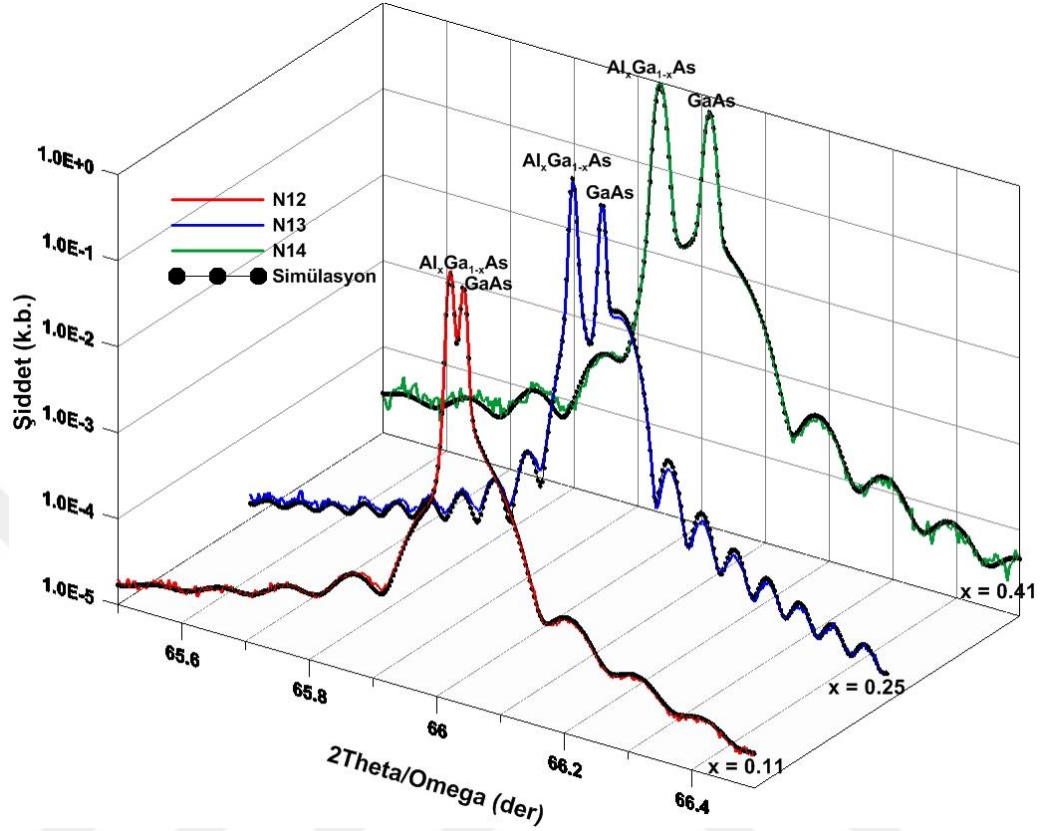




**Şekil 5.30** a) N13 için b) N14 için CBr4 akışındaki değişime karşı büyüme oranındaki değişim grafikleri

p-AlGaAs çalışması için büyütülen N12, N13 ve N14 numaralı üç örneğin Al alaşım oranını belirlemek için XRD ölçüm ve simülasyon tekniği kullanılmıştır (Şekil 5.31). Bu grafikteki kırmızı, mavi ve yeşil eğriler sırasıyla N12, N13 ve N14 numaralı örnekler için XRD ölçüm sonuçlarını göstermektedir, kesikli siyah eğriler ise global fit programı ile elde edilen simülasyon sonuçlarıdır. Yapılan simülasyonlar sonucunda belirlenen Al alaşım oranları N12, N13 ve N14 numaralı örnekler için sırasıyla %11, %25 ve %41'dir. Simülasyon sonuçları ölçüm verileriyle oldukça uyumludur (N9 için R faktör:0.012, N10 için R Faktör:0.017, N10 için R Faktör:0.009). Örneklerde gözlemlenen kalınlık osilasyonları ara yüzeylerin oldukça keskin olduğunu ve kristal kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. GaAs ve AlGaAs piklerinin sağ ve sol taraflarındaki davranışın aynı olmaması, GaAs pikinin sağ tarafında geniş bir omzun bulunması bize yapıda gerilme etkisinin mevcut olduğunu göstermektedir. Aynı davranışın Şekil 5.24' de verilen katkısız AlGaAs büyütmelelerinde gözlemlenmemesi bize bu gerilmenin kaynağının yapının p-tipi katkılanmasında kullanılan C atomlarından kaynaklandığını göstermektedir. Bunun sebebi C atomunun atomik yarıçapının yerini aldığı As atomunun atomik yarıçapından çok daha küçük olmasıdır (Gareso, 2009).

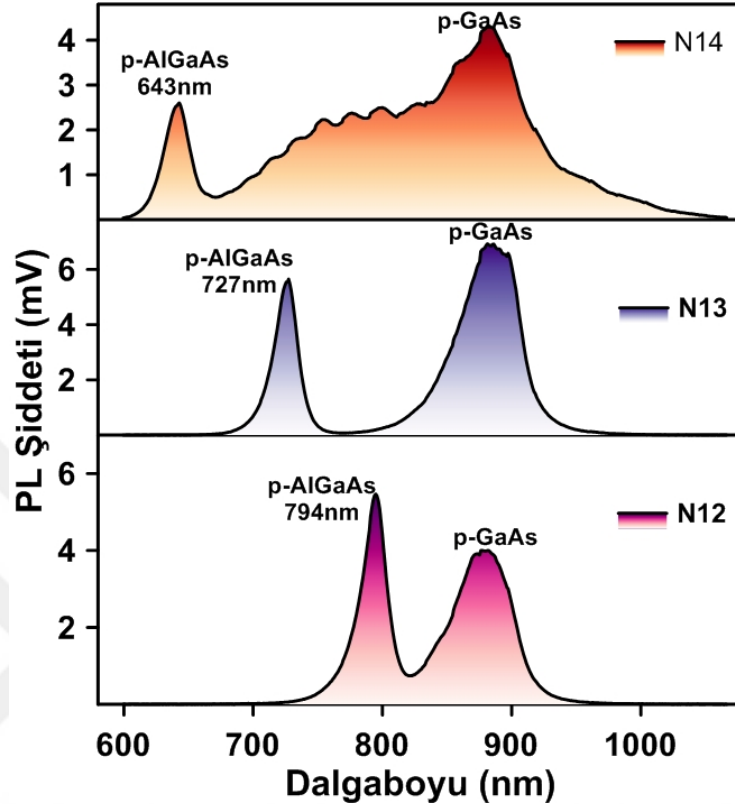




Şekil 5.31 N12, N13 ve N14 numaralı örnekleri ait HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

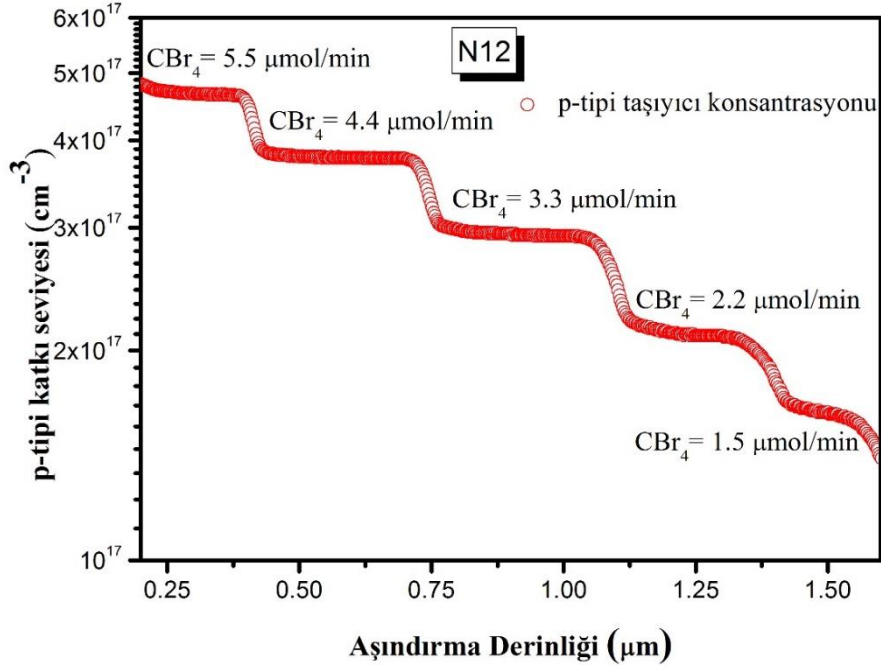
N12, N13 ve N14 numaralı örnekler için oda sıcaklığında 532 nm dalga boylu NdYAG lazer ve CCD512-BT-TE dedektör kullanılarak PL ölçümleri alındı. PL ölçümü sonucunda belirlenen bant kenarı enerjileri N12, N13 ve N14 numaralı örnekler için sırasıyla 1.56eV (794nm), 1.71eV (727nm) ve 1.93eV (643nm) olarak belirlendi (Şekil 5.32).

Oda sıcaklığında alınan fotoluminesans ölçümlerini kullanarak N9, N10 ve N11 numaralı örneklerin enerji bant aralıkları bileşik yarı iletken olan AlGaAs yapılarının alaşım kompozisyonları ve numune kalitesi gibi özelliklerini inceledik. N14 numaralı numune için p-AlGaAs ve p-GaAs arasında kalan omzun numune üzerindeki ağır C katkılamadan kaynaklandığı düşünülmektedir. N14 numaralı örneğin PL grafiğine bakılarak numunenin basamaklı olarak farklı akışlarda C katkılamasından dolayı eğri üzerinde farklı osilasyonların gözlemlendiği yorumu yapılabilir. N12 ve N13 numaralı örneklerde düşük düzeyde C ile katkılandığından dolayı eğri üzerindeki osilasyonların baskın bir şekilde gözlenmediği düşünülmektedir.

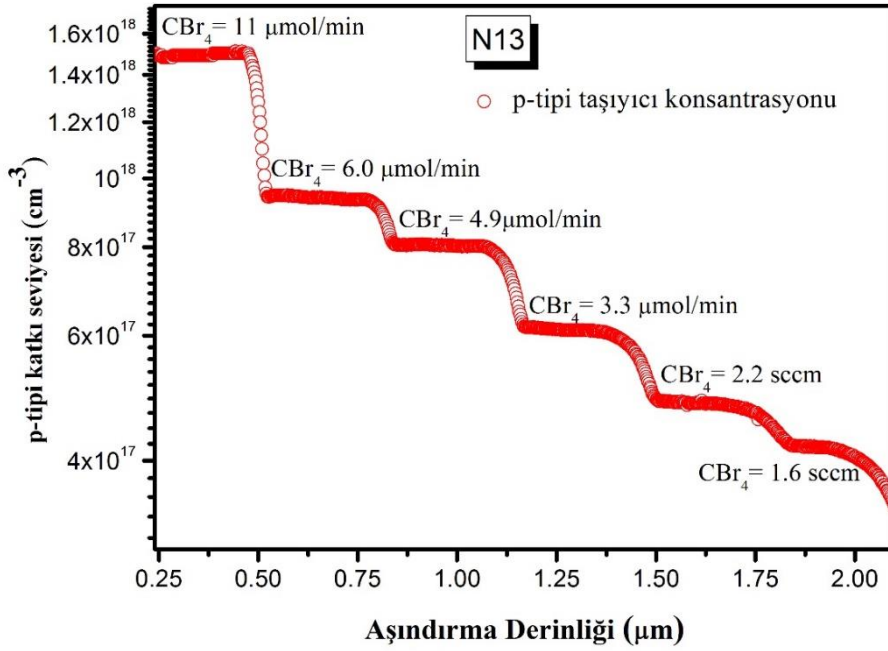


Şekil 5.32 N12, N13 ve N14 numaralı numunelere ait PL ölçüm sonuçları

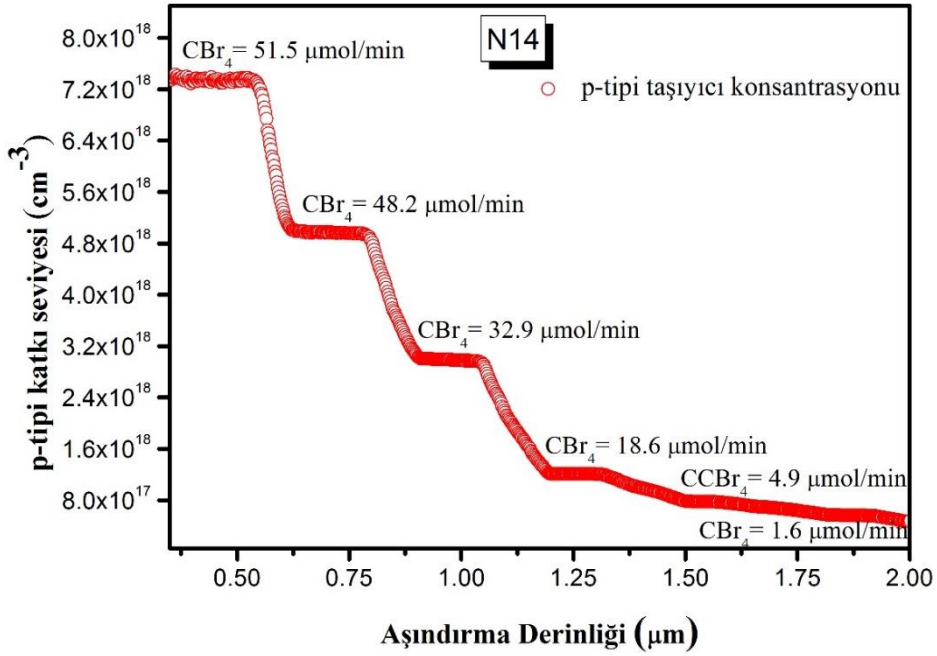
Farklı karbon akışları kullanılarak yüksek hol taşıyıcı konsantrasyonundan düşük hol taşıyıcı konsantrasyonuna doğru aşamalı olarak basamaklı şekilde büyütülen N12, N13 ve N14 numaralı p-AlGaAs örneklerinin taşıyıcı konsantrasyonları ECV ölçüm yöntemi kullanılarak aşındırma derinliğine bağlı olarak belirlendi (Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35).



Şekil 5.33 N12 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi

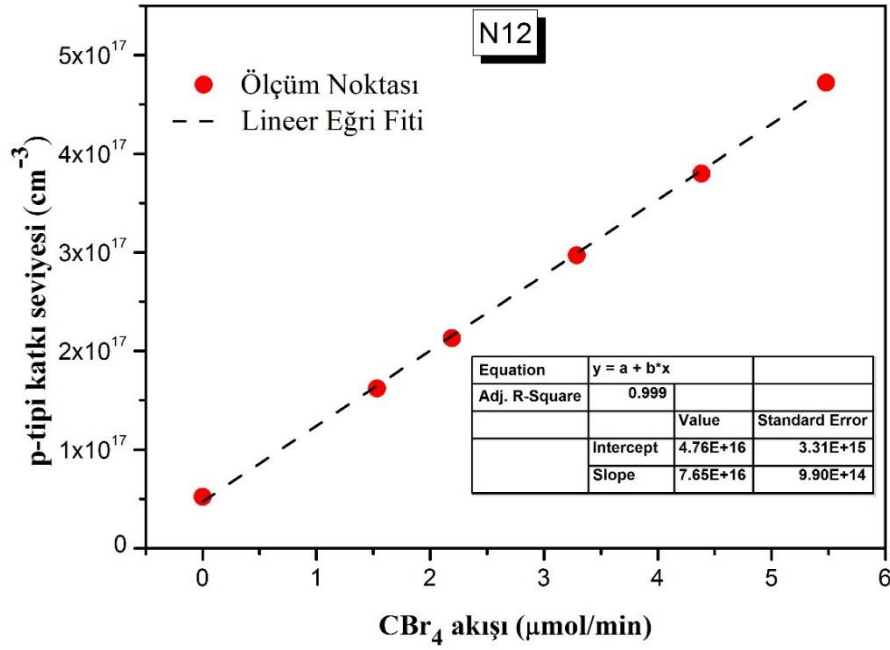


Şekil 5.34 N13 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi

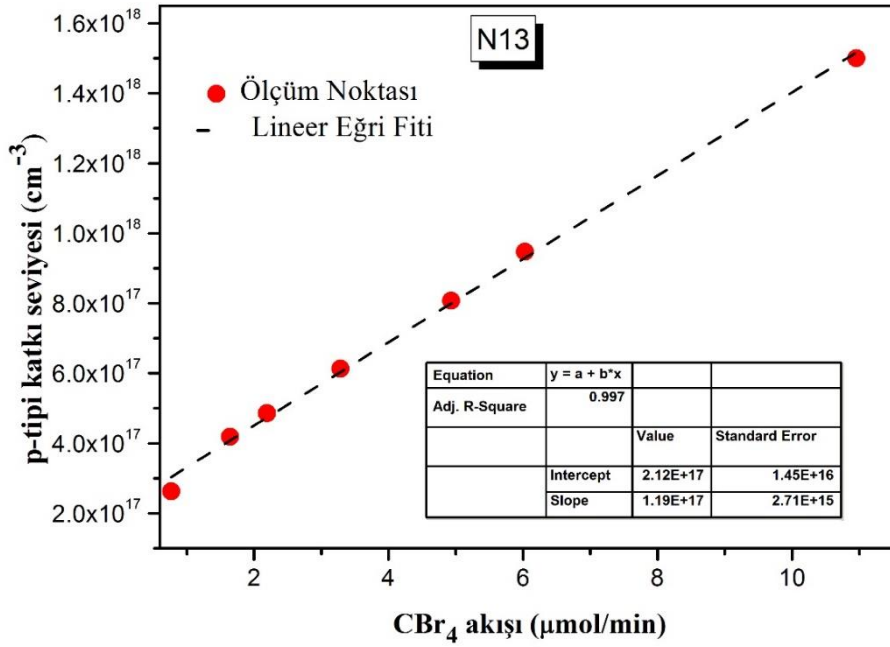


**Şekil 5.35** N14 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi

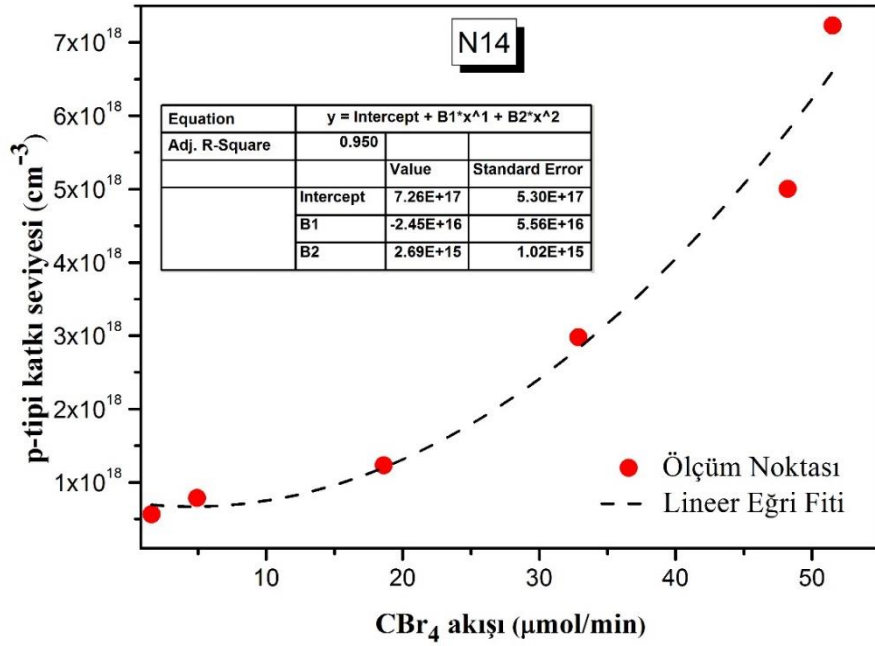
ECV ölçümünden yararlanılarak elde edilen taşıyıcı konsantrasyonlarının CBr<sub>4</sub> akışına karşı değişim grafiği her bir örnek için ayrı ayrı çizildi (Şekil 5.36, Şekil 5.37, Şekil 5.38). Grafikler üzerine uygulanan eğri fitleri ile farklı Al alaşım oranlarında büyütülen her üç örneğin CBr<sub>4</sub> akışına bağlı olarak p-tipi taşıyıcı konsantrasyonunun nasıl değiştiği belirlendi. Bu eğri fitleri daha sonraki LD büyütmelerinde p tipi katkı dalgası kılavuzu ve kılıf tabakası büyütülürken kullanılacak olan büyütme parametrelerini hesaplamak amacıyla elde edilmiştir. Yapılan eğri fitleri sonucunda; Al alaşım oranı düşük olan N12 ve N13 numaralı örnek için CBr<sub>4</sub> akışı ile p tipi katkı seviyesinin lineer bir şekilde arttığı gözlemlenirken, Al alaşım oranı yüksek olan N14 numaralı örnek için p tipi katkı seviyesinin CBr<sub>4</sub> akışına bağlı olarak polinomal bir şekilde arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.36 N12 numaralı örnek için CBr<sub>4</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi



Şekil 5.37 N13 numaralı örnek için CBr<sub>4</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi

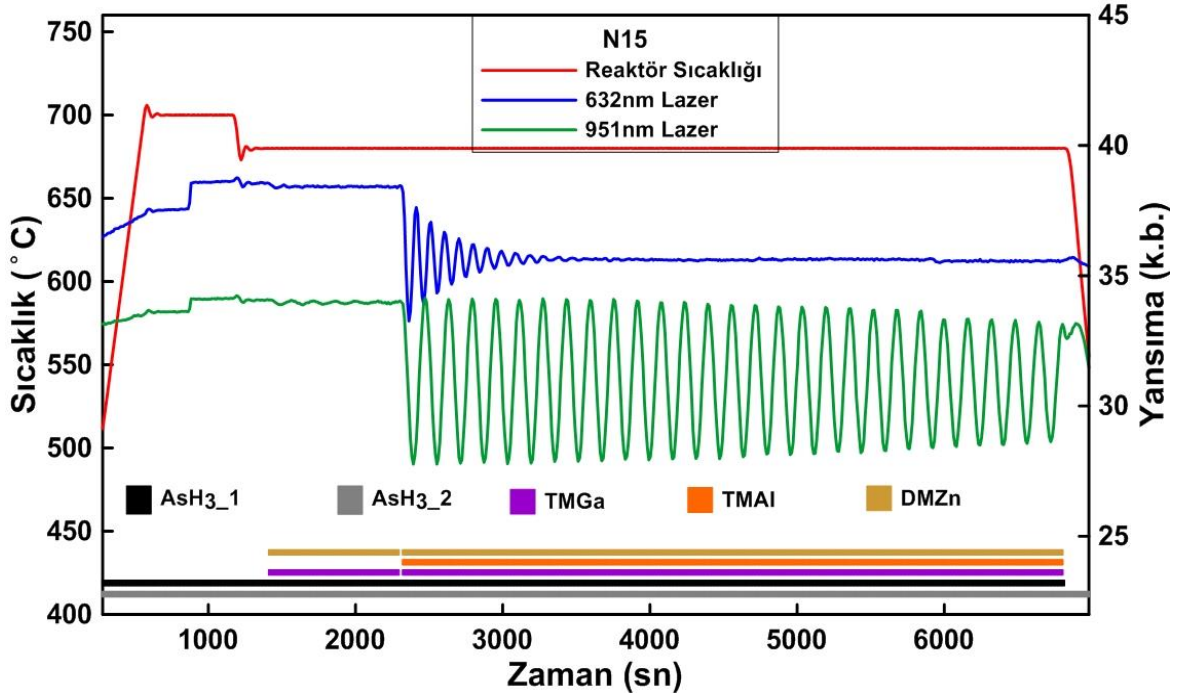


Şekil 5.38 N14 numaralı örnek için CBr<sub>4</sub> akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi

#### 5.4.2 Çinko katkılı AlGaAs Büyütmeleri ve Karakterizasyonları

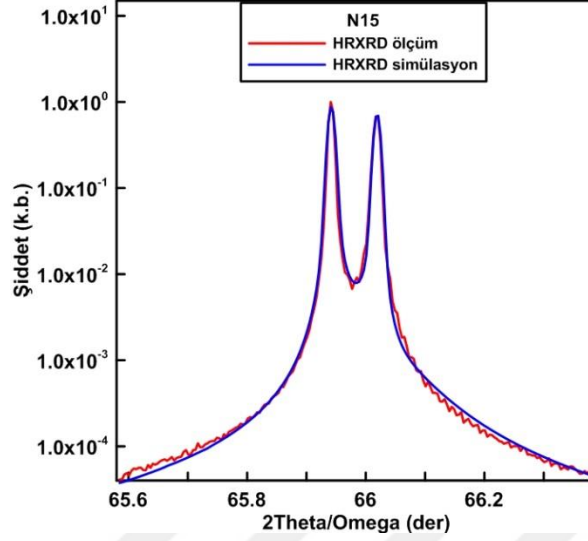
III-V bileşik yarıiletkenlerinde p-tipi katkı kaynağı olarak Zn difüzyon hızı  $C'$  a göre çok yüksek olmasına rağmen düşük hafıza etkisi göstermesi (Hudait, 1998), derin tuzak seviyelerinin miktarının az olması (Wang, 1988), ve yüksek katkı seviyelerinde bile yüzey morfolojisinin oldukça iyi olması gibi etkenlerden dolayı (Sun, 1993) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. DMZn ile p-tipi katkılama üzerine çeşitli çalışmalar birçok araştırma grubu tarafından yapılmıştır. Hudait ve ekibi tarafından yürütülen çalışmada 600-725°C arasındaki büyüme sıcaklığı kullanıldığında DMZn katkılanarak büyütilen GaAs yapılarının yüzeyinin ayna gibi pürüzsüz olduğu görülmüştür. Glew ise çinko katkılı GaAs için hol konsantrasyonunun büyüme sıcaklığına bağlı değişimini incelemiş ve üç farklı sıcaklık rejimi tanımlamıştır. 500-575°C sıcaklık aralığında çinko metallerinin arsin dekompozisyonu için katalizör etkisi oluşturduğunu; 575-675°C arasında DMZn' nin dopant aktivasyon enerjisinin 4eV olduğunu ve 675-800°C arasında ise DMZn dopant aktivasyon enerjisinin 2.7eV olduğunu göstermiştir (Glew, 1984). Yapmış olduğumuz çinko kullanarak p-tipi

AlGaAs elde etme çalışmasında büyütme sıcaklığı bu çalışmalar referans alınarak belirlendi. p-AlGaAs katkılama çalışmasında büyütülen N15 numaralı örnek 675°C büyütme sıcaklığı, 50mbar reaktör basıncı kullanılarak, gaz fazındaki Al/III oranı %34 ve V/III oranı 53 olacak şekilde Al ve Ga akış parametreleri hesaplanarak büyütüldü. Büyütme boyunca DMZn akışı hariç diğer tüm büyütme parametreleri sabit tutuldu. DMZn akışı ise 0.20  $\mu\text{mol/dk}$ , 2.04  $\mu\text{mol/dk}$ , 22.24  $\mu\text{mol/dk}$ , 84,68  $\mu\text{mol/dk}$  ve 559,15  $\mu\text{mol/dk}$  olarak değiştirilerek AlGaAs yapısının düşük katkı konsantrasyonundan yüksek katkı konsantrasyonuna doğru basamaklı şekilde p-tipi katkılanması sağlandı. Şekil 5.39 N15 numaralı numunenin büyütülmesi sürecinde yerinde yansıma ölçümü ile gözlemlenen yerinde yansıma ölçümünü göstermektedir. N15 numaralı örnek için yerinde yansıma ölçümü ile belirlenen büyütme oranı 0.844nm/sn'dir.



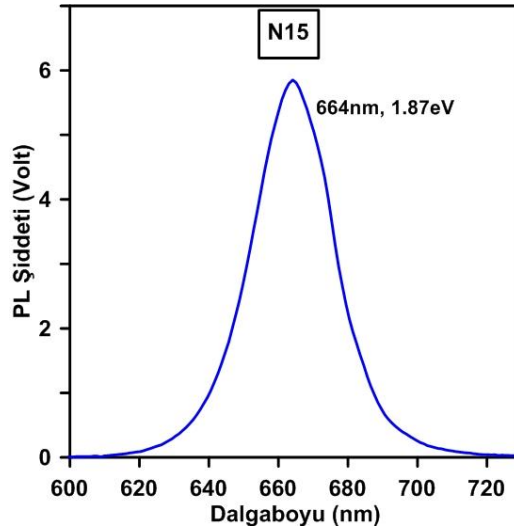
**Şekil 5.39** N15 numaralı örneğe ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

HRXRD ile N15 numaralı örnek üzerine uygulanan 2Theta/Omega taramasının ölçüm ve simülasyon sonuçları Şekil 5.40' da verilmiştir. N15 numaralı örnek üzerine uygulanan HRXRD ölçüm ve simülasyon sonuçlarıyla belirlenen  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  yapısındaki Al alaşım oranı %40 ve FWHM değeri ise 32 arcsec'dir ( $R=0.021$ ).



**Şekil 5.40** N15 numaralı numuneye ait HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

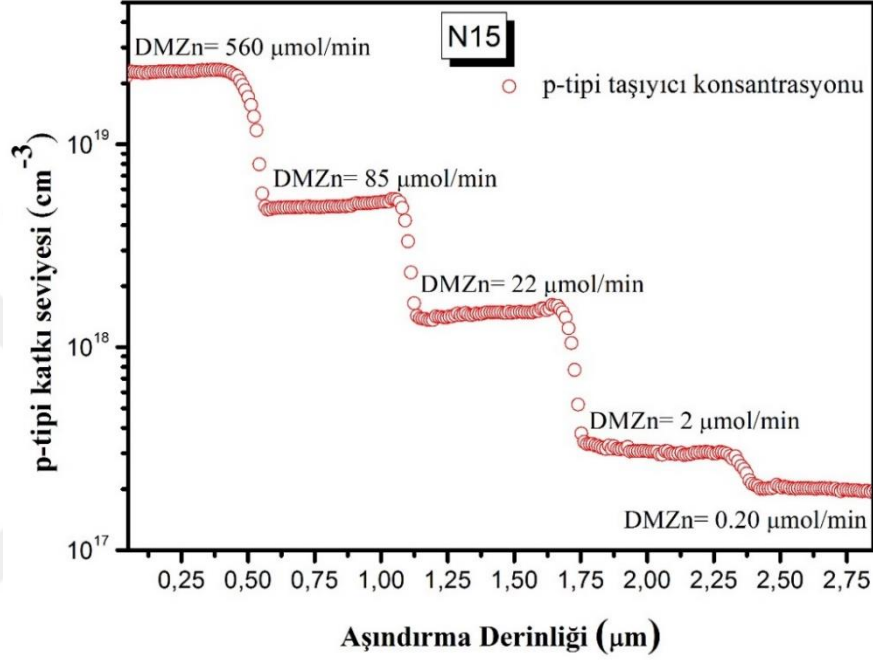
Oda sıcaklığında N15 numaralı numune üzerine 532nm dalga boyunda ışık yayan NdYAG lazer ile uyarılmış ve CCD512-BT-TE dedektör kullanılarak PL ölçümü yapılmıştır. Ölçüm esnasında kullanılan lazerin gücü 45.9 mW ve ölçümün alındığı tarama aralığı 5 pts/s' dir. Örnek 664nm (1.87eV) değerinde PL piki vermiştir (Şekil 5.41). Ölçümden elde edilen veriler Denklem 5.1 da yerine yazılarak yapıdaki Al alaşım oranı %23 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 5.41** N15 numaralı örneğe ait PL ölçüm sonuçları



Farklı DMZn akışları kullanılarak yüksek hol taşıyıcı konsantrasyonundan düşük hol taşıyıcı konsantrasyonuna doğru aşamalı olarak basamaklı şekilde büyütülen N12, N13 ve N14 numaralı p-AlGaAs örneklerinin taşıyıcı konsantrasyonları 0.2M EDTA çözeltisi kullanılarak ECV ölçüm yöntemi ile aşındırma derinliğine bağlı olarak belirlendi (Şekil 5.42).

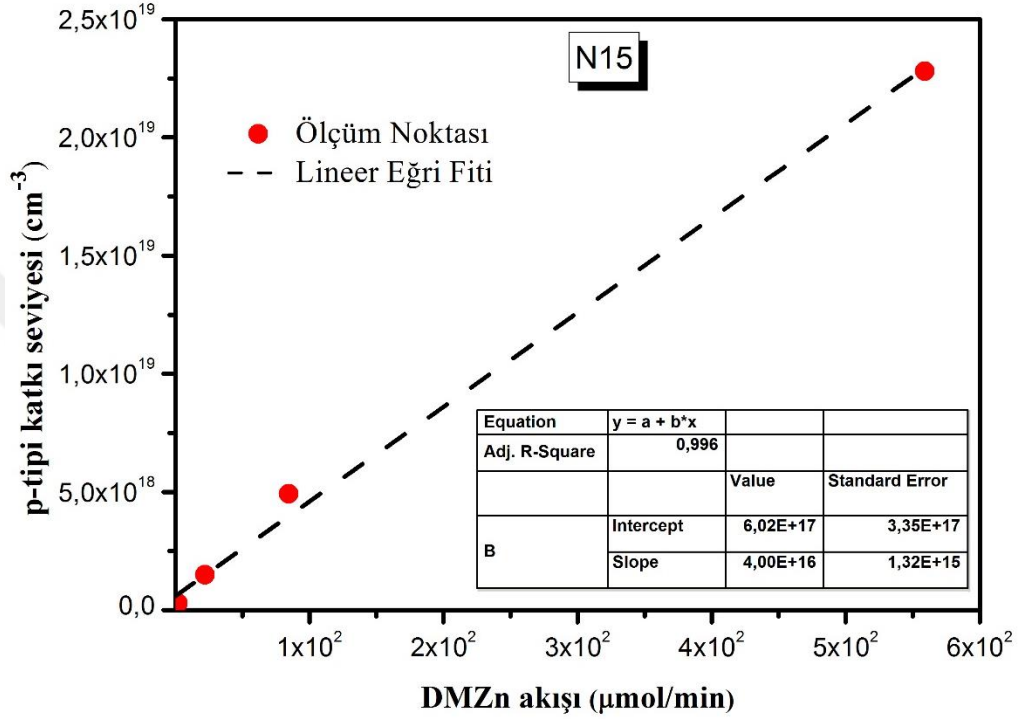


Şekil 5.42 N15 numaralı numune için aşındırma derinliğine karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi

ECV ölçümünden yararlanılarak elde edilen DMZn akışına karşı taşıyıcı konsantrasyonu değişim grafiği çizildi (Şekil 5.43). Grafikler üzerine uygulanan eğri fiti ile Al alaşım oranı %40 olan Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As yapısının p-tipi hol taşıyıcı konsantrasyonunun DMZn akışına bağlı olarak nasıl değiştiği belirlendi.

Farklı Al alaşım oranlarında büyütülen her üç örneğin CBr<sub>4</sub> akışına bağlı olarak p-tipi hol taşıyıcı konsantrasyonunun nasıl değiştiği belirlendi. Bu eğri fitleri daha sonraki LD büyütmelerinde p tipi katkılı dalga kılavuzu ve kılıf tabakası büyütülürken kullanılacak olan büyütme parametrelerini hesaplamak amacıyla elde edilmiştir. Yapılan eğri fitleri sonucunda; Al alaşım oranı düşük olan N12 ve N13 numaralı örnek için CBr<sub>4</sub> akışı ile p tipi katkı seviyesinin lineer bir şekilde arttığı gözlemlenirken, Al alaşım oranı yüksek olan N14

numaralı örnek için p tipi katkı seviyesinin  $\text{CBr}_4$  akışına bağlı olarak polinomal bir şekilde arttığı belirlenmiştir.

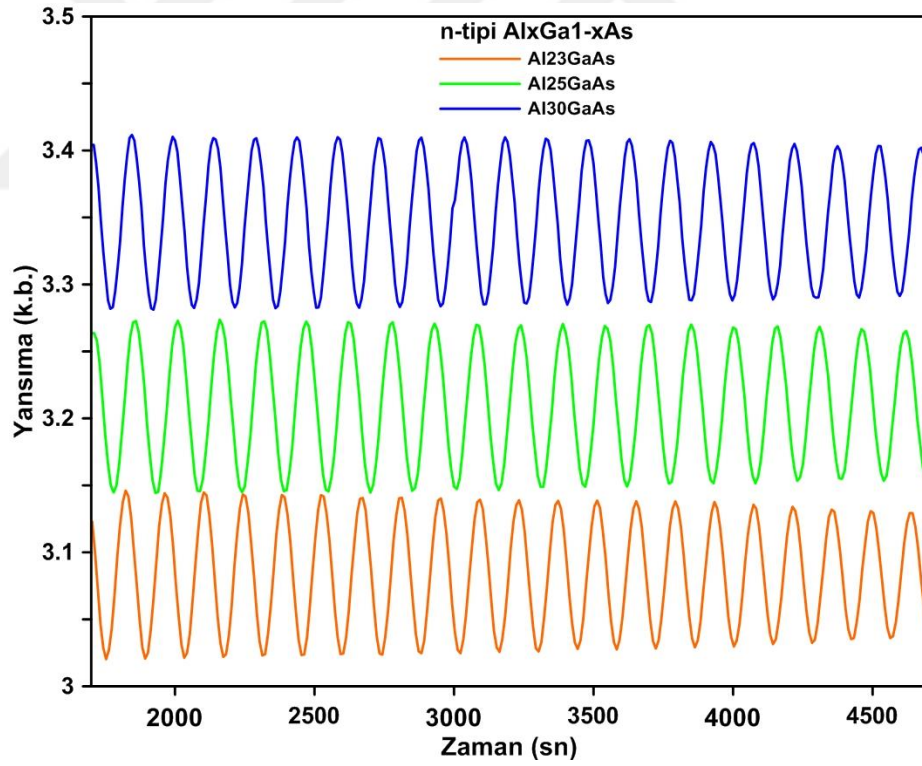


Şekil 5.43 N15 numaralı numune için DMZn akışına karşı p-tipi katkı seviyesi değişimi

### 5.4.3 n tipi katkılı AlGaAs Büyütmeleri ve Karakterizasyonları

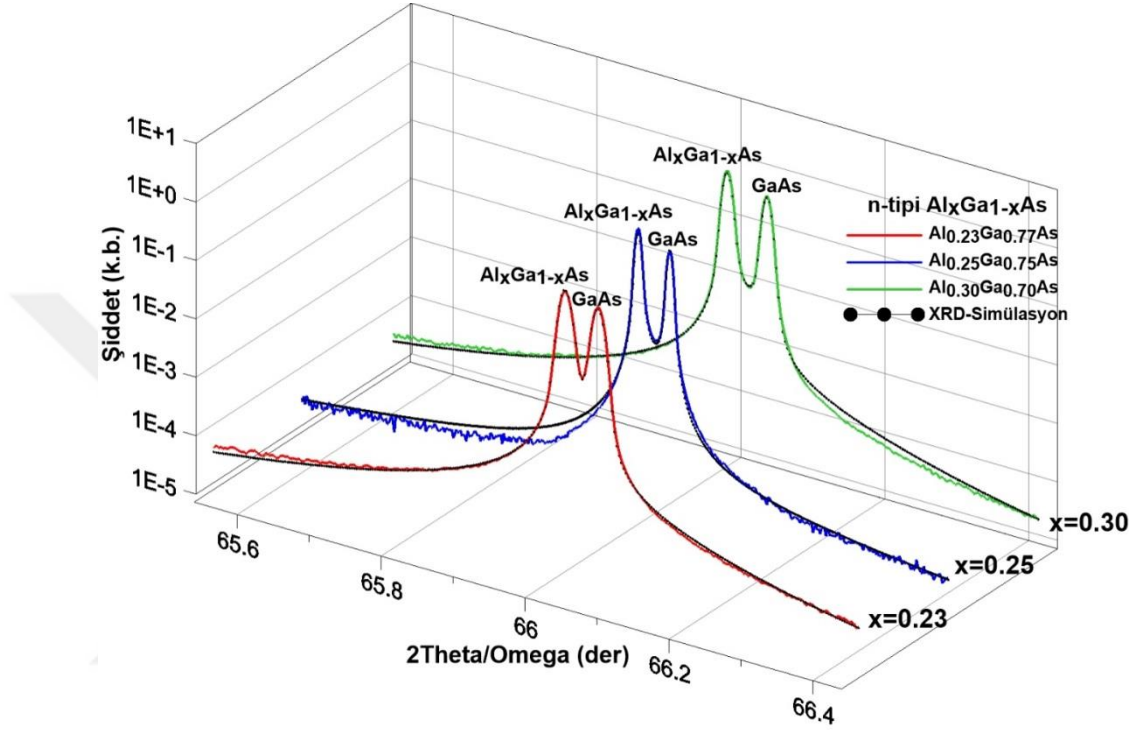
N16, N17, N18, N19, N20, N21 ve N22 olarak isimlendirilen 7 farklı numune n-tipi katkı malzemesi olarak  $\text{SiH}_4$  kaynağı kullanılarak büyütüldü. Bu numunelerden N16, N17, N18 ve N20 numaralı olanlar basamaklı bir şekilde farklı  $\text{SiH}_4$  akışları kullanılarak katkılanırken N19, N21 ve N22 numaralı olan örnekler ise sabit  $\text{SiH}_4$  akışı kullanılarak katkılanmıştır. Katkı maddesi olarak  $\text{SiH}_4$  kaynağı kullanılarak katkılanmış ve  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  yapıları başlıca 3 farklı Al içeriğine sahip olacak şekilde büyütülmüştür. Üç farklı alüminyum alaşım oranına sahip olarak büyütülen  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  epitaksiyel tabakalarına ait zamana bağlı yerinde yansıma eğrileri Şekil 5.44' de verilmiştir.

%23 Al içeriğine sahip olan N16 ve N17 numaralı örnekler büyütülürken kullanılan TMGa akışı 742 $\mu$ mol/min, TMAI akışı 186 $\mu$ mol/min ve AsH<sub>3</sub> akışı ise 44642 $\mu$ mol/min'dir. %23 Al içeriğine sahip olan örnek katkılanırken kullanılan SiH<sub>4</sub> akış değerleri ise 2  $\mu$ mol/min, 18  $\mu$ mol/min ve 186  $\mu$ mol/min' dir. %25 Al içeriğine sahip N18 ve N19 numaralı örnekler büyütülürken kullanılan TMGa, TMAI ve AsH<sub>3</sub> akışları sırasıyla 593  $\mu$ mol/min, 158  $\mu$ mol/min ve 44600  $\mu$ mol/min'dir. %25'lik Al içeriğine sahip olan N18 ve N19 numaralı örnekler büyütülürken kullanılan SiH<sub>4</sub> akış parametreleri 0.5  $\mu$ mol/min, 0.9  $\mu$ mol/min ve 15  $\mu$ mol/min' dir. Al içeriği %30 olan N20, N21 ve N22 numaralı örnekler büyütülürken kullanılan TMGa, TMAI ve AsH<sub>3</sub> akışları sırasıyla 594  $\mu$ mol/min, 158  $\mu$ mol/min ve 44600  $\mu$ mol/min' dür. N20, N21 ve N22 numaralı büyütmelemlerde kullanılan SiH<sub>4</sub> akışları ise 1.44  $\mu$ mol/min, 4.06  $\mu$ mol/min ve 35.6  $\mu$ mol/min' dir.



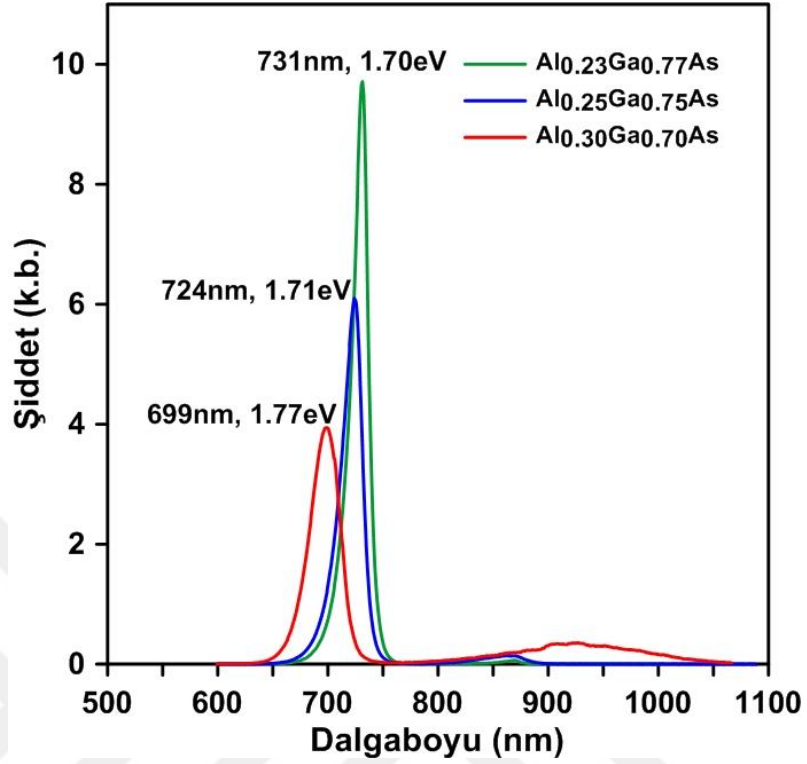
**Şekil 5.44** Farklı alimünyum alaşım oranlarına sahip örneklere ait yerinde yansıma eğrileri GaAs alttaş üzerine büyütülen üç farklı alüminyum alaşım oranına sahip n-tipi Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As büyütme çalışmalarında numunelerin alaşım oranları XRD ölçüm ve simülasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 5.45' deki yeşil, mavi ve kırmızı renkli eğriler XRD ölçüm

sonuçlarını gösterirken, siyah noktalı eğri ise alimünyum alaşımını belirlemek için ölçümlere Global fit programı kullanılarak uygulanan simülasyon sonuçlarını göstermektedir.



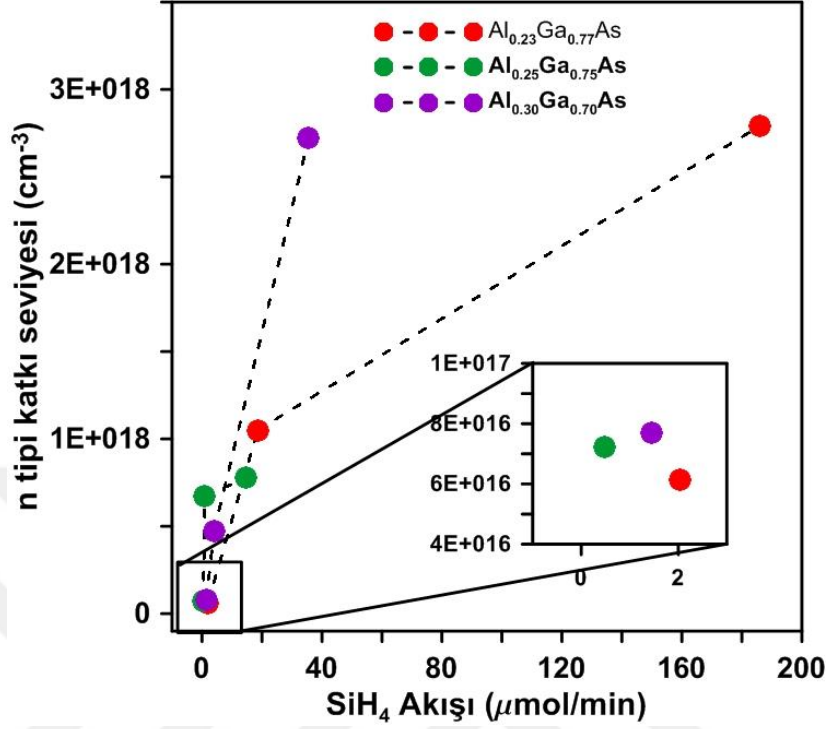
**Şekil 5.45** Farklı alimünyum alaşım oranlarına sahip numunelere ait HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

Farklı alüminyum alaşım oranına sahip n tipi katkılı  $Al_xGa_{1-x}As$  yapılarından oluşan numuneler üzerine oda sıcaklığında PL ölçümü uygulanmıştır (Şekil 5.46). Farklı alimünyum alaşım oranına sahip olan örneklerin 699nm, 724nm ve 731nm de PL piki verdiği görülmüştür. Bu ölçümler alınırken numuneler 532nm dalga boyunda ışık yayan NdYAG lazer ile uyarılmış ve numuneden detektöre yansıyan ışık CCD512-BT-TE dedektör kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm esnasında kullanılan lazerin gücü 47 mW, ölçümün alındığı tarama aralığı 40 pts/s, kullanılan slit genişliği 0,1 ve ızgara (grating) açıklığı 300g/mm-1000' dir.



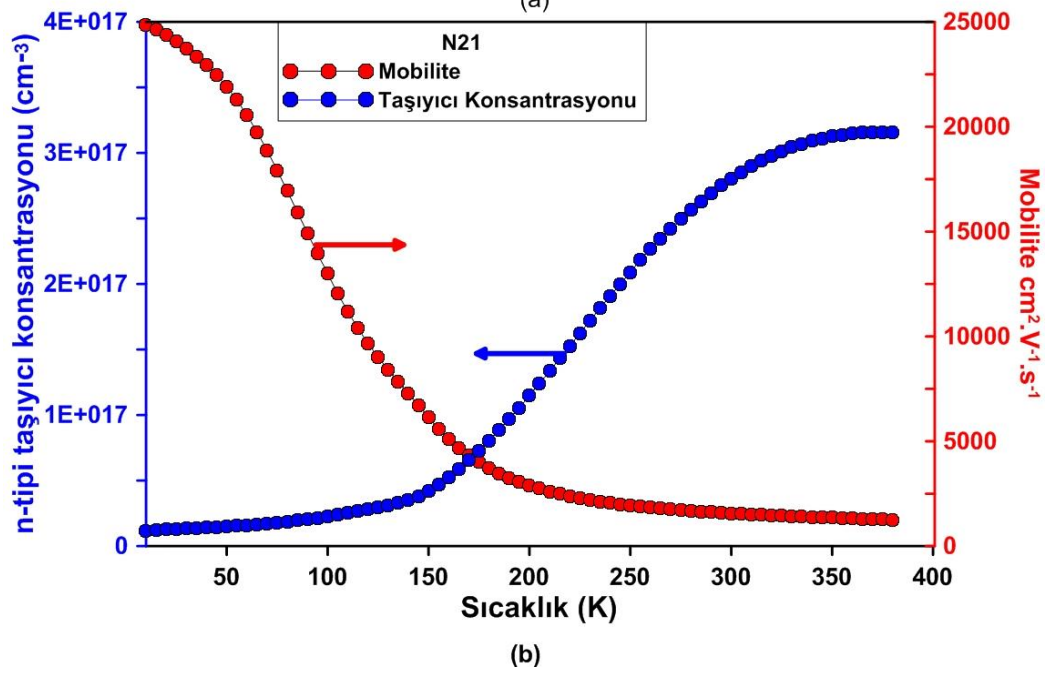
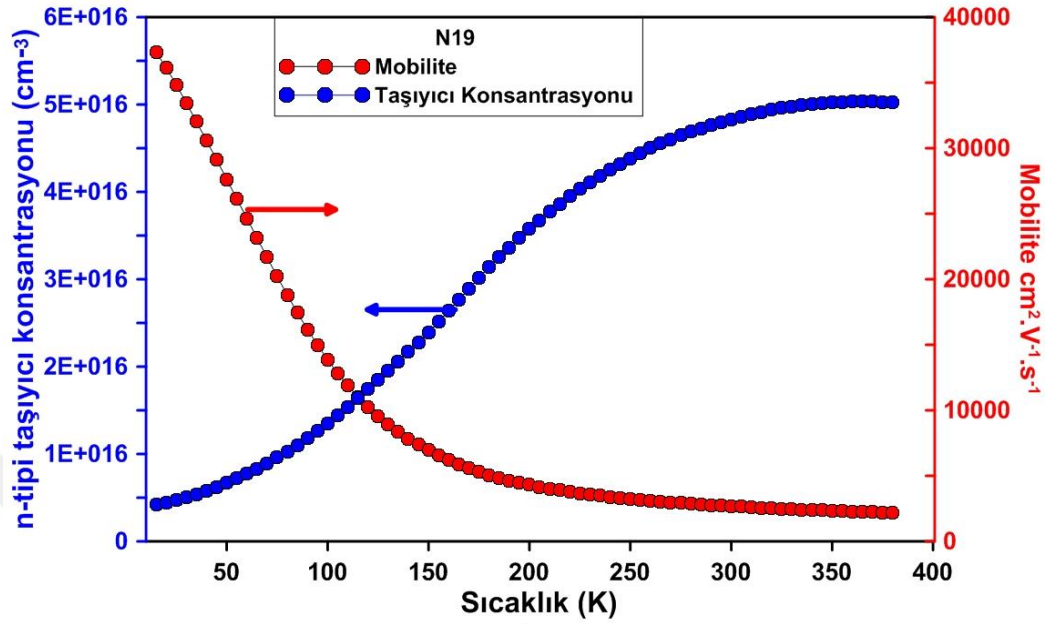
**Şekil 5.46** Farklı Alimünyum alaşım oranlarına sahip numunelerin oda sıcaklığındaki PL ölçüm sonuçları

Farklı alüminyum alaşım oranlarına sahip olan örneklerin büyütmede kullanılan SiH<sub>4</sub> akışına bağlı olarak katkı seviyeleri ECV ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. %23 Al içeriğine sahip olan N16 ve N17 numaralı örnekler katkılanırken kullanılan SiH<sub>4</sub> akış değerleri 2 µmol/min, 18 µmol/min ve 186 µmol/min' dür, bu akışlara karşılık gelen katkı seviyeleri ise sırasıyla 6.12E+16cm<sup>-3</sup>, 1.05E+18 cm<sup>-3</sup> ve 2.79E+18 cm<sup>-3</sup>' dür.%25 Al içeriğine sahip N18 ve N19 numaralı örnekler katkılanırken kullanılan SiH<sub>4</sub> akış parametreleri 0.5 µmol/min, 0.9 µmol/min ve 15 µmol/min' dir, bu akışlara karşılık gelen katkı seviyeleri ise sırasıyla 7.23E+16cm<sup>-3</sup>, 6.7E+17 cm<sup>-3</sup> ve 7.77E+17 cm<sup>-3</sup>' dür. N20, N21 ve N22 numaralı büyütmelerde kullanılan SiH<sub>4</sub> akışları ise 1.44 µmol/min, 4.06 µmol/min ve 35.6 µmol/min'dir, bu akışlara karşılık gelen katkı seviyeleri ise sırasıyla 7.71E+16 cm<sup>-3</sup>, 4.72E+17 cm<sup>-3</sup> ve 2.72E+18 cm<sup>-3</sup>' dür (Şekil 5.47).



Şekil 5.47 Farklı alimünyum alaşım oranına sahip numuneler için SiH<sub>4</sub> akışına ait n-tipi katkı seviyesi ölçümü

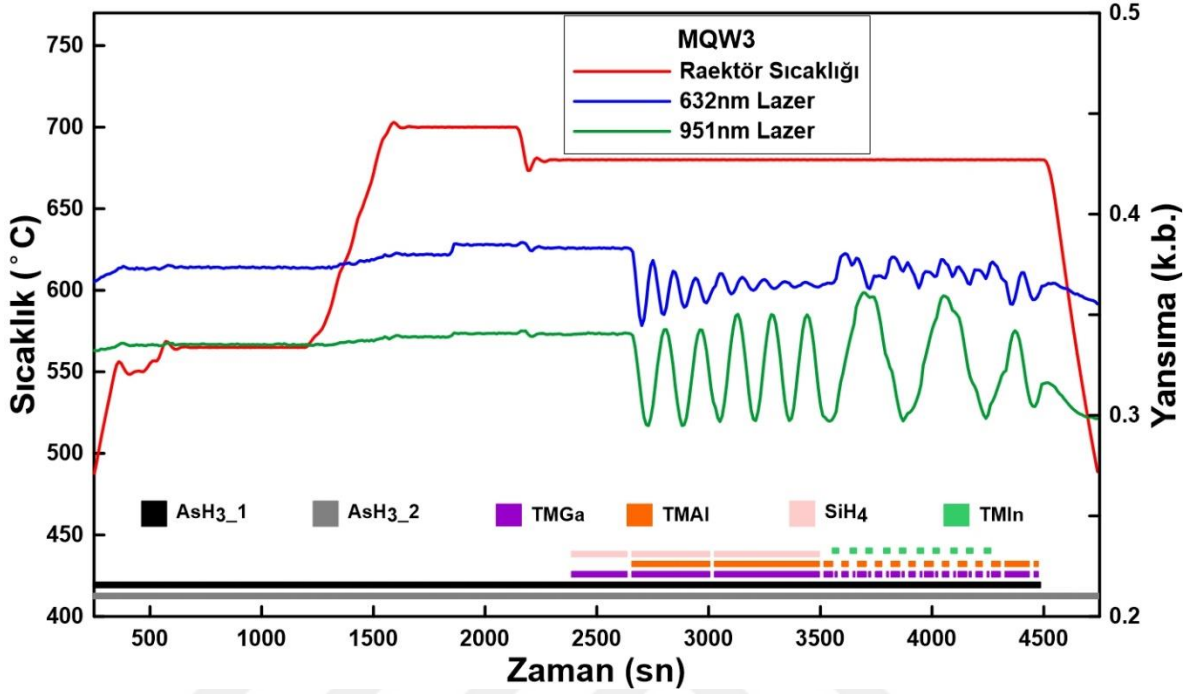
Şekil 5.48’ de sabit SiH<sub>4</sub> akışı kullanılarak büyütülen N19 ve N21 numaralı örnekler üzerine 250μA akım uygulandığında 1T manyetik alan altında sıcaklığa bağlı taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite ölçümleri alınmıştır. Bu çalışmada hall ölçümleri alınırken sıcaklık 50K’den 350K’ e kadar değiştirilmiştir. Şekil 5.48’deki mavi eğri sıcaklığa bağlı olarak n-tipi katkı seviyesindeki değişimi gösterirken, kırmızı renkli eğri sıcaklığa bağlı olarak hall mobilitesindeki değişimi gösterir. Sıcaklık azaldıkça mobilite değerinin sıcaklıktaki azalmaya bağlı olarak arttığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise optik fonon saçılmalarından dolayı mobilite değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Taşıyıcı konsantrasyonunun ise çalışılan sıcaklık aralığında sıcaklık arttıkça arttığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 5.48** N19 ve N21 numaralı numuneler için ölçüm sıcaklığına bağlı olarak n-tipi taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilite değişimi



## 5.5 InGaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyu



**Şekil 5.49** MQW3 isimli örneğin büyütmeye ait yerinde yansıma (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

MOCVD epitaksiyel büyütmeye yöntemi kullanılarak büyütülen farklı indiyum alaşım oranlarına sahip 10 tekrardan oluşan  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  MQW yapıları büyütülmüş ve MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 şeklinde isimlendirilmiştir. Tüm MQW yapıları lazer büyütmeye gerçekleştirildiğinde katmanlar üzerinde oluşacak gevşeme ve gerilme etkilerini doğru analiz etmek için (001) yönelimli GaAs alttaş üzerine büyütülen, ~300nm n tipi katkılı  $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$  kılıf, ~100nm n tipi katkılı  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  dalga kılavuzu katmanı üzerine büyütülmüştür. Ayrıca kuantum kuyu ve bariyer katmanlarının büyütülmesi tamamlandıktan sonra kuyu ve bariyer katmanlarının üzerine de katkısız 100nm kalınlığında  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  katmanı büyütülerek MQW büyütme tamamlanmıştır. Kuantum kuyu büyütme yapıları için reaktöre gönderilen indiyum akışı hariç diğer bütün büyütmeye parametreleri sabit tutulmuştur. MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapıları büyütülürken kullanılan indiyum akışları sırasıyla 38.06  $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 46.53  $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 81.95  $\mu\text{mol}/\text{min}$ , 141.3  $\mu\text{mol}/\text{min}$ ' dir. Bu büyütme yapıları için MQW3 yapısına ait yerinde yansıma ölçüm sonuçları Şekil 5.49'da verilmiştir. Büyütülen yapıların kristal özellikleri HR-XRD ölçüm yöntemi kullanılarak incelendi. Şekil 5.50'de MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 isimli dört farklı örneğin (004)



GaAs yönelimine göre ölçülen HR-XRD ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 5.50’deki kırmızı renkli eğriler HR-XRD ölçüm yöntemi uygulanarak elde edilen ölçüm sonuçlarını, mavi renkli eğriler ise global fit programı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Olarak elde edilmiştir. Ölçüm alınırken kaynak kolunda; Ge (220)x4 monochromator, Parallell Beam, 2mm genişlikli slit kullanılmıştır. Dedektör kolunda ise solar slit 5° kullanılmıştır. Ölçümler üzerine uygulanan XRD simülasyon sonuçları ile belirlenen MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapıları için belirlenen indiyum alaşım oranları sırasıyla 0.089, 0.108, 0.178 ve 0.278’dir.

Şekil 5.50’deki iyi tanımlanmış uydu pikleri tabaka periyodikliğinin oldukça iyi olduğunu ve ara yüzeylerin keskin olduğunu göstermektedir. Uydular arasındaki girişim saçakları pendellüsong saçakları olarak adlandırılır ve bu saçakların varlığı epitaksiyel katmanların oldukça yüksek kalitede büyüdüğünü göstermektedir. Çünkü ara yüzeydeki kusurlar, relaksasyon ya da kompozisyonel homojensizlik koherent faz kaybına neden olur ve bunun sonucunda pendellüsong saçakları ile uydu piklerinin sayısında azalma görülür. Şekil 5.50’de verilen MQW yapılarının HR-XRD ölçüm sonuçları incelendiğinde uydu pikleri arasında 8 tane pendellüsong saçığı olduğu, başka bir ifade ile kuantum kuyudaki indiyum alaşım oranı artsa bile yapılarındaki pendellüsong saçaklarının sayısının değişmediği görülmektedir. Bu da çalışma kapsamında büyütülen her dört yapının da epitaksiyel katmanlarının oldukça yüksek kalitede büyüdüğünün bir göstergesidir.

$\Delta\theta_0$  sıfırcı dereceden uydu piki ile GaAs (004) yansıması arasındaki açısal ayırmadır ve bunun değeri büyütme eksenini boyunca MQW yapılarının ortalama örgü uyumsuzluğunu vermektedir. Sıfırcı mertebeden pikin konumunu belirleyerek MQW yapılarında oluşacak olan gerilme değerini hesaplamak mümkündür. Sıfırcı mertebeden pik ya en güçlü piktir ya da alttaş pikine en yakın olan uydu pikidir, ancak karmaşık MQW yapılarında bu böyle değildir. Sıfırcı pikin konumunun tam olarak belirlenemediği durumlarda pikin durumunu doğru bir şekilde belirlemek için Dinamik XRD teorisi kullanılarak simülasyon yapılır. Yapılan simülasyon sonucu InGaAs ve AlGaAs yapılarının büyütme yönelimine paralel (out-plane) örgü sabiti değerleri ve her birinin hücre sayısı belirlenir. Belirlenen değerler Denklem [5.2]’de yerine yazılarak yapının (001) yönelimi boyunca ortalama örgü sabiti hesaplanır.

Ortalama örgü sabiti değeri Bragg yasasında yerine yazılarak sıfıncı mertebeden süper örgü pikinin konumu belirlenir.

$$a_0 = (a_{InGaAs}^{\perp} N_{InGaAs} + a_{AlGaAs}^{\perp} N_{AlGaAs}) / N \quad [5.2]$$

Bu denklemde  $a_0$  ortalama örgü sabiti,  $a_{InGaAs}^{\perp}$  InGaAs kuantum kuyunun büyütme yüzeyine dik (büyütme düzlemine paralel) örgü sabiti,  $a_{AlGaAs}^{\perp}$  AlGaAs bariyer tabakasının büyütme yüzeyine dik örgü sabiti,  $N_{InGaAs}$  InGaAs katmanının hücre sayısı,  $N_{AlGaAs}$  ise AlGaAs katmanının hücre sayısı ve  $N = N_{InGaAs} + N_{AlGaAs}$  ile verilen kuyu ve bariyer katmanlarının hücre sayısıdır. Belirlenen büyütme düzlemine paralel örgü sabitleri ve ortalama örgü sabiti değerleri Denklem [5.3]'da yerine yazılarak MQW yapısının ortalama örgü uyumsuzluğu değeri de hesaplanır.

$$\varepsilon \equiv \frac{a_{InGaAs}^{\perp} - a_0}{a_0} \quad [5.3]$$

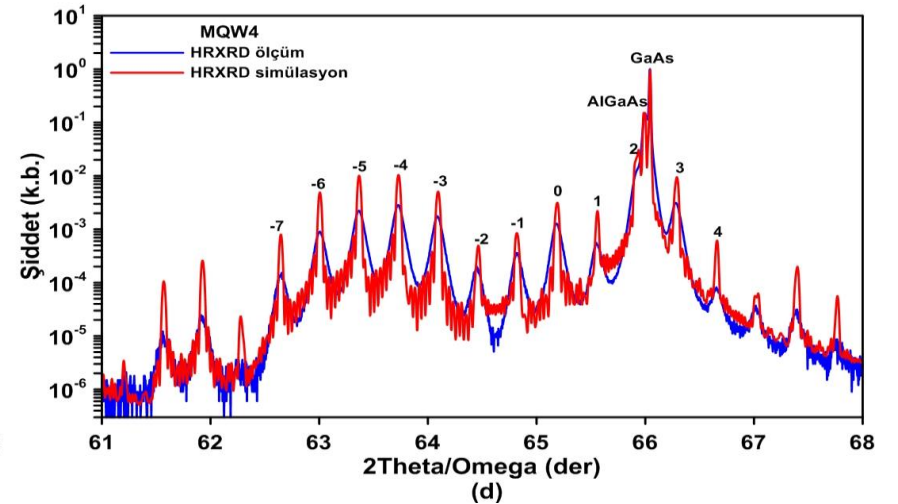
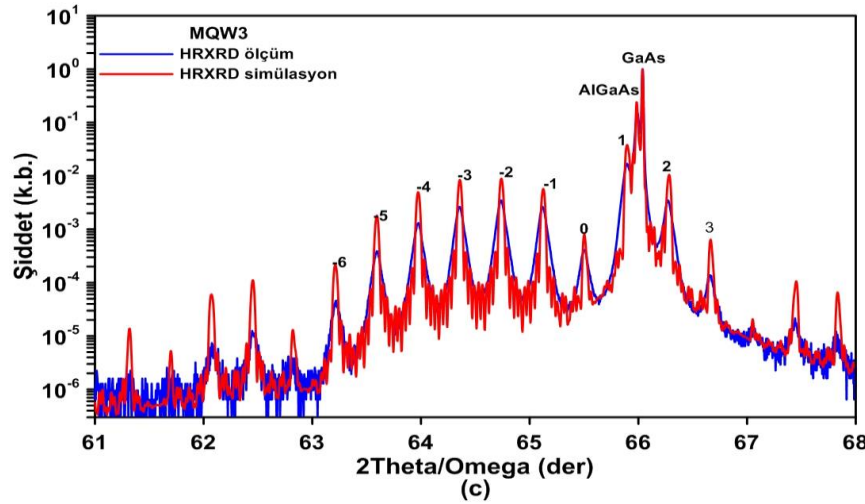
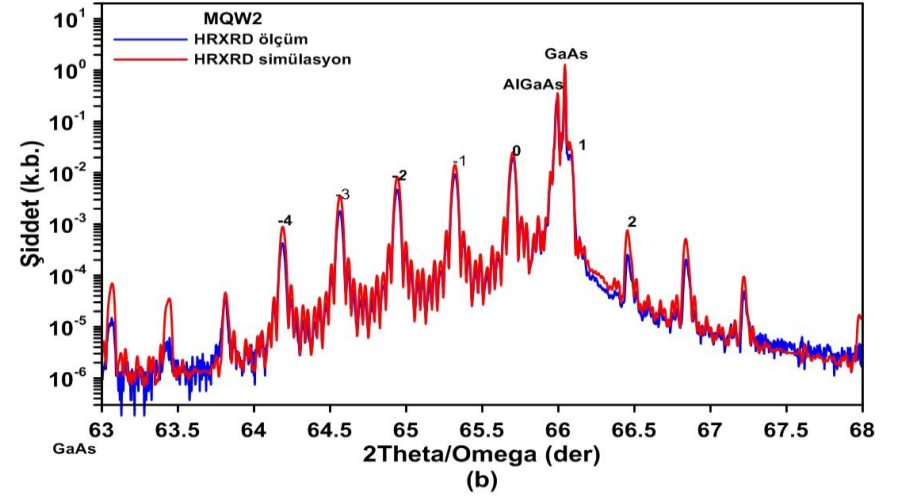
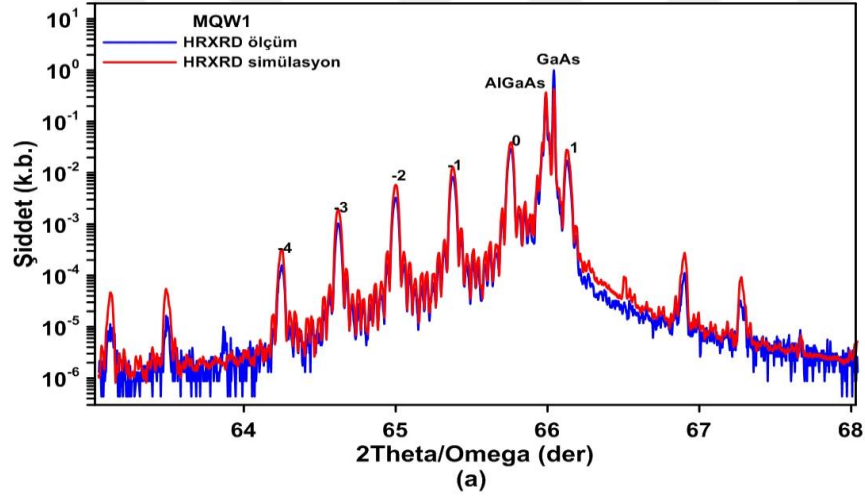
Çizelge 5.8'de MQW yapılarına uygulanan dinamik XRD simülasyonlarıyla belirlenen kuantum kuyu ve bariyer yapılarına ait büyütme düzlemine paralel örgü sabiti değerleri, hücre sayısı değerleri ve hesaplanan sıfıncı pikin ortalama örgü sabiti, konumu ve MQW yapısının ortalama örgü uyumsuzluğu değerleri verilmiştir. Şekil 5.50'de hesaplanan sıfıncı pik konumuna karşılık gelen uydu piki üzerine sıfır yazılarak dört MQW yapısı içinde sıfıncı pik konumları gösterilmiştir.

**Çizelge 5.8** MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapılarının dinamik XRD simülasyonunla belirlenen parametreleri

Numune Adı	$a_{InGaAs}^{\perp}$ (Å)	$a_{AlGaAs}^{\perp}$ (Å)	$N_{InGaAs}$	$N_{AlGaAs}$	$a_0$ (Å)	Sıfıncı uydu pikinin konumu ( $2\theta$ der)	Sıfıncı uydu pikinin FWHM (arcsec)	Ortalama örgü uyumsuzluğu (ppm)
MQW1	5,720	5,657	14,651	34,189	5,676	65,757	124,005	2,21E5
MQW2	5,738	5,657	14,107	34,674	5,680	65,699	121,085	2,73E5
MQW3	5,793	5,657	13,309	34,505	5,695	65,510	260,631	6,67E5
MQW4	5,857	5,657	15,814	34,270	5,720	65,186	288,506	4,11E5

MQW yapıları için sıfırıncı pikin FWHM değeri, yapıların arayüz kalitesini gösteren bir parametredir. Büyütülen 4 farklı indiyum alaşım oranına sahip MQW yapısının FWHM değerleri kıyaslandığında, FWHM değeri en yüksek olan MQW örneğinin kuyu yapısındaki indiyum alaşım oranının, dolayısıyla büyütme düzlemine dik yönelimdeki örgü sabitinin en yüksek olan örnek olduğu görülmektedir.





Şekil 5.50 MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapılarının HR-XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

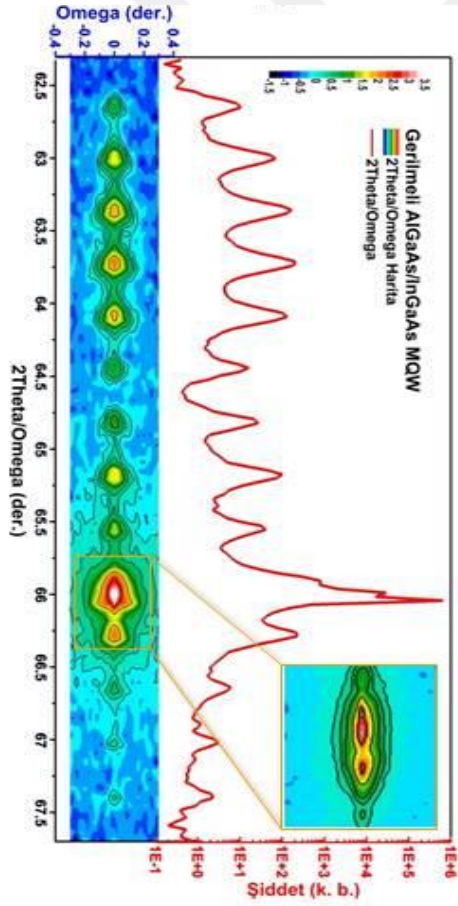
Şekil 5.51' de MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapıları üzerine (004) düzlemine göre GaAs referans piki etrafında yapılmış RSM (reciprocal space mapping- ters uzay haritalama) taramaları mevcuttur. Her bir RSM taramasının sol tarafındaki kırmızı renkli eğri; RSM taraması yapılırken omega açısının 2-theta açısının yarısına eşit olduğu anda alınan 2theta/omega taramasını göstermektedir. Yapılan RSM taramalarından görüldüğü gibi GaAs alttaş piki, Al<sub>0.30</sub>Ga<sub>0.70</sub>As kılıf tabakası piki, Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As dalga kılavuzu piki ve 10 tekrardan oluşan InGaAs/AlGaAs kuantum kuyu/bariyer tabakalarından kaynaklanan uydu piklerinin tamamı aynı omega açı değerinde oluşmuştur. Bu davranış epitaksiyel tabakaların (001) örgü düzlemi ile alttaşın (001) örgü düzlemi arasında  $\alpha$  ile simgelenen bir eğim (tilt) açısı olmadığını gösterir.

Şekil 5.51'deki (004) GaAs düzlemine göre yapılan taramalar kıyaslandığında kuantum kuyu yapısındaki indiyum içeriği arttıkça MQW yapısında uzunluk skalasında piklerin genişlediği görülmektedir. Bu da yapıdaki indiyum alaşım oranı arttıkça alttaş ve tabakalar arasındaki örgü uyumsuzluğunun artması sonucunda yapıda oluşacak olan dislokasyonlardan dolayı yapının kristal kalitesinin bozulmaya başladığının bir göstergesidir. Kuyudaki indiyum içeriği arttıkça piklerin hepsinde gözlemlenen genişleme MQW bölgesindeki gerilmeli relaksasyonun arttığına bir göstergesidir (Richards, 2015). Gerilmeli tabakaların relaksasyonu kavramı ilk olarak Romanato tarafından ortaya atılmış bir kavramdır. Gerilmeli tabakaların relaksasyonu threading dislokasyonlarının kaymasıyla oluşur. Relaksasyon sürecinin ilk aşamalarında, kayma dislokasyonları neredeyse dik çizgi yönelimli kusurlarla önceki dislokasyonların sayısını kesmek zorunda kalacak ve onların ilerlemesini engelleyecektir. Bu etki yarıiletken filmlerde oldukça yaygın olarak görülmektedir. Örgü uyumsuzluğunun yaklaşık %1,5'den daha az olduğu III-V yarıiletkenlerde, gerilme gevşemesi  $60^\circ$   $a/2$   $\langle 110 \rangle$   $\{111\}$  dislokasyonlarının oluşumuyla gerçekleşir. Bir zinc blend kristalde  $\alpha$  ve  $\beta$  olmak üzere iki farklı tipte  $60^\circ$  dislokasyonların oluşma olasılığı vardır.  $\alpha$  ve  $\beta$  tipi dislokasyonlar tamamen gerilmiş arayüzeyde  $[\bar{1}10]$  ve  $[110]$  çizgi yönelimlerine sahiptirler ve muhtemelen Ga- ve As- tabanlı çekirdeklerden dolayı oluşmaktadırlar.  $\alpha$  ve  $\beta$  tipi dislokasyon yapılarının farklı şekilde çekirdeklenmesine dislokasyon çekirdeklenmeleri ve kaymaları için gerekli aktivasyon enerjilerindeki büyük farkın neden olması beklenmektedir. Katkısız ve n tipi katkılı GaAs alttaş üzerine yapılan büyütmelemlerde  $\alpha$  tipi dislokasyonların kayma hızının  $\beta$  tipi dislokasyonlarına göre daha yüksek olduğu çeşitli

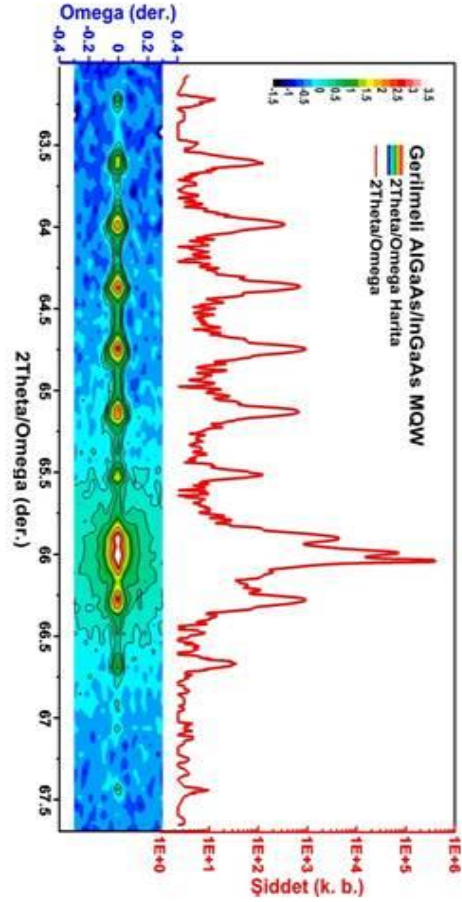
çalışmalarla belirlenmiş. Yapılan çeşitli çalışmalarda da  $\alpha$  tipi dislokasyonların InGaAs/GaAs ara yüzeyinde gerilmeli relaksasyon boyunca oluştuğu rapor edilmiş (Goldman, 1998 ).

Asimetrik düzlemde yapılan RSM taramaları heteroepitaksiyel yapıların dikey ve yanal örgü uyumsuzluğunu açığa çıkarır. Yanal örgü uyumsuzluğu tabakaların relaksasyon derecesini vermektedir.

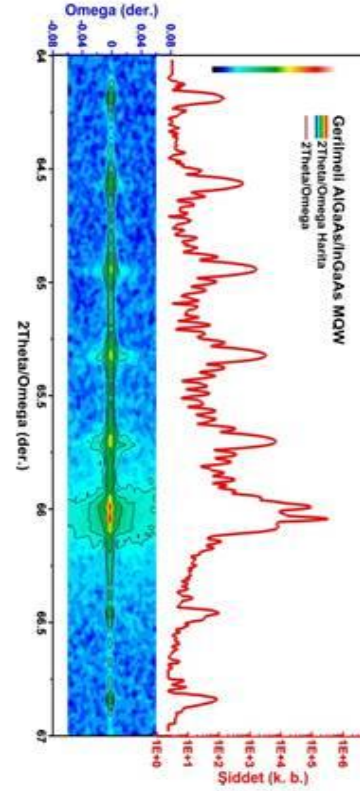
Şekil 5.52' de MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapıları üzerine (224) düzlemine göre GaAs referans piki etrafında uygulanmış RSM taramaları mevcuttur. Şekilde görüldüğü gibi bu çalışma kapsamında epitaksiyel olarak büyütülen tüm MQW yapılarında uydu piklerinin merkezinden ve alttaş merkezinden geçecek şekilde x eksenine normal olan ve pik çizgisi diye adlandırılan bir çizgi çizmek mümkündür. Çizilen pik çizgilerin x eksenine dik olması farklı indiyum alaşım oranları kullanılarak büyütülen InGaAs QW kuyu ile GaAs alttaş arasında büyütme yönelimine dik (in-plane) yönelimde örgü uyumunun olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da farklı indiyum alaşım oranları kullanılarak tekrarlı bir şekilde büyütülen MQW yapılarında bir gevşemenin (relaksasyonun) oluşmadığını göstermektedir. Yapıda herhangi bir gevşemenin olması durumunda pik çizgisinin saat yönünde dönmesi ve tamamen gevşemiş olduğu durumda pik çizgilerinin Şekil 5.52'de görülen dikdörtgenin uzun kenarına paralel olması beklenir.



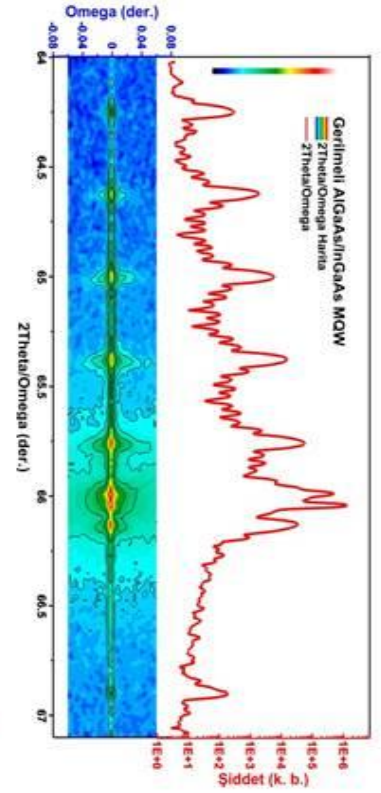
a)



b)



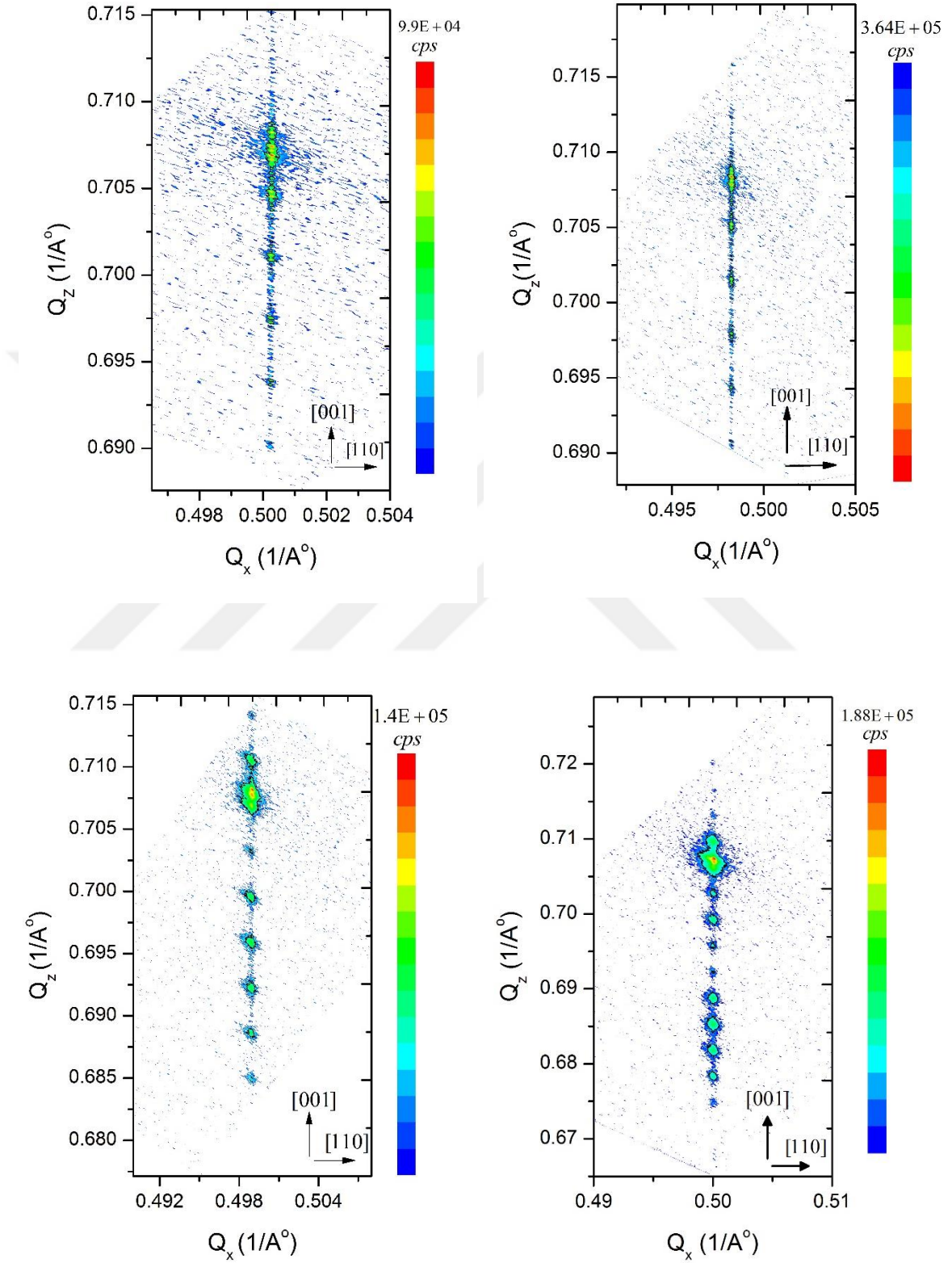
c)



d)

Şekil 5.51a) MQW4, b) MQW3, c) MQW2 ve d) MQW1 yapıları üzerine (004) düzlemine göre GaAs referans piki etrafında uygulanmış RSM taramaları

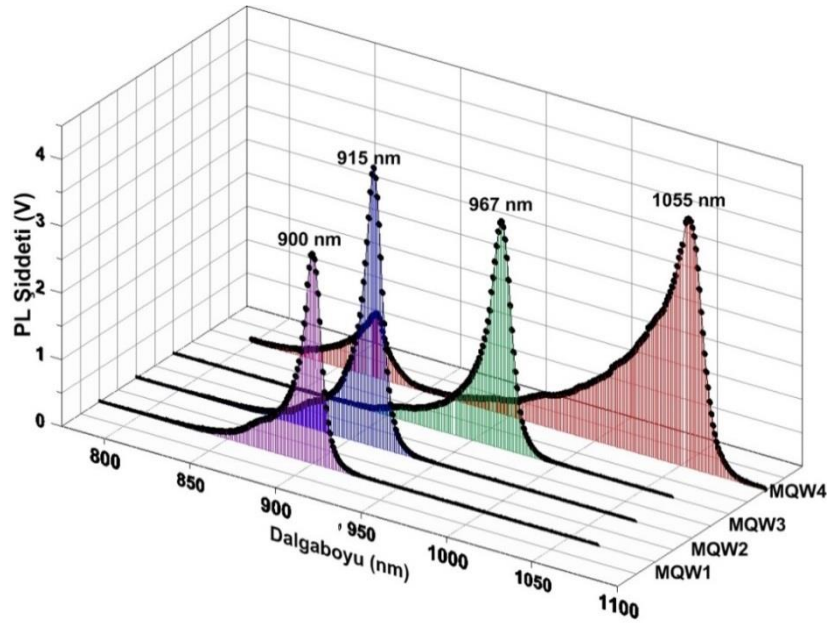




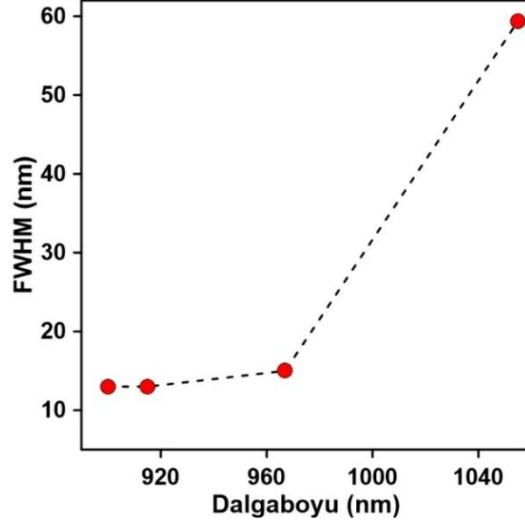
Şekil 5.51 MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapıları üzerine (224) düzlemine göre GaAs referans piki etrafında uygulanmış RSM taramaları



Farklı indiyum akışları kullanılarak büyütülen 10tekrarlı InGaAs/AlGaAs kuantum kuyu/bariyer tabakalarından oluşan MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 olarak adlandırılan numunelere ait PL ölçüm sonuçları Şekil 5.53’de verilmiştir. MQW1 ve MQW2 yapıları ölçülürken numuneler 532nm dalga boyunda ışık yayan 0.638mW güce sahip 532 NdYAG lazer kullanılarak uyarılmıştır. Kullanılan tarama adımı 40pts/s, açıklık 0.03mm ve ızgara genişliği 300g/mm-1000’dir. Ölçüm sonucunda MQW1 yapısının 900nm’de PL ışması verdiği gözlemlenmiştir, bu pikin FWHM (Tam genişlik yarı yükseklik) değeri ise 13nm’dir. MQW2 yapısı ise 915nm’de PL piki vermiştir ve FWHM değeri MQW1 yapısı ile aynıdır. MQW3 yapısına PL ölçümü uygulanırken yapı MQW1 ve MQW2’de olduğu gibi 532nm dalgaboylu lazer kullanılarak uyarılmıştır. Açıklık 0.1mm’ye çıkarılmış ve kullanılan lazerin gücü 1.63mW olarak ayarlanmıştır. Bu şartlar altında ölçüm alındığında MQW3 yapısının 967nm’de PL piki verdiği bulunmuştur. Bu pikin FWHM değeri ise 15nm’dir. MQW4 yapısı ölçülürken numune 785nm dalga boyunda ışık yayan lazer kullanılarak uyarılmıştır. Kullanılan lazerin gücü 59.4mW’dır. Ölçüm esnasında kullanılan açıklık 0.1mm, ızgara genişliği 300g/mm-1000, tarama oranı 40pts/s’dir. Yapılan tarama sonucunda MQW4 yapısının 1055nm dalga boyunda FWHM değeri 33,2nm olacak şekilde bir yayılım piki verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5,53’de MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapıları için PL ölçümü sonucunda elde edilen dalgaboyuna karşı FWHM değişim grafikleri verilmiştir.

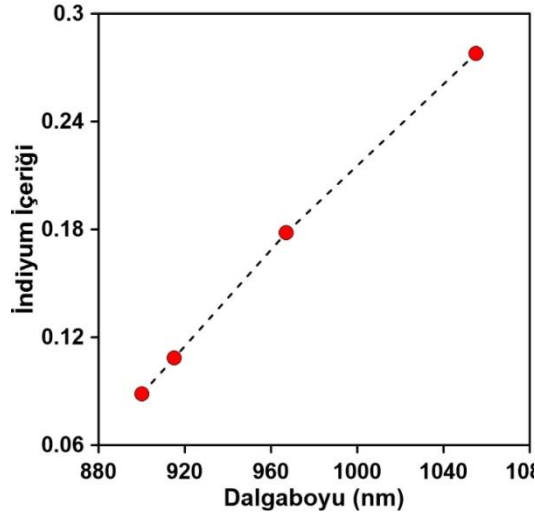


Şekil 5.52 MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 yapılarının PL ölçüm sonuçları



**Şekil 5.53** MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 için PL ölçümü ile belirlenen dalga boyuna karşı FWHM değişim grafiği

MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 için XRD simülasyonları sonucunda belirlenen indiyum alaşım oranına karşı, PL ölçümü ile belirlenen dalga boyu değişim grafiği Şekil 5.54 'de verilmiştir. Bu grafikten yararlanarak, 900 ile 1055nm arasındaki tüm dalga boylarında ışımaya yapan InGaAs kuantum kuyulu, InGaAs/AlGaAs lazer yapıları için kuyudaki indiyum alaşım oranı belirlenebilir ve farklı dalga boylarında lazerler üretilebilir.



**Şekil 5.54** MQW1, MQW2, MQW3 ve MQW4 için PL ölçümü ile belirlenen dalga boyuna karşı XRD simülasyonu sonucunda belirlenen InGaAs kuantum kuyusundaki indiyum alaşım oranı

## 5.6 LD Termal Dayanıklılık Çalışması

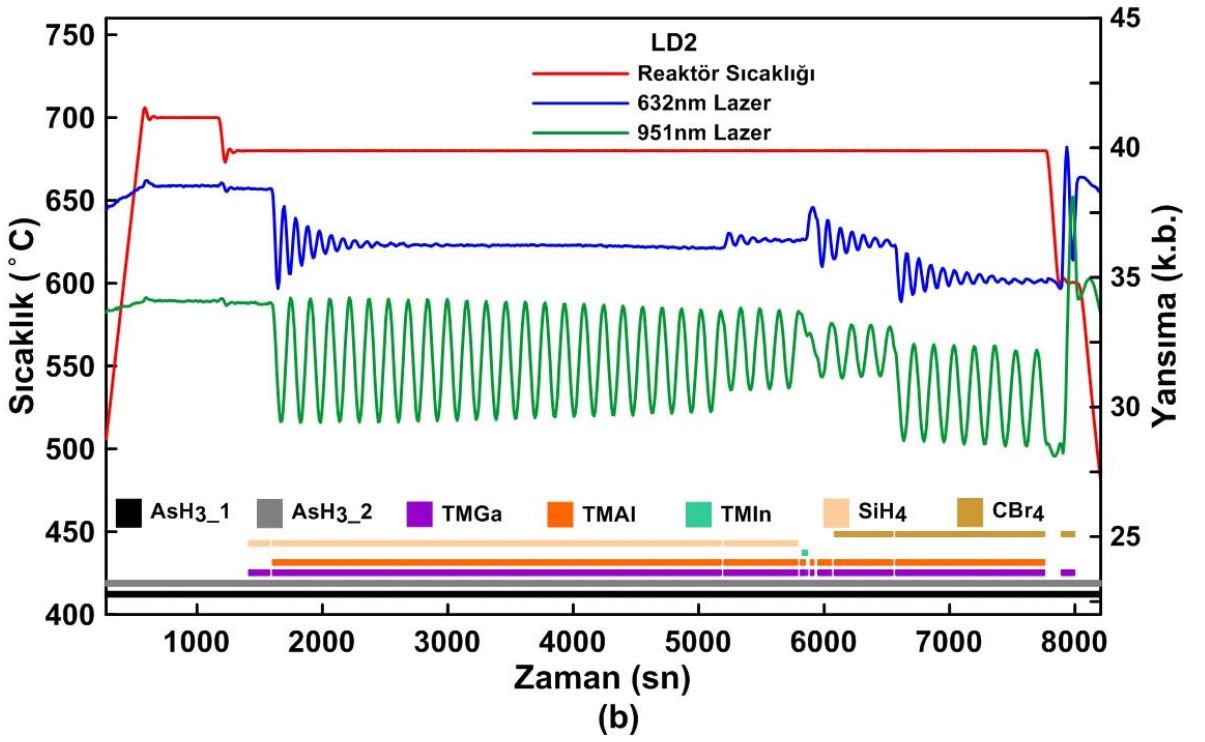
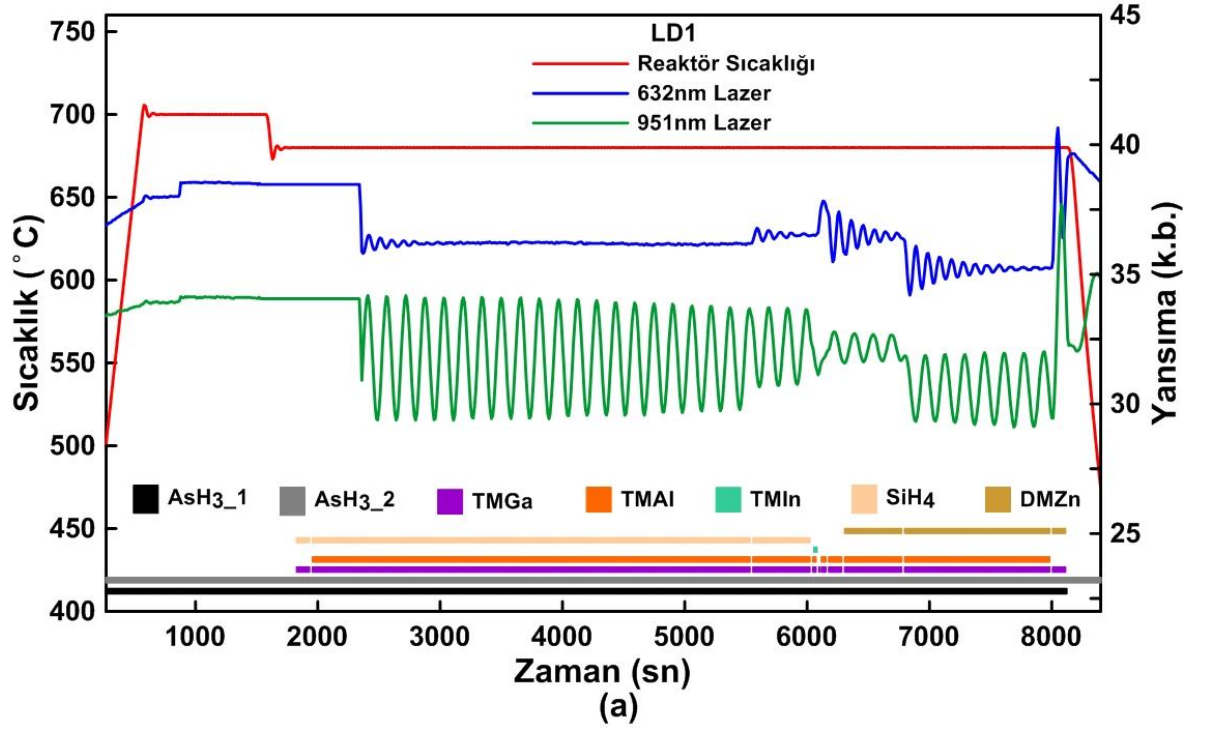
Yarıiletken lazerler temel olarak iki yüzey arasında kazanç sağlamak amacıyla üretilmektedir. Bir lazer yüksek çıkış gücünde sürüldüğü zaman, yüzey bölgeleri ışığı soğuracağından ısınır ve bunun sonucunda lazer yapısı geri dönüşü olmayan bir şekilde bozulur. Bu etki lazerin ölümcül optik hasarı (catastrophic optical damage, COD) olarak adlandırılır ve belirli bir maksimum enjeksiyon akımında çıkış gücünde ani düşme ile karakterize edilir (Sanayeh, 2008 ). Son 30 yıldır InGaAs/AlGaAs, InGaAsP/InGaP ve Al içermeyen InGaAs/InGaP kuantum kuyu/bariyer katmanından oluşan farklı malzeme gruplu lazer yapıları üzerinde COD etkisini engellemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. COD etkisini önlemek amacıyla uygulanan yöntemler şunlardır; yüzey oksidasyonunu azaltmak için uygun yüzey (facet) pasivasyonu yapmak, aynalardaki yüzey rekombinasyonlarını azaltmak için akımı engellemek, oradaki soğurmayı azaltmak için yüzey yakınında kuantum kuyu iç karışımı (quantum well intermixing, QWI) yöntemini kullanmak. Bu teknikler arasında en yaygın olarak kullanılan teknik hem uygulama kolaylığından hem de maliyeti diğer yöntemlere göre çok daha düşük olduğundan QWI yöntemidir.

QWI yöntemi bir yarıiletken kuantum kuyu yapısının bant aralığını kontrol edilebilir bir şekilde artırmak için geliştirilen bir yöntemdir. Örneğin GaAs kuantum kuyusu ve AlGaAs kuantum bariyerinden oluşan bir yarıiletken malzeme grubu üzerine QWI tekniğinin uygulandığını varsayarsak kuantum kuyu yapısının dalga boyu QWI uygulanmadan önceki durumuna göre parabolik bir şekilde ışık tayfında maviye doğru kayacaktır. Başka bir ifade ile dalga azalacak enerji bant aralığı ise artacaktır. QWI ile ilgili çalışmaların en önemli özelliği bant aralığı kontrolü ile ilişkili olmasına rağmen, kırılma indisindeki değişim de gömülü dalga kılavuzu yapmak için kullanılır. Tüm bu avantajlarından dolayı QWI pasif ve aktif bölgeci fotonik cihaz ya da fotonik entegre devrelerin fabrikasyonuna izin vermesinden dolayı seçici olarak uygulanmaktadır. Şu ana kadar uygulanan birçok iç karışım yöntemi mevcuttur. Bunlardan en yaygın olanları;

- i) Safsızlıklardan kaynaklanan bozukluklar (impurity induced disordering)
- ii) Serbest-Safsızlıkların oluşturduğu boşluklardan kaynaklı kusurlar (impurity free vacancy disordering)
- iii) İyon ekiminden kaynaklı kusurlar (ion implantation induced disordering)

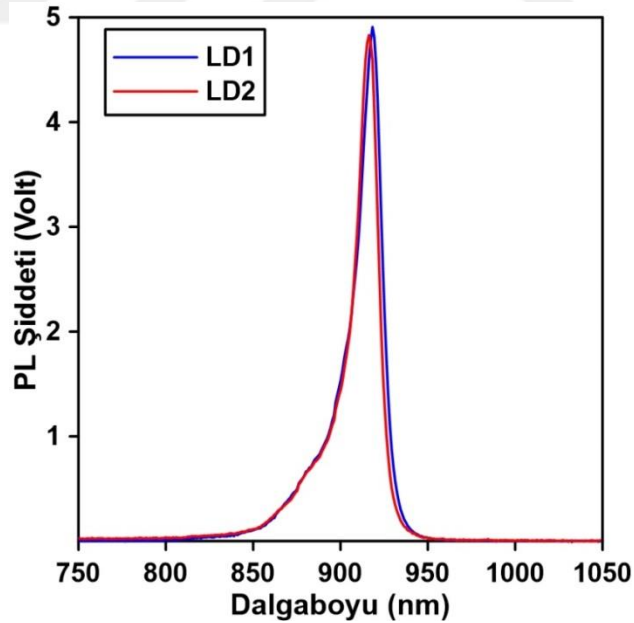
COD (catastrophic optic damage) olayının engellenmesi için bant aralığı açma QWI (quantum well intermixing) tekniğinin seçildiği lazer diyot uygulamalarında kuyu ve bariyer arasındaki iç difüzyonu başlatmak için lazer yapılarının yüksek sıcaklıkta tavlama gerekmektedir. Fakat intermixing için gerekli olan yüksek sıcaklıkta lazer yapılarının tavlama örneğinin fiziksel özelliklerini etkileyeceğinden, diyot performansını olumsuz yönde etkiler. Bu yüzden de numune üzerine fabrikasyon işlemi yapılmadan önce lazer diyot yapılarının termal dayanıklılıklarının çalışılması gerekmektedir. Bu amaçla p-tipi kontak, kılıf ve dalga kılavuzu tabakası Zn katkıları ile büyütülen lazer diyot yapısı ile C katkıları ile büyütülen lazer diyot yapılarından kesilen  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  boyutundaki parçalar  $850^\circ\text{C}$ - $925^\circ\text{C}$  sıcaklık aralığında azot akışı altında hızlı termal tavlama (rapid thermal annealing, RTA) ile 60s boyunca tavlama yapıldı. Tavlama yapılarına uygulanan PL ve XRD ölçüm yöntemleriyle termal tavlamanın numunelerin yapısal ve optik özelliklerini nasıl etkilediği incelendi. Ayrıca ECV ölçüm yöntemi kullanılarak tavlama sıcaklığının lazer yapısının elektriksel özelliğini nasıl etkilediği araştırıldı. Tavlama esnasında yüzeydeki arsenik kaybını minimize etmek için GaAs kapama yöntemi (GaAs proximity capping method) uygulandı.

Termal tavlamanın lazer yapısı üzerine etkisinin incelendiği bu çalışmada InGaAs/AlGaAs kuantum kuyu/bariyer tabakasından oluşturulduğu p tipi dalga kılavuzu ve kılıf tabakasının ayrı ayrı DMZn ve  $\text{CBr}_4$  kullanılarak katkılandığı iki farklı lazer diyot yapısı (0 0 1) yönelimli n+ GaAs alttaş üzerine büyütüldü. Büyütme reçetesi daha önceki MQW, p-tipi ve n-tipi katkıları çalışmaları adım adım belirlenen MOCVD akış parametreleri kullanılarak hazırlanmıştır. p-tipi katkı malzemesi olarak DMZn metal organik kaynağının kullanıldığı lazer diyot yapısı LD1 olarak isimlendirilmiştir,  $\text{CBr}_4$ 'ün kullanıldığı lazer diyot yapısı ise LD2 olarak isimlendirilmiştir. LD yapıları büyütülürken optik alan dağılımının büyük çoğunluğunun n-tipi tabakalarda yoğunlaştırıldığı asimetrik lazer diyot dizaynı kullanılmıştır. p-tipi kılıf katmanı olarak kullanılan  $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$  tabakası farklı taşıyıcı konsantrasyonu değerlerinde basamaklı bir şekilde katkılanmıştır. Büyütmeler esnasında yerinde yansıma ölçüm sistemi kullanılarak gözlemlenen yansıma ve sıcaklık eğrileri şekil 5.55' de verilmiştir.

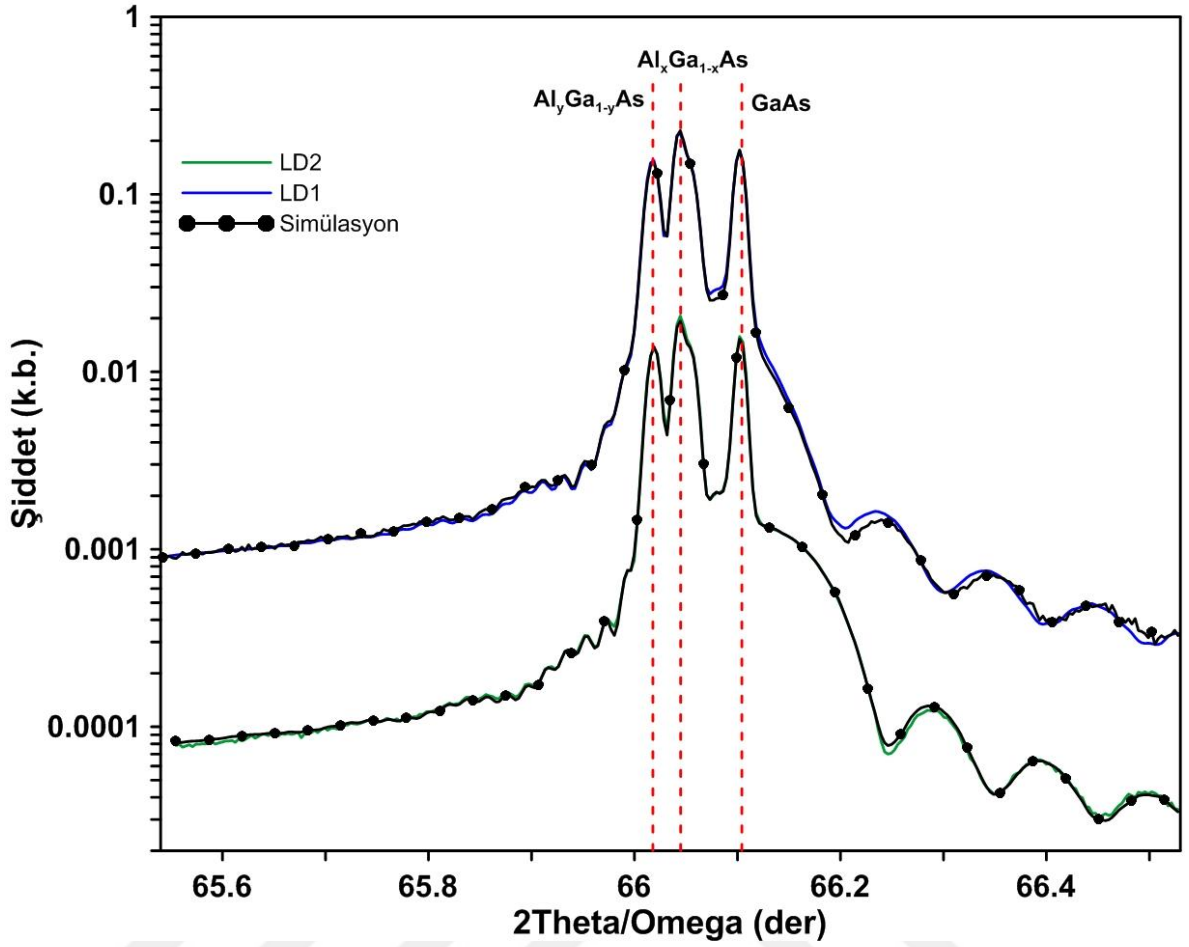


Şekil 5.55 LD1 ve LD2 isimli örneklere ait yerinde yansımaya (mavi ve yeşil) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri

p-tipi katkı malzemesi olarak DMZn ve CBr<sub>4</sub>'ün kullanıldığı LD1 ve LD2 yapılarının aynı dalgaboyunda ışıma verdiğini gösteren PL ölçüm sonuçları Şekil 5.56'da verilmiştir. Ayrıca yapıların kristal kalitesini belirlemek için XRD ölçüm yöntemi kullanılmıştır (Şekil 5.57). Bu grafikteki mavi eğri LD1 yapısına ait XRD ölçüm sonucunu gösterirken, yeşil eğri LD2 yapısına ait XRD ölçüm sonucunu, kesikli siyah eğriler ise global fit programı ile elde edilen simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Her iki numunenin XRD ölçüm sonucunda da gözlemlenen kalınlık osilasyonları ara yüzeylerin oldukça keskin olduğunu ve kristal kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. GaAs pikinin sol tarafındaki AlGaAs piklerinin aynı Bragg açısı değerinde pik vermesi ve davranışlarının aynı olması, istenildiği gibi katkı atomları hariç yapıların alaşım oranı, kalınlık gibi yapısal özelliklerinin aynı olduğunu gösterir. LD2 yapısının sağ tarafında geniş bir omzun bulunmasının nedeni ise daha önce de bahsedildiği gibi C atomunun atomik yarıçapının yerini aldığı As atomunun atomik yarıçapından çok daha küçük olmasından dolayı yapıda gözlemlenen gerilme etkisinden kaynaklanmaktadır. LD1 yapısının sağ tarafında geniş bir omzun bulunmamasının nedeni ise p-tipi katkı maddesi olarak kullanılan Zn atomunun, atomik yarıçapının yerini aldığı As atomunun atomik yarıçapı ile neredeyse aynı olmasıdır.



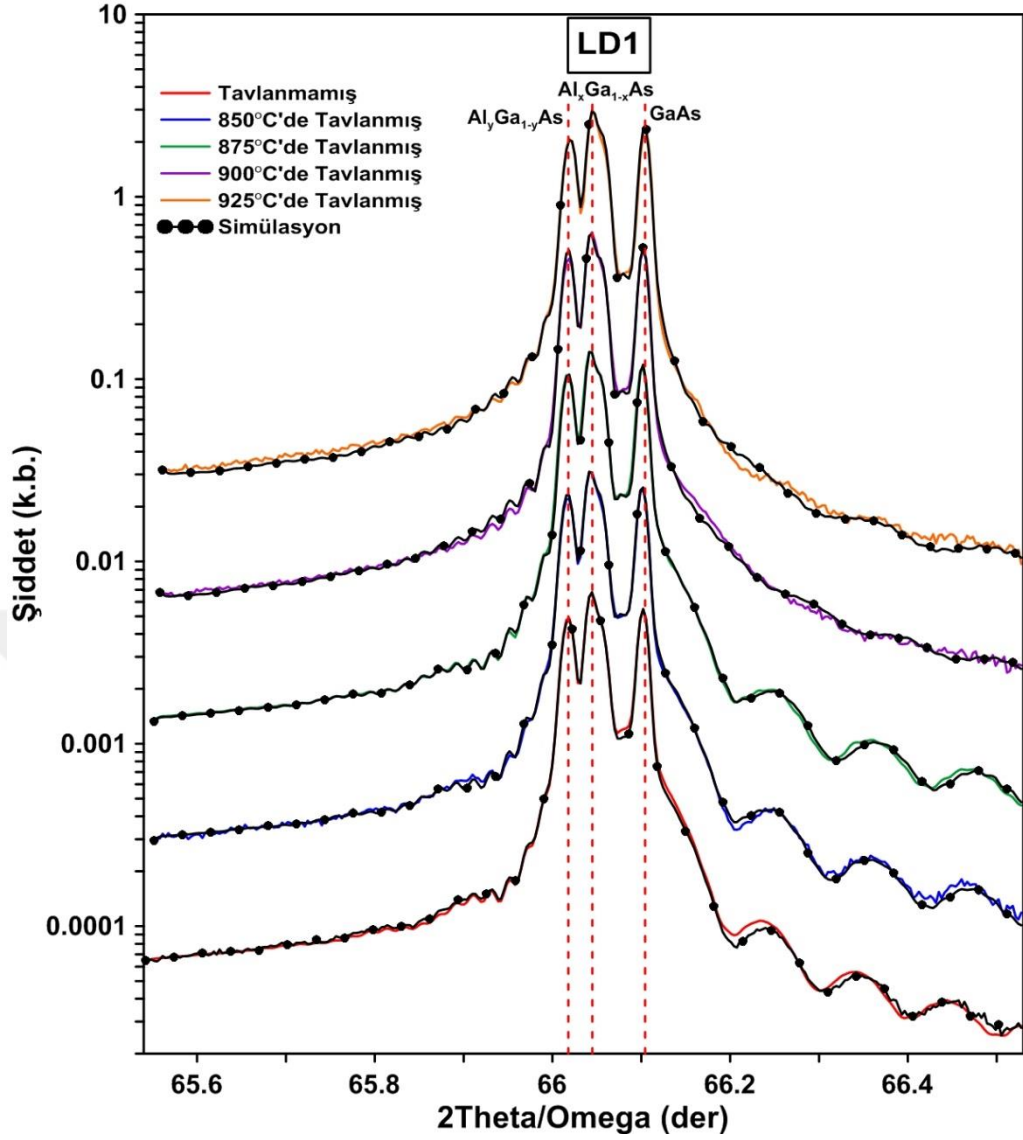
Şekil 5.56 LD1 ve LD2 yapılarının PL ölçüm sonuçları



Şekil 5.57 LD1 ve LD2 yapılarına ait XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

p-tipi kılıf ve dalga kılavuzu tabakaları; DMZn kullanılarak katkılanan LD1 yapısından kesilen  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  boyutundaki parçalar dört farklı sıcaklık ( $850^\circ\text{C}$ ,  $875^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$  ve  $925^\circ\text{C}$ ) değerinde azot akışı altında RTA ile 60s tavlandıktan sonra kristal kalitesindeki değişim XRD ölçüm ve simülasyon yöntemi kullanılarak incelendi (Şekil 5.57). Tavlınmamış örneklerle farklı sıcaklıklarda tavlanan örneklerde gözlemlenen kalınlık osilasyonlarındaki değişim kıyaslandığında  $875^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ara yüzey keskinliğinin azaldığı ve buna bağlı olarak GaAs pikinin sağ tarafındaki osilasyonların yüksek sıcaklıklarda kaybolduğu görülmektedir. Grafikler üst üste çizilerek incelendiğinde tavlama sıcaklığına bağlı olarak yapıdaki gerilmenin değiştiği gözlemlenmiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça GaAs pikinin sağ tarafındaki omuz daralıp GaAs'daki gerilmenin az miktarda azaldığı gözlemlenirken, AlGaAs pikinin sol tarafında çok az miktarda bir genişlemenin olduğu yani gerilme değerinin arttığı gözlemlenmiştir.



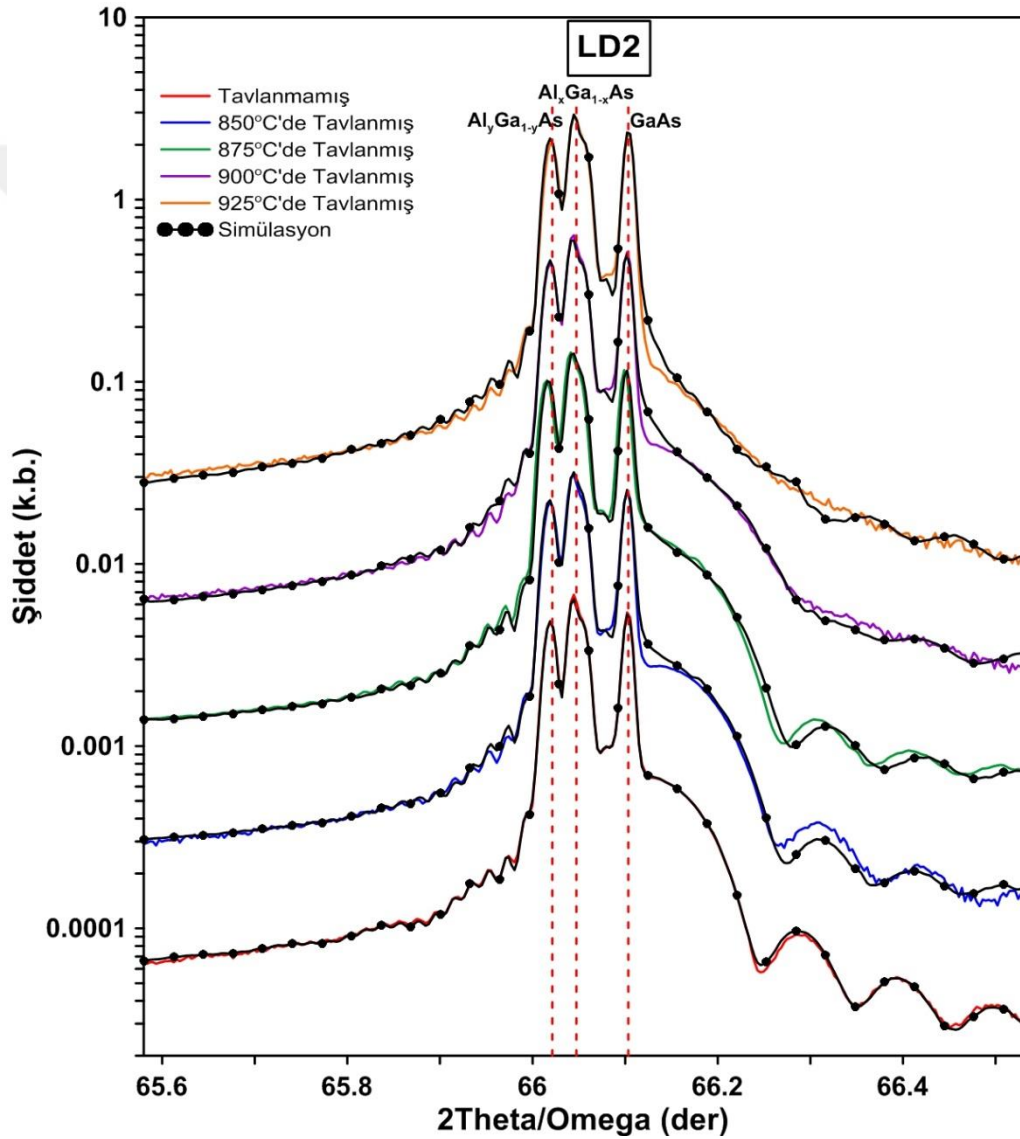


**Şekil 5.58** Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD1 numaralı örneğin XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

p-tipi kılıf ve dalga kılavuzu tabakaları; CBr<sub>4</sub> kullanılarak katkılanan LD2 yapısının da termal tavlamaya karşı dayanıklılığı LD1 yapısında olduğu gibi incelendi. LD2'den kesilen 5X5mm<sup>2</sup> boyutundaki parçalar dört farklı sıcaklık (850°C, 875°C, 900°C ve 925°C) değerinde azot akışı altında RTA ile 60s tavlandıktan sonra kristal kalitesindeki değişim Şekil 5.59'da verilen XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları kullanılarak incelenmiştir. Tavlanmamış örnekle farklı sıcaklıklarda tavlanan örneklerde gözlemlenen kalınlık osilasyonlarındaki değişim kıyaslandığında 875°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ara yüzey keskinliğinin DMZn ile katkılanan LD1 yapısında olduğu gibi azaldığı ve buna bağlı olarak GaAs pikinin sağ tarafındaki osilasyonların yüksek sıcaklıklarda kaybolduğu görülmüştür. Buda bize kullanılan katkı atomundan ziyade yüksek sıcaklıkta yapıyı



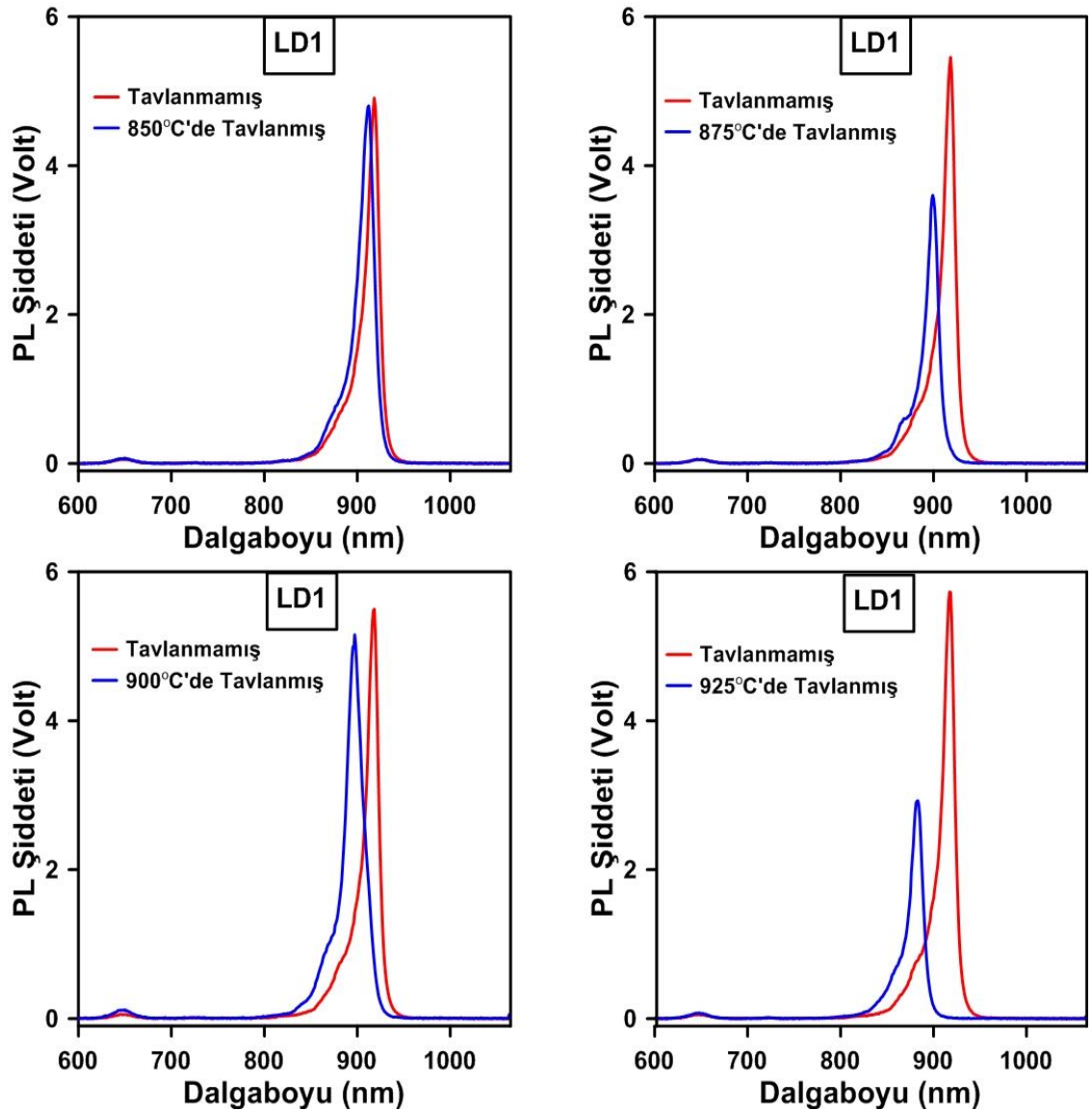
tavlamanın, yapının arayüzey keskinliği üzerinde olumsuz etkisinin olduğunu, tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak ara yüzey keskinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Grafikler üst üste çizilerek incelendiğinde ise tavlama sıcaklığına bağlı olarak yapıdaki gerilmenin değiştiği gözlemlenmiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça GaAs pikinin sağ tarafındaki omuz daralıp GaAs'daki gerilmenin azaldığı, hatta 925°C gibi yüksek bir sıcaklıkta GaAs pikinin sağındaki omuzun kaybolduğu yani gerilme etkilerinin ortadan kalktığı gözlemlenmiştir.



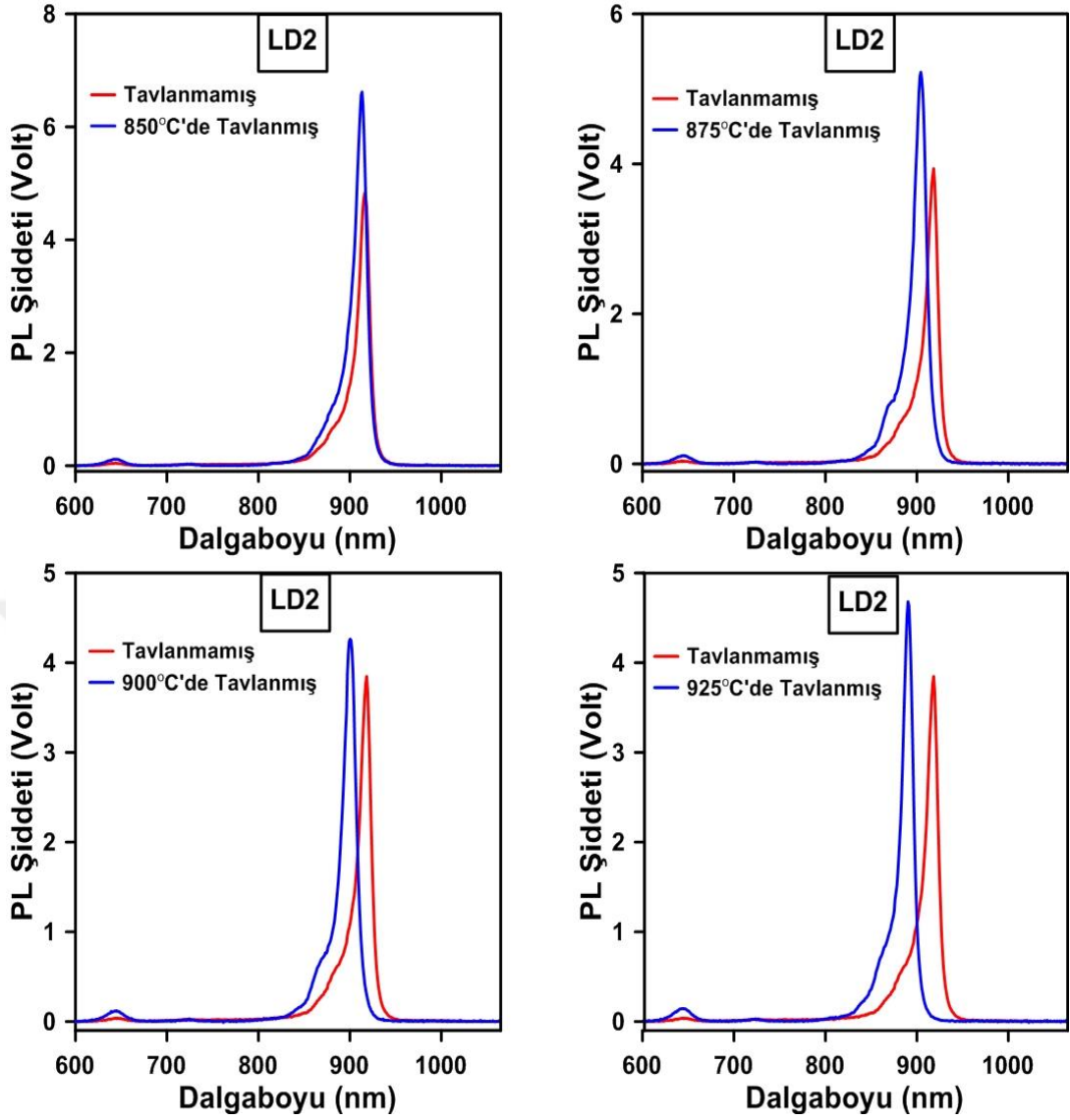
**Şekil 5.59** Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD2 numaralı örneğin XRD ölçüm ve simülasyon sonuçları

Tavlama sıcaklığının yayınım dalga boyu üzerindeki etkisini incelemek için LD1 ve LD2 yapıları; 532nm dalga boyunda ışık yayan çiftlenim frekanslı diyot pompalı katı hal lazer

kullanılarak uyarılmış ve numuneden yayılan ışınım CCD512-BT-TE algılanarak numuneler üzerine oda sıcaklığında PL ölçümü uygulanmıştır (Şekil...). 850°C'den 925°C'ye kadar 25°C tavlama aralıklarıyla tavlanan numunelerin, tavlama sıcaklığına bağlı PL pik kayma miktarları belirlenmiştir. Yapılan çalışma tavlama sıcaklığına bağlı olarak PL pik konumunun değiştiğini, tavlama sıcaklığı arttıkça PL pik konumunun maviye doğru kaydığını göstermektedir. Şekil 5.60 ve Şekil 5.61'de sırasıyla farklı sıcaklıklarda tavlanan LD1 ve LD2 yapılarından alınan PL ölçüm sonuçları ile tavlama öncesinde uygulanan PL ölçüm sonuçları mevcuttur.



**Şekil 5.60** Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD1 numaralı örneğin PL ölçüm sonuçları



**Şekil 5.61** Farklı tavlama sıcaklıklarında tavlanan LD2 numaralı örneğin PL ölçüm sonuçları

Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10 sırasıyla LD1 ve LD2 yapıları için farklı sıcaklıklarda azot akışı altında 60s boyunca tavlanan numunelerin PL pik konumları, tavlama öncesindeki PL pik konumları ile kıyaslamalı olarak verilmiştir. p-tipi katkı malzemesi olarak DMZn'nin kullanıldığı örneklerle CBr<sub>4</sub>'ün kullanıldığı örnekler kıyaslandığında; tavlama sonrasında DMZn katkılı örneklerdeki PL pik konumundaki kayma miktarının CBr<sub>4</sub> katkılı olan örneklerdeki kayma miktarına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

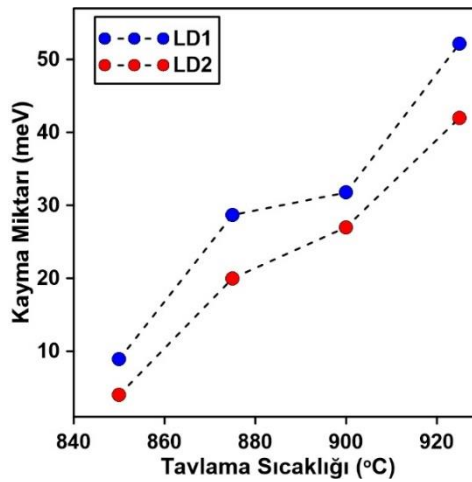
**Çizelge 5.9** LD1 numaralı örneğin için RTA tavlama sıcaklığına bağlı olarak PL pik kayması

LD1	RTA Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Büyütülen Lazer Yapısının Tavlama Öncesi Pik Konumu (nm)	Büyütülen Lazer Yapısının RTA Tavlama Sonrası Pik Konumu (nm)	Tavlama Sonrası Dalga Boyundaki Kayma Miktarı (nm)	Tavlama Sonrası Dalga Boyundaki Kayma Miktarı (meV)
		850	918	912	6
	875	918	899	19	28,7
	900	918	897	21	31,8
	925	918	883	34	52,2

**Çizelge 5.10** LD2 numaralı örneğin için RTA tavlama sıcaklığına bağlı olarak PL pik kayması

LD2	RTA Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Büyütülen Lazer Yapısının Tavlama Öncesi Pik Konumu (nm)	Büyütülen Lazer Yapısının RTA Tavlama Sonrası Pik Konumu (nm)	Tavlama Sonrası Dalga Boyundaki Kayma Miktarı (nm)	Tavlama Sonrası Dalga Boyundaki Kayma Miktarı (meV)
		850	918	915	3
	875	918	904	14	20
	900	918	900	18	27
	925	918	890	28	42

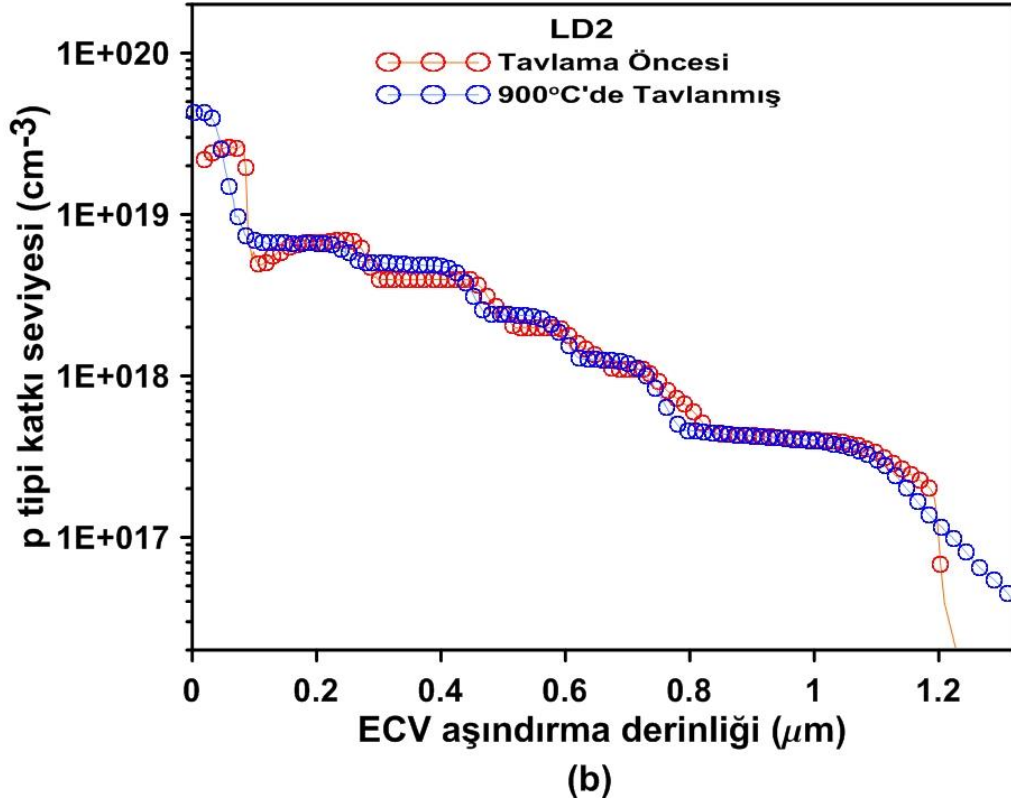
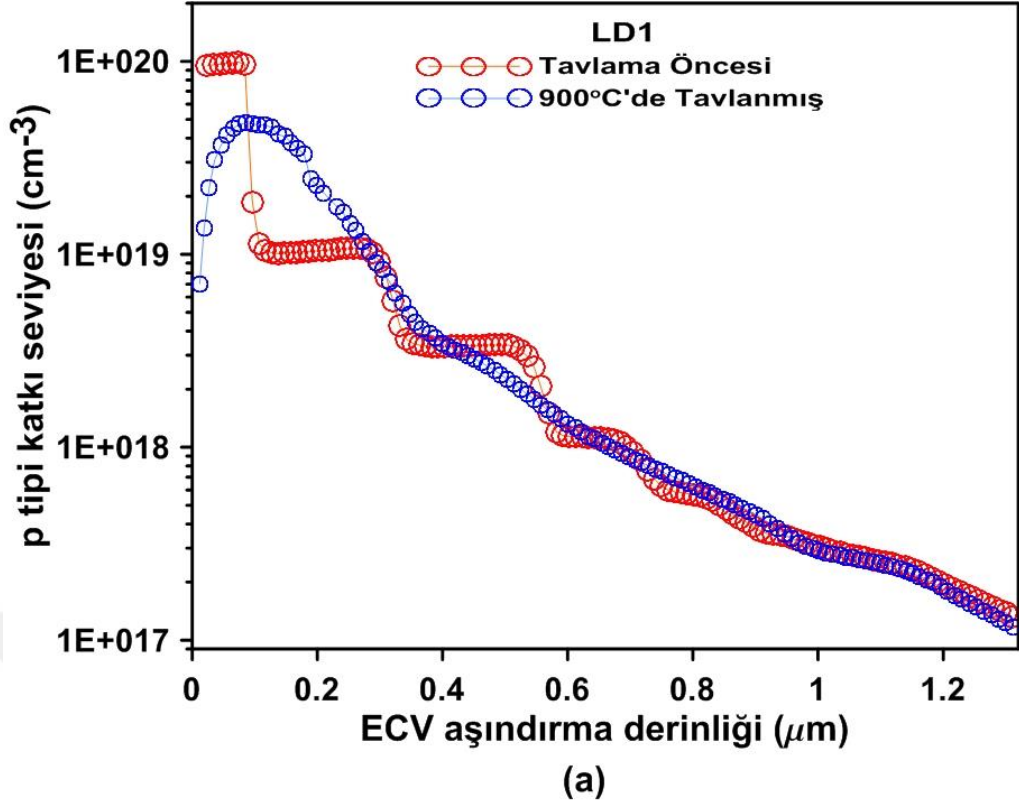
LD1 ve LD2 yapıları için tavlama sıcaklığına karşı PL pik konumundaki kayma miktarının değişim grafiği Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10'da verilen değerler kullanılarak çizilmiştir (Şekil 5.62).



**Şekil 5.62** LD1 ve LD2 yapıları için tavlama sıcaklığına bağlı PL pik konumundaki kayma miktarı

p-tipi katkı malzemesi olarak Zn ve C kullanılan lazer yapılarının katkı profili Nanometrics (EC-V) profiller kullanılarak belirlendi. ECV ölçümleri alınırken, de-iyonize su kullanılarak hazırlanan 0,1M (33,2 g/l) tiron çözeltisi kullanılmıştır ve ölçüm adımları arasındaki mesafe 2nm' de bir olacak şekilde ECV ölçümü yapılmıştır. Şekil 5.63 LD1 ve LD2 isimli örneklerden 900°C'de tavlandıktan sonra ve tavlansadan önce alınan ECV ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5.63'deki kırmızı eğri tavlama öncesi numunelerden alınan aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonu değişimini gösterirken, mavi eğri ise 900°C'de RTA ile N<sub>2</sub> akışı altında tavlandıktan sonra numunelerin taşıyıcı konsantrasyonundaki değişimi gösterir. Aşındırma derinliğine karşılık taşıyıcı konsantrasyonundaki değişim incelenirken ilk 0.1µm'lik bölgeye bakarak p<sup>++</sup>GaAs koruyucu tabakasının katkı seviyesinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak nasıl değiştiğini yorumlayabiliriz. DMZn katkılı LD1 yapısında p<sup>++</sup> GaAs tabakasının katkı seviyesinin 900°C'de tavlandıktan sonra belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. CBr<sub>4</sub> katkılı LD2 yapısında ise tavlama işleminden sonra C'nun aktivasyonundan dolayı katkı seviyesinin arttığı görülmüştür. Tavlama öncesinde alınan ölçümün aşındırma derinliği, tavlandıktan sonra alınan ölçümün aşındırma derinliği ile kıyaslandığında her iki örnek içinde p<sup>++</sup>GaAs tabasının kalınlığında azalmanın olduğu görülmüştür.

Zn katkılı LD1 yapısının aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonu değişimine genel olarak bakıldığında hem kılıf tabakasındaki hem de dalga kılavuzu tabakasındaki AlGaAs yapısının elektriksel özelliklerinin değiştiği görülmektedir. Difüzyon katsayısı C ile kıyaslandığında oldukça yüksek olan Zn atomlarının difüzyonundan dolayı başlangıçta basamaklı şekilde olan katkı profili tavlama işleminden sonra giderek azalan bir eğri profili göstermektedir. C katkılı LD2 yapısı p<sup>++</sup> GaAs katmanının kalınlığının 900°C'de tavlandıktan sonra azaldığı göz önüne alınarak incelendiğinde, tavlamanın C katkılı kılıf tabakasının katkı seviyesini az da olsa arttırdığı (%5), ancak dalga kılavuzu tabakasında herhangi bir değişime neden olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni C atomunun difüzyon katsayısının oldukça düşük olmasıdır. Sonuç olarak 900°C'de tavlama Zn katkılı lazer yapısının elektriksel özelliklerini değiştirdiği gözlemlenirken, C katkılı yapının katkı profilinin hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.63 a)LD1 ve b)LD2 numaralı numunelerin aşındırma derinliğine karşı taşıyıcı konsantrasyonu değişimi

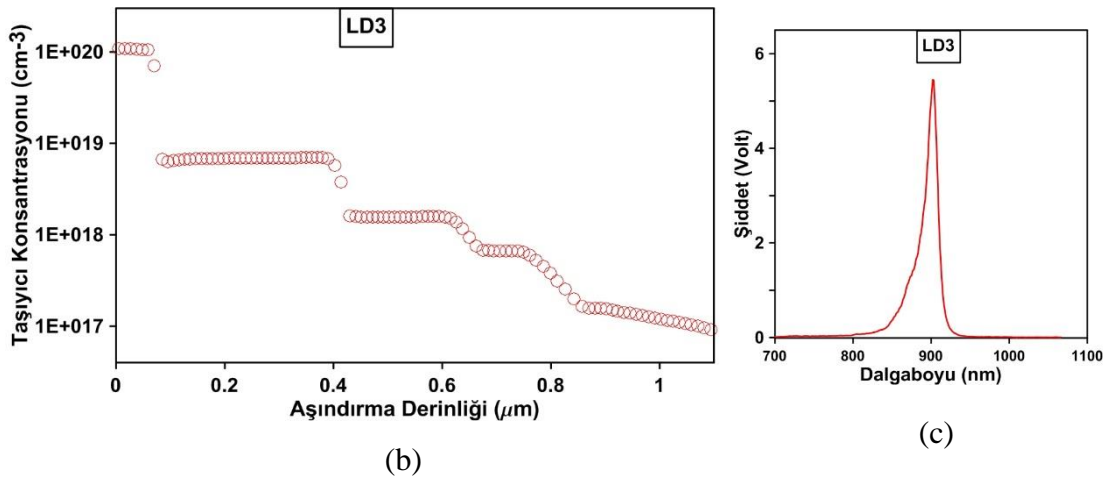
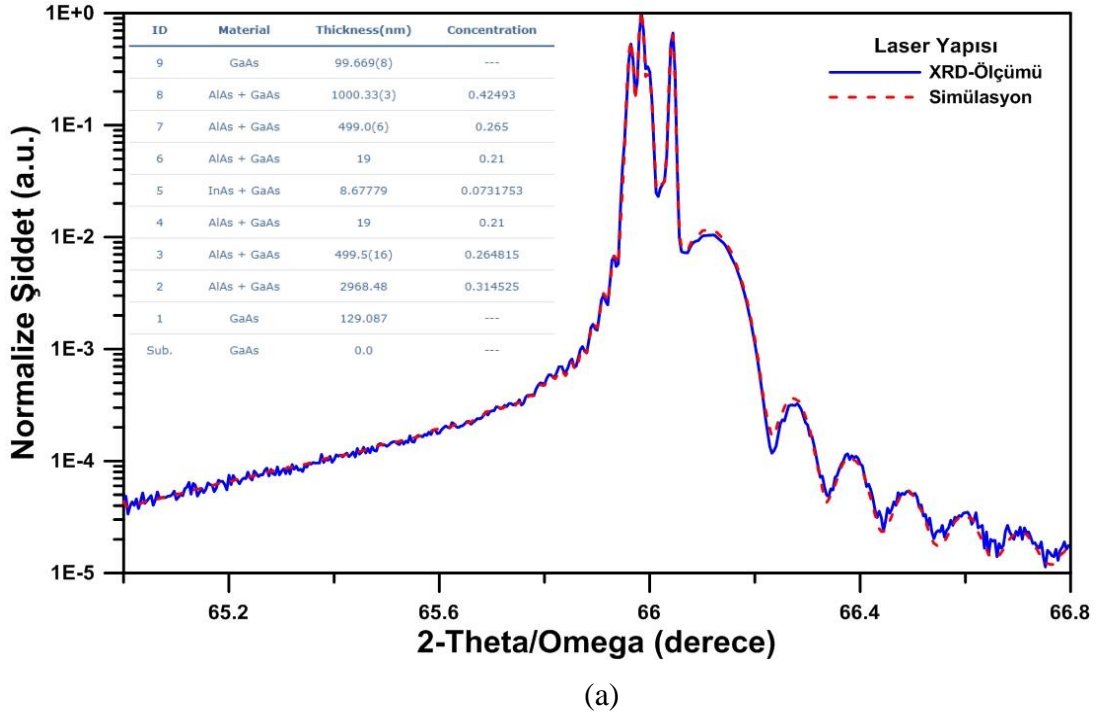
## 5.7 LD Karakterizasyon

Lazer yapısında kullanılacak olan büyütme parametrelerinin ayrı ayrı optimize edildiği tek tabaka büyütme çalışmaları bittikten sonra, belirlenen büyütme parametreleri tek bir reçetede yazılarak PL ışımaya dalga boyu 900nm LD3 isimli lazer diyot yapısı MOCVD yöntemiyle büyütüldü. Büyütülen LD3 isimli numunenin yapısı Şekil 5.64’ de verilmiştir.

	Büyütülen Katman	Katman Kalınlığı (nm)	Katkı Seviyesi ( $\text{cm}^{-3}$ )	Katkı Malzemesi
Kontak Tabakası	GaAs	100	8E19	C
Kılıf Tabakası	$\text{Al}_{0.43}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$	500	6E18	C
		300	1E18	C
		200	3E17	C
Dalga Kılavuzu	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	200	1E17	C
		300	5E16	C
Bariyer Tabakası	$\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$	19		
Kuantum Kuyusu	$\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$	8		
Bariyer Tabakası	$\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$	19		
Dalga Kılavuzu	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$	100		Si
		400	5E16	Si
Kılıf Tabakası	$\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$	500	1E17	Si
		2500	5E17	Si
Tampon Tabaka	GaAs	500		Si
Altaş		n-GaAs (100)		

Şekil 5.64 LD3 numaralı örneğin yapısı

LD3 büyütmesi tamamlandıktan sonra yapı üzerine uygulanan HR-XRD, PL ve ECV ölçümleriyle herbir katmanın alaşım oranı, kalınlığı, ışın dalgaboyu ve p-tipi katkı bölge için taşıyıcı konsantrasyonları belirlendi. Şekil 5.65’de LD3 yapısına ait a)HR-XRD ölçüm sonuçları b) p tipi katkı bölge için ECV ölçüm sonuçları ve c) ışın dalgaboyunu gösteren PL ölçüm sonuçları mevcuttur.



Şekil 5.65 LD3 yapısı için a) HR-XRD ölçüm sonuçları b) p tipi katkı bölge için ECV ölçüm sonuçları ve c) ışın dalgaboyunu gösteren PL ölçüm sonuçları mevcuttur.

Büyütme çalışmaları bittikten sonra ERMAKSAN Optoelektronik Ar&Ge Merkezinde fabrikasyonu yapılan lazer diyotlardan elde edilen tekli ışık yayıcıların (single emitter)



karakterizasyonları; hem akımın sürekli olarak uygulandığı (CW, continuous wave), hem de akımın 1µs zaman aralıklarıyla kesikli olarak uygulandığı (pulsed) L-I-V (güç-akım-voltaj) ölçümleri alındı. Alınan ölçümlerden yararlanılarak üretilen lazer diyot yapısının eşik akımı, eğri verimi, seri direnci, iç kuantum verimi, dış kuantum verimi gibi karakteristik özellikleri belirlenmiştir.

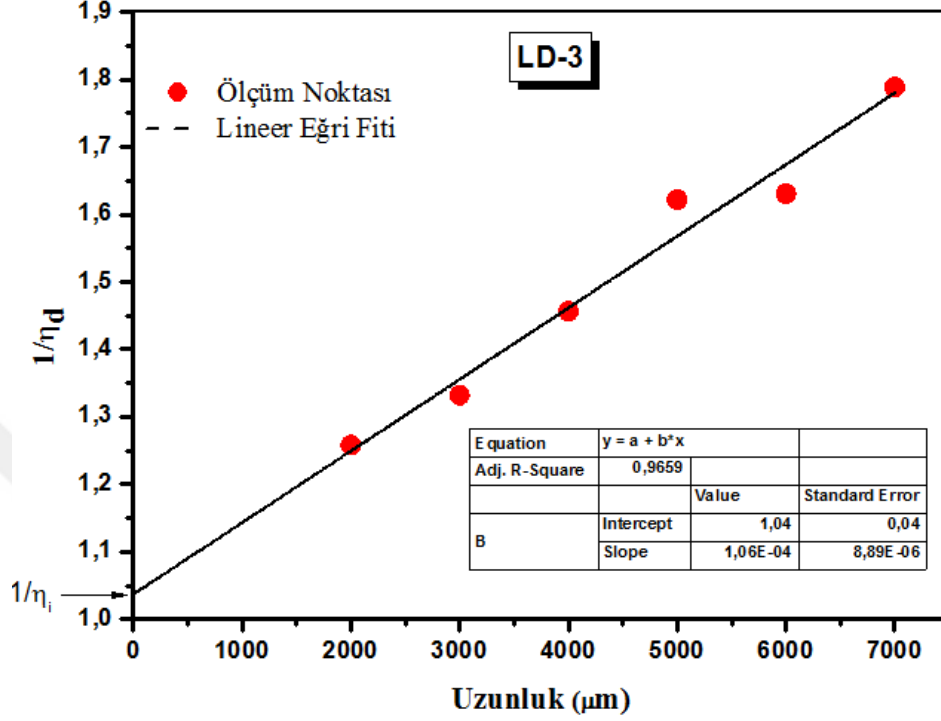
Bu tez çalışması kapsamında büyütülen lazer yapısı kullanılarak farklı kavite uzunluklarına (2, 3, 4, 5, 6, 7mm) sahip ve 100µm köprü genişlikli yüksek güçlü geniş alan köprü dalga kılavuzlu lazerler elde edildi. Bu tekli yayıcılardan elde edilen L-I ölçümünden yararlanılarak üretilen LD'lerin farklı kavite uzunluklarındaki eğri verimleri belirlendi ve Denklem [3. 1] kullanılarak kavite uzunluğundaki değişime bağlı olarak dış kuantum verindeki değişim hesaplandı. Bu hesaplamalar yapılırken eğri veriminin iki katı alınmıştır, bunun nedeni tekli ışık yayıcıların kırılan ayna yüzeylerinde kaplama olmamasından dolayı lazer ışınının her iki yüzeyden de çıkmasıdır. Çizelge 5.11'de L-I ölçümü sonucunda elde edilen kavite uzunluğuna bağlı eğri verimi, dış kuantum verimi ve dış kuantum veriminin tersi verilmiştir.

**Çizelge 5.11** Kavite uzunluğuna bağlı olarak eğri verimi, dış kuantum verimi

Kavite Uzunluğu (µm)	Eğri Verimi ( $2\Delta P/\Delta I$ )	Dış Kuantum Verimi $\eta_d$	$1/\eta_d$
2000	1,07	0,79	1,26
3000	1,02	0,75	1,33
4000	0,91	0,68	1,48
5000	0,86	0,63	1,58
6000	0,83	0,61	1,65
7000	0,74	0,54	1,84

Kavite uzunluğunun dış kuantum veriminin tersine karşı değişim grafiğinden yararlanılarak iç kuantum verimi %96 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.66). Kırılan ayna yüzeylerinde herhangi bir ayna kaplama olmadığında GaAs/AlGaAs tabanlı malzemeler için  $R_1=R_2$  ayna yansıtıcılıkları birbirine eşit olarak alınabilir ve bu yansıtıcılıklar

$\sim 0.32$ 'dir. Denklem [3.2] kullanılarak  $\alpha_i$  iç kayıpları hesaplandığında  $1.18 \text{ cm}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır.

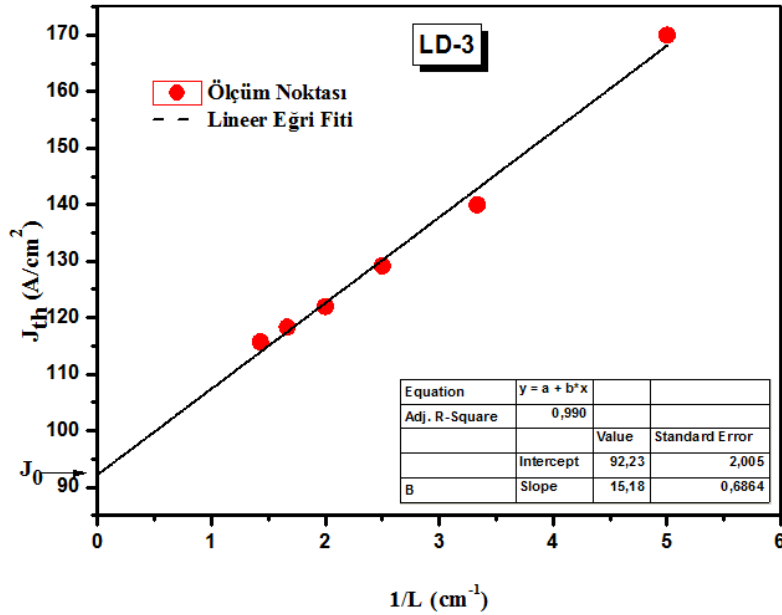


**Şekil 5.66** LD3 numaralı örnek için kavite uzunluğuna karşı dış kuantum veriminin tersinin değişimi

Çizelge 5.12’de geçirgenlik akım yoğunluğunu belirlemek için farklı kavite uzunluklarına sahip lazer diyotların kavite uzunluklarına bağlı eşik akım değerleri ve hesaplanan eşik akım yoğunlukları verilmiştir. Kavite uzunluğunun tersinin eşik akım yoğunluğuna karşı değişim grafiğinden yararlanılarak belirlenen  $J_{th}^0$   $92.3 \text{ A/cm}^2$ ,  $\tan\Theta$  değeri ise  $15.18$  radyandır. Belirlenen bu değerler denklem [3.3]’de yerine yazılarak hesaplanan  $J_0$  değeri  $76,58 \text{ A/cm}^2$  olarak hesaplanır.

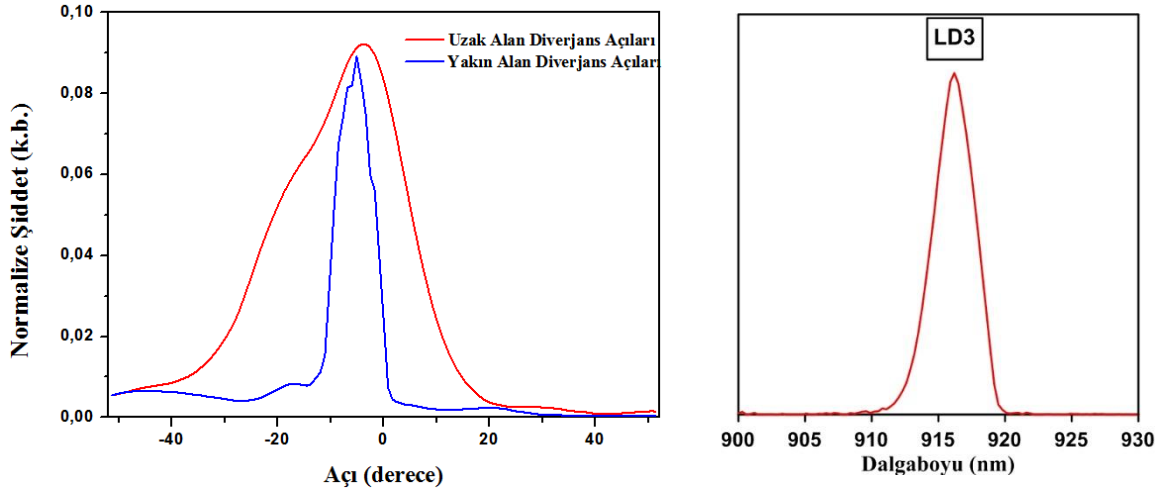
**Çizelge 5.12** Farklı kavite uzunluklarında tasarlanan LD3 numarlı lazer diyotun eşik akımı ve eşik akım yoğunluğu

Kavite Uzunluğu ( $\mu\text{m}$ )	Eşik Akımı (A)	Aygıt Alanı $\text{cm}^2$ ( $w=100 \mu\text{m}$ )	Eşik akım yoğunluğu $J_{\text{th}}$ ( $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
2000	0.34	0.002	170
3000	0.42	0.003	140
4000	0.52	0.004	129
5000	0.61	0.005	122
6000	0.71	0.006	118
7000	0.81	0.007	116



**Şekil 5.67** LD3 numaralı lazer diyot için kavite uzunluğunun tersine bağlı olarak eşik akım yoğunluğundaki değişim

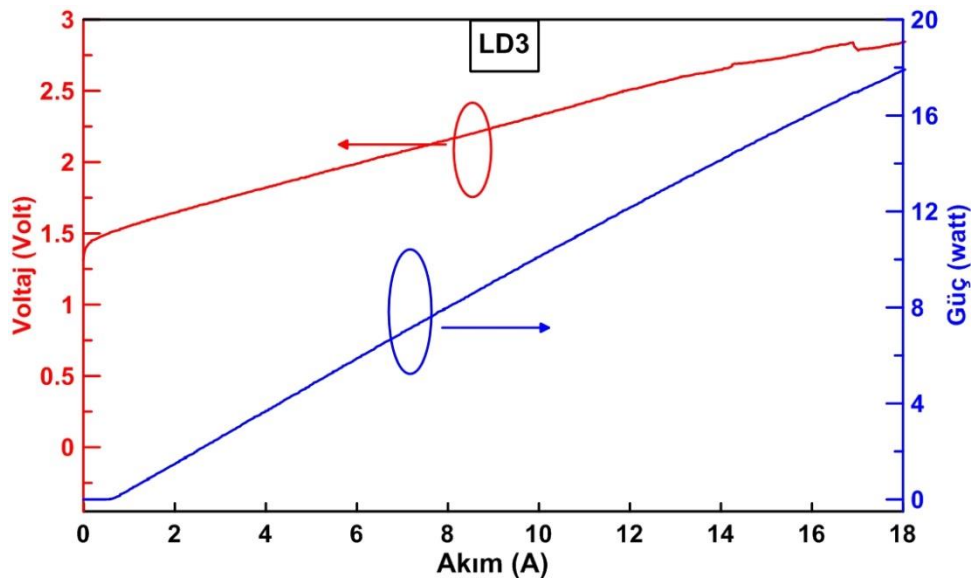
Şekil 5.68’ de 4mm kavite uzunluğunda, 500 $\mu\text{m}$  genişliğinde ve 100 $\mu\text{m}$  aralıktan akımın uygulandığı LD3 numaralı numuneden elde edilen lazer diyot yapısına ait uzak ve yakın alan diverjans açıları verilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda uzak ve yakın alan diverjans açısı değerlerinin sırasıyla 27.8° ve 10.4° olarak belirlenmiş ve 8A akım uygulandığında ışımaya dalgaboyununun 915nm’ de olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.68 LD3 yapısı için a)yakın ve uzak alan diverjans açđlarının ölçümü  
b)8A yayınım piki

4mm kavite uzunluğunda, 500µm genişliğinde ve 100µm aralıktan akımın uygulandığı LD3 numaralı numuneden elde edilen lazer diyot yapısından; hem akımın sürekli olarak uygulandığı (CW, continuous wave), hem de akımın 1µs zaman aralıklarıyla kesikli olarak uygulandığı (pulsed) (Şekil 5.69) durumda L-I-V ölçümleri alınmıştır. Tek ışık yayıcı 100 saat boyunca 25°C'de 8A'de sürekli akım uygulanarak çalıştırıldığında; ölçülen eğri verimi 1.14W/A, wall plug verimi %63, ışına dalga boyunda 914.7nm ve 8.23W ışık çıkış gücünde ışına yaptığı belirlenmiştir.

Aynı lazer diyot yapısına 5µs zaman aralıklarıyla kesikli olarak 18A uygulanarak alınan L-I ölçümler sonucunda; eşik akımı 0.67A, eğri verimi 1.03W/A, seri direnci 20.3 mohm ve ışık çıkış gücü 17.92 W olarak belirlenmiştir (Şekil 5.69).



Şekil 5.69 LD3 yapısının L-I-V ölçümü

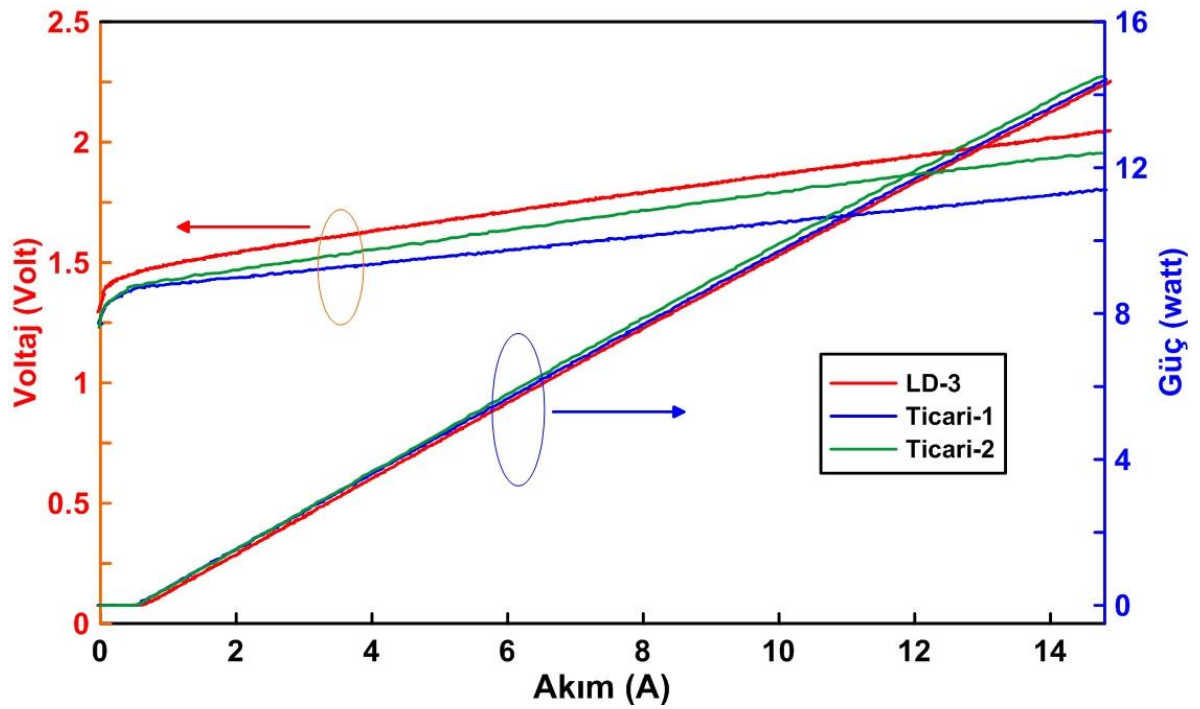
## 6 SONUÇ

Bu çalışmada yayının dalga boyu 9xx-10xx nm aralığında olan kenar yayıcı lazer diyot yapısı; yarıiletken çoklu malzemelerden oluşan çoklu tabaka dizilimlerinin epitaksiyel olarak depolanmasında kullanılan MOCVD yöntemi ile büyütülmüş ve çeşitli analiz yöntemleri kullanılarak büyütülen epitaksiyel katmanların karakterizasyonları yapılmıştır. Bir lazer yapısında büyütülen her bir katmanın yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üretilen lazer ışığının aktif bölgede sınırlandırılması, üretilen lazer diyotun eşik akımı, karanlık akımı, gücü ve termal dayanıklılığı gibi karakteristik özelliklerini doğrudan etkileyeceğinden yapıyı oluşturacak her bir epitaksiyel katman ayrı ayrı çalışılarak gerekli tüm optimizasyonlar yapılmıştır. Çalışmalara tampon tabaka büyütme ile başlanmış, tampon tabakalar büyütülürken kullanılacak molar akış parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra kılıf ve dalga kılavuzu olarak kullanılacak olan farklı Al alaşım oranlarına sahip p-tipi ve n-tipi katkılı  $Al_xGa_{1-x}As$  katmanları büyütülmüştür. Çalışmalar kapsamında p-tipi katkı malzemesi olarak hem çinko (Zn) atomu hem de karbon atomu (C) kullanılmıştır. n-tipi katkı malzemesi olarak ise  $SiH_4$  kullanılmıştır. Farklı dalga boylarında ışık yayan lazer yapıları elde etmek için; farklı indiyum akışları kullanılarak 900nm, 915nm, 967nm ve 1052nm’ de ışık yayan 10 tekrarlı çoklu kuantum kuyu yapıları büyütüldü. Tek tabaka çalışmaları sonucunda belirlenen büyütme parametreleri kullanılarak 918nm’de ışık yayan p-tipi katkı malzemesi olarak C ve Zn’ nin kullanıldığı, diğer tüm özelliklerinin aynı olduğu iki farklı lazer diyot yapısı büyütülerek yapıların QWI için gerekli olan yüksek sıcaklığa dayanıklılığı belirlendi. p-tipi katkı malzemesi olarak C’ nun kullanıldığı yapının termal dayanıklılığı oldukça iyi olduğundan üretilen lazer yapısında p-tipi katkı atomu olarak C kullanılmasına karar verilmiştir.

Tek tabaka çalışmalarının ardından farklı kalınlık ve Al alaşım oranlarına sahip kılıf ve dalga kılavuzu katmanlarından oluşan aşamalı kırılma indisi sıralamalı simetrik ve asimetrik tasarımlı, tek kuantum kuyulu lazer yapıları büyütüldü. Büyütülen yapıların fabrikasyonları ERMAKSAN Optoelektronik Ar&Ge Merkezinde yapıp, hali hazırda kendi sac kesme makinalarında kullanılmak üzere yurt dışında belirli sayıda firmalardan satın aldıkları, tekli yayıcı (single emitter) lazer diyotlarla karşılaştırıldı. Şekil 6.1’de bu tez çalışması kapsamında üretilen 915nm dalga boyunda ışık yayan LD3 isimli lazer yapısının iki farklı ticari firmadan alınan yapı ile kıyaslaması mevcuttur. Kıyaslamalar yapılırken lazer yapılarına 15A’lik akım uygulanmış ve bu akıma karşılık

lazer yapısının gösterdiği çıkış gücü ve voltaj eğrileri belirlenmiştir. Yapılan kıyaslamalar sonucunda bu tez çalışması kapsamında büyütülen 915nm dalga boylu lazer diyotun, ticari yapılarla neredeyse aynı eğri verimi ( $\sim 1$ ) ve çıkış gücüne sahip olduğu belirlenmiştir.

Bu tez çalışması sonrasında elde edilen lazer yapısı ERMAKSAN Optoelektronik Ar&Ge Merkezi tarafından kendi ürettikleri kesim tezgâhlarında kullanılmak üzere seri üretime geçirilecektir.



Şekil 6.1 Tez çalışması kapsamında büyütülen lazer diyot yapısı ile iki farklı ticari firmadan alınan lazer diyot yapılarının karşılaştırılması

## 7 KAYNAKLAR

- Agrawal, G.** (1986). Long-Wavelength Semiconductor Lasers. *Van Norstrand Reinhold Company*, 372s.
- Alam, T.** (2014). Comparative Performance Analysis and Optimization of 635nm Multiple Quantum Well Red Lasers. *The AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*.
- Allied, M. R..** *Fiber Laser Market by Type and Application - Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018-2025s.* (<https://www.alliedmarketresearch.com/fiber-laser-market>), 21.05.2019
- Ando, H.** (1992). Growth of carbon-doped base GaAs/AlGaAs HBT by gas-source MBE using TEG. TEA. TMG. AsH<sub>3</sub>. and S<sub>12</sub>H<sub>6</sub>. *Journal of Crystal Growth*, 228-223s.
- Aspnes, D.** (1986). Optical Properties of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. *J. Appl. Phys.* , 754s.
- Bashir, B.** (2009). *Designing of High Reflectance Distributed Bragg reflectors (DBRs), mirrors using AlGaInN material system in the UV wavelength range.* University of Gavle.
- Bennet, H. E.** (1961). Relation Between Surface Roughness And Specular Reflectance At Normal Incidence. *JOSA*, 123-129s.
- Breiland, W.** (2002). Distributed Bragg Reflectors for Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. *Material Research Society*, 520-524s.
- Butler, J.** (1980). Semiconductor Injection Lasers. *IEEE*, 409s.
- Capper, P.** (2006). *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials.*
- Chen, T.** (1990). Experimental determination of transparency current density and estimation of threshold current of semiconductor quantum well lasers. *American Institute of Physics*, 1002-1004s.
- Coleman, J.** (2000). Strained-layer InGaAs Quantum-Well Heterostructure Lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* , 1008-1013s.
- Coleman, J. J.** (2000). A Brief History of High-Power Semiconductor Lasers. *IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics*.
- Cunningham, B.** (1989). Carbon Diffusion in un-doped. n-type and p-type GaAs. *Appl. Physics Letters*, 687s.
- Cunningham, B.** (1990). Carbon Tetrachloride Doped Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Metalorganic Vapor Deposition Grown by Metalorganic Chemical Vapour Deposition. *Journal of Electronic Materials*.
- Dapkus, P.** (1981). High Impurity GaAs Prepared from Trimethylgallium and Arsine. *Journal of Crystal Growth*, 10-13s.

- David, F.** (2000). A Brief History of High-Power Semiconductor Lasers. *IEEE*, 1470-1477s.
- Deelen, J.** (2004 ). Parameter study of intrinsic carbon doping of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As by MOCVD . *Journal of Crystal Growth* , 376–384s.
- Deelen, J.** (2004). Parameter study of intrinsic carbon doping of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As by MOCVD. *Journal of Crystal Growth*, 376-384s.
- DEMİR, İ.** (2017). In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>y</sub>Al<sub>1-y</sub>As tabanlı kuantum çağlayan lazer yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonu. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Doktora Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.*
- Didchenko, R.** (1960). Reactions of phosphine with trimethylindium. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* , 35-37s.
- Dimroth, F.** (2000). High C-Doping of MOVPE Grown Thin Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Layers for AlGaAs/GaAs Interband Tunneling Devices. *Journal of electronic materials* .
- Enquist, P.** (1990). p-type doping limit of carbon in organometallic vapor phase epitaxial growth of GaAs using carbon tetrachloride . *Applied Physics Letters* .
- Erol, A.** (2013). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*. Seçkin Yayıncılık.
- Frank, F. C.** (1949). One-dimensional dislocations. II. Misfitting monolayers in oriented overgrowth. *Proc. Roy. Soc*, 216–225s.
- Fujii, K.** (1999). Dependence of carbon incorporation on growth conditions for unintentionally doped AlGaAs during metalorganic vapor-phase epitaxy . *Journal of Crystal Growth*, 204s.
- Gaoy, X.** (2007). 980 nm High Power Semiconductor Laser Stacked Arrays with Non-absorbing Window. *J. Mater. Sci. Technol.*
- Gareso, P.** (2009). A comparison of zinc and carbon doped on the atomic interdiffusion of InGaAs/AlGaAs QW LD structures after annealing . *Indonesian Journal of Physics*.
- Garrec, B.** (2009). Laser-diode and Flash Lamp Pumped Solid-State Lasers, CEA-CESTA, 15 avenue des Sablières, BP2, 33114 Le Barp, France. *LEI*, 111-116s.
- Glew, R.** (1984 ). Zinc Doping of MOCVD GaAs . *Journal of Crystal Growth* , 44-47s.
- Goldman, R.** (1998 ). Effects of GaAs substrate misorientation on strain relaxation in InGaAs films and multilayers. *Journal of Applied Physics* , 5137s.
- Grand View, R.** *Fiber Optics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Single Mode, Multimode, Plastic Optical Fiber), By Application (Telecom, Military & Aerospace, Medical), And Segment Forecasts, 2019 - 2025s.* (<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fiber-optics-market>), 21.05.2019
- Hall, E.** (1879). On A New Action Of The Magnet On Electric Currents. *American Journal Of Mathematics*, 287-292s.



- Hall, R.** (1962). Coherent Light Emission From GaAs Junction. *Phys. Rev. Lett*, 366s.
- Hardtdegen, H.** (1994). Heavy carbon doping in low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy of GaAs using trimethylarsenic a comparison between the carrier gases N<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>. *Journal of Crystal Growth*, 440-446s.
- Hayashi, I.** (1970). Junction lasers which operate continuously at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 109-111s.
- Hou, H.** (1997). Carbon doping and etching of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (0<x<1) with carbon tetrachloride in metalorganic vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letter*, 3600s.
- Höfling, S.** (2012). Continuous-wave uncooled interband cascade lasers for gas sensing. *SPIE*.
- Hudait, M.** (1998). Low temperature photoluminescence properties of Zn-doped GaAs. *Materials Science and Engineering*, 62-70s.
- Javan, A.** (1961). Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Phys. Rev. Lett.*, 106-110s.
- Kamran, S.** (2000). Test and Characterization of Laser Diodes: Determination of Principal Parameters. *Newport*, 1-7s.
- Kanskar, M.** (2005). High power conversion efficiency Al-free diode lasers for pumping high power solid state laser systems. *Proceedings of SPIE*.
- Kasap, S.** (2001). *Optoelectronics and Photonics Principles and Practices*. Pearson.
- Kasap, S.** (2005). *Electronic and Photonic Materials*. Canada: Springer.
- Kim, C.** (2010). Enhanced efficiency in GaInP/GaAs Tandem Solar Cells Using Carbon Doped GaAs in Tunnel Junction. *Microelectronic Engineering*, 677-681s.
- Kim, C.** (2010). Enhanced efficiency in GaInP/GaAs tandem solar cells using carbon doped GaAs in tunnel junction. *Microelectronic Engineering*, 677-681s.
- Kim, K.** (2006). Enhanced Performance of an InGaAs/GaAs Single Quantum Well Laser Diode by Introducing a High Al-Content Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Cladding Layer. *Journal of the Korean Physical Society*, 1169-1172s.
- Kim, S.** (1994). Carbon doping characteristics of GaAs and Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As grown by atmospheric pressure metalorganic chemical vapor deposition using CCl<sub>4</sub>. *Journal of Crystal Growth*, 324-330s.
- Kim, S.-I.** (1993). Characteristics of Heavily Carbon-Doped GaAs by LPMOCVD and Critical Layer Thickness. *Journal of Crystal Growth*, 441s.
- Kondo, M.** (1994). Dependence of carbon incorporation on crystallographic orientation during metal organic vapor phase epitaxy of GaAs and AlGaAs. *Journal of Crystal Growth*, 390-396s.
- Kozuch, D.** (1993). Passivation of carbon doped GaAs layers by hydrogen introduced by annealing and growth ambients. *Journal of Applied Physics*, 3716s.

- Kölbl, J.** (2008). Near-Infrared Laser Range Finder, using kHz Repetition Rate. *SPIE*, 1-9s.
- Kuech, T.** (1988). Controlled carbon doping of GaAs by metalorganic vapor phase epitaxy. *Apply Physic Letter*.
- LayTec, G.** (2008). *EpiCurve TT Two for Aixtron planetary MOCVD systems*. Berlin.
- Maiman, T.** (1960). Stimulated optical radiation in ruby masers. *Nature*, 493-494s.
- Major, J.** (1995). 'Welch High-Temperature, High-Power Self-Pulsating. *IEEE*, 147-148s.
- Manasevit, H.** (1939). The use of Metal-Organics in the Preparation of Semiconductor Materials. *Journal of The Electrochemical Society*, 1725-1732s.
- Manasevit, H.** (1969). The use of Metal-Organics in the Preparation of Semiconductor Materials I. Epitaxial Gallium-V Compounds. *Journal of Electrochemical Society*, 1725-1732s.
- Marketsandmarkets.** *Laser Diode Market by Type, Mode of Operation, Wavelength (Near Infrared, Red, Blue, Green, Others), Application (Communications & Optical Storage, Industrial, Medical, Military & Defense, Instrumentation & Sensor), and Geography - Global Forecast to 2020*. Laser Diode Market: (<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/laser-diode-market-1006.html>), 21.05.2019
- Matthews, J. W.** (1974). Defects in epitaxial multilayers. I. Misfit dislocations. *J. Cryst. Growth*, 118–125s.
- Meney, A.** (1995). Determination of the Band Structure of Disordered AlGaInP and its Influence on Visible-Laser Characteristics. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM*, 697-706s.
- Meney, A.** (1995). Determination of the Band Structure of Disordered AlGaInP and its Influence on Visible-Laser Characteristics. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM*, 697-706s.
- Micovic, M.** (1994). Quantum well lasers with carbon doped cladding layers grown by solid source molecular beam epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 411s.
- Modak, P.** (1997). Shyam Hardikar' and S.B.Krupanidhi\*. Structural and Electrical Properties of Undoped GaAs Grown by MOCVD. *IEEE*.
- Mogg, S.** (2002). N type doping induced losses in 1,3/1,55um distributed Bragg Reflectors.
- Nakanisi, T.** (1981). Growth of High Impurity GaAs Epilayers by MOCVD and their Application to Microwave MESFET's. *Journal of Crystal Growth*, 255-262s.
- Nanometrics.** (USA). *ECVpro, Electrochemical C-V Profiler, User Manual*. 2003.
- Nathan, M.** (1962). Stimulated emission of radiation from GaAs p-n Junction. *Appl. Phys. Lett.*, 62-64s.

- Nelson, A.** (1984). A study of p-type dopants for InP grown by adduct MOVPE. *J. Crystal Growth*, 102s.
- Ozeki, M.** (1977). Residual Donors in High Purity Gallium Arsenide Epitaxially Grown from Vapor Phase. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1617-1622s.
- Peng, L.** (2015). High Quality Carbon Doped GaAs/AlGaAs Material Growth by MOCVD and its Application for Optoelectronic Devices . *SPIE* .
- Petrescu, I. B.** (2003). *Patent No. US6522677B1*.
- Pristovsek, M.** (2000). In situ investigation of GaAs (001) intrinsic carbon p-doping in metal-organic vapour phase epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 149-155s.
- Razeghi, M.** (2011). *The MOCVD Challenge*. USA: CRC Press.
- Rebey, A.** (2004). In-situ reflectance monitoring of the growth and etching of AlAs/GaAs structures in MOVPE. *Journal of Crystal Growth*, 450-457s.
- Ren, F.** (1992). Stability of carbon and beryllium-doped base GaAs/AlGaAs heterojunction bipolar transistors. *Appl. Phys. Lett* , 3613s.
- Richards, R.** (2015). Growth and structural characterization of GaAsBi/GaAs multiple quantum well . *Semicond. Sci. Technol.*
- Richter, E.** (1995). Carbon doped GaAs Grown in Low Pressure-Metalorganic Vapor Phase Epitaxy Using Carbon Tetrabromide . *Journal of Electronic Materials*.
- Rossill, V.** (2010). *Patent No. US7830938B2*.
- Sakamoto, M.** (1990). High power, high brightness 2 W (200  $\mu\text{m}$ ) and 3 W (500  $\mu\text{m}$ ) CW AlGaAs laser diode arrays with long lifetimes . *Electron. Lett.*, 729s.
- Sanayeh, M.** (2008 ). *Catastrophic Optical Damage in High-Power AlGaInP Diode Lasers* . Universität Duisburg-Essen.
- Sanayeh, M.** (2008). Catastrophic Optical Damage in High-Power AlGaInP Diode Lasers .
- Sang, W.** (1985). *Semiconductors and semimetals*. 1985: Academic Press.
- Schawlow, A.** (1958). Infrared and optical masers. *American Physical Society*, 1940-1949s.
- Scifres, D.** (1983). Phase-locked (GaAl)As laser diode emitting 2.6 W CW from a single mirror. *Electron. Lett*, 169s.
- Shin, J.** (2010). *Very Low temperature sensitive, deep-well quantum cascade lasers ( $\lambda=4.8\mu\text{m}$ ) grown by MOCVD*. University of Wisconsin-Madison.
- Suikonen, S.** (2008). *Fabrication of InGaN quantum wells for LED applications*. Almany: Helsinki University of Technology.
- Sun, S.** (1993 ). Zinc and tellurium doping in GaAs and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As grown by MOCVD . *J. Cryst. Growth* , 103s.

- Tateno, K.** (1997). Carbon doping and etching effects of CBr<sub>4</sub> during metalorganic chemical vapor deposition of GaAs and AlAs. *Journal of Crystal Growth*, 5-12s.
- Tephen Najda, S.** (2003). *United States Patent No. US20070298531A1*.
- Timmons, M.** (1986). An alternative Mg precursor for p-type doping of OMVPE grown material. *J. Crystal Growth*, 37s.
- Vurgaftman, I.** (2015). Interband cascade lasers. *Apply Physics*, 17s.
- Wang, P.** (1988). Deep levels in p-type GaAs grown by metalorganic vapor phase epitaxy. *J. Appl. Phys.*, 4975s.
- Waters, R. G.** (1990). Viable strained-layer laser at 1100nm. *J. Appl. Phys*, 1132s.
- Yamada, Y.** (1998). Characteristics and reliability of high-power InGaAs/AlGaAs laser diodes with decoupled confinement heterostructure. *Electronics & Information Materials Laboratory, Mitsui-Chemicals*, 580.
- Yamagataa, Y.** (1999). 915nm high power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH). *Pro. of SPIE*.
- Yang, Y.** (1992). Integration of GaInP/GaAs Heterojunction Bipolar Transistors and High Electron Mobility Transistors. *IEEE Electron Device Letters*.
- Zhao, K.** (2018). Specialized directional beaming through a metalens and typical application. *Nanophotonics*, 339-345s.
- Zorn, M.** (2003). MOVPE growth of visible vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs). *Journal of Crystal Growth* , 186–193s.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Aliye AlevKIZILBULUT
Doğum Yeri ve Tarihi	Sivas, 22.01.1988
Medeni Hali	Bekâr
Yabancı Dil	İngilizce
E-posta Adresi	a.alevkizilbulut@gmail.com

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Kongre Lisesi 2005
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik, 2010
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik, 2014

### İş Tecrübesi

ERMAKSAN	Yarıiletken Bütütme Birim Yöneticisi, 2014-...
----------	--

### Proje Deneyimi

- II-N Tabanlı Malzemelerin MOCVD ile Yetiştirilmesi ve Yapısal Karakterizasyonları
- Yüksek Verimli Ardışık  $Ga_xIn_{1-x}P/Ga_xIn_{1-x}As$  Güneş Pillerinin Üretimi Ve Alttaş Etkisinin Araştırılması
- Akıllı Ekranlarda Arka Aydınlatma İçin Yüksek Verimli LED'lerin Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu
- LED Çip Prototip Geliştirilmesi
- 915nm Dalgaboylu Yüksek Güçlü Lazer Diyotun Geliştirilmesi

## **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler ve**

### **Posterler**

- 1) A. Kızılbulut, M. Erkuş, N. Muzafferoğlu, S. Elagöz, 'Determine The Annealing Effect For Carbon And Zinc Doped InGaAs/AlGaAs Single Quantum Well Laser Diode (SQW-LD) Structures' TFD 34, sözlü bildiri
- 2) A.O. Çetinkaya, A. Kızılbulut, N. Muzafferoğlu, S. Elagöz, Epitaxial Growth and Characterization of p-type Compositionally Graded AlGaAs Layers, TFD 34, Sözlü bildiri
- 3) A. Kızılbulut, M. Erkuş, N. Muzafferoğlu, S. Elagöz, The Role of Growth Temperature, V/III Ratio and CBr<sub>4</sub> flow on Carbon Doped p-GaAs Epilayers, Laser Optics and Photonics Conference 2018, Prague, Czech Republic
- 4) A. Kızılbulut, B. Bulut, M. Erkuş, S. Elagöz, Effects Of Well-barrier Thickness Variation on The Device Performance, Poster Sunumu, Nano-tr 13, 22 Ekim 2017.
- 5) M. Erkuş, A. Kızılbulut, N. Muzafferoğlu, S. Elagöz, The Emission Wavelength Dependency to Growth Parameters of InGaN/GaN-based Led Structures, Sözlü Sunum, Nano-tr 13, 22 Ekim 2017, 25 Ekim 2017.
- 6) A. Kızılbulut, M. Memiş, S. Elagöz, Comparative Study Of p-GaN Layers Grown on C-plane Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Substrates: The Role of Cp<sub>2</sub>Mg Flow Effects t, Sözlü Sunum, Turkish Physical Society 33rd International Phycis, Congress Uluslararası, 06 Eylül 2017, 09 Eylül 2017.
- 7) A. Kızılbulut, B. Bulut, A. Çetinkaya, S. Elagöz, Effects Of Stabilization Time During Well-barrier Transitions Of Ingan/gan Multi Quantum Wells Kizilbulut, Sözlü Sunum, Turkish Physical Society 33rd International Phycis Congress Uluslararası Özet Bildiri , 06 Eylül 2017, 09 Eylül 2017.
- 8) A. Kızılbulut, Optical Comparison Of Mocvd Grown Gan Layers On Flat And Patterned Sapphire Substrate, Sözlü Sunum, 3rd International Conference On Engineering And Natural Science Uluslararası, 03 Mayıs 2017, 07 Mayıs 2017.
- 9) İ. Demir, İ. Altuntaş, A. Kızılbulut, B. Bulut, S. Elagöz, Improved GaN Quality By Two Stages Ammonia Flow, Sözlü Sunum, 3rd International Conference On Engineering And Natural Science Uluslararası, 03 Mayıs 2017, 05 Mayıs 2017.
- 10) İ. Demir, İ. Altuntaş, A. Kızılbulut, B. Bulut, S. Elagöz, Optical Comparison Of MOCVD Grown GaN Layers on Flat and Patterned Sapphire Substrates, Sözlü Sunum, Iii International Conference On Engineering And Natural Science (ICENS), 05 Mayıs 2017.

- 11) İ. Altuntaş, İ. Demir, A. Kızılbulut, B. Bulut, M. Erkuş, S. Elagöz, Structural Comparison Of Epitaxially Grown Gan Layer On Conventional Sapphire And Patterned Sapphire Substrates, Sözlü Sunum, III International Conference On Engineering And Natural Science (ICENS) Uluslararası Özet Bildiri, 03 Mayıs 2017.
- 12) İ. Altuntaş, İ. Demir, A. Kızılbulut, B. Bulut, M. Erkuş, A. O. Çetinkaya, S. Elagöz, Study Of Defects in GaN Epilayer Grown On Patterned Sapphire Substrate, Sözlü Sunum, III International Conference On Engineering And Natural Science (ICENS), 05 Mayıs 2017.
- 13) A. Kızılbulut, İ. Demir, İ. Altuntaş, S. Elagöz, The Effects Of Nucleation Layer Thickness On Quality Of Gan Film, Sözlü Sunum, Tfd-32, 05 Mayıs 2017.
- 14) İ. Demir, A. Kızılbulut, İ. Altuntaş, B. Bulut, S. Elagöz, The Effects Of Carrier Gas On 3d 2d Transition Of Gan, Sözlü Sunum, 3th International Nanoscience And Nanotechnology For Next Generation (nanong), 20 Ekim 2016.
- 15) A. Kızılbulut, İ. Demir, İ. Altuntaş, S. Elagöz, Determine The Refractive Index Of Wurtzite Gan On Sapphire By Spectroscopic Ellipsometry, Poster Sunumu, 16th International Balkan Workshop On Applied Physics And Materials Science, 09 Temmuz 2016.
- 16) İ. Demir, A. Kızılbulut, B. Bulut, S. Elagöz, Ellipsometry and Photoluminescence Characterization of MOCVD Grown  $Al_xGa_{1-x}As$  Layers, Poster Sunumu, 16th International Balkan Workshop On Applied Physics And Materials Science, 09 Temmuz 2016.
- 17) İ. Demir, A. Kızılbulut, B. Bulut, E. Tüzemen, S. Elagöz, Optical and Structural Characterization Of  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  Epilayers, Poster Sunumu, NANOTR 12,05 Haziran 2016.
- 18) A. Kızılbulut, E. Tüzemen, S. Elagöz, Determining the Film Thicknesses of DBR Structures, Sözlü Sunum, BALKAN PHYSİCS UNİON 9, 27 Ağustos 2015.
- 19) A. Kızılbulut, E. Tüzemen, S. Elagöz, Optical Characterization and theoretical modeling of the GaAs/AlAs DBR structure, Poster Sunumu, Balkan Physics Union9, 27 Ağustos 2015
- 20) Electrical Characterization of the MOCVD Grown Single Crystal p-type and n-type GaInAs on GaAs and InP substrates, A. KIZILBULUT, G. KAYA, M. YALÇINTAKAYA, S.ELAGÖZ, Sözlü Sunum, BALKAN PHYSİCS UNİON 9, 27 Ağustos 2015.

- 21) E. Tüzemen, A. Kızılbulut, S. Elagöz, Optical Characterization and Theoretical Modelling of The GaAs/AlAs DBR Structure, Poster Sunumu, BALKAN PHYSİCS UNİON 9, 27 Ağustos 2015, 27 Ağustos 2015.
- 22) B. Alaydın, A. Kızılbulut, İ. Altuntaş, B. Bulut, M. Yalçinkaya, S. Elagöz, Research for Optimizing Growth Conditions of Gallium Nitride Epilayers for Blue LED Structures Grown by MOCVD, Sözlü Sunum, BALKAN PHYSİCS UNİON 9, 27 Ağustos 2015, 27 Ağustos 2015.
- 23) A. Kızılbulut, E. Tüzemen, R. Esen, S. Elagöz, Spektroskopik Elipsometre ve Cauchy Dağılım Modeli ile ZnO Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi, Sözlü Sunum, TFD31, 22 Temmuz 2014, 135.
- 24) A. Kızılbulut, B. Alaydın, B. Bulut, İ. Altuntaş, S. Elagöz, Characterization of The MOCVD Grown Single Crystal p-type And n-type GaInP on GaAs , Sözlü Sunum, NANOTR-10, 17 Haziran 2014, 17 Haziran 2014.
- 25) A. Kızılbulut, İ. Demir, İ. Altuntaş, S. Elagöz, MOCVD ile Büyütülen Ge/InGaAs Yapısının Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı ile Karakterizasyonu, Sözlü Sunum, ADIM FİZİK GÜNLERİ III, 17 Nisan 2014
- 26) A. Kızılbulut, Investigation Of Energy Band Gap With Uv-Vis-Nir Diffuse Reflectance Of MOCVD Grown GaIn<sub>1-x</sub>As On GaAs , Sözlü Sunum, TFD-30, 03 Eylül 2013, 03 Eylül 2013, 164.
- 27) İ. Demir, İ. Altuntaş, B. Alaydın, A. Kızılbulut, M. Boz, H. Karkı, S. Elagöz, 'Epitaxial Growth By Metal Organic Vapor Deposition (MOCVD) And Structural Characterization Of GaAs Films On Ge Substrates', Sözlü Sunum, NANOTR 9, 28 Haziran 2013, 28 Haziran 2013.
- 28) A. Kızılbulut, E. Tüzemen, İ. Demir, İ. Altuntaş, G. Bayhan, S. Elagöz, 'Specular Reflectance Spectra Of GaAs on Ge Substrates Grown By MOCVD', Sözlü Sunum, NANOTR 9, 24 Haziran 2013.