



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

**DÜŞEY KOVUKLU YÜZEY IŞIMALI LAZER YAPILARININ  
BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**DOKTORA TEZİ**

**Behçet Özgür ALAYDİN  
(201492032001)**

**Fizik Ana Bilim Dalı  
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ebru ŞENADIM TÜZEMEN**

**SİVAS  
KASIM 2018**

Behçet Özgür ALAYDİN'in hazırladığı ve "DÜŞEY KOVUKLU YÜZEY IŞIMALI LAZER YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından FİZİK ANA BİLİM DALI'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	<b>Prof. Dr. Ebru ŞENADIM TÜZEMEN</b> Cumhuriyet Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	<b>Prof. Dr. Atilla Aydın</b> Uludağ Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	<b>Prof. Dr. Yüksel Ergun</b> Eskişehir Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	<b>Prof. Dr. Sezai Elagöz</b> Aselsan MGEO	.....
Jüri Üyesi	<b>Prof. Dr. Esin Kasapoğlu</b> Cumhuriyet Üniversitesi	.....

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

**Prof. Dr. İsmail ÇELİK**

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.



*Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından **M-729** Nolu proje kapsamında desteklenmiştir.*



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Behçet Özgür ALAYDİN, 2018



Kızım, eşim, ailem ve tüm çalışma arkadaşlarıma

## ETİK

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

- ✓ 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 yararlanması 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.

9.11.2018

Behçet Özgür ALAYDİN

## KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve tecrübeleri ile her zaman yanımda olan, doktora çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ebru Şenadım Tüzemen'e çok teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarımın başladığı yüksek lisans dönemimden beri bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, zor zamanlarımda desteğini esirgemeyen hocam Prof. Dr. Sezai Elagöz teşekkür ederim.

Kısa bir dönem doktora araştırmalarım için bulunduğum ETH Zürich fizik bölümü ve Ultra Hızlı Lazer araştırma laboratuvarından Prof. Dr. Ursula Keller ve Dr. Matthias Golling'e teşekkür ederim.

Doktora dersleri için her hafta Ankara'ya beraber yolculuk yaptığım, tez döneminde fotoluminesans ölçümlerinde bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Ermaksan Optoelektronik'ten Aliye Alev Kızılbulut'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanları; Didem Altun, Barış Bulut, Prof. Dr. Pınar Başer, İlky Demir, İsmail Altuntaş, Deniz Kartal, İlhan Erdoğan, Gülüz Kaya, Yağmur Güler, Merve Nur Koçak, Gamze Yolcu, Fikret Akkuş, Sefa Tütüncü, Cihan Şahin, Ünal Yılmaz ve Münevver Dede'ye teşekkür ederim.

Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimine M-729 numaralı proje ile verdikleri destekler için teşekkür ederim.

Akademik hayatımda çok önemli bir yere sahip olan TÜBİTAK-BİDEB'e 2214/A Yurtdışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı için teşekkür ederim.

Eğitim hayatımda her zaman destekçim olan annem, babam ve kardeşime teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım boyunca hep yanımda olan ve desteğini her zaman hissettiğim eşim Sinem Alaydın'e ve hayatımızın tüm seyrini değiştiren kıymetlimiz kızımız Asya Defne Alaydın'e teşekkür ederim.

## ABSTRACT

### GROWTH AND CHARACTERIZATION OF VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASER

Behçet Özgür ALAYDİN

PhD Thesis

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ebru ŞENADIM TÜZEMEN

2018, 140+xxiii pages

In this study, optical pumped Vertical Cavity Surface Emitting Lasers were grown epitaxially by using Metal Organic Vapor Deposition system and characterized comprehensively by means of state of the art techniques. Single layer GaAs and AlAs layers were grown on GaAs substrates to optimize growth parameters and times. Grown layers were extensively characterized with simulations and High Resolution X-ray Diffraction system to find out layer thicknesses. After that Distributed Bragg Reflectors were grown and total reflection of mirrors were measured. Then, active region which consist of quantum well and barrier were grown. Alloy composition of InGaAs quantum well were determined with dynamic x-ray simulations and photoluminescence of quantum well was measured to find peak point of radiation. Before growing optical pumped Vertical Cavity Surface Emitting Laser structures, radiation wavelength of quantum well optimized and two different Vertical Cavity Surface Emitting Laser structures were grown. First was completely grown with Metal Organic Vapor Deposition system and in the second one active region was grown on Molecular Beam Epitaxy grown Distributed Bragg Reflector.

As a result, critical parameters which affect performance of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers were examined extensively and optical pumped Vertical Cavity Surface Emitting Lasers which radiated at 999 and 983 nm were successfully grown.

**Key Words:** VCSEL, AlAs, GaAs, DBR, HRXRD, Photoluminescence, SEM, Spectrophotometer

## ÖZET

### DÜŞEY KOVUKLU YÜZEY IŞIMALI LAZER YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

**Behçet Özgür ALAYDİN**

**Doktora Tezi**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ebru ŞENADİM TÜZEMEN**

**2017, 140+xxiii sayfa**

Bu çalışmada, optik pompalı Düşey Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer yapıları Metal Organik Buhar Biriktirme sistemi kullanılarak epitaksiyal olarak büyütülmüş, kristal ve optik karakterizasyonları yapılmıştır. Büyütme parametreleri ve sürelerini optimize etmek için GaAs alttaş üzerine tek katman GaAs ve AlAs tabakaları büyütülmüştür. Büyütülen tabakaların, kalınlıklarının bulunması için teorik yansıma simülasyonları ve yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınım sistemi ile kapsamlı şekilde karakterize edilmiştir. Tek katman büyütmelerinden sonra Dağınımlı Bragg Yansıtıcıları büyütüldü ve yansıma ölçümleri gerçekleştirildi. Daha sonra kuantum kuyusu ve bariyerinden oluşan aktif bölge GaAs üzerine büyütüldü. InGaAs kuantum kuyusunun alaşım oranı dinamik x-ışını simülasyonları ile belirlendi ve ışımının tepe noktasını bulmak için kuantum kuyusunun fotoluminesansı ölçüldü. Optik pompalanmış VCSEL yapıları büyütülmeden önce kuantum kuyusunun ışıma dalgaboyu optimize edildi ve iki farklı VCSEL yapısı büyütüldü. Birincisi tamamen MOCVD sistemi ile büyütülürken ve ikincisi Molecular Beam Epitaksi ile üretilmiş DBR üzerine büyütülmüştür.

Sonuç olarak, optik pompalı VCSEL'in performansını etkileyen kritik parametreler kapsamlı olarak incelenmiş, 999 ve 983 nm'de ışıyan optik pompalı VCSEL yapıları başarıyla büyütülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** VCSEL, AlAs, GaAs, HRXRD, Fotoluminesans, SEM, Spektrofotometre

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>ÖZET</b> .....	viii
<b>KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xix
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xix
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xxi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. YARIİLETKENLER VE YÜZEY IŞIMALI LAZERLER</b> .....	6
2.1. Kristal Yapı.....	6
2.2. Kristal Yapıda Oluşan Gerilme ve Gevşeme.....	9
2.3. Yarıiletkenler ve Temel Özellikleri.....	11
2.4. YüzeY Işimalı Lazerlerin Tarihsel Gelişimi.....	15
<b>3. TEORİ</b> .....	22
3.1. Transfer Matris Metodu (TMM).....	22
3.2. III-V Yarıiletkenlerin Kırılma İndisinin Hesaplanması.....	26
3.3. Dağınımlı Bragg Yansıtıcıları (Distributed Bragg Reflector-DBR).....	31
<b>4. DBR'NİN TEORİK KARAKTERİZASYONU</b> .....	37
4.1. DBR Çift Sayısının Yansımaya Etkisi.....	37
4.2. DBR Tek Tabaka Kalınlıklarının Yansımaya Etkisi.....	39
4.3. AlAs <sub>1-y</sub> P <sub>y</sub> /GaAs DBR Yapısı için Fosfor Oranının Etkisi.....	42
4.4. AlAs <sub>1-y</sub> P <sub>y</sub> /GaAs DBR Yapısı için Şapka Tabakasının (Cap Layer) Etkisi....	45
4.5. Katkılamannın DBR'ye Etkisi.....	47
<b>5. KRİSTAL BÜYÜTME VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ</b> .....	52
5.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi.....	52

5.2. Yerinde (In-Situ) Karakterizasyonu .....	57
5.3. Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı ile Yapısal Karakterizasyon.....	60
5.3.1. X-ışını Ölçüm Teknikleri.....	62
5.3.3. Tek Katman Kalınlığının Belirlenmesi .....	67
5.3.4. Periyodik Çoklu Katmanların Analizi .....	69
5.4. Taramalı Elektron Mikroskopi.....	71
5.5. Spektrofotometre.....	72
5.6. Fotoluminesans.....	74
<b>6. DÜŞEY KOVUKLU YÜZEY IŞIMALI LAZER YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU.....</b>	<b>76</b>
6.1. Tek Tabaka GaAs ve AlAs Büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	77
6.2. Dağınımlı Bragg Yansıtıcısının Büyütülmesi ve Karakterizasyonu.....	79
6.3. Kuantum Kuyusu Büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	109
6.4. Lazer Yapılarının Büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	112
<b>7. SONUÇ .....</b>	<b>130</b>
<b>8. KAYNAKLAR.....</b>	<b>132</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1 Web of Science arama motorundan elde edilen yüzey ışımali lazerler ile ilgili yayınlanan makale sayıları.....	1
Şekil 1.2 Yüzey ışımali lazerin çalışma bölgeleri .....	2
Şekil 1.3 LIDAR uygulamasına ait görüntü.....	3
Şekil 1.4 Yüzey ışımali lazer kullanılarak XBOX oyun konsolu için insan vücut ölçümleri ile elde edilen görüntü. ....	3
Şekil 1.5 2-3 µm dalgaboyu aralığındaki soğurma spektrumu.....	4
Şekil 2.1 Kristal örgü türleri.....	6
Şekil 2.2 fcc örgü yapısı.....	7
Şekil 2.3 Kübik örgü düzlemlerinin Miller indisleri .....	9
Şekil 2.4 Örgü uyumsuz büyütme sonucu oluşan gerilemeler. Sağda sıkıştırıcı gerilme solda ise çekici gerilme.....	10
Şekil 2.5 Örgü uyumsuz büyütme sonucunda kristal yapıda meydana gelen gevşeme .....	11
Şekil 2.6 Yarıiletkenlerin direk ve indirek bant yapıları .....	13
Şekil 2.7 GaAs'a Silisyum eklenerek elde edilen n-tipi yarıiletken yapısı.....	14
Şekil 2.8 GaAs'a Çinko eklenerek elde edilen p-tipi yarıiletken yapısı. ....	14
Şekil 2.9 Bantlar arası geçiş ile soğurmanın ve uyarılmış yayınının gerçekleşmesi .	16
Şekil 2.10 Kenar ışımali lazer yapısı.....	16
Şekil 2.11 Yüzey ışımali VCSEL yapısı. ....	17
Şekil 2.12 VECSEL yapısı .....	18
Şekil 3.1 Bir madde ortamına gelen, yansıyan ve geçen elektromanyetik dalga. ....	22
Şekil 3.2 Dalga boyuna karşılık kırılma indisi, AlAs (kırmızı), GaAs (mavi). ....	28
Şekil 3.3 % alüminyum konsantrasyonuna karşılık $Al_xGa_{1-x}As$ 'ın kırılma indisi. ....	29
Şekil 3.4 Dalga boyuna karşılık farklı Al konsantrasyonlarına sahip $Al_xGa_{1-x}As$ 'ın kırılma indisi.....	30
Şekil 3.5 Dalga boyuna karşılık AlAs, AlP, $AlAs_{0,96}P_{0,04}$ ve 980 nm'de $AlAs_xP_{1-x}$ 'in kırılma indisi.....	31
Şekil 3.6 DBR yapısı, $n_y$ yüksek kırılma indisi, $n_d$ düşük kırılma indisi. ....	32

<b>Şekil 3.7</b> İki katmanlı bir yapıda ara yüzeylerden yansıyan ve geçen elektromanyetik dalganın gösterimi. ....	33
<b>Şekil 3.8</b> Üç katmanlı bir yapıda ara yüzeylerden yansıyan ve geçen elektromanyetik dalganın gösterimi. ....	33
<b>Şekil 3.9</b> Üç katmanlı bir yapıda ara yüzeylerden yansıyan ve geçen elektromanyetik dalganın gösterimi. ....	34
<b>Şekil 4.1</b> Çift sayına karşılık yansıma grafiği. ....	37
<b>Şekil 4.2</b> $AlAs_{1-y}P_y/GaAs$ DBR yapısı için yansımanın DBR çift sayısı ile değişimi. ....	38
<b>Şekil 4.3</b> Farklı $AlAs_{1-y}P_y/GaAs$ çift sayısı için yansımanın dalga boyu ile değişimi verilmiştir. ....	39
<b>Şekil 4.4</b> $AlAs_{0,96}P_{0,04}/GaAs$ DBR yapısında $GaAs$ 'ın kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak yansıma değişimi. ....	40
<b>Şekil 4.5</b> $AlAs_{0,96}P_{0,04}/GaAs$ DBR yapısında $GaAs$ 'ın kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak faz'ın değişimi. ....	40
<b>Şekil 4.6</b> 30 çift $AlAs_{0,96}P_{0,04}/GaAs$ DBR yapısında $AlAs_{0,96}P_{0,04}$ 'ın kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak yansımanın değişimi. ....	41
<b>Şekil 4.7</b> $AlAs_{0,96}P_{0,04}/GaAs$ DBR yapısında $AlAs_{0,96}P_{0,04}$ 'ın kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak faz'ın değişimi. ....	42
<b>Şekil 4.8</b> Fosfor oranına bağlı olarak 21 çift $AlAs_{1-y}P_y/GaAs$ DBR yapısının yansıtıcılığının ve fazının değişimi. ....	43
<b>Şekil 4.9</b> Dalgaboyuna bağlı olarak farklı fosfor oranlarındaki 21 çift $AlAs_{1-y}P_y/GaAs$ DBR'in yansıma grafiği. ....	44
<b>Şekil 4.10</b> Fosfor oranına bağlı olarak bant genişliği (SBW) ve etkin ayna uzunluğunun değişimi ( $l_{eff}$ ). ....	44
<b>Şekil 4.11</b> 21 çift $AlAs_{0,96}P_{0,04}/GaAs$ DBR'nin üzerine farklı kalınlıklarda $AlAs_{0,96}P_{0,04}$ şapka tabaka eklenmesi ile dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi. ....	45
<b>Şekil 4.12</b> 21 çift $AlAs_{0,96}P_{0,04}/GaAs$ DBR'nin üzerine farklı kalınlıklarda $GaAs$ şapka tabaka eklenmesi ile dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi. ....	46
<b>Şekil 4.13</b> $AlAs$ ve $GaAs$ 'ın katkılama tipi ve değerine bağlı olarak reel kırılma indisindeki değişim. ....	48

<b>Şekil 4.14</b> AlAs ve GaAs'ın katkılama tipi ve değerine bağlı olarak sönümleme katsayısının değişimi.....	49
<b>Şekil 4.15</b> Farklı p-tipi katkılama değerine sahip 35 çift AlAs/GaAs DBR için dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi. ....	50
<b>Şekil 4.16</b> Farklı n-tipi katkılama değerine sahip 35 çift AlAs/GaAs DBR için dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi. ....	51
<b>Şekil 5.1</b> Sonata firmasına ait metal organik gaz kaynakları. ....	53
<b>Şekil 5.2</b> Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan MOCVD sisteminin kütle akış kontrol elemanları. ....	54
<b>Şekil 5.3</b> Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan MOCVD sisteminin reaktör kabini ve reaktör içerisinde bulunan RF ısıtma bobini. ....	55
<b>Şekil 5.4</b> MOCVD sistemi sıcaklık kontrol üniteleri. Solda alttan ölçüm kontrolcüsü sağda ise alttaş yüzeyinden yapılan ölçüm sistemi gösterilmektedir.....	55
<b>Şekil 5.5</b> MOCVD sistemi sıcaklık kontrol üniteleri. ....	56
<b>Şekil 5.6</b> Alttaş tutucu ünite ve eldivenli kutu. ....	56
<b>Şekil 5.7</b> MOCVD sisteminin çıkışında bulunan artık gazların etkisiz hale getirilip biriktirildiği sıvı “scrubber” sistemi. ....	57
<b>Şekil 5.8</b> Yerinde yansıma ölçümünde alttaş üzerine gönderilen lazer ışığının izlediği optik yollar. ....	59
<b>Şekil 5.9</b> MOCVD sisteminde InP üzerine $In_xGa_{1-x}As$ büyütmesine ait yerinde ölçüm grafiği (Alaydin, 2017). ....	59
<b>Şekil 5.10</b> Bragg yasasının gösterimi, $\theta$ x-ışınının geliş açısı, d düzlemler arası mesafe, $2\theta$ yansıma açısıdır. ....	61
<b>Şekil 5.11</b> $\theta/2\theta$ ölçümünün gösterimi.....	62
<b>Şekil 5.12</b> Salıntı eğrileri ölçümü gösterimi.....	63
<b>Şekil 5.13</b> Silisyum elementinin ters uzay haritası. ....	65
<b>Şekil 5.14</b> III-V grubu yarıiletkenlere ait “Zinc Blende” kristal örgü yapısı. ....	66
<b>Şekil 5.15</b> GaAs alttaş üzerine eklenmiş 100 nm AlAs'ın x-ışını kırınım deseninin simülasyonu. ....	68

<b>Şekil 5.16</b> AlAs/GaAs 30 çift süper örgü yapısına ait x-ışını kırınım deseninin simülasyonu. ....	69
<b>Şekil 5.17</b> Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım sistemi. ....	70
<b>Şekil 5.18</b> Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde kurulu bulunan MIRA3 TESCAN taramalı elektron mikroskobu. ....	72
<b>Şekil 5.19</b> Cary 5000 spektrofotometre sistemi. ....	73
<b>Şekil 5.20</b> Fotolüminesans ölçümündeki uyarım ve foton yayınımları. ....	74
<b>Şekil 6.1</b> VCSEL015 numaralı büyütmeye ait ekran görüntüsü. GaAs alttaş üzerine tek katman AlAs ve GaAs büyütülmesi.....	77
<b>Şekil 6.2</b> VCSEL015 numaralı büyütmeye ait yapı. ....	78
<b>Şekil 6.3</b> VCSEL015 numaralı büyütmeye ait HRXRD ölçümü ve dinamik x-ray simülasyonu. ....	79
<b>Şekil 6.4</b> VCSEL017 numaralı büyütmeye ait ekran görüntüsü. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş 30 çift AlAs/GaAs DBR yapısı.....	80
<b>Şekil 6.5</b> VCSEL017 numaralı büyütmeye ait yapı. ....	81
<b>Şekil 6.6</b> VCSEL017 numaralı büyütmeye ait SEM görüntüsü.....	81
<b>Şekil 6.7</b> VCSEL017 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi RSM ölçümü. ....	83
<b>Şekil 6.8</b> VCSEL017 numaralı büyütmeye ait (004) düzlemi RSM ölçümü. ....	83
<b>Şekil 6.9</b> VCSEL017 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi RSM ölçümü. ....	84
<b>Şekil 6.10</b> VCSEL017 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi RSM ölçümü. ....	84
<b>Şekil 6.11</b> VCSEL017 numaralı büyütmenin (002) düzlemine ait theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	86
<b>Şekil 6.12</b> VCSEL017 numaralı büyütmenin (004) düzlemine ait theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	86
<b>Şekil 6.13</b> VCSEL017 numaralı büyütmenin (006) düzlemine ait theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	87
<b>Şekil 6.14</b> VCSEL017 numaralı büyütmenin (224) düzlemine ait theta/2-theta ölçümü. ....	87
<b>Şekil 6.15</b> VCSEL017 yansıma ölçümü ve simülasyonu.....	89

<b>Şekil 6.16</b> VCSEL017 30° de yansıma ölçümü ve simülasyonu. ....	89
<b>Şekil 6.17</b> VCSEL017 60° de yansıma ölçümü ve simülasyonu. ....	90
<b>Şekil 6.18</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait SEM görüntüsü. ....	91
<b>Şekil 6.19</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi RSM ölçümü. ....	92
<b>Şekil 6.20</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi RSM ölçümü. ....	92
<b>Şekil 6.21</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi RSM ölçümü. ....	93
<b>Şekil 6.22</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi RSM ölçümü. ....	93
<b>Şekil 6.23</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	94
<b>Şekil 6.24</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (004) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	95
<b>Şekil 6.25</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	95
<b>Şekil 6.26</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi theta/2-theta ölçümü. ....	96
<b>Şekil 6.27</b> ES2418 numaralı büyütmeye ait (400) düzlemi theta/2-theta ölçümü. ....	96
<b>Şekil 6.28</b> ES2418 numaralı numunenin yansıma ölçümü ve simülasyonu. ....	98
<b>Şekil 6.29</b> ES2418 numaralı numunenin 30° de yansıma ölçümü ve simülasyonu. ...	98
<b>Şekil 6.30</b> ES2418 numaralı numunenin 60° de yansıma ölçümü ve simülasyonu. ...	99
<b>Şekil 6.31</b> ES2929 SEM görüntüsü. ....	100
<b>Şekil 6.32</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi RSM ölçümü. ....	101
<b>Şekil 6.33</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (004) düzlemi RSM ölçümü. ....	101
<b>Şekil 6.34</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi RSM ölçümü. ....	102
<b>Şekil 6.35</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi RSM ölçümü. ....	102
<b>Şekil 6.36</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (400) düzlemi RSM ölçümü. ....	103
<b>Şekil 6.37</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	104
<b>Şekil 6.38</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (004) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	104
<b>Şekil 6.39</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	105
<b>Şekil 6.40</b> ES2929 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi theta/2-theta ölçümü. ...	105

<b>Şekil 6.41</b> ES2929 numaralı büyütmeğe ait (400) düzlemi theta/2-theta ölçümü. ...	106
<b>Şekil 6.42</b> ES2929 numaralı numunenin yansıma ölçümü ve simülasyonu. ....	107
<b>Şekil 6.43</b> ES2929 numaralı numunenin 30° de yansıma ölçümü ve simülasyonu. .	107
<b>Şekil 6.44</b> ES2929 numaralı numunenin 60° de yansıma ölçümü ve simülasyonu. .	108
<b>Şekil 6.45</b> VCSEL018 numaralı büyütmeğe ait ekran görüntüsü. ....	109
<b>Şekil 6.46</b> VCSEL018 numaralı büyütmeğe ait yapı. ....	110
<b>Şekil 6.47</b> VCSEL018 numaralı büyütme (004) düzlemi HRXRD taraması ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	111
<b>Şekil 6.48</b> VCSEL018 tek kuantum kuyusuna ait PL ölçümü. ....	112
<b>Şekil 6.49</b> VCSEL019 numaralı büyütmeğe ait ekran görüntüsü. ....	113
<b>Şekil 6.50</b> VCSEL019 SEM görüntüsü. ....	114
<b>Şekil 6.51</b> VCSEL019 numaralı büyütmeğe ait (002) düzlemi RSM ölçümü. ....	115
<b>Şekil 6.52</b> VCSEL019 numaralı büyütmeğe ait (006) düzlemi RSM ölçümü. ....	115
<b>Şekil 6.53</b> VCSEL019 numaralı büyütmeğe ait (224) düzlemi RSM ölçümü. ....	116
<b>Şekil 6.54</b> VCSEL019 numaralı büyütmeğe ait (002) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	117
<b>Şekil 6.55</b> VCSEL019 numaralı büyütmeğe ait (004) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	117
<b>Şekil 6.56</b> VCSEL019 numaralı büyütmeğe ait (006) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	118
<b>Şekil 6.57</b> VCSEL019 numaralı numunenin fotoluminesans ve yansıma ölçümü ve simülasyonu. ....	119
<b>Şekil 6.58</b> VCSEL019 numaralı numunenin 30° ve 60° de yansıma ölçümü. ....	120
<b>Şekil 6.59</b> VCSEL020 numaralı büyütmeğe ait ekran görüntüsü. ....	121
<b>Şekil 6.60</b> VCSEL020 SEM görüntüsü, solda tam yapı sağda kuantum kuyusu bölgesi ve DBR kısmı. ....	122
<b>Şekil 6.61</b> VCSEL020 numaralı büyütmeğe ait (002) düzlemi RSM ölçümü. ....	122
<b>Şekil 6.62</b> VCSEL020 numaralı büyütmeğe ait (006) düzlemi RSM ölçümü. ....	123
<b>Şekil 6.63</b> VCSEL020 numaralı büyütmeğe ait (224) düzlemi RSM ölçümü. ....	123
<b>Şekil 6.64</b> VCSEL020 numaralı büyütmeğe ait (002) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	124

<b>Şekil 6.65</b> VCSEL020 numaralı büyütmeğe ait (004) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	125
<b>Şekil 6.66</b> VCSEL020 numaralı büyütmeğe ait (006) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu. ....	125
<b>Şekil 6.67</b> VCSEL020 numaralı numunenin fotoluminesans ve yansıma ölçümü. ..	127
<b>Şekil 6.68</b> Gerilme olmayan ve gerilme durumunda kuantum kuyusu valans bandındaki enerji seviyelerinin değişimi. ....	128
<b>Şekil 6.69</b> VCSEL020 numaralı numunenin 30°'de yansıma ölçümü ve simülasyonu. ....	129

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> III-V grubu ikili bileşik yarıiletkenlerin bant parametreleri. ....	13
<b>Çizelge 6.1</b> VCSEL015 numaralı büyütmenin gaz akış miktarları. ....	78
<b>Çizelge 6.2</b> VCSEL017 numaralı büyütmenin dinamik x-ışını simülasyonlarından bulunan kalınlık ve gerilme değerleri. ....	88
<b>Çizelge 6.3</b> ES2418 numaralı büyütmenin dinamik x-ışını simülasyonlarından bulunan kalınlık ve gerilme değerleri. ....	97
<b>Çizelge 6.4</b> ES2929 numaralı büyütmenin dinamik x-ışını simülasyonlarından bulunan kalınlık ve gerilme değerleri. ....	106
<b>Çizelge 6.5</b> VCSEL019 büyütmesinin dinamik x-ışını simülasyonu ile bulunan tabaka kalınlıkları ve indiyum alaşım oranları. ....	118
<b>Çizelge 6.6</b> VCSEL019 büyütmesinin dinamik x-ışını simülasyonu ile bulunan tabaka kalınlıkları ve indiyum alaşım oranları. ....	126

## SİMGELER DİZİNİ

<b>W</b>	:	Watt
<b><math>\mu</math></b>	:	Mikro
<b>a</b>	:	Örgü sabiti, Å
<b>T</b>	:	Öteleme vektörü
<b><math>E_G</math></b>	:	Enerji bant aralığı
<b><math>\theta</math></b>	:	Faz açısı
<b>R</b>	:	Mutlak yansırma
<b>r</b>	:	Yansırma
<b><math>\lambda</math></b>	:	Dalgaboyu
<b>c</b>	:	Işık hızı
<b><math>\epsilon_0</math></b>	:	Vakum geçirgenliğı
<b>n</b>	:	Reel kırılma indisi
<b><math>m_e</math></b>	:	Elektron etkin kütlesi
<b><math>m_h</math></b>	:	Hole etkin kütlesi
<b><math>\mu_e</math></b>	:	Elektron mobilitesi
<b><math>\mu_h</math></b>	:	Hole mobilitesi
<b><math>\alpha</math></b>	:	Soğurma katsayısı
<b>k</b>	:	Sönümlerme katsayısı
<b><math>k</math></b>	:	Dalga vektörü
<b><math>E_0</math></b>	:	Salıncı enerjisi

$E_d$	:	Dağınm enerjisi
$d$	:	Geometrik kalınlık
$\lambda_B$	:	Bragg dalgaboyu
$n_{gr}$	:	Grup kırılma indisi
$\Delta\lambda_{stop}$	:	DBR bant genişliği
$l_{eff}$	:	Etkin ayna uzunluğu
$d_{hkl}$	:	Düzlemler arası mesafe
$\theta/2\theta$	:	Theta/2-Theta
$Q_x$	:	Düzlem içi doğrultu kırınım vektörü
$Q_z$	:	Düzleme dik doğrultu kırınım vektörü
$\epsilon_{  }$	:	Düzlem içi gerilme
$\epsilon_{\perp}$	:	Düzleme dik doğrultuda gerilme
$\nu$	:	Poisson katsayısı
$\Lambda$	:	Periyot kalınlığı
$hh$	:	Ağır hole'ler
$lh$	:	Hafif hole'ler

## KISALTMALAR DİZİNİ

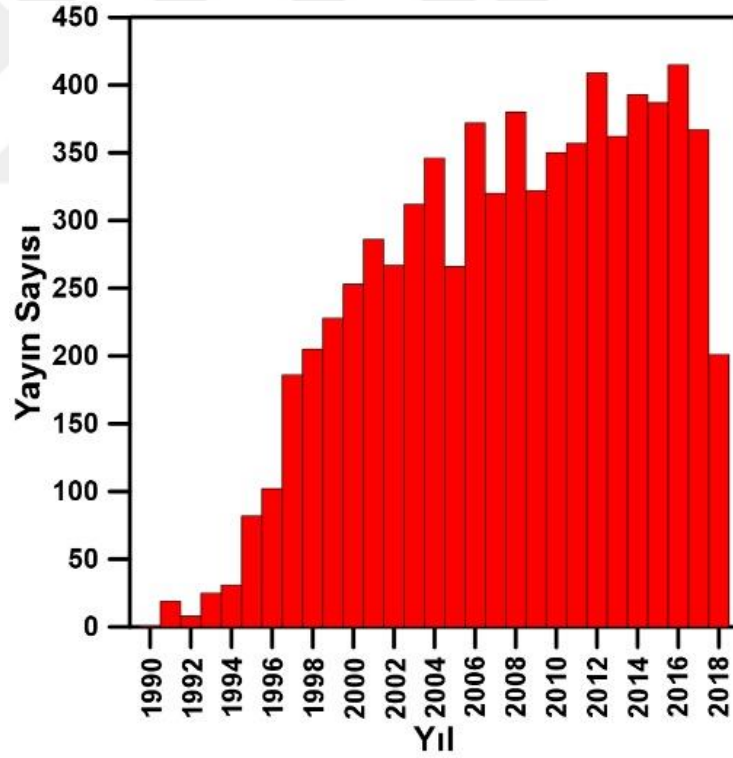
<b>SEL</b>	:	Yüzey Işımalı Lazer
<b>LD</b>	:	Lazer diyot
<b>QCL</b>	:	Kuantum Çağlayan Lazer
<b>VCSEL</b>	:	Düşey Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer
<b>VECSEL</b>	:	Düşey Harici Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer
<b>OP-VCSEL</b>	:	Optik Pompalı Düşey Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer
<b>MIXSEL</b>	:	Mod Kilitli Bütünleşik Harici Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer
<b>EEL</b>	:	Kenar ışmalı lazer
<b>UV</b>	:	Ultraviyole
<b>SiO<sub>2</sub></b>	:	Silisyum Dioksit
<b>TiO<sub>2</sub></b>	:	Titanyum Dioksit
<b>CH<sub>4</sub></b>	:	Metan
<b>NH<sub>3</sub></b>	:	Amonyak
<b>CO</b>	:	Karbon monoksit
<b>H<sub>2</sub>O</b>	:	Su
<b>HF</b>	:	Hidroflorik asit
<b>CO<sub>2</sub></b>	:	Karbondioksit
<b>TMM</b>	:	Transfer Matris Metodu
<b>MBE</b>	:	Moleküler Demet Epitaksi
<b>DBR</b>	:	Dağınımlı Bragg Yansıtıcısı

<b>CÜNAM</b>	:	Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi
<b>MOCVD</b>	:	Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>ETH ZÜRICH</b>	:	Zürich Politeknik
<b>SC</b>	:	Basit kübik
<b>BCC</b>	:	Cisim merkezli kübik
<b>FCC</b>	:	Yüzey merkezli kübik
<b>GaAs</b>	:	Galyum Arsenik
<b>AlAs</b>	:	Alüminyum Arsenik
<b>AlAsP</b>	:	Alüminyum Arsenik Fosfor
<b>InGaAs</b>	:	İndiyum Galyum Arsenik
<b>AlGaAs</b>	:	Alüminyum Galyum Arsenik
<b>AlP</b>	:	Alüminyum Fosfor
<b>InP</b>	:	İndiyum Fosfor
<b>eV</b>	:	Elektron Volt
<b>SBW</b>	:	Bant genişliği
<b>TMGa</b>	:	Trimetil Galyum
<b>TMAI</b>	:	Trimetil Alüminyum
<b>TMIIn</b>	:	Trimetil İndiyum
<b>AsH<sub>3</sub></b>	:	Arsin
<b>PH<sub>3</sub></b>	:	Fosfin
<b>NH<sub>3</sub></b>	:	Amonyak
<b>DMZn</b>	:	Dimetil Çinko

<b>CBr<sub>4</sub></b>	:	Karbon tetrabromit
<b>CBr<sub>2</sub>Mg</b>	:	BisCyclopentadienemagnezyum
<b>SiH<sub>4</sub></b>	:	Silan
<b>MFC</b>	:	Kütle akış kontrolcüsü
<b>RF</b>	:	Radyo frekansı
<b>RA</b>	:	Anizotropik yansıma
<b>RDS</b>	:	Yansıma anizotropi spektrofotometresi
<b>FWHM</b>	:	Yarı yükseklikteki genişlik
<b>SEM</b>	:	Taramalı elektron mikroskobu
<b>UV-VIS-NIR</b>	:	Ultraviyole-görünür-yakın kızılötesi
<b>PL</b>	:	Fotoluminesans
<b>HRXRD</b>	:	Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı
<b>QW</b>	:	Kuantum kuyusu
<b>RSM</b>	:	Ters uzay haritalandırması
<b>RHEED</b>	:	Yüksek Enerjili Elektron Kırınım Yansıması

## 1. GİRİŞ

Yarıiletken tabanlı elektronik ve optoelektronik aygıtların kullanımı günümüzde giderek artmaktadır. Bu artışa dünya genelinde yükselen enerji ihtiyacının yanı sıra yarıiletken aygıtların gösterdiği yüksek performanslarda oldukça katkı sağlamıştır. Bu nedenle çevremizde kullandığımız her aygıtın daha az enerji tüketir hale gelmesi büyük önem taşımaktadır. Bunların yanı sıra devletlerin her geçen gün artan askeri ihtiyaçlarının bir kısmının yarıiletken aygıtlar aracılığı ile karşılanabileceğinin anlaşılması yarıiletken araştırmalarında hızlı gelişmelere olanak sağlamıştır. Yoğun şekilde devam eden yarıiletken tabanlı aygıt araştırma alanlarından biride yüzey ışıklı lazerler olmuştur.

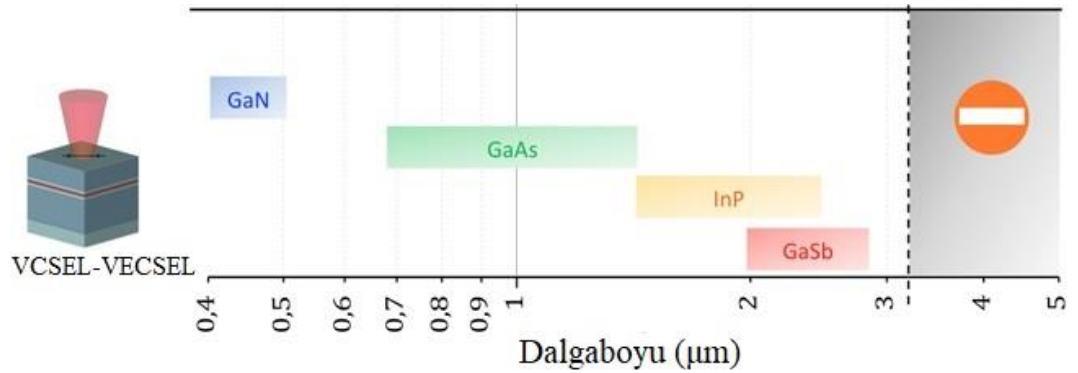


**Şekil 1.1** Web of Science arama motorundan elde edilen yüzey ışıklı lazerler ile ilgili yayınlanan makale sayıları.

Yapısal olarak yüzey ışıklı lazerlerin ilk tasarımı 1960'lı yıllarda Basov (Basov, 1972) tarafından yapılmıştır. Ancak bu yeni kavramın gösterimi için 1980'li yıllara

kadar beklenilmesi gerekmiştir. Günümüzde ilkel olarak adlandırabileceğimiz ilk yüzey ışmalı lazer 1979 yılında K. Iga tarafından yapılmıştır (Iga, 1987). Bu lazer elektrik-pompa yüzey ışmalı lazerdir (Vertical Cavity Surface Emitting Laser-VCSEL). 1990'lı yılların başına kadar bu yeni lazer türünde çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Yüzyılın son on yılında ise bu lazer türüne yeni bir tasarım öncülük etmiştir. Optik pompa yüzey kovuklu yüzey ışmalı lazerin (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser-VECSEL veya optik pompa-VCSEL) çalışması gösterilmiştir (M. Kuznetsov, 1997). Bu yeni tasarım ile elektriksel pompa lazerde mevcut olan birçok dezavantaj ortadan kaldırılmış geleneksel yarıiletken lazer diyotların performansları yakalanmıştır. Optik pompa lazerin yüksek performans göstermesinin ardından dünya genelinde yayınlanan makale sayısında olağanüstü artış gözlemlenmiştir.

Makale sayısındaki bu artışın nedeni yüzey ışmalı lazer araştırmalarının artmasının yanı sıra uygulama alanlarındaki artışta olmuştur. Günümüzde elektromanyetik spektrumun Ultraviyole (UV) bölgesinden orta kızılötesi (Mid-Infrared) bölgesine kadar elektriksel yada optik pompa VCSEL'lerin gösterimi başarı ile gerçekleştirilmiştir (Kaneda, 2008) (Rahim, 2008). Bu bölgelerde yaptığı ışımalarda 100 W pik şiddetinde ışın gücü (Heinen, 2012), pikosaniye ve femtosaniye değerlerinde çok kısa darbe süresi (Heinen, 2012), megahertz ile gigahertz aralığında tekrarlama (Butkus, 2013) (Saarinen, 2012) ve yüksek ortalama güç (Rudin, 2010) (Wilcox, 2013) (Scheller, 2012) gibi performans değerlerine ulaşılmıştır.



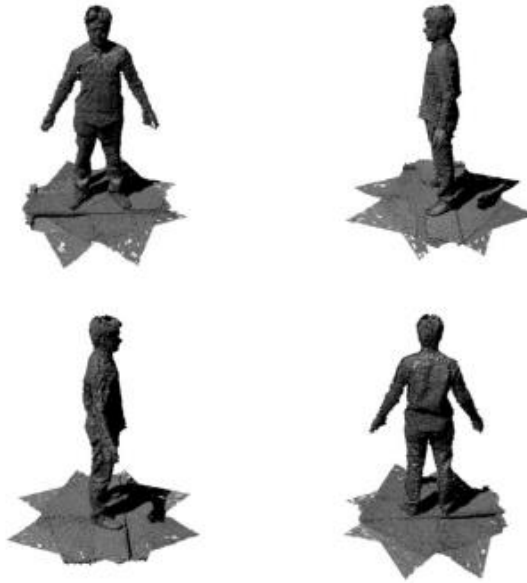
Şekil 1.2 Yüzey ışmalı lazerin çalışma bölgeleri

Yüzey ışmalı lazerlerden elde edilen sıra dışı performanslar kullanım alanlarında arttırmıştır. Geniş bir yelpazede kullanımları mümkün olmuştur. Günümüzde yüzey ışmalı lazerler Radar, Telekom ve LIDAR (light detection and ranging) sistemlerinde kullanılmaktadır (Strobel, 2010) (Bergen, 2009) (Fallahi, 2006).



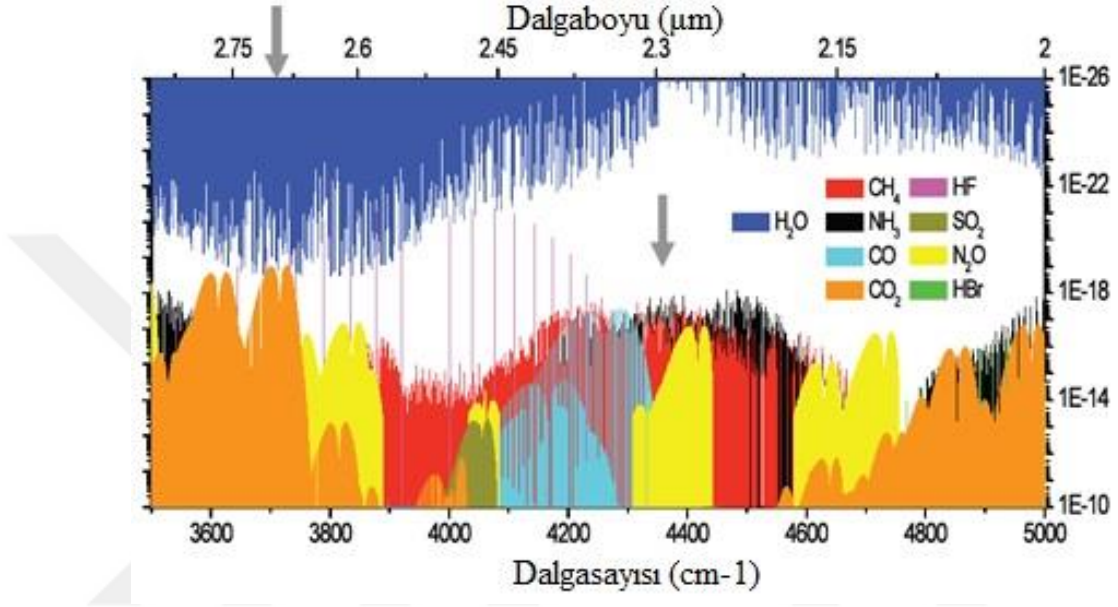
**Şekil 1.3** LIDAR uygulamasına ait görüntü

Bunların yanı sıra sağlık sektöründe hastalık teşhisinde, ameliyatlarda ve insan vücut ölçümleri ile bilgisayar oyunlarında sıkça kullanılmaya başlanmıştır (Perez, 2010).



**Şekil 1.4** Yüzey ışmalı lazer kullanılarak XBOX oyun konsolu için insan vücut ölçümleri ile elde edilen görüntü.

Yüzey ışıklı lazerler sivil uygulamaların yanı sıra güvenlik ve askeri uygulamalarda da kullanılmaktadırlar. 2-3 mikrometre dalga boyu aralığında CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, CO, HF, H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub> gazlarının güçlü soğurmalarından dolayı gaz algılama ve tespitinde sıkça kullanılmaktadır.



Şekil 1.5 2-3 µm dalgaboyu aralığındaki soğurma spektrumu.

Tez kapsamında öncelikle yüzey ışıklı lazer yapılarının optik özelliklerinin araştırılması için Transfer Matris Metodu kullanılarak teorik hesaplamalar yapılmıştır. Bunun yanı sıra doktora tez aşamasında kısa bir süre bulunduğum ETH Zürich First Lab'da Moleküler Demet Epitaksi (MBE) cihazı ile Dağınımlı Bragg Yansıtıcıları (DBR) büyütme yapılmıştır. Bu büyütme daha sonra DBR karakterizasyonunda ve VCSEL büyütülmesinde kullanılmıştır. Karakterizasyonlar için Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde (CÜNAM) bulunan yüksek çözünürlüklü x-ışını kırınım sistemi ve spektrofotometre, Cumhuriyet Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Ermaksan A.Ş.'de bulunan fotoluminesans cihazları kullanılmıştır. CÜNAM'da bulunan MOCVD sistemi kullanılarak tek katman, ayna tabakaları (DBR) ve aktif bölge (kuantum kuyusu-QW) büyütme yapılmıştır. Bunların yanısıra ETH Zürich'te büyütülen DBR yapısı üzerine, CÜNAM'da bulunan

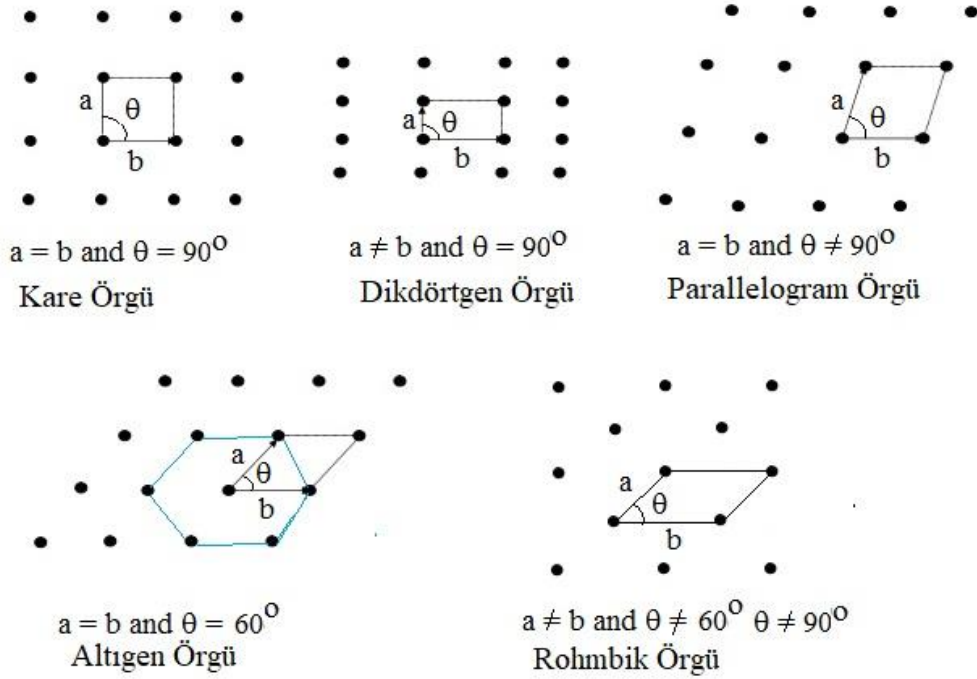
MOCVD sistemi kullanılarak kuantum kuyuları büyütülmüş ve optik pompalı VCSEL lazer yapısı elde edilmiştir. Ardından MOCVD sistemi ile tam bir optik pompalı VCSEL yapısı büyütülmüştür.



## 2. YARIİLETKENLER VE YÜZEY IŞIMALI LAZERLER

### 2.1. Kristal Yapı

Atomların yada bir grup atomun üç boyutlu periyodik dizilimi ile kristaller oluşur. İdeal bir kristal sonsuz sayıdaki atomun periyodik şekilde kusursuz dizilimi ile elde edilir. Alkali metallerde olduğu gibi en basit kristalde yapısal birim tek bir atomdur ancak en küçük yapısal birim birden çok atomdan yada molekülden oluşabilir. Tüm kristal yapıları örgü şeklinde tanımlanabilir, bu tanımda atomlar her bir örgü noktasında bulunurlar. Örgülerin çoklu sayıda tekrarı ile kristal yapıları oluşur.

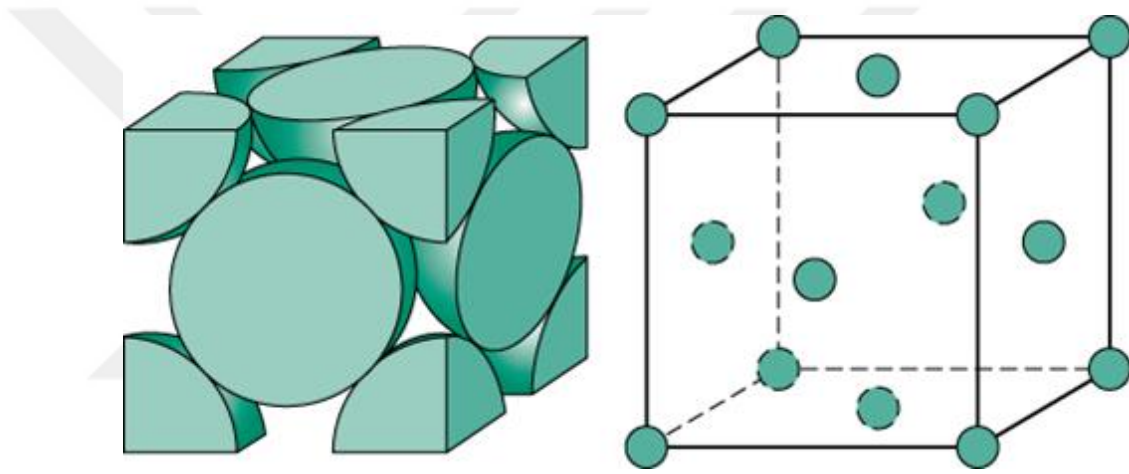


Şekil 2.1 Kristal örgü türleri.

Örgü üç-boyutlu uzayda vektörler ile tanımlanır. İlkel örgü vektörleri  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  ve  $\mathbf{a}_3$  olmak üzere atomlar örgü içerisinde öteleme vektörü  $\mathbf{T}$  ile her bir noktadan aynı görünürler.

$$\mathbf{T} = u_1 \mathbf{a}_1 + u_2 \mathbf{a}_2 + u_3 \mathbf{a}_3 \quad [2.1]$$

Burada  $u_1$ ,  $u_2$  ve  $u_3$  tam sayılardır. Kristal içerisindeki herhangi bir nokta  $T$  vektörü ile belirlenebilir. İlkel örgü vektörlerinin oluşturduğu tüm kristal yapıyı öteleme vektörü ile boşluk kalmayacak şekilde doldurabilen en basit kapalı alan ilkel hücre olarak adlandırılır ve birim hücre ilkel hücrenin bir türüdür. Herhangi bir kristal yapısı için ilkel hücre içerisindeki atom sayısı sabittir. Kübik kristal yapısında üç tür örgü vardır; basit kübik (simple cubic-sc), cisim merkezli (body centered cubic-bcc) ve yüzey merkezli kübik (face centered cubic-fcc).



Şekil 2.2 fcc örgü yapısı.

Tez kapsamında kullanılan yarıiletken kristal yapıların hepsi fcc örgü yapısına sahiptir. fcc yapısına sahip kristaller için öteleme vektörlerinin ilkel örgü vektörleri aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{a}_1 = \frac{1}{2}a(\hat{x} + \hat{y}) \quad [2.2]$$

$$\mathbf{a}_2 = \frac{1}{2}a(\hat{y} + \hat{z}) \quad [2.3]$$

$$\mathbf{a}_3 = \frac{1}{2}a(\hat{x} + \hat{z}) \quad [2.4]$$

Kristal yapıların incelemesinde ters örgü vektörünün bilinmesi elzemdir. İlkel örgü vektörlerine benzer olarak  $\mathbf{b}_1$ ,  $\mathbf{b}_2$  ve  $\mathbf{b}_3$  ters örgü uzayının ilkel örgü vektörleridir ve bu değerlerin bulunması ile ters örgü öteleme vektörü ( $\mathbf{G}$ ) benzer olarak elde edilebilir.

$$\mathbf{b}_1 = 2\pi \frac{\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3}{\mathbf{a}_1 \cdot (\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3)} \quad [2.5]$$

$$\mathbf{b}_2 = 2\pi \frac{\mathbf{a}_3 \times \mathbf{a}_1}{\mathbf{a}_1 \cdot (\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3)} \quad [2.6]$$

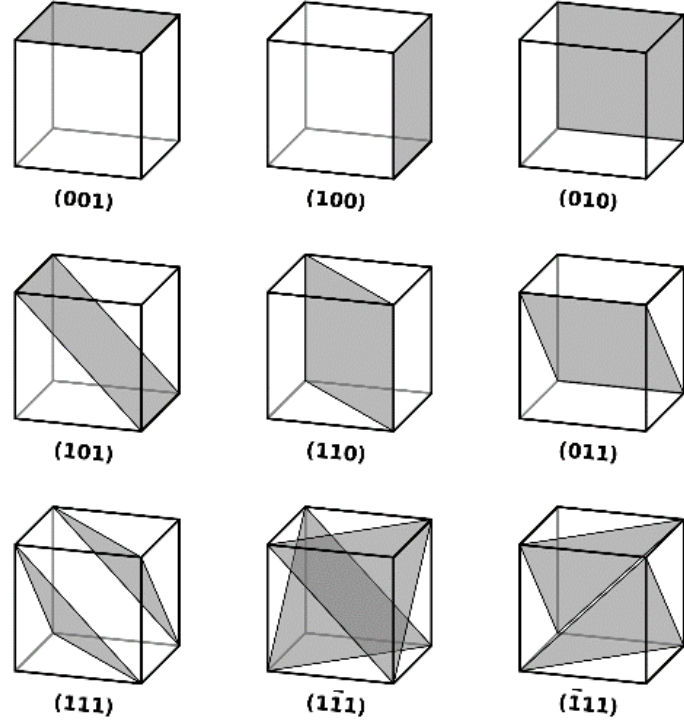
$$\mathbf{b}_3 = 2\pi \frac{\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2}{\mathbf{a}_1 \cdot (\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3)} \quad [2.7]$$

$v_1$ ,  $v_2$  ve  $v_3$  tam sayı olmak üzere ters örgü öteleme vektörü ilkel öteleme vektörleri ile ifade edilebilir.

$$\mathbf{G} = v_1 \mathbf{b}_1 + v_2 \mathbf{b}_2 + v_3 \mathbf{b}_3 \quad [2.8]$$

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{b}_j = 2\pi \delta_{ij} \quad [2.9]$$

İlkel örgü ve ters örgü ilkel vektörleri birbirilerine diktir. Bir kristalin kırınım deseni kristalin ters örgüsünün haritasıdır. İlkel ve ters örgü ilkel vektörleri kristal araştırmalarında x-ışını kırınımında sıkça kullanılmaktadırlar. Bu nedenle x-ışını kırınımında ölçülen düzlemler arası mesafe ile örgü sabitleri bulunabilmektedir. Bu amaçla kristal düzlemlerinin ifade edilmesinde Miller indisleri kullanılmaktadır. Bir örgü düzleminin Miller indisleri bu düzleme dik olan en kısa ters örgü vektörlerinin koordinatlarıdır ve Miller indisleri tam sayıdır. Bundan dolayı Miller indisleri h, k, l olan düzlem ters örgü vektörüne diktir. Kübik yapıya sahip kristal düzlemlerinin Miller indisleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



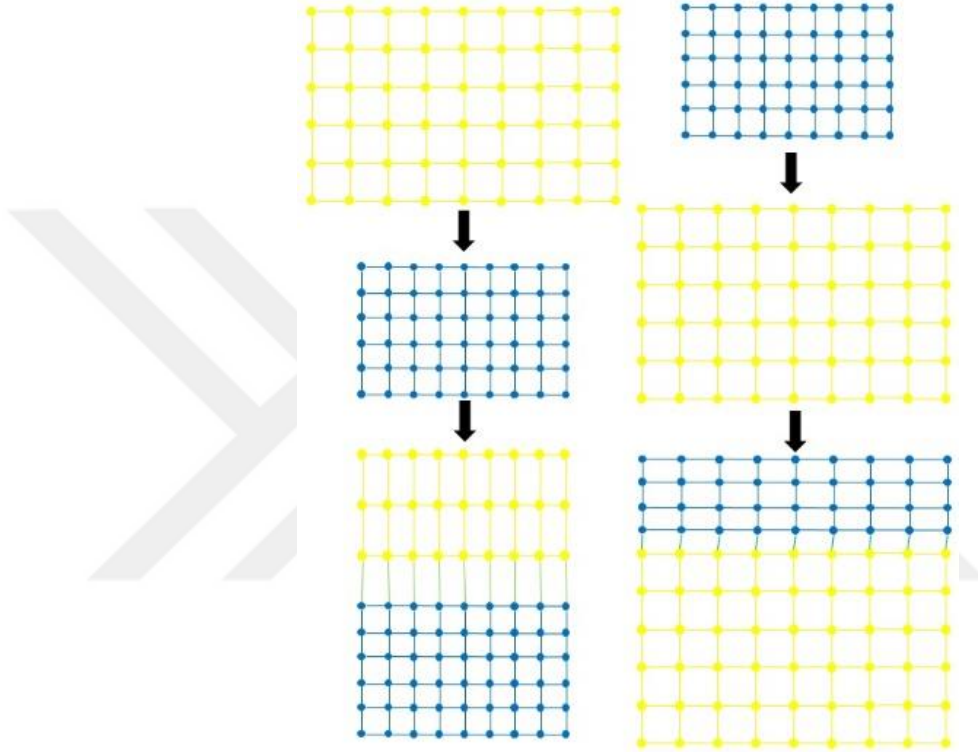
**Şekil 2.3** Kübik örgü düzlemlerinin Miller indisleri

Miller indisleri her bir düzlem için öteleme vektörlerinin katsayılarının tersi alınarak bulunmaktadır.

## 2.2. Kristal Yapıda Oluşan Gerilme ve Gevşeme

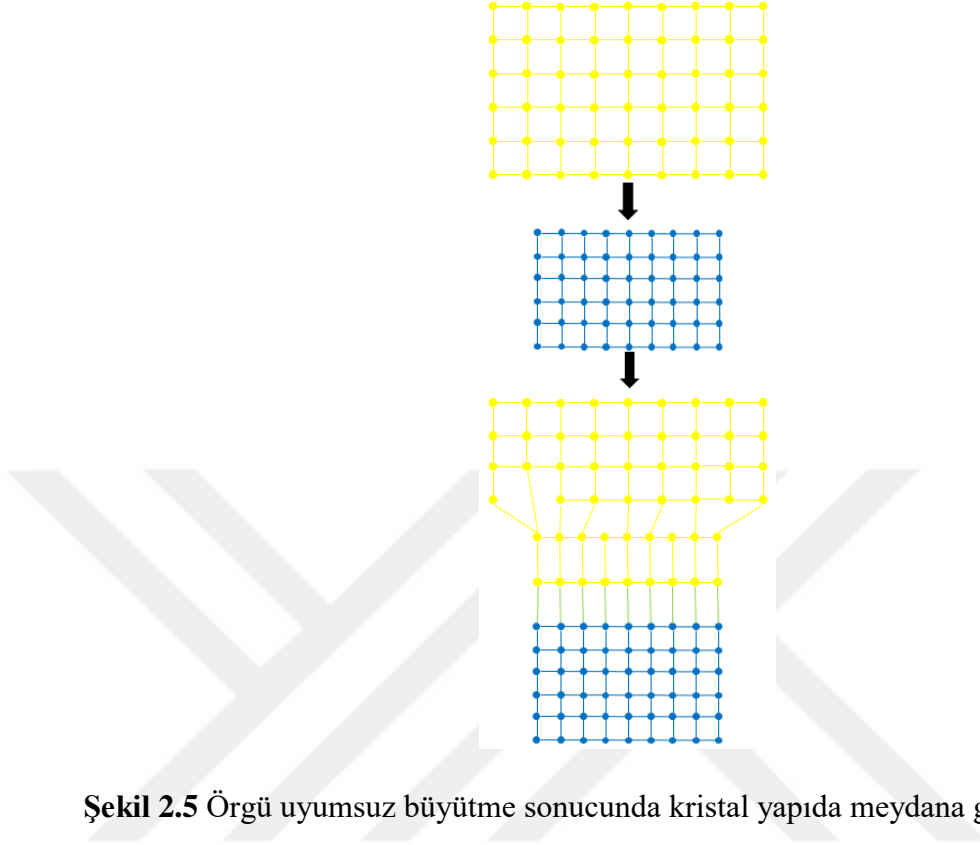
III-V grubu yarıiletkenler kovalent bağ ile oluşurlar ve bunlardan arsenik, fosfat ve antimoni tabanlı olanlar kübik kristal yapısına sahiptirler. Kübik kristal yapısında kristal üç boyutlu uzayda her yönden simetriktir ve bu nedenle kübik kristal yapıya sahip yarıiletkenlerde dikey ve yatay örgü sabitleri birbirine eşittir. AlAs, GaAs ve InAs'ın örgü sabitleri çizelge 2.1'de verilmiştir. AlAs ile GaAs'ın örgü sabitleri arasındaki fark %1'in altındadır ancak bu değer InAs için daha fazladır. InAs'ın GaAs ve AlAs ile arasındaki örgü uyumsuzluğu farkı %7'den biraz daha fazladır. Elektronik ve optoelektronik yapılarda kullanılması amacıyla bu yarıiletkenler sıkça üst üste büyütülmektedir ancak aralarındaki örgü uyumsuzluğundan dolayı büyütülen

kristallerde gerilmeler meydana gelmektedir. Eğer kullanılan alttaşın örgü sabiti büyütölen katmanın örgü sabitinden küçükse yapıda sıkıştırıcı gerilme (compressive strain) büyükse çekici (tensile strain) gerilme oluşur.



**şekil 2.4** Örgü uyumsuz büyütme sonucu oluşın gerilmeler. Sağda sıkıştırıcı gerilme solda ise çekici gerilme.

Bu gerilmeler yarıiletkenler arasındaki kritik kalınlık değerlerine kadar örgü uyumsuz (metamorphic) büyötmelere olanak sağlamaktadır. Kritik kalınlık örgü uyumsuz büyötmeye durumlarında belirli bir kalınlıktan sonra büyötülen katmanın gevşeyerek (relaxation) kendi örgü sabitinde büyümeye devam edeceği kalınlıktır.



**Şekil 2.5** Örgü uyumsuz büyütme sonucunda kristal yapıda meydana gelen gevşeme.

Kritik kalınlık sonrasında kristal yapıda noktasal ve çizgisel kusurlar meydana gelir ve kristal kalitesinde düşüğe neden olur. Bu kusur yoğunluğu direk olarak aygıt performansını etkiler ve düşük performansa neden olur.

### 2.3. Yarıiletkenler ve Temel Özellikleri

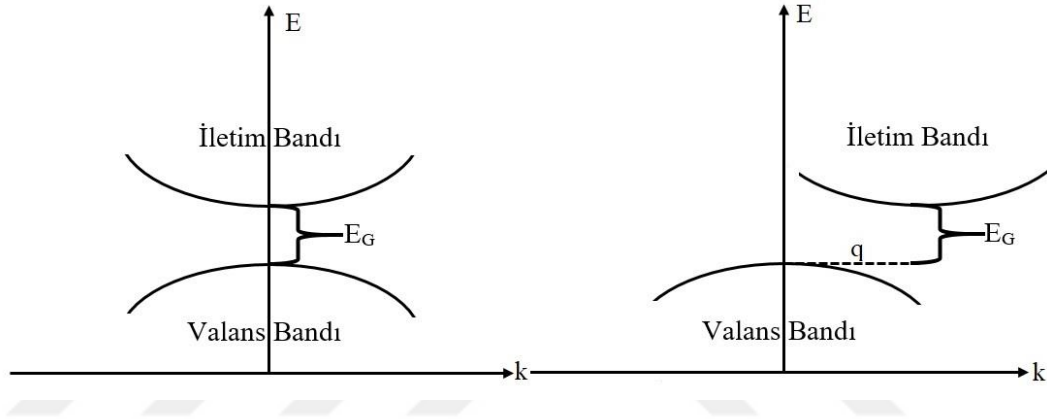
Serbest elektron modeline göre tamamen dolu bir elektronik banttaki elektron akım taşıyamaz ve bu tanım serbest elektron modeline göre yalıtkanlar ile metaller arasındaki farktır. Yalıtkanlarda temel durumda tüm bantlar ya tamamen dolu yada tamamen boşurlar, metallerde ise temel durumda bile en az bir bant kısmi olarak doludur. Yalıtkanlarda tamamen dolu elektronik bantların en üst seviyesi (valans bandı) ile tamamen boş elektronik bantların en alt seviyeleri (iletim bandı) arasında  $E_G$  kadar bir enerji bant farkı olan materyaller şeklinde tarif ederiz. Böyle bir elektronik bant yapısına sahip bir katı  $T=0^\circ K$ 'de akım iletmez. Ancak, mutlak sıfırın üzerindeki

sıcaklık değerlerinde termal olarak uyarılmış elektronların sıfırdan farklı bir olasılıkla enerji bant aralığını aşarak iletim bandına bulunma olasılıkları vardır. Termal olarak enerji bant aralığını aşan bu elektronlar akım iletebilirler. Bu olasılık değeri enerji bant aralığına bağlıdır ve sıcaklık ile üstel (exponentially) olarak ( $\text{Exp}(-E_G/kT)$ ) orantılıdır. Mutlak sıfır  $T=0^\circ \text{K}$ 'de yalıtkan olan ancak termal uyarımın erime sıcaklığının altındaki değerlerde enerji bant aralığının aşılmasıyla gözlemlenebilir iletkenlik oluşturduğu katılara yarıiletken denir. Yalıtkanlar ile yarıiletkenler arasındaki temel farklılık yalıtkanlarda enerji bant aralığının aşılamayacak seviyede olmasıdır. Bunun yanı sıra yarıiletkenlerde sıcaklığın artması ile iletkenlik artar ve metallere olan en keskin ayrımları budur çünkü metallerde elektron yoğunluğu sıcaklıktan bağımsızdır ve sıcaklığın artması ile gevşeme süresinin (relaxation time) azalması nedeniyle iletkenlik azalır. Bu nedenle yarıiletkenler iletkenliği metallere ile yalıtkanlar arasında olan malzemeler olarak da tanımlanırlar. Yarıiletkenler temel olarak iki sınıfa ayrılırlar: Elementel yarıiletkenler ve bileşik yarıiletkenler. Elementel yarıiletkenler periyodik cetvelin grup IV üyesi silisyum ve germanyumdur. Bileşik yarıiletkenler ise periyodik cetvelin III-V ve II-VI gruplarında bulunan elementlerin oluşturdukları yarıiletkenlerdir. Tez kapsamında kullanılan III-V grubu bileşik yarıiletkenlerin yapısal ve elektronik özellikleri çizelge 2.1'de verilmiştir.

Yarıiletkenler bant yapıları bakımından direk ve indirek olarak sınıflandırılırlar. İletim bandının minimum değeri ile valans bandının maksimum değeri momentum uzayında aynı momentum değerinde ise direk bant yapısına sahip yarıiletken olarak adlandırılır. İletim bandının minimum değeri valans bandının maksimum değerinden farklı bir momentum değerinde ise indirek yarıiletken olarak adlandırılırlar. İndirek bant yapısına sahip yarıiletkenlerde elektronun iletim bandı ile valans bandı arasında yaptığı geçişlerde momentumun korunması için elektron hareketine bir fonon etkileşimi eşlik eder. Direk bant yapısında ise momentum değerleri aynı olduğu için korunum doğal olarak sağlanmıştır. Bu nedenle indirek yarıiletkenlerin aktif olarak kullanıldığı optik aygıt yaygın değildir.

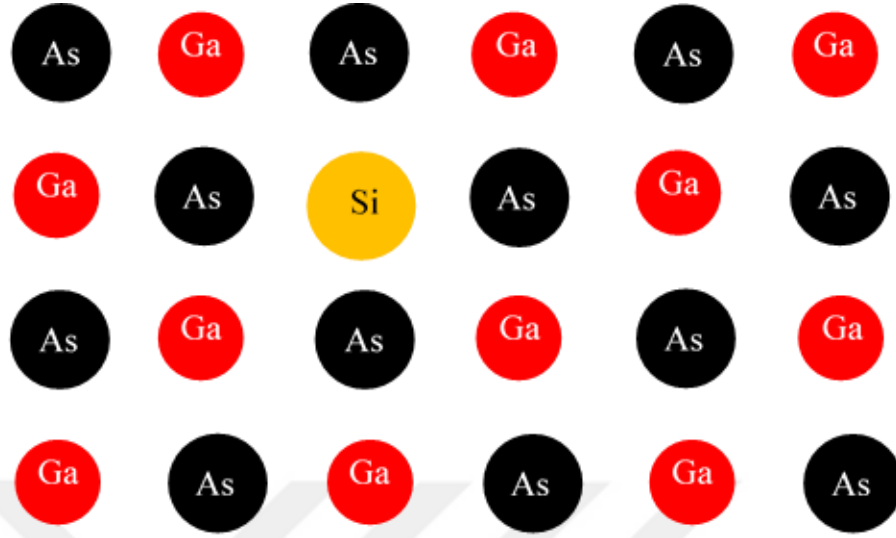
Çizelge 2.1 III-V grubu ikili bileşik yarıiletkenlerin bant parametreleri.

Materyal	Örgü Sabiti (Å)	Poisson Katsayısı	$E_G$ (eV)	Bant Yapısı
InAs	6,0583	0,35	0,41	Direk
GaAs	5,6533	0,31	1,42	Direk
AlAs	5,6611	0,32	2,90	İndirek



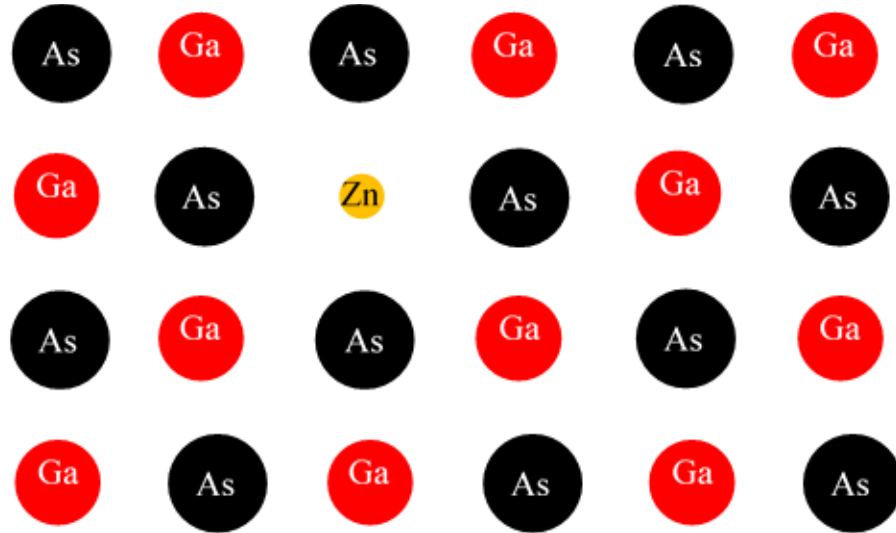
Şekil 2.6 Yarıiletkenlerin direk ve indirek bant yapıları

Bir yarıiletken içerisindeki yabancı atom sayısı çok az ve iletim bandındaki elektronlar sadece valans bandından gelmekte iseler yarıiletken saf yarıiletken olarak adlandırılır. Bu durumda yarıiletken içerisindeki safsızlıklar ihmal edilebilecek kadar azdır ve taşıyıcı yoğunluğuna etki etmezler. İletim bandındaki elektron yoğunluğu valans bandındaki pozitif yüklü “hole” yoğunluğuna eşittir. Yarıiletkenlerin elektronik ve optoelektronik aygıt üretimlerinde sıkça kullanılmasının bir nedeni ise iletkenliklerinin kontrol edilebilir olmasıdır. Yarıiletken kristallerin içerisinde kristali oluşturan elementlerden farklı bir element eklenerek bu gerçekleştirilir. III-V grubu yarıiletkenlerde katkılama amacıyla silisyum, magnezyum, çinko, berilyum ve karbon sıkça kullanılmaktadır. Eğer III-V grubu bir yarıiletken silisyum gibi periyodik cetvelin grup IV elementi ile katkılanırsa kristal yapı içerisinde bir serbest elektron fazlalığı oluşur ve yarıiletkende elektron-hole dengesi bozularak elektron yoğunluğu oluşur. Bu durumda yarıiletken n-tipi olarak adlandırılır.



Şekil 2.7 GaAs'a Silisyum eklenerek elde edilen n-tipi yarıiletken yapısı.

Eğer III-V grubu yarıiletken grup IIA ve IIB elementlerinden magnezyum, berilyum, çinko gibi elementler ile katkılanırsa bu grup elementleri kristal yapısında Galyum ile yer değiştirir ve atomik bağlar arasında bir boşluk oluşur. Kristal içerisindeki bu boşluk kristalin pozitif yüklü taşıyıcı bakımından yoğun hale gelmesine neden olur ve yarıiletken p-tipi olarak adlandırılır.



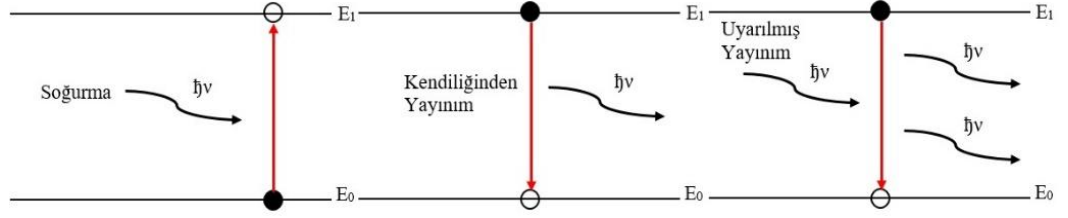
Şekil 2.8 GaAs'a Çinko eklenerek elde edilen p-tipi yarıiletken yapısı.

## 2.4. Yüzey Işımalı Lazerlerin Tarihsel Gelişimi

Einstein'ın teorik olarak uyarılmış yayını öngörmesinden (Einstein, 1917) sonra 1960 yılında Theodore H. Maiman tarafından yakut kristalinden üretilen ilk çalışan lazerin gösterimi yapılmıştır (Maiman, 1960). Yakuttan üretilen lazeri helyum ve neon'dan yapılan gaz lazerler takip etmiştir (Bennett W. R., 1962). İlk yarıiletken temelli lazer GaAs kullanılarak 1962 yılında Hall tarafından üretilmiştir (Hall, 1962). Bu yarıiletken temelli lazer kızılötesi bölgede ışımaya yaparken ilk görünür bölgede ışımaya yapan lazer Holonyak ve Bevacqua tarafından üretilmiştir (Holonyak, 1962). İlk lazerin gösteriminin ardından lazer teknolojileri üzerine çalışmalar büyük bir hızla artmıştır. Günümüz teknolojisinde lazerler askeri (Sprangle, 2009), tıp (Han, 2000), telekomünikasyon (Simoyama, 2012), sanayi (Lasers, 1997), bilgisayar (Michalzik, 2013), görsel sanatlar (Yonemura, 1985) ve bilimsel araştırmalarda yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Hayatımızdaki yeri gün geçtikçe artmakta ve varlığını bilmediğimiz alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Bilgisayar farelerinde imlecini kontrol etmekten, araçlardaki GPS sistemlerine kadar her yerde lazerler mevcuttur. Bunların yanı sıra veri depolamada kullanılan bulut sistemeleri ve fiber optik altyapıların tamamında lazerler yer almaktadır. Yarıiletken lazerler çalışma şekillerine göre başka bir deyişle elektronun yarıiletken içerisindeki hareketine göre iki gruba ayrılırlar:

- Bantlar arası geçiş (Interband Transition)
- Bantlar içi geçiş (Intraband Transition)

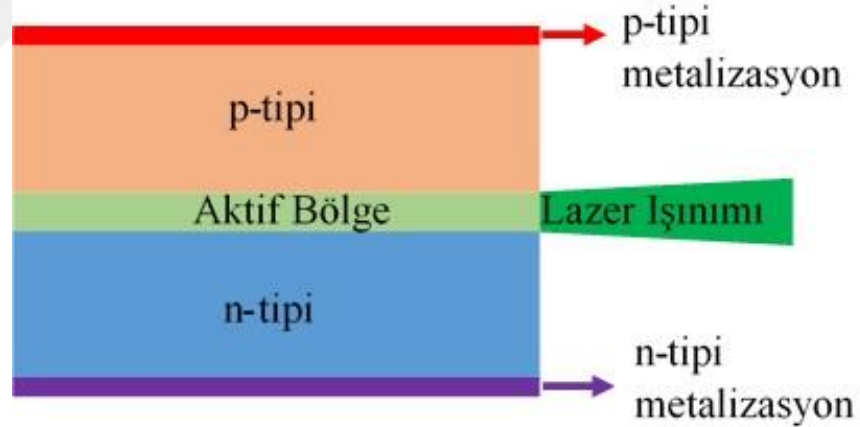
Bantlar arası geçiş genel olarak elektronun iletim bandı ile valans bandı arasındaki geçişlerde görülür. Valans bandından bir elektronun enerji kazanması ile iletim bandında geçmesi Şekil 2.9'da gösterildiği üzere soğurma olarak tanımlanır. İletim bandındaki bu elektron minimum enerji ilkesine göre tekrar valans bandına döner. Enerjinin korunumu için bu geçiş sırasında foton açığa çıkar ve bu olay kendiliğinden yayınım olarak adlandırılır. Kendiliğinden yayınım sonucu ortaya çıkan fotonun iletim bandından diğer elektronları tetikleyerek tüm elektronların valans bandına düşmesi sonucu, kendiliğinden yayınım ile eş fazlı ve enerjili fotonlar oluşur.



**Şekil 2.9** Bantlar arası geçiş ile soğurmanın ve uyarılmış yayınının gerçekleşmesi

Geleneksel lazer diyotlar ve yüzey ışıklı lazerler bantlar arası geçiş yapan lazer grubuna dâhildirler. Bunun yanı sıra yarıiletken lazerler ışımının dışarı çıktığı yere göre iki gruba ayrılırlar:

- Kenar Işıklı Lazer (Edge Emitting Laser-EEL): Lazer ışımınının yarıiletken katmanların yan kenarından çıkması durumunda lazer kenardan ışıklı olarak isimlendirilirler.



**Şekil 2.10** Kenar ışıklı lazer yapısı.

- Yüzey Işıklı Lazerler (Surface Emitting Laser-SEL): lazer ışımınının yarıiletken katmanların yüzey normaline paralel çıkması durumunda yüzey ışıklı olarak adlandırılırlar.

## Lazer Işınımı



Şekil 2.11 Yüzey ışıklı VCSEL yapısı.

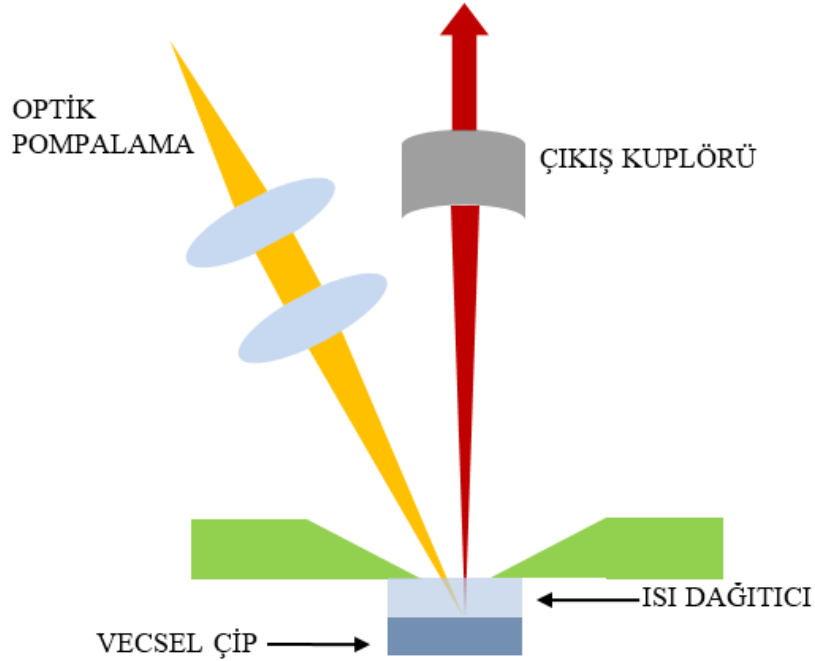
Lazer diyotlar (Laser diode-LD) ve Kuantum Çağlayan Lazerler (Quantum Cascade Laser-QCL) kenardan ışıklı lazer grubunda bulunurken. Düşey Kovuklu Yüzey Işıklı Lazerler (Vertical Cavity Surface Emitting Laser-VCSEL), Düşey Harici Kovuklu Yüzey Işıklı Lazerler (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser-VECSEL veya optik pompalı VCSEL) ve Mod Kilitli Bütünleşik Harici Kovuklu Yüzey Işıklı Lazerler (Mode-Locked Integrated Surface Emitting Laser-MIXSEL) yüzey ışıklı lazer grubuna dâhildirler.

Yüzey ışıklı lazerler kenar ışıklı lazerlere göre birçok avantajı bulunur:

- Düşük eşik akımı
- Yüksek verim
- Dairesel ışın
- Alttaş üzerinde test
- Kolay paketleme
- İki boyutlu dizinler ile üretim

Yüzey ışıklı lazer türlerinden olan VCSEL yapısı ilk olarak 1979 yılında K. Iga tarafından yapılmıştır (Soda, 1979) ve nüfus terslenmesi elektrik pompalama ile gerçekleştirilmiştir. Bu yüzey ışıklı lazer yapısında metal kaplamalar rezonatör aynaları ve elektrik kontaktları olarak kullanılmıştır. Yarıiletken katmanlar ise pn-eklemini oluşturabilmek için n-tipi InP alttaş üzerine n-tipi InP, GaInAsP aktif bölge ve p-tipi InP katmanlarından oluşmuştur. İlk yüzey ışıklı lazer 1,3  $\mu\text{m}$  dalgaboyunda

ışığa yapmıştır. VCSEL'in ilk gösteriminin ardından lazer ışınımını arttırmak amacıyla çalışmalar devam etmiş ve ilk VCSEL yapısından kullanılan rezonatör aynalarının yerini dielektrik malzemelerden oluşan  $TiO_2/SiO_2$  tabanlı Dağınımlı Bragg Yansıtıcıları (Distributed Bragg Reflector-DBR) almıştır (Iga, 1987). VCSEL'lerin büyük ilgi uyandırmasını sağlayan ilk çalışma ise Jewell (Patent No. US07538577, 1989) tarafından lazer ışınımının miliamper seviyesine ulaştığını göstermesi ile başlamıştır. Bu çalışmada dielektrik DBR'lerin yerini epitaksiyel AlAs/GaAs tabanlı DBR'ler almıştır. Bu çalışmada nüfus terslenmesinin sağlanabilmesi amacıyla DBR yapıları sırasıyla n ve p tipi olarak katkılanarak epitaksiyel büyütme ile elde edilmişlerdir. Literatüre katkı yapan tüm bu çalışmaların ardından 1992 yılından itibaren VCSEL'ler ticari olarak optik sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır (Geels, 1990). VCSEL'lerin yanı sıra 1997 yılında ilk optik pompalı VCSEL yapısı Kuznetsov (Kuznetsov, 1997) tarafından gösterilmiştir. Optik pompalı VCSEL yapısı GaAs alttaş üzerine 980 nm ışığa dalga boyunda olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapı içerisindeki DBR  $Al_{0,80}Ga_{0,20}As/GaAs$ 'dan oluşmaktadır ve aktif bölgede ise  $In_{0,20}Ga_{0,80}As$  kuantum kuyusu bulunmaktadır.



Şekil 2.12 VECSEL yapısı

Optik pompalı VCSEL temel olarak epi-ready alataş üzerine büyütölen katkısız DBR, aktif bölge ve yansıma önleyici katmandan oluşmaktadır. Rezonatör aynaları olarak DBR ve çıkış kuplörü kullanılmaktadır. Çıkış kuplörü VCSEL çipinden gelen ışımının bir kısmını çipe geri yansıtarak rezonansı sağlarken küçük bir kısmını ise lazer ışınımı olarak dışarı vermektedir. Optik pompalı VCSEL'ler harici olarak pompalandıkları için nüfus terslenmesinin sağlanması için pn-eklemine gerek kalmamaktadır. Bu nedenle epitaksiyel olarak büyütölmeleri elektrik pompalı VCSEL'lere göre daha kolaydır. Bunun yanı sıra optik pompalı VCSEL'ler geleneksel kenar ışımalı lazerlerin zayıf noktası olan eliptik ışın şeklinin üstesinden gelmesinin yanı sıra EEL'lere göre elektrik pompalı VCSEL yapılarının sahip olduğu düşük güç kısıtlamasını da aşmaktadır.

VCSEL'lerin EEL lazerlere göre avantajlarının gösterilmesi ve optik pompalı VCSEL'lerin düşük çıkış gücü probleminin aşılmasından sonra VCSEL'ler üzerine çalışmalar artmıştır. VCSEL'lerde kullanımı elzem olan DBR'lerin performansını arttırmak ve optik kayıpları azaltmak için çalışmalar yapılmıştır. DBR yapılarında kullanılan GaAs yarıiletkenler arasında direk bant yapısına sahip olması nedeniyle sık kullanılan bir yarıiletkendir. Sahip olduğu üstün optik özellikleri (direk bant yapısı, görünür ve kızılötesi bölge uygulamalarına uygun olması vb.) ise onu optik aygıtların yapımında kullanışlı kılar. GaAs'ın yanı sıra AlAs'da sıkça kullanılan bir III-V grubu yarıiletkendir. AlAs ile GaAs arasında yaklaşık olarak %0,14'lük bir örgü sabiti uyumsuzluğu vardır. AlAs'ın enerji bant aralığı daha geniştir. Kırılma indisleri ise 980 nm'de sırasıyla AlAs ve GaAs için 2,9 ve 3,5'dir. AlAs ve GaAs arasında bulunan kısmen düşük örgü sabiti uyumsuzluğu, uygun alaşımlarının yapılabilmesi ve aralarındaki kırılma indisi farkından dolayı DBR yapımı için oldukça kullanışlıdır. AlAs ile GaAs arasındaki örgü uyumsuzluğu her ne kadar düşük olsa da bu yapıların kalın tabakalar halinde üst üste büyütölmeleri durumunda (DBR yapılarında) kristal yapısında deformasyonlar meydana gelmektedir. Matthews-Blakeslee GaAs üzerine büyütölmüş AlAs yapısı için kritik kalınlığı 488 nm olarak vermişlerdir (Matthews, 1974). Bu durumda GaAs üzerine büyütölen ilk birkaç AlAs tabakasından itibaren yapıda gevşmeden (relaxation) kaynaklı deformasyonlar (kusurlar) meydana gelecektir. Bu da muhtemel cihaz performansını düşürecektir. Bu tür performans düşürücü durumların önüne geçmek amacıyla literatür de farklı çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmalarda 1995 yılında Mazuelas ve arkadaşları tarafından GaAs'ın yüksek oranda karbon (C) ile katkılanması çalışılan yöntemlerden biridir (Mazuelas, 1995). AlAs/GaAs yapısının  $\sim 10^{20}$  mertebesinde katkılanması ile AlAs yapısında meydana gelen gevşeme önlenmiştir. Ancak, yüksek katkılama oranı nedeniyle DBR'nin yansıtma özelliğinde serbest taşıyıcı soğurmasından kaynaklı düşüşler meydana gelmiştir. Elde edilen AlAs:C/GaAs:C yapısının x-ışını kırınımı ile yapısal olarak incelenmesiyle elde edilen kırınım desenlerinde (peak) genişleme meydana gelmiştir. Bu sonuç eklenen safsızlık atomları nedeniyle kristal kalitesinde düşüşü göstermektedir. Benzer çalışma yine 1997 yılında Mazuelas ve arkadaşları tarafından yapılmış, bu çalışmada GaAs'ın karbon yerine berilyum (Be) ile AlAs ise yine karbon ile katkılanmıştır (Mazuelas A. H., 1997). Çalışma sonucunda yine AlAs/GaAs yapısında oluşan gevşemenin önüne geçilmiş ve kristal kalitesinde bir önceki çalışmadan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu çalışmalarında yine katkılama atomlarından kaynaklanan yansımadaki düşüşün önüne geçememişlerdir. Yine aynı yıl yaptıkları başka bir çalışmada elde ettikleri sonuçlara göre 10 çift katkılanmış AlAs/GaAs DBR için yansıma %93 elde edilirken bu sonuç katkılanmamış DBR yapısı için %96 olarak elde edilmiştir. 20 adet katkılanmış AlAs/GaAs DBR yapısı için yansıma %98 olarak elde edilirken katkılanmamış DBR için bu değer %99 olarak ölçülmüştür (Mazuelas A. H., 1998). Tüm çalışmalarda AlAs ve GaAs'ın Be ve C ile katkılanması sonucunda bu katmanlar pozitif yüklü taşıyıcı bakımından baskın hale geçmiştir ve böylece bu katmanlar p-tipi yarıiletken olarak elde edilmişlerdir. Sonuç olarak bir VCSEL yapısı için ayrıca gerekli olan elektron yoğunluğu fazla n-tipi DBR için herhangi bir gerilme engelleyici performans düşürmeyen bir çözüm bulunamamıştır.

Bu tez kapsamında GaAs/AlAs DBR yapısı için gerilme ve gerilme nedenli performans düşürücü etkenler detaylı olarak yapısal ve optiksel özellikler bakımından araştırılmıştır. GaAs/AlAs DBR yapısındaki gerilmenin önüne geçilmesi ve performans düşüşünü önlemek amacıyla AlAs tabakasına fosfor (P) eklemesi ile elde edilen GaAs/AlAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub> DBR yapısı teorik olarak incelenmiştir. Son olarak optik pompalı VCSEL yapısı GaAs alttaş üzerine 30 çift AlAs/GaAs DBR ve aktif bölge

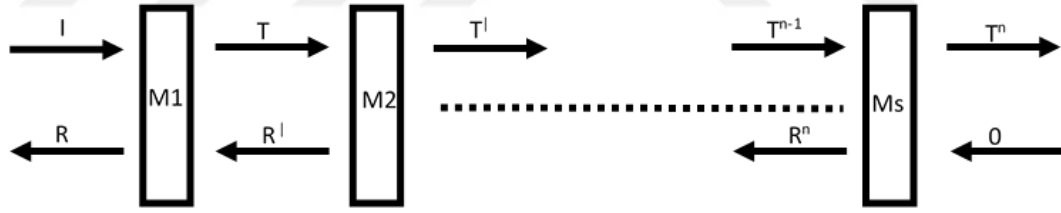
olarak  $\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  kuantum kuyusu bölgesi beş çift olarak MOCVD tekniği ile büyütölmüş, yapısal ve optik karakterizasyonları yapılmıştır.



### 3. TEORİ

#### 3.1. Transfer Matris Metodu (TMM)

Dağınımlı Bragg Yansıtıcılarının (Distributed Bragg Reflector-DBR) geçirgenlik (transmissivity) ve yansıtıcılık (reflectivity) özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan en yaygın ve doğru yollardan biri TMM'dir. Bu metot da DBR geçirgenlik çizgisi (transmission line) olarak modellenmektedir (Yariv, 1984). Varsayımın temel amacı DBR üzerine gönderilen elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünü DBR'den yansıyan elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörü ile ilişkilendirmektir. Elektromanyetik dalga bir madde üzerine gönderildiğinde temel olarak yansıtılır, soğurulur veya madde içerisinden geçer. DBR modellemesinde serbest taşıyıcı soğurması (free carrier absorption) dışında DBR üzerine gelen elektromanyetik dalganın yansıtıldığı veya DBR'den geçtiği varsayılmaktadır. Bu durumda gelen akı yansıtılan ve soğurulan akı miktarına eşit olacaktır.



Şekil 3.1 Bir madde ortamına gelen, yansıyan ve geçen elektromanyetik dalga.

TMM'de elektromanyetik dalga bir madde ortamından geçtiği anda elektromanyetik dalgada faz değişimi meydana gelir. Bu değişim 2x2 boyutunda durum matrisi ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_{gelen}^+ \\ E_{yansiyen}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-i\theta} & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{geçen}^+ \\ E_{yansiyen}^- \end{bmatrix} \quad [3.1]$$

Burada  $\theta$  faz açısıdır. Faz açısı elektromanyetik dalganın geçtiği maddenin kalınlığı ve dalga vektörünün ( $k$ ) çarpımına eşittir. Dalga vektörü  $k$ 'nin girişim yönü olmak üzere  $k = \frac{2n\pi}{\lambda}$  dalgaboyu ve kırılma indisine bağlı olarak verilir. Elektromanyetik dalga bir

madde sınırına geldiği zaman, elektromanyetik dalganın elektrik alan ve manyetik alan vektörleri süreklilik denklemini sağlar.

$$\begin{bmatrix} E_L \\ H_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_R \\ H_R \end{bmatrix} \quad [3.2]$$

Burada denklemleri basite indirmek amacıyla  $E_{gelen}^+$ ,  $E_L^+$  olarak ve  $E_{yansıyan}^-$  ise  $E_L^-$  olarak tanımlanmıştır. Elektromanyetik Maxwell denklemlerine göre yansıyan elektromanyetik dalga için [3.3] ve [3.4] formülündeki denklemler yazılabilir.

$$E_L = E_L^+ + E_L^- \quad [3.3]$$

$$H_L = n_L(E_L^+ - E_L^-) \quad [3.4]$$

Bu denklemleri matris formunda yazabiliriz.

$$\begin{bmatrix} E_L \\ H_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_L & n_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} \quad [3.5]$$

Bu denklemlerin yanı sıra benzer matris denklemini madde ortamından geçen elektromanyetik dalga içinde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} E_R \\ H_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_R & n_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R^+ \\ E_R^- \end{bmatrix} \quad [3.6]$$

Yukarıda yaptığımız basitleştirmeyi burada da uygularsak,  $E_R^+ = E_{geçen}^+$  ve  $E_R^- = E_{yansıyan}^-$  olarak tanımlanır. Korunum yasalarından yararlanarak [3.5] ve [3.6] denklemlerini birbirine eşitleyebiliriz.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_L & n_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_R & n_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R^+ \\ E_R^- \end{bmatrix} \quad [3.7]$$

$$\begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_L & n_L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_R & n_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_R^+ \\ E_R^- \end{bmatrix} \quad [3.8]$$

Elde edilen [3.8] eşitliğine göre bir elektromanyetik dalga herhangi bir madde ortamından geçtiği zaman sağ taraftaki elektromanyetik alan vektörünü sağ taraftaki madde ortamının durum matrisi ve sol taraftaki madde ortamının durum matrisinin tersi ile çarpıyoruz.

$$[B_L] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_L & n_L \end{bmatrix} \text{ ve } [B_R] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -n_R & n_R \end{bmatrix} \quad [3.9]$$

Olmak üzere [3.8] denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} = [B_L]^{-1} [B_R] \begin{bmatrix} E_R^+ \\ E_R^- \end{bmatrix} \quad [3.10]$$

Elektromanyetik dalga bir madde ortamına girdikten sonra madde ortamından geçer ve madde ortamının sağ kenarına ulaşır. Bu durumda elektrik alan vektörünü  $[B_R]^{-1}$  ve  $[B_L]$  durum matrisleri ile çarpmamız gerekmektedir. Bu durumda elde edilen denklemler aşağıda verilen formları oluştururlar.

$$\begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} = [B_L]^{-1} [B_R] \begin{bmatrix} e^{-i\theta} & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix} [B_R]^{-1} [B_L] \begin{bmatrix} E_R^+ \\ E_R^- \end{bmatrix} \quad [3.11]$$

$$\begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} = [Ortam] \begin{bmatrix} E_R^+ \\ E_R^- \end{bmatrix} \quad [3.12]$$

$$[Ortam] = [B_L]^{-1} [B_R] \begin{bmatrix} e^{-i\theta} & 0 \\ 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix} [B_R]^{-1} [B_L] \quad [3.13]$$

Burada [3.13] denklemi ortam matrisidir ve bu ortam matrisi DBR'ye göre genelleştirilebilir. AlAs ve GaAs'dan oluşan çoklu DBR yapısı için ortam denklemi;

$$[GaAs]^{-1} [AlAs] \begin{bmatrix} e^{-i\theta_{AlAs}} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_{AlAs}} \end{bmatrix} [AlAs]^{-1} [GaAs] \begin{bmatrix} e^{-i\theta_{GaAs}} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_{GaAs}} \end{bmatrix} [GaAs]^{-1} \dots \quad [3.14]$$

$$[M_1] = [AlAs] \begin{bmatrix} e^{-i\theta_{AlAs}} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_{AlAs}} \end{bmatrix} [AlAs]^{-1} \quad [3.15]$$

$$[M_2] = [GaAs] \begin{bmatrix} e^{-i\theta_{GaAs}} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_{GaAs}} \end{bmatrix} [GaAs]^{-1} \quad [3.16]$$

Şeklinde ifade edilir. Bu denklemlerde  $M_1$  AlAs'ın  $M_2$  ise GaAs'ın toplam ortam matrisleridir. N tabakadan oluşan bir DBR yapısı için toplam transfer matrisi [3.17] denklemindeki gibi ifade edilir.

$$[TM] = [M_1][M_2] \dots \dots \dots [M_N] \quad [3.17]$$

$[M_1][M_2] = [M_C]$  olmak üzere transfer matrisi son olarak [3.18] denklemindeki gibi yazılabilir.

$$[TM] = [M_C]^N [M_S] \quad [3.18]$$

Bu durumda toplam elektrik alan aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} = [TM] \begin{bmatrix} E_R^+ \\ E_R^- \end{bmatrix} \quad [3.19]$$

Çoklu DBR yapısının üzerine gelen tüm elektromanyetik dalgayı yansıttığını varsayarsak, alttaştan yansıma sıfır olacaktır. Bu durumda  $E_R^- = 0$  olur ve [3.19] denkleminin [3.20] numaralı denklemindeki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} E_L^+ \\ E_L^- \end{bmatrix} = [TM] \begin{bmatrix} E_R^+ \\ 0 \end{bmatrix} \quad [3.20]$$

Yansımanın tanımını kullanarak (yansıyan/gelen) DBR'den yansıma için aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$r = \frac{E_L^-}{E_L^+} \quad [3.21]$$

$$R = |rr^*| = \left| \frac{E_L^-}{E_L^+} \right|^2 \quad [3.22]$$

DBR yapılarının katkılanması durumunda DBR'yi oluşturan yarıiletkenlerin reel kırılma indisinde değişim meydana gelir. Bu değişim temel olarak katkılama türü, katkılama miktarı dalgaboyu ve etkin kütleyle bağlı olarak değişmektedir (Bennett, 1990).

$$\Delta n = - \left( \frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \right) \left( \frac{N}{m_e} + \frac{P}{m_h} \right) \quad [3.23]$$

Burada N, n-tipi katkılama miktarı, P, p-tipi katkılama miktarı,  $m_e$  elektronlar etkin kütlesi ve  $m_h$  hole etkin kütlesidir. Katkılama ile yarıiletken içerisinde serbest taşıyıcılar oluşur. Bu taşıyıcılar dalgaboyundan bağımsız olarak DBR üzerine gelen elektromanyetik dalgayı her dalgaboyunda soğururlar ve bu etki serbest taşıyıcı soğurması olarak tanımlanır. DBR'den elde edilen yansımanın doğru olarak hesaplanması için bu etkinin hesaplamalara katılması gerekir ve bu etki karmaşık kırılma indisinde soğurma katsayısı yardımı ile hesaplamalara dâhil edilir (Asplund, 2001).

$$\alpha = \frac{q^3 \lambda^2}{4\pi^2 \epsilon_0 n c^3} \left( \frac{N}{m_e^2 \mu_e} + \frac{P}{m_h^2 \mu_h} \right) \quad [3.24]$$

Sönümlenme katsayısının ardından soğurma katsayısı

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad [3.25]$$

formülü ile belirlenir. Reel kırılma indisindeki değişim ve soğurma katsayısının belirlenmesinin ardından karmaşık kırılma indisi [3.26] formülündeki gibi tanımlanır.

$$N = (n + \Delta n) + ik \quad [3.26]$$

### 3.2. III-V Yarıiletkenlerin Kırılma İndisinin Hesaplanması

Yarıiletkenlerin optik özelliklerinin incelenmesinde de kırılma indisleri sıkça kullanılmaktadır. Bu nedenle kırılma indislerinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Kırılma indislerinin hesaplanması amacıyla literatürde Cauchy modeli (Jenkins, 1981), Sellmeier katsayıları (Sellmeier, 1871), Adachi modeli (Adachi, 2009), tekli salınıcı (single Oscillator) veya modifiye edilmiş tekli salınıcı modeli sıkça kullanılmaktadır (Wemple, 1971). Temel olarak kırılma indisi reel ve sanal kısımdan oluşacak şekilde

karmaşık formda ifade edilir. Burada  $N$  karmaşık kırılma indisi,  $n$  reel kırılma indisi,  $k$  ise soğurma katsayısı ve  $\lambda$  dalgaboyudur.

$$N(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \quad [3.27]$$

Kırılma indisinin değişimi soğurmanın olmadığı foton enerjilerinde temel soğurma (fundamental absorption), serbest taşıyıcı soğurması (free carrier absorption) ve örgü soğurması (lattice vibration) değerlerince belirlenir. Bu etkilerin içerisinde temel soğurma en etkili olanıdır. Wemple and DiDomenico temel soğurmanın kırılma indisi değişimine olan etkisinin tekli salıncı modeline eşdeğer olduğunu göstermişlerdir (Wemple, 1971). Buradan yola çıkarak kırılma indisinin bulunabilmesi için bir formül türetmişlerdir.

$$n^2 - 1 = \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (h\nu)^2} \quad [3.28]$$

Burada  $E_0$  salıncı enerjisi (oscillator energy),  $E_d$  dağınım enerjisi (dispersion energy),  $h$  Planck sabiti ve  $\nu$  foton frekansı olmak üzere  $h\nu$  foton enerjisidir. Salıncı enerjisi ve dağınım enerjisi her bir yarıiletken için değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla hesaplanmak istenen her bir malzeme için ayrı ayrı değerleri bulunmalıdır, bunun yerine arsenik (arsines-As), fosfor (phosphine-P) ve antimon (antimony-Sb) tabanlı III-V yarıiletkenler için salıncı enerjisini ve dağınım enerjisini veren genel bir denklem çıkarılması daha kolay olacaktır. Bu amaçla T. Takagi (Takagi, 1982) As, P ve Sb tabanlı III-V yarıiletkenler için genel bir denklem türetmiştir. Bu denklem yardımıyla öncelikle salıncı enerjisi yarıiletkenin direk enerji bant aralığına bağlayan [3.29] formülünü türetmiştir.

$$E_0 = 1,80E_g + 0,90 \quad [3.29]$$

$E_g$  yarıiletkenin direk enerji bant aralığıdır. Bunun ardından dağınım enerjisini salıncı etkisine bağlayan denklemi türetmiştir.

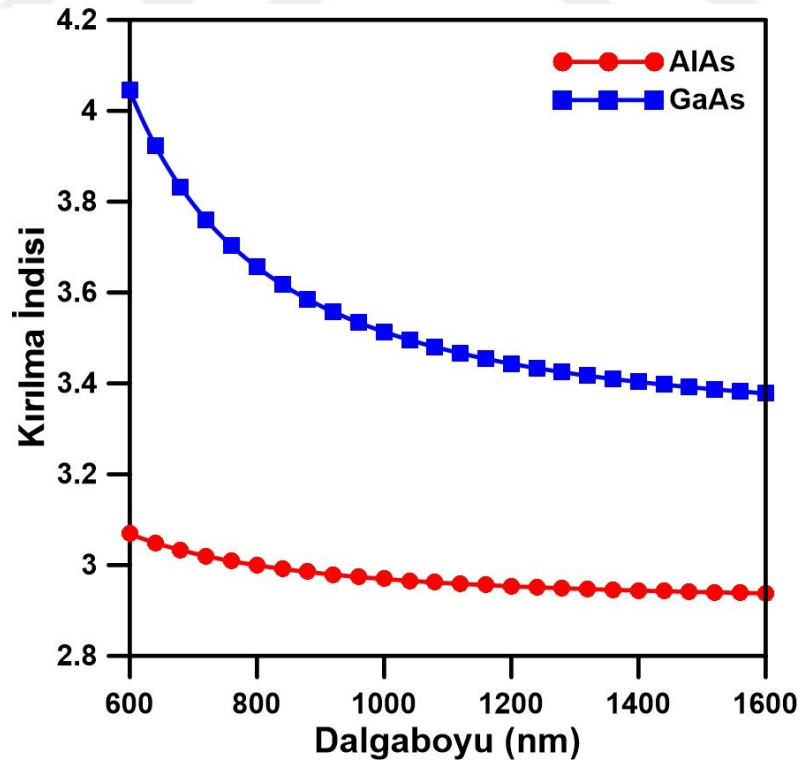
$$\frac{E_d}{E_0} = 9,89 A_{III} B_V \quad [3.30]$$

Burada  $A$  ve  $B$  katsayıları yarıiletkenin oluştuğu III ve V grubu malzemelerin konsantrasyonlarına bağlı parametrelerdir.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{In}_y\text{P}_a\text{As}_{1-a-b}\text{Sb}_b$  formundaki yarıiletken için katsayılar [3.31] formülündeki gibidir.

$$A_{III} = 0,76^x * 1,08^z \quad [3.31]$$

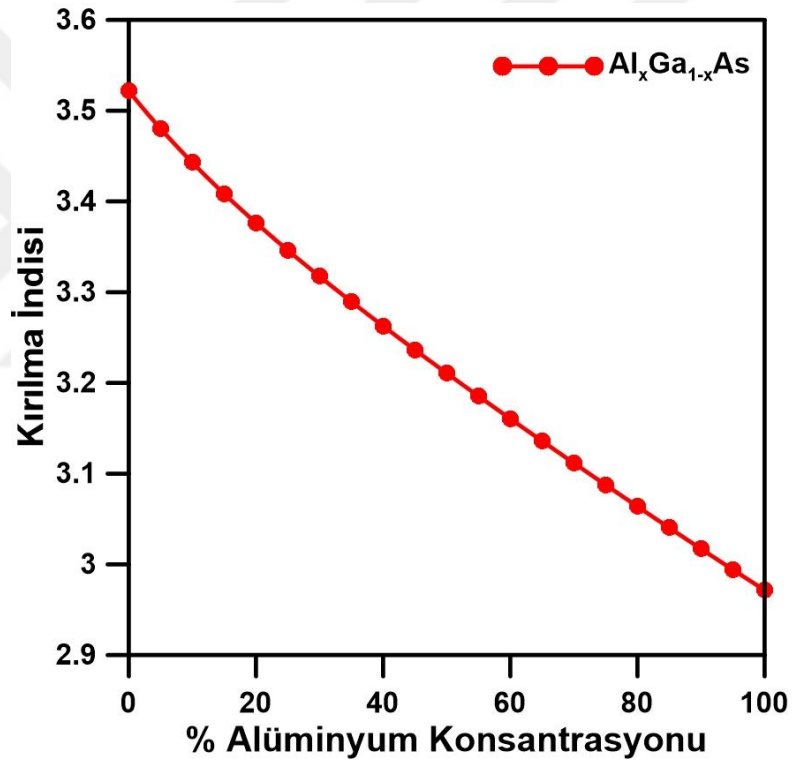
$$B_V = 0,82^a * 1,26^b \quad [3.32]$$

Yarıiletkenin bileşimini ve alaşım oranlarını belirleyen parametreler  $0 \leq x, y, z, a, b, c \leq 1$  arasında olmak üzere yarıiletkenlerin kırılma indisini foton enerjisine yada dalga boyuna bağlı olarak hesaplanabilmesine olanak sağlamaktadır. Tez kapsamında yapılacak simülasyon hesaplamalarının tamamında yarıiletken malzemelere ait reel kırılma indisi yukarıda ifade edilen denklemler kullanılarak bulunacaktır. AlAs, GaAs için dalga boyuna bağlı olarak kırılma indislerinin değişimi Şekil 3.2 'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.2 Dalga boyuna karşılık kırılma indisi, AlAs (kırmızı), GaAs (mavi).

Yarıiletkenlerde kırılma indisi enerji bant aralığı ile ters orantılıdır. AlAs'ın direk enerji bant aralığı 3,01 eV iken GaAs'ın enerji bant aralığı 1,42 eV'dir. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere temel soğurmanın olmadığı dalga boylarında AlAs'ın kırılma indisi GaAs'ın kırılma indisinden daha küçüktür. Bu bağlamda  $Al_xGa_{1-x}As$  üçlü alaşım yapısı için Alüminyum (Al) oranı arttıkça  $Al_xGa_{1-x}As$ 'ın enerji bant aralığı artar buna bağlı olarak kırılma indisi azalır. 980 nm dalgaboyu için  $Al_xGa_{1-x}As$  kırılma indisinin Al konsantrasyonuna bağımlılığı şekil 3.3'te verilmiştir.

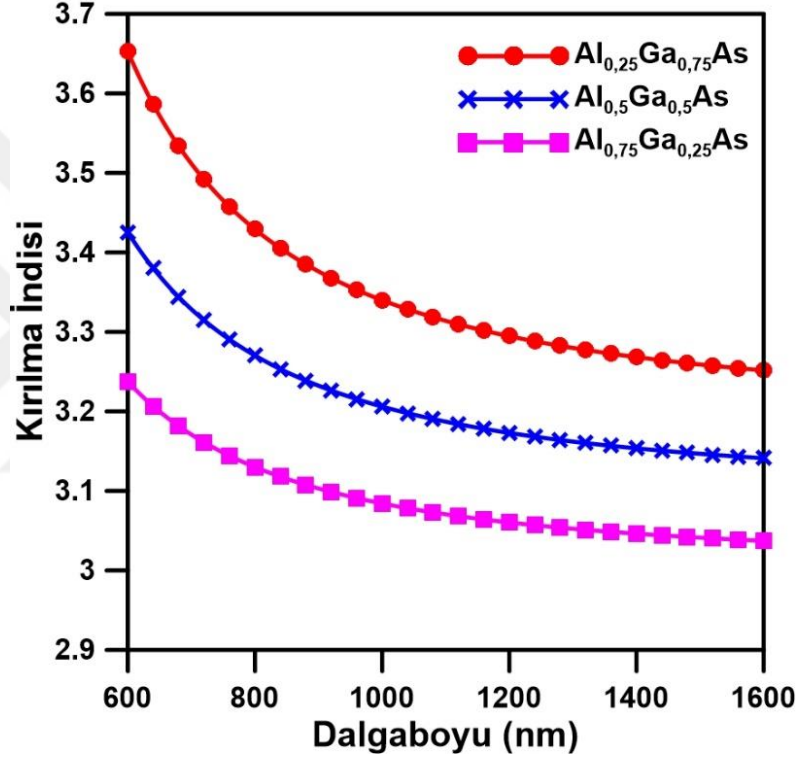


Şekil 3.3 % alüminyum konsantrasyonuna karşılık  $Al_xGa_{1-x}As$ 'ın kırılma indisi.

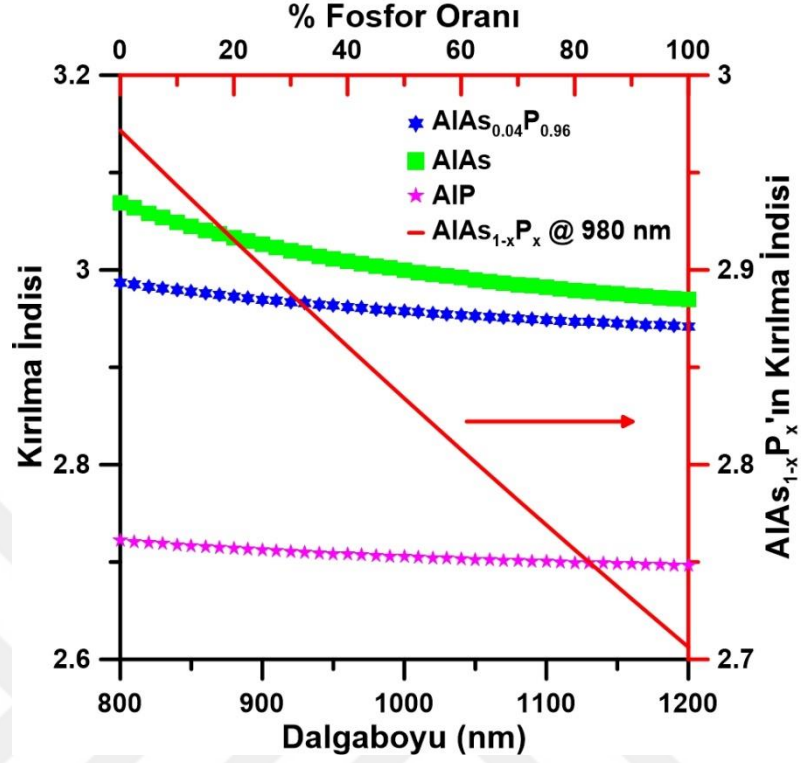
Farklı Al konsantrasyonları için  $Al_xGa_{1-x}As$ 'nın kırılma indisinin dalga boyuna göre değişimi ise Şekil 3.4'te verilmiştir. Dalga boyu arttıkça kırılma indisinin azaldığı açıkça görülmektedir.

AlAs ile GaAs arasında %1'den daha düşük bir oranda örgü sabiti uyumsuzluğu vardır. Bu uyumsuzluk AlAs yapısına düşük miktarda fosfor eklenerek giderilebilmektedir.

Teorik hesaplamalara göre  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}$  yarıiletkeni GaAs ile örgü uyumludur. AlAs'a fosfor eklenmesi durumunda elde edilen  $\text{AlAs}_x\text{P}_{1-x}$  yarıiletkeninin enerji bant aralığı artmaktadır. Buna bağlı olarak da kırılma indisi düşmektedir. Şekil 3.5'de  $\text{AlAs}_x\text{P}_{1-x}$  yarıiletkeninin dalga boyuna ve 980 nm'de fosfor oranına bağlı olarak kırılma indisindeki değişim gösterilmektedir.



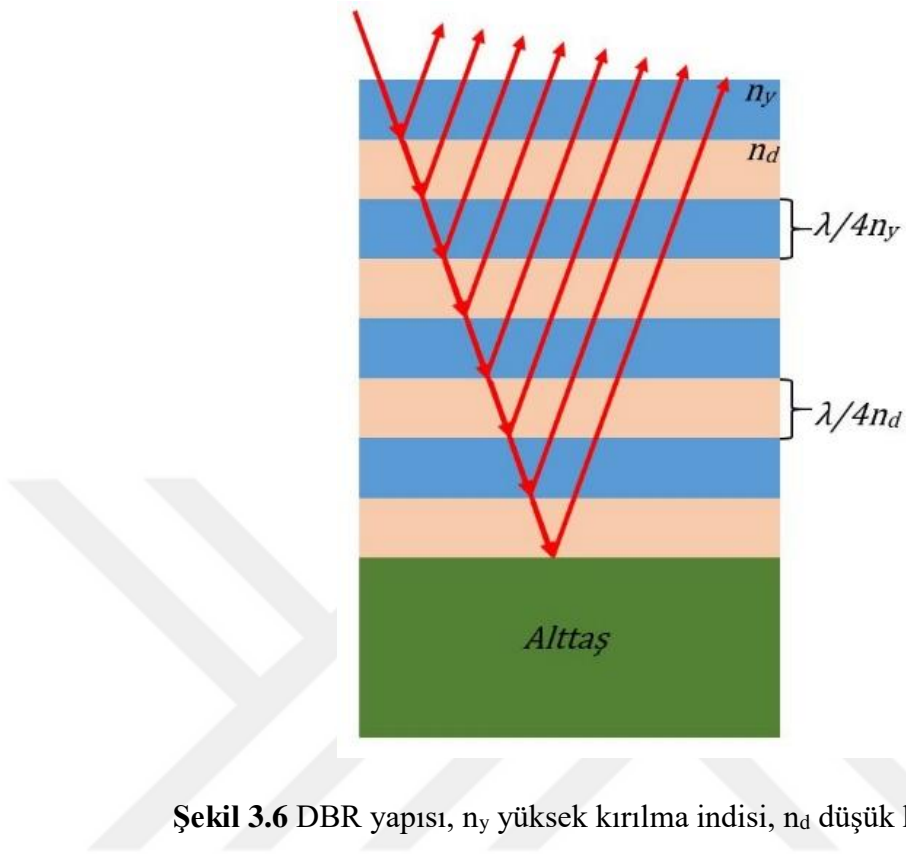
Şekil 3.4 Dalga boyuna karşılık farklı Al konsantrasyonlarına sahip  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın kırılma indisi.



Şekil 3.5 Dalga boyuna karşılık AlAs, AlP, AlAs<sub>0,96</sub>P<sub>0,04</sub> ve 980 nm'de AlAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub>'in kırılma indisi.

### 3.3. Dağınımlı Bragg Yansıtıcıları (Distributed Bragg Reflector-DBR)

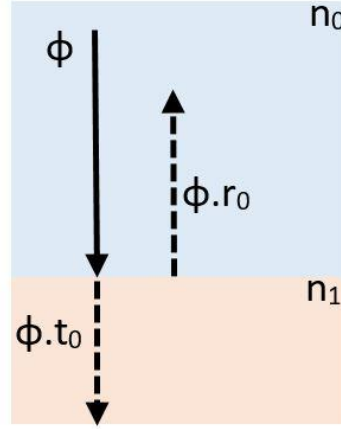
DBR çeyrek dalga boyu ( $\lambda/4n$ ) kalınlıkta yüksek ve düşük kırılma indisli farklı materyallerin çoklu olarak üst üste büyütülmesi ile elde edilen yüksek yansıtıcılığa sahip aynalardır. Çeyrek dalga boyuna sahip materyallerin üst üste büyütülmesi ile her bir ara yüzeyde yapıcı girişim oluşur ve DBR yüzeyinden elde edilen toplam yansıma her bir ayna çiftine bağlı olarak artar.



**Şekil 3.6** DBR yapısı,  $n_y$  yüksek kırılma indisi,  $n_d$  düşük kırılma indisi.

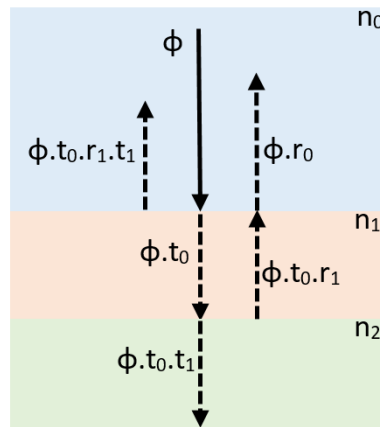
DBR içerisinde herhangi bir ara yüzeyde elektromanyetik dalga yansıtılır ya da diğer DBR katmanına geçer. DBR yüzeyine gelen elektromanyetik dalganın normalize akı miktarı  $\phi=1$  olmak üzere yansıyan (r) ve geçen (t) akı (soğurmanın olmadığı durumlarda) arasında  $r+t=1$  eşitliği vardır. Şekil 3.7 DBR yapısının iki katmanını göstermektedir. Buna göre kırılma indisi değerleri  $n_0$  ve  $n_1$  olmak üzere bir madde ortamına gelen elektromanyetik dalganın yansıması [3.33] eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$r_0 = \left( \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad [3.33]$$



**Şekil 3.7** İki katmanlı bir yapıda ara yüzeylerden yansıyan ve geçen elektromanyetik dalganın gösterimi.

Üçlü tabakanın olduğu ara yüzeyden yansıma ise Şekil 3.8’de gösterilen iki tabakalı yapıdan daha karmaşıktır. Bunun nedeni her bir ara yüzeyde çoklu yansıma ve geçirgenliğin meydana gelmesidir. Ara yüzeylerde oluşan bu çoklu yansımalar girişim yapacaktır. Bu durumda materyalden elde edilen toplam yansıma girişimin yapıcı ve yıkıcı olmasına göre değişecektir. Yapıcı girişim yansıyan ışınlar arasındaki faz farkı 0 ya da  $2\pi$  olduğu durumda meydana gelir ve olası diğer durumlarda yıkıcı girişim oluşur ve toplam yansımada azalma meydana gelir. Yapıcı girişim temel olarak etkileşimin meydana geldiği katmanların kalınlığı ve ışının dalga boyuna bağlıdır.

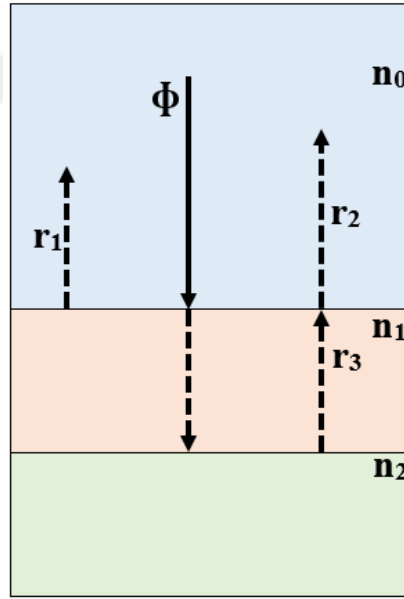


**Şekil 3.8** Üç katmanlı bir yapıda ara yüzeylerden yansıyan ve geçen elektromanyetik dalganın gösterimi.

$\Delta\theta$  faz kayması,  $n$  kırılma indisi,  $d$  katman kalınlığı (geometrik kalınlık) ve  $\lambda$  dalga boyu olmak üzere faz kayması [3.34] eşitliğindeki gibi ifade edilir.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi \cdot d \cdot n}{\lambda} \quad [3.34]$$

$d \cdot n$  çarpımını literatürde optik kalınlık olarak ifade edilir. Optik kalınlığın  $\lambda$  olduğu durumlarda elektromanyetik dalganın fazında meydana gelen değişim  $2\pi$  olur ve yapıcı girişim meydana gelir. Optik kalınlığın  $\lambda/2$  olması durumunda ise faz kayması  $\pi$  olur ve yıkıcı girişim sonucu elektromanyetik dalga katmanlar arasında sönümlenir. Katman kalınlıklarının yanı sıra faz kayması oluşturan bir diğer parametre ise yansımanın gerçekleştiği katmanların kırılma indisleri arasındaki ilişkidir. Eğer katmanların kırılma indisleri arasında  $n_0 > n_1$  ilişkisi varsa faz kayması oluşmazken  $n_0 < n_1$  durumunda ise  $\pi$  kadar faz kayması oluşur.



**Şekil 3.9** Üç katmanlı bir yapıda ara yüzeylerden yansıyan ve geçen elektromanyetik dalganın gösterimi.

Şekil 3.9’da verilen yapı için  $n_1$  katmanının kalınlığı  $\lambda/4$  olmak üzere  $n_0 > n_1 > n_2$  durumu için her bir ara yüzeyde meydana gelen faz kayması incelenirse  $R_1$  yansıması için  $n_0 > n_1$  olduğu için faz kayması oluşmaz ve  $\Delta\theta=0$  olur.  $R_3$  yansıması için  $\lambda/4$  kalınlığındaki

tam bir turdan dolayı  $\pi$  kadar ve  $n_1 > n_2$  olduğu için ise faz kayması oluşmaz bu durumda toplam faz kayması  $\Delta\theta = \pi$  olur. Dolayısı ile  $R_1$  ve  $R_3$  arasında  $\pi$  kadar faz kayması oluşur ve yıkıcı girişim meydana gelir.

$n_2 > n_1 > n_0$  durumunda  $R_1$  yansıması düşük kırılma indisli ( $n_0$ ) ortamdan büyük kırılma indisli ( $n_1$ ) ortama geldiği için  $\pi$  kadar faz kayması oluşur.  $R_3$  yansıması için ise  $\lambda/4$  kalınlığındaki tam bir turdan dolayı  $\pi$  kadar ve  $n_2 > n_1$  olduğundan dolayı yine  $\pi$  kadar daha olmak üzere toplamda  $\Delta\theta = 2\pi$  kadar faz kayması oluşur.  $R_1$  ve  $R_3$  arasındaki  $\pi$  kadarlık faz farkından dolayı yıkıcı girişim meydana gelir.

$n_1 > n_0 = n_2$  durumunda  $R_1$  yansıması düşük kırılma indisli ( $n_0$ ) ortamdan büyük kırılma indisli ( $n_1$ ) ortama geldiği için  $\pi$  kadar faz kayması oluşur.  $R_3$  yansıması için  $\lambda/4$  kalınlığındaki tam bir turdan dolayı  $\pi$  kadar faz kayması oluşurken  $n_1 > n_2$  olduğu için faz kayması oluşmaz ve  $R_3$  için toplam faz kayması  $\Delta\theta = \pi$  olarak elde edilir.  $R_1$  ve  $R_3$ 'ün faz kaymaları aynı olduğu için yapıcı girişim oluşur.

$n_0 = n_2 > n_1$  durumunda  $R_1$  yansıması için faz kayması meydana gelmez.  $R_3$  yansıması için ise  $\lambda/4$  kalınlığındaki tam bir turdan dolayı  $\pi$  kadar ve  $n_2 > n_1$  olduğundan dolayı  $\pi$  kadar olmak üzere toplam faz kayması  $\Delta\theta = 2\pi = 0$  olur ve faz kayması oluşmaz. Bu durumda ise  $R_1$  ile  $R_3$  eş fazlı olduğu için yapıcı girişim elde edilir.

DBR yapısı göz önüne alındığında, DBR'den yansımada yüksek ve düşük kırılma indisli tabakaların üst üste büyütülmesinden dolayı son iki durum söz konusudur. DBR'nin en önemli optik özelliklerinden biri bant genişliğidir (Stop Band Width-SBW). SBW DBR'den elde edilen yansımanın %90'ın üzerine çıktığı iki dalgaboyu arasındaki genişliktir. SBW'nin geniş olması elzemdir, çünkü lazer uygulamalarında aktif bölgede oluşan uyarılmış yayınının dalgaboyundaki sapmalardan etkilenmeden geri yansıtılması gerekmektedir. SBW'nin genişliği teorik olarak DBR yapısında bulunan yarıiletkenlerin kırılma indisleri farkına bağlıdır.

$$\Delta\lambda_{stop} \approx \frac{2\lambda_B \Delta\bar{n}_B}{\pi(\bar{n}_{gr})} \quad [3.35]$$

DBR'den maksimum geri yansıma alınabilmesi için DBR içerisindeki optik kayıpların minimum olması gerekir. Bu nedenle DBR üzerine düşen elektromanyetik dalganın

mümkün olduğunca DBR'nin ilk katmanlarında yansıtılması istenir. Yansımanın büyük kısmını gerçekleştiren ilk katman kalınlıkları etkin ayna uzunluğu (effective mirror length- $l_{eff}$ ) ile belirlenir.

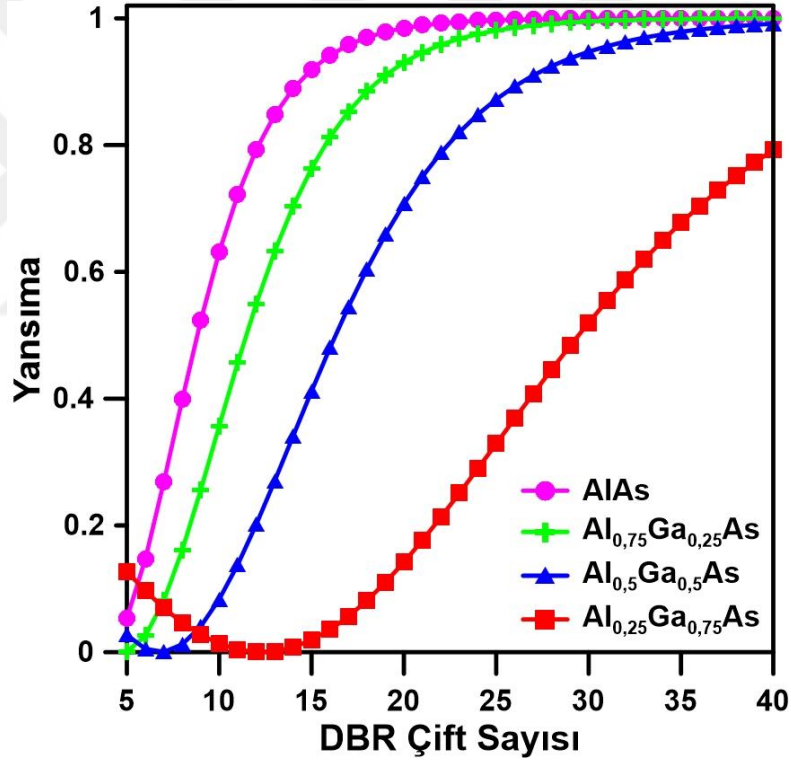
$$l_{eff} \approx \frac{\lambda_B}{4\Delta n_B} \quad [3.36]$$

Etkin ayna uzunluğu bir anlamda elektromagnetik dalganın penetrasyon (nüfuz) uzunluğunu verir.  $l_{eff}$  teorik olarak DBR'nin çalışma dalgaboyu ve kırılma indisleri arasındaki farka bağlıdır. Düşük dalga boyunda çalışan aynı yarıiletkenlerden oluşan DBR'lerde  $l_{eff}$  daha küçüktür. Bunun yanı sıra DBR yüksek kırılma indisi farkı etkin ayna uzunluğunu direk olarak etkilediği için optik kayıpları azaltmak için gereklidir.

## 4. DBR'İN TEORİK KARAKTERİZASYONU

### 4.1. DBR Çift Sayısının Yansımaya Etkisi

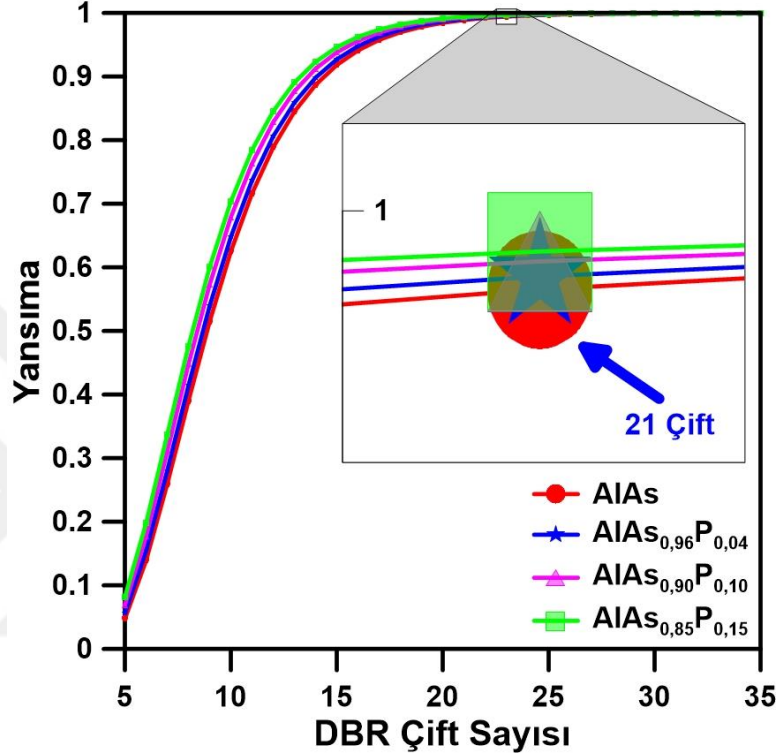
DBR'nin yansıtıcılığını belirleyen temel parametrelerden biri DBR çift sayısıdır. Maksimum yansımaya için çift sayısının mümkün olduğunca fazla olması gerekir. 980 nm merkez dalga boyuna sahip  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  yarıiletkenlerinden oluşan DBR yapısı için çift sayısına bağlı olarak yansımaya grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Çift sayısına karşılık yansımaya grafiği.

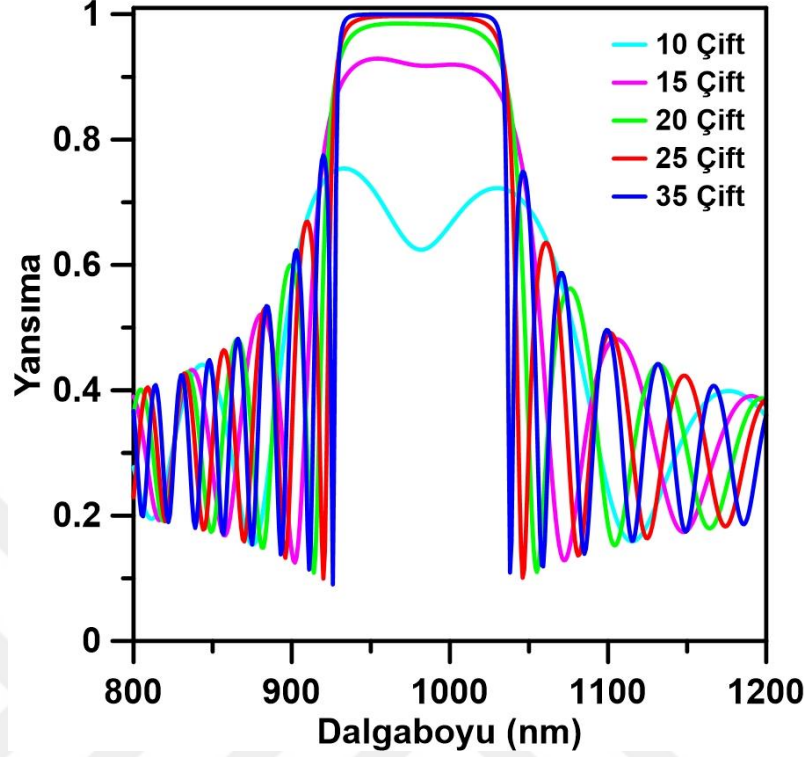
$\text{AlAs}$  ile  $\text{GaAs}$  arasında 980 nm'de  $\Delta n=0,6$  kadar kırılma indisi farkı vardır.  $\text{AlAs}$ 'ın  $\text{GaAs}$  ile oluşturduğu üçlü alaşım  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın  $\text{GaAs}$  ile olan kırılma indisi farkı  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  içerisindeki galyum ile ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 4.1'den görüldüğü üzere kırılma indisi farkı azaldıkça aynı çift sayısında daha düşük toplam

yansımaya elde edilmektedir. Bunun sonucu olarak maksimum yansımamın elde edilmesi amacıyla daha fazla DBR çiftinin büyütülmesi gerekmektedir.



Şekil 4.2 AlAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>/GaAs DBR yapısı için yansımamın DBR çift sayısına bağlı olarak değişimi.

AlAs ile GaAs arasındaki örgü uyumsuzluğundan kaynaklı DBR yapısında oluşan gerilmenin ortadan kaldırılması AlAs'a fosfor eklenmesi ile elde edilebilmektedir. Bu amaçla AlAs'a %4 oranında fosfor eklenmesi ile elde edilen AlAs<sub>0.96</sub>P<sub>0.04</sub> GaAs ile Vegard yasasına göre örgü uyumludur ve yapıda teorik olarak gerilme meydana gelmemektedir. Şekil 4.2'de farklı fosfor oranına sahip AlAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>'ın 980 nm de çalışan DBR için çift sayısına bağlı olarak yansımaya grafiği verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere 21 çift AlAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>/GaAs için teorik olarak %99 yansımaya elde edilirken AlAs/GaAs'dan oluşan DBR yapısında ise teorik olarak %98 yansımaya elde edilmektedir. Bu sonuca göre AlAs/GaAs DBR yapısındaki AlAs'a eklenen fosfor DBR'de oluşan gerilmeyi ortadan kaldırmasının yanı sıra DBR'in yansıtıcılığını kırılma indisi farkını arttırdığı için arttırmıştır.

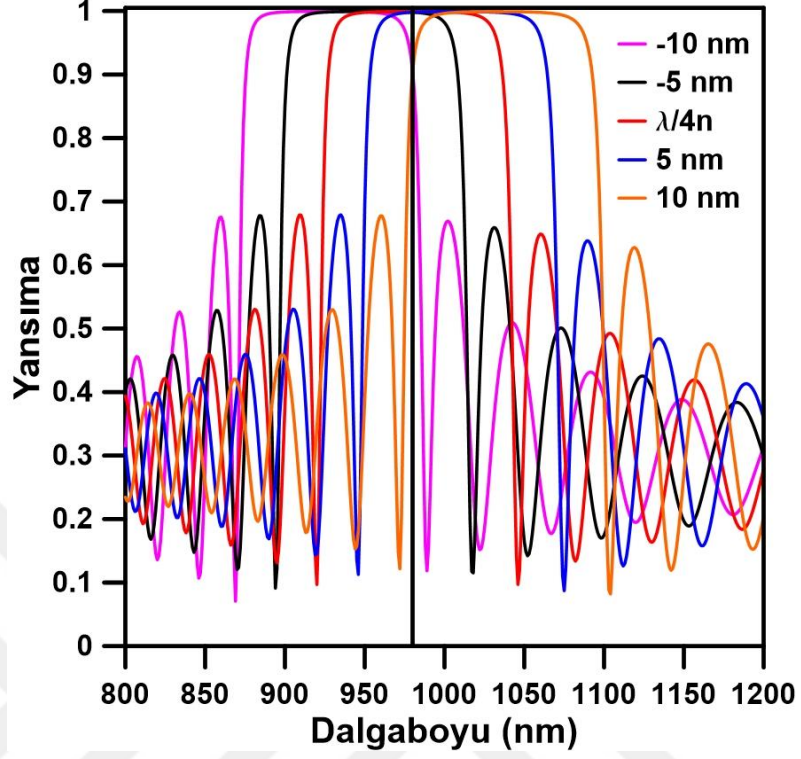


**Şekil 4.3** Farklı  $\text{AlAs}_{1-y}\text{Py}/\text{GaAs}$  çift sayısı için yansımının dalga boyu ile değişimi verilmiştir.

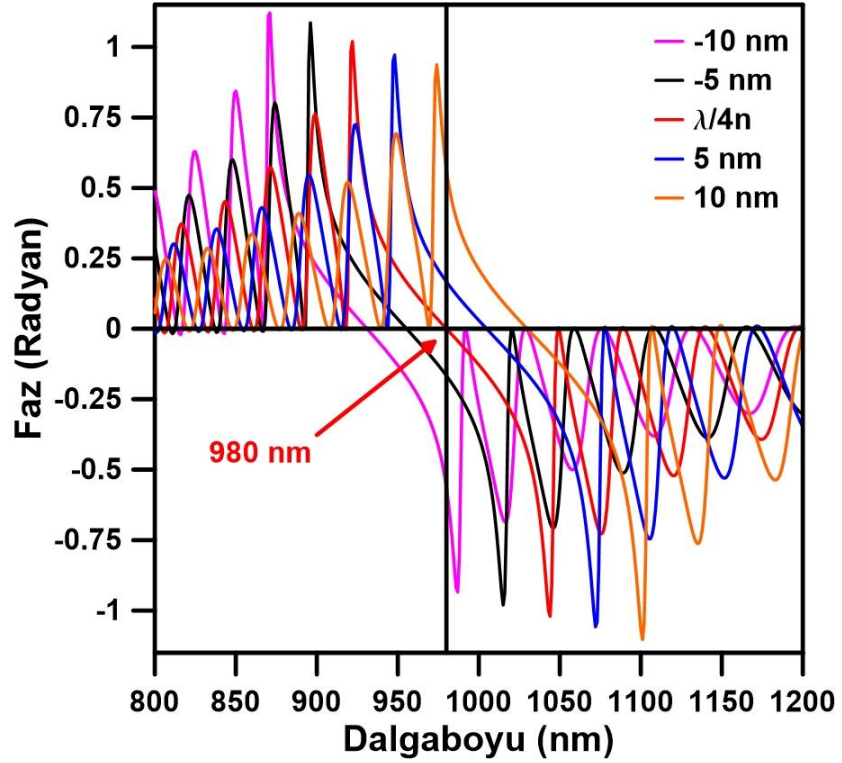
Yüzeiden ışımali lazer yapılarında kullanılan DBR'ler için önemli parametrelerden biri olan bant genişliği yansımının %90'ın altına düştüğü iki dalga boyu arasında belirlendiğinden yetersiz sayıdaki DBR çift sayılarında bant genişliğinden söz edilememektedir. Bunun yanı sıra yeterli DBR çift sayısında bant genişliğinin çift sayısından bağımsız olduğu açıkça görülmektedir.

#### 4.2. DBR Tek Tabaka Kalınlıklarının Yansımaya Etkisi

DBR tabaka kalınlıkları  $\lambda/4n$  olmak üzere çalışma dalga boyuna bağlı olarak belirlenirler. Dolayısı ile DBR tabaka kalınlıklarındaki sapma DBR'nin çalışma dalga boyunu etkiler. Bunun yanı sıra kontrol edilemeyen kaymalar ise hedeflenen dalga boyundaki yansımada azalmalara neden olur. 30 çift  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}/\text{GaAs}$  örgü uyumlu DBR yapısı için GaAs'ın her bir tabakasındaki sapmanın etkisi Şekil 4.4'de gösterildiği üzere DBR'nin merkez noktasında kaymaya neden olmuştur.

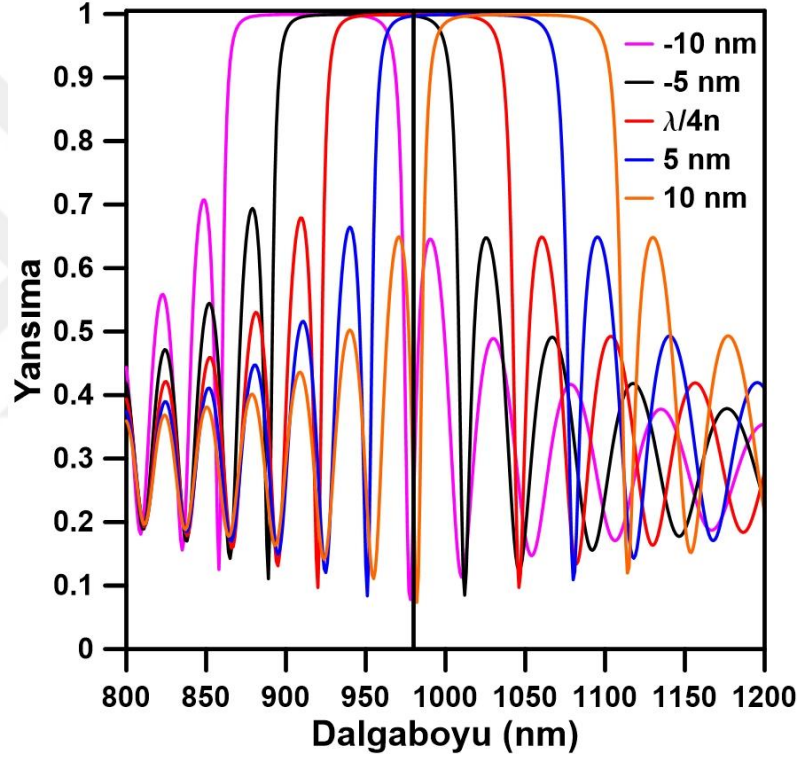


Şekil 4.4  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}/\text{GaAs}$  DBR yapısında GaAs'ın kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak yansıma değişimi.

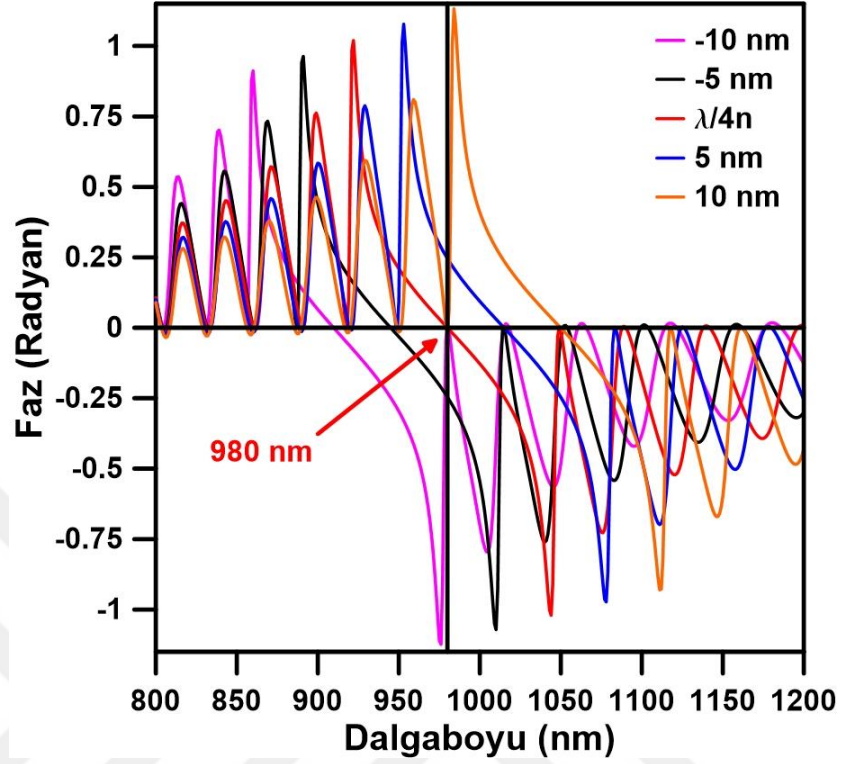


Şekil 4.5  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}/\text{GaAs}$  DBR yapısında GaAs'ın kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak faz'ın değişimi.

GaAs'ın her bir katmanındaki kaymanın 5 nm'ye kadar olduğu durumlarda DBR'nin maksimum yansıtıcılığı 980 nm dalga boyunu kapsamaktadır. 5 nm ile 10 nm arasındaki kaymalarda ise DBR'den yansıtım düşmeye başlamaktadır. 10 nm ise burada sınır değeridir ve bu değerden daha büyük sapmalarda DBR'den yansıtım çok düşük değerlere inmektedir. Bu değişim nedeni ise şekil 4.6'da gösterildiği üzere faz kaymasından kaynaklı meydana gelen yıkıcı girişimdir.



Şekil 4.6 30 çift  $\text{AlAs}_{0.96}\text{P}_{0.04}/\text{GaAs}$  DBR yapısında  $\text{AlAs}_{0.96}\text{P}_{0.04}$ 'in kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak yansıtımın değişimi.

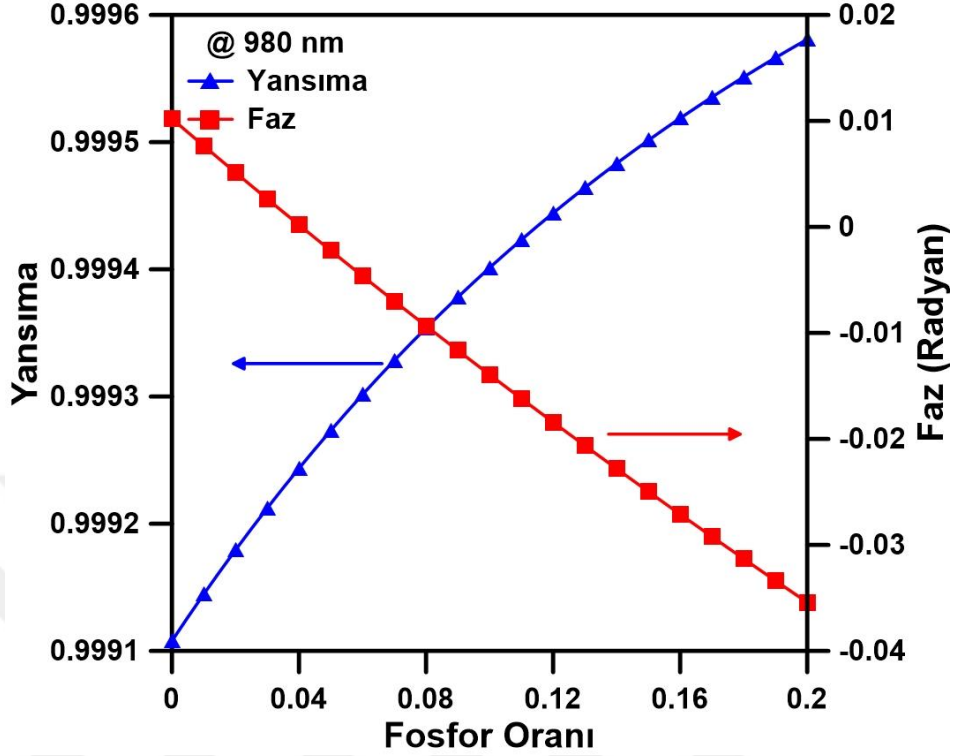


Şekil 4.7 AlAs<sub>0,96</sub>P<sub>0,04</sub>/GaAs DBR yapısında AlAs<sub>0,96</sub>P<sub>0,04</sub>'ın kalınlığındaki sapmalara bağlı olarak faz'ın değişimi.

AlAs<sub>0,96</sub>P<sub>0,04</sub> çoklu katmanının her bir kayma GaAs tabakasındaki kaymadan daha etkili olmaktadır. 10 nm ve üzeri kaymalarda optik kalınlığa bağlılık AlAs<sub>0,96</sub>P<sub>0,04</sub> katmanı için daha etkilidir. Bunun sonucu olarak DBR içerisinde yıkıcı girişimler meydana gelmekte ve DBR'den yansıma %10'un altına düşmektedir.

#### 4.3. AlAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>/GaAs DBR Yapısı için Fosfor Oranının Etkisi

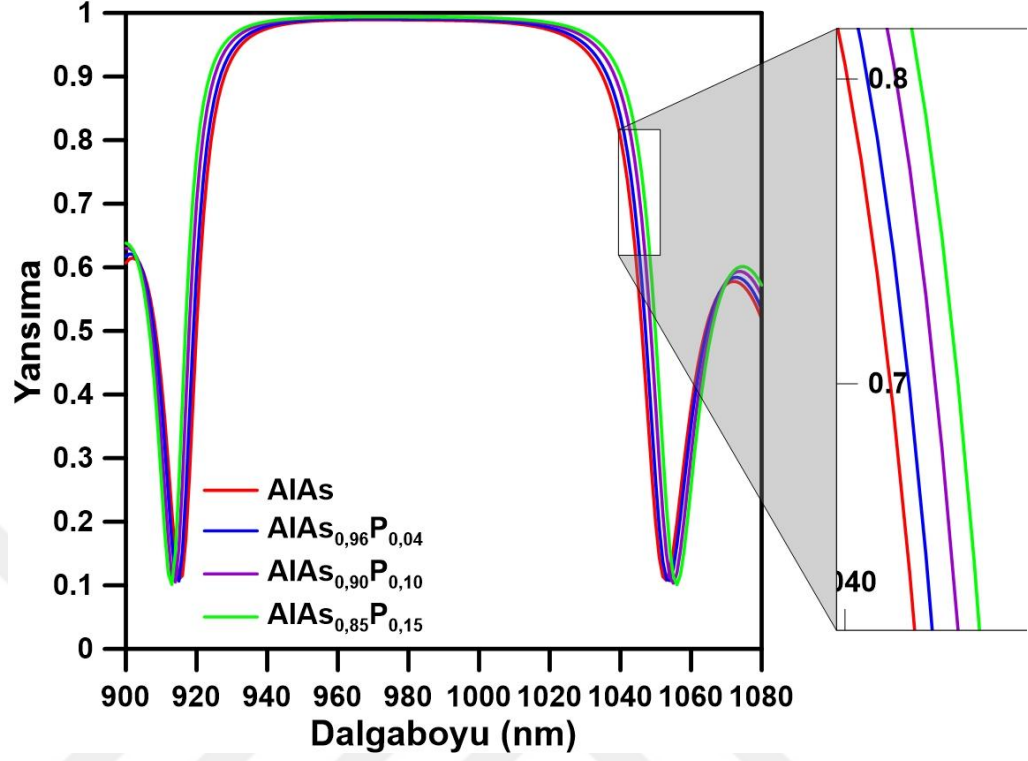
AlAs'a fosfor eklenmesi ile elde edilen AlAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub> üçlü yarıiletkeninin kırılma indisi değeri fosfor oranı ile ters orantılıdır. AlAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub> kırılma indisinin azalması GaAs ile aralarındaki kırılma indisi farkını arttırmaktadır. Kırılma indisi farkı ise DBR'den elde edilen yansıma ile orantılıdır.



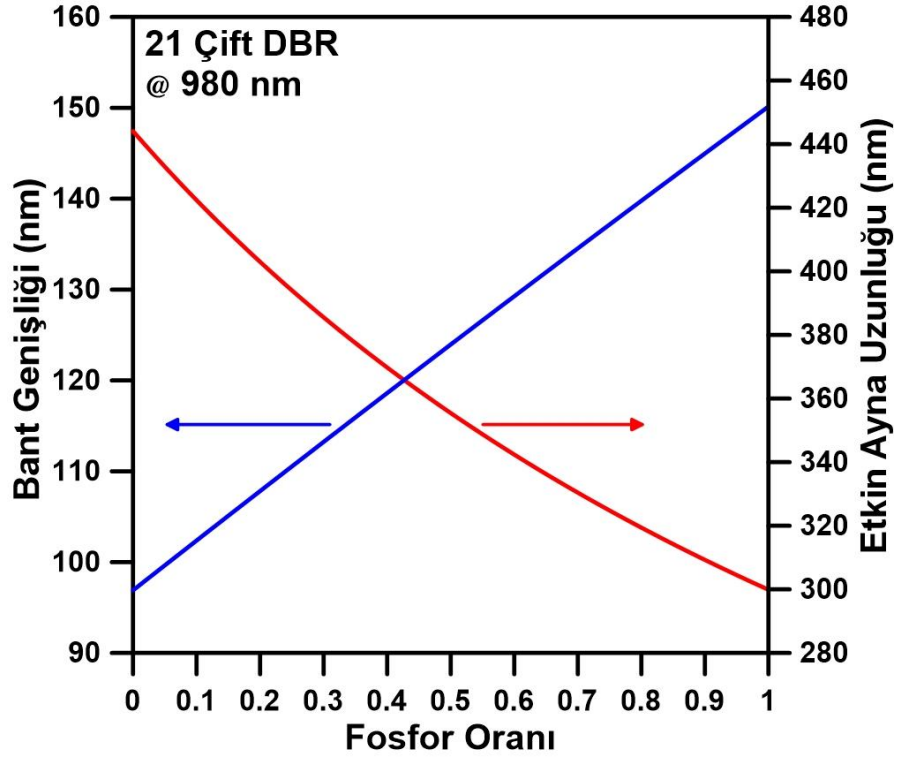
**Şekil 4.8** Fosfor oranına bağlı olarak 21 çift  $\text{AlAs}_{1-y}\text{P}_y/\text{GaAs}$  DBR yapısının yansıtıcılığının ve fazının değişimi.

Şekil 4.8’den görüldüğü üzere fosfor’un %4 oranında faz kayması sıfırdır. Bunun yanı sıra fosfor oranındaki %4’den fazla artış fazdaki kaymayı arttırmaktadır, ancak DBR’den elde edilen toplam yansıtımada buna rağmen teorik olarak artış gözlenmektedir. Bunun nedeni kırılma indisi farkındaki artışın faz kaymasındaki artışa göre daha baskın olmasındandır.

980 nm merkez dalgaboyuna sahip 21 çift  $\text{AlAs}_{1-y}\text{P}_y/\text{GaAs}$  DBR yapılarının dalgaboyuna bağlı olarak yansıtımalarının değişimi Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Buradan görüldüğü üzere toplam yansıtımada meydana gelen artışın yanı sıra kırılma indisi farkının da artması ile DBR’nin bant genişliğinde de artış meydana gelmektedir.



Şekil 4.9 Dalgaboyuna bağlı olarak farklı fosfor oranlarındaki 21 çift AIAs<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>/GaAs DBR'in yansıma grafiği.

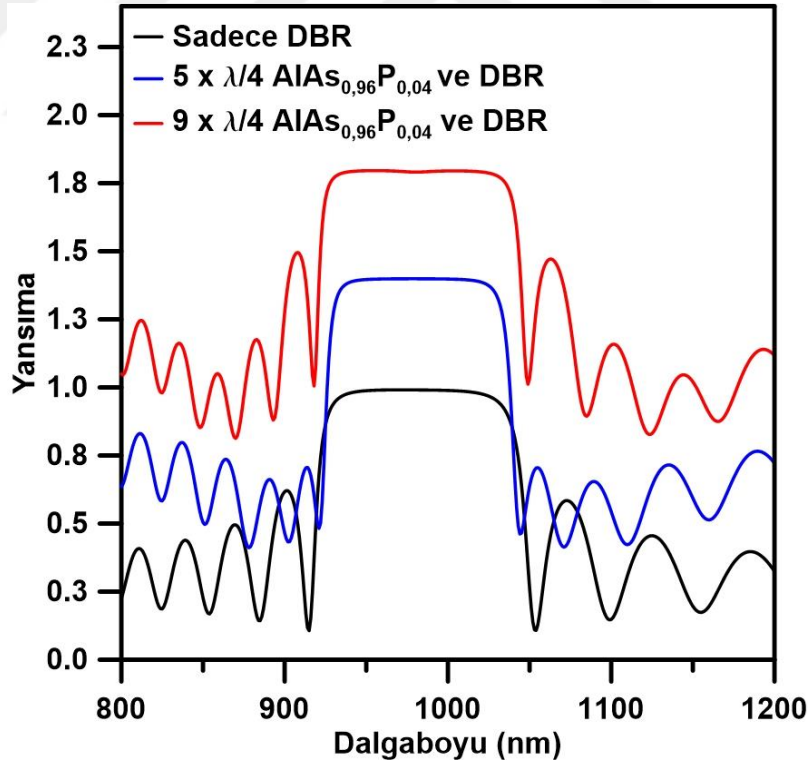


Şekil 4.10 Fosfor oranına bağlı olarak bant genişliği (SBW) ve etkin ayna uzunluğunun değişimi ( $l_{eff}$ ).

Teorik olarak bant genişliği kırılma indisi farkı ile orantılıdır. Şekil 4.10'da gösterildiği üzere fosfor oranı arttıkça bant genişliği artmaktadır. Bunun yanı sıra fosfor oranı ile etkin ayna uzunluğu azalmaktadır. DBR yapısında etkin ayna uzunluğunun azalması ile soğurmaya bağlı optik kayıplarda azalacaktır.

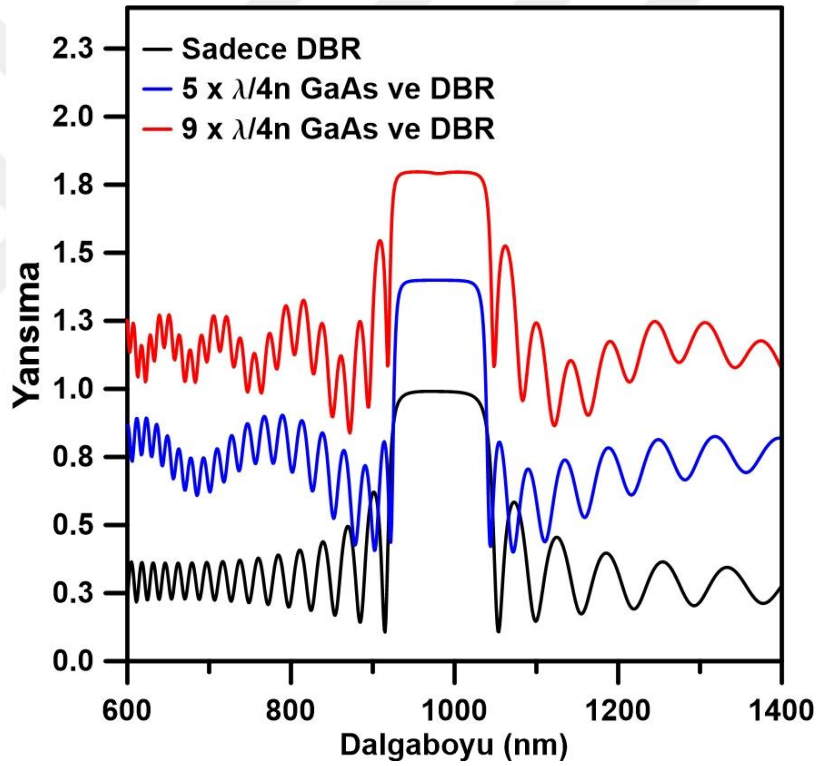
#### 4.4. $\text{AlAs}_{1-y}\text{P}_y/\text{GaAs}$ DBR Yapısı için Şapka Tabakasının (Cap Layer) Etkisi

Yüzey ışıklı lazer yapılarında DBR yapısından sonra aktif bölge gelmektedir. Aktif bölgede yüzey ışıklı lazer yapısına bağlı olarak gerilme önleyici katman, kuantum bariyer ve kuantum kuyu bölgesi bulunmaktadır. Verimli bir lazer yapısı için bu katmanların DBR'den geri yansıyan ışığı sönmülememesi gerekmektedir.



Şekil 4.11 21 çift  $\text{AlAs}_{0.96}\text{P}_{0.04}/\text{GaAs}$  DBR'nin üzerine farklı kalınlıklarda  $\text{AlAs}_{0.96}\text{P}_{0.04}$  şapka tabaka eklenmesi ile dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi.

Şekil 4.11 21 çift  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}/\text{GaAs}$  DBR yapısı üzerine geometrik kalınlığın 5 ve 10 katı değerlerinde şapka tabaka eklendiğinde meydana gelen değişimi gstermektedir (şapka tabakası eklenen yapılardaki değişimin gsterilebilmesi amacıyla yansıma değerleri yukarıya doğru kaydırılmıştır).  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}$  şapka katmanının eklenmesi ile DBR'den elde edilen yansımada azalma meydana gelmediği ağıkça gsterilmektedir. Bunun nedeni eklenen şapka katmanlarının kalınlığının optik kalınlığın tam katı olmasıdır. Bunun dışındaki her değerde yansımada dūřuř meydana gelecektir.

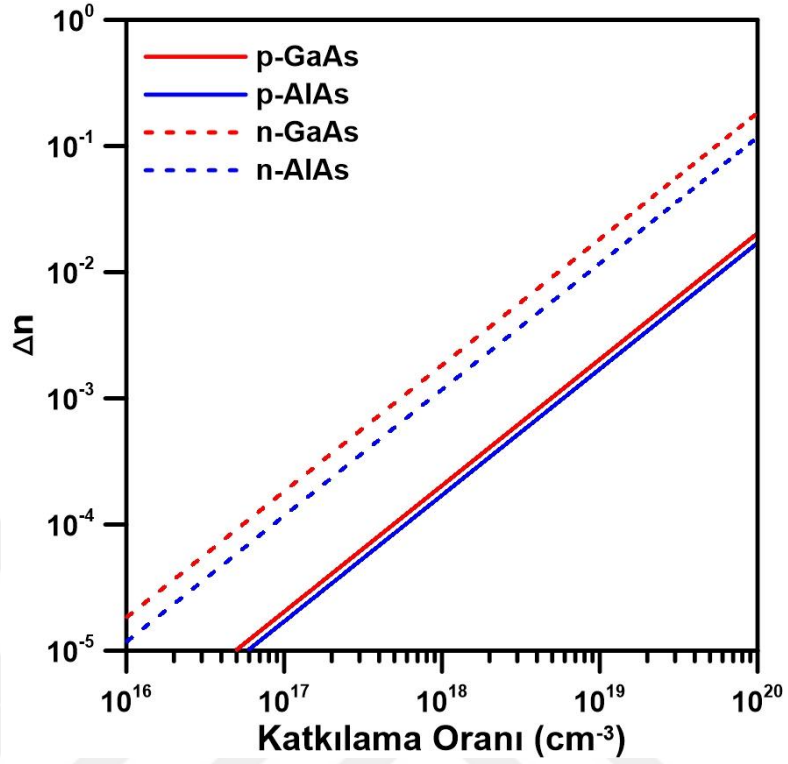


**Şekil 4.12** 21 çift  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}/\text{GaAs}$  DBR'nin üzerine farklı kalınlıklarda GaAs şapka tabaka eklenmesi ile dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi.

Şekil 4.12'de  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}/\text{GaAs}$  DBR yapısına geometrik kalınlığın tam katları GaAs şapka katmanının eklenmesi durumunda DBR'nin maksimum yansımasında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir. Bu sonuç DBR katmanından sonraki aktif bølge uygulamalarında GaAs'ın kalınlığının uygun seğimlerinde DBR performansında herhangi bir koterleşmeye neden olmayacağı açıkça gsterilmektedir.

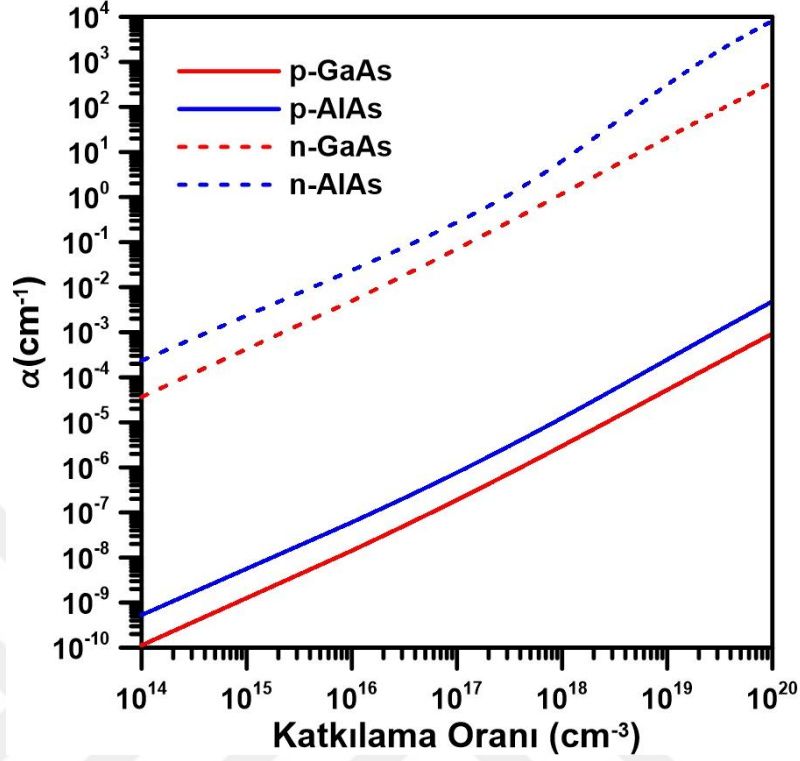
#### 4.5. Katkılamanın DBR'ye Etkisi

Elektrik pompalı VCSEL uygulamalarında DBR'nin katkılanması seri direncin düşürülmesi ve nüfus terslenmesinin sağlanması için gereklidir. Bu nedenle DBR yapılarında p ve n tipi katman katkılarını yapılmaktadır. DBR normal şartlar altında DBR'yi oluşturan yarıiletken katmanların soğurma kenarından daha büyük dalga boylarında çalışmaktadır ve DBR'de soğurma olmadığı için kırılma indisi sadece reel kırılma indisi ile ifade edilmektedir. Başka bir deyişle karmaşık kırılma indisi reel kırılma indisine eşittir. DBR'nin katkılanması ile DBR yarıiletken katmanlarında serbest taşıyıcılar oluşturulmaktadır ve serbest taşıyıcılar DBR'den yansıtılan elektromanyetik dalgayı soğurmaktadırlar. Bu nedenle her bir katman için kırılma indisi soğurma katsayısı ile karmaşık olarak ifade edilmektedir. Serbest taşıyıcılar DBR yapısında her dalga boyunda soğurma yapmaktadır ve bu nedenle DBR'den elde edilen toplam yansımayı düşürmektedir. Bunun yanı sıra katkılama ile yarıiletken katmanların reel kırılma indislerinde de değişime neden olmaktadır. Bu nedenlerle katkılanmış DBR'lerde katkılamanın etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.



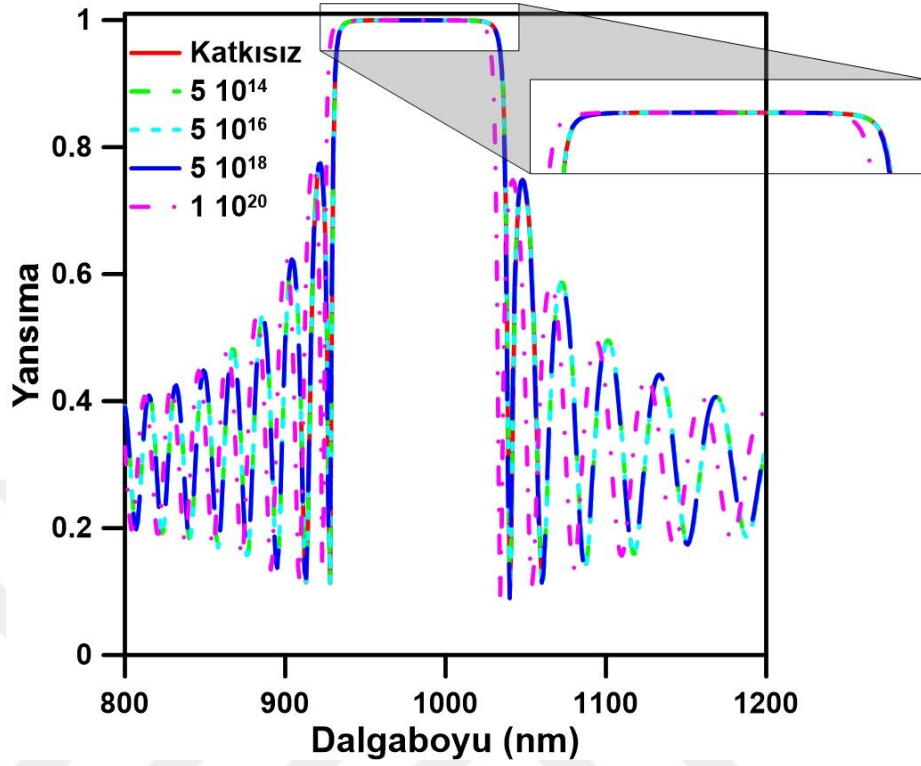
**Şekil 4.13** AlAs ve GaAs'ın katkılama tipi ve değerine bağlı olarak reel kırılma indisindeki değişim.

Katkılama oranına bağlı olarak yarıiletkenlerin reel kırılma indislerinde yarıiletkenin enerji bant aralığına ve katkılama oranına bağlı olarak değişim gözlenmektedir. Aynı katkılama seviyelerinde düşük enerji bant aralığına sahip yarıiletkenin reel kırılma indisinde daha fazla değişim olmaktadır. Bunun yanı sıra p-tipi katkılama ile yarıiletkenin reel kırılma indisinde daha az değişim meydana gelmektedir.



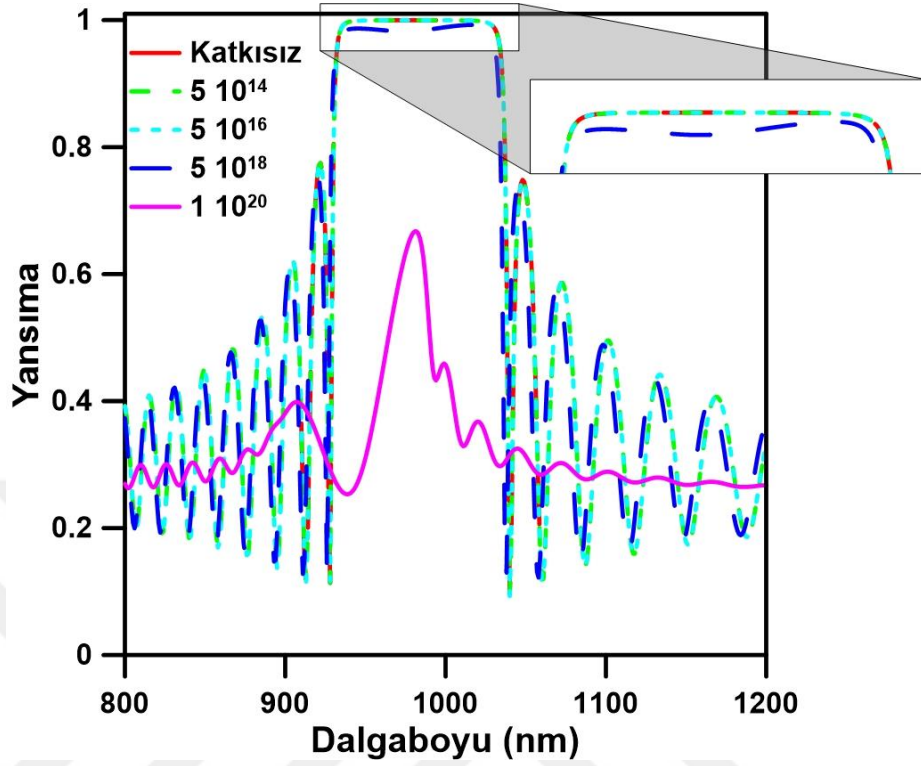
Şekil 4.14 AlAs ve GaAs'ın katkılama tipi ve değerine bağlı olarak sönmleme katsayısının değışimi.

Şekil 4.14'te katkılamaya bağlı olarak soğurma AlAs yarıiletkeninde daha etkin olarak görölmektedir. n-tipi katkılamada soğurma p-tipine göre daha fazladır bunun nedeni n-tipi katkılamada serbest taşıyıcıların etkin kütlelerinin daha düşük olmasıdır. Yüksek katkılama değerlerinde ise soğurma n-tipi yarıiletkenlerde çok yüksek değerlere ulaşmaktadır. Katkılamamanın reel kırılma indisi ve soğurma katsayısı üzerine etkisinden sonra DBR'den elde edilen yansıtıcılığa etkisi bu her iki durumun teorik hesaplamalara eklenmesi ile bulunabilir.



**Şekil 4.15** Farklı p-tipi katkılama değerine sahip 35 çift AlAs/GaAs DBR için dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi.

Şekil 4.15'te p-tipi katkılama AlAs ve GaAs'ın karmaşık kırılma indisinde değişikliğe neden olmasına rağmen DBR'den elde edilen yansımada düşüşe neden olmamaktadır. Aşırı katkılama ( $\sim 10^{20}$ ) durumunda yarıiletkenlerin reel kırılma indisinde meydana gelen değişimden kaynaklı olarak merkez dalga boyunda düşük dalga boylarına kaymaya neden olmaktadır.



**Şekil 4.16** Farklı n-tipi katkılama değerine sahip 35 çift AlAs/GaAs DBR için dalgaboyuna bağlı olarak yansımanın değişimi.

Şekil 4.16’da yüksek n-tipi katkılama durumlarında yarıiletken katmanların soğurmasının yüksek değerlere ulaştığı katkılamaya karşılık sönümlenme katsayısının değişiminde gösterilmiştir. Bu seviyedeki katkılamalarda soğurmanın etkisi ile DBR’den elde edilen yansıma çok düşük seviyelere inmektedir. 35 çift AlAs/GaAs DBR yapısı için yaklaşık olarak  $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde itibaren soğurma DBR’nin yansıtıcılığını düşürmekte ve  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde DBR çalışamaz duruma gelmektedir. Ayrıca DBR’nin bant genişliği azalmakla beraber aşırı katkılama durumlarından kaybolmaktadır.

## 5. KRİSTAL BÜYÜTME VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

Tezin bu bölümü kristal büyütme ve karakterizasyon teknikleri ile ilgili temel bilgileri kapsamaktadır. Kristal büyütmede kimyasal buhar depolama tekniği kullanılmıştır. Kristal büyütme tekniğinin açıklanmasından sonra yapısal karakterizasyon tekniklerinden x-ışını kırınım yöntemi ve taramalı elektron mikroskobu yöntemleri hakkında bilgi verilmektedir. Son olarak kristallerin optiksel özelliklerinin araştırılması spektrofotometre ve fotoluminesans ölçümleri ile bitirilmiştir.

### 5.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi

III-V grubu yarıiletkenlerin büyütülmesinde Moleküler Işın Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy-MBE) ve Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (Metal Organic Chemical Vapor Deposition-MOCVD) yöntemleri en sık kullanılan yöntemlerdir. MOCVD tabanlı bilimsel çalışmalar sıkça Manasavit'in (Manasavit, 1969) öncü çalışması ile ilişkilendirilir ve Manasavit'in çalışmaları MOCVD teknolojisindeki gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. 70'li yılların ortalarında ilk çalışmalar genel olarak tek kristal III-V, II-VI ve IV-VI yarıiletkenlerinin büyütülmesine odaklanılmıştır (Strin fellow, 1999). 80'li yılların başlarında yayınlanan makalelerin yüksek performanslı azınlık taşıyıcı tabanlı aygıtların gösterimi ile MOCVD tabanlı araştırmalarda büyük artış meydana gelmiştir. Günümüzde ise MOCVD çalışmalarının odak noktası ticari ürün elde edilmesi olmuştur.

MOCVD teknolojisindeki gelişmelerin hızlanması ile yüksek saflıkta yarıiletken üretilmesi, yarıiletken ara yüzeylerdeki geçişlerin iyileştirilmesi ve nitrat tabanlı kısa dalga boylu aygıtların üretilebilmesi mümkün olmuştur. Tüm bu gelişmeler MOCVD'yi lider teknolojilerden biri haline getirmiştir. MOCVD teknolojisinin büyük ilgi görmesinde çok yönlü kullanımı ve seri üretime yatkınlığıda büyük etkiye sahiptir. Bunların yanı sıra diğer tekniklere göre daha ekonomik olması ise bir diğer çekici yanıdır. Tüm bu nedenlerden dolayı MOCVD teknolojisine olan ilgi sürekli artmakta ve dünyada MOCVD tabanlı üretim yapan tesisler kurulmaktadır.

MOCVD yönteminde III-V grubu yarıiletken malzemelerin büyütülmesinde üç tür gaz kaynağı kullanılmaktadır:

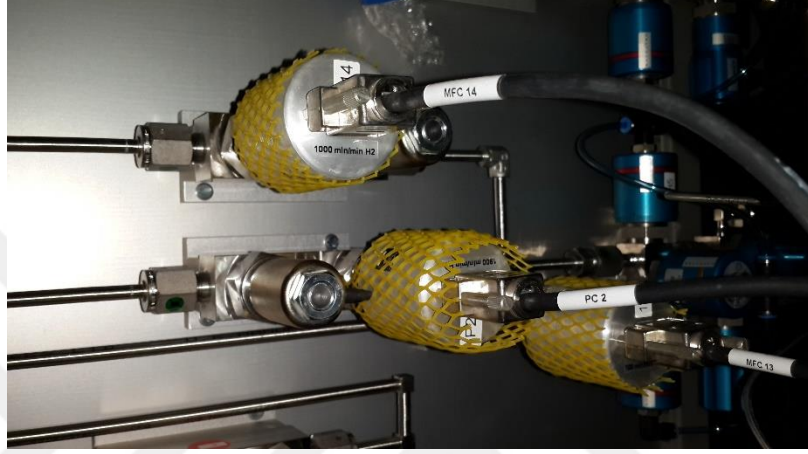
- III grubu gaz kaynakları (Metal Organik Kaynaklar)
  - Trimetil Galyum - TMGa
  - Trimetil Alüminyum - TMAI
  - Trimetil İndiyum - TMIIn
- V grubu gaz kaynakları (Hidritler)
  - Arsin – AsH<sub>3</sub>
  - Fosfin – PH<sub>3</sub>
  - Amonya – NH<sub>3</sub>
- Katkılama gaz kaynakları
  - Dimetil Çinko – DMZn
  - Karbon tetrabromit – CBr<sub>4</sub>
  - BisCyclopentadienemagnezyum – CBr<sub>2</sub>Mg
  - Silan – SiH<sub>4</sub>

Bu gazların yanı sıra azot (N<sub>2</sub>) ve hidrojen (H<sub>2</sub>) molekül gazları ise hidrit ve metal organik gazların reaktöre ulaştırılmasında taşıyıcı gaz olarak kullanılmaktadırlar (azot ve hidrojen ayrıca sistem temizliğinde de kullanılmaktadırlar).



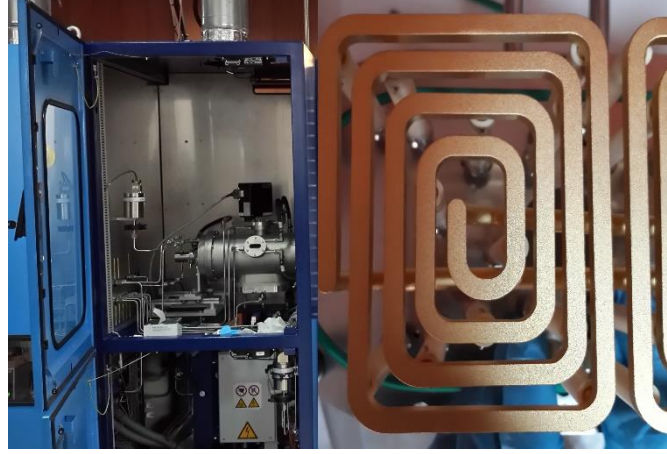
Şekil 5.1 Sonata firmasına ait metal organik gaz kaynakları.

MOCVD yönteminde gaz haldeki kimyasallar reaktöre belirli oranlarda kontrollü basınç değerlerinde gönderilirler. Reaktöre gönderilen gazların miktarları kütle akış kontrol (mass flow controller - mfc) elemanları ile sağlanmaktadır.



**Şekil 5.2** Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan MOCVD sisteminin kütle akış kontrol elemanları.

MOCVD yönteminde gaz karışımı reaktörde gerçekleşir. Reaktör genel olarak kuvars yada paslanmaz çelikten yapılmıştır. Reaktör istenilen sıcaklığa halojen lambalar yada radyo frekans (Radio Frequency - RF) kaynaklar kullanılarak ısıtılırlar. Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde (CÜNAM) bulunan MOCVD sistemi paslanmaz çelik reaktör ve RF ısıtma sistemine sahiptir.



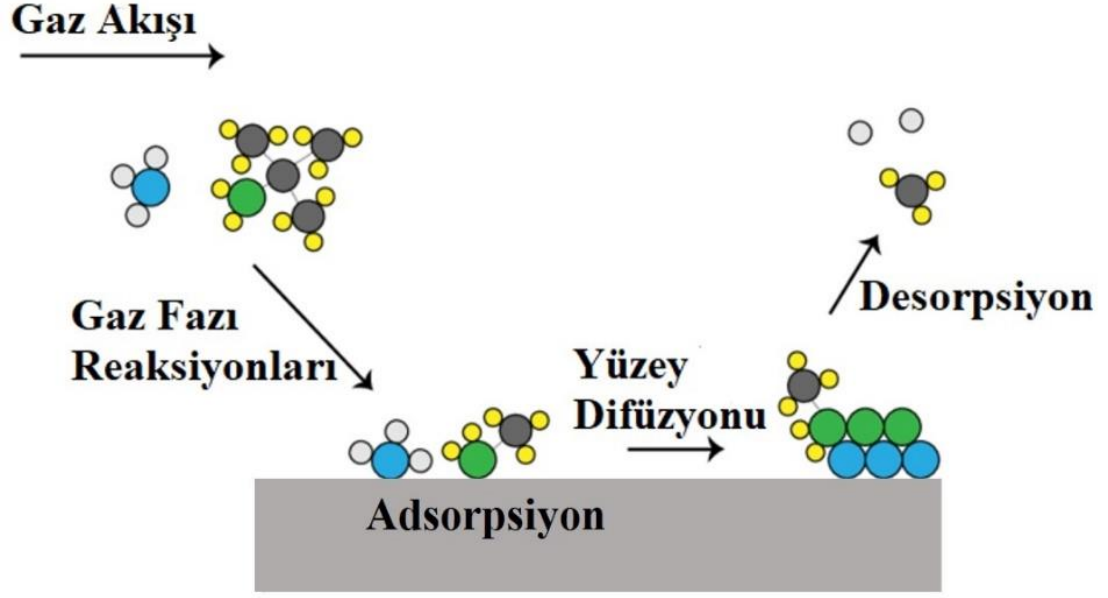
**Şekil 5.3** Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan MOCVD sisteminin reaktör kabini ve reaktör içerisinde bulunan RF ısıtma bobini.

Reaktör yüksek sıcaklıklara RF ısıtma sistemi ile ulaşır. Sıcaklık reaktör içerisinde iki farklı yöntemle ölçülür. Alttan altından “light bulb” ile ölçülürken alttaşın üst kısmından ise Compton saçılması kullanılarak optik yolla ölçülür.



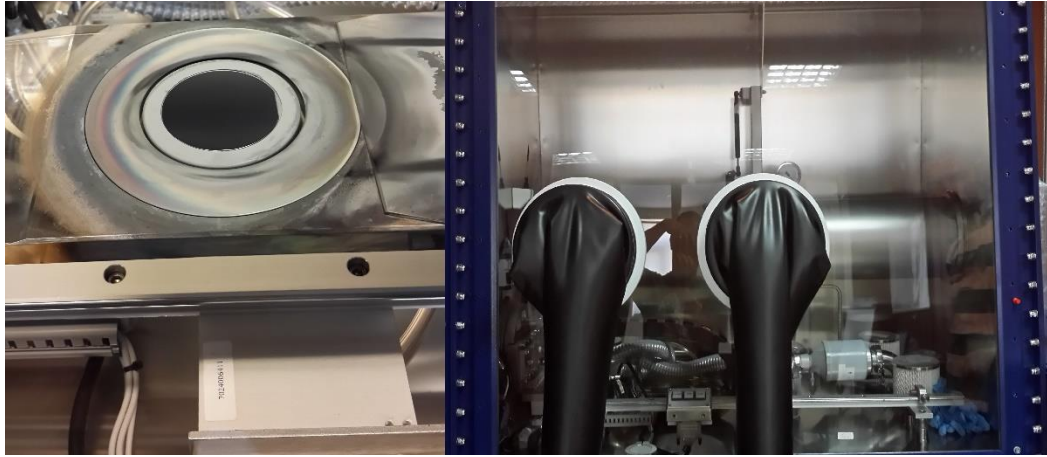
**Şekil 5.4** MOCVD sistemi sıcaklık kontrol üniteleri. Solda alttan ölçüm kontrolcüsü sağda ise alttaş yüzeyinden yapılan ölçüm sistemi gösterilmektedir.

Reaktöre ulaşan gazlar reaktör içerisinde sıcaklığın etkisi ile bağlarını kırarlar. III grubu gazlar metaller ile V grubu gazlar ise hidrojenler ile ayrılırlar. Reaktör içerisinde III ve V grubu gazlar birbirleri ile bağ yaparlar. Elde edilen bileşik yarıiletken alttaş üzerinde birikmeye başlar. Böylece MOCVD sistemi ile büyütme gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 5.5 MOCVD sistemi sıcaklık kontrol üniteleri.

CÜNAM'da bulunan MOCVD sisteminde büyütme 2 ve 3 inç boyutundaki alttaşların üzerine yapılabilmektedir. Alttaş Reaktöre eldivenli kutu (glove box) tarafından yüklenmekte ve çıkarılmaktadır. Eldivenli kutu sürekli olarak pozitif azot basıncında tutulmaktadır. Böylece alttaş yükleme ve çıkarılması esnasında reaktöre kirliliğe neden olan gazlarının bulaşması engellenmektedir.



Şekil 5.6 Alttaş tutucu ünite ve eldivenli kutu.

Artık gazlar ise reaktör sisteminin bağılı bulunduğu egzoz sisteminden dışarı atılırlar. III-V grubu yarıiletkenlerde artık gazlar zehirli, yanıcı ve parlayıcıdır bu nedenle reaktörün ardından etkisiz hale getirilip uzaklaştırılmaları gerekir. Artık gazlar ilgili gaz karışımına bağılı olarak kullanılan asit karışımları ile bağlanarak etkisiz hale getirildikten sonra biriktirilir yada uygun havalandırma sistemi ile açık havaya salınır.



**Şekil 5.7** MOCVD sisteminin çıkışında bulunan artık gazların etkisiz hale getirilip biriktirildiği sıvı “scrubber” sistemi.

## 5.2. Yerinde (In-Situ) Karakterizasyonu

Yarıiletken ince film büyütmelerinin karakterizasyonu temel olarak büyütme sırasında ve büyütme sonrasında olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır. Büyütme esnasında yapılan karakterizasyon teknikleri sınırlı olmakla beraber yerinde ölçüm (in-situ) olarak isimlendirilir. Yerinde ölçüm ile büyütme esnasında gerçekleşen bilinmeyen etkilerin gözlenmesi ve kaynağının bulunması mümkündür. Bu etkilere büyütme sırasında çözüm üretilmesi için kullanışlı bir tekniktir. Tez kapsamında yapılan büyütmelerde yerinde ölçüm sisteminin kullanılması nedeniyle bu bölümde yerinde ölçüm ile ilgili temel bilgiler verilmektedir.

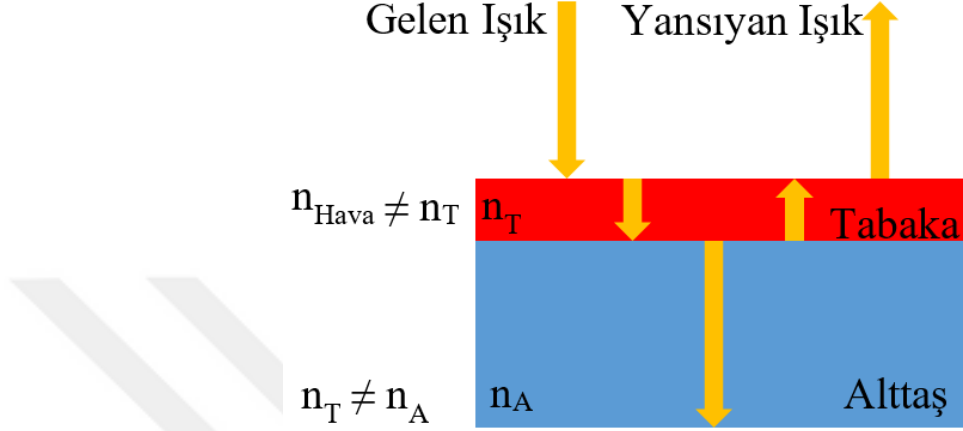
MOCVD sistemlerinde büyütme açık hava basıncında yada mbar seviyelerinde yapılmaktadır ve bu nedenle MBE sistemlerine göre daha kaotik bir durum söz konusudur. Bunun yanı sıra reaktör içerisinde kullanılan paslanmaz çelik ve kuvars malzemelerde büyütmeyle ilgili olarak kaplanmalar meydana gelmekte ve kimyasal reaksiyonlarında reaktör içerisinde gerçekleşmesi nedeniyle MOCVD sistemlerinde yerinde ölçüm sistemleri MBE reaktörlere göre daha basittir. Bu nedenle MOCVD sistemlerinde MBE sistemlerinden farklı olarak optik tabanlı ölçüm sistemleri kullanılmaktadır.

Optik ölçüm sistemlerinde fotonların ölçüm yapılan yapıda değişimlere neden olmaması bu ölçüm tekniğinin kullanılmasına olanak sağlamıştır. MOCVD sistemlerinde elipsometri ölçümleri sıkça kullanılan yöntemlerdendir (Aspnes, 1985). Elipsometrik ölçümlerde örnek üzerine gönderilen ışın demetinin polarizasyonundaki değişiklik ölçülerek örneğin dielektrik özellikleri ( karmaşık kırılma indisi ve dielektrik fonksiyon) incelenmektedir. Büyütme sırasında numunenin doğru olarak karakterize edilebilmesi için alttaşdan gelen katkılarında ölçülebilmesi gerekmektedir. Bu etki ancak optik yolla gönderilen ışının alttaşa nüfuzu ile gerçekleşebilir bu amaçla ışının örnek içerisindeki nüfuzunu arttırmak amacıyla UV veya mor ötesi ışın kaynağı kullanılması önemlidir (Razeghi, 1995).

Elipsometri tekniğinin yanı sıra MOCVD sistemlerinde kullanılan bir diğer yerinde ölçüm metodu ise yansıma anizotropisi (reflectance anisotropy - RA) veya yansıma farkı spektroskopisi (reflectance difference spectroscopy - RDS) tekniğidir (Aspnes, 1985). RDS tekniğinde elipsometri ölçümüne benzer olarak polarize ışık örnek yüzeyine sifıra yakın bir açı ile gönderilir ve örnek yüzeyinden yansıyan ışının polarizasyonundaki değişim ölçülür. Kübik kristal yapısına sahip arsenik ve fosfat tabanlı yarıiletkenlerin simetrisinden dolayı yüzey yada arayüzeylerde simetri bozulabilir. Bu nedenle elipsometre ölçümlerinde olduğundan farklı olarak örnek yüzeyine gönderilen ışığın dalga boyu ne olursa olsun RDS direk olarak yüzey ve ara yüzeylere duyarlıdır.

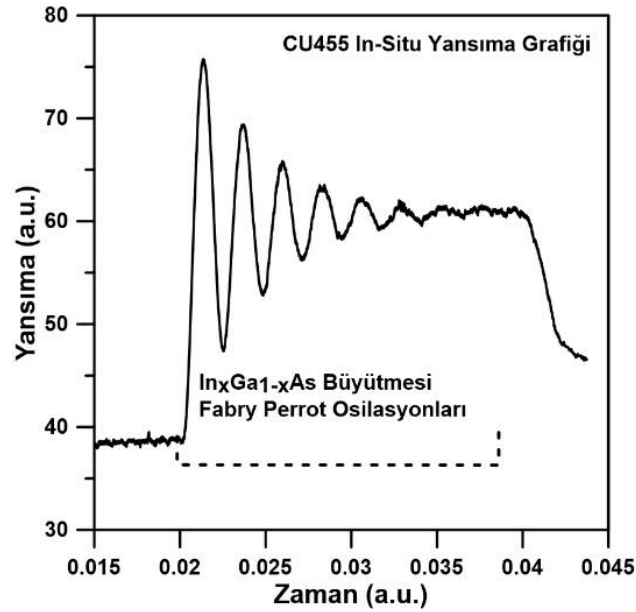
Yeni nesil MOCVD sistemlerinde kullanılan bir diğer yöntem Fabry-Perot benzeri yansıma ölçümüdür. Bu ölçüm tekniği ile büyütme esnasında büyütme hızı (growth

rate) ve kristal kalitesi hakkında bilgi edinilebilmektedir. Bu teknikte standart lazer kaynakları ile lazer ışığı  $7^\circ$  açı yapacak şekilde örnek üzerine gönderilmekte ve örnekten yansımaları ölçülmektedir.



**Şekil 5.8** Yerinde yansıma ölçümünde altaş üzerine gönderilen lazer ışığının izlediği optik yollar.

Teknik temel olarak altaş ile büyütülen katmanların kırılma indisleri farkına dayanmaktadır ve eğer altaş ile büyütülen katmanın kırılma indisleri farklı ise Fabry-Perot osilasyonları gözlenmektedir.



**Şekil 5.9** MOCVD sisteminde InP üzerine  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  büyütmesine ait yerinde ölçüm grafiği (Alaydin, 2017).

Eğer büyütülen katmanın kırılma indisi ve kullanılan lazer ışığının dalga boyu biliniyorsa bir osilasyonun kalınlığı hesaplanabilmektedir.

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2n} \quad [5.1]$$

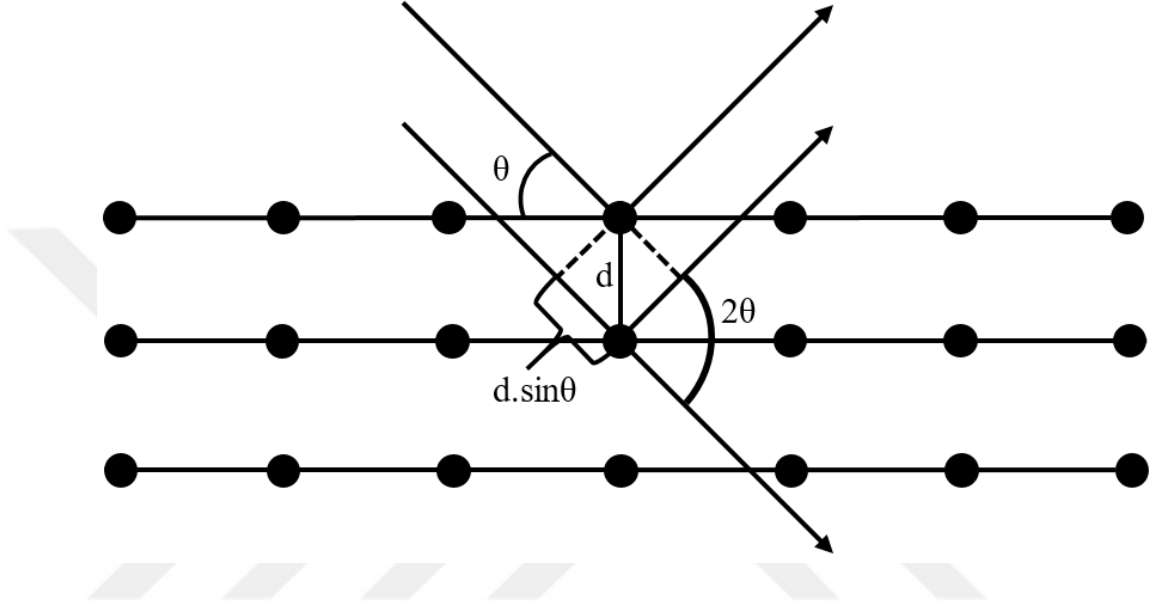
$$r = \frac{\Delta d}{L} \quad [5.2]$$

Burada  $\lambda$  lazer ışığının dalgaboyu,  $n$  büyütülen katmanın reel kırılma indisi,  $r$  büyütme hızı ve  $L$  ise bir periyodun büyütülmesi için geçen süredir. Fabry-Perot osilasyonlarının kullanılarak yapılan kalınlık hesaplamalarında doğruluğun yüksek olması için kullanılan kırılma indisi değerlerinin büyütme sıcaklığındaki değerler olması gerekmektedir (Alaydin, 2017). Fabry-Perot osilasyonlarının şiddeti alttaş ile büyütülen katman arasındaki kırılma indisi farkı ve büyütülen katmanın kalitesi ile direk orantılıdır. Eğer büyütülen katmanın kırılma indisi alttaşdan büyük ise büyütme esnasında daha yüksek yansıma görülmektedir değilse yansıma şiddeti büyütmenin başlangıç aşamasındaki alttaştan elde edilen değer altına düşmektedir. Tüm bunların yanı sıra kristal kalitesi yansıma şiddeti üzerinde direk etkiye sahiptir. Düşük kristal kalitesi durumunda düşük yansıma elde edilmektedir. Ayrıca Fabry-Perot osilasyonlarının şiddeti büyütülen katman kalınlığı ile ters orantılıdır. Büyütülen katman kalınlığı attıkça alttaştan yansıyan ışık miktarı azalmakta ve Fabry-Perot osilasyonları sönümlenmektedir. Tez kapsamında yapılan büyütmelelerde Fabry-Perot yansıma tekniği yerinde ölçüm metodu olarak kullanılmıştır.

### 5.3. Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı ile Yapısal Karakterizasyon

X-ışınları 1895 yılında W. Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Dalgaboyu 0,1 ile 100 Å arasındadır ve atomik düzlemler arası mesafelerle karşılaştırılabilir olduğu için kristal araştırmalarında kullanılabilir. X-ışınlarının kristal düzlemlerinden saçılması ilk olarak W. L. Bragg ve oğlu L. Bragg tarafından açıklanmış ve 1915 yılında Nobel ödülünü almışlardır. Bragg yasası temel olarak Laue kırınım şartının özel bir

uygulamasıdır. Bragg yasası, kristali aralarındaki uzaklıkları  $d$  olan iyonlardan oluşan paralel düzlemler olarak varsaymaktadır. Bu durumda x-ışınları düzlemlerden yansıyacak ve yapıcı girişim oluşturacaktır. Bunun sonucunda düzlemler arasındaki mesafe ile ilişkili olarak bir açı değerinde keskin yansıma verecektir.



**Şekil 5.10** Bragg yasasının gösterimi,  $\theta$  x-ışınının geliş açısı,  $d$  düzlemler arası mesafe,  $2\theta$  yansıma açısıdır.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad [5.3]$$

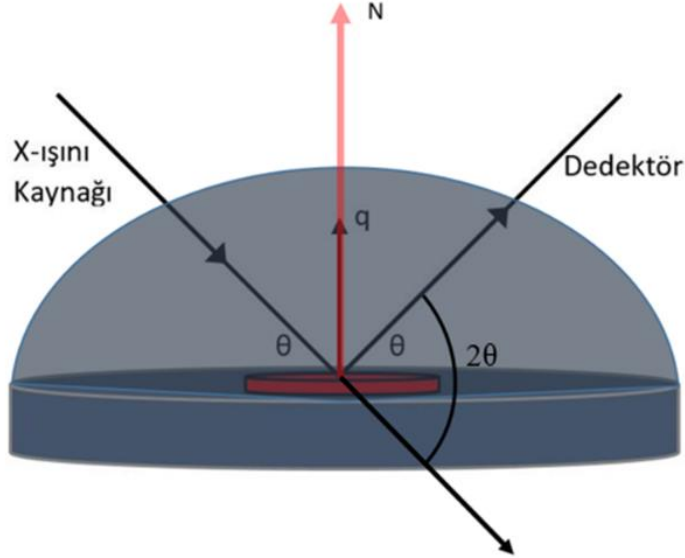
Bragg yasasına göre paralel düzlemlerden yansıyan x-ışınları arasındaki yol farkı  $2d\sin\theta$ 'dır. Bu değer dalga boyunun tam katları olduğunda düzlemleri arası mesafesi  $d$  olan kristalin  $2\theta$  açısında yansıma vereceğini söylemektedir. Burada  $n$  kırınım derecesidir. Bragg yasasına göre her kristal belirli açılarda yansıma verecektir. Düzlemler arası mesafe direk olarak kristal örgü sabitleri ile orantılıdır ve Miller indisleri yardımıyla her bir kristal için düzlemler arası mesafe ölçüldükten sonra kristale ait örgü sabitleri hesaplanabilmektedir. Kübik yapıya sahip kristaller için örgü sabiti ( $a$ ) ile düzlemler arası ilişki 5.4 formülünde verilmiştir. Burada  $hkl$  ilgili düzleme ait Miller indisleridir.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad [5.4]$$

### 5.3.1. X-ışını Ölçüm Teknikleri

#### 5.3.1.1. $\theta/2\theta$ Ölçümü

X-ışınlarının bir düzlemden yansımalarını ölçmek için kullanılan en genel ölçüm tekniklerinden biri  $\theta/2\theta$  ölçümüdür. X-ışını ölçümlerinde yapısal bilgilerin elde edilmesinde Bragg yansımalarının derecesi, şekli ve şiddeti önemlidir. Bragg yansımalarında şiddet direk olarak örnek ile dedektör arası mesafeye bağlıdır. Bu nedenle yapısal kaynaklı şiddet değişimlerinin elde edilebilmesi için dedektör ile örnek arası mesafe sabit olmalıdır ve bu da  $\theta/2\theta$  ölçüm tekniğinde dedektörün örnek etrafında sabit bir dairesel yörüngede hareket etmesiyle sağlanır.



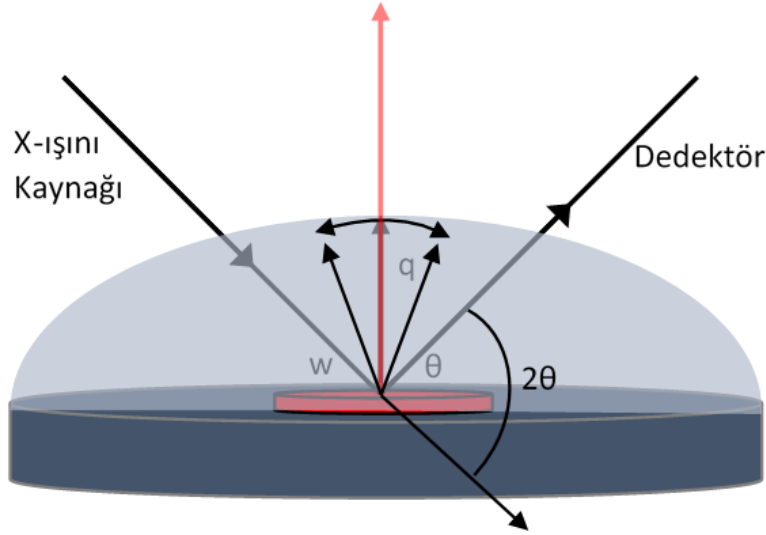
Şekil 5.11  $\theta/2\theta$  ölçümünün gösterimi.

Şekil 5.11’de gösterildiği üzere  $\theta/2\theta$  ölçümünde dedektör yarımkürenin yüzeyinde hareket ettirilerek örnek ile arasındaki mesafe sabit tutulur.  $\theta/2\theta$  ölçümünde x-ışını örnek üzerine  $\theta_{\text{gelen}}$  açısı ile gönderilir ve aynı  $\theta_{\text{yansıyan}}$  açısı ile örnekten yansımaları ölçer. Ölçüm boyunca gelen ve yansıyan  $\theta$  açıları eşit kalmak ( $\theta_{\text{gelen}} = \theta_{\text{yansıyan}}$ ) şartıyla sürekli olarak değişir. Gelen x-ışını vektörünün uzantısının örnek ile yaptığı açıda  $\theta$  olduğu için gelen ile yansıyan kırınım vektörleri arası açı  $2\theta$  olur. Bu ölçüm bu nedenle  $\theta/2\theta$  olarak isimlendirilir.  $\theta/2\theta$  ölçümünde kırınım vektörü  $q$  yüzey normaline

paraleldir. Bu nedenle  $\theta/2\theta$  ölçümü ile sadece yüzey normaline paralel düzlemler ölçülür.  $q$  vektörünün boyu  $\theta$  açısının değerine bağlı olduğu için  $\theta/2\theta$  ölçümlerinde bir düzlemin ters örgü noktası etrafında dikey doğrultu boyunca ölçüm yapılır. Tez kapsamında  $\theta/2\theta$  ölçümleri dinamik x-ışını simülasyonlarında ve yarı maksimum yükseklikteki genişlik (Full Width at Half Maximum – FWHM) hesaplamalarında kullanılmıştır.

### 5.3.1.2. Salıntı Eğrileri Ölçümü ( $w$ ölçümü)

Salıntı eğrileri ölçümünde dedektör açısı  $2\theta$ , ölçülen düzlem etrafında sabit tutulur. Bu durumda x-ışını kaynağı ile dedektör arasındaki açı ve kırınım vektörü  $q$ 'nun büyüklüğü sabit kalır.  $q$  vektörü ölçülen düzlem etrafında  $w$  açısı kadar eğimle salıntı şeklinde hareket eder. Bu durumda  $\theta$  açısı  $w$  kadar değişmiş olur. Bu nedenle bu tarama ayrıca  $w$  taraması olarak da isimlendirilir.



Şekil 5.12 Salıntı eğrileri ölçümü gösterimi.

Salıntı eğrileri ölçümlerinde kırınım vektörü  $q$ 'nun yüzey normaline paralel bir kırınım vektörü bileşeni  $q_z$ 'ye sahip olmasının yanı sıra eğimli ölçüm tekniğinden kaynaklı bir yatay kırınım vektörü bileşenine de sahiptir. Bu kırınım vektörü ise  $q_x$ 'tir. Bu nedenle salıntı eğrileri ölçümleri kristal içerisindeki düzlem içi düzensizliklere duyarlıdır.

### 5.3.1.3. Ters Uzay Haritalandırma Ölçümü

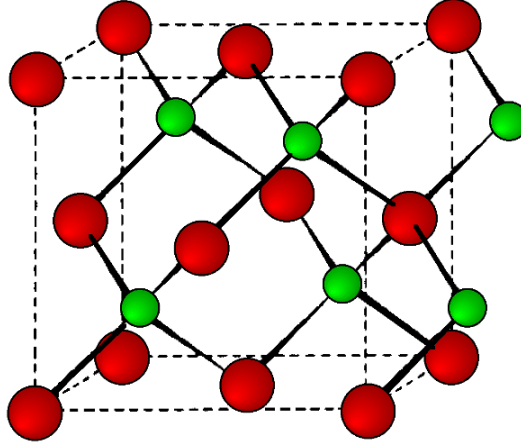
$\theta/2\theta$  ölçümlerinin anlatıldığı kısımda simetrik  $\theta/2\theta$  taramalarında kırınım vektörü  $q$ 'nun yüzey normaline paralel düzlemler için yansıma elde edileceği açıklanmıştır. Ters uzay haritalandırmalarında  $\theta/2\theta$  taramalarına ait kırınım vektörü  $q_z$  olarak adlandırılır. Salıntı eğrileri ölçümlerinde ise her zaman düzlem içi doğrultuda  $q_x$  kırınım vektör bileşeni vardır.  $\theta/2\theta$  ve  $w$  ölçümlerinde deneysel koordinatlar açısız olarak ifade edilirken ters uzay haritalandırma ölçümlerinde bu koordinatlar momentum cinsinden ifade edilir. Bu nedenle  $\theta/2\theta$  ve  $w$  ölçümleri sırasıyla  $q_z$  ve  $q_x$  olarak ifade edilir ve deneysel koordinatlar ile momentum vektörleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$q_z = q[\cos(\theta - w) - \cos(\theta + w)] \quad [5.5]$$

$$q_x = q[\sin(\theta - w) - \sin(\theta + w)] \quad [5.6]$$

Ters uzay haritalandırma ölçümlerinde kırınımın elde edildiği düzlem kırınım vektörleri ile kuşatılır. Kuşatma dikey düzlemde  $q_z$  yatay düzlemde ise  $q_x$  vektörleri ile gerçekleştirilir. Kuşatma iki-boyutlu olarak gerçekleşir ve tek başına  $\theta/2\theta$  veya  $w$  taramaları yeterli değildir. Bu nedenle ters uzay haritalandırma ölçümlerinde bu iki taramanın birleşimi ile gerçekleştirilir. İki boyutlu tarama her bir  $w$  açısında  $\theta/2\theta$  taraması yapılır. Her ölçüm üst üste bindirilir ve sonuçta iki boyutlu dikey eksen  $q_z$ , yatay eksen  $q_x$  olmak üzere şiddete bağlı olarak ters uzay haritalandırması elde edilir. Ters uzay haritalandırması kristal düzlemlerinde gerilme kaynaklı eğim (tilt), örgü sabiti, gerilme ve gevşeme (relaxation) hakkında bilgi edinilebilir.





Şekil 5.14 III-V grubu yarıiletkenlere ait “Zinc Blende” kristal örgü yapısı.

Örgü sabitlerindeki bu değişim farklı Bragg açılarında kırınımına neden olmaktadır. Yüksek kaliteli farklı yarıiletken katmanların üst üste büyütülmesi tabakalarda gerilmelere yol açmaktadır. Her katmandaki gerilme Bragg yasasında kırınım açısına bağlı olarak ifade edilebilir.  $\Delta\theta$  Bragg açısındaki değişim olmak üzere;

$$\frac{\Delta d}{d} = - \frac{\sin \theta - \sin(\theta + \Delta\theta)}{\sin(\theta + \Delta\theta)} \quad [5.7]$$

$d$  düzlemler arası mesafe,  $\Delta d$  gerilme nedeni ile oluşan sapmadır. Poisson katsayısının korunma zorunluluğundan dolayı düzlem içi doğrultudaki örgü uyumsuzluğu düzleme dik doğrultuda oluşacak gerilme ile doğrudan ilişkilidir.

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{1-\nu}{1+\nu} (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) \quad [5.8]$$

$\epsilon_{\parallel}$  düzlem içi gerilme,  $\epsilon_{\perp}$  düzleme dik doğrultudaki gerilme ve  $\nu$  Poisson katsayısıdır. Kübik kristal yapısına sahip sistemlerde gerilmeler;

$$\epsilon_{\parallel} = \frac{a_S - a_L}{a_L} \quad [5.9]$$

$$\epsilon_{\perp} = \frac{c_L - a_L}{a_L} \quad [5.10]$$

olarak ifade edilirler. Gerilme denklemleri ve örgü sabitlerinin kullanılması durumunda gerilmeye bağlı Bragg açısındaki değişim yada düzlemler arası mesafeye bağlı olarak Bragg açısı bulunabilir.

$$\left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{\parallel} = -\frac{1-\nu}{1+\nu}\left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{\perp} \quad [5.11]$$

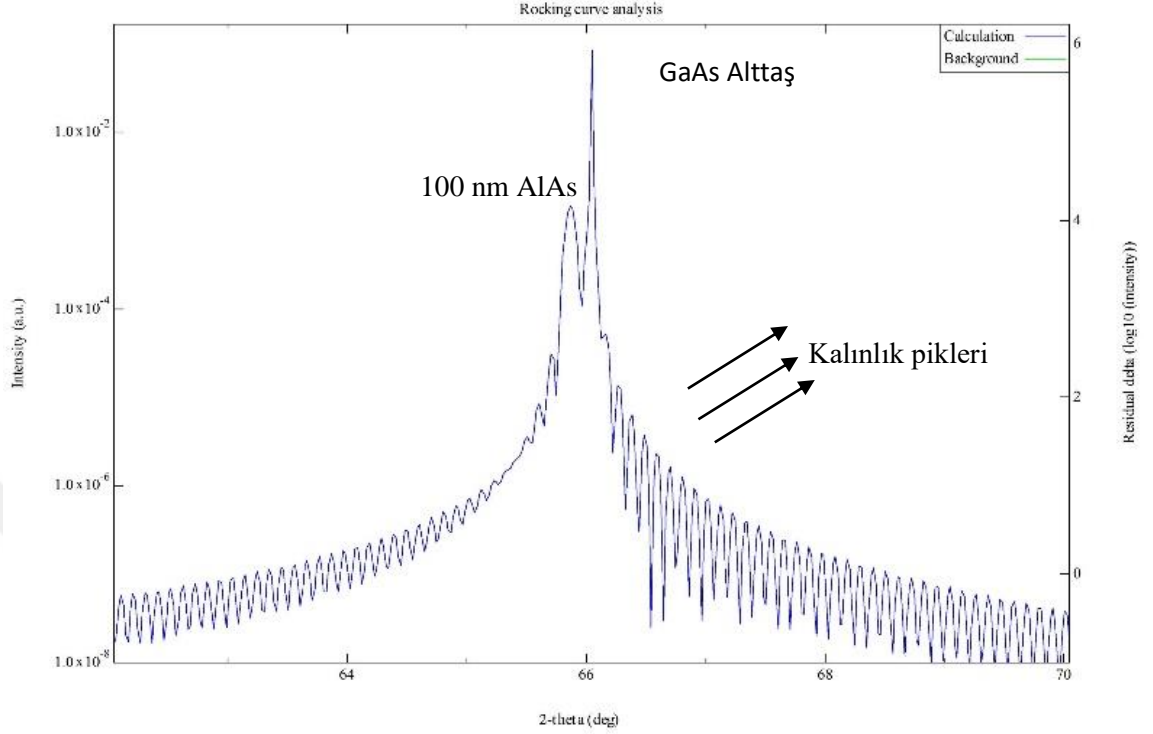
Yarıiletkenlerde alaşım oranındaki değişim Vegard yasası ile bulunabilir. Herhangi bir alaşım oranındaki üçlü  $\alpha_x\beta_{1-x}\gamma$  bileşiğinin kristal sabitleri  $\alpha\beta$  ve  $\gamma\beta$  yarıiletkenlerine ait parametreler kullanılarak hesaplanabilir. Bu parametreler ile üçlü yarıiletkene ait kompozisyon oranı bulunabilir.

$$x = \frac{d_S\left[\left(\frac{\Delta d}{d}\right)_S + 1\right] - d_{\gamma\beta}}{d_{\alpha\beta} - d_{\gamma\beta}} \quad [5.12]$$

Tez kapsamında büyütülen numunelerden lazer yapısının kuantum kuyusunu oluşturan  $In_xGa_{1-x}As$  yarıiletkenin alaşım oranı bu eşitlikleri kullanan dinamik x-ışını simülasyon programı kullanılarak hesaplanmıştır.

### 5.3.3. Tek Katman Kalınlığının Belirlenmesi

X-ışınlarının farklı optik yollarından dolayı kırınım deseninde gözlenen girişim saçakları tabakaların kalınlıklarına bağlıdır ve Scherrer denklemi kırınım deseninin pik noktasının genişliğini tabaka kalınlığına bağlamaktadır. Alttaş üzerine ince olarak büyütülmüş farklı bir yarıiletkene ait en basit  $\theta/2$ - $\theta$  x-ışını kırınım deseni temel olarak alttaş yansıması, epitaksiyel katmanın yansıması ve kalınlık piklerinde oluşur.



**Şekil 5.15** GaAs alttas üzerine eklenmiş 100 nm AlAs'ın x-ışını kırınım deseninin simülasyonu.

Kalınlık piklerinin her biri alttasdan itibaren  $n_1, n_2, n_3, \dots$  vs olarak isimlendirilir.  $t$  kalınlık (tek bir pik noktası için düzlemler arası mesafe) olmak üzere her bir kalınlık pikine karşılık Bragg yasası yazılabilir.

$$2t \sin \theta_1 = n_1 \lambda \quad [5.13]$$

$$2t \sin \theta_2 = n_2 \lambda \quad [5.14]$$

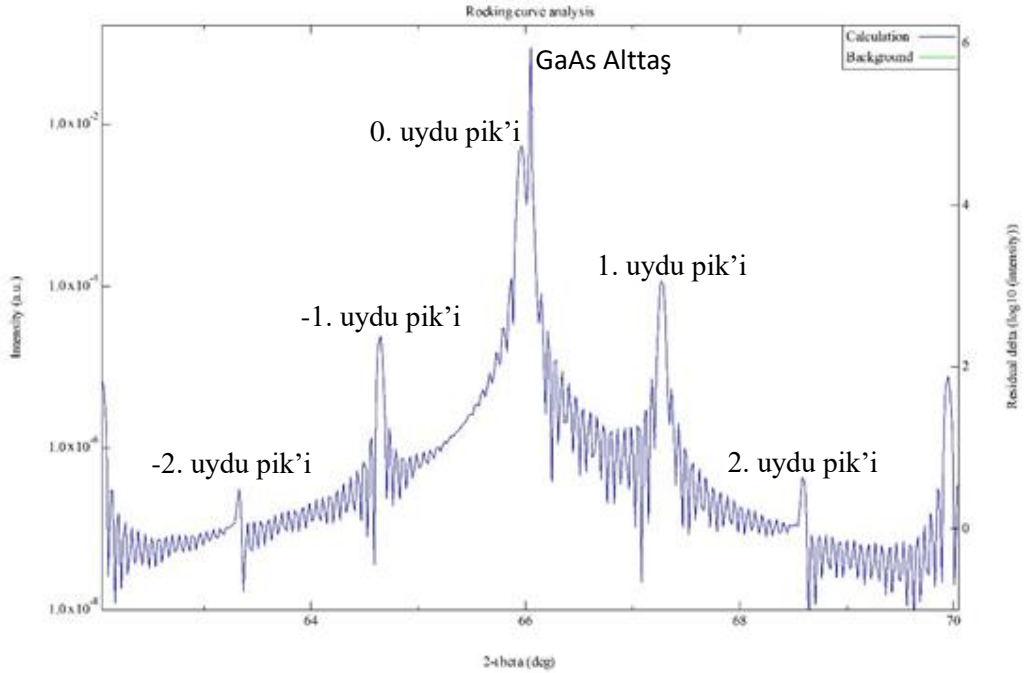
Son iki denklemin birbirinden çıkarılması durumunda tek katmana ait kalınlık ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$t = \frac{(n_1 - n_2) \lambda}{2(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)} \quad [5.15]$$

Tez kapsamında büyütülen tek katmanların kalınlıkları dinamik x-ışını simülasyon programı kullanılarak yukarıda verilen formüller ile hesaplanmıştır (Şekil 5.15).

### 5.3.4. Periyodik Çoklu Katmanların Analizi

Periyodik çoklu katmanlar en az iki farklı materyalin üst üste çoklu sayıda büyütülmesi ile elde edilirler. Dalga fonksiyonlarının üst üste binmesi ile oluşan süperörgüler ve yüksek yansıtıcılığa sahip ayna olarak kullanılan dağınımlı Bragg Yansıtıcıları periyodik çoklu katmanlara örnektir. Bunların yanı sıra periyodik yapı x-ışını kırınımı üzerinde de büyük etkiye sahiptir. Periyodik yapıların x-ışını kırınımı ile analizi kalınlık pikleri yardımı ile kalınlık analizine benzer olarak yapılmaktadır ancak periyodik yapılarda kalınlığın yanı sıra periyodiklikteki değişimler, ara yüzey geçişleri ve pürüzlülüğü hakkında da ayrıca bilgi sağlamaktadır. Dinamik x-ışını teorisi kullanılarak yapılan periyodik yapı analizlerinde katmanların kalınlıklarına ve kompozisyon değerlerine bağlı olarak kalınlık piklerine benzer olarak uydu (satellite) pikleri x-ışını kırınım deseninde elde edilmektedir. Bu pikler kompozisyon ve gerilmenin modülasyonu olarak düşünülebilir.



**Şekil 5.16** AlAs/GaAs 30 çift süper örgü yapısına ait x-ışını kırınım deseninin simülasyonu.

[5.3] denklemi kullanılarak pikler arası mesafeden yola çıkılarak kalınlıklar hesaplanabilir. Bu nedenle x-ışını kırınım deseninde periyodiklikle ve toplam kalınlıkla

bağıntılı olarak pikler görülür. Şekil 5.16'da GaAs üzerine büyütülmüş 30 çift AlAs/GaAs süperörgüsüne ait dinamik x-ışını hesaplama simülasyonu görülmektedir. Toplam periyot kalınlığı  $\Lambda$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Lambda = \frac{(n_i - n_j)\lambda}{2(\sin \theta_i - \sin \theta_j)} \quad [5.16]$$

Burada  $\Lambda$  çoklu katmanı oluşturan iki yarıiletkenin kalınlıkları toplamına eşittir.

### 5.3.5. Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Sistemi

Tez kapsamında Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu bulunan Rigaku Smartlab Döner Anodlu X-ışını Kırınım sistemi kullanılmıştır (Şekil 5.17).



**Şekil 5.17** Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde kurulu yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım sistemi.

Sistemin özellikleri aşağıdaki gibidir:

- 45 kV 200 mA çalışma gücü
- Bakır anotlu  $K_{\alpha 1}=1.54059 \text{ \AA}$  x-ışını kaynağı
- (220)x4 germanyum monokromatör
- (220)x2 germanyum analizör
- $0,0004^\circ$  adım aralığı ile ölçüm

#### **5.4. Taramalı Elektron Mikroskopyu**

Taramalı elektron mikroskopyu (scanning electron microscopy-SEM) yüksek enerjili odaklanmış elektron demetlerini vakum altında örnek yüzeyine gönderilmesi ile örneğin görüntüsünü oluşturur. SEM ölçümü temel olarak odaklanmış elektronların atomlarla esnek olmayan çarpışmalar sonucunda geri saçılması (back scattering) yada uyarılan atomların yaydıkları ikincil elektronların (secondary electrons) bir dedektör tarafından algılanması ile gerçekleşir. Elektronların atomlarla etkileşimi sonucunda yüzey morfolojisi, kristal yapısı, kristal oryantasyonu ve örnek kompozisyonu hakkında bilgi elde edilebilmektedir. Geri saçılan elektronlar ile elde edilen görüntüler genel olarak çok fazlı yapılardaki zıtlık (contrast) farkını görüntüleme de kullanılırken ikincil elektronlarla elde edilen görüntüler ise yüzey morfolojisinin incelenmesi amacı ile kullanılır. SEM ile bir nanometre mertebesinde çözünürlükle örnek ölçümü yapılabilir ve örneğe herhangi bir zarar vermez. Tez kapsamında Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde Kurulu bulunan MIRA TESCAN taramalı elektron mikroskopyu kullanılmıştır.



**Şekil 5.18** Cumhuriyet Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde kurulu bulunan MIRA3 TESCAN taramalı elektron mikroskopu.

### 5.5. Spektrofotometre

Optik ölçümler yarıiletken malzeme üzerine gönderilen elektromanyetik dalganın malzeme ile etkileşmesinin ardından malzemedeki yansıtılma, geçme veya soğurulma miktarının ölçülmesi mantığına dayanmaktadır. Yarıiletken malzemelerin optiksel karakterizasyonunda yansıtılma, soğurma ve geçirgenlik ölçümleri sıkça kullanılmaktadır. Bu ölçümlerden yansıtılma yarıiletken üzerine farklı dalgalarda gönderilen ışığın malzemedeki yansıtıldıktan sonra dedektör tarafından soğurulması mantığına dayanmaktadır. Yansıtılma ölçümü tek katmanlı yarıiletkenlere yapılabileceği gibi çoklu katmanlara da uygulanabilir. Tek katman ölçümünde yarıiletkenin enerji bant kenarı, eksiton soğurması gibi fiziksel olaylar hakkında bilgi verirken çoklu katman ölçümlerinde katman kalınlıkları, katmanlar arası geçiş kalitesi ve yansıtıcılık özellikleri hakkında bilgi sağlayabilmektedir. Tez kapsamında Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde Kurulu bulunan Cary 5000 UV-VIS-NIR spektrofotometre cihazı kullanılmıştır.



**Şekil 5.19** Cary 5000 spektrofotometre sistemi.

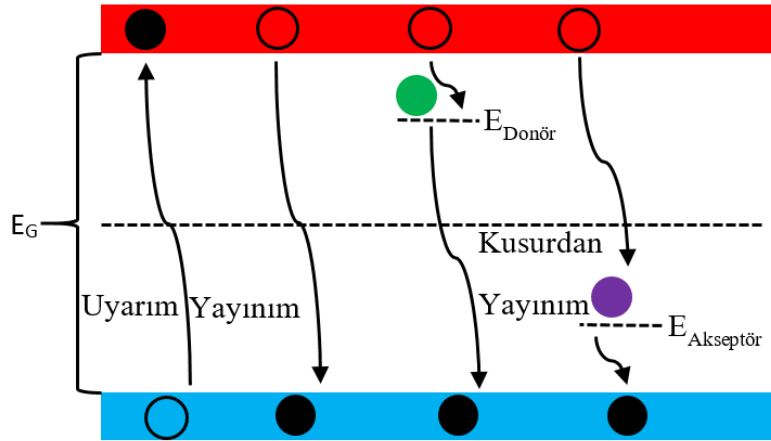
Sistem özellikleri:

- 175-3300 nm dalgaboyu aralığı
- Spektral (toplam) yansımaya ölçüm sistemi 200-2500 nm aralığındadır.
- Dağınmık yansımaya ölçüm sistemi 200-2500 nm aralığındadır.
- 0,01 mm slit genişliği

Tez çalışmasında büyütülen DBR yapılarının yansımaya ölçümleri spektrofotometre cihazı ile 0,5 ve 1 nm adım aralığı ile yapılmıştır. Yansımaya ölçümleri DBR yapılarının optiksel özelliklerinin belirlenmesinde detaylı analiz yapılabilmesi amacıyla açığa bağımlı olarak 0, 30 ve 60 dereceler için yapılmıştır. Açığa bağımlı ölçümlerde ERA 30 ve ERA 60 aksesuarları kullanılmıştır. Bu ölçümler ile DBR'nin çalışma aralığı, bant genişliği ve etkin ayna uzunluğu (penetrasyon derinliği) hakkında bilgi edinilmiştir.

## 5.6. Fotolüminesans

Fotolüminesans (photoluminescence-PL) herhangi bir maddenin foton soğurmasından sonra yaptığı ışık yayınıdır. İngilizcede ışık yayını (luminescence) ve ışıkla uyarım (photoexcitation) anlamına gelen kelimelerinin birleşimi ile oluşur. PL direk bant aralığına sahip yarıiletkenlerin enerji bant aralığı ve yarıiletkenin optiksel kalitesini belirlemek için kullanılan numuneye hasar vermeyen bir yöntemdir. Bunun yanı sıra kuantum kuyusu ve kuantum noktası yapılarının ölçümünde de kullanılmaktadır. PL ölçümlerinde temel olarak yarıiletkenin valans bandındaki elektronları yarıiletkenin enerji bant aralığından daha büyük foton enerjisine sahip bir lazer kaynağı ile uyarılarak iletim bandına çıkmaları sağlanır. İletim bandında maddenin yapısına bağlı olarak bir süre kaldıktan sonra yarıiletken malzemenin enerji bant aralığına eşit enerjiye sahip bir foton yayınlayarak tekrar valans bandına dönerler. Dolayısı ile yarıiletkenin enerji bant aralığı bu şekilde bantlar arası geçiş ile belirlenebilir.



Şekil 5.20 Fotolüminesans ölçümündeki uyarım ve foton yayınımları.

Bunun yanı sıra kuantum kuyusu ve kuantum noktası ölçümlerinde iletim ve valans bantlarında oluşan enerji seviyeleri arasındaki geçişler için fotolüminesans kullanılır. Kusur miktarı yüksek-düşük kaliteli numuneler yada katkılama değerleri yüksek yarıiletkenlerde yasak enerji aralığında kusur seviyeleri oluşabilir. İletim bandındaki elektron kusur seviyelerine düştükten sonra valans bandına dönebilir, bu durumda

kusur seviyesine eşit enerjiye sahip foton yayını yapar. Fotolüminesans ölçümü ile kristal kalitesinin tayini ölçülen katmandan elde edilen ışık yayınıının yarı yükseklikteki genişliğinin (FWHM) belirlenmesi ve kusur seviyelerinden gelen yayını ile mümkündür. Tez kapsamında Ermaksan A.Ş. arge araştırma laboratuvarında bulunan Nanometrics-RPM Blue PL sistemi kullanılarak kuantum kuyusu ve VCSEL yapıları ölçülmüştür.



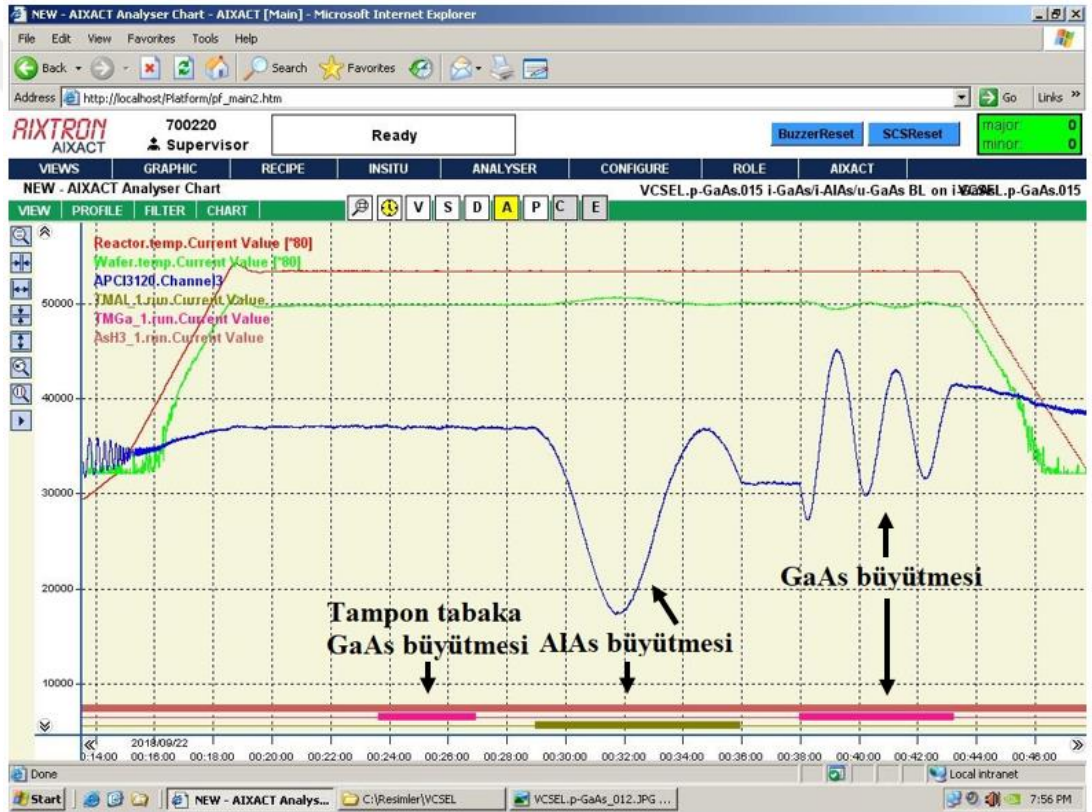
## 6. DÜŞEY KOVUKLU YÜZEY IŞIMALI LAZER YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Tezin bu bölümünde düşey kovuklu yüzey ışimalı lazer yapılarının ayna tabakaları ve aktif bölgesini oluşturan GaAs, AlAs ve InGaAs tabakalarının MOCVD sistemi ile büyütülmesi ve karakterizasyonu detaylı şekilde incelenmiştir. Öncelikle büyütme ve karakterizasyon çalışmaları tek katman tabakalar için yapılmıştır. VCSEL yapısında kullandığımız GaAs ve AlAs'ın büyütme hızlarının belirlenmesi amacıyla GaAs alttaş üzerine sırasıyla GaAs tampon tabaka, tek tabaka AlAs ve tek tabaka GaAs büyütülmüştür. MOCVD sisteminde bulunan yerinde ölçüm sistemi kullanılarak bu katmanların büyütme hızları belirlenmiştir. Elde edilen büyütme hızları VCSEL yapısında bulunan ayna katmanların kalınlıklarının ışın dalgaboyunun dörtte birine göre ayarlanarak DBR büyütme yapılmıştır. DBR yapılarının HRXRD analizi yapılarak çoklu yapıdaki katmanların kalınlıkları ve kalitesi belirlenmiştir. DBR yapısının ardından VCSEL yapısının aktif bölgesini oluşturan kuantum kuyusu (QW) kısmı büyütülmüştür. QW bölgesi GaAs bariyer katmanları ve tek bir InGaAs kuantum kuyusundan oluşmaktadır. VCSEL yapılarında aktif bölgenin toplam kalınlığı ışın dalgaboyunun yarısı olacak şekilde büyütme yapılmıştır. HRXRD ve fotoluminesans (PL) ölçümleri ile QW bölgesinin karakterizasyonu tamamlanmıştır. DBR ve QW büyütmelerinden elde edilen veriler kullanılarak tam bir lazer yapısı büyütülmüştür. Lazer yapısının karakterizasyonundan sonra lazer ışın dalgaboyu 980 nm için aktif bölgede bulunan InGaAs yapısındaki indiyum oranı değiştirilerek elde edilmeye çalışılmıştır.

Tez kapsamında yapılan büyütme çalışmalarının tamamında yüzey yönelimi <001> düzlemi olan eğimsiz tek tarafı parlatılmış yarı-yalıtkan (semi-insulating) GaAs alttaşlar kullanılmıştır. Büyütme çalışmalarının tamamı 620 °C yüzey sıcaklığında yapılmıştır ve toplam gaz akış değeri 6000 sccm'dir. Taşıyıcı gaz H<sub>2</sub>'dir ve alttaşın döndürülmesi için N<sub>2</sub> gazı 10 sccm değerinde kullanılmıştır.

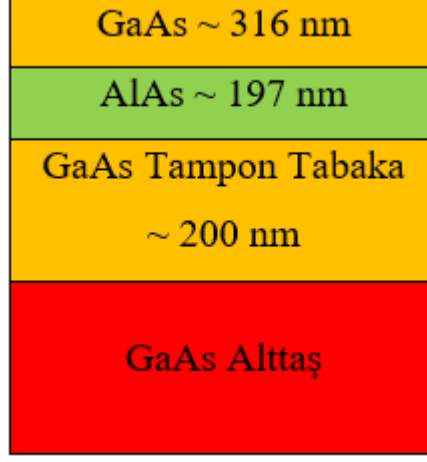
## 6.1. Tek Tabaka GaAs ve AlAs Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

Büyütme teknolojisinden bağımsız olarak epitaksiyel büyütmelemlere genel olarak alttaş ile uyumlu büyütme olması durumunda alttaş ile aynı malzemenin büyütülmesi ile başlanır. Büyütmede bu katman tampon tabaka (buffer layer) olarak adlandırılır ve alttaştan gelecek kusurların büyütülmek istenen katmana nüfuz etmesini engeller. Bu amaçla tek katman çalışmalarında GaAs alttaş üzerine yaklaşık olarak 200 nm GaAs büyütülmüş ardından diğer epitaksiyel tabakaların büyütülmesine geçilmiştir.



Şekil 6.1 VCSEL015 numaralı büyütmeye ait ekran görüntüsü. GaAs alttaş üzerine tek katman AlAs ve GaAs büyütülmesi.

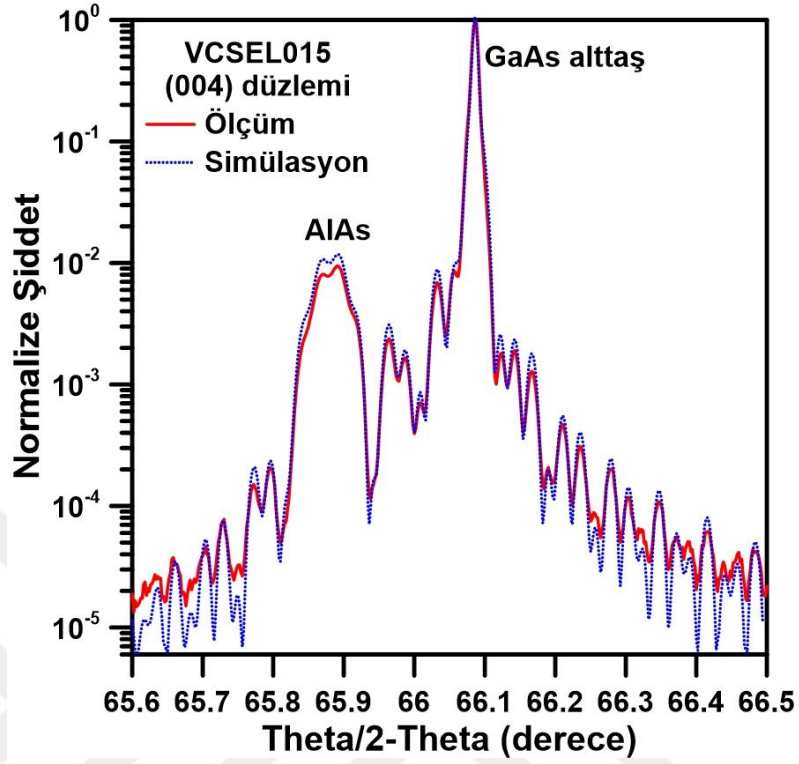
VCSEL015 numaralı büyütmede 1 osilasyon AlAs ve 2,5 osilasyon GaAs büyütülmüştür. Büyütme süreleri 420 ve 316 s'dir. Yerinde ölçüm sistemi ile yapılan fit ile katman kalınlıkları AlAs ve GaAs için sırasıyla 197 ve 316 nm olarak bulunmuştur. Büyütmeye ait gaz akış değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Bu akış değerlerinde büyütme hızları 0,47 ve 1 nm/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.2 VCSEL015 numaralı büyütmeye ait yapı.

Çizelge 6.1 VCSEL015 numaralı büyütmenin gaz akış miktarları.

Katman	TMAI Kaynak (sccm)	TMAI Basınç (mbar)	TMGa Kaynak (sccm)	TMGa Basınç (mbar)	AsH3 Kaynak (sccm)
GaAs Buffer	0	0	14	1000	30
AlAs	30	1000	0	0	30
GaAs	0	0	14	1000	30

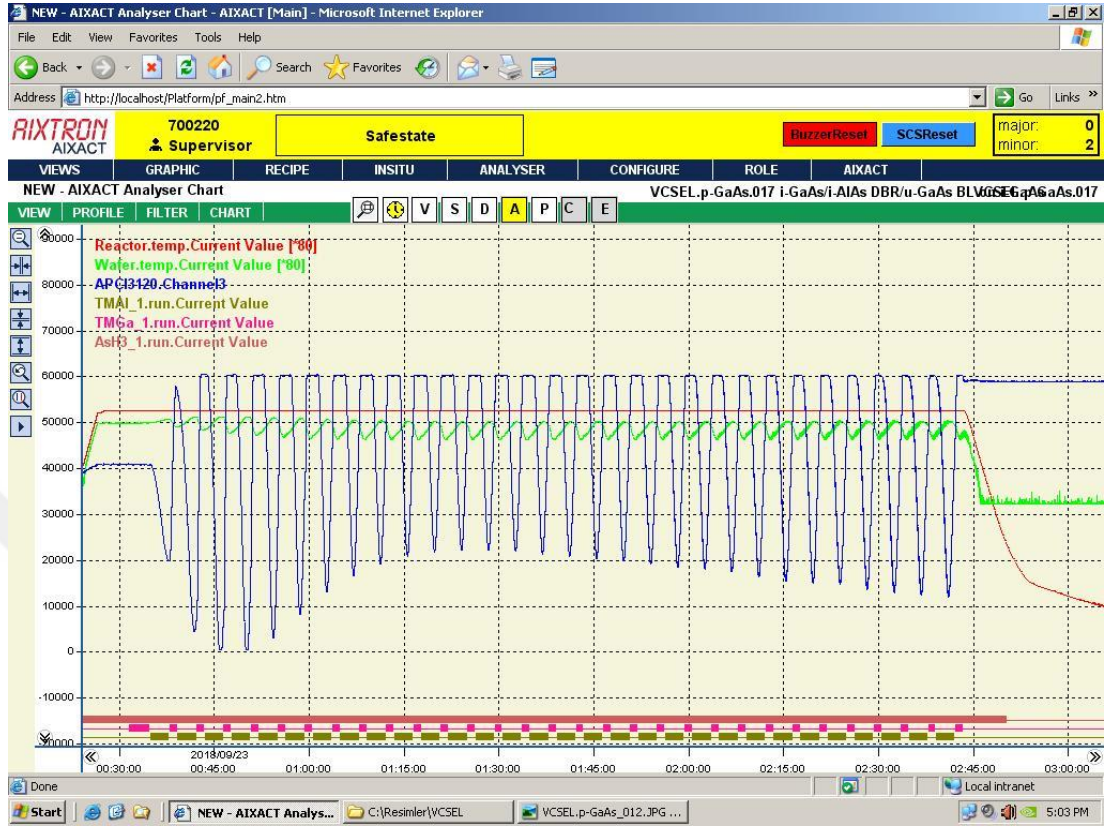


**Şekil 6.3** VCSEL015 numaralı büyütme için HRXRD ölçümü ve dinamik x-ray simülasyonu.

VCSEL015 numaralı büyütmenin kristal kalitesinin araştırılması amacıyla (004) düzlemi doğrultusunda HRXRD ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonucunda AlAs ve GaAs katmanlarına ait tabaka kalınlıkları 165,6 ve 301 nm olarak bulunurken büyütme hızları AlAs ve GaAs için 0,39 ve 0,95 nm/s'dir. Yerinde ölçüm ve dinamik XRD simülasyonu ile bulunan kalınlıklar arasında 31,5 ve 15 nm şeklinde kalınlık farkları vardır.

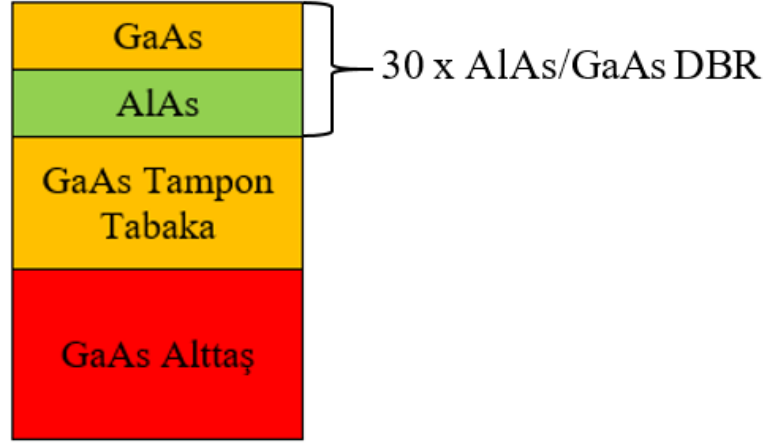
## 6.2. Dağınımlı Bragg Yansıtıcısının Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

Ölçüm metodlarından kaynaklı hatanın bulunması ve sonraki büyütme süreçlerinde düzeltmenin yapılabilmesi amacıyla yerinde ölçüm sisteminden bulunan büyütme hızı değerleri kullanılarak VCSEL017 numaralı büyütme yapılmıştır.



**Şekil 6.4** VCSEL017 numaralı büyütmeye ait ekran görüntüsü. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş 30 çift AlAs/GaAs DBR yapısı.

VCSEL017 numaralı büyütmede VCSEL015 numaralı büyütmedeki akış değerleri kullanılmıştır. Her bir epi-katman için hedeflenen kalınlık AlAs ve GaAs katmanları için sırasıyla 83,1 nm ve 69,9 nm'dir. Bu kalınlıklar 980 nm merkez dalgaboyuna sahip DBR için belirlenmiştir. Bu amaçla 30 döngü halinde GaAs tampon tabaka üzerine 177 s ve 70 s AlAs ve GaAs büyütülmüştür. VCSEL017 numaralı büyütmeye ait ekran görüntüsünde DBR çift sayısı ile eşit sayıda tam 30 periyod osilasyon görülmektedir.



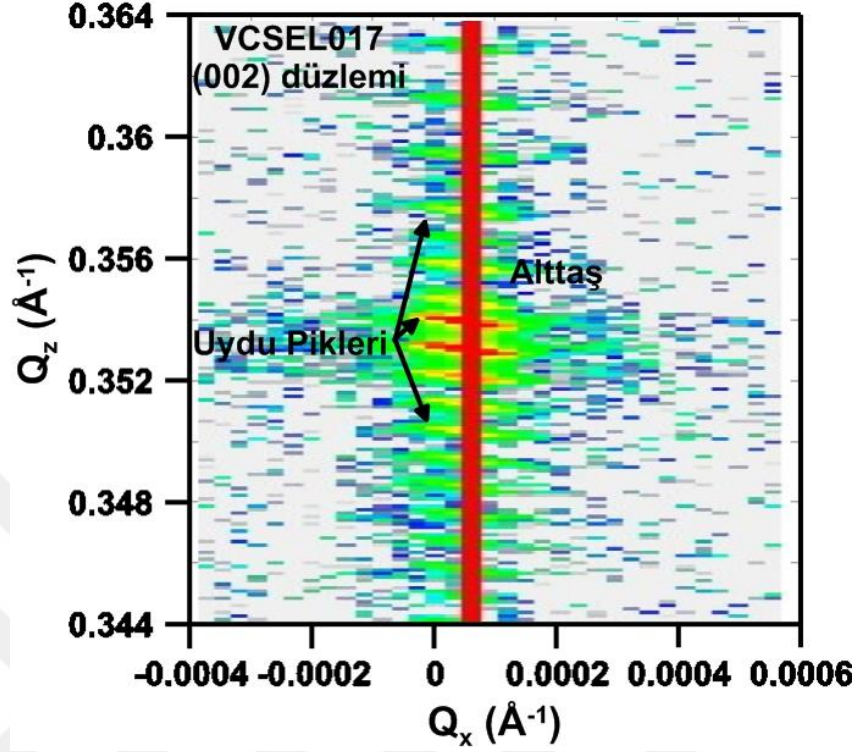
Şekil 6.5 VCSEL017 numaralı büyütmeye ait yapı.

Büyütme sonrası DBR yapısının analizi amacıyla SEM ve HRXRD ile yapısal karakterizasyon, spektrofotometre ile optik karakterizasyon için yansıma ölçümleri yapılmıştır.

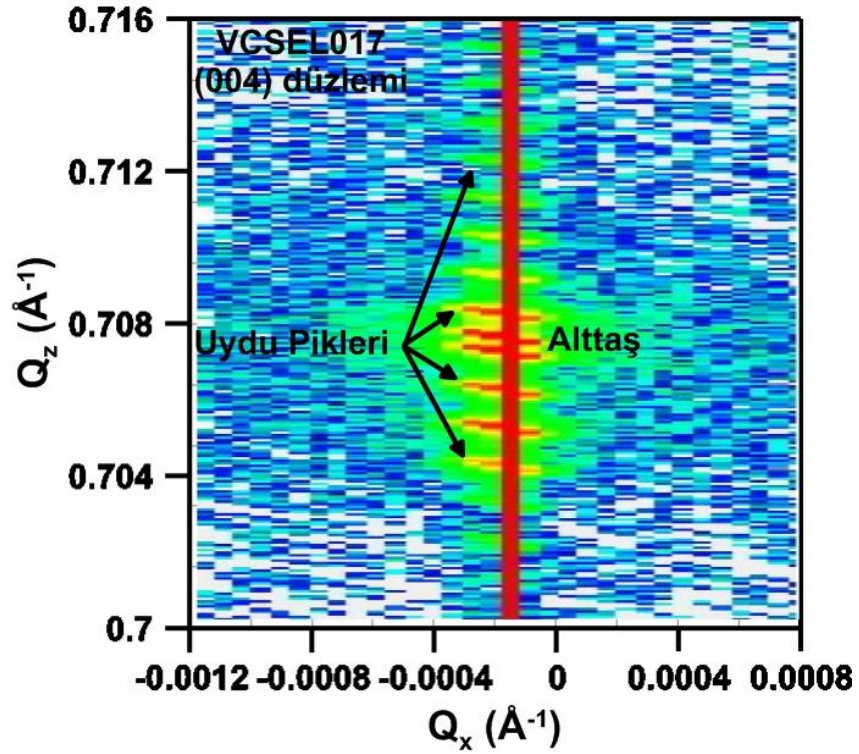


Şekil 6.6 VCSEL017 numaralı büyütmeye ait SEM görüntüsü.

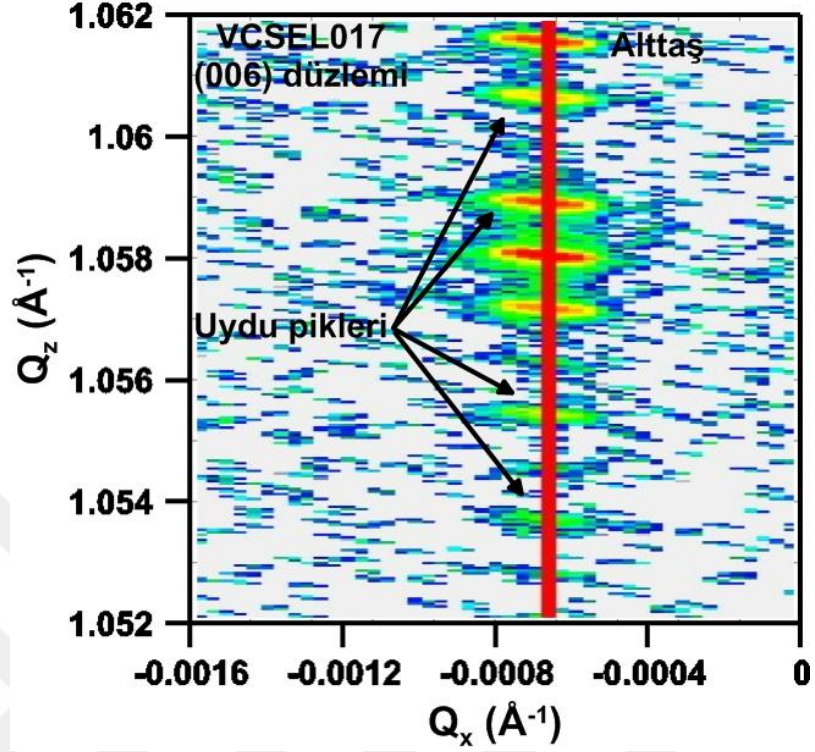
SEM görüntüsü büyütülen çoklu yapının periyodikliğini göstermektedir. AlAs ve GaAs katmanları arasındaki geçişler keskindir ve kolaylıkla ayırt edilebilir seviyededir. Ancak, son üç katmanda dalgalanma görülmektedir. SEM görüntüsünün ardından DBR yapısındaki her bir katmanın kristal kalitesinin araştırılması ve katmanlar arasındaki geçişlerin kalitesini göstermek amacıyla (002), (004), (006) ve (224) düzlemleri doğrultusunda ters uzay haritalandırma (reciprocal space mapping-RSM) ve  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümleri yapılmıştır. RSM ölçümleri kristal yapıda oluşabilecek eğilme ve gevşemenin bulunması için kullanılmıştır. Bu değerler daha sonrasında  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümlerinin dinamik x-ışını simülasyonlarında kullanılacaktır. Düzleme dik doğrultuda (002), (004) ve (006) düzlemlerinin üçünün de ölçülmesinin nedeni bu düzlemlerden (002) ve (006)'da AlAs'ın yapı faktörünün GaAs'a küçük ve sıfıra yakın olmasının yanı sıra çoklu yapının periyodikliğine daha duyarlı olmalarıdır (Bhattacharyaa, 2005). Bunun yanı sıra (006) düzleminin Bragg açısı (002) düzlemine göre daha büyüktür ve x-ışınları yapıya daha iyi nüfuz etmektedir. DBR gibi kalın tabakaların analizinde daha iyi sonuçlar elde edilebilir. (004) düzleminde ise AlAs ve GaAs'ın yapı faktörlerinin büyük olması bu düzlemin çoklu yapının periyodikliğinin yanı sıra her katmanın kalitesine de ayrıca duyarlı olacağını göstermektedir.



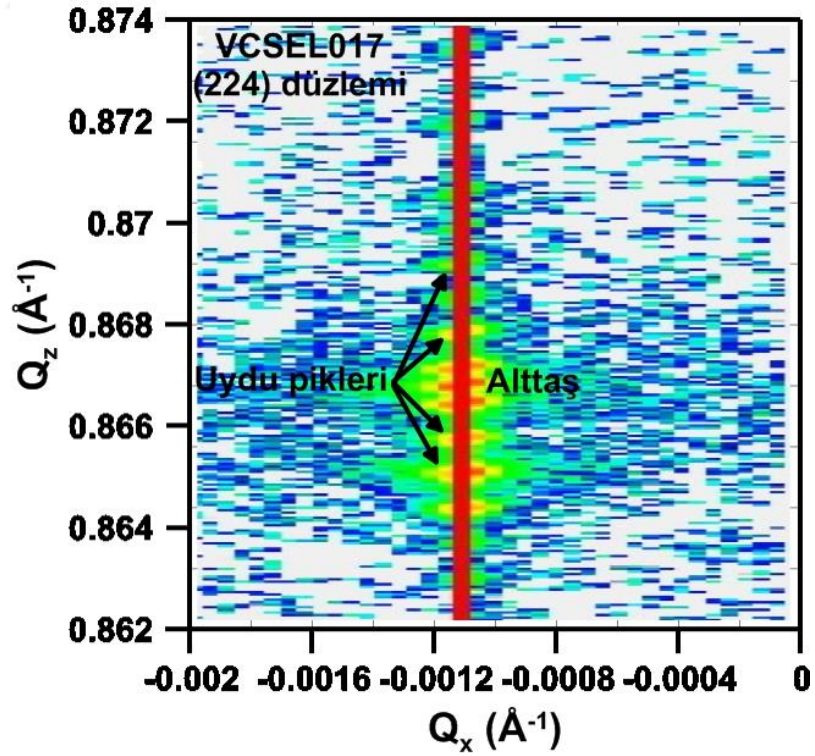
Şekil 6.7 VCSEL017 numaralı büyütme için (002) düzlemi RSM ölçümü.



Şekil 6.8 VCSEL017 numaralı büyütme için (004) düzlemi RSM ölçümü.

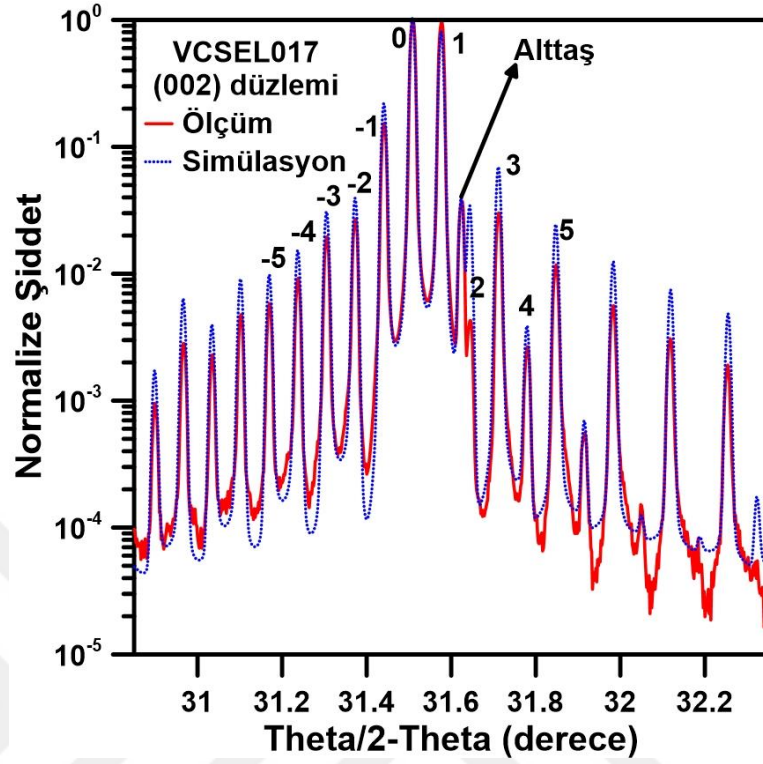


Şekil 6.9 VCSEL017 numaralı büyütme için (006) düzlemi RSM ölçümü.

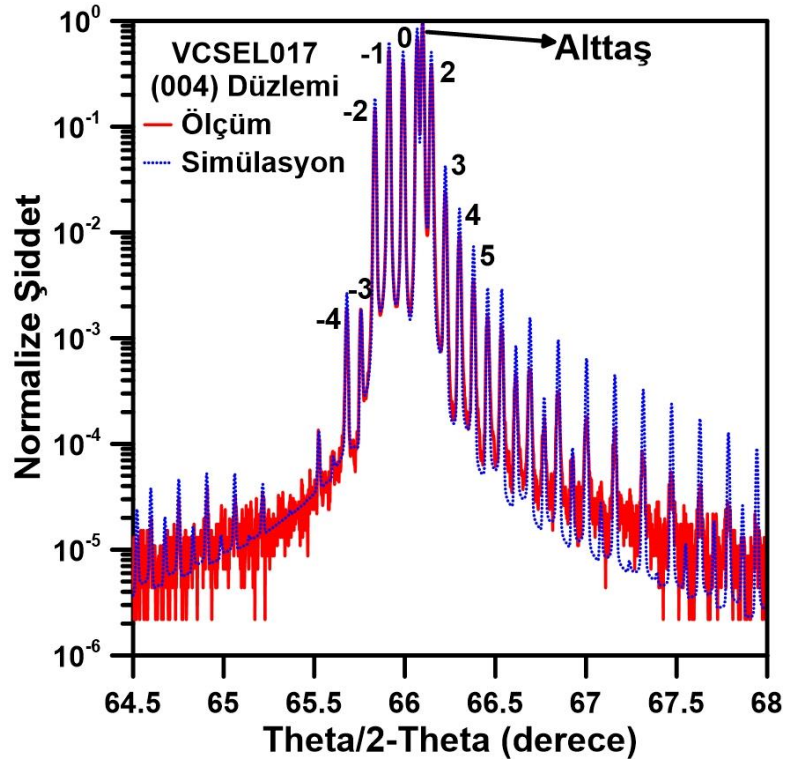


Şekil 6.10 VCSEL017 numaralı büyütme için (224) düzlemi RSM ölçümü.

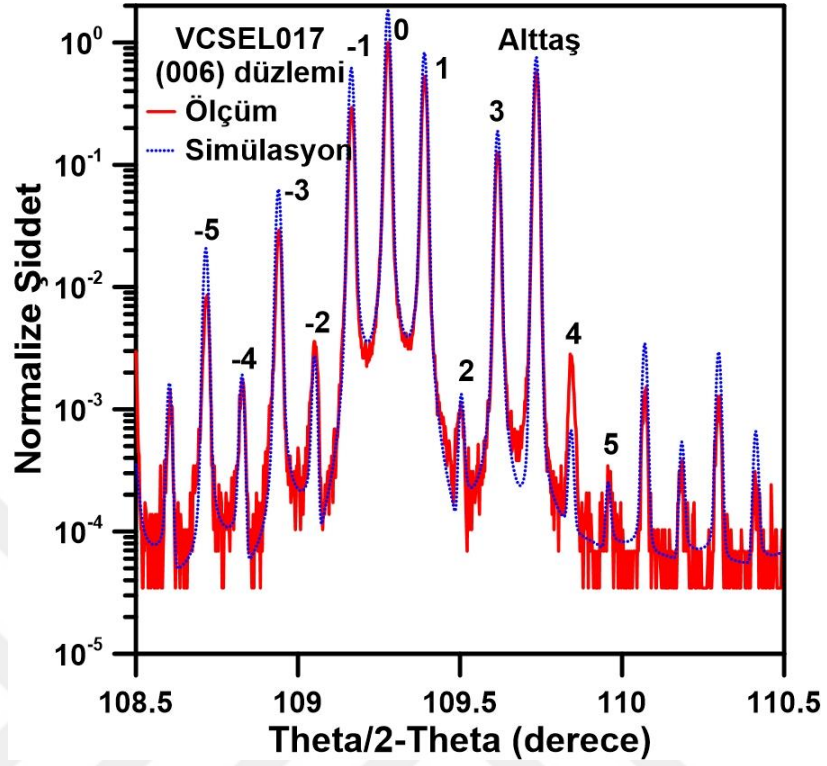
VCSEL017 numaralı büyütmenin düzleme dik doğrultuda yapılan RSM ölçümlerinin hepsinde alttaş ve uydu pikleri aynı  $Q_x$  doğrusu (kırmızı çizgiler) üzerindedir. Aynı  $Q_x$  değeri yapıda herhangi bir eğilme (tilt) olmadığını göstermektedir. Asimetrik (224) düzlemi RSM ölçümü ise kristal yapıda sıfırdan farklı Miller indisleri nedeniyle düzleme dik ve düzlem içi doğrultulardaki kusurlara duyarlıdır. Kristal yapıda meydana gelen gevşeme bu ölçümden hesaplanabilir. VCSEL017 numaralı büyütme (224) düzlemi RSM ölçümünde alttaş ve uydu pikleri yine aynı  $Q_x$  değerindedir. Bu sonuç VCSEL017 numaralı büyütmede herhangi bir gevşeme olmadığı ve gevşemeden kaynaklı kusur bulunmadığını göstermektedir. Uydu piklerinin her RSM ölçümünde görülmesi ise ayrıca kristal kalitesinin iyi olduğunun bir işaretidir. RSM ölçümlerinden elde edilen eğilme ve gevşeme değerleri dinamik x-ışını simülasyonunda kullanılmıştır. VCSEL017 numaralı büyütmede kalınlıkların bulunması ve yapıda meydana gelen gerilme değerlerinin saptanması amacıyla (002), (004) ve (006) düzlemlerinin hepsine dinamik x-ışını simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon programı asimetrik eksenlerin hesaplanmasında yetersiz olduğu için (224) düzleminin sadece  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümü verilmiştir.



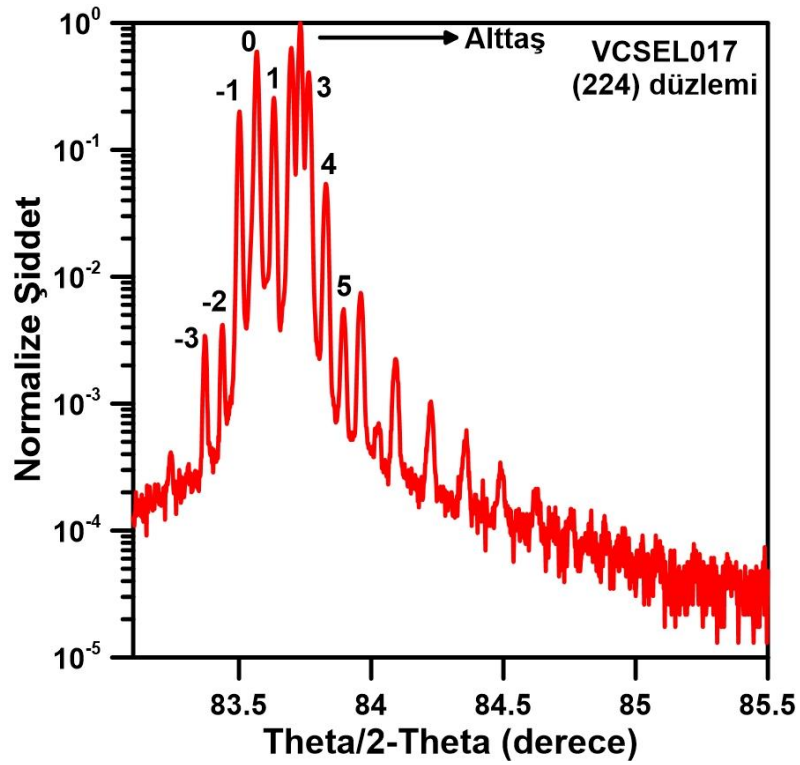
Şekil 6.11 VCSEL017 numaralı büyütmenin (002) düzlemine ait theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.12 VCSEL017 numaralı büyütmenin (004) düzlemine ait theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.13 VCSEL017 numaralı büyütmenin (006) düzlemine ait  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.

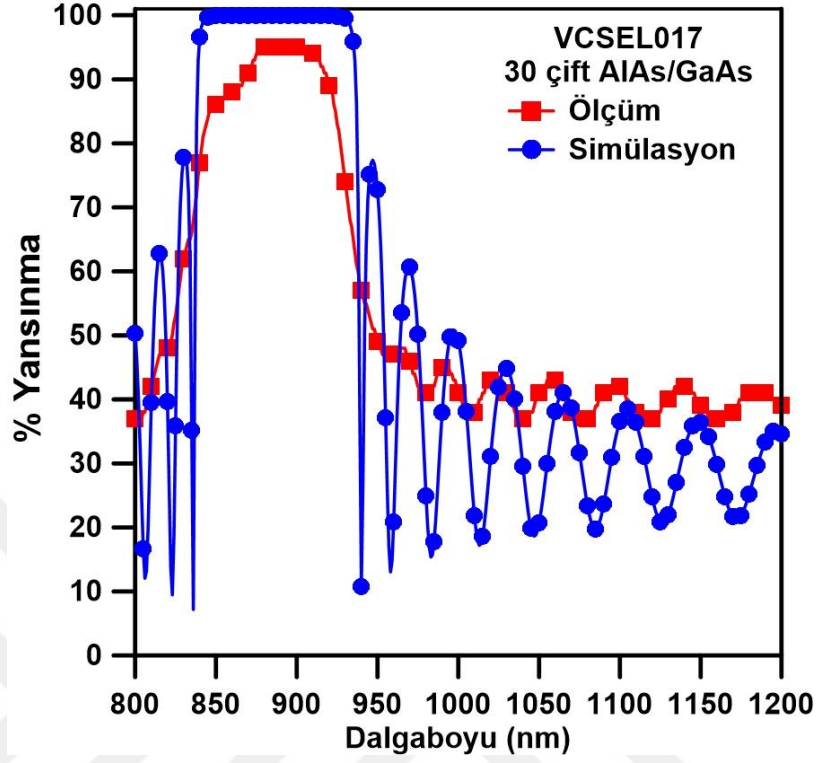


Şekil 6.14 VCSEL017 numaralı büyütmenin (224) düzlemine ait  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümü.

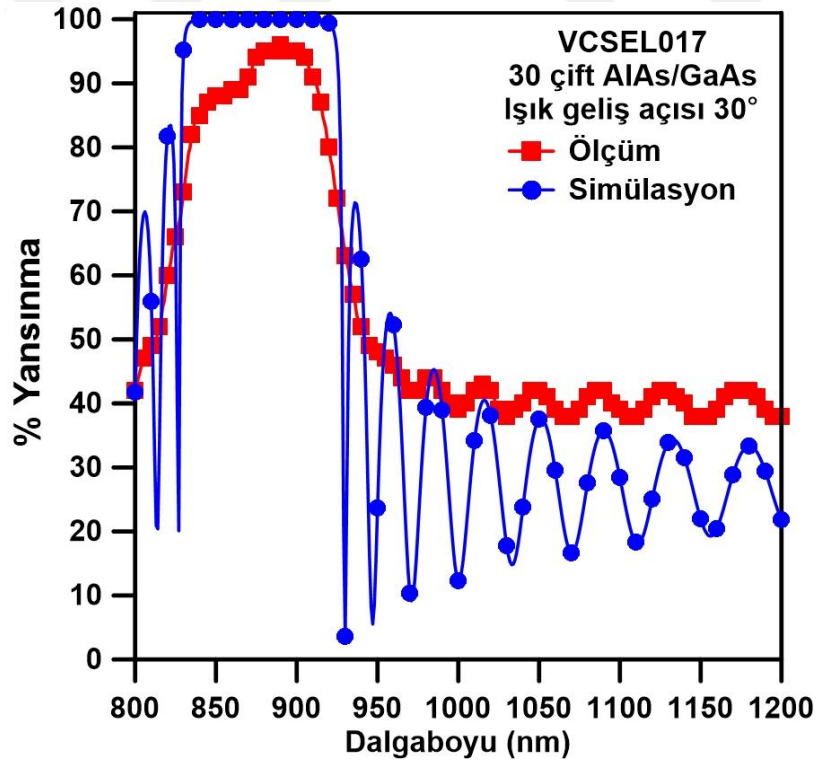
(002) ve (006) düzleminin theta/2-theta ölçümünde uydu pikleri ölçüm aralığının tamamında kristal kalitesinin bir göstergesi olarak açıkça görülmektedir. Önceki bölümlerde açıklandığı üzere uydu pikleri kullanılarak çoklu katmanın bir periyodunun kalınlığının hesaplanması mümkündür. Bunun yanı sıra (004) düzleminin simülasyonundan elde edilen gerilme değerleri yapı faktörünün etkisi nedeni ile daha doğru sonuç vermektedir. Tüm bu sonuçlar Çizelge 6.2’de gösterilmektedir. (004) düzlemine ait theta/2-theta ölçümünde uydu pikleri alttaşın sol tarafında ilk birkaç pik’ten sonra sönümlenmektedir. Bu sonuç bize çoklu katmandaki gerilmenin tek yönlü ve sıkıştırıcı (compressive strain) olduğunu göstermektedir. Dinamik x-ışını simülasyonundan elde edilen kalınlık değerleri yerinde ölçüm sistemi kullanılarak yapılan ölçüm değerlerinden daha düşük elde edilmiştir.

**Çizelge 6.2** VCSEL017 numaralı büyütmenin dinamik x-ışını simülasyonlarından bulunan kalınlık ve gerilme değerleri.

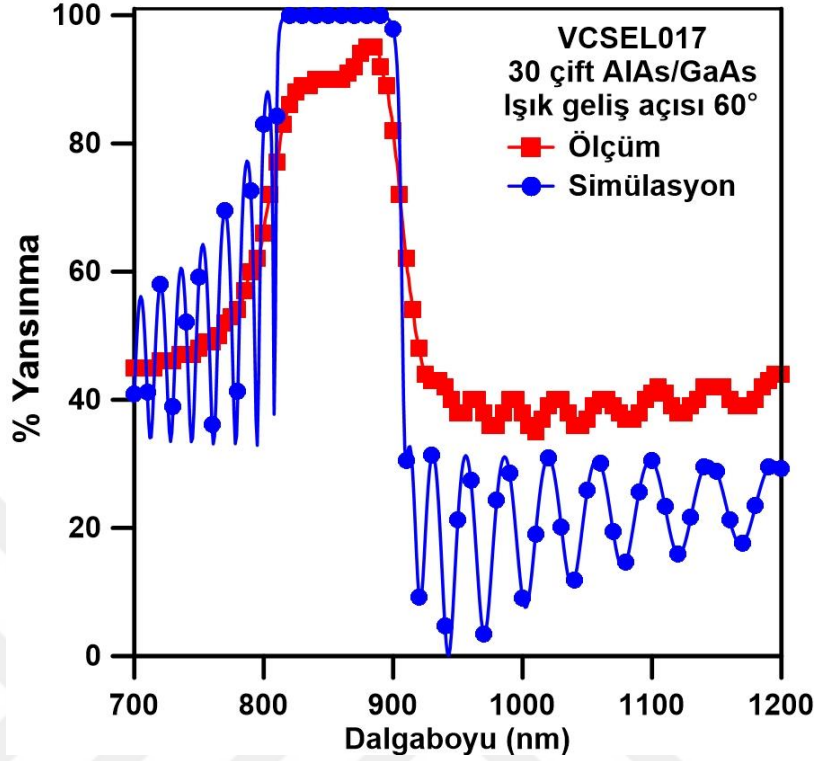
<b>Katman</b>	<b>(002) kalınlık (nm)</b>	<b>(004) kalınlık (nm)</b>	<b>(006) kalınlık (nm)</b>	<b>(002) gerilme %</b>	<b>(004) gerilme %</b>	<b>(006) gerilme %</b>
<b>GaAs</b>	65,0	65,0	65,5	-0,0021	0,0006	-0,0019
<b>AlAs</b>	70,2	70,4	69,7	0,0135	0,0099	0,0123



Şekil 6.15 VCSEL017 yansınma ölçümü ve simülasyonu.



Şekil 6.16 VCSEL017 30°'de yansınma ölçümü ve simülasyonu.

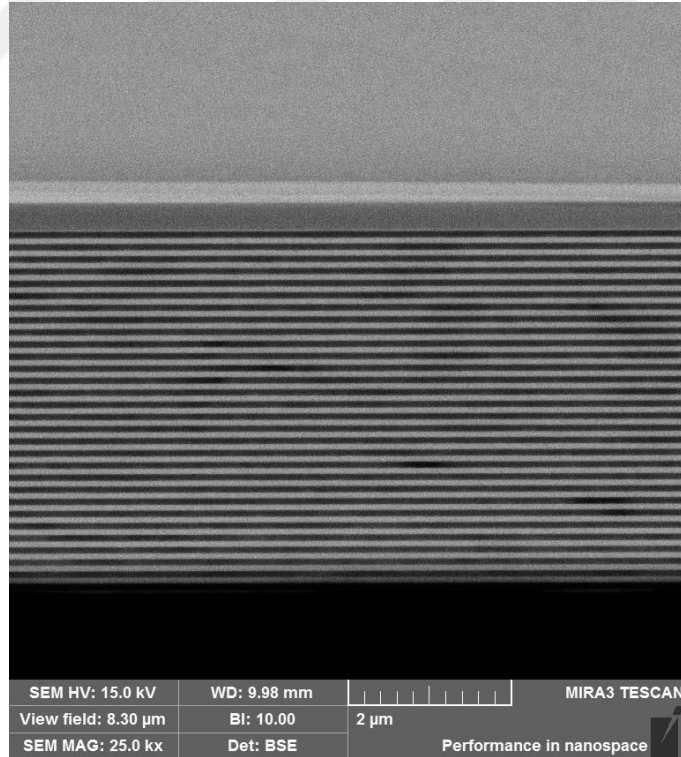


Şekil 6.17 VCSEL017 60°’de yansınma ölçümü ve simülasyonu.

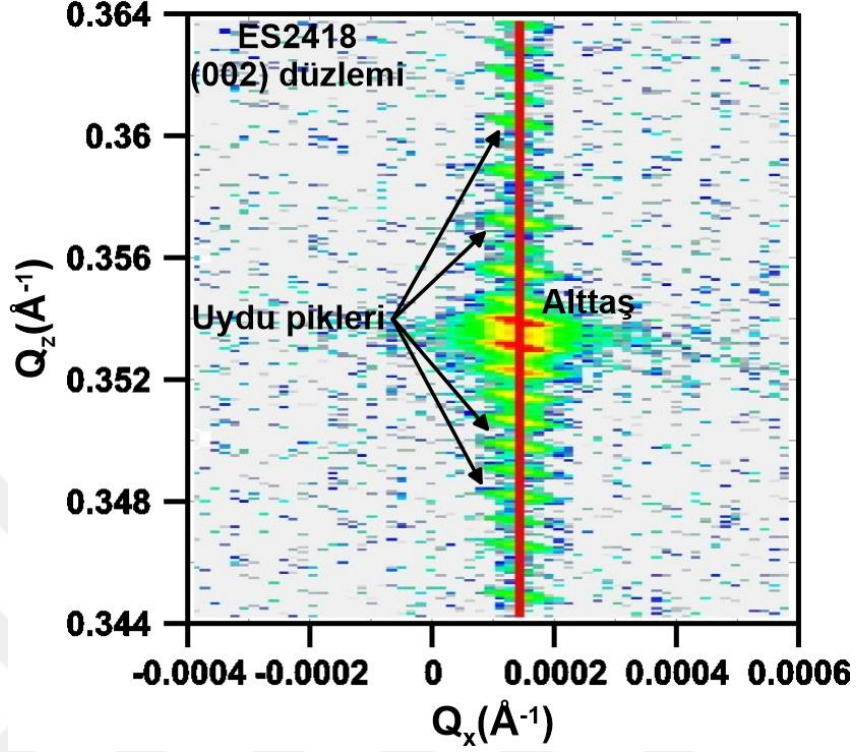
VCSEL017 numaralı büyütmenin Spektrofotometre ile yansınma ölçümleri 0°, 30° ve 60°’de yapılmıştır. Hedeflenen merkez dalgaboyu 980 nm’den daha düşük elde edilmiştir. Bunun yanı sıra (002) düzleminden elde edilen kalınlık değerleri kullanılarak yapılan simülasyonlar her açı değerinde ölçüm ile uyuşmaktadır. Ancak toplam yansınma değerleri teorik hesaplamaların gösterdiği yansınma değerinden periyodik yapının üst katmanlarındaki dalgalanma ve katmalar arası geçişleri yeterince iyi olmaması nedeniyle daha düşük elde edilmiştir. Bunun yanı sıra DBR’nin merkez dalgaboyu GaAs’ın soğurma dalgaboyu 876 nm’ye denk geldiği için bu değerden itibaren GaAs katmanları tarafından soğurma başlamış yansımada sol tarafta yansımada düşüşe neden olmuştur. VCSEL017’de toplam yansınma maksimum %95 olarak elde edilirken simülasyonda %99,99 hesaplanmıştır. Açıya bağlı ölçümlerde ışık geliş açısı artarken DBR dalgaboyu daha düşük dalgaboylarına doğru kaymaktadır. Bu nedenle bant genişliği artan geliş açısında artan soğurma nedeniyle daha da azalmıştır. Elde edilen DBR dalgaboyları MOCVD sistemi yerinde ölçüm sistemi ile yapılan kalınlık analizinde sapma olduğunu göstermektedir. Bu nedenle dinamik x-ışını

simülasyonundan elde edilen kalınlık değerlerinden elde edilen büyütme hızları kullanılarak bundan sonraki büyütme için optimize edilecektir.

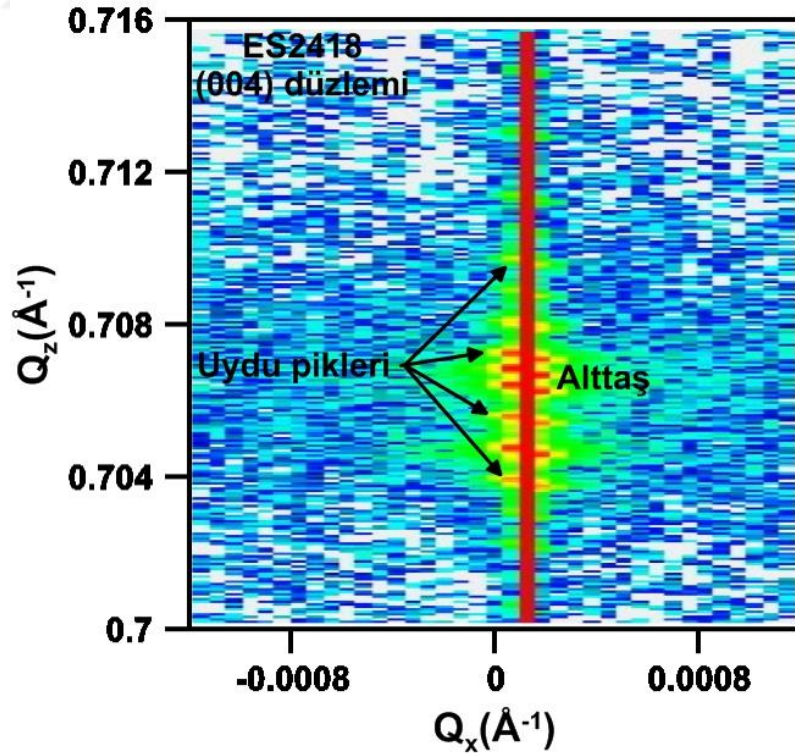
MOCVD büyütmelelerinin yanı sıra doktora tez dönemi sırasında TÜBİTAK 2214/A bursu ile bulunduğum ETH Zürich Ultrahızlı Lazer laboratuvarında bulunan MBE sistemi kullanılarak iki adet DBR büyütmesi yapılmıştır. Bu büyütmele GaAs alttaş üzerine 30 çift AlAs/GaAs çoklu katmanından oluşmaktadır. DBR yapılarından ES2418 numaralı DBR merkez dalgaboyu olarak 980 nm ve ES2929 numaralı DBR için 1030 nm merkez dalgaboyu hedeflenmiştir. VCSEL017 örneğinin karakterizasyonuna benzer olarak SEM, HRXRD ve Spektrofotometre ile yansıma ölçümleri ES2418 ve ES2929 numaralı numuneler için yapılmıştır. SEM görüntüleri ES2418'in her bir katmanının birbirine düzgün bir şekilde paralel olduğunu göstermekte ve üst katmanlarda dahi dalgalanma olmadığını göstermektedir.



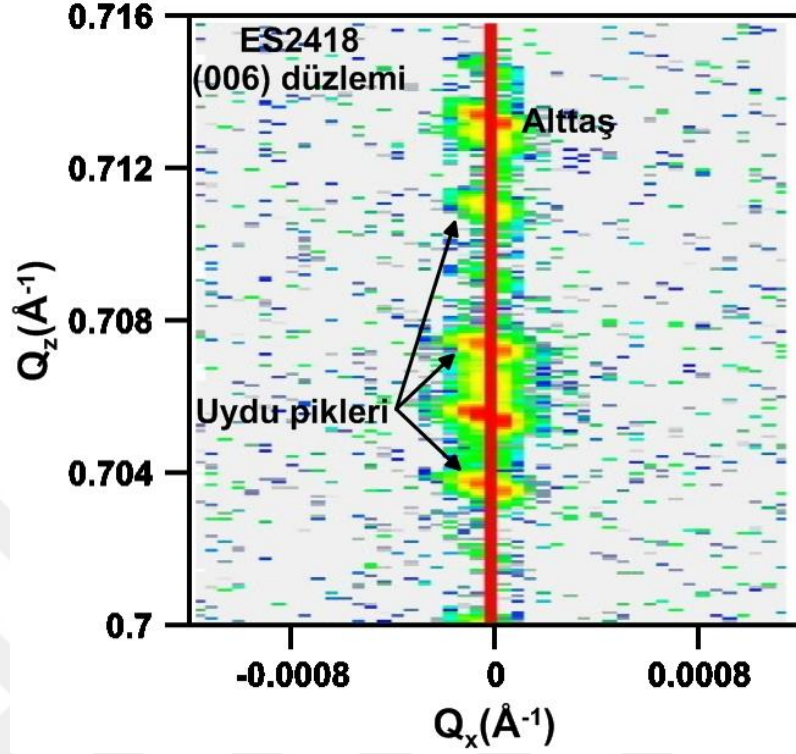
**Şekil 6.18** ES2418 numaralı büyütme için SEM görüntüsü.



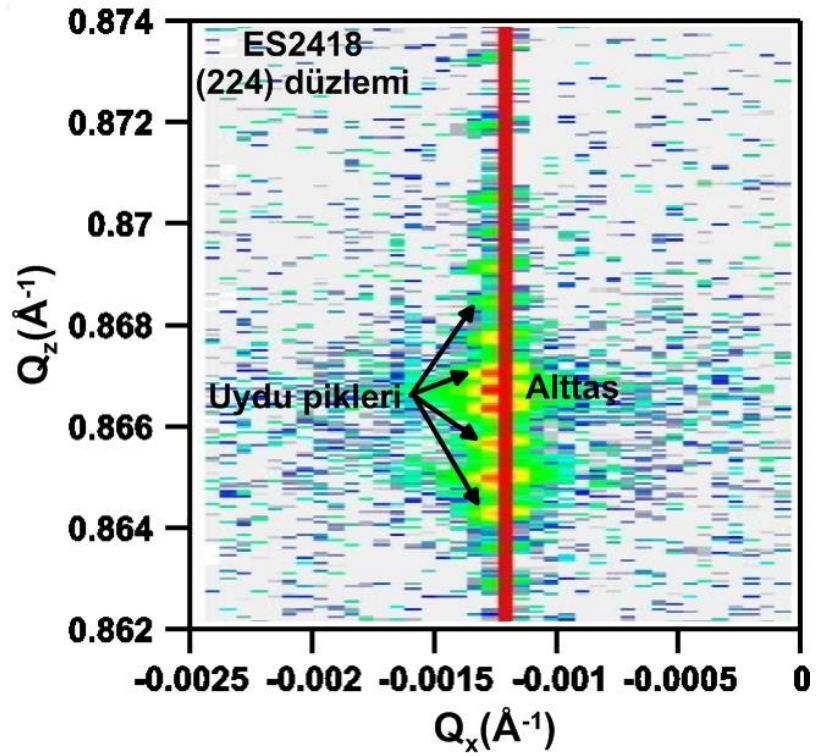
Şekil 6.19 ES2418 numaralı büyütme için (002) düzlemi RSM ölçümü.



Şekil 6.20 ES2418 numaralı büyütme için (224) düzlemi RSM ölçümü.

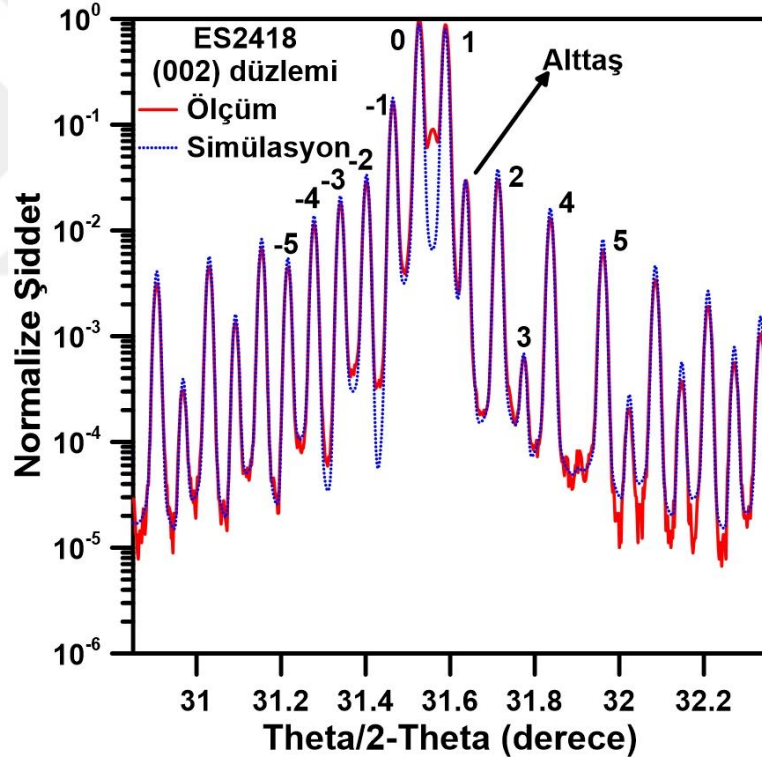


Şekil 6.21 ES2418 numaralı büyütme için (006) düzlemi RSM ölçümü.

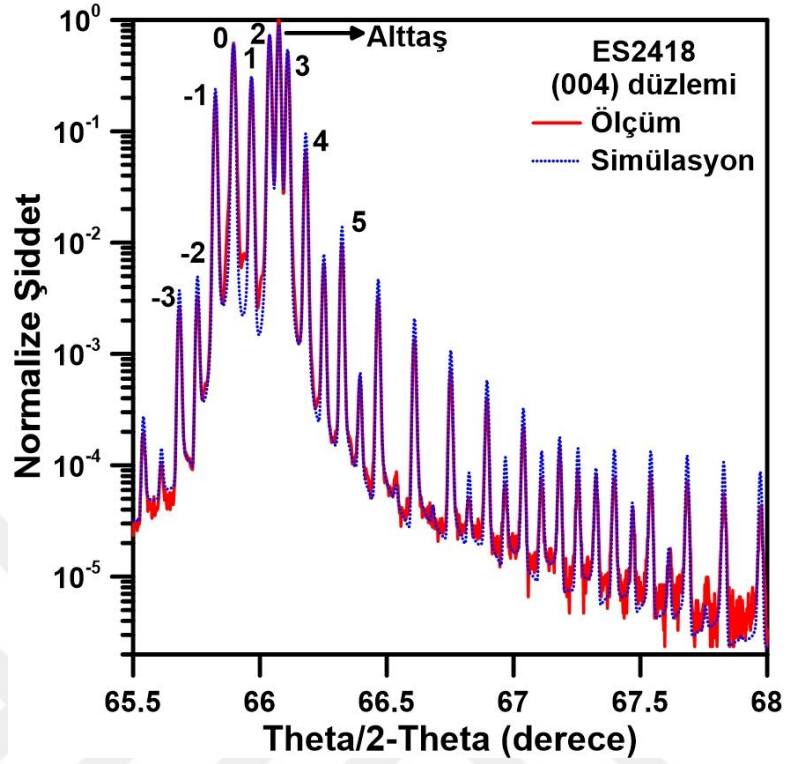


Şekil 6.22 ES2418 numaralı büyütme için (224) düzlemi RSM ölçümü.

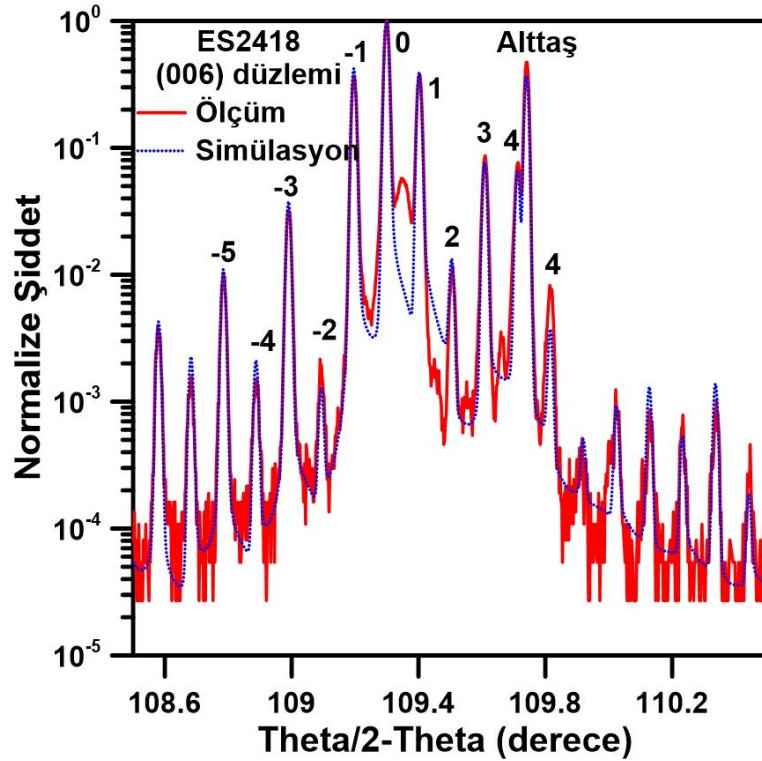
ES2418 numaralı büyütmenin düzleme dik doğrultuda yapılan RSM ölçümlerine göre altaş ile uydu pikleri aynı  $Q_x$  değerindedir. VCSEL017’de olduğu gibi ES2418 numaralı büyütmede de yapıda eğilme görülmemiştir. Bu nedenle asimetric (224) düzlemi RSM ölçümünde eğilme düzeltmesi (tilt correction) yapılmamıştır. (224) düzlemi RSM ölçümünde altaş ile uydu pikleri yine aynı  $Q_x$  değerinde ölçülmüştür ve yapıda gevşeme olmadığı görülmüştür. Tüm RSM ölçümlerinde uydu pikleri açıkça görülmektedir, (004) düzleminde son tarafa uydu piklerinin erken sönümlenmesinin bir nedeni altaş ve 0. pik şiddetlerinin çok yüksek olmasıdır. RSM ölçümlerinden bulunan sonuçlar. kullanarak theta/2-theta ölçümlerinin dinamik x-ışını simülasyonunda kullanılmıştır.



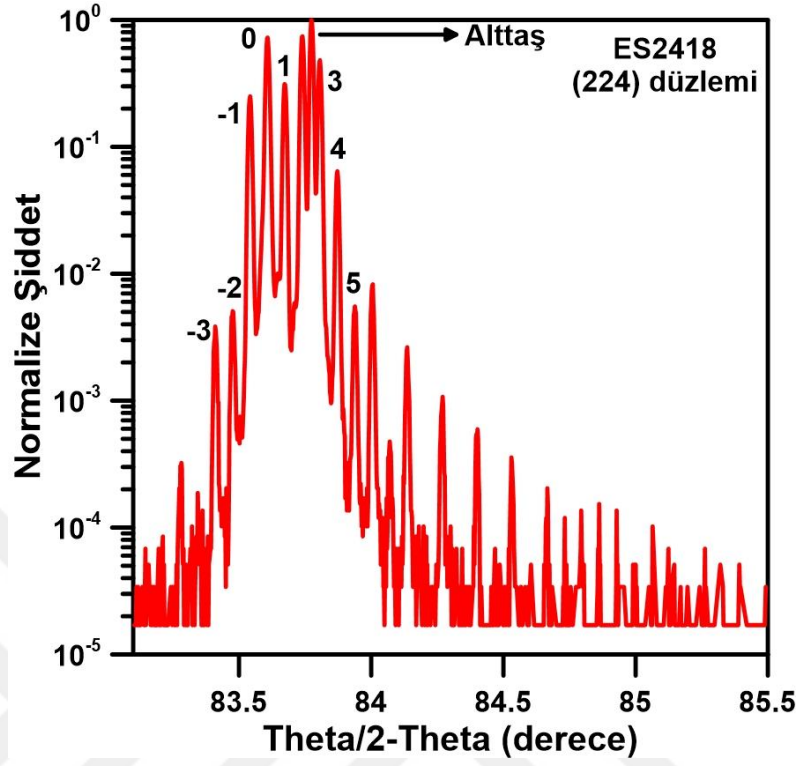
Şekil 6.23 ES2418 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



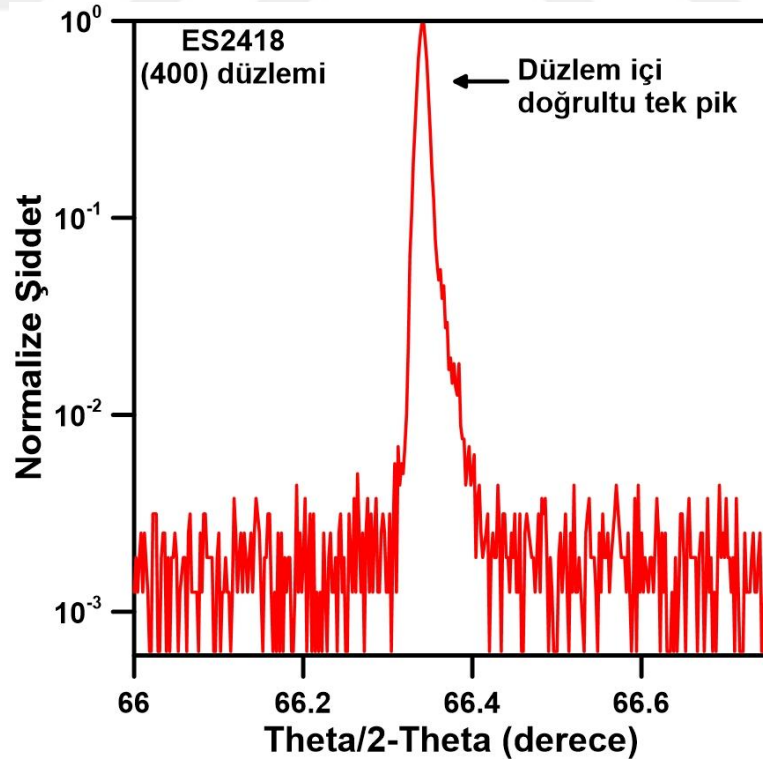
Şekil 6.24 ES2418 numaralı büyütmeye ait (004) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.25 ES2418 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.26 ES2418 numaralı büyütme için (224) düzlemi theta/2-theta ölçümü.



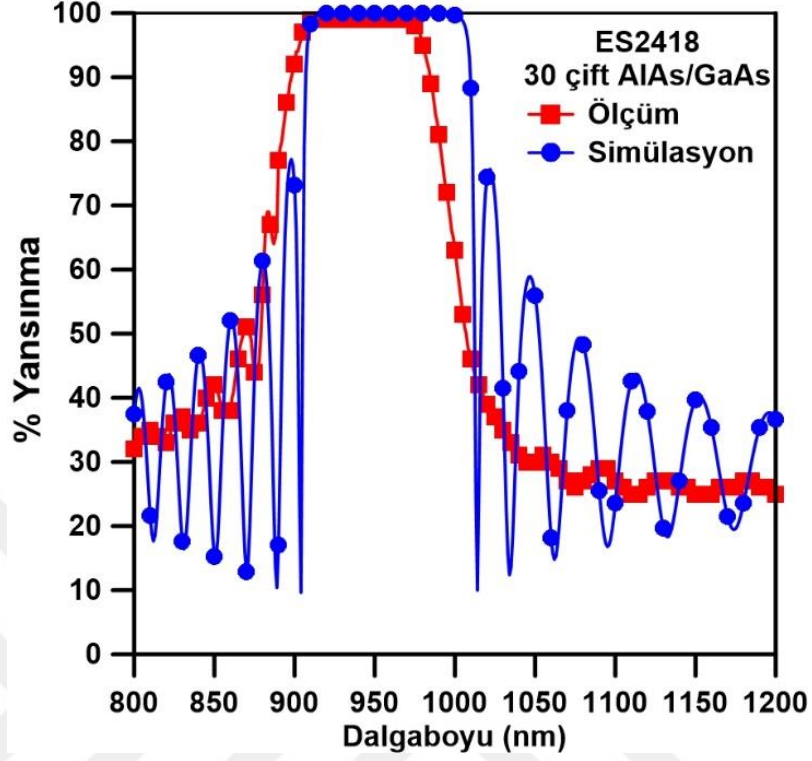
Şekil 6.27 ES2418 numaralı büyütme için (400) düzlemi theta/2-theta ölçümü.

ES2418 numaralı büyütmeye ait dinamik x-ışını simülasyonları aynı parametreler kullanılarak yapılmıştır. Aynı parametreler kullanılarak yapılan simülasyonlar kristal yapıda dikey yöndeki periyodiklikte bir değişimin (gradient) olmadığını göstermektedir. Çoklu katman kalınlıkları için elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olması simülasyonların doğruluğunun bir göstergesidir. Ayrıca elde edilen gerilme değerleri beklenildiği üzere AlAs için sıkıştırıcı, GaAs için ise genişletici olarak bulunmuştur.

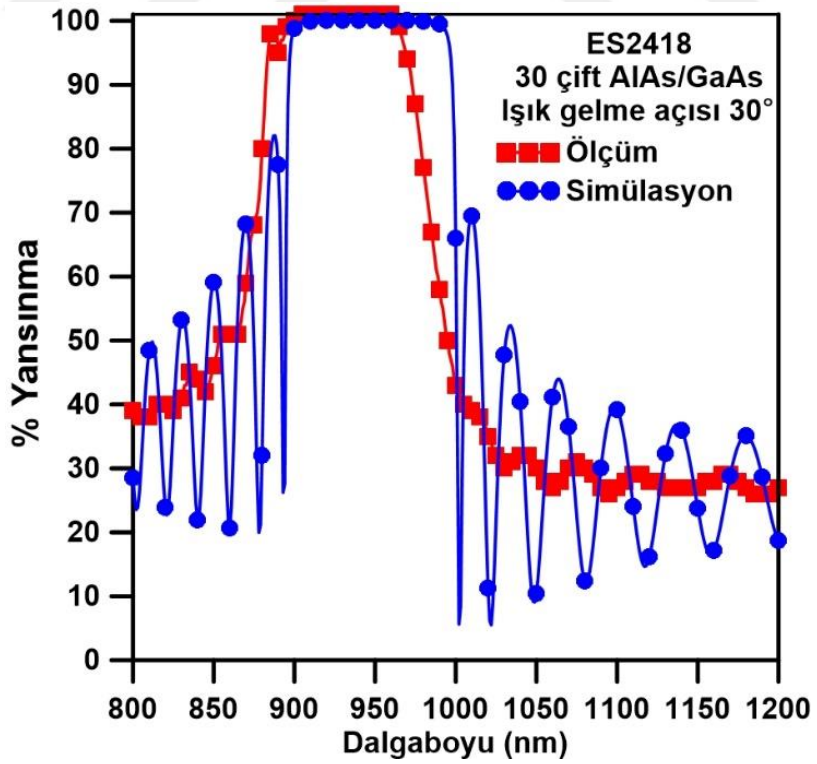
**Çizelge 6.3** ES2418 numaralı büyütmenin dinamik x-ışını simülasyonlarından bulunan kalınlık ve gerilme değerleri.

<b>Katman</b>	<b>(002) kalınlık (nm)</b>	<b>(004) kalınlık (nm)</b>	<b>(006) kalınlık (nm)</b>	<b>(002) gerilme %</b>	<b>(004) gerilme %</b>	<b>(006) gerilme %</b>
<b>GaAs</b>	69,7	69,5	69,0	-0,0010	-0,0021	-0,0026
<b>AlAs</b>	78,0	78,2	78,8	0,0094	0,0097	0,0098

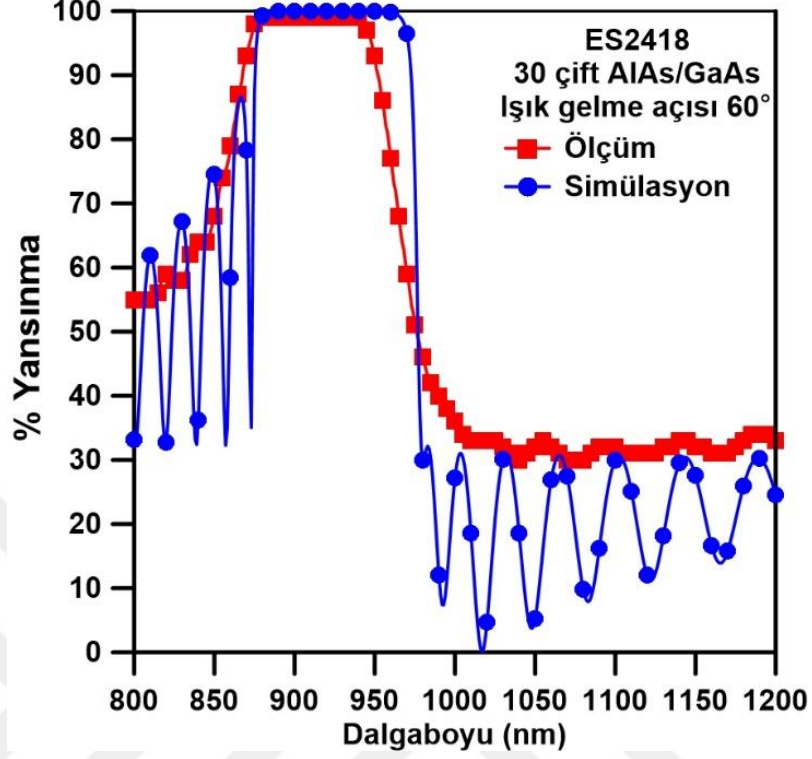
GaAs üzerine büyütülen AlAs için kritik kalınlık  $\sim 488$  nm'dir. 30 çift büyütülen AlAs/GaAs DBR yapısı için toplam AlAs kalınlığı ( $\sim 2,3$   $\mu\text{m}$ ) kritik kalınlığın çok üzerinde olmasına rağmen yapıda herhangi bir gevşeme bulunmamaktadır. Bunun nedeni AlAs'ın GaAs'ın üzerine parça parça büyütülmesinden dolayı yapıda oluşan gerilmenin büyütülen her GaAs katmanı tarafından telafi edilmesi (compensation) edilerek ve gevşemenin tetiklenmemesini önlemesidir. Yapıda gevşemenin olmadığından emin olmak amacıyla düzlem içi doğrultuda (400) düzleminin theta/2-theta ölçümü yapılmış ve düzlem içi doğrultuda yapıda herhangi bir gevşeme olmadığına göstergesi olan tek pik görülmüştür. Bunların yanı sıra simülasyonlardan elde edilen kalınlık değerleri kullanılarak DBR yapısının yansıma simülasyonu yapılmıştır.



Şekil 6.28 ES2418 numaralı numunenin yansınma ölçümü ve simülasyonu.



Şekil 6.29 ES2418 numaralı numunenin 30° de yansınma ölçümü ve simülasyonu.

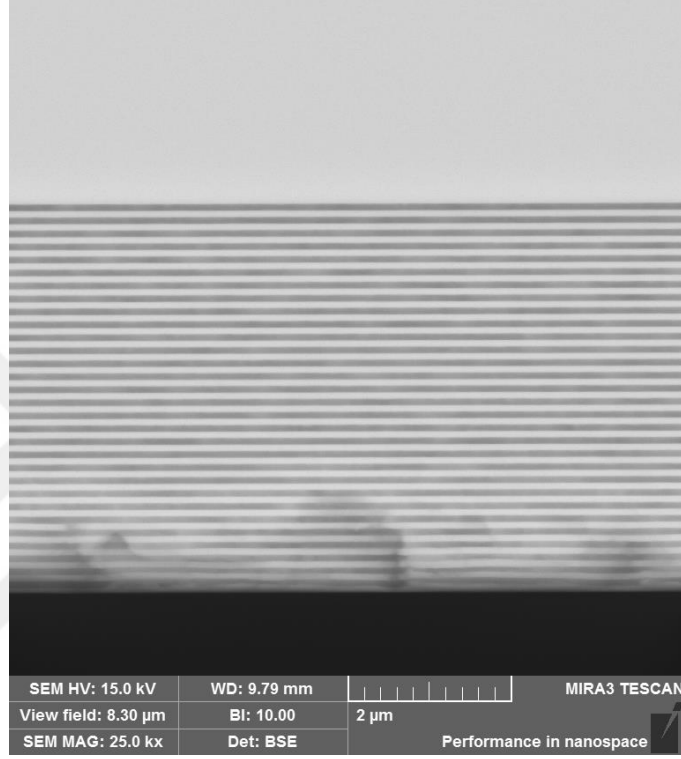


Şekil 6.30 ES2418 numaralı numunenin 60° de yansıma ölçümü ve simülasyonu.

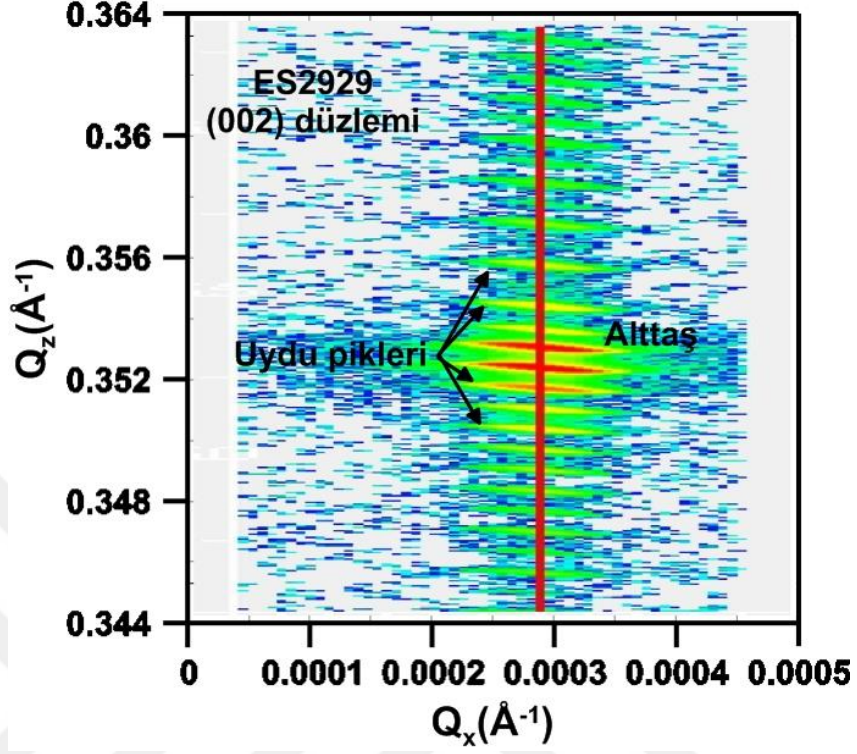
ES2418 numaralı büyütmenin merkez dalgaboyu 960 nm olarak ölçülmüştür. Bant genişliği ise 86 nm'dir. Merkez dalgaboyunda 20 nm'lik bir kayma olmasına rağmen bant genişliği 980 nm'yi kapsamaktadır ve optik pompalı VCSEL için ayna olarak kullanılabilir. Bunun yanı sıra DBR'nin maksimum yansıma değeri %99 olarak ölçülmüş ve simülasyon ile uyumaktadır. Açıya bağlı DBR ölçümlerinde ışığın artan geliş açısı ile DBR merkez dalgaboyunun kısa dalgaboylarına doğru kayması açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra GaAs soğurma dalgaboyundaki dip noktası 30° de görülmektedir.

ES2929 numaralı büyütmede ES2418'e benzer olarak kalınlık değerleri MBE sistemlerinde yerinde ölçüm metodu olarak kullanılan yüksek enerjili elektron kırınım yansıması (Reflection high-energy electron diffraction-RHEED) sistemi kullanılmıştır. 1030 nm merkez dalgaboyuna sahip DBR için kalınlıklar RHEED sistemi ile AlAs ve GaAs için 89,3 ve 75,3 nm olarak büyütülmüştür. Kristal kalitesinin araştırılması

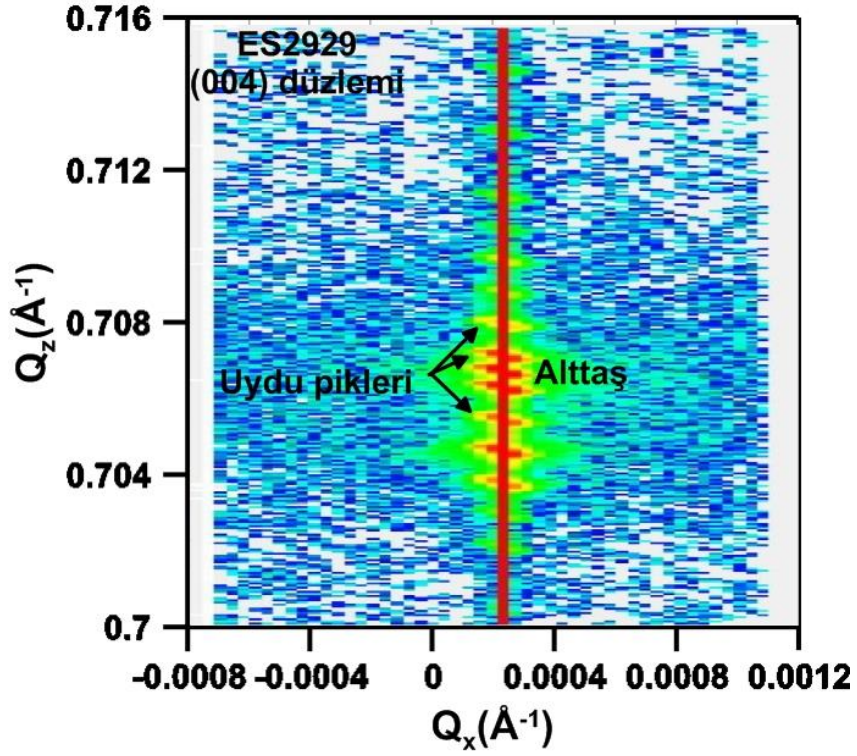
amacıyla ES2929 numaralı büyütme SEM görüntülemesi, RSM ve theta-2/theta ölçümleri yapılmıştır.



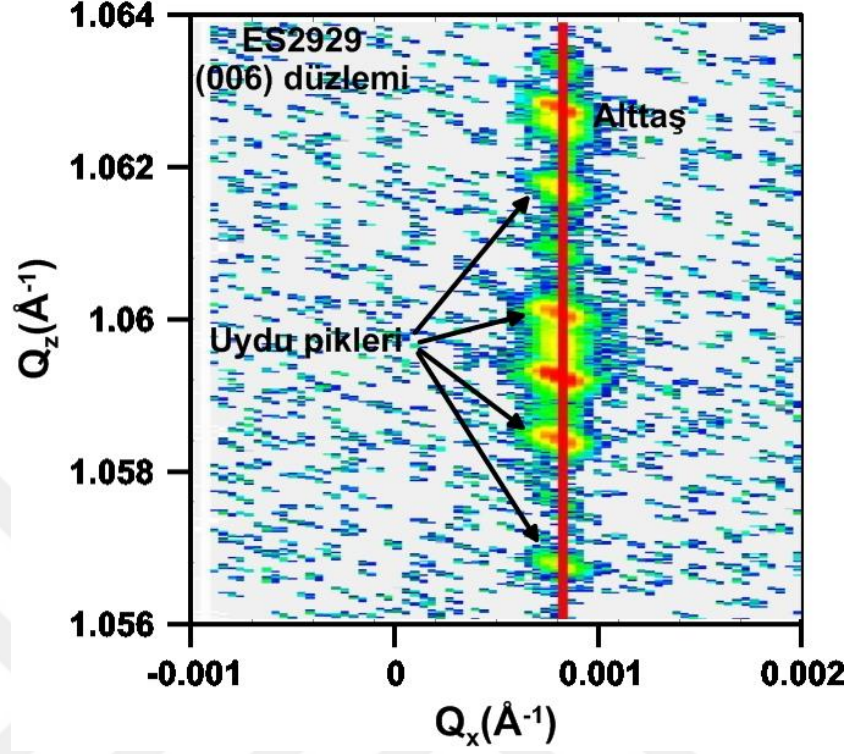
Şekil 6.31 ES2929 SEM görüntüsü.



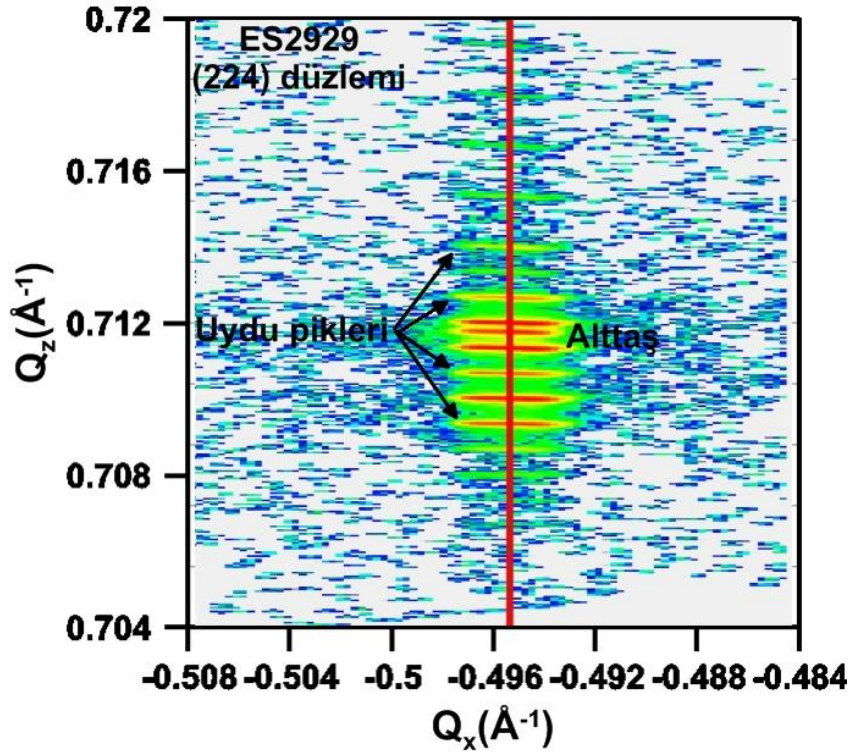
Şekil 6.32 ES2929 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi RSM ölçümü.



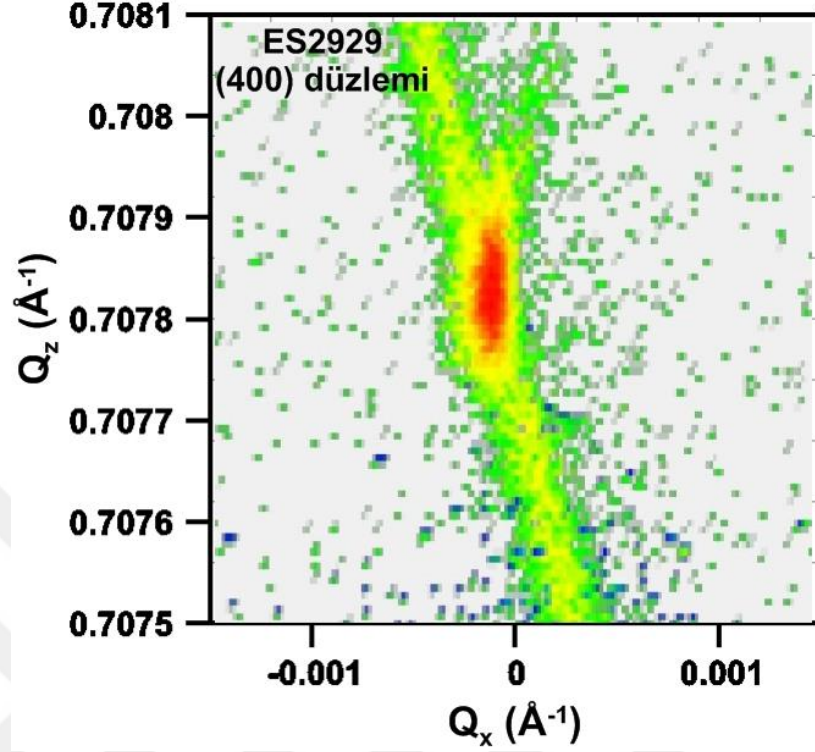
Şekil 6.33 ES2929 numaralı büyütmeye ait (004) düzlemi RSM ölçümü.



Şekil 6.34 ES2929 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi RSM ölçümü.

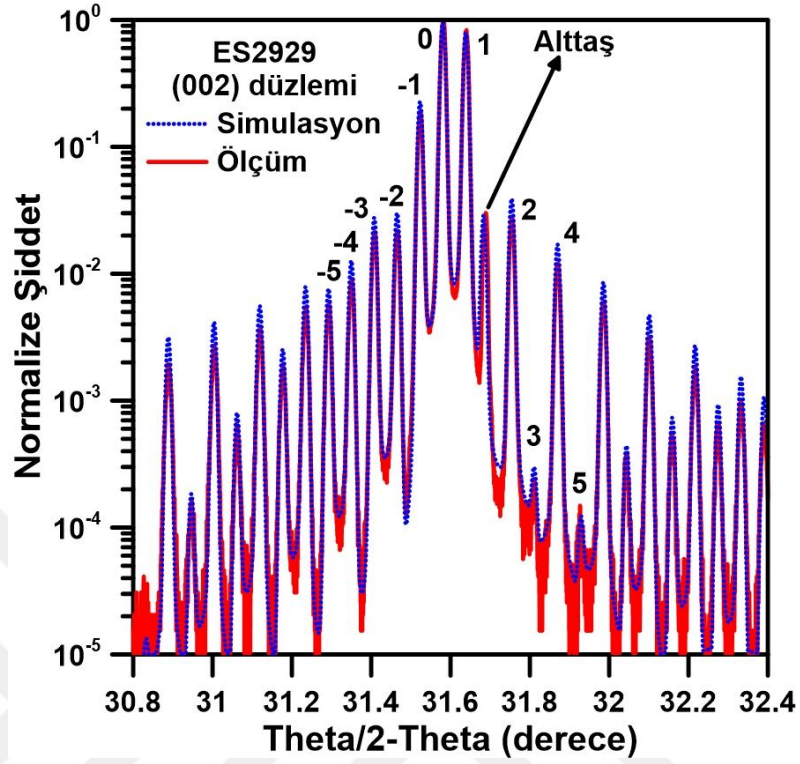


Şekil 6.35 ES2929 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi RSM ölçümü.

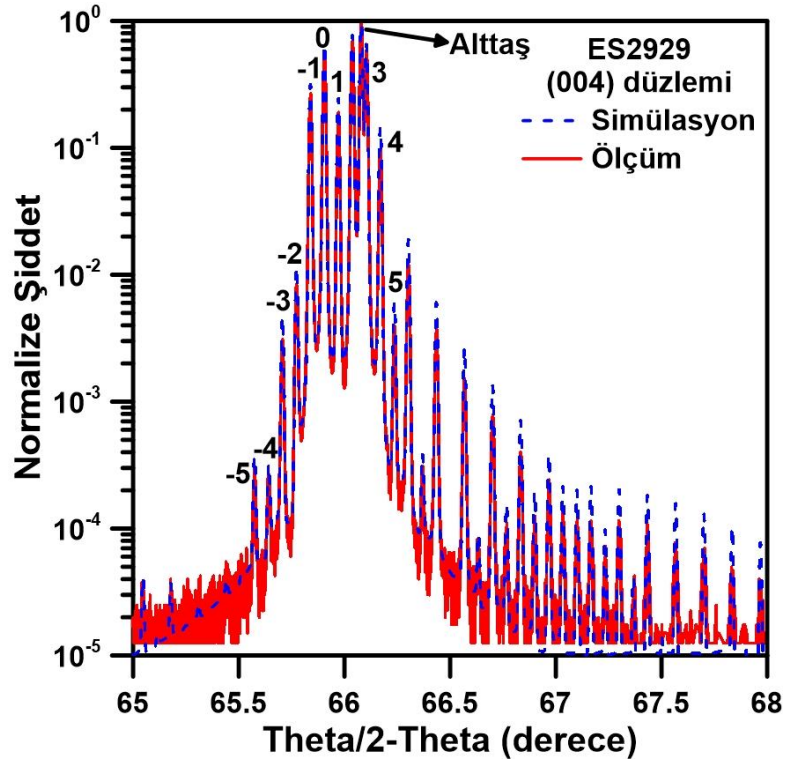


Şekil 6.36 ES2929 numaralı büyütme için (400) düzlemi RSM ölçümü.

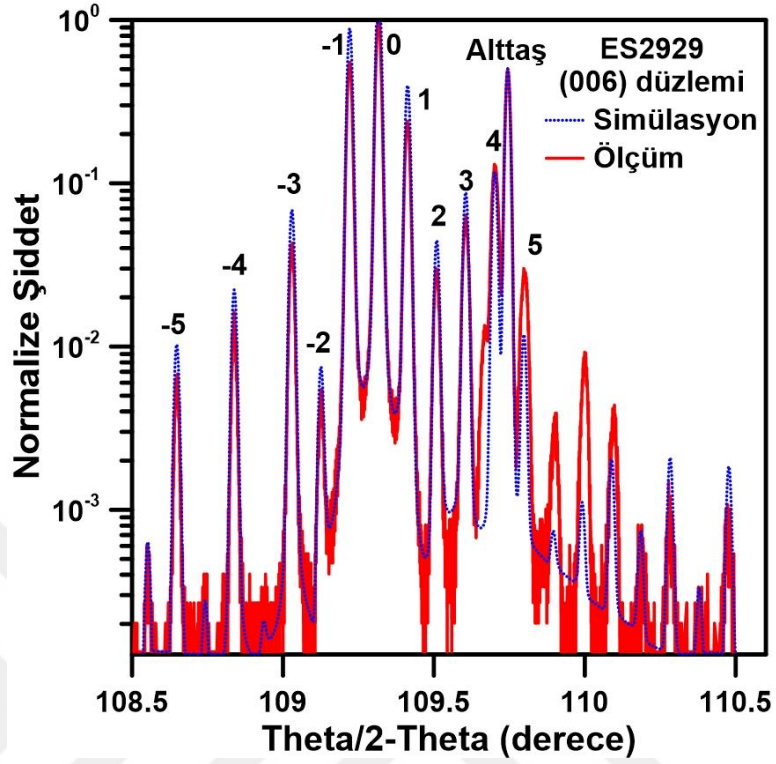
RSM ölçümlerinde diğer örneklerle benzer olarak alttaş ve uydu pikleri aynı  $Q_x$  değerlerinde ölçülmüştür ve yapılarda herhangi bir eğilme gözlenmemiştir. Bunun yanı sıra (224) ve (400) asimetrik ve düzlem içi doğrultularda yapılan RSM ölçümlerinde yapıda bir gevşeme gözlenmemiştir.



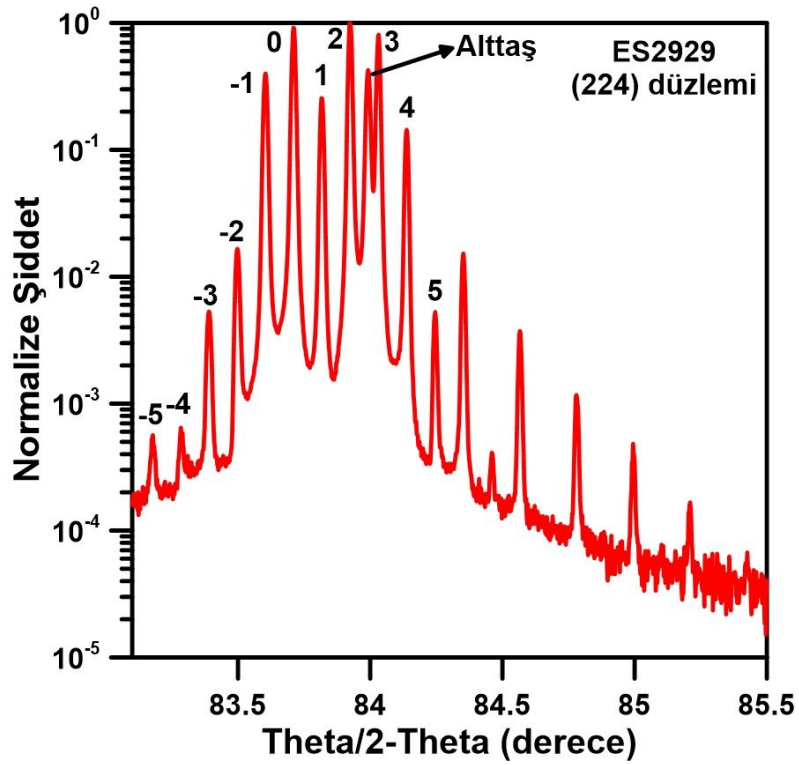
Şekil 6.37 ES2929 numaralı büyütme için (002) düzlemi  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



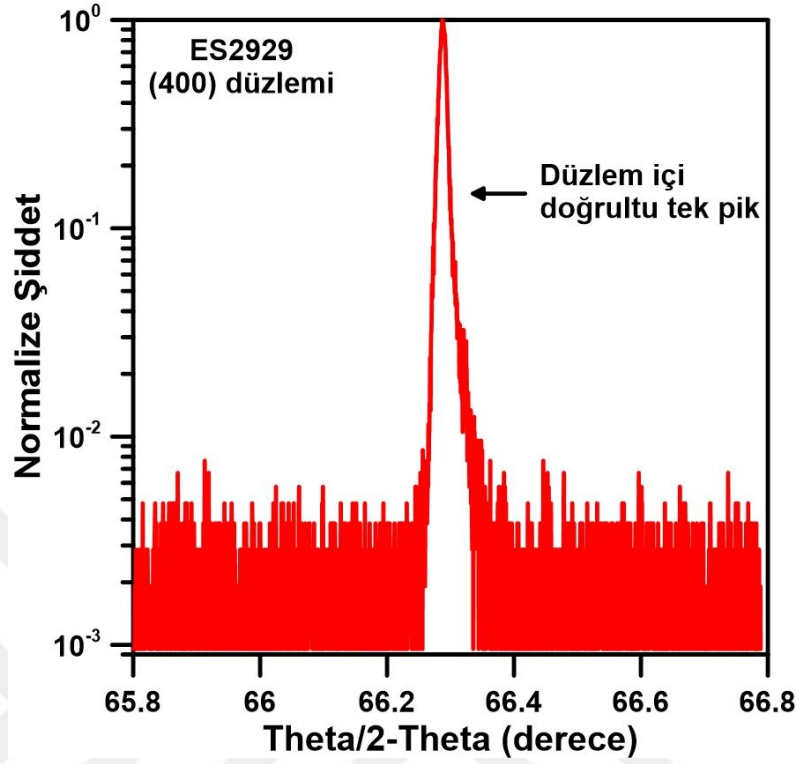
Şekil 6.38 ES2929 numaralı büyütme için (004) düzlemi  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.39 ES2929 numaralı büyütme için (006) düzlemi  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.40 ES2929 numaralı büyütme için (224) düzlemi  $\theta/2$ - $\theta$  ölçümü.

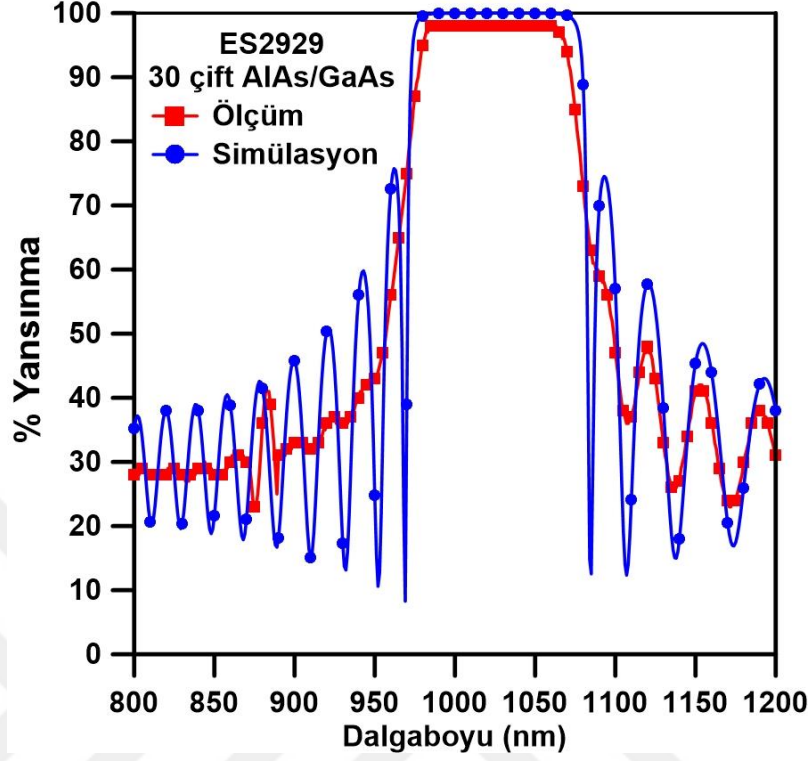


Şekil 6.41 ES2929 numaralı büyütme için (400) düzlemi theta/2-theta ölçümü.

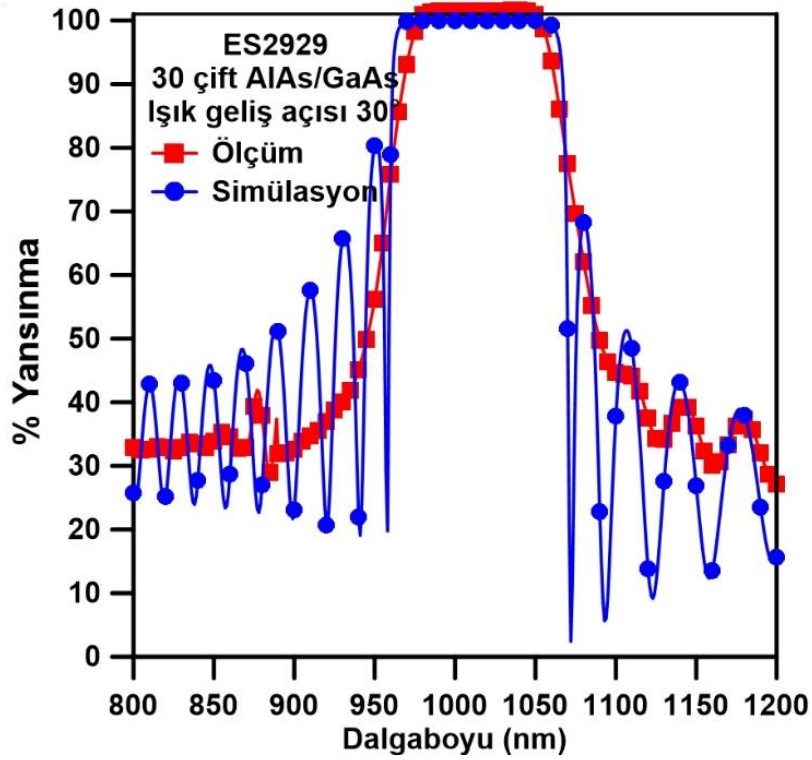
ES2929 numaralı numunenin simülasyonları VCSEL017 ve ES2418 numaralı büyütme için benzer olarak aynı simülasyon değerleri ile yapılmıştır ve dikey yöndeki periyodiklikte bir değişimin olmadığı gösterilmiştir. (004) düzlemi doğrultusundaki theta/2-theta ölçümünde kristal kalitesinin göstergesi olarak -4 ve -5. uydu pikleri açıkça görülmektedir. 1030 nm merkez dalgaboyuna sahip DBR yapısındaki katman kalınlıkları 980 ve 960 nm merkez dalgaboyuna sahip DBR'lerden daha kalın olmasına rağmen (004) düzleminde görülebilir olan -4 ve -5. uydu pikleri kristal kalitesinin diğer iki DBR yapısına göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.4 ES2929 numaralı büyütmenin dinamik x-ışını simülasyonlarından bulunan kalınlık ve gerilme değerleri.

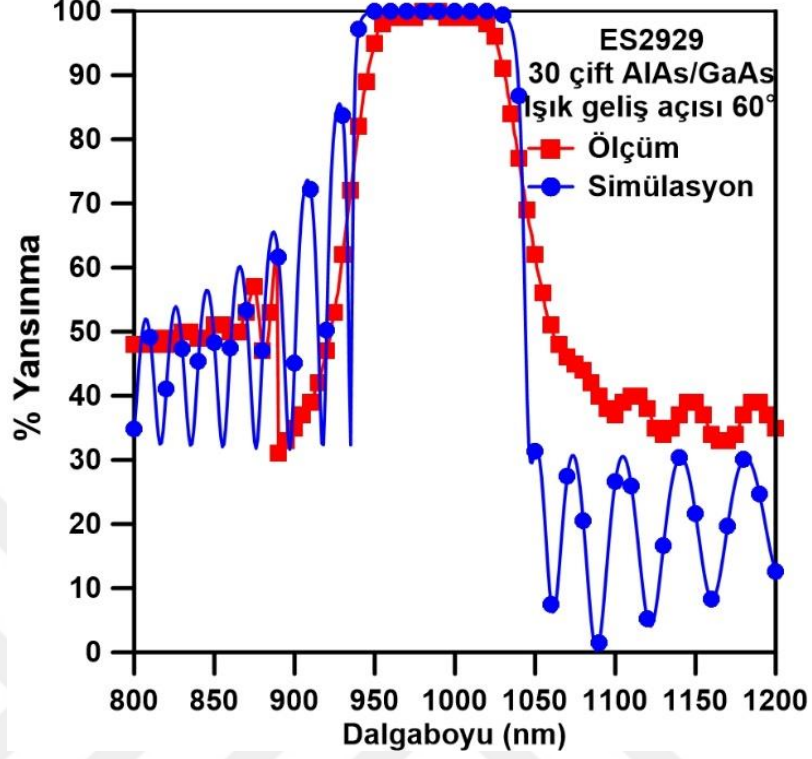
Katman	(002) kalınlık (nm)	(004) kalınlık (nm)	(006) kalınlık (nm)	(002) gerilme %	(004) gerilme %	(006) gerilme %
GaAs	75,1	75,0	75,4	-0,0047	-0,0005	-0,0003
AlAs	83,7	84,0	83,4	0,0047	0,0092	0,0099



Şekil 6.42 ES2929 numaralı numunenin yansınma ölçümü ve simülasyonu.



Şekil 6.43 ES2929 numaralı numunenin 30° de yansınma ölçümü ve simülasyonu.



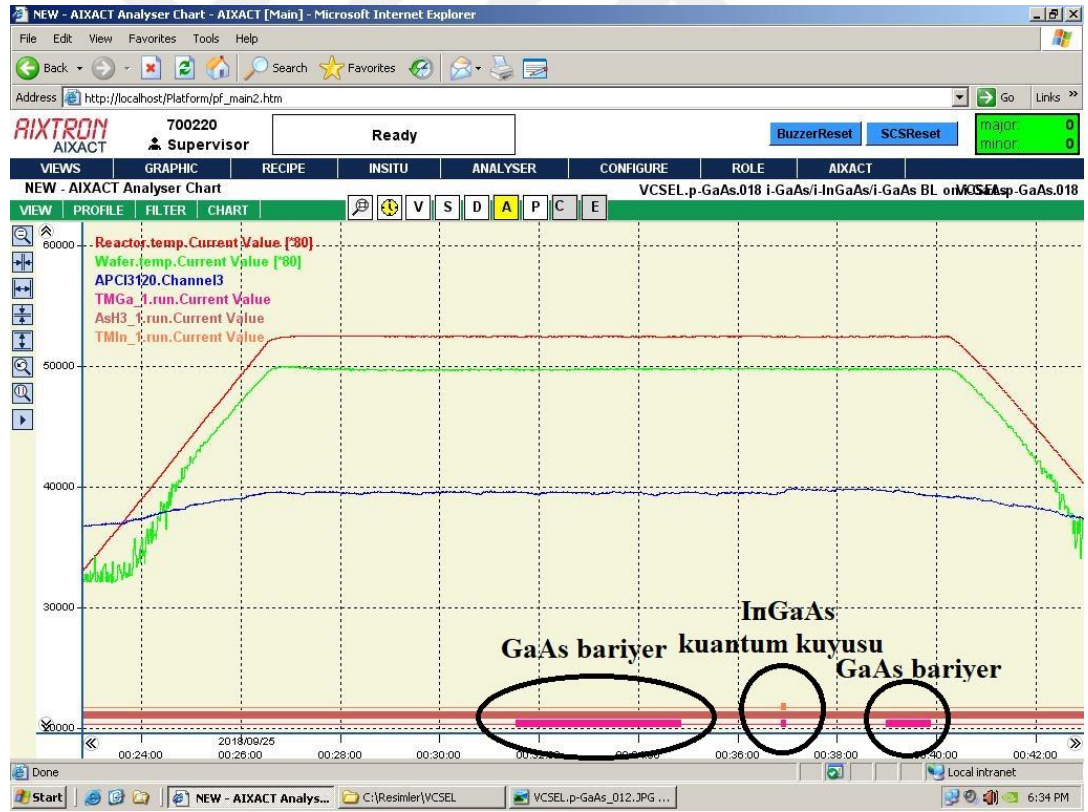
Şekil 6.44 ES2929 numaralı numunenin 60° de yansıma ölçümü ve simülasyonu.

Dinamik x-ışını simülasyonundan elde edilen kalınlıklar kullanılarak yapılan yansıma simülasyonlarında DBR merkez dalgaboyları ölçümler ile birebir örtüşmüştür. Bunun yanı sıra düşük yansıma değerlerindeki yansıma osilasyonları da kalınlıkların tam olarak belirlenmesinden dolayı yansıma simülasyonundan ortaya çıkan osilasyonlarla örtüşmektedir. 30 çift AlAs/GaAs DBR yapısı için teorik yansıma %99,99 olarak hesaplanmaktadır. Ölçüm sonucunda elde edilen maksimum yansıma ise %98'dir. Yaklaşık %2'lik kaybın DBR yapısındaki kristal kusurlarından, AlAs ile GaAs arasındaki katman geçişlerinin mükemmel olmamasından ve serbest taşıyıcı soğurmasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra SEM görüntüsünde E2929 numaralı numunenin son birkaç periyodik katmanında dalgalanma olduğu görülmektedir. Maksimum yansımadaki düşmenin etkin ayna uzunluğuna bağlı olarak bu katmanlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, açılı geliş açılarından dalgaboyundaki kaymaya rağmen maksimum yansıma değerinde artış olmuş ve %99 yansıma elde edilmiştir. 60° derece gelme açısında merkez dalgaboyu yaklaşık olarak ~986 nm civarındadır. Açıya bağlı ölçümler geliş açısına bağlı olarak aynı materyal

grubu kullanılarak düşük dalgaboyu uygulamalarının mümkün olduğunu göstermektedir.

### 6.3. Kuantum Kuyusu Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

Optik pompalı VCSEL yapılarında alttaş üzerine büyütülen aynayı lazer ışınımının üretildiği aktif bölge takip eder. VCSEL yapılarında aktif bölgede bulunan kuantum bariyer ve kuantum kuyusunun kalınlığının ışımının maksimum olması için en az ışım dalgaboyunun yarısı yada tam katları olmalıdır. Kuantum kuyusu ise üretilen ışımın maksimum olması için elektrik alan şiddetinin maksimum olduğu nokta olan kuantum kuyusunun tam ortasında olmalıdır.

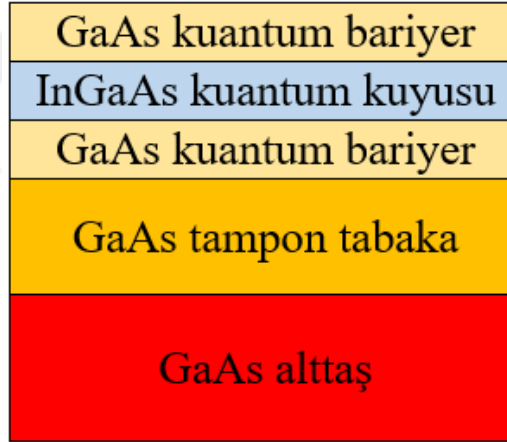


Şekil 6.45 VCSEL018 numaralı büyütmeye ait ekran görüntüsü.

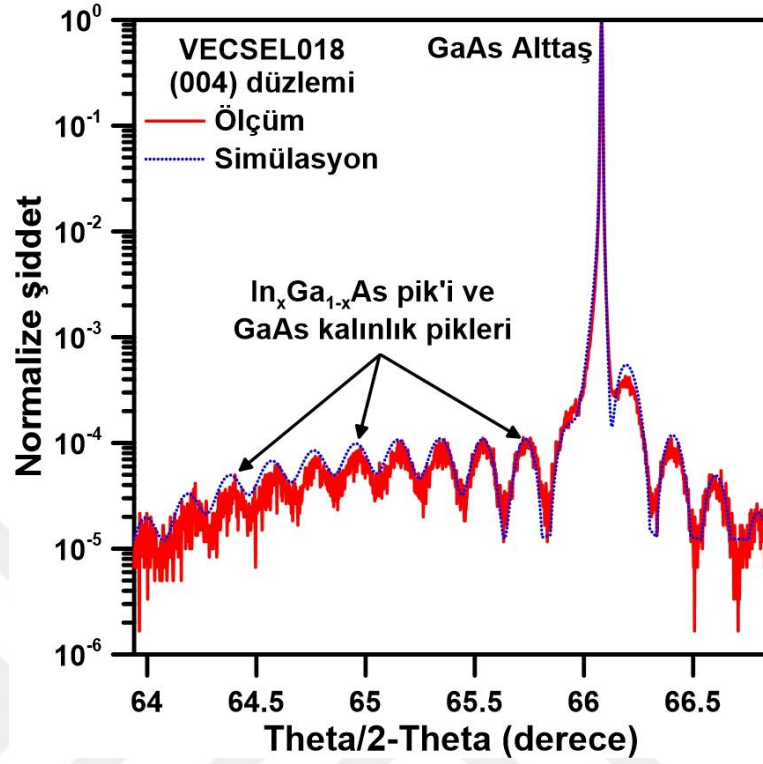
Tam bir optik pompalı VCSEL büyütmesi yapmadan önce InGaAs/GaAs kuantum kuyusu ve kuantum bariyeri büyütülerek ışım dalgaboyu optimize edilmelidir. Bu

amaçla VCSEL018 numaralı tek kuantum kuyusu büyütülmesi yapılmıştır. VCSEL018 GaAs alttaş üzerine tampon tabaka, 50 nm kuantum bariyer, 8 nm InGaAs ve 50 nm GaAs büyütülmüştür.

VCSEL018 numaralı büyütmede GaAs katmanları için VCSEL015 numaralı büyütmedeki gaz akış ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. InGaAs katmanı için ise galyum kaynak akış değeri 14 sccm, indiyum kaynak akış değeri 64 sccm ve V/III oranı 83 olarak ayarlanmıştır. Büyütmenin ardından kuantum kuyusunun kristal kalitesi, indiyum alaşım oranı ve ışınım dalgaboyunun belirlenmesi amacıyla HRXRD ve PL ölçümü yapılmıştır. HRXRD ölçümü kullanılarak dinamik x-ışını simülasyonu yapılmış GaAs ve InGaAs kalınlıkları belirlenmiştir.

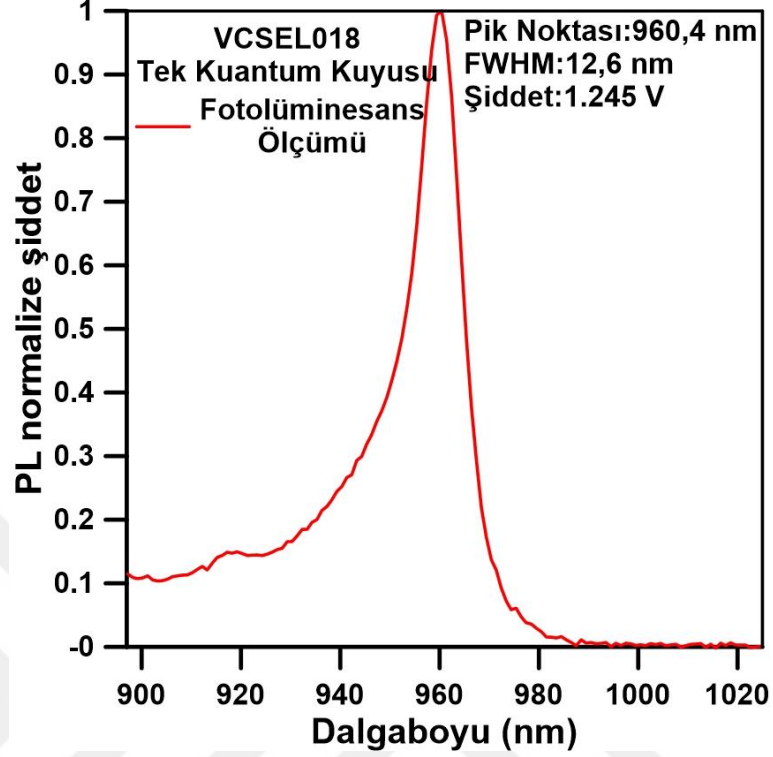


**Şekil 6.46** VCSEL018 numaralı büyütme yapısı.



Şekil 6.47 VCSEL018 numaralı büyütme (004) düzlemi HRXRD taraması ve dinamik x-ışını simülasyonu.

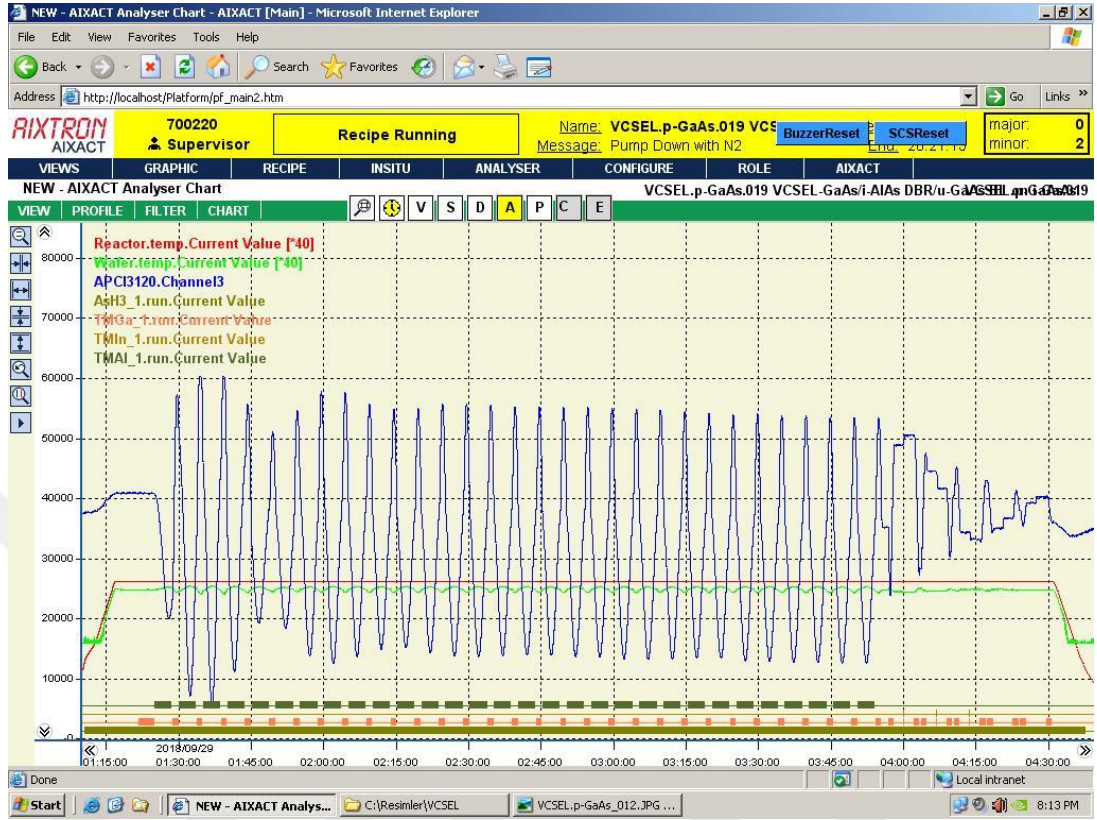
HRXRD ölçümünde en üst katmandaki GaAs'a ait kristal kalitesinin göstergesi olan kalınlık pikleri açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra ince InGaAs'a ait geniş pik bulunmaktadır. Dinamik x-ışını simülasyonunda indiyum alaşım oranı %14,66 ve kuantum kuyusu kalınlığı 7,7 nm olarak bulunmuştur. Yapının en üst katmanı olan kuantum bariyeri ise 50 nm olarak hesaplanmıştır. VCSEL017 numaralı DBR büyütmesinden elde edilen büyütme hızları kullanılarak bu katmanın büyütme süresi hesaplanmış ve kalınlıklar beklendiği gibi elde edilmiştir. Kuantum kuyularında ışınım dalgaboyu temel olarak kuantum kuyusu genişliğine (kuyu kalınlığı) ve derinliğine (indiyum alaşım oranına) bağlıdır. Büyüttüğümüz kuantum kuyusunun ışınım dalgaboyu PL ölçümü ile belirlenmiştir. PL ölçümünde ışınım dalgaboyu 960,4 nm'de elde edilmiş ve ışınımaya ait yarı yükseklikteki genişlik (FWHM) 12,6 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.48 VCSEL018 tek kuantum kuyusuna ait PL ölçümü.

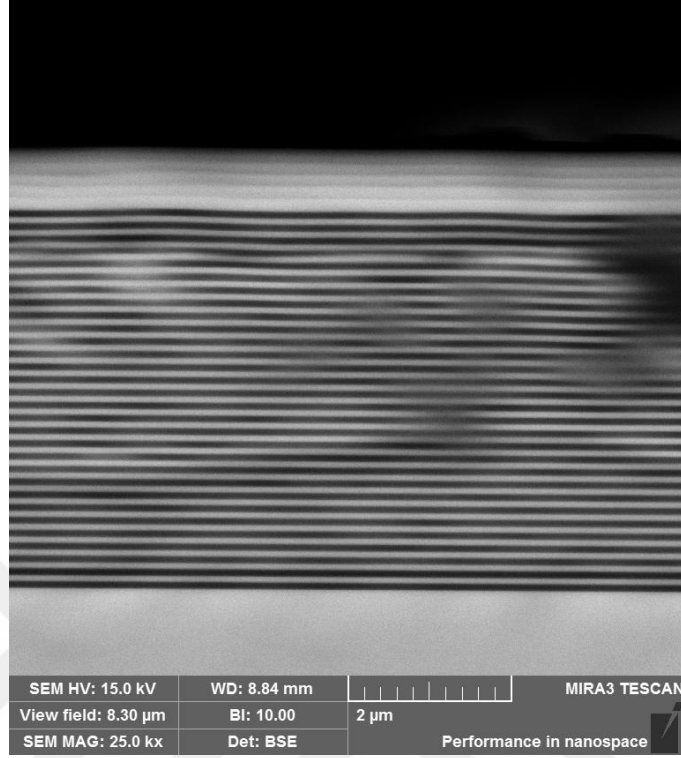
#### 6.4. Lazer Yapılarının Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

DBR katmanlarına ait kalınlıkların bulunması ile büyütme sürelerinin optimizasyonu tamamlanmıştır. Bununla birlikte kuantum kuyusuna ait indiyum alaşım oranı, ışınım dalgaboyu ve kalınlığın belirlenmesinin ardından MOCVD sistemi kullanılarak optik pompalı VCSEL yapısı büyütülmüştür. Ayrıca ES2418 numaralı DBR yapısı üzerine aktif bölge büyütmesi yapılmış ve ikinci bir VCSEL yapısı elde edilmiştir. VCSEL yapıları 30 çift AlAs/GaAs DBR ve 5 tekrar InGaAs/GaAs kuantum kuyusundan oluşmaktadır. VCSEL018 numaralı büyütmede elde edilen ışımının şiddetinin artırılması amacıyla kuantum kuyusu sayısı artırılmıştır.



Şekil 6.49 VCSEL019 numaralı büyütme için ekran görüntüsü.

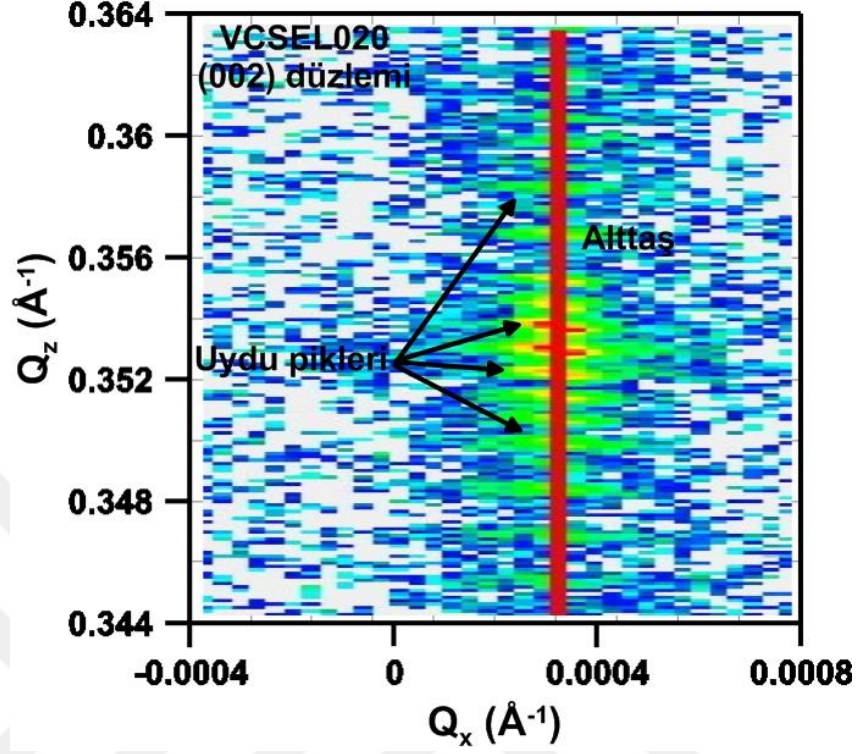
VCSEL019 büyütmesi MOCVD sistemi ile büyütülmüş 30 çift AlAs/GaAs DBR ve 5 tekrar InGaAs/GaAs kuantum kuyusundan oluşmaktadır. Büyütme görüntüsündeki osilasyon sayısı 30 çift AlAs/GaAs yapısının büyütülebildiğini açıkça göstermektedir. Büyütmede DBR kısmı için VCSEL017 kullanılan gaz akış değerleri optimize edilen büyütme süreleri kullanılarak yapılmıştır. Lazer ışınım dalga boyunun 980 nm dalgaboyuna kaydırmak amacı ile VCSEL018 numaralı kuantum kuyusu büyütmelerinde kullanılan indiyum gaz akış değeri 64 sccm'den 84 sccm'ye çıkarılmış ancak büyütme süresi aynı tutulmuştur. Büyütmenin ardından VCSEL yapısının SEM, HRXRD, spektrofotometre ile yansıma ve son olarak PL ölçümü yapılmıştır.



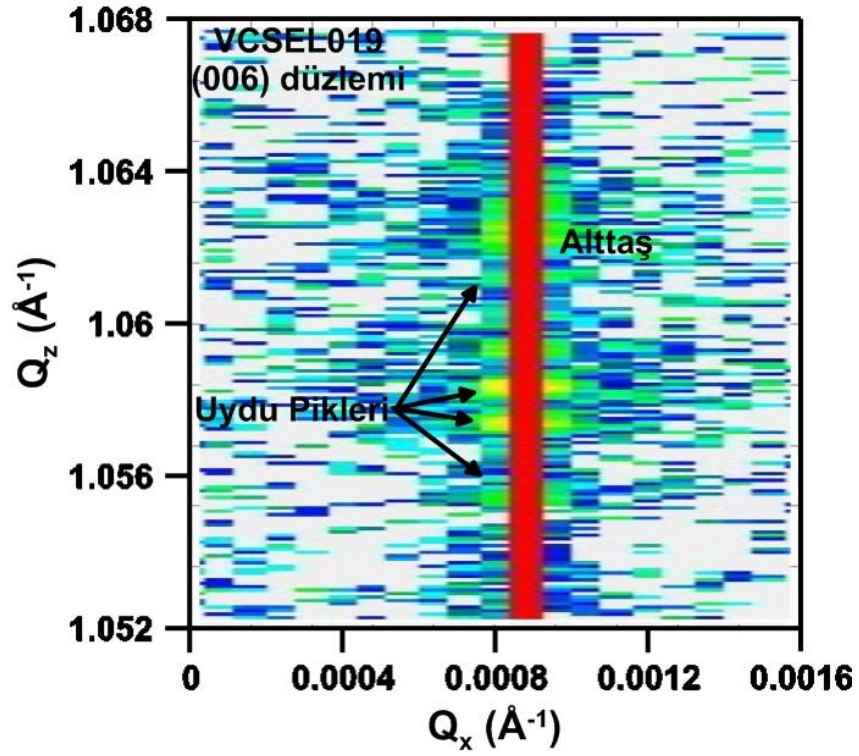
**Şekil 6.50** VCSEL019 SEM görüntüsü.

Şekil 6.50'deki SEM görüntüsü VCSEL yapısında hem DBR hem de kuantum kuyu bölgesinde üst katmanlara doğru dalgalanmanın başladığını, katman kalınlıklarında sapmalara bağlı olarak katman geçişlerinin bozulduğu görülmektedir. Bu dalgalanmanın kuantum kuyusu bölgesine de sirayet ettiği ve katmanların birbirlerine olan paralelliğinin bozulduğu görülmektedir.

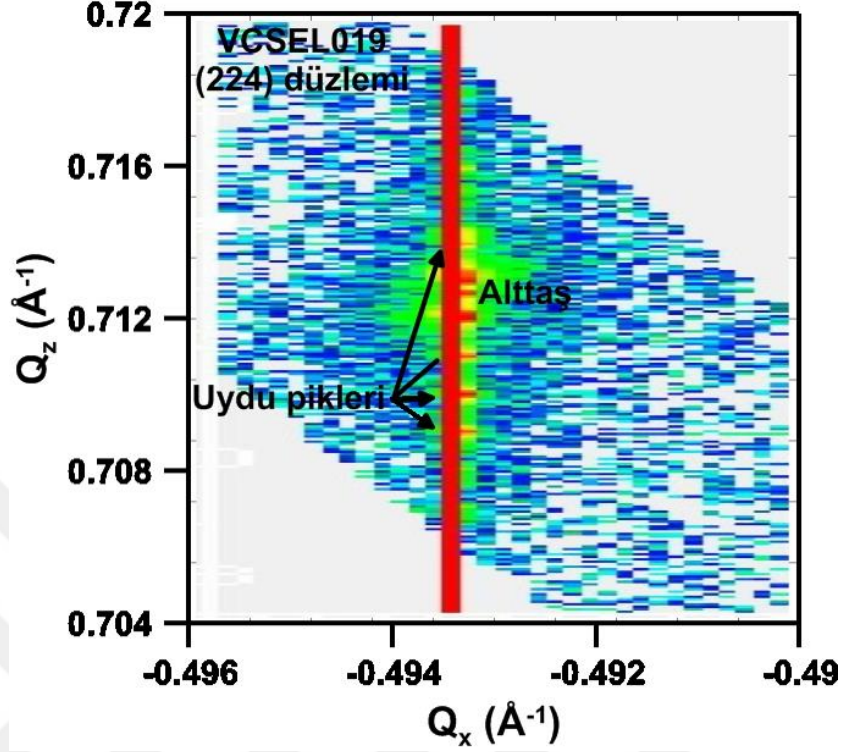
DBR yapılarına benzer olarak VCSEL yapılarında meydana gelebilecek kristal kusurlarının araştırılması amacıyla VCSEL yapılarının (002), (004), (006) ve (224) düzlemlerinin RSM ölçümleri yapılmıştır. (004) düzlemindeki RSM ölçümünün geniş aralıkta düşük çözünürlük nedeniyle teze eklenmemiştir.



Şekil 6.51 VCSEL019 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi RSM ölçümü.

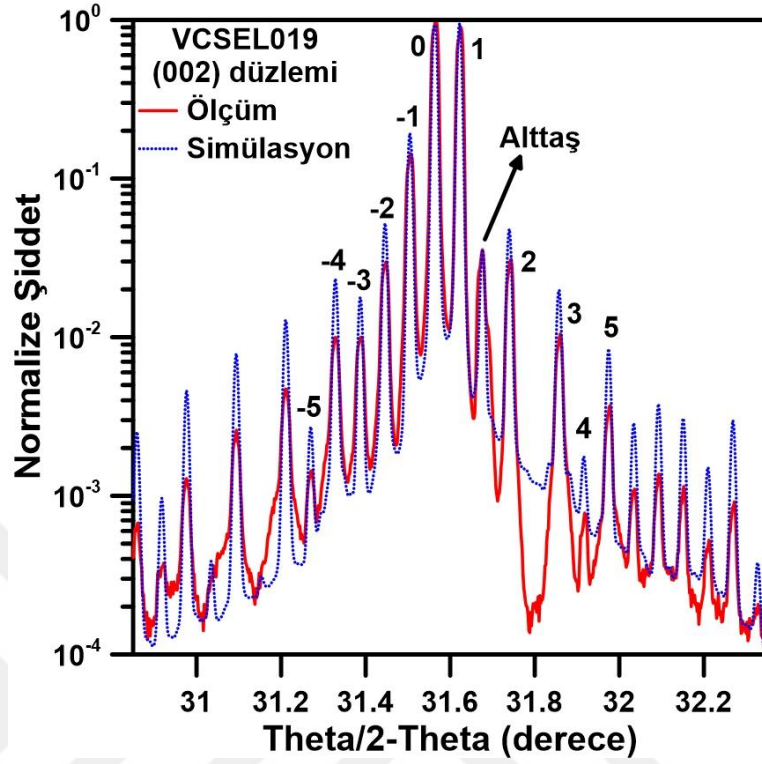


Şekil 6.52 VCSEL019 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi RSM ölçümü.

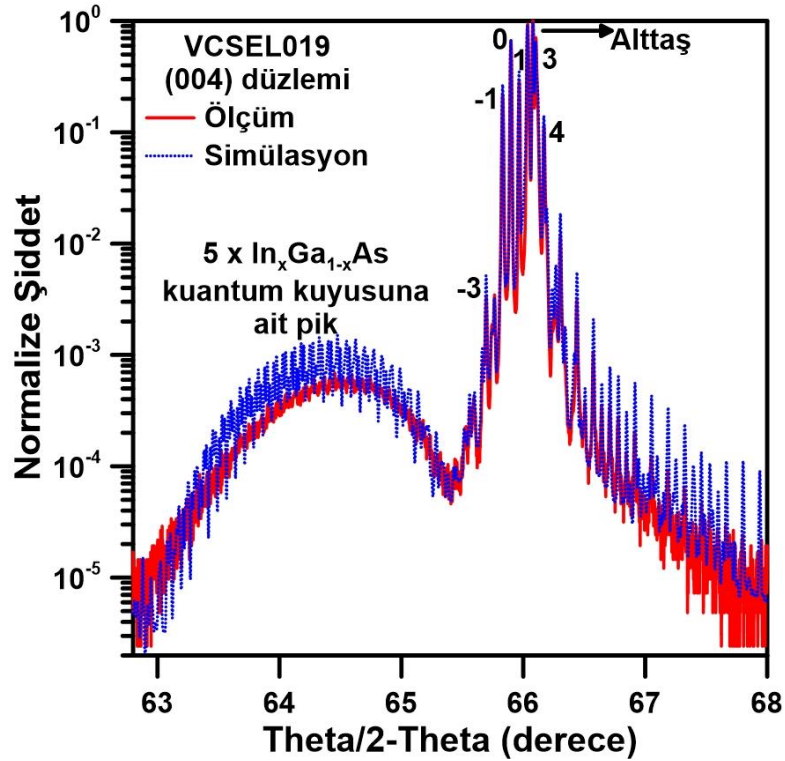


Şekil 6.53 VCSEL019 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi RSM ölçümü.

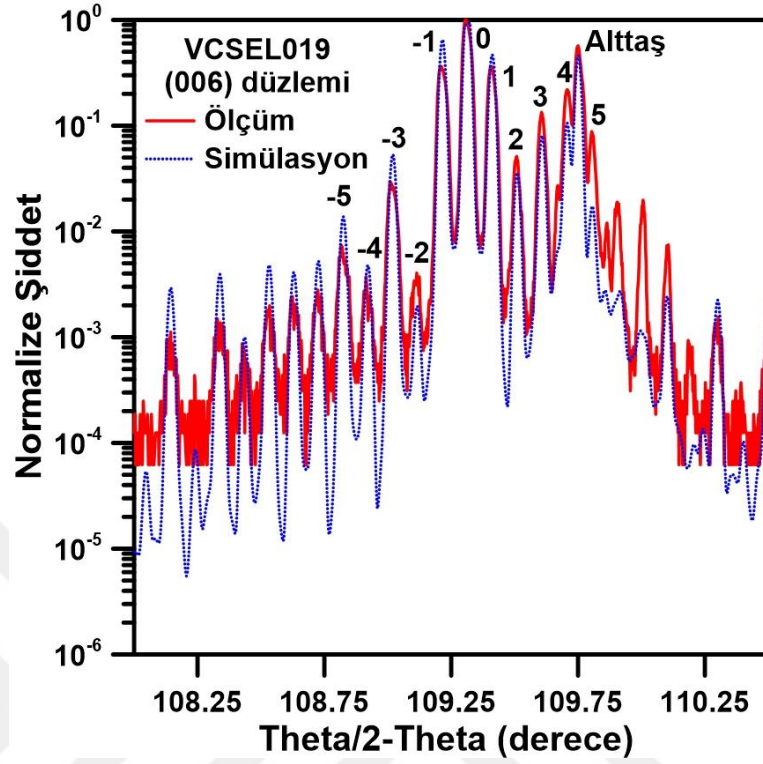
VCSEL019 yapısında (002) ve (006) düzlemlerinde DBR yapılarına benzer olarak herhangi bir eğilme görülmemektedir. (224) düzlemi ise yapıda gevşeme olmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar optik pompalı VCSEL yapısının MOCVD sistemi başarılı olarak büyütülebildiğini göstermektedir. VCSEL yapısının kristal analizinin yapılması, kuantum kuyusu genişliğinin belirlenmesi ve indiyum alaşım oranının belirlenmesi amacıyla (002), (004) ve (006) düzlemlerinin theta/2-theta ölçümlerine dinamik x-ışını simülasyonu yapılmıştır.



Şekil 6.54 VCSEL019 numaralı büyütme için (002) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.55 VCSEL019 numaralı büyütme için (004) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.

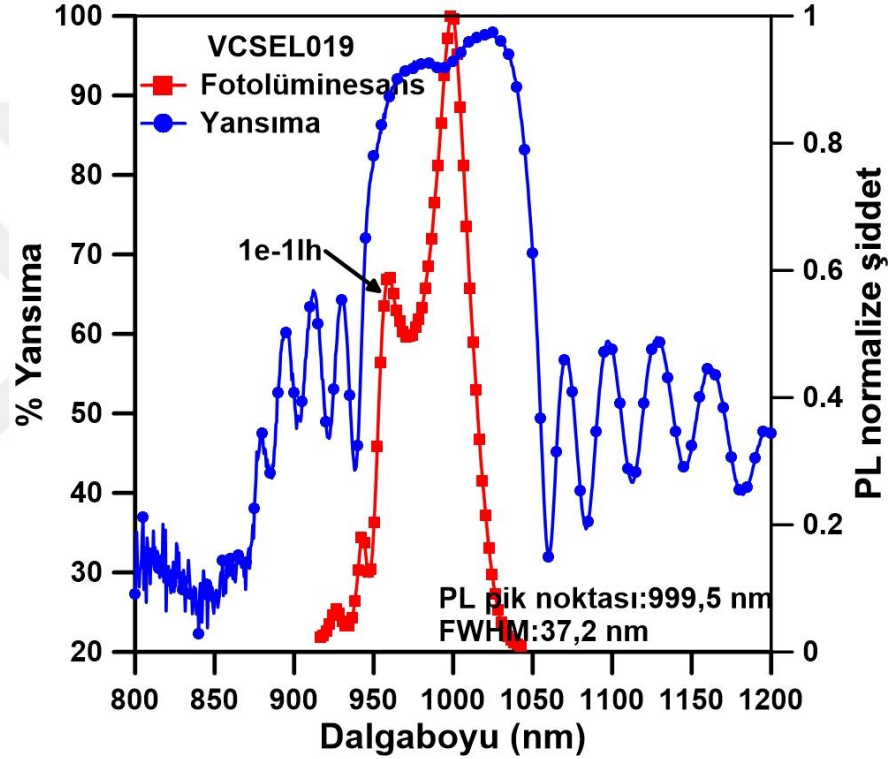


Şekil 6.56 VCSEL019 numaralı büyütme için (006) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.

Çizelge 6.5 VCSEL019 büyütmesinin dinamik x-ışını simülasyonu ile bulunan tabaka kalınlıkları ve indiyum alaşım oranları.

Katman		(002) kalınlık (nm)	(004) kalınlık (nm)	(006) kalınlık (nm)	(002) İndiyum oranı %	(004) İndiyum oranı %	(006) İndiyum oranı %
DBR	AlAs	84,9	84,7	84,8	0	0	0
	GaAs	71,2	70,8	70,5	0	0	0
	GaAs	63,0	62,8	66,8	0	0	0
1. QW	InGaAs	8,80	8,6	8,57	18,95	19,53	19,53
	GaAs	128,0	133,1	134,5	0	0	0
2. QW	InGaAs	8,3	8,3	8,3	18,04	19,75	18,04
	GaAs	135,0	130,0	132,3	0	0	0
3. QW	InGaAs	7,4	8,3	8,3	19,02	19,02	19,02
	GaAs	131,0	131,6	135,3	0	0	0
4. QW	InGaAs	8,1	8,6	8,6	19,75	18,04	18,04
	GaAs	139,0	129,8	128,5	0	0	0
5. QW	InGaAs	8,2	8,37	8,4	19,53	18,95	18,95
	GaAs	64,0	67,3	66,6	0	0	0

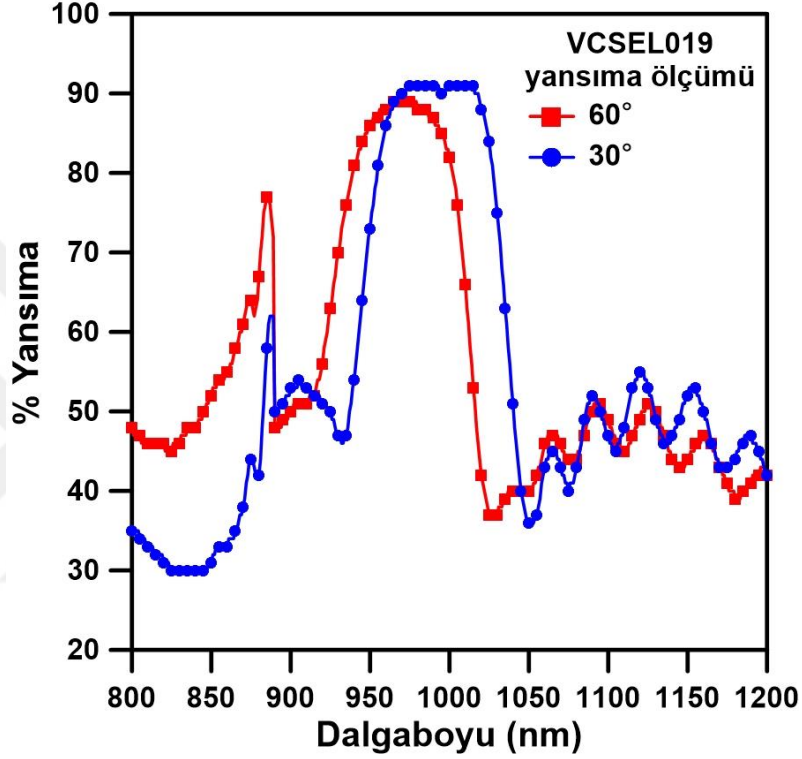
(002) ve (006) düzlemleri periyodik çoklu katmana duyarlı oldukları için uydu pikleri açıkça görülmektedir ancak -4 ve -5. uydu piklerinde InGaAs katmanının etkisi ile meydana gelen genişleme belirgin şekilde görülmektedir. (004) düzleminde ise InGaAs pik'i açıkça görülürken uydu piklerinde kristal kalitesinde meydana gelen bozulma nedeni ile uydu pik şiddetleri azalarak sönümlenmişlerdir.



**Şekil 6.57** VCSEL019 numaralı numunenin fotolüminesans ve yansımaya ölçümü ve simülasyonu.

Fotolüminesans ve yansımaya ölçümlerinde VCSEL019 numaralı numunenin PL pik noktası ile yansımaya ölçümünde bulunan dip noktası aynı dalgaboyunda ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları VCSEL019 numaralı numunenin ışımaya dalga boyunun 999,5 nm olduğunu göstermektedir. 960 nm dalgaboyunda ışımaya yapan tek kuyu VCSEL018'den 1000 nm'ye kaymasının temel nedeni büyütmede indiyum alaşım oranının artırılması sonucu kuantum kuyu derinliğinin artmasıdır. Bunun yanı sıra artan indiyum gaz akışı ile InGaAs'ın büyüme hızı artmış ve kuyu genişliği artmıştır. Kuyu genişliği kuantum

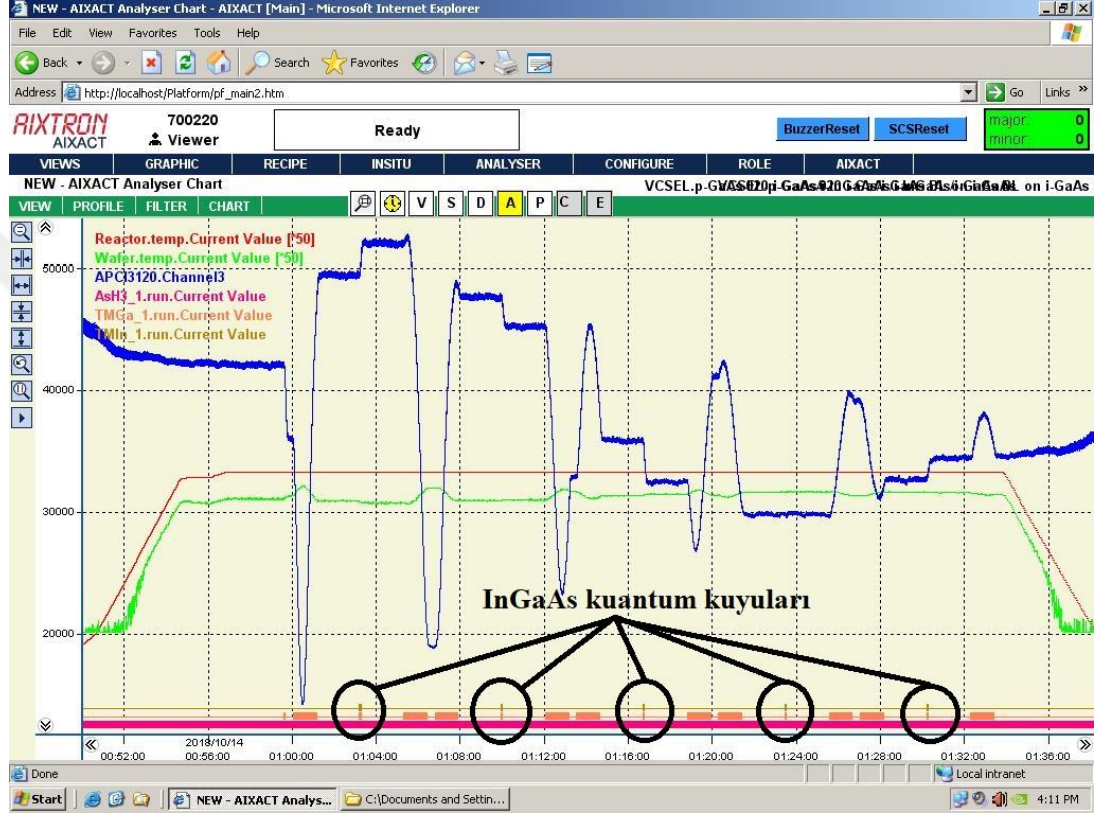
kuyusu içerisinde oluşan enerji seviyelerinin kuyu tabanına yaklaşmasına neden olmuştur. Böylece bantlar arası geçiş daha düşük enerjide daha yüksek dalga boyuna kaymıştır.



Şekil 6.58 VCSEL019 numaralı numunenin 30° ve 60°'de yansımaya ölçümü.

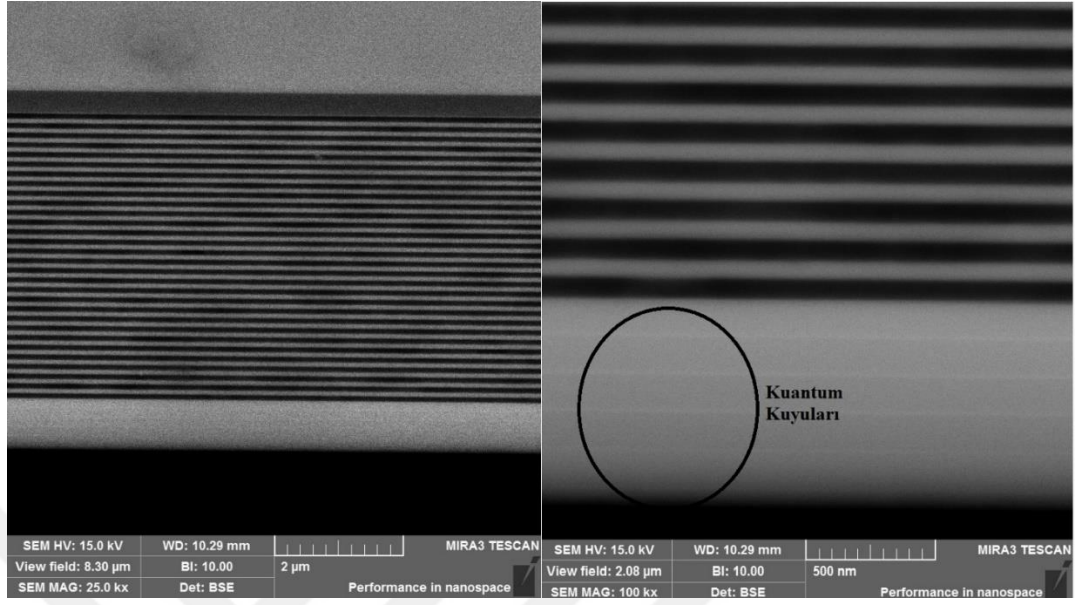
Spektrofotometre ile yapılan yansımaya ölçümlerinde InGaAs katmanından kaynaklanan soğurma nedeni ve DBR üzerine büyütülen katmanların faz kayması oluşturması nedeniyle maksimum yansımada düşüş meydana gelmektedir. Işık geliş açısına bağlı olarak DBR pik noktasının kısa dalgalı boylarına kayması kuantum kuyusu bölgesinde soğurmaya arttırmasından dolayı kısa lazer yapısından elde edilen yansımaya daha da azalmakta ve 60° geliş açısında %90'ın altına düşmektedir. Kısa dalgalı boyuna kayma sonucunda 30° ve 60° geliş açılarındaki yansımaya ölçümlerinde ortaya çıkan ışımaya dalgalı boyu 996 ve 970 nm değerlerine kaymıştır. Kaymanın ışık geliş açısına doğru orantılı bağlı olmadığı görülmektedir. VCSEL019'da istenilen ışımaya dalgalı boyunda kayma olmasının ardından indiyum gaz akış değeri 84 sccm'den 75 sccm'ye

düşürülerek VCSEL020 numaralı büyütme yapılmıştır. VCSEL020, ES2418 numaralı DBR katmanı üzerine 5 çift InGaAs/GaAs kuantum kuyusu büyütülerek elde edilmiştir.

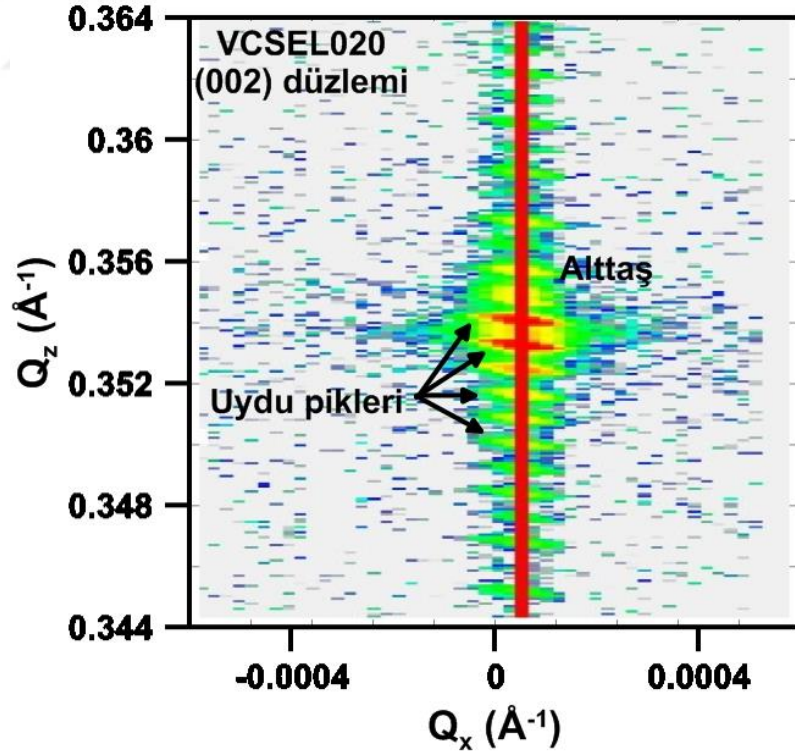


Şekil 6.59 VCSEL020 numaralı büyütmeye ait ekran görüntüsü.

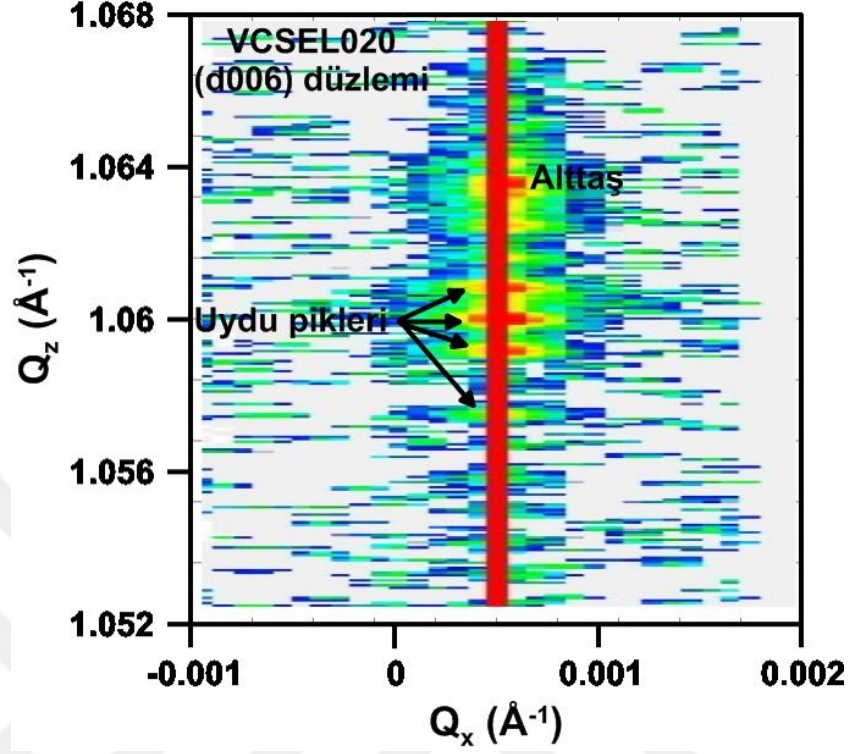
VCSEL020 büyütmesi direk olarak 5 kuantum kuyusu büyütmesi ile başlamıştır. Büyütme süresi ve sıcaklık değerleri VCSEL019'un aktif bölgesi ile aynıdır. Büyütme sonrası SEM, HRXRD, Spektrofotometre ile yansıma ve son olarak PL ölçümü yapılmıştır. SEM görüntüsünde tüm katmanların birbirine mükemmel şekilde paralel olduğu görülmektedir. Beş kuantum kuyusu SEM görüntüsünde ayrıca kristal kalitesinin bir göstergesi olarak ayırt edilebilmektedir.



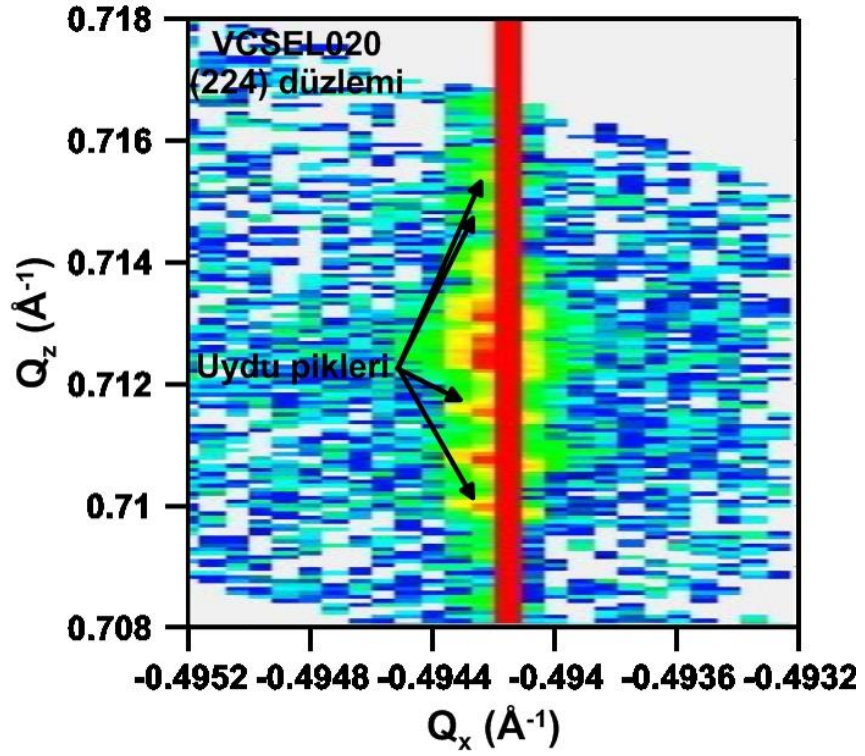
Şekil 6.60 VCSEL020 SEM görüntüsü, solda tam yapı sağda kuantum kuyusu bölgesi ve DBR kısmı.



Şekil 6.61 VCSEL020 numaralı büyütmeye ait (002) düzlemi RSM ölçümü.

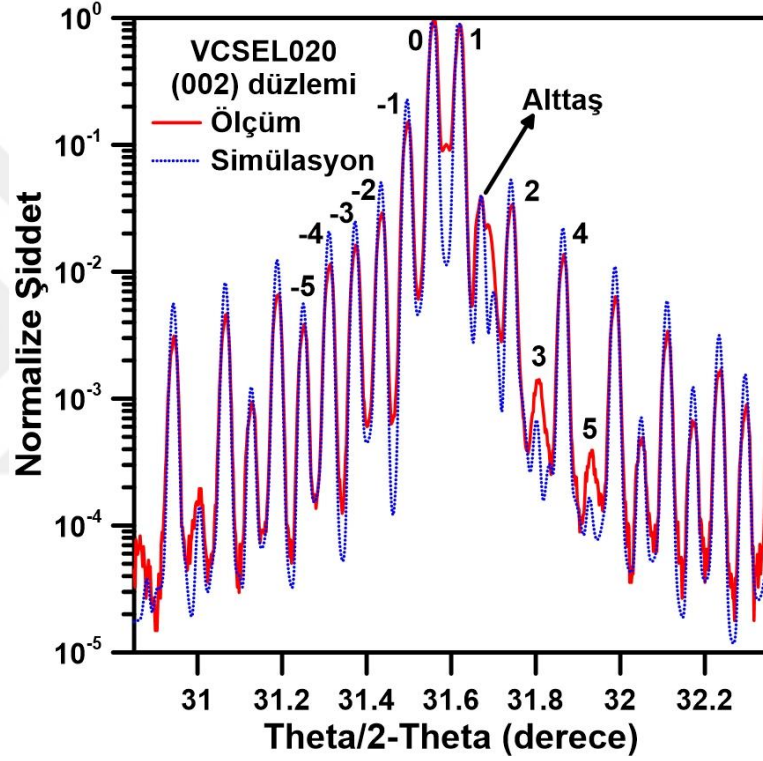


Şekil 6.62 VCSEL020 numaralı büyütmeye ait (006) düzlemi RSM ölçümü.

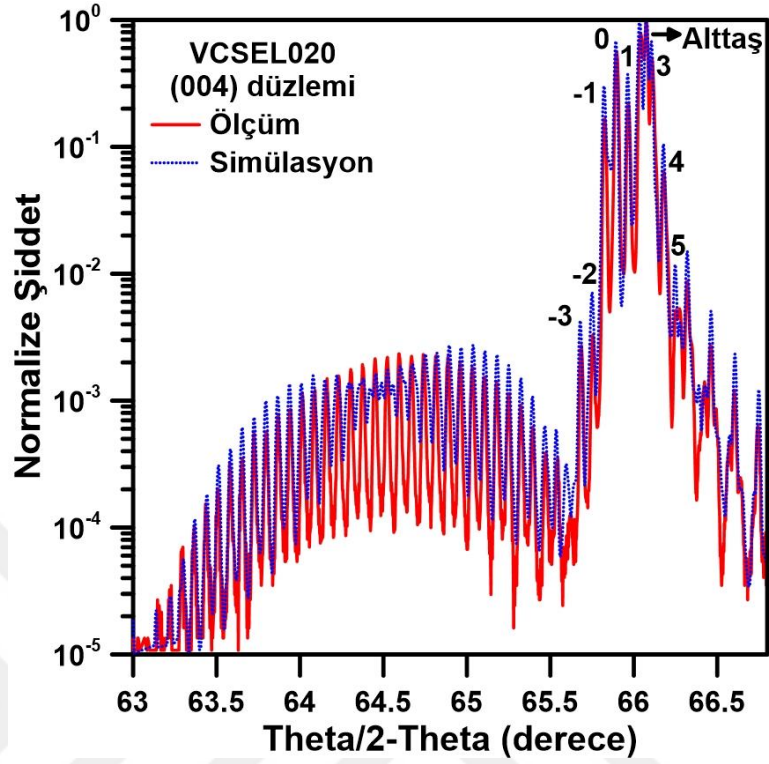


Şekil 6.63 VCSEL020 numaralı büyütmeye ait (224) düzlemi RSM ölçümü.

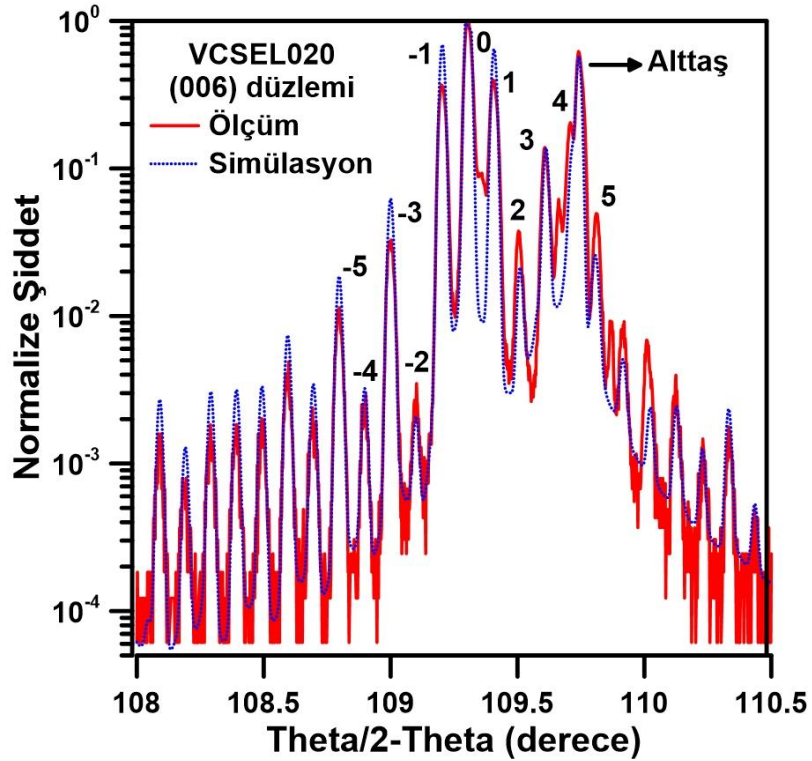
RSM ölçüm sonuçlarına göre VCSEL020 büyütmesinde MBE-DBR üzerine MOCVD-QW büyütülmesi yapıda eğilmeye yada gevşemeye neden olmamıştır. (002) düzlemi RSM ölçümünde uydu piklerinin açıkça görülmesi ve sönümlenmemesi kristal kalitesinin üst düzeyde olduğunu kanıtlamaktadır. RSM ölçüm sonuçları kullanılarak dinamik x-ışını simülasyonu yapılmıştır.



**Şekil 6.64** VCSEL020 numaralı büyütme için (002) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.65 VCSEL020 numaralı büyütme için (004) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.



Şekil 6.66 VCSEL020 numaralı büyütme için (006) düzlemi theta/2-theta ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu.

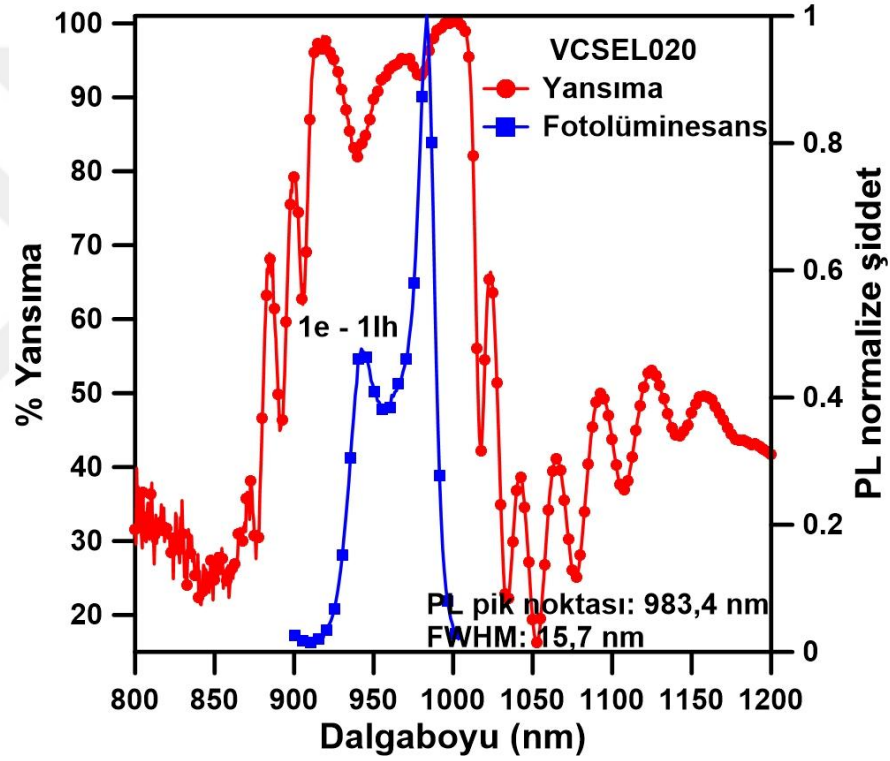
Dinamik x-ışını simülasyonundan elde edilen kuantum kuyusu kalınlıkları ve indiyum alaşım oranları birbirlerine oldukça yakın elde edilmiştir. VCSEL019 numaralı büyütmeden farklı olarak azaltılan indiyum gaz akışının etkisi elde edilen indiyum alaşım oranlarında ve kalınlıklarında görülmektedir. (002) ve (006) düzlemlerinin ölçümlerinde InGaAs kuantum kuyusunun yapıya getirdiği gerilme uydu piklerinde genişleme olarak açıkça görülmektedir.

**Çizelge 6.6** VCSEL020 büyütmesinin dinamik x-ışını simülasyonu ile bulunan tabaka kalınlıkları ve indiyum alaşım oranları.

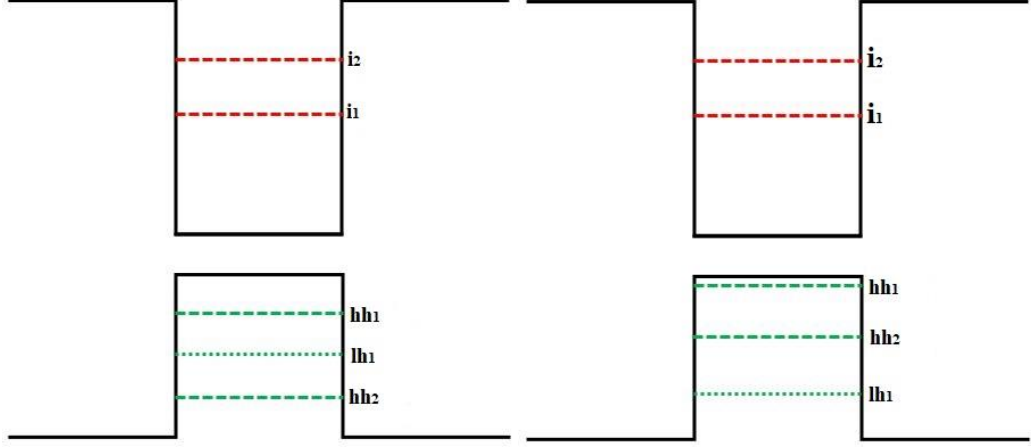
Katman		(002) kalınlık (nm)	(004) kalınlık (nm)	(006) kalınlık (nm)	(002) İndiyum oranı %	(004) İndiyum oranı %	(006) İndiyum oranı %
DBR	AlAs	79,4	78,2	79,4	0	0	0
	GaAs	69,8	69,5	70,0	0	0	0
	GaAs	65,0	68,2	64	0	0	0
1. QW	InGaAs	8,2	8	8,3	17,1	17,1	17,8
	GaAs	129,0	141,6	130	0	0	0
2. QW	InGaAs	8,2	8	8,3	17,7	16,7	17,8
	GaAs	129,0	142,5	130	0	0	0
3. QW	InGaAs	8,2	8	8,3	17,2	17,2	17,2
	GaAs	129	135,8	130	0	0	0
4. QW	InGaAs	8,2	8	8,3	17,7	17,7	17,7
	GaAs	129	135,7	130	0	0	0
5. QW	InGaAs	8,2	8	8	17,8	17,8	17,1
	GaAs	64	68	66	0	0	0

HRXRD analizinin ardından VCSEL020'nin optiksel özelliklerinin analizi amacıyla PL ve spektrofotometre ile yansıma ölçümleri yapılmıştır. Yansıma ölçümlerinde 983,4 ve 945 nm dalgaboylarında dip noktaları görülmektedir. Yine PL ölçümlerinde ise bu dip noktalarına karşılık gelen pikler görülmektedir. Benzer ölçüm sonucu VCSEL019'da da elde edilmiştir. DBR'nin SBW genişliği içerisinde iki pik'in görülmesi literatürde yaygındır (Jasik, 2016), (Fan, 2007), (Men, 2015). Kuantum kuyusu büyütmelerinde gerilmenin olmadığı durumlarda valans bandında oluşan ağır hole'lere ait enerji seviyeleri kuantum kuyusunun alaşım oranı, hidrostatik basınç ve kalınlık değişimlerinden etkilenmezler (O'Reilly, 1989). Ancak gerilme altında

büyütülen kuantum kuyularının valans bandında ağır holler ile hafif holler arasında bir bant açıklığı (energy splitting) oluşur ve hafif hollerin seviyesinin gerilemeye bağlı olarak ağır hollerin ikinci enerji seviyesinin altına düşebilir (Şekil 6.68). Ağır holler ile hafif hollerin enerji seviyeleri arasındaki farkın artışı ile optik ölçümlerde düşük dalgaboylarında ikinci pik görülür. Bu ışıma ancak kuantum kuyusu katmanlarının gerilme altında yüksek kalite ile büyütülmesi durumunda gerçekleşir (Shen, 1994).

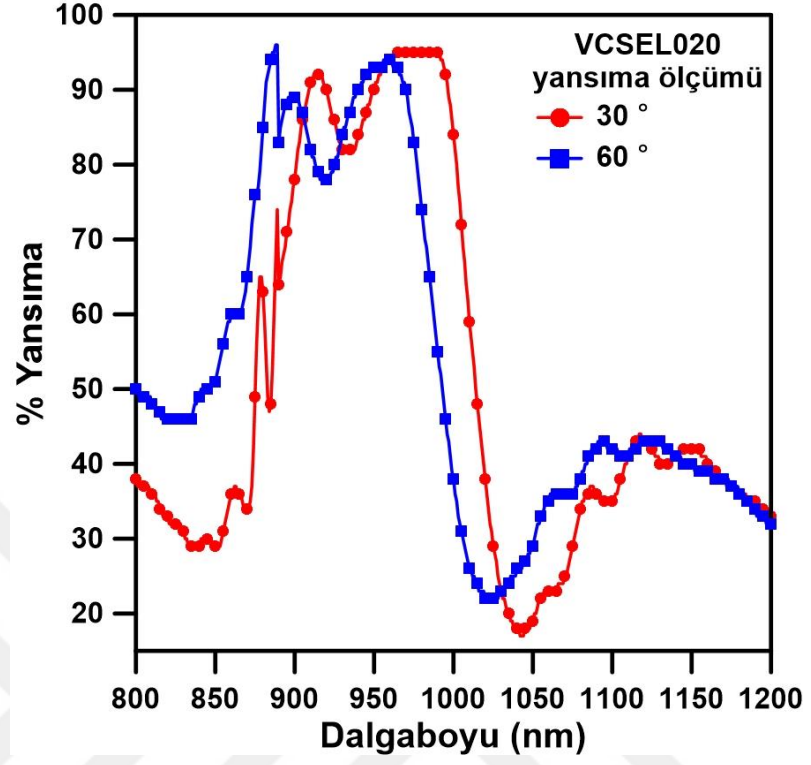


Şekil 6.67 VCSEL020 numaralı numunenin fotolüminesans ve yansıma ölçümü.



**Şekil 6.68** Gerilme olmayan (sol) ve gerilme durumunda(sağ) kuantum kuyusu valans bandındaki enerji seviyelerinin değişimi.

PL sonucuna göre VCSEL019'dan sonra kuantum kuyusunun büyütme parametrelerinde yapılan değişiklikler ile hedeflenen dalgaboyu 980 nm'de ışıyan optik pompalı VCSEL büyütülebilmektedir. VCSEL019 ile karşılaştırıldığında elde edilen lüminesansda artış gözlenmiştir ve kristal kalitesinin bir göstergesi olan PL FWHM değerinde %60'a yakın iyileştirme elde edilmiştir. Son olarak açığa bağlı yansıma ölçümlerinde kısa dalgaboyuna kayma açık olarak görülmektedir (Şekil 6.69).



Şekil 6.69 VCSEL020 numaralı numunenin 30°’de yansırma ölçümü ve simülasyonu.

## 7. SONUÇ

Düşük enerji tüketimine sahip yüksek performanslı aygıtlara gereksinim günümüzde giderek artmaktadır. Artan güç ve uygulama alanlarının yanı sıra görünür bölgeden orta kızılötesi bölgeye kadar ışımaya yapan VCSEL'ler yarıiletken teknolojileri içerisinde en çok talep gören aygıtlardandır.

Tez kapsamında optoelektronik aygıtlardan 980 nm kızılötesi dalgaboyunda ışımaya yapan VCSEL'lerin teorik hesaplaması, büyütülmesi ve karakterizasyonu yapılmıştır. VCSEL temel olarak ayna ve aktif bölge olarak iki kısımda incelenmiştir. Ayna kısmı çok katmanlı periyodik DBR'den yapılmıştır. DBR yapısı için AlAs ve GaAs yarıiletkenleri seçilmiştir. Bu tasarımdaki temel gerilme problemi ortaya koyulmuş, potansiyel çözümler teorik olarak irdelenmiştir. Bunun yanı sıra gerilme probleminin çözülmesi amacıyla literatürde çalışmaları yeni olan AlAs'a fosfor eklenerek elde edilen GaAs ile örgü uyumlu olan  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}$  yarıiletkeni önerilmiştir. Bu kapsamda karşılaştırmanın yapılabilmesi amacıyla AlAs/GaAs ve  $\text{AlAs}_{0,96}\text{P}_{0,04}$ /GaAs DBR yapılarının teorik hesaplamaları yapılmıştır. DBR'nin toplam yansımaya etki eden faktörlerden DBR çift sayısı, katman kalınlıkları, fosfor oranı, şapka katman kalınlığı ve katkılamanın etkisi araştırılmıştır.

Teorik hesaplamaların ardından MOCVD sistemi ile GaAs alttaş üzerine AlAs ve GaAs katmanları büyütülmüştür. Bu büyütme MOCVD sisteminde bulunan yerinde ölçüm sistemindeki büyütme hızlarının bulunması için yapılmıştır. Büyütme hızlarının ardından GaAs alttaş üzerine büyütülen 30 çift AlAs/GaAs yapısı analiz edilmiştir. Analiz kapsamında öncelikle periyodikliğin görülmesi amacıyla SEM görüntülemesi yapılmış ve katmanlardaki geçiş kalitesi, kalınlık değişimleri ve katmanların paralelligi incelenmiştir. SEM görüntülemesinden sonra HRXRD analizi yapılmıştır. HRXRD çalışmaları temel olarak RSM ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu olarak iki kısımdan oluşmaktadır. RSM ölçümleri ile kritik kalınlığı geçen toplam AlAs'ın etkisi araştırılmış yapılarda herhangi bir eğilme ya da gevşeme görülmemiştir. Bu sonuçlar dinamik x-ışını simülasyonunda kullanılmıştır. Dinamik x-ışını simülasyonları ile DBR yapısının kalınlıkları ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Dinamik x-ışını simülasyonlarından elde edilen (veya büyütme hızları) ile yerinde ölçüm sisteminden

elde edilenler arasında fark olduğu gösterilmiştir. Bu farkın kaynağının bulunması ve ölçüm sonuçlarının doğrulanması amacı ile DBR yapısının spektrofotometre ile yansımaları dalgalı boyuna bağı olarak ölçülmüştür. Yansıma ölçüm sonuçları DBR merkez dalgalı boyunun hedeflenenden daha düşük dalgalı boyunda olduğunu göstermiştir. Bu sonuç dinamik x-ışını simülasyonlarından elde edilen kalınlıklar kullanılarak yapılan yansıma simülasyonu ile doğrulanmış ve sonraki tam lazer yapılarının büyüütülmesinde dinamik x-ışını simülasyonlarından elde edilen büyüütme hızları kullanılmıştır.

Teorik ve deneysel olarak DBR analizlerinin yapılmasının ardından MOCVD sistemi kullanılarak VCSEL yapılarının aktif bölgesini oluşturan kuantum kuyusu ve bariyeri için optimizasyon büyüütmesi yapılmıştır. Aktif bölge olarak GaAs alttaş üzerine GaAs bariyer katmanları ve InGaAs kuantum kuyusu büyüütülmüştür. Kuantum kuyusunun analizi için kalınlığı ve indiyum alaşım oranının bulunması için HRXRD ölçümü ve dinamik x-ışını simülasyonu yapılmıştır. Bunun yanı sıra kuantum kuyusunun ışımaya dalgalı boyunun bulunması için PL ölçümü yapılmıştır. Deneyler sonucunda InGaAs'ın indiyum alaşım oranı %14,66, kalınlığı 7,7 nm ve ışımaya dalgalı boyu 960 nm olarak saptanmıştır. Hedeflenen dalgalı boyunun 980 nm olması nedeni ile sonraki büyüütmelemlerde indiyum akış miktarı artırılmıştır.

VCSEL'in ayna ve aktif bölgesinin büyüütülmesi ve optimizasyonunun ardından tam lazer yapıları MOCVD sistemi kullanılarak büyüütülmüştür. Bu kapsamda öncelikle MOCVD sistemi ile GaAs alttaş üzerine 30 çift AlAs/GaAs DBR ve 5 çift InGaAs/GaAs kuantum kuyusundan oluşan aktif bölge büyüütülmüştür. Bunun ardından MBE ile büyüütülmüş DBR yapısı üzerine yine 5 çift InGaAs/GaAs kuantum kuyusu büyüütülmüştür. Tamamı MOCVD sistemi ile büyüütülen optik pompalı VCSEL 999 nm ışımaya dalgalı boyunda ışımaya yaparken azaltılan indiyum gaz akışının etkisi MBE-DBR üzerine büyüütülen ile 983 nm'de ışımaya yapan VCSEL büyüütülmüştür. Sonuç olarak azalan indiyum alaşım oranının etkisi ile VCSEL020 VCSEL019'a göre daha iyi optiksel özellik göstermiş hedeflenen dalgalı boyunda optik pompalı VCSEL ülkemizde ilk defa büyüütülmüştür.

## 8. KAYNAKLAR

- Adachi, S.** (2009). *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. Wiley.
- Alaydin, B. O.** (2017). Optical and Structural Properties of MOCVD Grown In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Epilayers. *Cumhuriyet Science Journal*, 681 - 689.
- Asplund, C. .** (2001). Doping-induced losses in AlAs/GaAs distributed Bragg reflectors. *Journal of Applied Physics*, 794.
- Aspnes, D. S.** (1985). Anisotropies in the above band gap optical spectra of cubic semiconductors. *Physical Review Letters*, 1956-1959.
- Basov, N. G.** (1972). *Semiconductor Lasers*. Amsterdam: Elsevier.
- Bennett, B. R.** (1990). Carrier-Induced Change in Refractive Index of InP, GaAs and InGaAsP. *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, 1.
- Bennett, W. R.** (1962). Dissociative Excitation Transfer and Optical Maser Oscillation in Ne-O<sub>2</sub> and Ar-O<sub>2</sub> rf Discharges. *Physical Review Letters*, 470.
- Bergen, K. M.** (2009). Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, G00E06.
- Bhattacharyaa, A. N.** (2005). Comprehensive characterization of MOVPE-grown AlGaAs/AlAs distributed Bragg reflector structures by optical reflectance, X-ray diffraction and atomic force microscopy. *J Crys. Growth.* , 331 - 338.
- Butkus, M. V.** (2013). 85.7 MHz repetition rate mode-locked semiconductor disk laser: fundamental and soliton bound states. *Optics Express*, 25526 - 25531.
- Einstein, A.** (1917). The Quantum Theory of Radiation. *Physikalische Zeitschrift*, 121.

- Fallahi, M. M.** (2006). High Power Vertical-External-Cavity Surface-Emitting and Their Applications. *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices III*, 61270C.
- Fan, L. H.** (2007). Highly strained InGaAs/GaAs multiwatt vertical-external-cavity surface-emitting laser emitting around 1170 nm. *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 131114.
- Geels, R. C.** (1990). Narrow-linewidth, low threshold vertical-cavity surface-emitting lasers. *12th IEEE International Conference on Semiconductor Laser*.
- Hall, R. N.** (1962). Coherent Light Emission From GaAs Junctions. *Physical Review Letters*, 366.
- Han, P. Y.** (2000). Time-domain transillumination of biological tissues with terahertz pulses. *Optics Letters*, 242 - 244.
- Heinen, B. W.** (2012). 106 W continuous-wave output power from vertical-external-cavity surface-emitting laser. *Electronics Letters*, 516 - 517.
- Holonyak, N. B.** (1962). Coherent (Visible) Light Emission From Ga(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) Junctions. *Appl. Phys.*, 82 - 83.
- Iga, K. K.** (1987). Microcavity GaAs/GaAs surface-emitting laser with I<sub>th</sub>= 6 mA. *Electronics Letters*, 134 - 136.
- Jasik, A. S.** (2016). Impact of strain on periodic gain structures in vertical cavity surface-emitting laser. *Applied Physics B Laser and Optics*, 258.
- Jenkins, F. A.** (1981). *Fundamentals of Optics*. McGraw-Hill.
- Jewell, J. L.** (1989). *Patent No. US07538577*.
- Kaneda, Y. Y.** (2008). Continuous-wave all-solid-state 244 nm deep-ultraviolet laser source by fourth-harmonic generation of an optically pumped semiconductor laser using CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> in an external resonator. *Optics Letters*, 1705 - 1707.

- Klopp, P. G.** (2009). Mode locked InGaAs-AlGaAs disk laser generating sub-200-fs pulses, pulse picking and amplification by a tapered diode amplifier. *Optics Express*, 10820 - 10834.
- Klopp, P. G.** (2011). Pulse repetition rate up to 92 GHz or pulse duration shorter than 110 fs from a mode-locked semiconductor disk laser. *Applied Physics Letters*, 071103.
- Kuznetsov, M. H.** (1997). High-power (>0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1063 – 1065.
- Kuznetsov, M. H.** (1999). Design and characteristics of high-power (>0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 561 - 573.
- Lasers, I. A.** (1997). *John F. Ready*. San Diego: Academic Press.
- M. Kuznetsov, F. H.** (1997). High-power (>0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1063 - 1065.
- Maiman, T. H.** (1960). Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, 493 - 494.
- Manasavit, H. M.** (1969). The Use of Metal-Organics in the Preparation of Semiconductor Materials: I. Epitaxial Gallium- V Compounds. *J. Electrochem. Soc*, 1725 - 1732.
- Matthews, J. B.** (1974). Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations. *Journal of Crystal Growth*, 118 - 125.
- Mazuelas, A. H.** (1997). Strain compensation in highly carbon doped GaAs/AlAs distributed Bragg Reflectors. *Journal of Crystal Growth*, 383 - 386.
- Mazuelas, A. H.** (1998). Alternating Be and C doping for strain compensated GaAs/AlAs distributed Bragg reflectors. *Applied Physics Letters*, 2088.

- Mazuelas, A. N.** (1995). Growth and xray characterization of strain compensated GaAs/AlAs distributed Bragg reflectors. *Applied Physics Letters*, 806.
- Men, Y. W.** (2015). Thermal properties of multiple quantum wells used in vertical-external-cavity surface-emitting lasers. *Optical Engineering*, 076102.
- Michalzik, R.** (2013). *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*. Ulm: Springer.
- O'Reilly, E. P.** (1989). Valance band engineering in strained-layer structures. *Sernicond. Sci. Technol*, 121 - 137.
- Perez, J. P.** (2010). Technologies for thermal management of mid-IR Sb-based surface emitting lasers. *Semiconductor Science and Technology*, 045021.
- Rahim, M. F.** (2008). Optically pumped 5  $\mu\text{m}$  IV-VI VECSEL with Al-heat spreader. *Optics Letters*, 3010 - 3012.
- Razeghi, M.** (1995). The MOCVD Challenge. M. Razeghi içinde, *The MOCVD Challenge* (s. 433). Bristol: CRC Press.
- Rudin, B. V.** (2010). High-power MIXSEL: an integrated ultrafast semiconductor laser with 6.4 W average power. *Optics Express*, 27582–27588.
- Saarinen, E. J.** (2012). 200 GHz 1 W semiconductor disc laser emitting 800 fs pulses. *Electronics Letters*, 1355–1357.
- Scheller, M. W.-L.** (2012). Passively modelocked VECSEL emitting 682 fs pulses with 5.1W of average output power. *Electronics Letters*, 588 –589.
- Sellmeier, W.** (1871). Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spectrum einiger Substanzen. *Annalen der Physik und Chemie*, 272 - 282.
- Shen, W. Z.** (1994). Absorption spectroscopy studies of strained InGaAs/GaAs singlequantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 2728.
- Simoyama, T. M.** (2012). 50-Gbps Direct Modulation using 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs MQW Distribute-Reflector Lasers. *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 2.11.

- Soda, H. I.** (1979). GaInAsP/InP surface emitting injection lasers. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2329.
- Sprangle, P. T.** (2009). Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 138 - 148.
- Strinifellow, G. B.** (1999). *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy: Theory and Practice*. Utah: Academic Press.
- Strobel, O. R.** (2010). Communication in automotive systems: Principles, limits and new trends for vehicles, airplanes and vessels. *2010, 12th International Conference on Transparent Optical Networks*, 978-1-4244-7798-2.
- Takagi, T.** (1982). Dispersion Parameters of the Refractive Index in III-V Compound Semiconductors. *Japanese Journal of Applied Physics*, L167 - L169.
- Wemple, S. H.** (1971). Behavior of the electronic dielectric constant in covalent and ionic materials. *Physical Review B*, 1338.
- Wilcox, K. G.** (2013). 4.35 kW peak power femtosecond pulse mode-locked VECSEL for supercontinuum generation. *Optics Express*, 1599–1605.
- Yariv, A. Y.** (1984). *Optical Waves in Crystals*. California: Wiley.
- Yonemura, M.** (1985). Wavelength-change characteristics of semiconductor lasers and their application to holographic contouring. *Optics Letters*, 1 - 3.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Behçet Özgür Alaydin
Doğum Yeri ve Tarihi	Ankara, 20.05.1986
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce, Almanca
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü, 58140, Sivas
E-posta Adresi	balaydin@cumhuriyet.edu.tr

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Halide Edip Lisesi, 2003
Lisans	Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik, 2010 Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı 2014

## **İş Tecrübesi**

Kayra Mühendislik

Fizikçi, 2011

Cumhuriyet Üniversitesi

Araştırma Görevlisi, 2011

## **Yayınlar**

- I.** B. O. Alaydin, E. S. Tuzemen, I. Demir and S. Elagoz, Optical and Structural Properties of MOCVD Grown  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  Epilayers. Cumhuriyet Sci. J., Vol.38-4 (2017) 681-689.
- II.** B. Ö. Alaydin, E. Öztürk & S. Elagöz, Interband Transitions Dependent on Indium Concentration  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  Asymmetric Triple Quantum Wells, International Journal of Modern Physics B, 2017, 1793-6578, 32, 1850052, 1.
- III.** B. O. Alaydin, I Altuntas, E Senadim Tuzemen, S Elagoz, Simulation of Highly Reflective  $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  Distributed Bragg Reflector Structure for UV-Blue LEDs, Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2018, 13, 3, 387-393.
- IV.** B. O. Alaydin, E. Se. Tuzemen, D. Altun, S. Elagoz, Comprehensive structural and optical characterization of  $\text{AlAs}/\text{GaAs}$  distributed Bragg reflector, International Journal of Modern Physics B, submitted.

## **Kongreler ve Bildiriler**

- I.** D. ALTUN, B. Ö. ALAYDİN, B. BULUT, M. ERKUŞ & S. ELAGÖZ, Effect of LT-GaN Thickness On The Structural Properties Of GaN Grown On Pss By Mocvd, Sözlü Sunum, 2nd International Mediterranean Science And Engineering Congress, 25 Ekim 2017, 27 Ekim 2017.
- II.** B. Ö. ALAYDİN, E. ŞENADİM TÜZEMEN & S. ELAGÖZ, Modelling Highly Reflective  $\text{AlAs}_{1-x}\text{Px}/\text{GaAs}$  DBR Structure, Sözlü Sunum, International Conference On Condensed Matter And Material Sciences, 11 Ekim 2017, 15 Ekim 2017.
- III.** B. Ö. ALAYDİN, E. ŞENADİM TÜZEMEN & S. ELAGÖZ, Simulation Of GaAs Based DBR Structures For Vcsel Application, Poster Sunumu,

International Conference On Condensed Matter And Material Sciences, 11 Ekim 2017, 15 Ekim 2017.

- IV. B. Ö. ALAYDİN, Optical And Structural Properties Of Lattice Matched And Slightly Lattice Mismatched MOCVD Grown  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  Epilayers, Sözlü Sunum, Ibwap, 07 Temmuz 2016, 09 Temmuz 2017.
- V. B. Ö. ALAYDİN, E. ŞENADİM TÜZEMEN & S. ELAGÖZ, Modelling Of Highly Reflective  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  DBR Structure For 980 Nm Vcsels Applications, Sözlü Sunum, 4th International Conference On Materials Science And Nanotechnology For Next Generation (msng2017), 28 Haziran 2017, 30 Haziran 2017.
- VI. B. Ö. ALAYDİN, İ. ALTUNTAŞ, E. ŞENADİM TÜZEMEN & S. ELAGÖZ, Simulation Of Highly Reflective  $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  DBR Structure For Uv-blue Leds, Poster Sunumu, 4th International Conference On Materials Science And Nanotechnology For Next Generation (msng2017), 28 Haziran 2017, 30 Haziran 2017.
- VII. B. Ö. ALAYDİN, Growth And Characterization Of High Aluminium Alloy Concentration ( $x=0.92-0.94$ )  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  For Optoelectronic Application, Sözlü Sunum, Tfd 32. International Physics Congree, 06 Eylül 2016, 09 Eylül 2016.
- VIII. B. Ö. ALAYDİN, I. DEMİR & S. ELAGÖZ, Growth And Characterization Of High Aluminium Alloy Concentration  $X>0.9$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  For Optoelectronic Application, Sözlü Sunum, Tfd 32, 06 Eylül 2016, 09 Eylül 2016.
- IX. B. Ö. ALAYDİN, Research For Optimizing Growth Conditions Of Gallium Nitride Epilayers For Blue Led Structures Grown By Mocvd, Sözlü Sunum, 9th International Physics Conference Of The Balkan Physical Union, 24 Ağustos 2015, 27 Ağustos 2015.
- X. B. Ö. ALAYDİN, Mocvd ile Büyütülen Ge/Gaas Non-polar-polar Yapısının Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımıyla Yapısal Karakterizasyonu, Sözlü Sunum, Adım Fizik Günleri, 17 Nisan 2014, 18 Nisan 2014.

## **Projeler**

- I.** TÜBİTAK 1001/3501/1003, BURSİYER, Vcsel-tabanlı Yüksek Güçlü Yarıiletken Lazerler, Yürütülen Kuruluş: CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ, 2018.
- II.** KURUMSAL (BAP V.B.), ARAŞTIRMACI, Investigation Of Zno Based Distributed Bragg Reflectors (dbrs) By Using Transfer Matrix Method, Yürütülen Kuruluş: CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ 2018.
- III.** KURUMSAL (BAP V.B.), ARAŞTIRMACI, AlAs<sub>1-x</sub>Px/GaAs Dağıtılmış Bragg Yansıtıcılarının (Distributed Bragg Reflector-DBR) Kuramsal Modellemesi, Yürütülen Kuruluş: CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ, 01 Nisan 2017, 01 Aralık 2017.
- IV.** SANAYİ, ARAŞTIRMACI, Kızılötesi Kısa Dalgaboyu Dedektör Geliştirme Projesi, Yürütülen Kuruluş: ASELSAN ELEKTRONİK SAN. VE TİC. A.Ş., 01 Kasım 2012, 01 Aralık 2017.

## **Ödüller & Burslar**

- I.** Diğer, Uluslararası, Araştırma Bursu, Yök Yüksek Lisans Sırası Araştırma Bursu, Ödül Alınan Kurum: YÖK, TÜRKİYE, 01 Haziran 2013.
- II.** BEHÇET ÖZGÜR ALAYDİN, Araştırma Burs ve Destekleri Müdürlüğü, 2214-A Yurt Dışı Araştırma Burs Programı (Doktora öğrencileri için), Türkiye'ye Döndü, 2016 - 2, 2018.