

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ TABANLI
KUANTUM ÇAĞLAYAN LAZER YAPILARININ
BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

İlkay DEMİR
(201192032005)

Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

SİVAS

MART 2017

İLKAY DEMİR'in hazırladığı ve “**In_xGa_{1-x}As/In_yAl_{1-y}As** Tabanlı Kuantum Çağlayan Lazer Yapılarının Büyütülmesi ve Karakterizasyonu” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **FİZİK ANA BİLİM DALI**’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ**
Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Enise AYYILDIZ**
Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin SARI
Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail ÇELİK
Cumhuriyet Üniversitesi

Doç.Dr. Emre GÜR
Atatürk Üniversitesi

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

Prof. Dr. İdris ZORLUTUNA
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, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yürütülen SAN-TEZ Programı kapsamında 0573.STZ.2013-2 kod numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© İlkay DEMİR, 2017

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

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez 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 yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

07/03/2017

İlkay DEMİR

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince TÜBİTAK 2214/A Yurtdışı Doktora Araştırma Bursu kapsamında 1 yıl süreyle çalışmalarda bulunduğum Northwestern Üniversitesi Kuantum Cihazları Araştırma Merkezi'nde her türlü yardımlarını esirgemeyen ve hayatıma yeni bir bakış açısı katan David Heydari, Dr. Hongjian Li, Dr. Yoann Robin, Dr. Neelanjan Bandyopadhyay, Dr. Saumya Sengupta, Dr. Sourav Adhikary, Dr. Kai Ding, Dr. Bijan Movaghar, Dr. Ming Chen, Dr. Yanbo Bai, Dr. Pouya Dianat, Dr. Quanyong Lu, Dr. Anh Hoang, Dr. Ryan McClintock, Dr. Steven Slivken, Dr. Abbas Haddadi, Dr. Donghai Wu, Dr. Arash Dehzangi ve merkez müdürü Prof.Dr.Manijeh Razeghi'ye çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanları İsmail Altuntaş, Barış Bulut, Yağmur Güler, Dilşad Taydaş, İlhan Erdoğan, Gülüz Kaya, Didem Altun, Deniz Kartal, Behçet Özgür Alaydın, Fikret Akkuş, Cihan Şahin, Sefa Tütüncü ve Ünal Yılmaz'a çok teşekkür ederim.

Akademik hayatımda çok önemli bir yere sahip olan TÜBİTAK-BİDEB'e 2214/A Yurtdışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı, 2211 Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı, 2228-A Son Sınıf Lisans Öğrencileri İçin Lisansüstü Burs Programı ile desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince altyapılarını kullanımımıza açan Ermaksan Optoelektronik yöneticileri ve Aliye Alev Kızılbulut'a çok teşekkür ederim.

Yanımda olmasalar da uzaktan desteklerini hep hissettiğim anneme babama ve kardeşime çok teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince her zaman yanımda olan ve desteğini hiç esirgemeyen hayat arkadaşım, eşim Meryem Demir'e ve tez çalışmalarımın sonuna ama en önemli kısımlarında ailemize katılan, hayatımıza anlam katan bir tanecik kızım Mina'ya çok teşekkür ederim.

Bu çalışma, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından yürütülen SAN-TEZ programı kapsamında 0573.STZ.2013-2 numaralı projeyle desteklenmiştir.

ÖZET

In_xGa_{1-x}As/In_yAl_{1-y}As TABANLI KUANTUM ÇAĞLAYAN LAZER YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

İlkay DEMİR

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

2017, 204+xxiv sayfa

Bu çalışmada Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama (MOCVD) tekniği kullanılarak In_xGa_{1-x}As/In_yAl_{1-y}As tabanlı kuantum çağlayan lazer yapıları epitaksiyel olarak büyütmüş ve detaylı karakterizasyonları yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda InP alttaşa örgü uyumlu ve örgü uyumsuz-gerilme dengeli olarak tek tabaka In_xGa_{1-x}As ve In_yAl_{1-y}As üçlü alaşımları optimize edilerek büyütülmüştür. Optimizasyon aşamasında sıcaklık, V/III oranı, büyüme oranı vb. birçok büyüme parametresi göz önüne alınmıştır. Daha sonra, tüm tek tabakalar n-tipi katkılanarak maksimum mobilite elde edilecek şekilde büyütülmüştür. Tek tabaka büyüme ve optimizasyonundan sonra tabakaların süperörgü yapıları içindeki kalınlık ve büyüme oranı yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) ölçümleri ile geliştirilen teknik yardımıyla çok hassas bir biçimde belirlenmiştir. Ayrıca kuantum çağlayan lazer yapısının aktif bölgesi büyütülürken tabakalar arası geçişte bekleme süresinin etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Sonuç olarak örgü uyumsuz ve gerilme dengeli yapılar ile kısa (~4µm) kızılötesi bölgede, örgü uyumlu yapılar ile de orta kızılötesi (~10µm) bölgede ışınım yapacak kuantum çağlayan lazer yapıları MOCVD tekniği ile başarılı bir şekilde büyütülmüştür.

Anahtar kelimeler: Metal organik kimyasal buhar depolama, epitaksiyel, kuantum çağlayan lazerler, In_xGa_{1-x}As, In_yAl_{1-y}As .

ABSTRACT

GROWTH AND CHARACTERIZATION OF $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ BASED QUANTUM CASCADE LASER STRUCTURES İlkay DEMİR

PhD Thesis

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Sezai ELAGÖZ

2017, 204+xxiv pages

In this study, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ based quantum cascade laser structures were grown epitaxially by means of Metal Organic Chemical Vapor Deposition technique and they were characterized in detail. Single layer ternary alloys of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ were grown with optimized parameters as lattice matched and lattice mismatched. During the optimization, growth parameters such as temperature, V/III ratio, growth rate etc were considered. Then all single layers were doped as an n-type to have maximum mobility. After the growth and optimization of single layers, thickness and growth rate of the layers in the structure were determined very precisely by the technique which was developed by means of high resolution X-ray diffraction measurements with growing superlattices. Additionally, interruption time effects were investigated during the growth of active region of quantum cascade lasers

As a conclusion, shortwave ($\sim 4\mu\text{m}$) infrared region quantum cascade lasers were grown by lattice mismatch and strain balanced layers, midwave ($\sim 10\mu\text{m}$) infrared region quantum cascade lasers were grown by lattice matched layers by means of MOCVD technique successfully.

Key Words: Metal organic chemical vapor deposition, epitaxial, quantum cascade lasers, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
SİMGELER DİZİNİ	xxii
KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii

1. GİRİŞ	1
1.1 Orta Kızılötesi Dalgaboylu Lazerlerin Uygulama Alanları	4
1.2 Mevcut Orta Kızılötesi Lazerler	9
1.3 Kuantum Çağlayan Lazerler	12
1.3.1 Kısa dalga boylu kuantum çağlayan lazerler	18
2. TEORİ	23
2.1 Kristal Yapı	23
2.2 Band Yapısı	25
2.2.1 Örgü uyumsuz yapılar için örgü sabiti ve band yapısı değişimi	27
3. METOD	33
3.1 Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama Sistemi (MOCVD)	33
3.1.1 Elektriksel kabinet	33
3.1.2 Güvenlik ölçümü	36
3.1.3 Gaz karıştırma kabini	39
3.1.4 Reaktör kabini	48
3.1.5 Radyo frekans (RF) jeneratörü	52
3.1.6 Eldivenli kutu	53
3.1.7 Egzoz	57
3.1.8 Hidrit gaz kabinetleri	60
3.2 Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi	61
3.3 Yerinde (In-Situ) Karakterizasyon	65
3.4 Yapısal Karakterizasyon	68
3.4.1 Optik mikroskop	68
3.4.2 X ışını kırınımı (XRD) ve x ışını yansıması (XRR)	70
3.5 Optiksel Karakterizasyon	77
3.5.1 Fotoluminesans	77
3.6 Elektriksel Karakterizasyon	81
3.6.1 Hall etkisi ölçümü	82
3.6.2 Elektrokimyasal kapasitans voltaj ölçümü	85
4. KUANTUM ÇAĞLAYAN LAZER YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU	89
4.1 Tek Tabaka InP Büyütülmesi ve Karakterizasyonu	89
4.1.1 Katkısız ve n-katkılı InP büyütülmesi ve karakterizasyonu	90
4.2 Tek Tabaka In _x Ga _{1-x} As ve In _y Al _{1-y} As Büyütülmesi ve Karakterizasyonu	96
4.2.1 Düşük büyüme oranlı In _x Ga _{1-x} As ve In _y Al _{1-y} As yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonları	111

4.2.1.1 Düşük büyüme oranlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütülmesi ve karakterizasyonları...	112
4.2.1.2 Düşük büyüme oranlı $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ büyütülmesi ve karakterizasyonları ...	125
4.2.2 V/III oranının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tek tabakasına etkisi.....	134
4.2.3 V/III oranının $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ tek tabakasına etkisi	142
4.2.4 n-tipi katkılı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonu	151
4.2.5 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ süperörgülerinin büyütülmesi ve kalınlık tayini.....	156
4.2.6 Örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ süperörgülerin büyütülmesi	168
4.2.7 Örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ süperörgü büyütmelelerine tabakalar arası bekleme süresi etkisi.....	173
4.2.8 Örgü uyumsuz ($x \neq 0.53$, $y \neq 0.52$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ tabakalarının büyütülmesi ve karakterizasyonu	180
4.2.9 Örgü uyumsuz ve gerilme dengeli $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{As}$ süperörgülerinin büyütülmesi ve karakterizasyonu	186
5. SONUÇ	194
KAYNAKLAR	196
ÖZGEÇMİŞ	201

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Elektromanyetik spektrum ve kızılötesi (yakın, orta ve uzak) bölgenin spektrumdaki yerinin şematik gösterimi (Evans, Allan Joseph 2008)	1
Şekil 1.2 Yıllara göre kuantum çağılayan lazerler ile ilgili yapılan uluslararası ve ulusal bilimsel yayın sayıları.....	4
Şekil 1.3 Işınının ciddi miktarda zayıflamaya uğramadan geçebildiği atmosferik pencerenin gösterimi. Orta kızılötesi bölgede 2 adet (3-5 μm ve 8-12 μm) atmosferik pencere bulunmaktadır. Şekilde gösterilen molekül notasyonları spesifik dalgaboylarının o molekülün soğurma dalgaboyuna denk geldiğini göstermektedir (Bayram 2016)...	5
Şekil 1.4 Kızılötesi lazerler yardımıyla uzaktan algılama optik sistemlerin askeri uygulama alanına ait örnek (a), ve uzaktan algılamalı çevre kirliliği kontrolüne örnek (b) (Evans, Allan Joseph 2008)	6
Şekil 1.5 Vanderbilt Üniversitesinde orta kızılötesi lazer ile gerçekleştirilen beyin ameliyatı (Salisbury 2001)	7
Şekil 1.6 Orta kızılötesi lazer sistemleri ile ısı güdümlü tehditlerin uzaklaştırılması (hcphotonics tarih yok).....	8
Şekil 1.7 Serbest uzay iletişiminin kullanım alanlarına örnekler uydular arası iletişim (a), hareketli çizimler arası iletişim (b), kalabalık şehirdeki binalar arası iletişim (c)....	9
Şekil 1.8 Orta kızılötesi bölgede ışınım yapan yarıiletken lazerlerin sınıflandırılması	11
Şekil 1.9 Bantlar arası geçişlerden yararlanan klasik yarıiletken lazerlerin (a) ve alt bantlar arası geçişlerden yararlanan kuantum çağılayan lazerlerin (b) çalışma prensibini şematik olarak gösterimi.....	13
Şekil 1.10 Kuantum çağılayan lazer yapısına ait iki enjektör bölgesi arasına sıkıştırılmış aktif bölgenin şematik gösterimi.	14
Şekil 1.11 Üç kuantum kuyulu aktif bölgeye sahip kuantum çağılayan lazer yapısının potansiyel fark uygulanmış (a) ve uygulanmamış (b) halinin gösterimi.....	15
Şekil 1.12 Dört kuantum kuyulu yada iki fononlu rezonans olarak adlandırılan aktif bölgeye sahip kuantum çağılayan lazer tasarımı	16
Şekil 1.13 Süperörgü tasarımına sahip kuantum çağılayan lazer yapısının şematik gösterimi (Tredicucci, Capasso, ve diğerleri 1998). Koyu bölgeler mini bantların oluşturduğu enerji seviyelerini gösterirken dalgalı oklar ise 2 ve 1 numaralı enerji seviyeleri arasındaki ışımayı temsil etmektedir.....	17
Şekil 1.14 Bağlı durumdan sürekli veya mini bant durumuna geçişli kuantum çağılayan lazerlerin aktif bölge ve enjektör bölgesinin potansiyel fark uygulanmış durumu	18
Şekil 1.15 Örgü uyumlu InP tabanlı kısa dalga boylu kuantum çağılayan lazerlerde termal elektronların kaçış mekanizmasının şematik gösterimi	19
Şekil 1.16 Termal kaçışları engellemek için AlAs engelleme bariyeri ve InAs kuyusunun eklenmesinin şematik gösterimi.....	21
Şekil 1.17 Gerilme dengeli yapılar büyütülerek termal kaçışların engellenmesinin şematik gösterimi. Örgü uyumlu olarak büyütülen yapılarda (a) bant ofset 0.52 eV iken gerilme dengeli olarak büyütülen yapılarda (b) bu değer arttırılabilir.	22
Şekil 2.1 Yüzey merkezli kübik kristalin ilkel hücresi. İlkel öteleme vektörleri $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ ve $\mathbf{a}_3$ orjindeki örgü noktasını yüzey merkezlerindeki örgü noktaları ile birbirine bağlamaktadır (Rana 2009).	24
Şekil 2.2 Çinko sülfür kristal yapısı.....	25

Şekil 2.3 İzole bir pozitif iyon korunun varlığında iletim elektronunun maruz kaldığı elektrostatik potansiyel (a), Kristali oluşturmak için çok sayıda atom biraraya getirildiğinde elektronların potansiyel enerjileri örtüşürler (b).....	25
Şekil 2.4 InP (a) ve GaAs (a) bileşiklerinin bant yapıları (Singh 2001).....	26
Şekil 2.5 Alttaş ile epitaksiyel tabaka arasında yüksek örgü uyumsuzluğu durumunda ortaya çıkan gerilme gevşemesi durumu. Bu durumda kristalde dislokasyon oluşur ve kristalde tetragonal distorsiyon meydana gelir	28
Şekil 2.6 Sıkışma gerilimi epitaksisi ile gevşeme olmadan yapılan epitaksiyel büyütme. İdeal olarak gevşemiş ve örgü sabiti alttaştan büyük epitaksiyel tabaka (a), epitaksiyel tabakanın örgü sabitinden küçük örgü sabitine sahip InP alttaş (b), sıkışma gerilimi altında alttaş üzerine sanki morfik olarak büyütülen epitaksiyel tabaka (c).....	29
Şekil 2.7 Çekme gerilimi epitaksisi ile gevşeme olmadan yapılan epitaksiyel büyütme. İdeal olarak gevşemiş ve örgü sabiti alttaştan küçük epitaksiyel tabaka (a), epitaksiyel tabakanın örgü sabitinden küçük örgü sabitine sahip InP alttaş (b), çekme gerilimi altında alttaş üzerine sanki morfik olarak büyütülen epitaksiyel tabaka (c).....	30
Şekil 2.8 Örgü sabiti alttaş örgü sabitinden büyük epitaksiyel tabaka ile örgü sabiti alttaş örgü sabitinden küçük epitaksiyel tabakaların üstüste büyütülerek gerilme dengesinin sağlanması	31
Şekil 2.9 Alttaş ile epitaksiyel tabaka arasındaki örgü uyumsuzluğu dolayısıyla ortaya çıkan gerilme tiplerine göre bant aralığı değişiminin şematik gösterimi. Çekme gerilimi altında büyütülen yapı (a), Gerilmesiz yapı (b), sıkışma gerilimi altında büyütülen yapı (c).....	32
Şekil 3.1 MOCVD sisteminde bulunan elektriksel kabinin ön yüzü	34
Şekil 3.2 Güvenlik Kontrol Sistemi (SCS)	34
Şekil 3.3 Sıcaklık kontrolörü (üst) ve Eurotherm basınç farkı kontrolcüsü (alt) (a), reaktör basıncı kontrolcüsü (b)	36
Şekil 3.4 MOCVD sistemine ait ana bilgisayar (a) ve büyütmelere ait yerinde yansıma ve sıcaklık ölçümü yapan LUXTRON sistemi (b).....	36
Şekil 3.5 MOCVD sisteminde bulunan acil kapama (a) ve proses durdurma (b) düğmeleri. 37	
Şekil 3.6 MOCVD sisteminin havalandırma borusu üzerinde ve ortamda bulunan (a) ve sensörlerin okuduğu değerleri gösteren gözlem ünitesi (b)	38
Şekil 3.7 Drager sensör kontrolörü	38
Şekil 3.8 Alarm ikaz lambaları	39
Şekil 3.9 2/2, 3/2, 4/2 ve 5/2 pnömatik valflerinin şemasal gösterimleri	40
Şekil 3.10 Sıcaklığı kontrol edilebilir su banyosu (a) ve su banyosu içine yerleştirilen MO kaynağın giriş ve çıkış hatları	41
Şekil 3.11 MOCVD sistemine ait tüm parametrelerin görüntülenip manuel veya reçete ile otomatik kontrol edilebilen arayüz.	43
Şekil 3.12 Run ve vent hatları arasındaki geçişi sağlayan 5/2 valfinin görünümü.	44
Şekil 3.13 Reaktör haznesine giden hatlar (Run MO, Run Hyd, Lineer Purge 1, lightpipe, Window 1,2,3 ve Main rotation).....	45
Şekil 3.14 Reaktöre giren Azot ve hidrojen ana hatlarının basınç göstergeleri	45
Şekil 3.15 Detaylandırılmış ısı banyosu ve metal organik kaynak bağlantıları.....	46
Şekil 3.16 Kütle akış kontrolörü ve basınç kontrolörlerin bilgisayar ile kontrolü için kullanılan arayüz (interface)	46
Şekil 3.17 MOCVD sisteminde kullanılan hidrojen ve azot gazlarının daha yüksek seviyede temiz hale getirilmesi için kullanılan saflaştırıcılar (a), kullanılan gazların çığ noktası ölçen cihaz ve ölçüm değerleri (b)	47
Şekil 3.18 MOCVD sisteminde bulunan sıvı kaçak sensörü	48

Şekil 3.19	Reaktör kabininde bulunan yatay reaktör	48
Şekil 3.20	Ayırma plakasının konumu ve reaktörün iç çeperinin kaplanmasını engelleyen kuvars parçanın reaktörün içinden görünüşü	49
Şekil 3.21	Transfer modülü (a), transfer modülün tabanla paralel olduğunu gösteren su terazisi (b), çift conta (DOR) (c) ve numune tutucu bileşenleri (1-cover ring, 2-susceptor, 3-quartz ring, 4-rotation disk, 5-fixing pin, 6-insulation plate, 7-insulation ring, 8-inlaid disk) (d).....	50
Şekil 3.22	Reaktör kabininde bulunan kelebek valf	51
Şekil 3.23	MOCVD sisteminde kullanılan soğutma suyuna ait dağıtım ünitesi.....	52
Şekil 3.24	RF jeneratörü ve osilatör ünitesi.....	53
Şekil 3.25	Eldivenli kutu içerisinde bulunan antechamber ve reaktör içerisine kuars malzeme, alttaş vb parçalar koyabilmek için dış ortama açılan kapak.....	54
Şekil 3.26	Vakumlu cımbız kullanarak alttaşın alttaş tutucu susceptor üzerine yerleştirilme işlemi.....	54
Şekil 3.27	Cımbızla alttaş arasında vakum oluşturmak için kullanılan pedallar (a) ve eldivenli kutu içindeki basıncı gerekli durumlarda manuel olarak arttırmak ya da azaltmak için kullanılan pedal grubu (b).....	55
Şekil 3.28	Eldivenli kutu içerisinde yer alan ve reaktör ve eldivenli kutu içerisinde oluşabilecek kirliliği temizlemek amacıyla kullanılan yüksek emiciliğe sahip süpürge	55
Şekil 3.29	Eldivenli kutunun tüm parametrelerini kontrol etmeye yarayan kontrol ve gözlem ünitesi.....	56
Şekil 3.30	Eldivenli kutu içerisindeki oksijen ve nem seviyesini düşürmek için yapılan sirkülasyon işlemi. F1 filtresinden giren ortam gazı (çoğunlukla azot) çeşitli saflaştırma ünitelerinden geçtikten sonra tekrar F2 filtresi vasıtasıyla ortama verilmektedir (a), Eldivenli kutu ortamındaki oksijen ve nem seviyelerini ölçen sensörler (b).....	56
Şekil 3.31	Reaktör egzoz hattında bulunan ve zehirli gazların boru çeperlerine yapışmasını engelleyen ısıtma ceketi (a) ve ısıtma ceketlerinin 6 farklı bölgesinden anlık sıcaklık değerlerinin kontrolünün sağlandığı elektriksel kabinette bulunan kontrol birimi (b).....	58
Şekil 3.32	Üç ayaklı hazne ve soğuk tuzak (cold trap).....	58
Şekil 3.33	MOCVD reaktöründe değişken basınç ortamlarında büyütme yapabilmek için kullanılan EBARA A25 S ana pompa.....	59
Şekil 3.34	MOCVD reaktöründe büyütme sırasında kullanılan ve büyütme sonrasında ortaya çıkan zehirli atık gazların tehlikesiz hale getirilmesi için çeşitli kimyasal çözeltiler içeren 3 aşamalı atık temizleme ünitesi	60
Şekil 3.35	MOCVD büyütmelerinde hidrit kaynağı olarak kullanılan Arsin, fosfin, amonyak ve n tipi katkılama için kullanılan silan gazlarının yer aldığı kabinetler	61
Şekil 3.36	Tipik bir kimyasal buhar biriktirme reaksiyonuna ait adımlar. Burada A gaz fazı, B sınır tabakası (boundary layer), C ise alttaşı göstermektedir (MOCVD Manuel 2006)	62
Şekil 3.37	Tipik bir MOCVD sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi	63
Şekil 3.38	Yerinde yansıma ölçümünde alttaş, epitaksiyel tabaka ve ortamın kırılma indisi farkından dolayı gelen ve yansıyan ışığın şiddet değişiminin şematik gösterimi	66
Şekil 3.39	Yerinde yansıma ölçümünde yüzeyden ve arayüzlerden yansıyan ışıkların oluşturduğu girişim deseninin zamana göre şiddet grafiği. Burada T tam bir osilasyon oluşması için geçen zamanı belirtmektedir.	67

Şekil 3.40	Center for Quantum Devices laboratuvarlarında (a) ve Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (b) kurulu bulunan optik mikroskoplar.....	69
Şekil 3.41	MOCVD ile InP alttaş üzerine büyütülen EMC5775 numaralı n tipi InP numunesine ait 40x büyütme ile alınmış optik mikroskop görüntüleri, kenar (a,c), orta (b).....	70
Şekil 3.42	Bragg yasasının şematik gösterimi. Burada d kristal düzlemleri arasındaki mesafe, θ gelen x-ışını ile yüzey arasındaki açı 2θ ise gelen ve yansıyan x-ışınları arasındaki açıyı temsil etmektedir.....	71
Şekil 3.43	Tez çalışması kapsamında kullanılan X-ışını kırınımı sistemleri. Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan Rigaku SmartLab model X-ışını difraktometresi (a) ve Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu bulunan Phillips HRD 1880 model X-ışını difraktometresi (b).....	72
Şekil 3.44	$2\theta/\theta$ tarama geometrisine ait şematik gösterim. Numune, x-ışını ve dedektörün konumu (a), numuneye ait kristal düzlemleri (b), gelen, yansıyan ve geçen x-ışınlarına ait dalga vektörleri (c), ters uzayda örgü düzlemleri (d) (Bulut 2010).....	73
Şekil 3.45	ω taraması geometrisine ait şematik gösterim. Numune, x-ışını ve dedektörün konumu (a), ters uzayda momentum geçiş vektörünün tarama sırasında hareketi (b) (Bulut 2010).....	74
Şekil 3.46	Büyütülen malzemelerdeki birtakım değişikliklerin XRR taramalarına etkisi incelenmiştir. InAlAs (a) ve InGaAs (b) alaşımlarındaki indiyum konsantrasyonu, yüzey (c) ve arayüz pürüzlülüğü (d) ve büyütülen InAlAs (e) ve InGaAs alaşımlarının kalınlıklarının (f) XRR'ye etkisi.	76
Şekil 3.47	Tipik bir kuantum çağlayan lazer yapısından elde edilecek olan fotolüminesans ışınımının şematik gösterimi.....	79
Şekil 3.48	Yarıiletken bir malzemede fotolüminesans prosesinin şematik gösterimi. Elektronların optik olarak uyarılması ve elektron boşluk çifti oluşturulması (1), enerjili elektronların fazla enerjilerini kaybederek iletkenlik bandı taban durumuna geçişi (2), tuzak seviyeleri sebebiyle ışımasız geçiş (3), veya ışımalı geçiş (4). (Bandyopadhyay 2015).....	80
Şekil 3.49	Çalışmalar kapsamında fotolüminesans ölçümleri için kullanılan Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarındaki Argon iyon lazere sahip oda sıcaklığı fotolüminesans ölçüm sistemi (sol) Ermaksan Optoelektronik laboratuvarlarında kurulu bulunan Nanometrics-RPM Blue marka model fotolüminesans ölçüm sistemi (sağ).....	81
Şekil 3.50	Hall etkisi olayının şematik gösterimi (Bandyopadhyay 2015).....	83
Şekil 3.51	Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan HEMS model 2T manyetik alan şiddetine sahip elektromıknatıslı sistem (a) ve Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu bulunan sabit 0.6T manyetik alana sahip Hall etkisi ölçüm sistemleri.....	84
Şekil 3.52	Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında ve Ermaksan Optoelektronik laboratuvarlarında kurulu bulunan Nanometrics ECV-PRO cihazı.....	85
Şekil 3.53	Elektrokimyasal kapasitans voltaj ölçümünde p-tipi (a) ve n-tipi (b) yarıiletken için aşındırma işleminin şematik gösterimi.....	87
Şekil 3.54	n-InP alttaş üzerine büyütülmüş katkısız InP tabakasına ait ECV ölçümü.....	88
Şekil 4.1	InP alttaş üzerine büyütülen InP tabakasına ait yerinde yansıma eğrisi.....	90

Şekil 4.2	EMC5775 numaralı katkısız InP büyütmesine ait Atomik kuvvet mikroskobu ölçümü. Karekök ortalama yüzey pürüzlülüğü (root mean square surface roughness) değeri 0.186 nm.	92
Şekil 4.3	EMC5775 numaralı katkısız InP büyütmesine ait oda sıcaklığı fotoluminesans ölçümü.	93
Şekil 4.4	InP alttaş (kırmızı) üzerine büyütülen katkısız 2 µm kalınlığındaki InP (mavi) tabakasına ait 2θ/ω HRXRD taraması	93
Şekil 4.5	MOCVD büyütmelelerinde n tipi katkılama için kullanılan SiH ₄ hattının şematik gösterimi	95
Şekil 4.6	SiH ₄ akışının MOCVD ile büyütülen n tipi katkılı InP tabakasına ait külçe taşıyıcı yoğunluğu (kırmızı) ve mobilite (mavi) değişimine etkisi	96
Şekil 4.7	Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan Aixtron marka AIX 200/4 RF-S model yatay akışlı MOCVD reaktörü (üst) ve TÜBİTAK 2214/A Yurtdışı doktora sırası araştırma bursu kapsamında 1 yıl çalışmalarda bulunulan Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu Emcore marka dikey akışlı MOCVD reaktörü (alt).....	98
Şekil 4.8	In _x Ga _{1-x} As büyütmelelerinin optimizasyonu süresinde karşılaşılan başarısız büyütmelelere ait yerinde yansıma ölçümleri.....	100
Şekil 4.9	In _x Ga _{1-x} As büyütmelelerinden önce hem alttaş tan gelecek kusurların yapı içerisine ilerlemesini engellemek hem de büyütme için daha esnek bir ortam ayarlamak için ilk önce aynı sıcaklıkta InP ara tabaka büyütmesi ve daha sonra In _x Ga _{1-x} As büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrisi.....	101
Şekil 4.10	QCL040 numaralı In _x Ga _{1-x} As büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	103
Şekil 4.11	QCL40 numaralı büyütmele için HRXRD taraması.....	103
Şekil 4.12	QCL037 numaralı In _x Ga _{1-x} As büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	104
Şekil 4.13	QCL37 numaralı büyütmele için HRXRD taraması.....	104
Şekil 4.14	QCL36 numaralı In _x Ga _{1-x} As büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	105
Şekil 4.15	QCL36 numaralı büyütmele için HRXRD taraması.....	105
Şekil 4.16	QCL57 numaralı In _x Ga _{1-x} As büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	106
Şekil 4.17	QCL57 numaralı büyütmele için HRXRD taraması.....	106
Şekil 4.18	QCL043 numaralı In _x Ga _{1-x} As büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.....	107
Şekil 4.19	QCL43 numaralı büyütmele için HRXRD taraması.....	107
Şekil 4.20	InP alttaş üzerine MOCVD ile büyütülmüş In _x Ga _{1-x} As alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi ..	108
Şekil 4.21	QCL35 numaralı In _x Ga _{1-x} As alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi. Büyütme süresi 20s.	110
Şekil 4.22	QCL36 numaralı In _x Ga _{1-x} As alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi. Büyütme süresi 60s.	110
Şekil 4.23	QCL37 numaralı In _x Ga _{1-x} As alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi. Büyütme süresi 100s.	111
Şekil 4.24	Toplam III grubu (TMGa ve TMIIn) kaynak akışlarının InGaAs büyüme oranına etkisini.....	113
Şekil 4.25	QCL72 numaralı büyütmele için yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.....	114

Şekil 4.26 QCL72 numaralı büyötmeye ait $2\theta/\omega$ HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	114
Şekil 4.27 QCL73 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	115
Şekil 4.28 QCL73 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	116
Şekil 4.29 QCL74 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	117
Şekil 4.30 QCL74 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	118
Şekil 4.31 QCL75 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	119
Şekil 4.32 QCL75 numaralı büyötmeye ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	119
Şekil 4.33 QCL76 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	120
Şekil 4.34 QCL76 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	120
Şekil 4.35 QCL77 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	121
Şekil 4.36 QCL77 numaralı büyötmeye ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	121
Şekil 4.37 QCL78 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiğı.....	122
Şekil 4.38 QCL78 numaralı büyötmeye ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	122
Şekil 4.39 QCL79 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiğı.....	123
Şekil 4.40 QCL79 numaralı büyötmeye ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	123
Şekil 4.41 InAlAs büyötmelerinde kullanılan AsH ₃ hattının şematik gösterimi	126
Şekil 4.42 QCL86 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	127
Şekil 4.43 QCL86 numaralı büyötmeye ait 200x büyötmeli optik mikroskop görüntüsü ...	128
Şekil 4.44 QCL85 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiğı.....	128
Şekil 4.45 QCL85 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	129
Şekil 4.46 QCL87 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	130
Şekil 4.47 QCL87 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	130
Şekil 4.48 QCL88 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiğı.....	131
Şekil 4.49 QCL88 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi).....	131
Şekil 4.50 QCL109 numaralı büyötmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiğı.....	132

Şekil 4.51 QCL109 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiğı (mavi)	133
Şekil 4.52 QCL79 (mavi), QCL80 (yeşil), QCL81 (kırmızı) ve QCL82 (pembe) numaralı InGaAs büyötmelerine ait AsH ₃ akışı değışiminin yerinde yansıma ölçömlerine etkisi.....	136
Şekil 4.53 QCL79-80 numaralı numunelerin 500x büyötmeli (QCL79 için 1000x ayrıca koyulmuştur) optik mikroskop görüntöleri. Görüntölerdeki kırmızı çemberler mikroskop kaynaklı kusurları göstermektedir.....	137
Şekil 4.54 Artan AsH ₃ akışının (V/III oranı) InGaAs alaşımına ait HRXRD taramalarına etkisi	138
Şekil 4.55 Artan AsH ₃ akışının (V/III oranı) InGaAs alaşımına ait RSM taramalarına etkisi	139
Şekil 4.56 Artan AsH ₃ akışının (V/III oranı) QCL79-82 numaralı InGaAs tabakalarının fotölüminesans karakteristiklerine etkisi. Şekil içindeki grafik elde edilen ışıma piklerinin şiddetinin (mavi) ve pik FWHM değıerlerinin (kırmızı) AsH ₃ akışına göre değıişimini göstermektedir.....	140
Şekil 4.57 Artan AsH ₃ akışının (V/III oranı) QCL79-82 numaralı InGaAs tabakalarının tabaka taşıyıcı yoğunluğına (mavi), özdirenç (kırmızı) ve mobilite (yeşil) değıişimine etkisi.....	141
Şekil 4.58 Artan AsH ₃ akışının HRXRD 2 θ / ω taramaları üzerine etkisinin incelenmesi için yapılan taramalar.....	143
Şekil 4.59 AsH ₃ akışının InAlAs yapısındaki gerilme (kırmızı) ve In atomunun InAlAs yapısına katılma katsayısı (incorporation coefficient) (mavi) ile ilişkisi.....	144
Şekil 4.60 AsH ₃ akışının InAlAs ω (rocking curve) taramalarına ait FWHM değıerlerine etkisi	145
Şekil 4.61 V/III oranı değıişiminin In _x Al _{1-x} As alaşımının 750-1100 nm aralığında oda sıcaklığı fotölüminesans karakteristiğıne etkisi.....	146
Şekil 4.62 Sabit AsH ₃ akışı altında (sabit V/III) değışken SiH ₄ akışının In _x Al _{1-x} As tabakalarına ait 2 θ / ω HRXRD taramalarına etkisi	148
Şekil 4.63 Sabit AsH ₃ akışı (sabit V/III oranı) ile artan SiH ₄ akışının In _x Al _{1-x} As alaşımındaki In oranı (mavi) ve fotölüminesans pik FWHM değıerine (kırmızı) etkisi	149
Şekil 4.64 Sabit AsH ₃ akışı (sabit V/III oranı) ile artan SiH ₄ akışının In _x Al _{1-x} As alaşımının oda sıcaklığı fotölüminesans karakteristiğıne etkisi	150
Şekil 4.65 Sabit AsH ₃ akışı (sabit V/III oranı) ile artan SiH ₄ akışının In _x Al _{1-x} As alaşımının külçe taşıyıcı yoğunluğı (mavi) ve mobilite (kırmızı) üzerine etkisi	151
Şekil 4.66 Artan SiH ₄ akışının n-InGaAs külçe taşıyıcı yoğunluğı (kırmızı) ve mobilite (mavi) değıişimine etkisi	152
Şekil 4.67 AsH ₃ akışının n-InAlAs tabakası HRXRD taramasına etkisi	154
Şekil 4.68 Sabit SiH ₄ akışı altında AsH ₃ akışı değıişiminin (V/III oranı) InAlAs tabakası fotölüminesans karakteristiklerine etkisi	155
Şekil 4.69 Sabit SiH ₄ akışı altında V/III oranı değıişiminin In _x Al _{1-x} As mobilite ve külçe taşıyıcı yoğunluğına etkisi	156
Şekil 4.70 InP altaş üzerine MOCVD ile büyötmölüş ölan In _x Ga _{1-x} As tabakasının enine kesitinin taramalı elektron mikroskobu ile görüntölünmesi ve kalınlık ölçömlü	157
Şekil 4.71 InP altaş üzerine büyötmölüş ölan farklı kalınlıklara sahip InP ve In _x Ga _{1-x} As tabakalarını içeren yapının enine kesitinin taramalı elektron mikroskobu ile görüntölünmesi ve elde edilen kontrast farkından yapılan kalınlık ölçömleri ...	158
Şekil 4.72 InGaAs/InAlAs tabakalarına sahip kuantum çağlayan lazer yapısının aktif bölgisinin geçirimli elektron mikroskobu ile enine kesitinin görüntölünmesi ve	

kalınlık ölçümü. Koyu bölgeler InGaAs tabakalarını açık bölgeler ise InAlAs tabakalarını göstermektedir (Mawst, et al. 2013).....	159
Şekil 4.73 Kalınlık ve büyüme oranını belirlemek amacıyla yapılan süperörgü büyütmelerinin şematik gösterimi. Bekleme süresi boyunca reaktöre herhangi bir 3 grubu kaynak akışı olmamakla birlikte sadece AsH ₃ (AsH ₃ _1 veya AsH ₃ _2) ve taşıyıcı gaz H ₂ akışı sağlanmıştır	161
Şekil 4.74 QCL111 numaralı büyütme için yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık eğrisi (kırmızı)	162
Şekil 4.75 HRXRD tekniği ile epitaksiyel tabakalara ait kalınlıkların hassas bir biçimde belirlenebilmesi için büyütülen QCL111 numaralı InGaAs/InAlAs süperörgü yapısına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen simülasyon eğrisi (mavi)	163
Şekil 4.76 HRXRD tekniği ile epitaksiyel tabakalara ait kalınlıkların hassas bir biçimde belirlenebilmesi için büyütülen QCL112 numaralı InGaAs/InAlAs süperörgü yapısına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen simülasyon eğrisi (mavi)	164
Şekil 4.77 HRXRD tekniği ile epitaksiyel tabakalara ait kalınlıkların hassas bir biçimde belirlenebilmesi için büyütülen QCL113 numaralı InGaAs/InAlAs süperörgü yapısına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen simülasyon eğrisi (mavi)	165
Şekil 4.78 Şekil 4.73 ile gösterilen HRXRD taramasında iki süperörgü piki arasındaki kalınlık piklerini daha net ortaya çıkararak kalınlık hesabı yapabilmek için yapılan dar aralık HRXRD taraması (kırmızı) ve simülasyon eğrisi (mavi)	166
Şekil 4.79 QCL225 numaralı In _{0.53} Ga _{0.47} As/In _{0.52} Al _{0.48} As süperörgülerinden oluşan ve kuantum çağılayan lazer aktif bölgesini oluşturan büyütme için yerinde yansıma ve sıcaklık eğrileri	169
Şekil 4.80 MOCVD sisteminde kurulu bulunan yüksek (AsH ₃ _1) ve düşük (AsH ₃ _2) V/III oranlı tabaka büyütmelerinde kullanılan AsH ₃ hatlarının şematik gösterimi. Standart hidrit hatlarında sadece 2 adet kütle akış kontrolcüsü bulunurken modifikasyon sonrası 4 adet kütle akış kontrolcülü hat eklenmiştir	171
Şekil 4.81 Tabakalar arası bekleme süresi etkisinin araştırılması amacıyla yapılan In _{0.52} Al _{0.48} As/In _{0.53} Ga _{0.47} As süperörgülerinin büyütülmesinde kullanılan gaz valflerinin şematik gösterimi	174
Şekil 4.82 Tek tabaka In _{0.53} Ga _{0.47} As (mavi), In _{0.52} Al _{0.48} As (eflatun) ve In _{0.52} Al _{0.48} As /In _{0.53} Ga _{0.47} As süperörgülerine (yeşil) ait yerinde yansıma ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri	175
Şekil 4.83 QCL119 (kırmızı), QCL120 (mavi) ve QCL123 (yeşil) numaralı numunelere ait 2θ/ω HRXRD taraması. Büyütülen grafik QCL119'a aittir	176
Şekil 4.84 Sıfırıncı mertebe (0 th) süperörgü piki FWHM değeri (mavi) ve süperörgüdeki ortalama In alaşımının (kırmızı) bekleme süresi ile değişimi.	177
Şekil 4.85 QCL119 (kırmızı), QCL120 (mavi) ve QCL123 (yeşil) numaralı numunelere ait 2θ/ω XRR taraması	178
Şekil 4.86 Tabakalar arası bekleme süresinin değişimine karşılık fotoluminesans pik şiddeti (mavi) ve pik FWHM (kırmızı) değerinin davranışı.....	179
Şekil 4.87 Tek tabaka Ga _x In _{1-x} As (a) ve Al _y In _{1-y} As (b) üçlü alaşımları için (kırmızı), kuantum kuyuları için (mavi) ve gerilmiş süperörgü tabakaları için (yeşil) değişen In ve Al alaşım oranlarına göre kritik kalınlığın değişimi (Evans, Allan Joseph 2008) ..	181
Şekil 4.88 Yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip QCL190 numaralı InGaAs büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık eğrisi (kırmızı)	183

Şekil 4.89	Yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip QCL191 numaralı InAlAs büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık eğrisi (kırmızı)	184
Şekil 4.90	Çizelge 4.13 ile verilen değişken III grubu akışının InGaAs (kırmızı) ve InAlAs (mavi) büyütmelelerinde yerinde yansıma eğrilerinde tam bir osilasyon için geçmesi gereken süreye etkisi	184
Şekil 4.91	37-42 sccm aralığında değişen TMIn akışı ile büyütülen InGaAs alaşımlarına ait $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları	185
Şekil 4.92	15-20 sccm aralığında değişen TMAI akışı ile büyütülen InAlAs alaşımlarına ait $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları	186
Şekil 4.93	Gerilme dengeli kuantum çağılayan lazer yapılarının kalınlık ve büyüme oranını belirlemek için yapılan büyütmelelere ait şematik gösterimi	187
Şekil 4.94	Gerilme dengeli kuantum çağılayan lazer yapılarının kalınlık ve büyüme oranını belirlemek için yapılan QCL199 numaralı büyütmeyle ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği	188
Şekil 4.95	Gerilme dengeli kuantum çağılayan lazer yapılarının kalınlık ve büyüme oranını belirlemek için yapılan QCL199 numaralı büyütmeyle ait $2\theta/\omega$ HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için oluşturulan simülasyon (mavi) eğrisi	189
Şekil 4.96	QCL200 numaralı gerilme dengeli kuantum çağılayan lazer yapısının 10 tekrarlı kor bölgesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) ölçümü	191
Şekil 4.97	QCL200 numaralı gerilme dengeli kuantum çağılayan lazer kor bölgesinin 10 tekrarlı yapısının $2\theta/\omega$ HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için oluşturulan simülasyon (mavi) eğrisi	192
Şekil 4.98	Şekil 4.93'de gösterilen HRXRD taramasının $2\theta = 63.1^\circ - 63.7^\circ$ aralığının geniş gösterimi. $\Delta\theta$ süperörgü pikleri arasındaki açıyı, $\Delta\delta$ iki süperörgü piki arasındaki toplam kalınlık piklerinin her biri arasındaki açıyı temsil etmektedir. 1-10 arasındaki rakamlar ise toplam kalınlık piklerini göstermektedir	193

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1	Eldivenli kutudaki filtrelerin temizlenmesi amacıyla yapılan rejenerasyon işleminin adımları	57
Çizelge 4.1	SI-InP alttaş üzerine büyütülen katkısız InP büyütme parametreleri	91
Çizelge 4.2	n-InP yelek tabakasında katkılama çalışmaları için yapılan büyütmelele ait büyütme detayları ve Hall ölçümü ile elde edilen külçe taşıyıcı yoğunluğu ve Hall mobilitesi değerleri.....	94
Çizelge 4.3	Büyütmelerin tekrar edilebilirliğini ve yerinde yansıma ölçümleri ve HRXRD taramalarından elde edilen kalınlık ölçümlerini senkronize ederek büyütmelere devam etmek açısından yapılan büyütmelere ait parametreler.....	109
Çizelge 4.4	Büyüme oranı çalışmasına ait örnekler için büyütme detayları.....	112
Çizelge 4.5	InGaAs büyüme oranı çalışmasına ait örnekler için yerinde yansıma ölçümlerinden elde edilmiş büyüme oranları ve HRXRD taramaları ve simülasyonlarından elde edilen alaşımlardaki indiyum oranları.....	124
Çizelge 4.6	Örgü uyumlu InAlAs büyütme çalışmalarına ait büyütme parametreleri.....	126
Çizelge 4.7	SI-InP alttaş üzerine büyütülen katkısız InGaAs tabakalarına V/III oranı etkisinin araştırılması için yapılan büyütmelere ait parametreler	135
Çizelge 4.8	InAlAs büyütmelerine V/III oranının etkisini araştırmak için yapılan büyütmelere ait detaylar.....	142
Çizelge 4.9	Sabit AsH ₃ akışı altında (sabit V/III) SiH ₄ akışının etkisini araştırmak için yapılan büyütmelere ait büyütme detayları.....	147
Çizelge 4.10	Sabit SiH ₄ akışı altında AsH ₃ akışının etkisini araştırmak için yapılan büyütmelere ait büyütme detayları	153
Çizelge 4.11	Kalınlık ve büyüme oranını HRXRD tekniğiyle ölçebilmek için yapılan QCL111-113 numaralı süperörgü büyütmelerine ait parametreler.....	160
Çizelge 4.12	QCL111-113 örneklerine yapılan HRXRD taramaları ve Denklem [4.3] vasıtasıyla elde edilen periyot ve toplam kalınlık değerleri.....	166
Çizelge 4.13	Yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip InGaAs ve InAlAs büyütmelerine ait büyütme parametreleri	182
Çizelge 4.14	Gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapılarındaki tek tabakaların kalınlık ve büyüme oranını HRXRD tekniğiyle ölçebilmek için yapılan süperörgü büyütmelerine ait parametreler.....	187

SİMGELER DİZİNİ

a	Örgü sabiti, nm
A	Kesit alanı, cm ²
d_{hkl}	hkl Miller indisleri ile tanımlanan düzlemler arası mesafe, nm
e	Elektron yükü, C
E_g	Yarıiletken bant aralığı, eV
ε₀ε_r	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
hkl	Miller indisleri
k_s	Giden x-ışını dalga vektörü, nm ⁻¹
k₀	Gelen x-ışını dalga vektörü, nm ⁻¹
L	Kesit uzunluğu, cm
n	Elektron taşıyıcı yoğunluğu, cm ⁻³
p	Boşluk taşıyıcı yoğunluğu, cm ⁻³
P, P₀	Metalorganik kaynağın herhangi bir T ve T ₀ sıcaklığındaki buhar basıncı, mbar
q	Momentum geçiş vektörü, nm ⁻¹
R	Direnç, ohm
r_v	V grubu kaynakların akışı, mol/dk
r_{III}	III grubu kaynakların akışı, mol/dk
T, T₀	Metalorganik kaynağın tutulduğu sıcaklıklar, C°
Γ	Valans bandının tepe noktası, eV
θ	Bragg açısı, derece
ω	Offsetli Bragg açısı, derece
σ	İletkenlik, S
μ_n	Elektron mobilitesi, cm ² /Vs
μ_p	Boşluk mobilitesi, cm ² /Vs
φ	Schottky engel yüksekliği, eV
V	Uygulanan potansiyel fark, V
Λ	XRD taramasından elde edilen periyot, nm
Δθ	XRD taramasında süperörgü pikleri arasındaki uzaklık, derece
δθ	XRD taramasında kalınlık pikleri arasındaki uzaklık, derece
λ	X-ışını dalgaboyu, nm

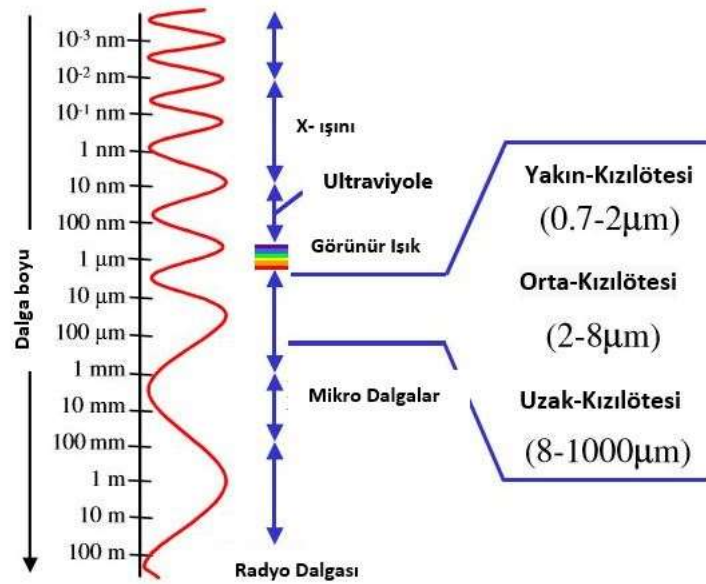
KISALTMALAR DİZİNİ

AlAsSb	:	Aluminum Arsenic Antimonide
AlGaAs	:	Alumium Gallium Arsenic
AlSb	:	Aluminum Antimonide
AlP	:	Aluminum Phosphide
AsH₃	:	Arsine
bcc	:	Body Centered Cubic
CBr₄	:	Carbon Tetrabromide
CQD	:	Kuantum Cihazları Merkezi
Cp₂Mg	:	Bis(cyclopentadienyl)magnesium
CÜNAM	:	Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi
CV	:	Kapasitans Voltaj
CVD	:	Kimyasal Buhar Depolama
DC	:	Doğru Akım
DEZn	:	Diethylzinc
DOR	:	Çift Conta
F_B	:	Manyetik alan kuvveti
F_E	:	Elektrik alan kuvveti
fcc	:	Face Centered Cubic
ECV	:	Elektrokimyasal Kapasitans Voltaj
FWHM	:	Yarı Yükseklik Tam Genişliği
GaAs	:	Galium Arsenic
GaSb	:	Galium Antimonide
GMC	:	Gaz Karıştırma Kabini
HRXRD	:	Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı
InAlAs	:	Indium Aluminum Arsenic
InAs	:	Indium Arsenic
InGaAs	:	Indium Galium Arsenic
InGaAsP	:	Indium Galium Arsenic Phosphide
InP	:	Indium Phosphide
InSb	:	Indium Antimonide
LP	:	Düşük Basınç
MBE	:	Moleküler Demet Epitaksi
MFC	:	Kütle Akış Kontrolcüsü
MO	:	Metal Organik
MOCVD	:	Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama
MOVPE	:	Metal Organik Buhar Fazı Epitaksi
MQW	:	Çoklu Kuantum Kuyusu
OMCVD	:	Organo-Metalik Kimyasal Buhar Depolama
OMVPE	:	Organo-Metalik Buhar Fazı Epitaksi
PCU	:	Basınç Kontrol Ünitesi
PC	:	Basınç Kontrolcüsü
PH₃	:	Phosphine
PL	:	Fotoluminesans
QCL	:	Kuantum Çağlayan Lazer
RSM	:	Ters Uzay Haritalama
RA	:	Yansıma Dağınlığı
RDS	:	Yansıma Farkı Spektroskopisi

RF	:	Radyo Frekans
RHEED	:	Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı ve Yansıması
sc	:	Simple Cubic
SCCM	:	Dakikada Standart Santimetreküp
SCS	:	Güvenlik Kontrol Sistemi
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
SL	:	Süperörgü
THz	:	Terahertz
TMGa	:	Trimethylgallium
TMAI	:	Trimethylaluminum
TEGa	:	Triethylgallium
TMIIn	:	Trimethylindium
TEM	:	Geçirimli Elektron Mikroskobu
VPE	:	Buhar Faz Epitaksi
VH	:	Hall Voltajı
Vhh	:	Ağır boşluk bandı
Vlh	:	Hafif boşluk bandı
XRD	:	X Işını Kırınımı
XRR	:	X Işını Yansıması

1. GİRİŞ

Transistörler ve yarıiletken tabanlı elektronik devre elemanlarının özellikle bilgisayar çipleri için geliştirilmesi ile son elli yıldır dünya çok hızlı bir biçimde değişmektedir. En az elektronik yapı elemanları kadar önemli olan ışık yayan ve algılayan yarıiletken tabanlı optoelektronik aygıtlar ile bu değişim tahmin edilemez bir hızla ilerlemektedir. Yarıiletken tabanlı optoelektronik aygıtlar olmadan barkod tarayıcıları kullanılamaz, lazer yazıcılar ile çıktı alınamaz, internet iletişimi mümkün olamaz, CD (compact disc) veya DVD (digital versatile disc) izlenip dinlenemezdi. Artık günümüzde yarıiletken tabanlı optoelektronik cihazlar enerji verimli LED (light emitting diode) lambaları, yüksek çözünürlüklü ve hafif görüntüleme cihazları, cep telefonlarındaki kompakt kameralar ve birçok cihazda kullanılmaktadır. Çevremizde en çok kullanılan ve dikkat çeken görünür bölge cihazlarına ek olarak yarıiletken tabanlı optoelektronik cihazlar mikrodalga, kızılötesi, mor ötesi ve hatta x ışını cihazlarını içererek neredeyse tüm elektromanyetik spektrumu (Şekil 1.1) kapsayacak şekilde genişletilebilir.



Şekil 1.1 Elektromanyetik spektrum ve kızılötesi (yakın, orta ve uzak) bölgenin spektrumdaki yerinin şematik gösterimi (Evans, Allan Joseph 2008).

Birçok insan kızılötesi yarıiletken optoelektronik cihazların hayatlarındaki önemli rollerin farkında olmayabilirler. Bunlara örnek olarak internetin fiber optik

omurgasının yakın kızılötesi lazerler ile güçlendirilmesi, elektronik cihaz kontrolü için kızılötesi LED'lerin kullanılması, çevremizdeki tüm güvenlik kameralarında, hareket sensörlerinde ve hatta termometrelerde bile kızılötesi sensörlerin kullanılması verilebilir. Askeri alanlarda ise kızılötesi teknolojiler lazer tabanlı hız sensörlerinde, ısı güdümlü füzelerde ve gece görüntüleme sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kızılötesi yarıiletken optoelektronik cihazlar kimyasal spektroskopi (NASA'nın gezici Mars robotu toprağın ve minerallerin bileşiminin araştırılması için), uzayın astronomiksel görüntülenmesi (Deep Impact, Hubble ve 2018 yılında görüntü alınması beklenen James Webb teleskopları) gibi bilimsel alanlar için de oldukça önemlidir.

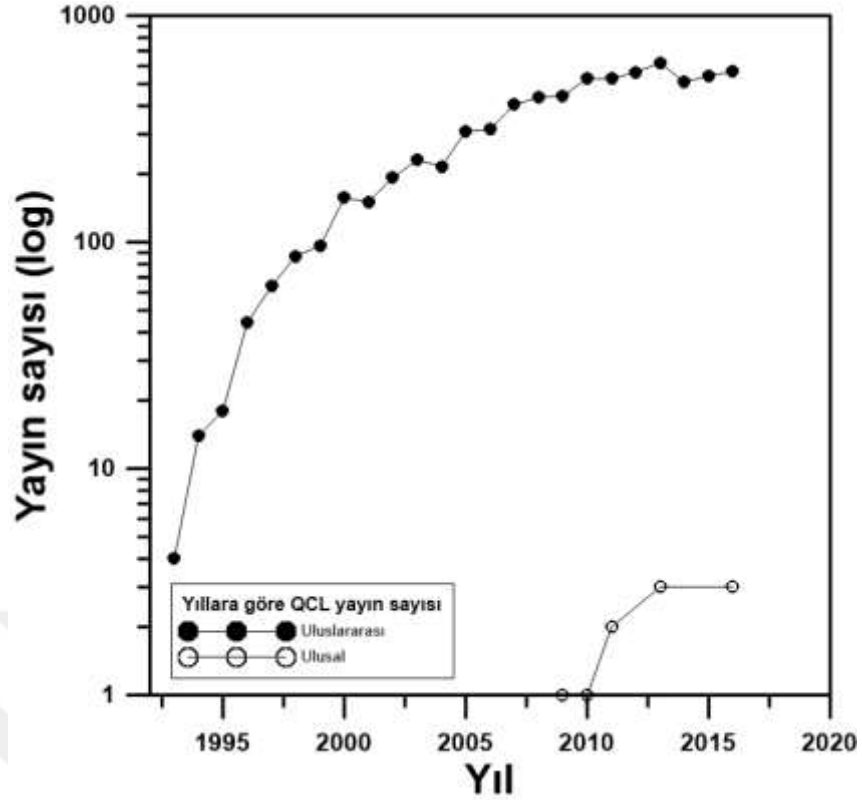
Geçtiğimiz yarım yüzyıl içerisinde geliştirilen en önemli optoelektronik cihazlardan biri hiç şüphesiz lazerdir. Lazerler bugünkü yoğun kullanımına rağmen barkod tarayıcıların icadına kadar günlük hayatta bilinen herhangi bir uygulama alanına sahip değildir (S.A.Brown 1997), (B.Nelson 1997). Bu zamandan sonra lazerlerin ve diğer optoelektronik cihazların kullanımı ciddi bir şekilde artmıştır. Örneğin sadece 2015 yılında dünya genelinde ortalama 40 milyon lazer yazıcı satışı yapılmıştır (Wirth 2015). 2016 yılında toplam lazer satışının ise 10.5 milyar dolar tutarında ve bu satışın %43'ünün diyot lazerlere ait olması beklenmektedir (Overton, ve diğerleri 2016).

İlk lazer Theodore Maiman tarafından 1960 yılında yapılmıştır. Bu lazer katı hal yakut tabanlı olup uyarma kaynağı olarak da xenon flaş lamba kullanmıştır (Maiman 1960). Bu keşfi hızlı bir şekilde helyum ve neon gazları kullanılarak ilk gaz lazerin keşfi takip etmiştir (Bennett, Javan ve Herriot, Gas Optical Maser 1964), (Bennett, Background of an inversion: the first gas laser 2000). Yarıiletken tabanlı ilk lazer ise Robert Hall tarafından GaAs tabanlı yarıiletken lazer olarak üretilmiştir ve ışınım dalga boyu yakın kızılötesi civarındadır (Hall, ve diğerleri 1962). Bununla birlikte görünür ışık yayan ilk yarıiletken lazer aynı yıl Nick Holonyak tarafından gösterilmiştir (Holonyak ve Bevacqua 1962). Sekiz yıl aradan sonra Zhores Alferov ve ekibi ile Hayashi ve ekibi daha gelişmiş heteroeklemler vasıtasıyla elde edilen ilk yarıiletken lazeri keşfettiler (Alferov, ve diğerleri 1970), (Hayashi, ve diğerleri 1970). Alferov ve ekibi çalışmalarını diğer gruptan bir ay daha önce yayınladıkları için bu konudaki kilometre taşı olarak kendileri görülmektedir.

Şu anda yarıiletken tabanlı lazerlerin çok büyük bir çoğunluğu periyodik cetvelin III ve V numaralı kolonlarındaki elementlerden oluşan direk band aralıklı InP, GaAs,

InSb, GaSb, InGaAs, AlGaAs ve InGaAsP gibi ikili bileşik, üçlü ve dörtlü alaşımlardan yapılmaktadır. Bununla birlikte bir miktarı da periyodik cetvelin II, IV ve VI grubunda bulunan elementler vasıtasıyla oluşturulmaktadır. Yarıiletken lazerler tarihsel olarak görünür bölge ve yakın kızılötesi bölgenin belirli kısımlarında bazı limitlere sahiptirler, çünkü lazer ışığının dalga boyunu yarıiletken malzemenin doğal bant aralığı belirlemektedir.

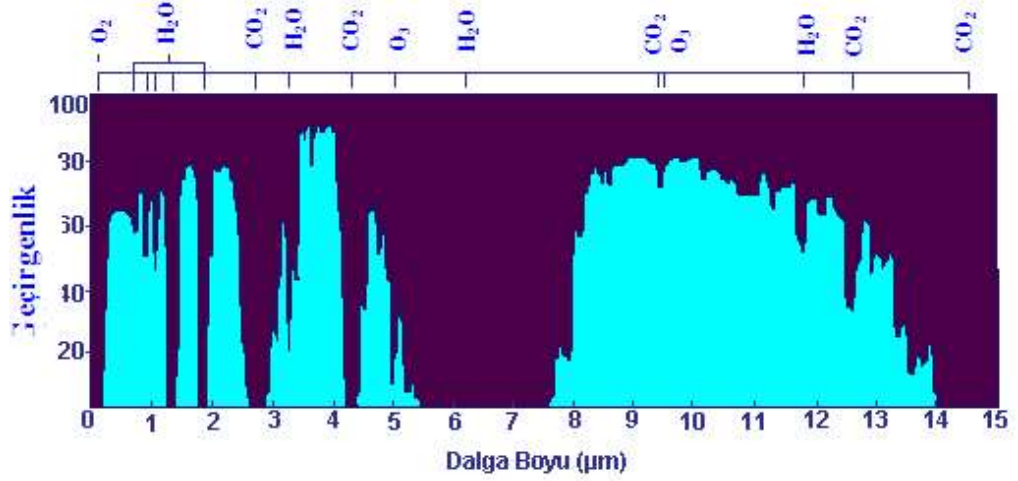
1971 yılının başlarında Kazarinov ve Suris bu bant aralığı sınırlamasının yarıiletken malzemede nanometre mertebesindeki ince tabakaların kuantum kuşatma (quantum confinement) ile aşılabileceğini öne sürerek pn eklemine ihtiyaç olmadan daha uzun kızılötesi dalga boylarına ulaşılabilceğini öne sürdüler (Kazarinov ve Suris 1971). 23 yıl deneysel olarak gerçekleştirilemeyen bu öneri 1994 yılında Bell laboratuvarlarında Capasso ve arkadaşları tarafından MBE (Molecular Beam Epitaxy) tekniği yardımıyla Kuantum Çağlayan Lazer (Quantum Cascade Laser-QCL) isimli süperörgülerden oluşan yapı ile ispatlanmıştır (Faist, Capasso, ve diğerleri 1994). Bu çalışmada üretilen lazerin kriyojenik sıcaklıklarda 4.8 μm dalga boyunda ışınım yaptığı ispatlanmış olup Google Scholar veri tabanında 4700'ün üzerinde atıfa sahiptir (Url-2 2017). Ayrıca Web of Science tabanında sadece “quantum cascade laser” anahtar kelimeleri ile taratılarak elde edilen veriler yardımıyla çizilen grafikten (Şekil 1.2) kuantum çağlayan lazer çalışmalarının bu yıldan sonra büyük bir artış gösterdiği ve bilimsel olarak hala aktif bir araştırma alanı olduğu ancak ülkemizde çalışmaların yeni sayılabilecek seviyede olduğu görülmektedir.



Şekil 1.2 Yıllara göre kuantum çağılayan lazerler ile ilgili yapılan uluslararası ve ulusal bilimsel yayın sayıları.

1.1. Orta Kızılötesi Dalgaboylu Lazerlerin Uygulama Alanları

Orta kızılötesi bölge elektromanyetik spektrumun (Şekil 1.3) $\sim 3\text{-}13\ \mu\text{m}$ dalga boyu aralığını içeren kısımdır. Bu bölgede birçok molekülün C-H, N-H ve O-H bağ eksen boyunca atomlar arası mesafe esneme titreşimi mevcuttur ve bu titreşimler moleküllerin algılanmasında karakteristik soğurma spektrumu vermektedirler (Lu, ve diğerleri 2014). Dolayısıyla elektromanyetik spektrumun orta kızılötesi bölgesi birçok molekül için spektroskopik parmak izi bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca bu bölgede bulunan bazı kısımlardan ışınım herhangi bir zayıflamaya uğramadan geçebilir. Spektrumun bu bölgeleri atmosferik pencereler olarak adlandırılmaktadır. Orta kızılötesi bölge $3\text{-}5\ \mu\text{m}$ ve $8\text{-}12\ \mu\text{m}$ aralıklarında 2 adet atmosferik pencereye sahiptir.



Şekil 1.3 Işınımınların ciddi miktarda zayıflamaya uğramadan geçebildiği atmosferik pencerenin gösterimi. Orta kızılötesi bölgede 2 adet (3-5 μm ve 8-12 μm) atmosferik pencere bulunmaktadır. Şekilde gösterilen molekül notasyonları spesifik dalgaboylarının o molekülün soğurma dalgaboyuna denk geldiğini göstermektedir (Bayram 2016).

Yukarıda bahsedilen özellikleri sayesinde orta kızılötesi bölge cihaz uygulamaları için oldukça çekicidir. Bu sebeple bu bölümde orta kızılötesi dalga boyuna sahip lazerlerin ve özellikle bu bölgede çalışan kuantum çağlayan lazerlerin uygulama alanlarından bahsedilecektir.

Orta kızılötesi lazerlerin ilk ve en yaygın uygulaması soğurma spektroskopisi ve kimyasal algılamadır. Numunenin kimyasal kompozisyonunu tam olarak belirlemek ya da kimyasal silah, patlayıcı ve zehirli madde yapımında kullanılan bazı kimyasalların madde içindeki izlerini algılamak birçok bilimsel, endüstriyel ve güvenlik uygulamaları için oldukça önemlidir (Wagner, ve diğerleri 2004). Ayrıca ilgilenilen kimyasalların zehirli veya insan sağlığı için tehlikeli olması durumunda bu kimyasalların güvenli bir uzaklıktan gözlenmesi ve algılanması gerekmektedir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4 Kızılötesi lazerler yardımıyla uzaktan algılama optik sistemlerin askeri uygulama alanına ait örnek (a), ve uzaktan algılamalı çevre kirliliği kontrolüne örnek (b) (Evans, Allan Joseph 2008).

Tüm moleküller atomların dizilimi ve kimyasal bağları nedeniyle olası birçok titreşim modlarına sahip olduklarından soğurma spektroskopisi (absorption spectroscopy) oldukça önemli bir tekniktir. Titreşen moleküller belirli bir enerji (bu enerjinin belirli bir dalga boyunun soğurulduğu bölgeye denk gelmesi koşuluyla) ile uyarıldıklarında bir moddan (titreşim frekansı) başka bir moda geçiş yaparlar. Kullanılan lazerin ışıyım dalga boyu ayarlanarak moleküler titreşimlerin soğurma ve geçirme spektroskopisi incelenir ve kimyasal kompozisyon ve konsantrasyon kolaylıkla belirlenebilmektedir. Orta kızılötesi bölge bu uygulama için oldukça çekicidir çünkü bu bölge her bir bağ konfigürasyonu için uygun dalga boyunu içerir ve dolayısıyla her bir moleküle ait optiksel parmak izi kolaylıkla elde edilebilir. Bugün var olan spektroskopi sistemlerinin büyük çoğunluğu kızılötesi ışıyım elde etmek için lazer yerine geniş bant aralıklı termal kaynaklar kullanmaktadırlar. Geniş bant aralıklı sistemler sürekli bir şekilde siyah cisim ışıması yaydıklarından her bir dalga boyunda düşük güç üretirler dolayısıyla uzaktan algılamada ve düşük konsantrasyonlu kimyasalların algılanmasında çok iyi sonuç veremezler. Son yıllarda aşırı hassas algılama için kızılötesi optik teknikler dar bant aralıklı orta kızılötesi lazerler kullanarak milyarda bir hassasiyete sahip sistemler geliştirmiştir (Dumitras, Giubileo ve Puiu 2005), (Besson, Schilt ve Thevenaz 2005).

Orta kızılötesi lazerlerin önemli ikinci uygulama alanı ise tıptır. Bu kısımda orta kızılötesi lazerlerin tıp alanında kullanımına yönelik birkaç örnek verilecektir. Kozmetik cerrahide dövme silinmesi, diş minesinin ağartılması, lazer ile göz ameliyatları bunlardan sadece bilinen ve popüler olan birkaçıdır. Son yıllarda orta kızılötesi lazerler ile ortaya çıkan yeni medikal lazer uygulama alanları mevcuttur.

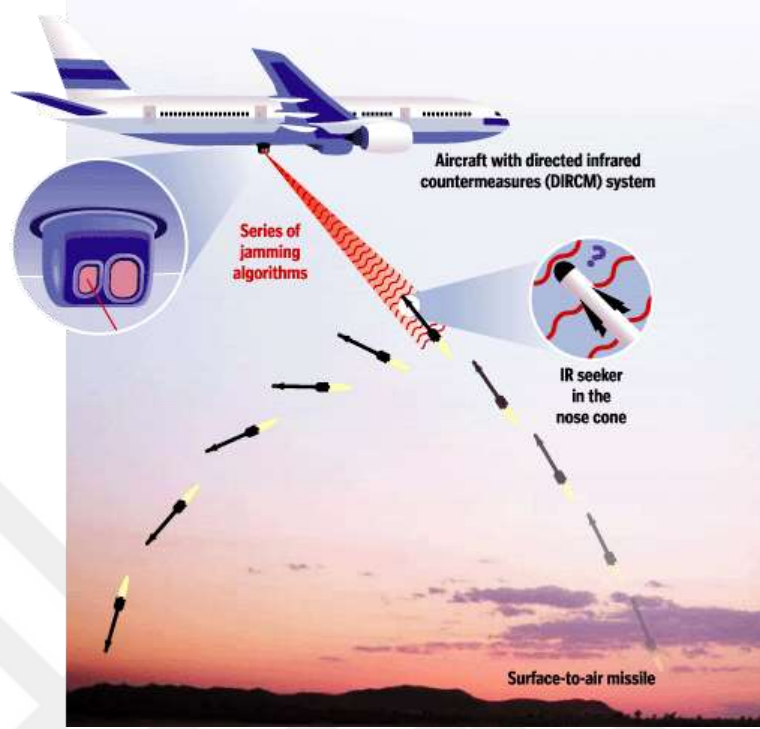
Bunların en önemlilerinden bir tanesi müdahalesiz (non-invasive) kanser ve diğer hastalıklarının erken teşhisinde insan nefesindeki aerosol (bir katının veya bir sıvının gaz ortamı içerisinde dağılması) haline getirilmiş parçacıkların gözlenmesi ve analizidir (Lambrecht, ve diğerleri 2006). Orta kızılötesi lazerlerin başlangıç demonstrasyonlarından olan diğer bir müdahalesiz teknik ise glikoz görüntülemidir (Olesberg, ve diğerleri 2005). Orta kızılötesi lazerlerin gelecek vaat eden bir uygulaması da doku hedefleme için kullanılmasıdır. Bu uygulamada dokunun belirli bir bölgesi analiz için uyarılır, görüntülenir veya kaldırılır. Bu teknoloji ve artan görüntüleme sistemleri ile cerrahi müdahalelerde sadece hastalıklı dokulara odaklanıp çevresindeki dokulara zarar verilmemektedir. Orta kızılötesi lazerler ile bu teknik kavramın ispatı olarak son yıllarda serbest elektron lazeri ile Vanderbilt Üniversitesinde beyin ameliyatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.5). (Salisbury 2001)



Şekil 1.5 Vanderbilt Üniversitesinde orta kızılötesi lazer ile gerçekleştirilen beyin ameliyatı (Salisbury 2001).

Orta kızılötesi lazer uygulamalarının önemli üçüncü alanı ise askeri ve savunma sistemleridir. Kızılötesi sistemlerin gelişmesi ile ısı güdümlü silah teknolojisi de gelişmektedir. Gelişen silah teknolojisine karşılık özellikle uçaklarda bu silahların hedef belirleme sistemlerinin yanlış yönlendirilmesi veya frekanslarının karıştırılması için orta kızılötesi sistemler kullanılmaktadır (Fang, ve diğerleri 2013). Kızılötesi karşı atak sistemleri uçağı ısı güdümlü silahlardan korumak için ilk önce tehdidi algılar daha

sonra ise kullandığı orta kızılötesi lazer sistemleri ile savunmaktadır (Şekil 1.6) (Url-1 2017).

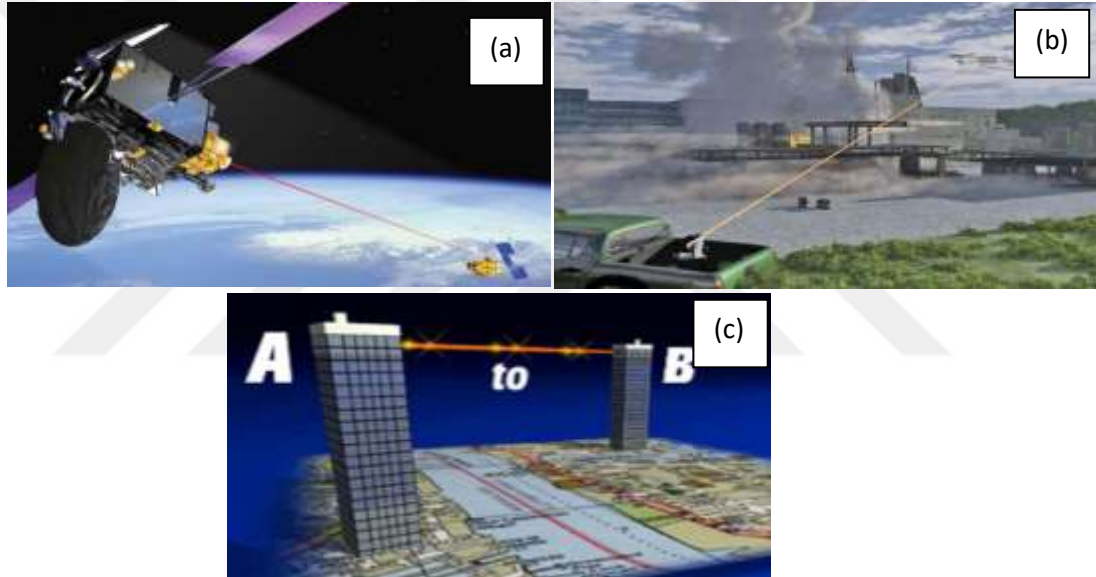


Şekil 1.6 Orta kızılötesi lazer sistemleri ile ısı güdümlü tehditlerin uzaklaştırılması (Url-1 2017).

Dünyada şu anda kullanılan uçak sayısı göz önüne alındığında kızılötesi karşı atak sistemleri ile birlikte kullanılmak üzere çok yüksek kapasitede orta kızılötesi lazer kaynaklarına ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca uçaklar kapasite olarak çok dar olması ve hem güç hem de ağırlık sınırlaması sebebiyle kompakt ve verimli lazer kaynaklarına ihtiyaç duymaktadırlar. Sonraki bölümlerde tartışılacak olan diğer sistemler boyutları, ağırlıkları, güç ihtiyaçları ve soğutma ihtiyaçları ve ışıma dalga boylarının aralığı gibi birçok sebepten dolayı makul bir seçim olmamaktadırlar. Bununla birlikte kuantum çağılayan lazerler tüm bu gereklilikler dikkate alındıklarında var olan kaynaklara göre mükemmel bir aday olarak görülmektedir.

Orta kızılötesi lazer kaynaklarının dördüncü olarak kullanılabilmeye aday en önemli alan ise serbest uzay iletişimidir (free space communication). Fiber, kablo tabanlı ve radyo iletişim teknolojileri ile kıyaslandığında serbest uzay optik iletişimi birçok avantaj sağlamaktadır. Kablo tabanlı iletişim yollarının kazılması ve altyapısının oluşturulması gibi birçok pahalı hizmetlere ihtiyaç duyarken serbest uzay iletişimi açık görüş hattı (line of sight) teknolojisine dayandığından kurulumu için minimum maliyet

ve zaman gerekmektedir. Taşınabilirlik ve minimuma düşürülmüş altyapı maliyetleri göz önüne alındığında özellikle geçici bağlantılar için oldukça önemli ve pratiktir. Geleneksel radyo frekans kablosuz iletişim sistemleri ile karşılaştırıldığında orta kızılötesi lazer tabanlı sistemler daha geniş bant aralığı, istisnai bir yönlülük ve sinyal görünmez olduğundan demetin gerçek yolu bilinmediği sürece kesmek çok zor olduğundan güvenlik gayet yüksektir. Mevcut ticari serbest uzay iletişim sistemleri yakın kızılötesi ve görünür bölgede yapılmaktadır ki hava durumuna karşı hassasiyet ve havadaki duman, sis ve kirli havadaki parçacıklardan saçılma gibi durumlar dolayısıyla servis problemi yaşanmaktadır. Orta kızılötesi serbest uzay teknolojisi 3-5 μm ve 8-13 μm atmosferik pencerelerindeki yüksek geçirgenlik avantajıyla tasarlanmıştır (Majumdar ve Ricklin 2007).



Şekil 1.7 Serbest uzay iletişiminin kullanım alanlarına örnekler uydular arası iletişim (a), hareketli çizimler arası iletişim (b), kalabalık şehirdeki binalar arası iletişim (c).

1.2. Mevcut Orta Kızılötesi Lazerler

Mevcut orta kızılötesi lazerler tasarımlarına ve çalışma prensiplerine göre birçok farklı gruba ayrılmasına rağmen en genel olarak gaz, katı ve yarıiletken lazerler olmak üzere 3 gruba ayrılırlar. Gaz tabanlı lazer kaynaklarında ışık elektrik alan vasıtasıyla uyarılan gaz moleküllerinin geçişleri ile üretilir. Orta kızılötesi bölgede ışıma yapan en genel gaz lazerler 9.4 μm ve 10.6 μm civarında ışıma yapan CO_2 ve 5.1 μm civarında ışıma

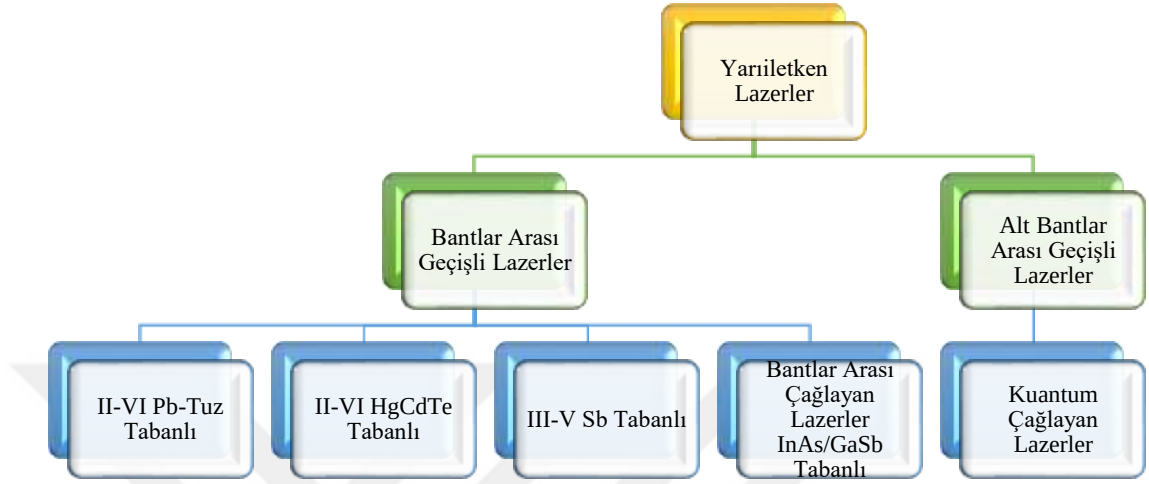
yapan CO lazerlerdir (Duarte 1995). CO₂ lazerler keşiflerinden bu yana çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar (C. Patel 1964). Bu lazerler çok yüksek güç üretebildiklerinden endüstriyel uygulamalar için de oldukça uygundurlar.

Katı hal lazerler tasarım olarak gaz lazerlerden farklı olarak ışık üretmek için gaz yerine katı kristal kullanırlar (Koechner 2006), (Denker ve Shklovsky 2013). Katı hal lazerlerde yüksek enerjili fotonlar kristale gönderilir ve malzemedeki lineer olmayan davranıştan dolayı fotonlar küçük enerjilere bölünürler.

Katı hal ve gaz lazerlerde üretilen lazer ışığının dalga boyu kullanılan gaz ve kristal ile belirlenir. Bu iki tip lazerden de tipik olarak çok yüksek çıkış gücü elde edilebilmektedir fakat bu lazerler tüm uygulamalar için ideal değildirler. Örneğin gaz lazerlerin ışıyım dalga boyu aralığı ve ayarlanabilirliği diğer lazerlerle karşılaştırıldığında oldukça sınırlıdır. Aynı zamanda sağlamlık ya da taşınabilirlik gerekli olduğunda kırılğan tüpler, kristaller ve aynalar gibi malzemeler içerdiğinden ve bu malzemeler rutin olarak bakıma ihtiyaç duyduklarından çok istenilen lazerler değildirler. Ayrıca bu tip lazerler yüksek voltaj güç üniteleri ile çalıştıklarından bu üniteler pahalı, masraflı ve ağır olduklarından taşınabilirlik açısından pratik ve kullanışlı değildir. Taşınımı zorlaştıran diğer bir husus ise katı hal lazerler lazer ışığı üretebilmek için ek bir pompa lazere ihtiyaç duymaktadırlar ve bu lazer hassas bir biçimde odaklanmış optik bileşenlere sahiptir ki tüm bu malzemeler kullanılan sistemin hacmini büyüterek taşınımı zorlaştırır.

Üçüncü. tip lazerler ise yarıiletken lazerlerdir. Yarıiletken lazerlerin en büyük avantajı oluşturulan ayna yüzeyler ile birlikte kavite boyutlarının 0.1-1mm² civarında olmasıdır. Ayrıca kullanılan materyaller iletken oldukları için elektrik akımı basit bir devre yardımıyla çalıştırılabilir. Lazerin toplam boyutu ise kavite boyutundan çok büyük değildir. Yarıiletken lazerler günümüzde CD ve DVD oynatıcıların, lazer işaretleyicilerin ve hatta telekomünikasyonun bel kemiğini oluşturmaktadır. Yarıiletken lazerler boyut olarak küçük olduğu gibi alttaşı boyutunda büyütme ve proses teknolojisi nedeniyle maliyeti de düşüktür. Ayrıca yarıiletken lazerler modern elektronik devrelere kolayca entegre edilebilir. Özellikle III-V grubu malzemeler doğal bir sertliğe sahip olduğundan ve küçük boyut avantajından çok sağlamdırlar. Yarıiletken lazerler katı hal ve gaz lazerlerdeki gibi dış aynalar içermezler ve güç gereksinimi açısından da diğer tip lazerlere göre daha avantajlıdır.

Orta kızılötesi bölgede bulunan yarıiletken lazerlerin birçok alt grubu bulunmaktadır ve bu grupların sınıflandırılması genel olarak Şekil 1.8 ile verilmiştir. Bu alt sınıflar en genel anlamda bantlar arası ve alt bantlar arası geçişli lazerler olarak kategorize edilmektedir. Kuantum çağlayan lazerler alt bantlar arası geçişli lazerler sınıfına aittir.



Şekil 1.8 Orta kızılötesi bölgede ışıyım yapan yarıiletken lazerlerin sınıflandırılması.

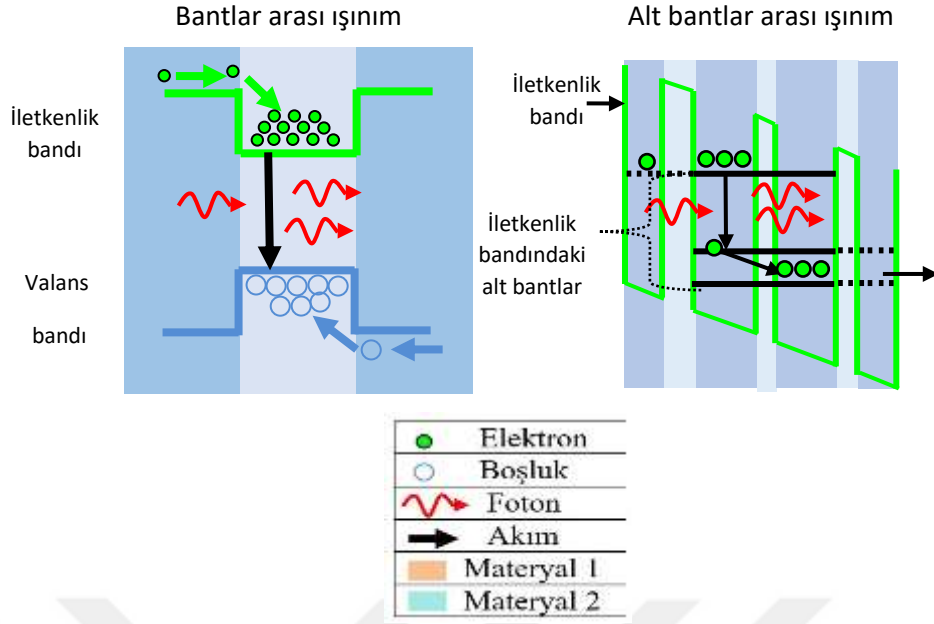
Kuantum çağlayan lazerler haricindeki çoğu yarıiletken lazer ışık üretmek için yarıiletken malzemenin bant aralığı boyunca elektron ile boşluğun yeniden birleşme prosesinden faydalanırlar. Şekil 1.8 incelenecek olursa orta kızılötesi bölgede birçok yarıiletken lazer olmakla birlikte tüm dalga boyları için performansları aynı değildir. Örneğin Pb-tuz tabanlı (Feit, ve diğerleri 1996), Sb tabanlı (Wu, ve diğerleri 1999) ve InAs/GaSb tabanlı (Olafsen, ve diğerleri 1998) lazerler 2-4 μm dalga boyu aralığında en yüksek çıkış gücü ve en yüksek çalışma sıcaklığı ile ışıyım yaparlar. Dolayısıyla bu lazerler çalışabilmek için kriyojenik soğutmaya ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca bu cihazlarda düşük malzeme düzgünlüğü (uniformity), büyütme ve proses teknolojisindeki problemlerin yanı sıra yüksek etkin kütle gibi temel malzeme tabanlı sıkıntılarda bulunmaktadır. Dolayısıyla tüm bu problemler çalışma sıcaklığını yükseltirken güç dönüşüm verimliliğini de düşürmektedir.

Yarıiletkenin iletkenlik ve valans bantları arasındaki enerji farkından yararlanarak ışık yayan yarıiletken lazerlerden farklı olarak kuantum çağlayan lazerler iletkenlik bandındaki alt enerji seviyeleri arasındaki elektron geçişlerinden yararlanır. Alt bantlar arası proses sadece boşluklara göre daha az kütleli ve dolayısıyla daha hızlı elektronları kullanır ve böylece yüksek sıcaklıkta bantlar arası lazerleri sınırlandıran ışımasız Auger etkisini elimine eder. Ayrıca alt bantlar arası geçişler ilgili yarıiletken

malzemenin bant aralığında bağımsız olarak ışınlım dalga boyunu değiştirilebilmesine olanak sağlar. Bu durum asıl olarak modern epitaksiyel büyütme teknikleri yardımıyla tabaka kalınlıklarının çok hassas biçimde kontrol edilebilmesi ile mümkün kılınabilmektedir. Diğer yarıiletken lazerler ile karşılaştırıldığında kuantum çağlayan lazerler geniş bir dalga boyu aralığında oda sıcaklığında yüksek güç üretebilen tek cihazdır. Yani tipik bir kuantum çağlayan lazer soğutma ihtiyacı olmadan ve kullanılan cihaz teknolojisi değiştirilmeden birçok alana uygulanabilir.

1.3. Kuantum Çağlayan Lazerler

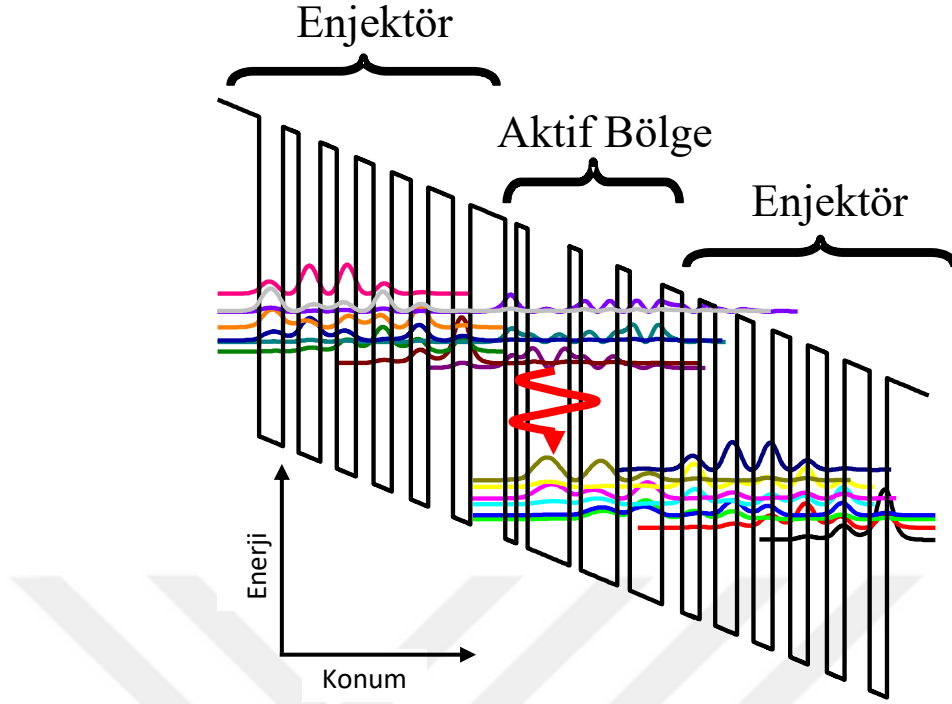
Kuantum çağlayan lazerler birçok yarıiletken lazerden farklı olarak ışık oluşturmak için elektron ve boşluk çiftine değil sadece elektronlara ihtiyaç duyan tek kutuplu (unipolar) bir lazerdir. Böylece daha önce de kısmen açıklandığı gibi kuantum çağlayan lazerler klasik yarıiletken lazerlerde olduğu gibi yarıiletkenin enerji bant aralığı vasıtasıyla birleşen elektron boşluk çifti yerine iletkenlik bandındaki elektronların alt bant geçişleri prensibini kullanmaktadır. Şekil 1.9 bantlar arası geçişlerden yararlanan klasik yarıiletken lazerlerin (a) ve alt bantlar arası geçişlerden yararlanan kuantum çağlayan lazerlerin (b) çalışma prensibini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 1.9 Bantlar arası geçişlerden yararlanan klasik yarıiletken lazerlerin (a) ve alt bantlar arası geçişlerden yararlanan kuantum çağlayan lazerlerin (b) çalışma prensibini şematik olarak gösterimi (Evans, Allan Joseph 2008).

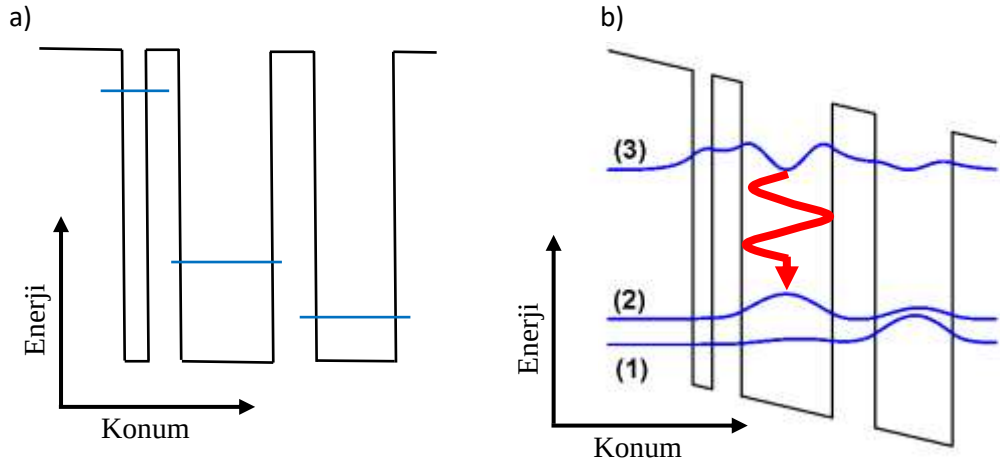
Kuantum çağlayan lazerlerin çalışma prensibi Şekil 1.9 ile incelendiğinde ışınlama dalga boyu ilgili yarıiletken bileşiğin intrinsik bant aralığı ile sınırlandırılmaz. Fakat tabaka kalınlığının değişimi ile kolayca değiştirilebilir. Tabaka kalınlıkları tipik olarak birkaç nm civarındadır ve bu kalınlıklar elektronik durumların birbirleriyle etkileşmesine, bu etkileşim ile gerekli alt enerji seviyelerinin oluşmasına ve elektronların kuantum kuyularından engellere tünellemesine olanak sağlar.

Kuantum çağlayan lazer tasarımı genel olarak enjektör bölgesi ve aktif bölge olarak adlandırılan iki farklı bölgeden oluşmaktadır (Şekil 1.10). Aktif bölge kuantum çağlayan lazerde ışığın oluştuğu bölgedir.



Şekil 1.10 Kuantum çağılayan lazer yapısına ait iki enjektör bölgesi arasına sıkıştırılmış aktif bölgenin şematik gösterimi.

Tipik bir üç kuantum kuyulu aktif bölgeye sahip kuantum çağılayan lazer yapısının aktif bölgesi enerji seviyeleri ile birlikte voltaj uygulanmamış (a) ve uygulanmış (b) haliyle şematik olarak Şekil 1.11’de gösterilmektedir. Kuantum kuyularında görülen enerji seviyeleri değişken kalınlıktaki kuantum kuyu ve engellerin oluşturduğu kuantum kuşatma etkisi nedeniyle ortaya çıkmaktadır.



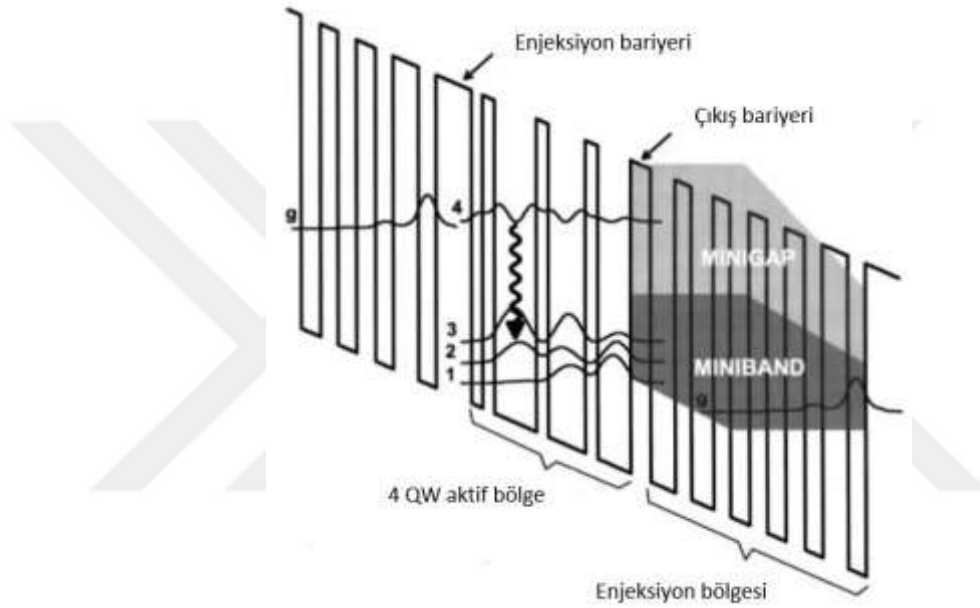
Şekil 1.11 Üç kuantum kuyulu aktif bölgeye sahip kuantum çağılayan lazer yapısının potansiyel fark uygulanmış (a) ve uygulanmamış (b) halinin gösterimi.

Şekil 1.11 ile gösterilen aktif bölge tasarımında elektronlar 3 numaralı yüksek enerji durumundan 2 numaralı düşük enerjili duruma geçtiğinde aradaki enerji farkı ile ilişkili bir foton ortaya çıkar. Daha sonra fononlar vasıtasıyla elektronlar gevşeme mekanizması ile 2 numaralı enerji seviyesinden 1 numaralı taban durumu enerji seviyesine geçerler. Bu geçiş durumu 1 ve 2 enerji seviyeleri arasındaki fark optik fonon enerjileri ($\sim 35-40$ meV) ile kıyaslanabilir mertebelerde olduğunda daha hızlı olur. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ için boyuna optik fonon enerjisi 34 meV, GaAs için 35 meV ve InP için 43 meV değerlerine sahiptir. Bu yapılarda yalnızca istenilen dalga boyunda ışınım olması için dipol matris elemanının ya da enerji seviyelerine ait dalga fonksiyonlarının çakışma durumlarının hesaplanarak istenilen geçişin maksimize olması hesaplanabilmektedir.

Şekil 1.10' da gösterilen enjektör bölgesi ise elektronların çağlama prosesine olanak sağlamak için aktif bölgeleri birbirine bağlamaktadır. Çağlama prosesinde enjekte edilen tek bir elektrona karşılık çok sayıda foton üretilmesi kuantum çağılayan lazerlerin dış kuantum verimlerinin %100'den büyük olmasını sağlamaktadırlar. Enjektör bölgesi ayrıca aktif bölgenin 3. enerji seviyesi (diğer tasarımlarda en yüksek enerji seviyesi) için elektron rezervuarı olarak görev yapmakla birlikte 2. ve 1. enerji seviyelerindeki elektronları uzaklaştırma görevi de bulunmaktadır. Enjektör bölgesi elektronların fononlar vasıtasıyla hızlı bir şekilde yeniden kullanım için taban durumuna iletilmesi amacıyla enerji seviyelerinin mini bantlarını içerirler. Enjektör bölgesi ayrıca mini bantların yanı sıra herhangi bir enerji durumunun olmadığı mini

boşluklar oluştururlar. Bu bölgelerde elektronların sürekli seviyelere veya sonraki enjektör bölgesine herhangi bir foton salınımı olmadan kaçmaları engellenmiş olur.

Üç kuantum kuyulu aktif bölgeye sahip kuantum çağlayan lazer tasarımının yanı sıra genel olarak kullanılan 3 farklı tasarım daha bulunmaktadır. Bunlardan ilki dört kuantum kuyulu aktif bölgeye sahip ya da iki fononlu rezonans olarak adlandırılan kuantum çağlayan lazer tasarımıdır (Şekil 1.12) (Hofstetter, ve diğerleri 2001). Bu tasarıma nüfus terslenmesini azaltan termal olarak enerjili elektronların geri dolumunun (back-filling) azaltılması için ihtiyaç duyulmaktadır.

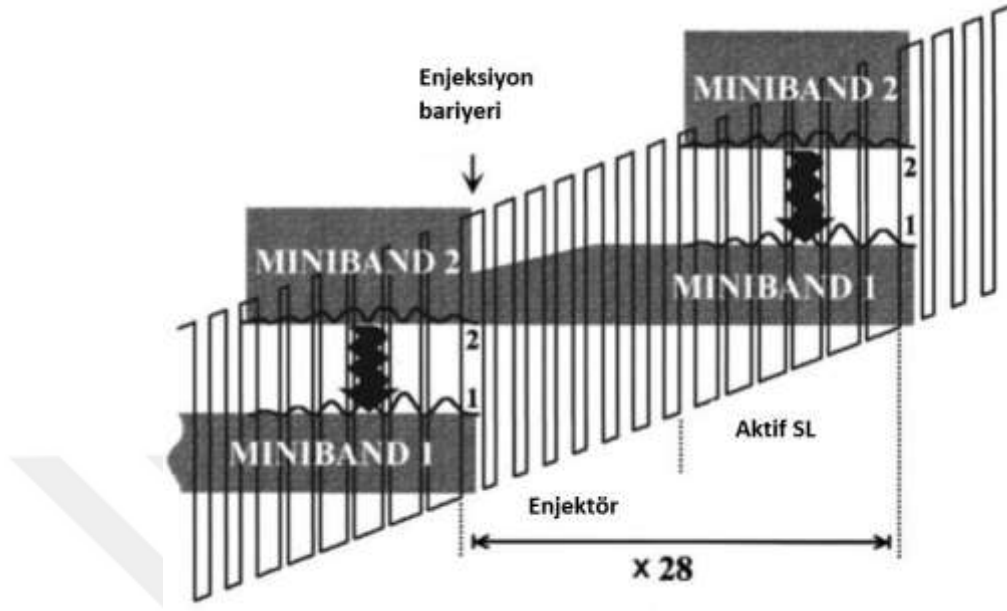


Şekil 1.12 Dört kuantum kuyulu ya da iki fononlu rezonans olarak adlandırılan aktif bölgeye sahip kuantum çağlayan lazer tasarımı.

Bu tasarımın diğer bir önemli avantajı da düşük enerji seviyelerindeki elektronların tersine nüfus yoğunluğunu azaltmasıdır. Elektronun enjeksiyon bariyeri boyunca tünellemesi yüksek enjeksiyon verimi sağlarken kalın enjeksiyon bariyeri ise daha uzun süreli üst enerji seviyesi yaşam ömrü sağlamaktadır. Enjeksiyon bölgesindeki üst enerji seviyesi taban durumu enerji seviyesine bağlaşımlı iken enjeksiyon bariyeri aynı zamanda aktif bölgenin düşük enerji seviyelerine bağlaşımlı minimize eder ve bu sayede aktif bölge dışında ışımasız geçişleri minimize eder.

Kuantum çağlayan lazerlerin bir başka tasarımı da süperörgülerden oluşan tasarımıdır (Tredicucci, Capasso, ve diğerleri 1998) ki burada Şekil 1.11 ile gösterilen 1, 2 ve 3 numaralı bağlı enerji seviyeleri Şekil 1.13'te gösterildiği gibi artık mini bant durumları

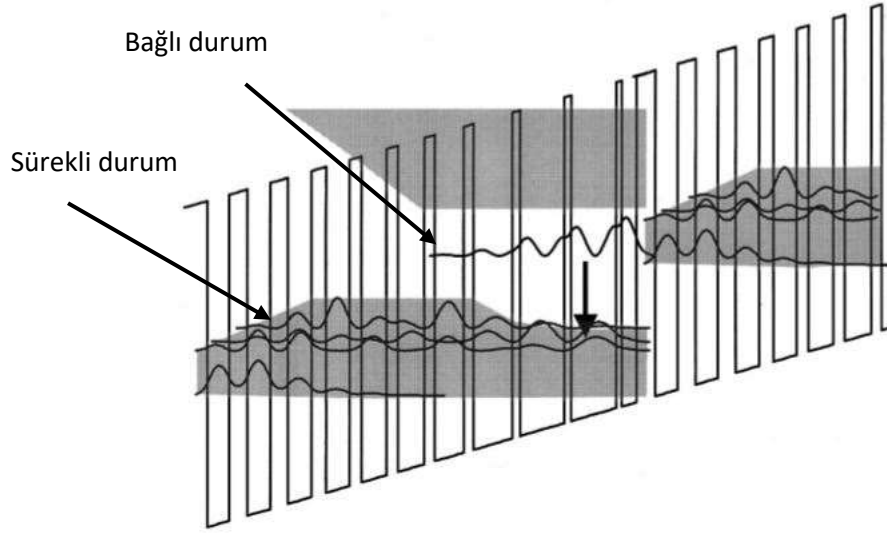
ile yer deşiştirmiştir. Bu tasarımda geçişler artık tek enerji seviyeleri arasında değil aralarındaki enerji farkı çok az olan mini bantlar arasında olacaktır.



şekil 1.13 Süperörgü tasarımına sahip kuantum ağlayan lazer yapısının şematik gösterimi (Tredicucci, Capasso, ve diğerleri 1998). Koyu bölgeler mini bantların oluşturduğu enerji seviyelerini gösterirken dalgalı oklar ise 2 ve 1 numaralı enerji seviyeleri arasındaki ışımayı temsil etmektedir.

Bu tasarım düşük enerji seviyesindeki elektronlara hızlı fonon destekli gevşeme prosesi ile aşırı kısa bir yaşam ömrü sağlamaktadır. Süperörgü aktif tabaka tasarımı ile düşük emisyon enerjisine sahip ve mühendislik yaklaşımı olarak zor olan bu bölgede 17-24 μm dalgaboyu aralığında gayet başarılı bir şekilde çalışan kuantum ağlayan lazer demonstrasyonu gerçekleştirilmiştir (Tredicucci, Gmachl, ve diğerleri 1999), (Colombelli, ve diğerleri 2001) .

Kuantum ağlayan tasarımlarından üçüncüsü ise bağlıdan sürekli duruma veya mini banta geçiştir ki bu durum süperörgü ve iki fonon rezonans tasarımlarının birleşimi şeklinde-dir (şekil 1.14) (Faist, Beck, ve diğerleri 2001).



Şekil 1.14 Bağlı durumdan sürekli veya mini bant durumuna geçişli kuantum çağlayan lazerlerin aktif bölge ve enjektör bölgesinin potansiyel fark uygulanmış durumu.

Bu tasarımında 3 kuantum kuyulu tasarımın rezonans tünelleme enjeksiyonunun avantajı ile süperörgü tasarımındaki hızlı elektron çıkarmanın avantajını birleştirme amaçlanmaktadır. Böylece bu tasarımda tek yüksek enerjili durum ile düşük enerjili mini bantlar arasında geçiş olup ışıma ortaya çıkmaktadır.

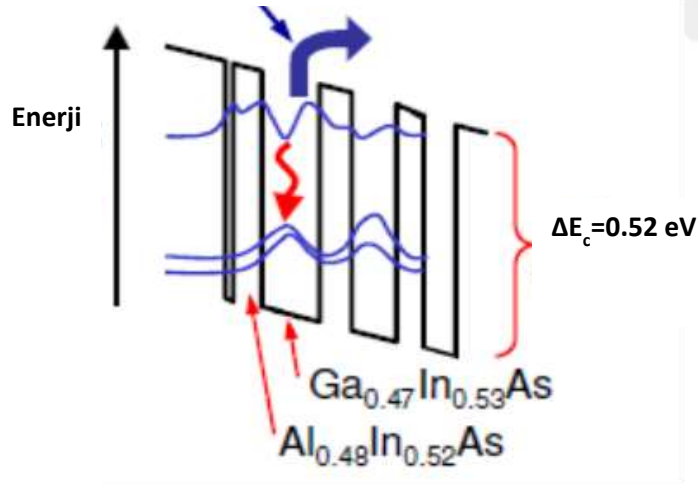
Tez çalışması kapsamında büyütülen kuantum çağlayan lazer yapıları 3 kuantum kuyulu aktif bölgeye sahip tasarımı ve iki fonon rezonans tasarımlarını içermektedir.

1.3.1. Kısa dalga boylu kuantum çağlayan lazerler

Teorik olarak kuantum çağlayan lazerlerin kapsadığı dalga boyu aralığı $\sim 3\text{--}200\ \mu\text{m}$ olmasına rağmen InP içeren sistemlerde alttaşa örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ üçlü bileşikleri için ilk başarılı ve yüksek güçteki QCL'ler 425 K sıcaklığı civarında $7\text{--}11\ \mu\text{m}$ dalgaboyu aralığında çalışacak şekilde üretilmişlerdir (Evans, ve diğerleri 2005), (Kazarinov ve Suris 1971), (Faist, Capasso, ve diğerleri 1994). Belirtilen dalga boyu aralığında ışıma yapması için büyütülen tabakalar alttaşa ile örgü uyumlu oldukları için herhangi bir gerilmeye maruz kalmazlar. Bu nedenle de kristal kaliteleri oldukça yüksektir. Ancak kuantum çağlayan lazerlerin giriş kısmında anlatılan uygulama alanlarında veya daha farklı bir uygulama alanında kullanmak için daha düşük dalga boylarında çalışmak üzere bir lazer tasarlandığında karşımıza bir takım temel engeller çıkmaktadır. Bu arada mümkün olan düşük dalga boylarına

inmenin önemli bir sebebi de giriş kısmında açıklanan 3-5 μm aralığının atmosferik pencerenin kullanılma isteğidir. Düşük dalga boylarına inilmeye başlandığında karşımıza çıkan en önemli engellerden birisi ısısal olarak uyarılan elektronların ışımaya katkı yapmak yerine yapıdan kaçmalarıdır. Elektronların termal kaçıışı adı verilen bu mekanizma şematik olarak Şekil 1.15’de gösterilmiştir. Lazer ışıma dalga boyunun küçültülmesi için kuantum kuyularındaki enerji düzeyleri arasındaki farkın arttırılması gerekmektedir. Bu farkı elde edebilmek için üst düzeydeki enerji seviyeleri mümkün olan en yüksek seviyelere çıkarılmalıdır. Bu durumda bariyer seviyesine çok yakın enerji düzeyleri oluşur ve burada sınırlandırılmış olan elektronların kuşatılması bahsi geçen termal etkiler nedeni ile zorlaşır. Bu düzeydeki elektronlar düşük bir termal enerji ile dahi kuantum kuyusundan kaçma eğilimi göstermektedirler. İstenmeyen bu kaçış hem cihaz performansını önemli derecede etkileyecek hem de oda sıcaklığında istenilen dalga boyunun yüksek hassasiyetle elde edilmesini hemen hemen imkânsız hale getirecektir.

Termal Kaçış



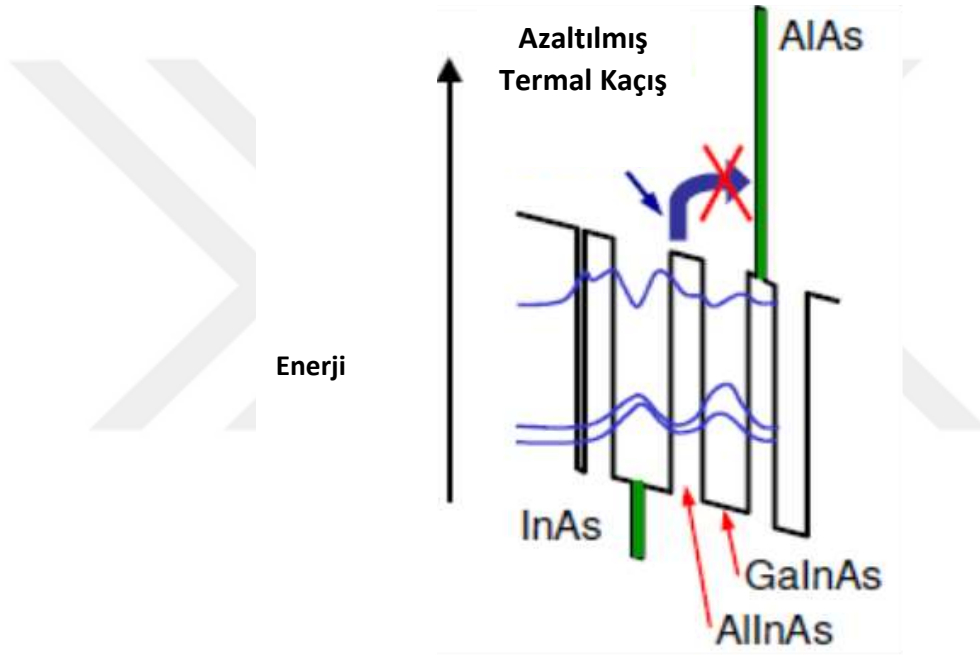
Şekil 1.15 Örgü uyumlu InP tabanlı kısa dalga boylu kuantum çağlayan lazerlerde termal elektronların kaçış mekanizmasının şematik gösterimi.

Kuantum Çağlayan Lazerler güncel olarak farklı birçok malzeme grubu ile çalışılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları Si/Ge (Zhang, ve diğerleri 2005) (THz uygulamaları için), AlGaAs/GaAs (Sirtori, ve diğerleri 2002), InAs/AlSb (Devenson, ve diğerleri 2006), InGaAs/AlAsSb (Revin, ve diğerleri 2004) ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}$.

$y\text{As}/\text{InP}$ olarak verilebilir. $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ aralığı ise birçok hidrokarbonun spektral parmak izi olarak nitelendirildiğinden dolayı ayrı bir öneme sahiptir fakat bu bölgedeki gelişmeler biraz daha yavaştır. Daha öncede belirtildiği gibi ışınım dalga boyu kısaldıkça birçok sınırlama ve problem ortaya çıkmaktadır. Bu sorunları ortadan kaldırmak için kullanılan en önemli malzeme gruplarından biri büyütme teknolojisinin olgunlaşması ve yüksek termal iletkenlikleri vb. sebeplerden dolayı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}/\text{InP}$ 'dır. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}/\text{InP}$ gerilme dengeli olarak InP alttaş üzerine büyütülmektedir ve bu sayede daha kısa dalga boylarına ulaşmak mümkün olmaktadır. Fakat kısa dalga boylarına inildikçe daha önce bahsedilen sorunlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu sorunların aşılması için atılan adımlardan birisi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}/\text{InP}$ malzeme grupları yerine (3.1 - $3.3\ \mu\text{m}$) InAs/AlSb (Devenson, ve diğerleri 2006) ve $\text{InGaAs}/\text{AlAsSb}$ (Revin, ve diğerleri 2004) yapılarını kullanmaktır. Bu yapılarda iletkenlik bandı ofseti $1.6\ \text{eV}$ 'a kadar ulaşmaktadır ki bu değer $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ yapısı ile karşılaştırıldığında ($0.52\ \text{eV}$) elektronları kuyu içinde kalacak (engel yüksekliğinin oldukça altında) şekilde kuşatmak mümkündür. Fakat bu durumda InAs yapılarının bant içi soğurmalarından dolayı dalga kılavuzu kaybı ve InP alttaş ile karşılaştırıldığında düşük termal iletkenliği önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca Sb içeren bileşikler epitaaksiyel olarak büyütme ve aygıt yapımı süreçleri diğer bileşiklere göre henüz olgunlaşma aşamasına erişememiştir ve termal etkiler bu yapılarda çok daha öne çıktığından daha düşük çalışma sıcaklık değerlerine ihtiyaç vardır. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ malzeme grubu büyütme ve aygıt yapımı açısından olgunlaşmış bilgi birikimine sahip olduğumuz için diğer materyal gruplarına göre büyük bir avantajı sahiptir.

Tez çalışması kapsamında düşük dalga boylarında ısıma yapacak kuantum çağlayan lazer yapılarının büyütülebilmesi amacıyla gerilme dengeli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}/\text{InP}$ yapıları tercih edilmiştir. Fakat bundan önce yine bu malzeme grupları ile literatürde yapılanları özetleyecek olursak; düşük dalga boylarında termal kaçışları engellemek için uygulanan diğer bir yöntem ise bant ofseti yüksek olan ikili AlAs bileşiğini termal kaçışı engelleyici ince bir tabaka olarak aktif bölgede engelin içine yerleştirmektir (Yank, ve diğerleri 2005) (Şekil 1.16). Bu tabaka yüksek enerjili elektronların kaçışını engeller. Fakat eklenen ince AlAs tabakası ile yapı arasında örgü uyumsuzluğu olacağından, örgü uyumsuzluğundan doğan gerilme etkilerini azaltmak için aktif bölgeye daha düşük örgü sabitli ince bir InAs tabakası yerleştirilir. Bu tabaka ile aktif

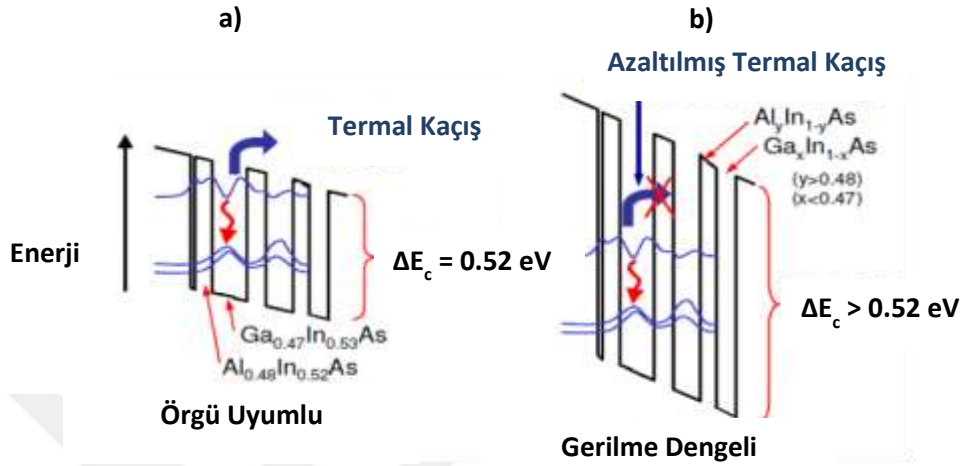
bölgede oluşturulan kuantum kuyusunun derinliği ve elektron kuşatma etkisi de arttırılmaktadır. Dolayısıyla AlAs ve InAs ince ara tabakalarının eklenmesiyle hem termal kaçışlar engellenmiş hem de kuşatma etkisi arttırılmış olur. Bu yapıda 77 K sıcaklıktaki maksimum pik gücü AlAs ve InAs tabakalarını koymadan büyütülen yapıya göre üç kat artmıştır ve ayrıca atmalı moddaki maksimum çalışma sıcaklığı 320 K' den 350 K' e yükselmiştir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı ise örgü uyumlu yapıya keskin bir şekilde örgü uyumsuz tabakalar yerleştirilmesiyle optoelektronik cihazlar için ölümcül etkileri olan dislokasyonların üretilmesidir.



Şekil 1.16 Termal kaçışları engellemek için AlAs engelleme bariyeri ve InAs kuyusunun eklenmesinin şematik gösterimi.

Yöntemlerden bir diğeri ise $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ yapılarını dengeli bir gerilme oluşturarak büyütmektir (Diehl, ve diğerleri 2006). Burada $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ bileşiğindeki Al içeriği arttırılarak ($y > 0.48$) bir yandan bariyer yüksekliği arttırılırken diğer yandan ise yapıdaki çekme gerilimi arttırılır, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ bileşiğindeki In içeriği arttırılarak ise ($x > 0.53$) bir yandan kuyu derinliği arttırılırken diğer yandan yapıdaki sıkışma gerilimi arttırılır. Dolayısıyla tüm yapı x ve y oranlarını değiştirilerek oluşan gerilmeler dengelenmeye çalışılır. Bu yöntem ile büyütülecek yapılardan gerilme altında kalın tabakalar büyütmek (kritik kalınlığı aşmaksızın) mümkün olmaktadır. Kuantum kuyusunun derinliği arttıkça elektronun termal enerjisi ile kuyudan çıkma

olasılığı azalacak ve kuşatma etkisi artacaktır (Şekil 1.17) ve bu sayede kısa dalga boylu kuantum çağlayan lazer yapımı mümkün olacaktır. Bu şekilde inşa edilen kuantum çağlayan lazer yapısında kuantum kuyusundaki In mol oranı %66, bariyer bölgesinde ise % 36 alınarak örgü uyumlu sistemde 0.52 eV olan bant süreksizliği 0.82 eV değerine çıkarılabilir ki böyle bir tasarımda bant offset net olarak 300 meV arttırılmış olur.



Şekil 1.17 Gerilme dengeli yapılar büyütülerek termal kaçışların engellenmesinin şematik gösterimi. Örgü uyumlu olarak büyütülen yapılarda (a) bant ofset 0.52 eV iken gerilme dengeli olarak büyütülen yapılarda (b) bu değer arttırılabilir.

Bu teknikte dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi de gerilme altında büyütülen yapıların belirli bir kritik kalınlığa ulaştıktan sonra kırılmalar oluşmasıdır. Gerilme altındaki büyütmelere ait açıklamalar ilerleyen bölümlerde detaylandırılacaktır.

2. TEORİ

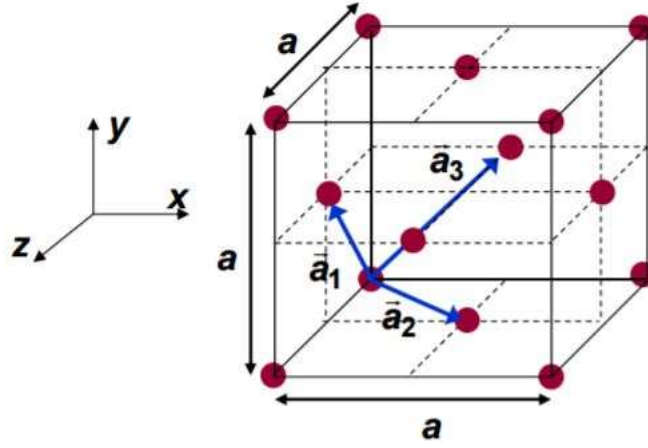
Yarıiletkenlerin elektronik cihaz yapımında onları çok kullanışlı hale getiren en önemli özelliği denge durumunda neredeyse tamamı dolu bir valans bandından yasak enerji aralığı ile ayrılmış hemen hemen boş olan iletkenlik bandına sahip olmasıdır. Ayrıca bu iki bandın işgal edilme oranı yarıiletkenin katkılanması veya elektriksel veya optiksel uyarımlarla taşıyıcı enjeksiyonu vasıtasıyla tasarlanabilmektedir. Yapılacak bu tasarımlarda göz önüne alınması gereken en önemli kısımlar yarıiletkenin kristal yapısı ve bant yapısıdır.

2.1. Kristal Yapı

Enerji bantları ve bant aralığı kavramları atomların kristal içerisinde düzenli bir biçimde sıralanmasından ileri gelmektedir. Kristal yapısının temel şablonu Bravais örgüsü olarak adlandırılır ve kristal boyunca düzenli aralıklarla kendini tekrar eden noktalardan oluşmaktadır. Kristaldeki herhangi bir noktanın $\mathbf{R}$ noktasındaki konumu herhangi bir $\mathbf{R}'$ noktasına göre konumu matematiksel olarak şu şekilde açıklanabilir;

$$\mathbf{R} = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3 + \mathbf{R}' \quad [2.1]$$

ve bu formül öteleme simetrisi olarak bilinmektedir. Burada $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ ve $\mathbf{a}_3$ örgü öteleme vektörleri ve n_1 , n_2 , n_3 ise tam sayılardır. İlkel örgü öteleme vektörleri ile kapatılmış alan ise birim hücre olarak adlandırılmaktadır. Herhangi bir tek atom ya da atom grupları (baz) örgü noktalarına eklendiğinde gerçek kristal yapı oluşturulur. Olası tüm örgüler yönelimlere ve örgü öteleme vektörünün uzunluğuna göre yedi adet kristal sistemi altında toplanabilmektedir. Bu kristal sistemleri kübik, tetragonal, ortorombik, trigonal, hegzagonal, monoklinik ve triklinik olarak adlandırılmaktadır. Tez çalışması kapsamında kullanılan tüm ikili bileşik ve üçlü alaşımlar kübik kristal sistemlerine sahiptirler. Kübik kristal sistemleri kendi aralarında üç gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar basit kübik yapı (simple cubic, sc), cisim merkezli kübik yapı (body centered cubic, bcc) ve yüzey merkezli kübik yapı (face centered cubic, fcc) olarak sınıflandırılmaktadırlar. Tez çalışması kapsamında kullanılan materyallerin hepsi yüzey merkezli kübik yapıya sahiptir. Şekil 2.1 yüzey merkezli kübik kristalin ilkel hücresini göstermektedir.



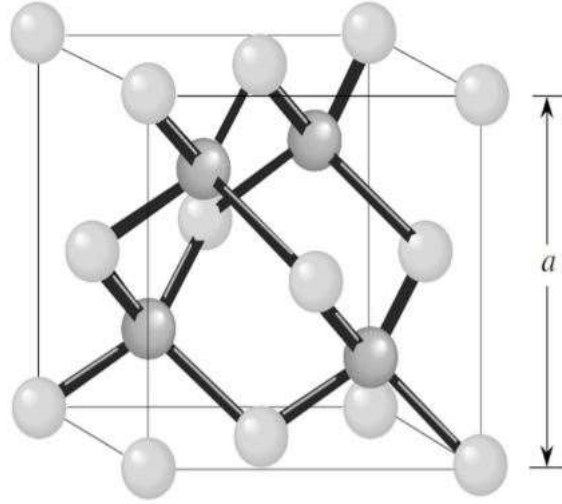
Şekil 2.1 Yüzey merkezli kübik kristalin ilkel hücresi. İlkel öteleme vektörleri $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$ ve $\mathbf{a}_3$ orijindeki örgü noktasını yüzey merkezlerindeki örgü noktaları ile birbirine bağlamaktadır (Rana 2009).

Şekil 2.1 ile gösterilen yüzey merkezli kübik kristalin ilkel vektörleri;

$$\mathbf{a}_1 = \frac{1}{2} a (\hat{y} + \hat{z}); \mathbf{a}_2 = \frac{1}{2} a (\hat{x} + \hat{z}); \mathbf{a}_3 = \frac{1}{2} a (\hat{x} + \hat{y}) \quad [2.2]$$

şeklinde verilmektedir ve eksenler arasındaki açı 60° olup $\hat{x}$, $\hat{y}$ ve $\hat{z}$ birim vektörlerdir (Kittel 2005).

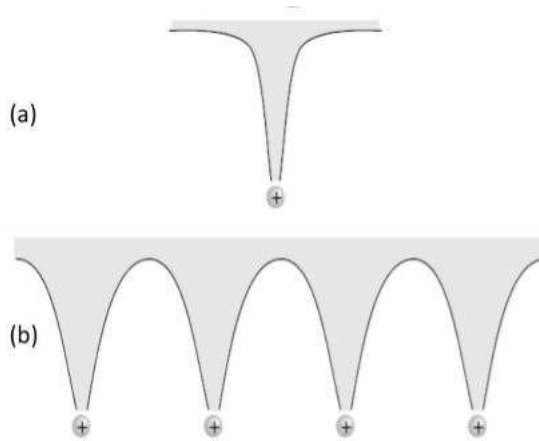
Tez çalışması kapsamında ilgilenilen kuantum çağlayan lazer yapılarını oluşturan ikili InP bileşiği ve üçlü InGaAs ve InAlAs alaşımları yüzey merkezli kübik kristal yapısı tabanlı olan ve çinko sülfür (ZnS) olarak adlandırılan yapıya sahiptir. Bu yapı temelde elmas (diamond) yapıya sahip olup bazı iki atomludur. Bu yapı iç içe geçmiş iki fcc yapının köşegen boyunca köşegen uzunluğunun $1/4$ 'ü kadar ötelenmesiyle oluşmaktadır. (0, 0, 0) konumunda bir atom bulunurken diğer atom ise $(1/4, 1/4, 1/4)$ (veya tersi) konumunda bulunmaktadır. Birim hücresinde 8 atom bulunmaktadır. ZnS kristal yapısı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Çinko sülfür kristal yapısı.

2.2. Band Yapısı

Kısmen serbest elektron modelinde elektron katı cisim içinde pozitif iyonların oluşturduğu belirli bir periyotla değişen periyodik potansiyelin etkisi altındadır. Şekil 2.3-a'da izole bir pozitif iyon korunun varlığında iletim elektronunun maruz kaldığı elektrostatik potansiyel enerji gösterilmektedir. Kristali oluşturmak için çok sayıda atom bir araya getirildiğinde elektronların potansiyel enerjileri örtüşürler Şekil 2.3-b.



Şekil 2.3 İzole bir pozitif iyon korunun varlığında iletim elektronunun maruz kaldığı elektrostatik potansiyel (a), Kristali oluşturmak için çok sayıda atom bir araya getirildiğinde elektronların potansiyel enerjileri örtüşürler (b).

Elektron, periyodik örgü içerisinde hareket ettiğinden maruz kaldığı potansiyel periyodiktir;

$$V(\vec{r}) = V(\vec{r} + \vec{R}) \quad [2.3]$$

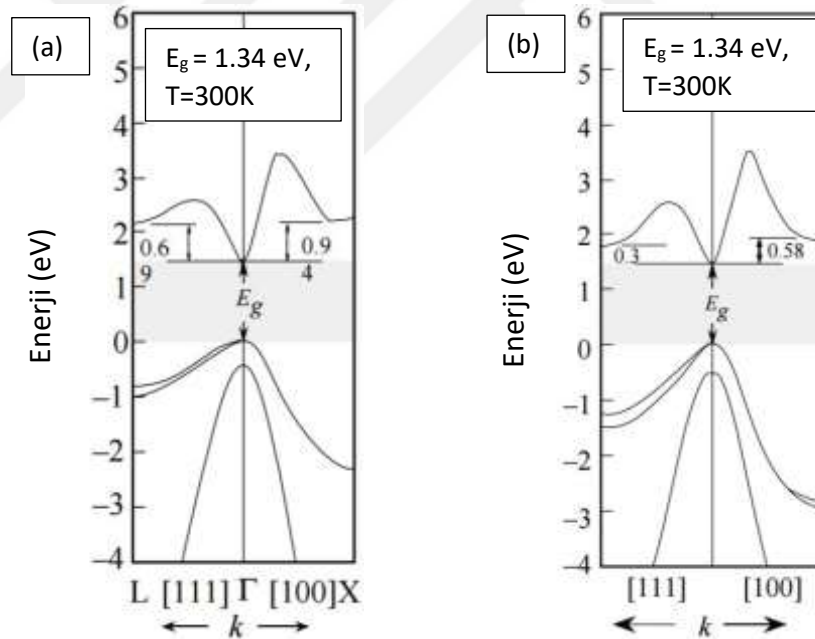
Ayrıca bu simetri dalga fonksiyonunun mutlak karesi içinde geçerlidir;

$$|\Psi(\vec{r})|^2 = |\Psi(\vec{r} + \vec{R})|^2 \quad [2.4]$$

Bu yüzden Bloch'un önerisi ile dalga fonksiyonu bir düzlem dalga ile kendisinin çarpımı şeklinde yazılabilir;

$$\Psi_{n\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} U_{n\vec{k}}(\vec{r}) \quad [2.5]$$

Burada $U_{n\vec{k}}(\vec{r})$ de periyodik bir fonksiyon olup Bloch fonksiyonu olarak adlandırılır. Bu fonksiyon Schrödinger denkleminde dalga fonksiyonu olarak yerine yazılır gerekli sınır değer şartları uygulanır ve detaylı bir şekilde çözümler elde edilirse buradan bazı enerji değerlerinin yasak bazılarının ise izinli olduğu bantlar ortaya çıkmaktadır (Kittel 2005). Şekil 2.4 InP (a) ve GaAs (b) bileşiklerinin bant yapılarını göstermektedir.



Şekil 2.4 InP (a) ve GaAs (a) bileşiklerinin bant yapıları (Singh 2001).

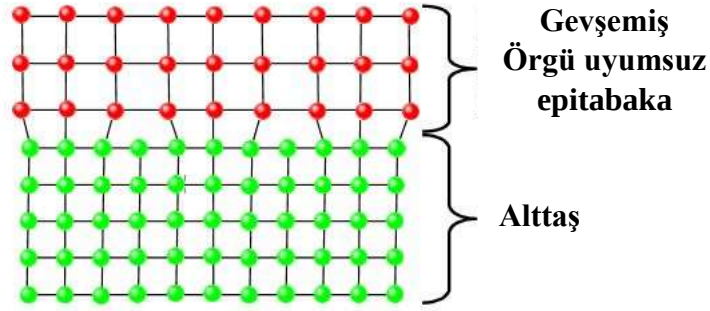
Şekil 2.4'te görüldüğü gibi izole atomların kesikli enerji seviyeleri yerine sürekli bir dağılıma sahip izinli ve birtakım bant aralıkları ile ayrılmış yasak enerji bölgelerine sahiptir. Direk bant aralığına sahip yarıiletkenlerde iletkenlik ve valans bantlarının maksimumları Γ noktasında oluşmaktadır.

2.2.1. Örgü uyumsuz yapılar için örgü sabiti ve band yapısı değişimi

Önceki bölümlerde tez çalışması kapsamında kullanılan bileşik ve alaşımların kristal yapıları ve bant yapıları incelenmiştir. Bu bölümde daha sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde incelenecek gerilme altında büyütülmüş kuantum çağlayan lazer yapılarında ortaya çıkan gerilmenin örgü sabiti ve bant yapılarına getireceği etkiler incelenecektir.

Yarıiletkenlerde örgü sabitlerindeki gerilme malzemenin fiziksel ve elektronik özelliklerini çok ciddi miktarda etkilemektedir. Bu etkilenme uygulamalarda karşılık bulacak şekilde alan etkili transistörlerde (Lee, ve diğerleri 2005), ışık yayan diyotlarda (Rong, ve diğerleri 2013), lazerlerde (Wang, ve diğerleri 2008), güneş pillerinde (Sayed, ve diğerleri 2016) ve birçok süperörgü cihazlarında kullanılmaktadır. Direk bant aralığından dolayı ışık yayan cihazlarda baskın olarak gerilme altındaki $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}/\text{InP}$ malzeme sistemleri kullanılmaktadır. Bu malzeme gruplarında gerilme aynı zamanda kırılma indisi ve termal iletkenlik gibi fiziksel parametreleri de değiştirmektedir, fakat tez çalışması kapsamında bu parametreler ile ilgilenilmemektedir.

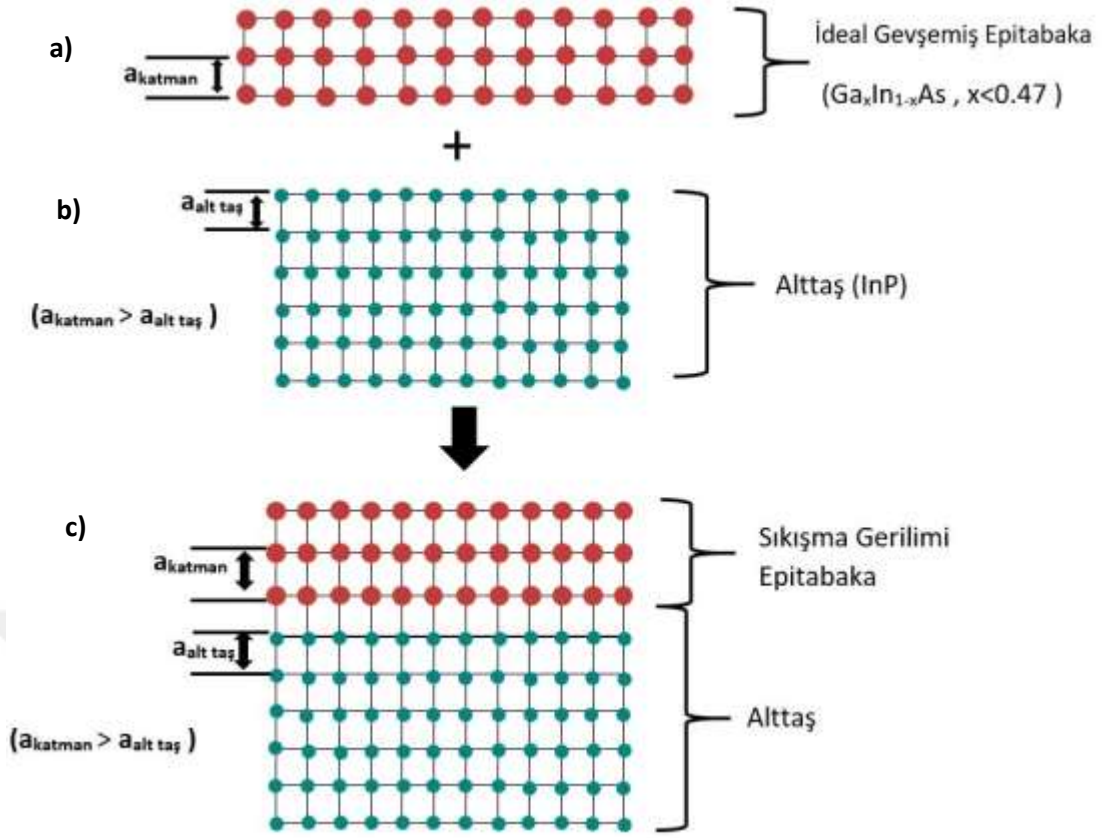
Gerilme altındaki yapılar doğal örgü sabiti, üzerine büyütme yapılacak olan alttaşın örgü sabitinden farklı olduğunda ortaya çıkmaktadır. Eğer büyütülecek epitaksiyel tabaka ile alttaş arasındaki örgü uyumsuzluğu çok fazla ise epitaksiyel tabaka ilk birkaç tabakada alttaşın örgü sabiti ile büyümeye zorlanacaktır. Fakat gerilme çok ciddi miktarda artacağından epitaksiyel tabaka gevşemeden sonra kendi doğal örgü sabiti ile büyümeye devam edecektir (Şekil 2.5). Gerilme altındaki tabakanın gevşediği kalınlığa kritik kalınlık adı verilir ve malzeme, büyütme şartlarına göre değişebilmektedir. Kritik kalınlık ile ilgili detaylı bilgi deneysel kısımda verilecektir. Epikristaldeki gevşeme yapıda dislokasyon oluşumuna yol açar ve pürüzlü bir yüzey ortaya çıkar ki bu durum cihaz performansını olumsuz yönde etkilediğinden epitaksiyel büyütmelemlerde arzu edilen bir durum değildir.



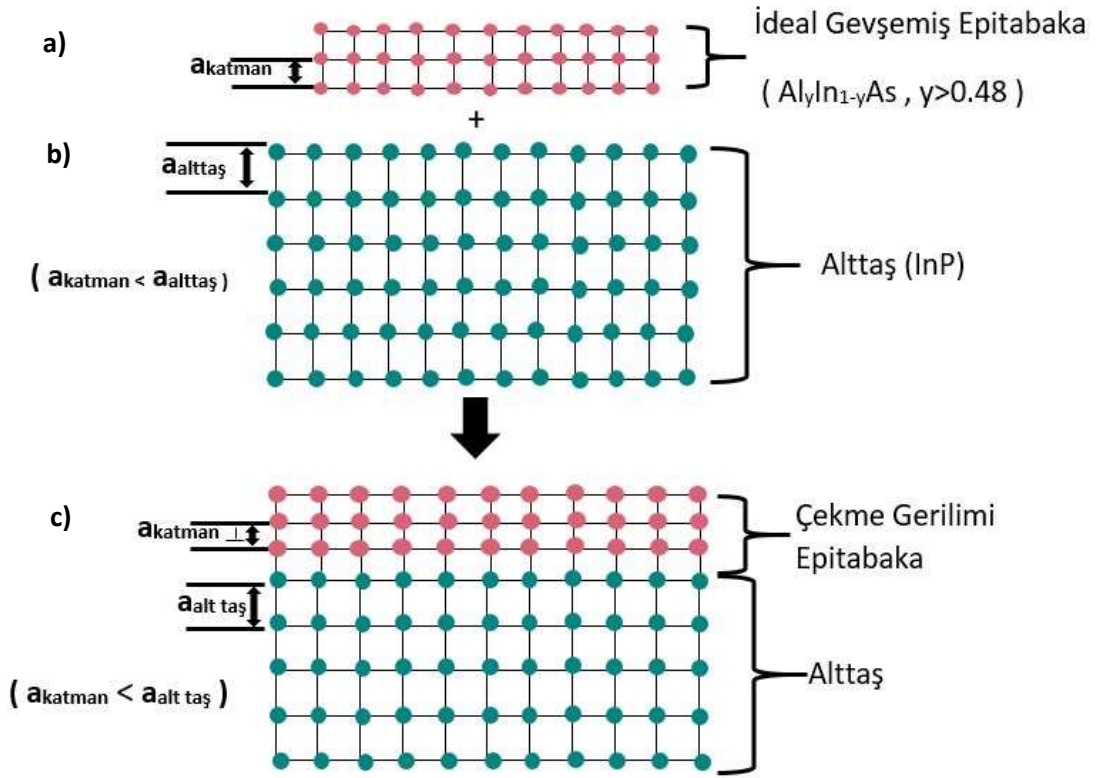
Şekil 2.5 Alttaş ile epitaksiyel tabaka arasında yüksek örgü uyumsuzluğu durumunda ortaya çıkan gerilme gevşemesi durumu. Bu durumda kristalde dislokasyon oluşur ve kristalde tetragonal distorsiyon meydana gelir.

Uygun büyütme koşulları altında belirli malzeme grupları için epitaksiyel tabakanın örgü sabiti alttaş ile uyumlu olacak şekilde kritik kalınlık herhangi bir gevşeme olmadan arttırılabilir. Bu şekilde dislokasyonsuz olarak epitaksiyel tabaka büyütme tekniğine sözde morfik (pseudomorphic) epitaksiyel büyütme adı verilmektedir. Sanki morfik epitaksiyel büyütme tekniği sıkışma gerilimi (compressively strained) (Şekil 2.6) ve çekme gerilimi (tensile strained epitaxy) (Şekil 2.7) altında büyütülen tabakaları içermektedir.

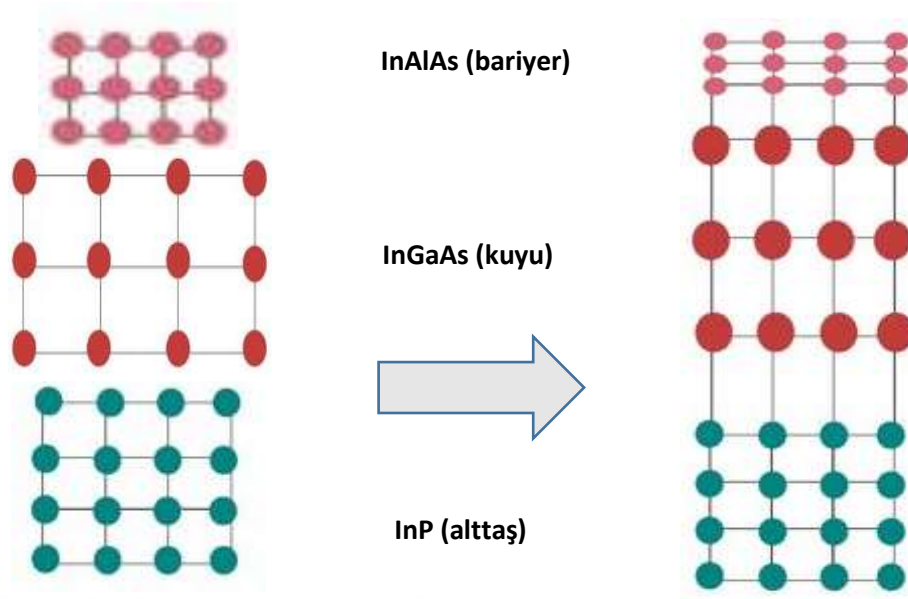
Tek tabaka büyütmelerine ek olarak bu teknik çoklu tabakaların bir arada büyütülmesinde de kullanılmaktadır. Sıkışma gerilimi ve çekme gerilimi altındaki tabakalar belirli şartlar altında üst üste büyütüldüğünde ortaya çıkan net gerilme ihmal edilebilir seviyelere indirgenebilir ve hatta sıfıra düşürülebilir. Böylece tüm yapı örgü uyumlu olacak şekilde herhangi bir kritik kalınlık kısıtlaması olmadan büyütülebilir (Şekil 2.8). Bu yaklaşım ile tez çalışması kapsamında da kullanılan çok kalın ve karmaşık yapılar büyütülebilmektedir.



Şekil 2.6 Sıkışma gerilimi epitaksisi ile gevşeme olmadan yapılan epitaksiyel büyütme. İdeal olarak gevşemiş ve örgü sabiti alttaştan büyük epitaksiyel tabaka (a), epitaksiyel tabakanın örgü sabitinden küçük örgü sabitine sahip InP alttaş (b), sıkışma gerilimi altında alttaş üzerine sanki morfik olarak büyütülen epitaksiyel tabaka (c).



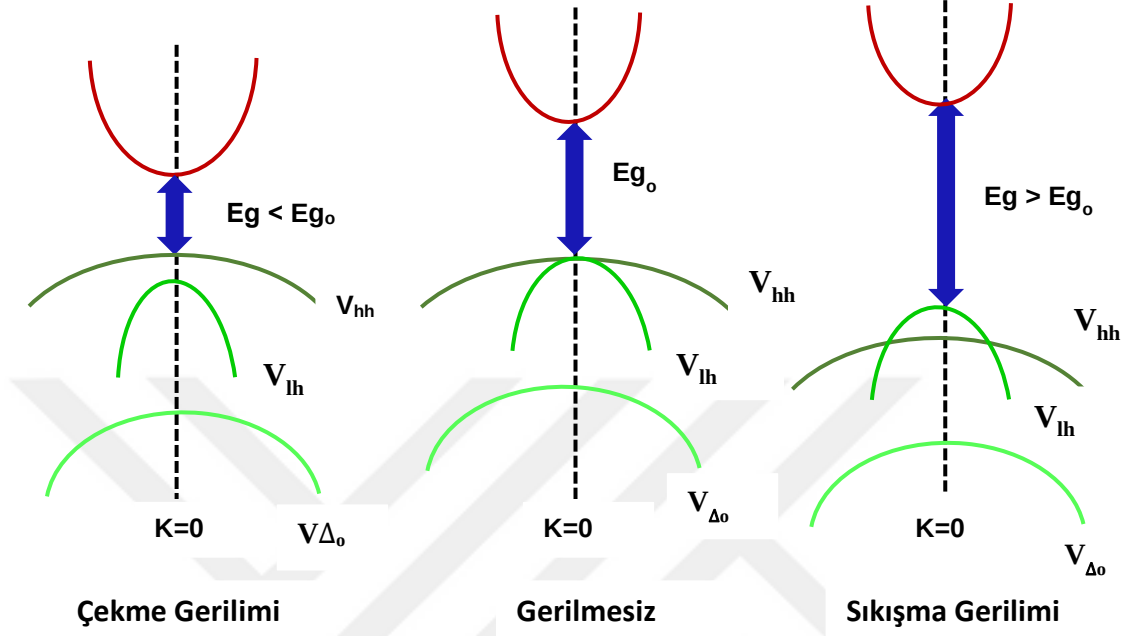
Şekil 2.7 Çekme gerilimi epitaksisi ile gevşeme olmadan yapılan epitaksiyel büyütme. İdeal olarak gevşemiş ve örgü sabiti alttastan küçük epitaksiyel tabaka (a), epitaksiyel tabakanın örgü sabitinden küçük örgü sabitine sahip InP alttas (b), çekme gerilimi altında alttas üzerine sanki morfik olarak büyütülen epitaksiyel tabaka (c).



Şekil 2.8 Örgü sabiti alttas örgü sabitinden büyük epitaksiyel tabaka ile örgü sabiti alttas örgü sabitinden küçük epitaksiyel tabakaların üst üste büyütülerek gerilme dengesinin sağlanması.

Epitaksiyel tabakalar yukarıda bahsedilen gerilme tiplerine maruz kaldıklarında kristal simetrileri azaldığından elektronik özellikler bakımından da bir takım etkilenmelere maruz kalmaktadırlar. Örneğin sıkışma gerilimi altında malzemeye ait bant aralığı artarken çekme gerilimi altında ise azalmaktadır (Adachi 1992). Bant aralığındaki değişimlerin gerilme tiplerine göre davranışı Şekil 2.9 ile gösterilmektedir. Alttaş ile örgü uyumlu bir tabakanın büyütülmesinde yapıda herhangi bir gerilme olmayacağından bant yapısında da herhangi bir değişim olmayacaktır. Bu durumda ağır boşluk bandı (heavy hole band, V_{hh}) ile hafif boşluk bantları (light hole band, V_{lh}) Γ noktasında çakışmaktadırlar Şekil 2.9-b. Bu durumdaki bant aralığı epitabakanın orijinal bant aralığıdır (E_g). Epitabakanın örgü sabiti alttaşın örgü sabitinden küçük olduğunda yapıda net bir çekme gerilimi olacaktır. Bu durumda hafif boşluk bandı ile ağır boşluk bandı arasında belirgin bir ayrılma olacak ve bant aralığı orijinal bant aralığından daha küçük olacaktır ($E_g < E_{g0}$) (Şekil 2.9-a. Ayrıca her ne kadar kuantum çağılayan lazerlerde gerçekleşmeye de elektronlar ile boşluklar arasındaki yeniden birleşme prosesi (recombination process) iletkenlik bandı ve ağır boşluk bandı arasında olacaktır. Epitabakanın örgü sabiti alttaşın örgü sabitinden büyük olduğunda yapıda net bir sıkışma gerilimi olacaktır. Bu durumda hafif boşluk bandı ile ağır boşluk bandı arasında yine belirgin bir ayrılma olacak ve bant aralığı orijinal bant aralığından daha büyük olacaktır ($E_g > E_{g0}$) (Şekil 2.9-c). Bu

durumda ise elektronlar ile boşluklar arasındaki yeniden birleşme prosesi iletkenlik bandı ve hafif boşluk bandı arasında olacaktır.



Şekil 2.9 AlGaAs ile epitaksiyel tabaka arasındaki örgü uyumsuzluğu dolayısıyla ortaya çıkan gerilme tiplerine göre bant aralığı değişiminin şematik gösterimi. Çekme gerilimi altında büyütülen yapı (a), Gerilmesiz yapı (b), sıkışma gerilimi altında büyütülen yapı (c).

3. METOD

Bu bölümde tez çalışması kapsamında üretilen ve detaylı bir şekilde karakterize edilen ince filmlerin büyütülmesi ve karakterize edilmesi için kullanılan altyapıdan bahsedilecektir. Üretim tekniği, bu tekniğe ait detaylar, üretimde kullanılan sistemin temel parçaları ve görevleri, karakterizasyon cihazları ve bu cihazların temel olarak çalışma prensiplerinden detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

3.1. Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama Sistemi (MOCVD)

Tez çalışması kapsamında incelenen tüm numunelerin büyütüldüğü epitaksiyel tek kristal büyütme sistemi olan MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) sistemi ve diğer tüm alt bileşenlerinden bu bölümde detaylı bir biçimde bahsedilecektir. Sistemin tüm elektriksel kontrolünün sağlandığı elektriksel kabinet, gaz kaçaqlarına karşı kullanıcıları ve çevreyi koruyan güvenlik ölçümleri, gaz karıştırma kabini, reaktör kabini, radyo frekans jeneratörü, eldivenli kutu, egzoz ve diğer tüm parçalar incelenecektir.

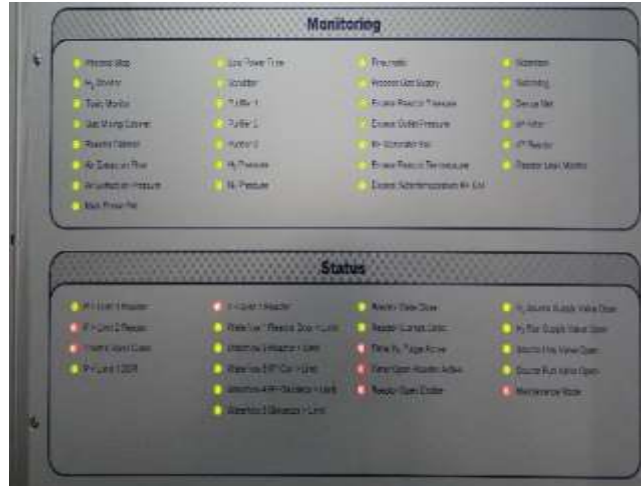
3.1.1. Elektriksel kabinet

MOCVD sisteminin tüm elektrik ve elektronik bileşenleri, elektriksel kabinette bulunan Güvenlik Kontrol Sistemi (SCS, Safety Control System) ile kontrol edilmektedir. Bu bileşenler, AIXTACT yazılımı aracılığıyla, yazılan uygun reçeteler tarafından sunucu bilgisayarı ile kontrol edilmektedir. Elektriksel kabinin ön kısmı Şekil 3.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 MOCVD sisteminde bulunan elektriksel kabinin ön yüzü.

Şekil 3.2’ de verilen SCS monitörü tüm sinyalleri, vana pozisyonlarını, sensörleri ve analog sınır değerlerini kontrol ederek, bu elektronik bileşenlerin pozisyonlarına veya değerlerine göre sistemin güvenli olup olmadığı hakkında bilgi verir. Ayrıca herhangi bir tehlike durumunda çalışan reçeteyi durdurur ve sistemi güvenli duruma (Safe State) getirir.



Şekil 3.2 Güvenlik Kontrol Sistemi (SCS).

Elektriksel kabinin ön yüzünde yer alan SCS paneli iki kısımdan oluşmaktadır. Üst kısımda yer alan LED’ler önemli alarmları göstermektedir. Reçetenin çalışması için bu bölümde herhangi bir hatanın olmaması yani bu kısımda yer alan bütün

LED'lerin yeşil yanması gerekmektedir. Panel üstündeki LED'lerin rengi MOCVD sisteminin durumu hakkında bilgi verir. LED'lerin rengi yeşil ise aktif bir alarmın olmadığını dolayısıyla reçeteyi başlatmada her hangi bir engelin olmadığını gösterir. Bu kısımda yer alan LED'lerden herhangi biri kırmızı ise bir alarm durumu olduğunu ve bu alarm giderilmeden reçetenin başlatılamayacağını gösterir. LED'lerden her hangi birisi turuncu ise alarmı oluşturan sebebin ortadan kalktığını gösterir ve yeniden yeşil olabilmesi için SCS monitörünün yeniden başlatılması (resetlenmesi) gerektiğini göstermektedir. SCS panelinin alt kısmında (Status bölümü) yer alan LED'ler sadece sıcaklık, kaynak, su ve basınç vanalarının durumunu göstermektedir. Örneğin, vanalarının açık olup olmadığı bu panel ile belirlenir ve eğer vana açık ise LED yeşil renkte yanarken, kapalı durumda LED'in rengi kırmızıdır.

Reaktör sıcaklığı, elektriksel kabininde bulunan "Eurotherm" sıcaklık kontrol birimi aracılığıyla kontrol edilmektedir. Ayrıca elektriksel kabinde üç adet Eurotherm basınç farkı kontrolörü vardır. Bu basınç farkı kontrolörleri ile vent (egzoz) ve run (reaktör) hatları arasındaki basınç farkları (differential pressure) ölçülmektedir. Metal organik ve hidrit kaynaklarının reaktöre giden ve egzozu giden hatları arasındaki basınç farkı bu kontrolcüler ile kontrol edilmektedir. Reaktör ve egzoz hatları arasındaki basınç farkını dengelemek için üç adet kontrolcü vardır. Bunların ikisi metal organik kaynakların olduğu hatta (MO1 ve MO2), üçüncüsü ise hidrit kaynakların olduğu hatta yer almaktadır. Her bir kaynak hattında reaktör ve egzoz hatları bulunmaktadır. Her bir hatta yer alan egzoz hatları geçiş esnasında basınç dengesini korumak için konulmaktadır. Aksi takdirde geri akış (back flow) olma olasılığı çok yüksektir. Egzoz hatları sayesinde basınç değişimi dengede tutularak bu problemin önüne geçilmiş olunur. Reaktör basıncı, sürekli bir şekilde "basınç kontrol birimi" (PCU, Pressure Control Unit) ile kontrol edilmektedir. PCU, kelebek valf (throttle valf) pozisyonunu değiştirerek reaktör basıncını ayarlamaktadır. Sıcaklık kontrolörü, run-vent hatları arasındaki basınç farklarını gösteren Eurotherm basınç farkı kontrolörleri ve basınç kontrol birimi Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Sıcaklık kontrolörü (üst) ve Eurotherm basınç farkı kontrolcüsü (alt) (a), reaktör basıncı kontrolcüsü (b).

AIXTACT yazılımı kontrolü için ana bilgisayar ve numuneden yerinde (in-situ) yansıma ve sıcaklık ölçümü yapan LUXTRON kontrol birimi de elektriksiz kabinette yer almaktadır. Ana bilgisayar ve yerinde yansıma ve sıcaklık ölçümü yapan LUXTRON sistemi Şekil 3.4’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.4 MOCVD sistemine ait ana bilgisayar (a) ve büyütme için yerinde yansıma ve sıcaklık ölçümü yapan LUXTRON sistemi (b).

3.1.2. Güvenlik ölçümü

Nitrat ve As/P tabanlı MOCVD sistemi piroforik (bazı maddelerin hava veya su ile temas ettiklerinde veya ısıtıldıklarında kendiliğinden alev almaları.) metal organik kaynakları, büyük ölçüde yanıcı hidrojen gazı (taşıyıcı gaz) ve zehirli olan silan, fosfin, arsin ve amonyak gazını içerir. Bu gazların çok düşük miktarda sızıntısı ortamda çalışma ve sağlık açısından güvenli olmayan durumlara neden olur. Bu nedenle MOCVD sisteminde, tüm gaz hatları örneğin metal organik ve hidrit kaynakların reaktör ve egzoz hatları, tüm gaz karıştırma kabini, reaktör kabini, hidrit gazı kabineleri periyodik olarak helyum gazı kaçak detektörü ile kontrol edilmelidir. Buna ek olarak, kaçak testi kaynakların (MO’ler ve Hidritler) değişiminden sonra da yapılmalıdır.

Acil bir durumda ya da kaza halinde proses gazlarını (MO kaynakları, hidritler ve hidrojen) kapatmak için, MOCVD sistemi kırmızı renkli acil kapatma (emergency off) ve sarı renkli proses durdurma (process stop) düğmeleri ile donatılmıştır Şekil 3.5’te acil ve proses durdurma düğmeleri gösterilmektedir.

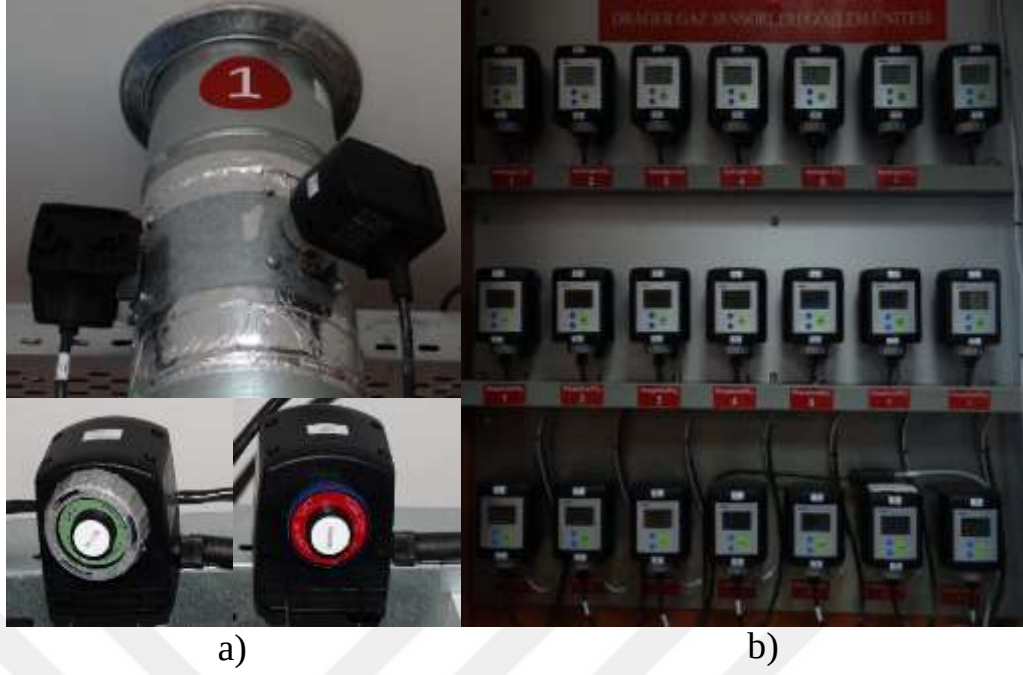


Şekil 3.5 MOCVD sisteminde bulunan acil kapama (a) ve proses durdurma (b) düğmeleri.

Tehlikeli bir durumda EMERGENCY OFF düğmesine basılması MOCVD sisteminin gücünü kapatırken PROCESS STOP düğmesine basıldığında;

- Çalışan reçete sonlandırılır
- Kelebek valf kapanır
- Tüm hidrojen, metal organik ve hidrit kaynakları kapanır
- Reaktörün ısıtıcı birimi kapanır
- Tüm gaz hatları azot ile temizlenir

Bu güvenlik düğmelerine ek olarak, amonyak, fosfin ve hidrojen drager gaz algılama sensörleri; MOCVD sisteminin havalandırma kısımlarına, scrubberin ve hidrit kabinetlerinin havalandırma kanalları üzerine ve ortamda da bu gazları algılamak için uygun yerlere monte edilmiştir. Şekil 3.6’ da MOCVD sisteminde var olan 21 adet Drager zehirli ve yanıcı gaz algılayıcı sensörlerine ait gözlem ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 3.6 MOCVD sisteminin havalandırma borusu üzerinde ve ortamda bulunan (a) ve sensörlerin okuduğu değerleri gösteren gözlem ünitesi (b).

Herhangi bir kaçak durumunda kaçak gaz algılama sensörleri, set edilen alarm seviyesi üzerinde bir gaz kaçağı algıladığında, drager sensör kontrolörü otomatik olarak SCS monitörünü tetikler ve reçeteyi iptal eder. Drager sensör kontrolörü **Şekil 3.7'** de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 Drager sensör kontrolörü.

Drager sensör kontrolörü tarafından SCS monitöründe oluşan alarm ayrıca gaz ikaz lambalarını da tetikler. Şekil 3.8' de verilen gaz ikaz lambalarından yeşil renkli olan her hangi bir alarmın olmadığını ve sistemin kullanımının güvenli olduğunu göstermektedir. Kırmızı lambalar ise hidrojen ya da zehirli gaz kaçağının olduğunu

işaret eder. Hidrojen ya da zehirli gaz kaçağı durumunda, kırmızı lamba/lambaların yanıp sönmesine eşlik eden siren sesi en kısa zamanda tehlikenin olduğu yerin boşaltılması için operatör ve çalışanları uyarmaktadır.



Şekil 3.8 Alarm ikaz lambaları.

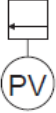
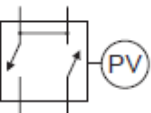
Drager gaz kaçağı göstergesindeki gaz kaçağı değeri/değerleri kalibre edilmiş alarm seviyesinin altına düşene kadar alarm giderilemez. Gaz kaçağı değeri/değerleri kalibre edilmiş alarm seviyesinin altına düştükten sonra sistem güvenli duruma geçer. Gaz kaçağının belirlenmesi ve sebebinin anlaşılması işleminde oksijen maskesini kullanma eğitimi almış kişiler oksijen maskelerini kullanarak gaz kaçağına sebep olan yeri tespit ederek gerekli önlemleri alırlar. Kırmızı lambaların yanması durumunda ayrıca hidrojen ve zehirli gaz kaynakları otomatik olarak kapanır.

3.1.3. Gaz karıştırma kabini

Gaz Karıştırma Kabini (GMC, Gas Mixing Cabinet) kaynak gaz hatları, gaz saflaştırıcıları, metal organik kaynakları ve aşağıdaki kontrol bileşenlerinden oluşur.

- Valfler (manuel, pnömatik 2/2, 3/2, 4/2, 5/2 valfler)
- Kütle akış kontrolcüler (MFCs, Mass flow controllers)
- Basınç kontrolcüler (PCs, Pressure controllers)

MOCVD sisteminde kullanılan valflerin şematik gösterimleri Şekil 3.9'da gösterilmektedir.

	pnömatik 2/2 valf
	pnömatik 3/2 valf
	pnömatik 4/2 valf
	pnömatik 5/2 valf

Şekil 3.9 2/2, 3/2, 4/2 ve 5/2 pnömatik valflerinin şemasal gösterimleri.

GMC’de bulunan MO kaynakları buhar basınç dengesi için sıcaklığı kontrol edilebilir su banyolarında (bubblers) tutulmaktadır. Sıcaklığı kontrol edilebilir su banyosu ve içine yerleştirilen MO kaynak Şekil 3.10’da gösterilmektedir. GMC’in ön kısmında bulunan MO kaynaklar, bir adet trimetilgalyum (TMGa, Trimethylgallium), bir adet dietilçinko (DEZn, Diethylzinc), bir adet trimetilalüminyum (TMAI, Trimethylaluminum), bir adet magnezyum kaynağı (Cp₂Mg, Bis-Cyclopentadienylmagnesium) ve bir adet karbon tetrabromür (CBr₄, Carbontetrabromide)’dür. GMC’nin arka tarafında bulunan MO kaynaklar ise, bir adet trimetilindiyum (TMIn, Trimethylindium) ve bir adet trietilgalyum (TEGa, triethylgallium)’dur. Hidrojen ve azot taşıyıcı gaz olarak Silan (SiH₄) hidrit kaynağı n- tipi katkılama için, genellikle p tipi katkılama için ise Cp₂Mg, DEZn ve CBr₄ MO kaynaklar kullanılmaktadır.



a)

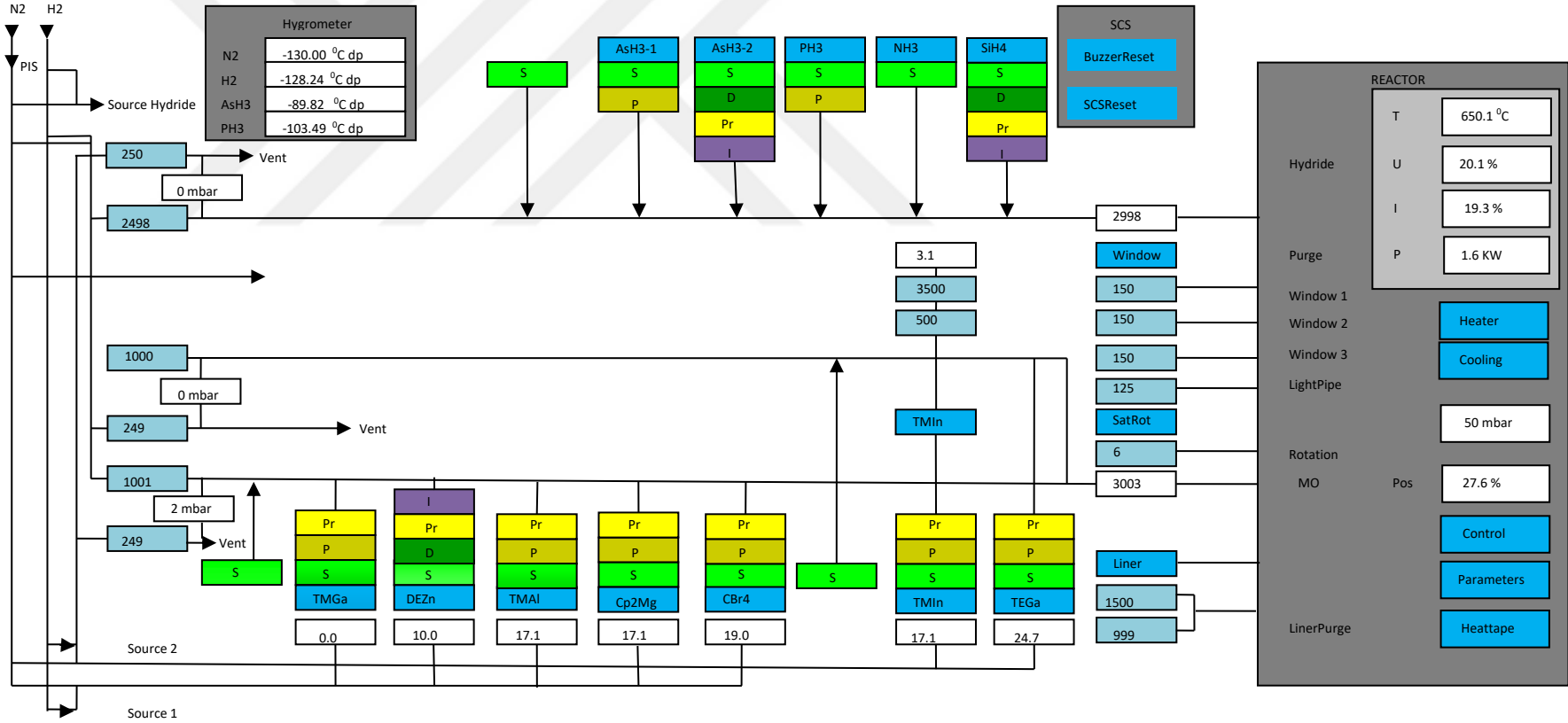


b)

Şekil 3.10 Sıcaklığı kontrol edilebilir su banyosu (a) ve su banyosu içine yerleştirilen MO kaynağın giriş ve çıkış hatları.

MOCVD sisteminde bulunan tüm hatların diyagramını ve kontrol edilebilir veya gözlenebilir tüm değerleri gösteren arayüz Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Şekil 3.11’de verilen arayüzdeki bazı kısımlar aşağıda açıklanmıştır.

	Hat (Line): Kullanılacak olan kaynağın (hidrit veya MO) hattının açılmasını sağlar. Mavi renk kaynak hattının kapalı olduğunu gösterir. Eğer hat açık ise yeşil renk olur.
S	Kaynak (source) Kütle Akış Kontrolörü: Kullanılacak olan kaynağın akış miktarını ayarlayan kütle akış kontrolörüdür.
P	İtme (Push) Kütle Akış Kontrolörü: Taşıyıcı gaz yardımı ile kullanılacak kaynağın itilmesi ve seyreltme için kullanılan kütle akış kontrolörü.
Pr	Basınç (pressure) Kontrolör: Reaktöre (run) ya da egzoz (vent) gidecek olan kaynağın basıncını ayarlayan basınç kütle akış kontrolörü.
D	Seyreltme (Dilute) Kütle Akış Kontrolörü: Reaktöre gönderilecek bazı kaynakların (DEZn ve Silan) daha hassas kontrolü için kullanılır.
I	Enjekte (inject) Kütle Akış Kontrolörü: Seyreltilmiş olan kaynağın reaktöre ya da ekzoz (vent) gönderilecek akış miktarını ayarlar.
19.0	Su Banyosu (Bubbler) Sıcaklık Göstergesi: Sıcaklığı kontrol edilebilir su banyosunun sıcaklığını gösterir. Su banyosu içine konulan MO sabit bir sıcaklıkta tutulması gerekir. Aksi halde kısmi buhar basıncı (Partial Vapor Pressure) bubbler sıcaklığı ile değişir ve bu değişim kullanılacak kaynağın miktarını değiştirir.
..... °C dp	Nem Ölçer (Hygrometer): Kullanılan hidrit kaynaklarının ve taşıyıcı gazların çiğ noktası (dew point) değerlerini ölçer.
SatRot	Dönme (SatRot) Kütle akış kontrolörü: Alttaşın dönmesi için kullanılan gazın miktarını ayarlayan kütle akış kontrolörüdür. Mavi renk olduğunda kullanılan gaz azot iken yeşil renk hidrojen kullanıldığını gösterir. Aynı davranış pencere (window) ve linerdan geçen gazlar için de geçerlidir.



Şekil 3.11 MOCVD sistemine ait tüm parametrelerin görüntülenip manuel veya reçete ile otomatik kontrol edilebilen arayüz.

Şekil 3.11’de açıkça görüldüğü üzere MOCVD sisteminde reaktöre giden üç ana hat vardır. Bunlar büyütme için kullanılacak gazların kaynaktan reaktöre gitmesi için kullanılır. Arsin, fosfin, silan ve amonyak kaynakları için hidrit run hattı, GMC’nin ön tarafında bulunan MO kaynaklar (TMGa, DEZn, TMAI, Cp₂Mg, CBr₄) için MO1 run hattı, GMC’nin arka tarafında bulunan MO kaynaklar (TMIn, TEGa) için ise MO2 run hattı kullanılmaktadır. Bu kaynaklar yüksek saflıktaki hidrojen ya da azot taşıyıcı gazı ile reaktör kabinine taşınmaktadırlar. Kaynağın vent hattı ile run hattı arasındaki geçiş (run-vent stack) Şekil 3.12’de gösterildiği gibi 5/2 valfi ile yapılır ve iki durum söz konusudur.

- Eğer 5/2 valfi açık ise büyütme için kullanılacak kaynak reaktöre girer.
- Eğer 5/2 valfi kapalı ise kaynak reaktöre girmez ve vent hattı boyunca ekzoza akar.



Şekil 3.12 Run ve vent hatları arasındaki geçişi sağlayan 5/2 valfinin görünümü.

Hidrit ve metal organik kaynaklar 5/2 valfi kullanarak reaktöre yönlendirilir. Ayrıca bu kaynak gazlara ek olarak lineer temizliği, reaktörde haznesinde bulunan üç adet pencerenin temizliği, alttaş sıcaklığını ölçen ışıık borusunun temizliği (lightpipe) ve dönmeyi sağlamak için reaktör haznesine gaz gönderilmektedir. Reaktör haznesine giden bu gazların bulunduğu hatlar Şekil 3.13’de gösterilmektedir.



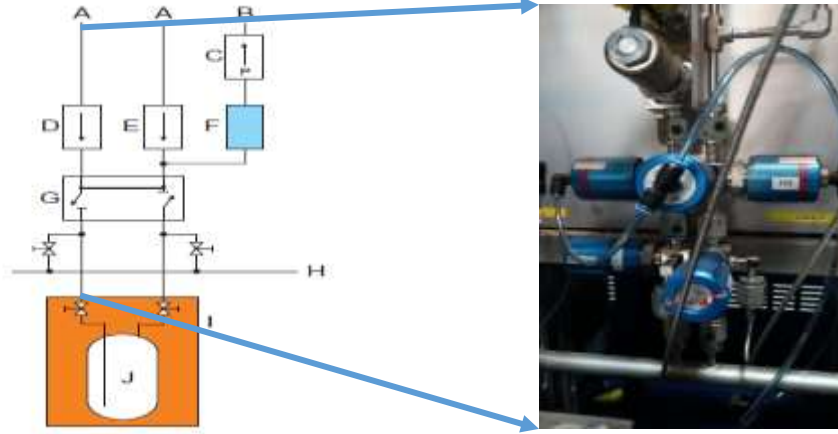
Şekil 3.13 Reaktör haznesine giden hatlar (Run MO, Run Hyd, Lineer Purge 1, lightpipe, Window 1,2,3 ve Main rotation).

Run ve vent hatları arasındaki geçiş süreçlerinde basıncı dengelemek ve geri akışı engellemek için run/vent hatları ve reaktör aynı basınç değerinde tutulmalıdır. MFCs, kaynakların akışını kontrol eder ve akış denetleyicilerinin etkin işleyişi için azot /hidrojen/hidrit gaz basıncı 3,5 barda tutulması gerekmektedir. Şekil 3.14’ de azot ve hidrojen gazının basıncını gösteren basınç göstergeleri verilmiştir. Bunlara ek olarak, GMC’de bulunan MO kaynakları için ayrıca bir temizleme hattı (MO-Vac) bulunmaktadır.



Şekil 3.14 Reaktöre giren azot ve hidrojen ana hatlarının basınç göstergeleri.

Isı banyosunun şematik resmi ve banyo içindeki metal organik kaynağa bağlı olan hatlar, MFCs ve PC’nin gösterimi ve isimleri Şekil 3.15’de gösterilmektedir.



- | | |
|--|---|
| A N ₂ /H ₂ Kaynağı | F Gaz Alışım Ölçümü |
| B MO run/vent hattı | G 4/2 vana |
| C Basınç kontrolörü | H MO vakum (MO kaynağını değiştirmede kullanılır) |
| D Kaynak MFC | I Su banyosu |
| E İtme MFC | J MO Kaynak |

Şekil 3.15 Detaylandırılmış ısıt banyosu ve metal organik kaynak bağlantıları.

MOCVD sisteminde bulunan tüm kütle akış kontrolörleri ve basınç kontrolörlerinin bilgisayar kontrolü bir arayüz (interface) birimine bağlıdır. Sistemde bulunan arayüzlerden bir tanesi Şekil 3.16’da gösterilmektedir.



Şekil 3.16 Kütle akış kontrolörü ve basınç kontrolörlerin bilgisayar ile kontrolü için kullanılan arayüz (interface).

MOCVD’de büyütme sürecinde saflığı düşük olan kaynakların kullanılması büyütülen yarıiletken kristal malzemenin genel olarak düşük kaliteli olmasına neden olur. Dolayısıyla kullanılan kaynakların saflığı, epitaksiyel tabakaların ve üretilen cihazların kalitesi için kaçınılmazdır. Bu nedenle her ne kadar ultra yüksek saflıkta kaynaklar kullanılıyor olsa da büyütme için kullanılacak gazlar reaktöre gönderilmeden önce tekrar saflaştırıcıdan (prufier) geçirilmelidir. Saflaştırıcılar gaz içerisindeki oksijen, karbon ve üretim ve depolanma esnasında kullanılan birçok metal

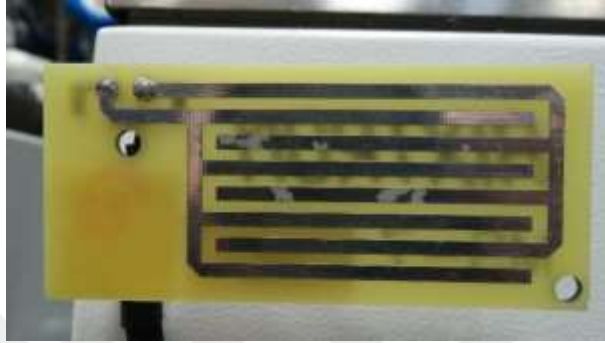
vb gibi safsızlıkları tutabilen yüksek yüzey alanlı emici maddelerden oluşur. Safsızlık atomları kimyasal bağlarla yüzeysel tutunma reaksiyonu süreçleri ile reaktif ortamın yüzeyine bağlanır. Ortamın yüksek yüzey alanına sahip olması giren gazın safsızlık seviyeleri ve ortalama akış oranına bağlı olarak uzun kullanım ömrü sağlar. Arıtma malzemesi, hidrojen ve azot gazı için nikel karışım, amonyak gazı için manganer reçinedir. Gazların saflığının bir göstergesi olan çiğ noktası (dp, dew point) büyütme için kullanılan her bir gaz için 24 saat boyunca ölçülmektedir. Şekil 3.17’ de hidrojen ve azot gazları için sisteme entegre olan saflaştırıcılar, çiğ noktası ölçer ve ölçüm sonrası elde edilen değerler gösterilmektedir.



Şekil 3.17 MOCVD sisteminde kullanılan hidrojen ve azot gazlarının daha yüksek seviyede temiz hale getirilmesi için kullanılan saflaştırıcılar (a), kullanılan gazların çiğ noktası ölçer cihaz ve ölçüm değerleri (b).

MOCVD sisteminin birçok noktasında büyütme sırasında reaktörün ve bağlı olan birçok parçanın ısınmadan kaynaklı deformasyonunu azaltmak için soğutma su sistemi hattı bulunmaktadır. Olası herhangi bir kaza ve kaçak anında oluşabilecek ve devam edecek su kaçağı sisteme ve kullanıcılara ciddi hasarlar verebilmektedir. Bu yüzden MOCVD sisteminin birçok bölgesi Şekil 3.18’ de gösterilen sıvı kaçak sensörleri ile donatılmıştır. Bu sıvı kaçak sensörleri SCS monitörüne bağlıdır. Eğer sensörlerden biri ile sıvı algılanırsa (örneğin termostat banyosundaki suyun taşması veya soğutma suyunu taşıyan borulardan birisinin patlaması durumunda), bu durum SCS monitör

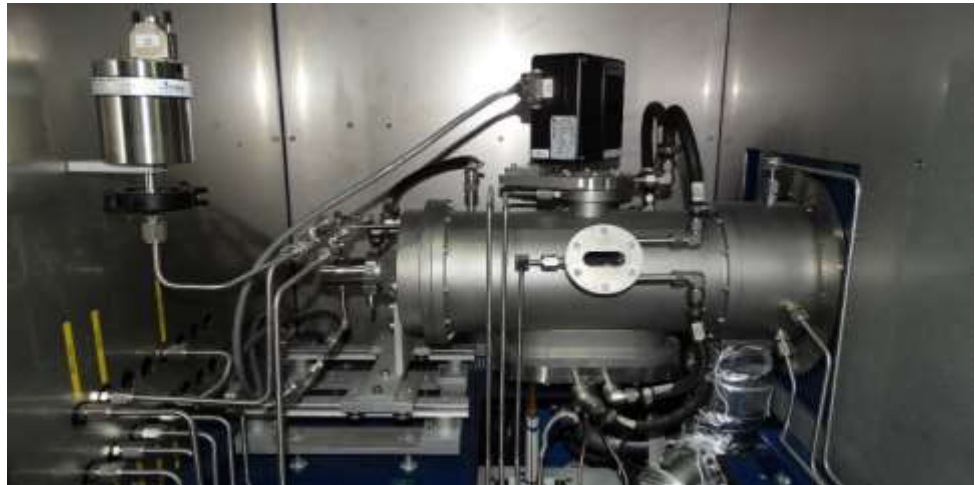
kısımında kırmızı alarm meydana getirir. Sıvı kaçak sensörünün çalışma prensibi oldukça basittir. Sıvı kaçağı durumunda Şekil 3.18’de görülen iki paralel kontak arasında bağlantı sağlanır yani kısa devre olur ve SCS monitöründe “su sızıntısı (waterleak)” alarmı aktive olur. Alarmı kaldırmak için, kaçağı tespit eden sensör belirlenerek sıvıdan tamamen arındırılmış olması ve SCS sisteminin resetlenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.18 MOCVD sisteminde bulunan sıvı kaçak sensörü.

3.1.4. Reaktör kabini

Reaktör kabini, paslanmaz çelik gövdeden oluşan yatay (horizontal) reaktör (Şekil 3.19), reaktör içerisinde bulunan susceptör, kuvars parçalar, numune transfer sistemi, RF indüktör, çift conta (DOR, Double O-Ring) ve yerinde yansıma ve sıcaklık ölçüm ünitesinden oluşmaktadır.

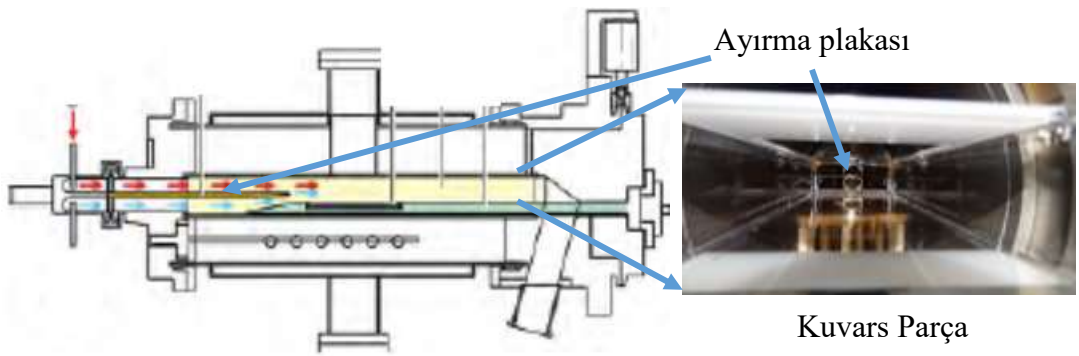


Şekil 3.19 Reaktör kabini içinde bulunan yatay reaktör.

Reaktör içerisinde belirli bölgelerde büyütme esnasında kaplama olmaması için birçok temizleme (purge) hattı vardır. Bunlar Liner Purge, Light Pipe ve pencere bölmesi

(Window 1, Window 2, Window 3)'dır. Hem azot hem de hidrojen temizleme gazı olarak kullanılabilir. Reaktör kabini içerisinde temizleme gaz hatlarına ek olarak alttaşın konulduğu parçanın (susceptor) dönmesi için de bir gaz hattı vardır.. Susceptorün dönmesi üretici firma Aixtron patentli “gas foil rotation” tekniği kullanılarak yapılır ve dönme hızı bu hatta gönderilen gaz akış miktarı değiştirilerek kontrol edilir. Büyütme esnasında alttaşı görebilmek ve gerekirse yerinde ölçüm cihazları takabilmek için üç adet pencere bölmesi vardır. Yeterince yüksek sıcaklıkta susceptorün dönme hızını ve alttaşın takip edilebileceği ön pencere, yerinde yansımayı ölçmek için lazerin tam susceptor üzerine düşmesi için tasarlanan üst pencere ve son olarakta reaktörün arka tarafında bir pencere bulunmaktadır.

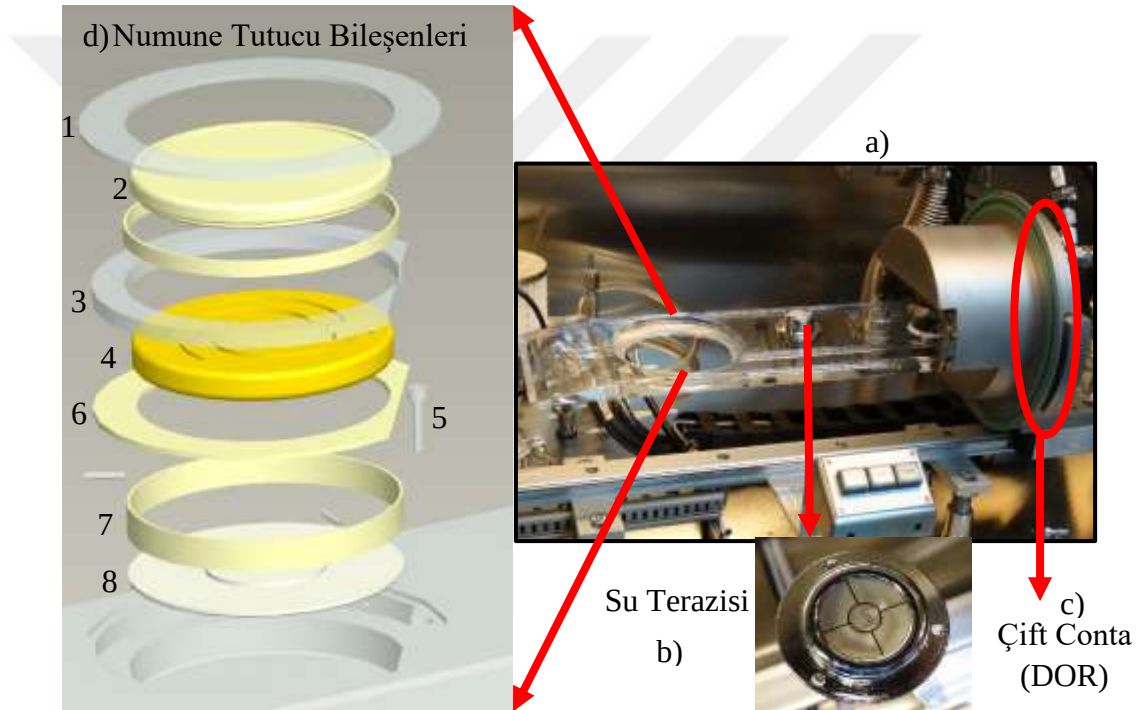
Büyütmenin gerçekleştiği ortam ayırma plakası (separation plate), tavan plakası (ceiling plate) ve reaktörün iç çeperinin kaplanmasını engelleyen liner kuvars parçadan oluşur. Bu tasarım ve sistemde bulunan kuvars parça Şekil 3.20’de gösterilmektedir. Reaktör içerisine yerleştirilen ayırma plakası, susceptor bölgesine ulaşana kadar MO run hattı ve hidrit run hattından gelen gazların karışmaması ve parazitik reaksiyon oluşmaması için kullanılmaktadır. Liner kuvars parça, susceptor tutucuyu sarar ve kuvars parçanın içi kısmı kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bölümdür. Tavan plakası linerin üzerini kapatmak ve yerinde ölçümde kullanılan lazerin alttaşa ulaşması için tasarlanmıştır. Büyütme boyunca ilgili alaşımlar alttaş, liner duvarları ve taban plakası üzerine birikirler. Tavan plakası kolaylıkla çıkartılabilir ve büyütme süresince alttaş üzerine herhangi bir parça düşmesini engellemek için sürekli temizlenir.



Şekil 3.20 Ayırma plakasının konumu ve reaktörün iç çeperinin kaplanmasını engelleyen kuvars parçasının reaktörün içinden görünüşü.

Alttaş, raylı transfer modülü yardımıyla reaktöre yüklenir ve reaktörden çıkarılır. Transfer modülü Şekil 3.21’de verildiği gibi taban düzlemine paralel

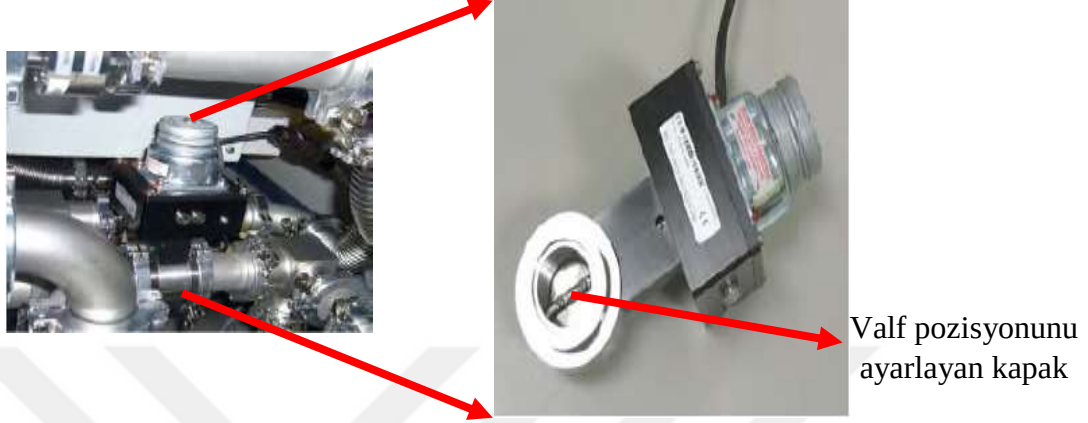
konumdadır. Transfer modülü üzerindeki boşluk olan kısım numune tutucu kısmıdır (Şekil 3.21). Üzerine büyütme yapılacak olan alttaş, numune tutucu üzerinde bulunan susceptore yerleştirildikten sonra transfer modülü yardımıyla reaktöre doğru itilerek yüklenir. Yükleme sonunda reaktör kapısı üç adet pnömatik tırnak ile kilitlenir. Ayrıca reaktör kapağında herhangi bir kaçak olmaması için Şekil 3.21’de belirttiği gibi DOR (çift conta, double o-ring) sistemi vardır. DOR sistemi iç ve dışta olmak üzere iki adet contadan oluşur. Bu iki conta arasında kalan bölgenin basıncı içerden dışarı veya tersi durumda oluşabilecek kaçak için sürekli olarak kontrol edilmektedir. Bu iki conta arasındaki basınç 20 mbar’ın üzerine çıkarsa sistem hata verir ve reçete otomatik olarak sonlandırılır.



Şekil 3.21 Transfer modülü (a), transfer modülün tabanla paralel olduğunu gösteren su terazisi (b), çift conta (DOR) (c) ve numune tutucu bileşenleri (1-cover ring, 2-susceptor, 3-quartz ring, 4-rotation disk, 5-fixing pin, 6-insulation plate, 7-insulation ring, 8-inlaid disk) (d).

Bu bileşenlere ek olarak, kelebek valf ve su soğutma sistemi reaktör kabininin arka tarafında yer almaktadır. Reaktör içerisine monte edilen basınç ölçer yardımıyla reaktör içerisindeki basınç değeri MKS basınç kontrol ünitesine aktarılır. MKS basınç kontrol cihazı, kelebek valfinin pozisyonunu kontrol ederek reaktördeki basınç değerini ayarlar. Kelebek valf tamamen açık (pozisyonu %100 olduğunda) iken

reaktör pompanın tüm gücüyle vakumlanır ve minimum basınç değeri elde edilir. Eğer kelebek valf kapalı ise (pozisyonu %0 olduğunda) bu durumda reaktör atmosfer basıncındadır. MOCVD sisteminde bulunan kelebek valf Şekil 3.22’de gösterilmektedir.



Şekil 3.22 Reaktör kabini içinde bulunan kelebek valf.

MOCVD sisteminde RF jeneratörüne ve reaktör kabine giden iki ayrı soğutma suyu hattı bulunmaktadır. MOCVD sisteminde reaktör kabini soğutma işlemi için soğutma su girişinin 6 bar çıkışının ise 2 bar olması gerekmektedir. Eğer su basıncında dalgalanma ya da düşme olursa SCS monitöründe alarm tetiklenir ve reçete sonlanır. Bu nedenle büyötmeye başlanmadan önce soğutma su hatları kontrol edilmelidir. Reaktör kabine giren ana su hattı Şekil 3.23’de gösterildiğı gibi sistemin farklı bölgelerine dağıtılmak üzere ayrılır. Şekil 3.23’de görölen su hattında manuel valfler yardımıyla suyun basınç değeri değıştirilebilir. Bu sayede reaktör, bağlantılar (flanges), RF osilatörü, bobin (coil) ya da indiktör ve eldivenli kutu (glove box) farklı su akış değeri altında tutulabilir. Ayrıca soğutma suyu içerisinde olası istenmeyen parçacıklar olma olasılığı nedeniyle soğutma suyu kabinete girmeden önce bir filtre setinden geçirilir ve bu filtreler periyodik olarak temizlenmektedir.



Giriş suyu basıncını
ayarlama vanası

Çıkış suyu basınç
göstergesi

Akış metreler

Su seviyesini ayarlamak
için manuel valfler

Şekil 3.23 MOCVD sisteminde kullanılan soğutma suyuna ait dağıtım ünitesi.

3.1.5. Radyo frekans (RF) jeneratörü

Radyo Frekans (RF) jeneratörü, çıkışındaki bobin ya da indüktör aracılığıyla grafit ya da SiC (silicon carbide) kaplı alttaş tutucuya (susceptor) güç transfer eder. RF jeneratörünün iki modu vardır. Bunlar iç (internal mode) ve (remote mode) uzak moddur. İç modda jeneratör fonksiyonları bağımsızdır. Jeneratörün çalışması için gerekli olan tüm komutlar jeneratör içerisinde üretilir. Uzak modda ise, jeneratör daha yüksek mertebeden kontrol sistemi tarafından kontrol edilebilmesi için entegre edilmiştir. Jeneratörün çalışması için gerekli olan tüm komutlar dijital arayüz yardımıyla veya reçete ile çalışmaktadır.

RF jeneratörü Şekil 3.24’de gösterildiği gibi iki ana bölümden oluşmaktadır: güç kaynağı ve osilatör ünitesi (alüminyum döküm gövde ve alüminyum sac metal gövde). Güç kaynağı ve osilatör ünitesinde su soğutma sistemi bulunmaktadır. MOCVD sisteminde uyarıcı (exciter) olarak bilinen RF osilatör ve indüktör reaktör kabininde yer alır. RF jeneratörü olarak bilinen güç kaynağı ünitesi MOCVD sisteminin dışında ayrı bir ünite olarak yer almaktadır. Bu iki ayrı sistem, bir güç besleme kablosu ve bir kontrol kablosu ile birbirine bağlıdır.



Şekil 3.24 RF jeneratörü ve osilatör ünitesi.

Uyarıcı, ara devrenin DC kaynak voltajından sinüzoidal olarak değişen voltaja dönüştürerek RF sinyali üretmektedir. Bu alternatif voltajın frekansı osilatör devresi tarafından belirlenir ve bu frekans çalışma frekansıdır. Osilatör devresi bir indüktör ve bir ya da birden fazla kapasitörden oluşmaktadır. RF enerjisini bir iş parçasına aktarımı bir indüktör vasıtasıyla sağlanır. İndüktör iş parçasına ve frekans uyumuna göre şekil alır. RF jeneratörünün akım tüketimi osilatör devresindeki kaybına bağlıdır. İzleme elektroniği dalgalanma gerilimi, su arızaları, yardımcı voltaj ve çalışma frekansı uyarıcısını izler. İzleme elektroniği, ikaz cihazının çalışma verilerini güç kaynağı ünitesindeki kontrol elektroniğine de aktarır.

3.1.6. Eldivenli kutu

Eldivenli kutu (glove box) asal bir gaz olan saf azot ortamını içermektedir. Dolayısıyla reaktörde bakım yapıldığında (örneğin reaktör içerisinde bulunan kuvars parçaların temizliği) veya alttaş transferinde herhangi olası bir kirlilik (su buharı, oksijen vb) minimum düzeyde tutulmaya çalışılmaktadır. Eldivenli kutu, ortam içerisinde çalışılabilmesi için iki adet eldiven, alttaş transferi için vakumlu cımbız, süpürge, transfer modülü rayı ve dış ortama açılan ön odacıktan (antechamber) oluşmaktadır. Dış ortama açılan hazne iki kapaktan oluşur; bu kapaklar alttaşları veya reaktör parçalarını yüklemek ve boşaltmak için kullanılır. Büyütme için kullanılacak alttaşlar dış ortama açılan kapaktan yüklenerek kapak kapatılır. Artık kapalı olan bu ortam havadan gelen oksijen ve nem ortamındadır. Dolayısıyla dış ortamdan gelen bu istenmeyen gaz ortamına haznenin iç kapağı açılmadan önce ortam temizlenmelidir. Temizleme işleminde, başlangıçta ortam tamamen vakumlanıp daha sonra yüksek saflıkta azot ile doldurulur ve bu döngü en az üç kez tekrar edilir. Böylece iç kapı

açılmadan önce ön odacığın tamamen azot ortamında olması sağlanır. Temizleme işlemi sonunda ön odacığın eldivenli kutu ortamında bulunan iç kapağı açılarak alttaş eldivenli kutu içerisine transfer edilir. Şekil 3.25'te ön odacık ve dış ortama açılan kapak gösterilmektedir.



Şekil 3.25 Eldivenli kutu içerisinde bulunan ön odacık (antechamber) ve reaktör içerisine kuars malzeme, alttaş vb parçalar koyabilmek için dış ortama açılan kapak.

Alttaşı susceptör üzerine yerleştirilirken eldivenli kutu içerisinde bulunan özel olarak tasarlanmış vakumlu cımbız (tweezer) kullanılır. Vakumlu cımbız yardımıyla alttaşın alt kısmından numune vakumlanarak Şekil 3.26'da gösterildiği gibi alttaş tutucu susceptör üzerine yerleştirilir. Böylece büyütme gerçekleşecek olan yüzeyde büyütmeyi olumsuz yönde etkileyecek herhangi bir çizik, toz, parçacık vb kirlilik olmaz.



Şekil 3.26 Vakumlu cımbız kullanarak alttaşın alttaş tutucu susceptör üzerine yerleştirilme işlemi.

Vakumlu cımbız eldivenli kutu dışında bulunan bir pedal yardımı ile kontrol edilir. Pedal yardımıyla cımbızın uç kısmında bulunan boşluktan vakum başlatır bu sayede alttaş cımbız yüzeyine tutturulur. Cımbızla alttaş arasındaki vakumu kırmak yani alttaş alttaş tutucuya yerleştirebilmek için ise cımbız üzerindeki vakum kırma düğmesi kullanılır. Alttaş cımbıza tutturmak için kullanılan pedal ve eldivenli kutu

basıncını gerekli durumlarda manuel olarak arttırıp azaltmak için kullanılan pedal grubu Şekil 3.27’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.27 Cımbızla alttaş arasında vakum oluşturmak için kullanılan pedallar (a) ve eldivenli kutu içindeki basıncı gerekli durumlarda manuel olarak arttırmak ya da azaltmak için kullanılan pedal grubu (b).

Eldivenli kutu içerisinde ayrıca oluşabilecek kirliliği temizlemek amacıyla yüksek emiciliğe sahip ve temiz oda kriterlerine uygun süpürge bulunmaktadır. Bu süpürge yardımıyla reaktör içerisinde kirlenen kuvars parçaları eldivenli kutu dışına çıkarmaya gerek duymadan temizlemeyi mümkün kılar. Bu süpürge'nin topladığı toz, kir vs atıklar tehlikeli olabileceğinden özel bir hazne içerisinde biriktirilir. Şekil 3.28 eldivenli kutu içerisinde bulunan süpürgeyi göstermektedir.



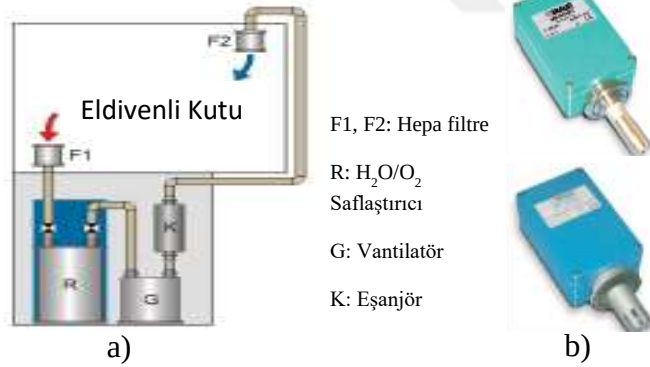
Şekil 3.28 Eldivenli kutu içerisinde yer alan ve reaktör ve eldivenli kutu içerisinde oluşabilecek kirliliği temizlemek amacıyla kullanılan yüksek emiciliğe sahip süpürge.

Şekil 3.29’da eldivenli kutunun tüm parametrelerini kontrol etmeye yarayan kontrol ve gözlem ünitesi gösterilmektedir. Eldivenli kutu içerisindeki oksijen ve nem oranları ppm biriminde analizör (analyzer) ile ölçülür.



Şekil 3.29 Eldivenli kutunun tüm parametrelerini kontrol etmeye yarayan kontrol ve gözlem ünitesi.

Reaktör, eldivenli kutu ortamında açılmadan önce reaktörün her zaman temiz tutulabilmesi açısından Şekil 3.29'daki eldivenli kutu kontrol ünitesinin göstergesinde yer alan oksijen ve nem değerleri 10 ppm'in altında olması gerekmektedir. Oksijen ve nem seviyesini düşük tutmak için eldivenli kutu içerisindeki azot gazı sürekli olarak H_2O/O_2 saflaştırıcıdan geçirilerek (circulation) gaz içerisindeki safsızlıklardan arındırılır. Bu süreç kabaca Şekil 3.30'da gösterilmektedir.



Şekil 3.30 Eldivenli kutu içerisindeki oksijen ve nem seviyesini düşürmek için yapılan sirkülasyon işlemi. F1 filtresinden giren ortam gazı (çoğunlukla azot) çeşitli saflaştırma ünitelerinden geçtikten sonra tekrar F2 filtresi vasıtasıyla ortama verilmektedir (a), Eldivenli kutu ortamındaki oksijen ve nem seviyelerini ölçen sensörler (b).

Eğer oksijen veya nem ölçerlerin gösterdikleri değerler 10 ppm değerinin üzerinde ise reaktör açılmadan önce temizleme (purge) işlemi yapılmalıdır. Temizleme işleminde ortama sürekli olarak yüksek saflıkta azot gazı akışı olur ve fazla gaz egzozdan dışarı

atılır, bu sayede eldivenli kutu içindeki azot gazı dışarıdan gelen azot gazı ile yer değiştirilmiş olur. Sirkülasyon (circulation) yapılmasına rağmen oksijen ve nem değerlerinin sürekli artması durumunda filtreler rejenerasyon işlemi yapılmalıdır. Rejenerasyon işleminde filtrelerin temizlenmesi için forming gaz (%95 N₂, %5 H₂) gönderilerek Çizelge 3.1’de gösterilen aşamalar uygulanır.

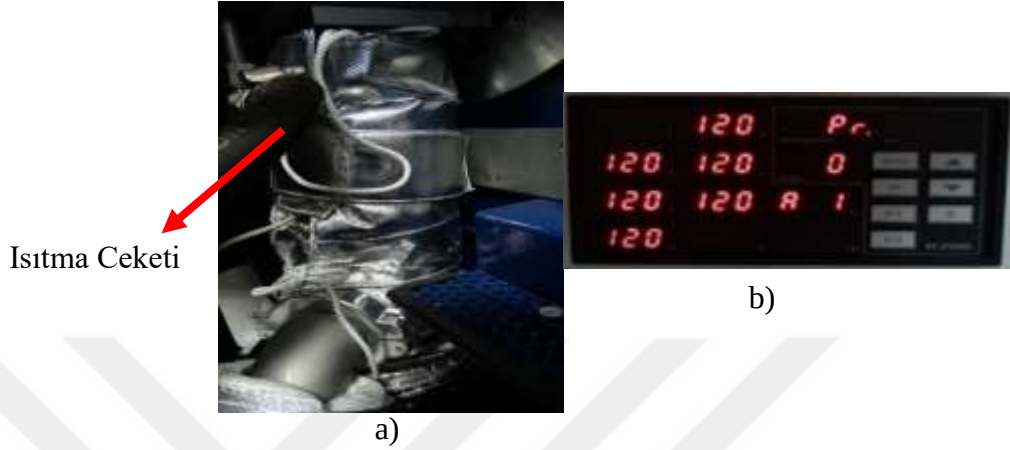
Çizelge 3.1 Eldivenli kutudaki filtrelerin temizlenmesi amacıyla yapılan rejenerasyon işleminin adımları

Adım	Süre	Gerçekleşen işlemler
Başlangıç	Başlangıç	Rejenerasyon için kullanılacak gazın akış testi yapılır. Gerekli akış sağlandığında test bitirilir. Daha sonra purge valfi açılır ve ısıtma işlemi başlar
1	180 dakika sonra	Formik gaz giriş valfi açılır
2	345 dakika sonra	Isıtma kapatılır
3	360 dakika sonra	Formik gaz giriş valfi kapatılır
4	480 dakika sonra	Rejenerasyon vakum/ gaz balast valfi açılır
5	540 dakika sonra	Gaz Balast valfi kapatılır Orta düzey doldurma 1 (20 saniye doldurma, daha sonra boşaltılır)
6	570 dakika sonra	Orta düzey doldurma 2 (20 saniye doldurma, daha sonra boşaltılır)
7	600 dakika sonra	Orta düzey doldurma 3 (20 saniye doldurma, daha sonra boşaltılır)
8	660 dakika sonra	Rejenerasyon vakum valfi kapatılır.
9	661 dakika sonra	Basınç dengeleme valfi açılır.
10	960 dakika sonra	Basınç dengeleme valfi kapanır. Rejenerasyon işlemi sonlanır.

3.1.7. Egzoz

Büyütme esnasında kimyasal reaksiyonlar sonucu orta çıkan artık gazlar egzozdan reaktör ortamı dışına atılır. Büyütmelerde kullanılan arsin, fosfin gibi aşırı zehirli gazlar ana pompa vasıtasıyla egzoz hattından atık temizleme ünitesine (scrubber) gönderilmeden önce etrafında soğuk tuzak bulunan özel bir filtreden geçirilir. Reaktörün egzoz çıkışında ısıtma ceketleri (heater jackets) vardır. Ceketler bu kısımdaki egzoz hattını ısıtarak zehirli gazların boru çeperlerine yapışarak ilerde

tehlike oluşturmasını önlerler. Her biri 120 °C sıcaklıkta bulunan 6 adet ısıtma ceketı vardır. şekil 3.31’de 120 °C’de tutulan ceketler ve elektrıksel kabinette bulunan ceketlerin sıcaklığını kontrol eden birim görülmektedir.



şekil 3.31 Reaktör egzoz hattında bulunan ve zehirli gazların boru çeperlerine yapışmasını engelleyen ısıtma ceketı (a) ve ısıtma ceketlerinin 6 farklı bölgesinden anlık sıcaklık değerlerinin kontrolünün sağlandığı elektrıksel kabinette bulunan kontrol birimi (b).

Isıtılan egzoz hattının sonunda üç ayaklı soğuk tuzak (cold trap) adı verilen bir hazne bulunmaktadır. Bu hazne içerisinde egzozdan sıcak olarak çıkan arsin ve fosfin artık gazlarının tutulması için özel tasarlanan bir filtre bulunur ve hazne zehirli gazları filtrenin tutma kabiliyetini arttırmak için soğuk (4 C⁰) tutulur. Böylece sıcak ortamdan aniden soğuk ortama gelen zehirli gazların büyük kısmı şekil 3.32’de verilen üç ayaklı hazne içinde bulunan filtre ile tutulmuş olur.



şekil 3.32 üç ayaklı hazne ve soğuk tuzak (cold trap).

Ana pompa, reaktör ortamını vakumlamak için kullanılır. Bu pompa, kelebek valf vasıtasıyla reaktör basınç kontrol ünitesine ve kelebek valfin pozisyonuna göre reaktör basıncı ayarlar (10 mbar'dan atmosfer basıncına kadar). Şekil 3.33'te gösterilen EBARA A25 S markalı, A serisi pompa, temiz oda ortamında kullanılmak üzere tasarlanmış kuru vakum pompasıdır. A serisi pompalar kompakt bir tasarıma sahiptir. Pompada bulunan dişliler Perfloro-Polieter (PFPE) yağı ile yağlanırlar. Dişlilere bir zarar gelmemesi için yağ seviyesi sürekli olarak kontrol edilmelidir. Vakum sağlayan pompanın dişlileri için kullanılmak zorunda olunan yağdan kirlenmemesi için mil contasına azot gazı gönderilerek bu bölge yağdan arındırılır. Ayrıca büyütme esnasında kullanılan zehirli gazları vakumlayan pompa bu alaşımları azot gazı ile seyreltir. Pompa, vakumdan atmosferik basınca kadar gaz sıkıştırdığından sıkıştırma ısısı üretir. Bu nedenle soğutma suyu döngüsü sağlanarak gerekli bölümler soğutulur. Pompa durdurulduğunda pompadan reaktöre doğru gazın ters akışını önlemek için pompa çıkışında bir egzoz kontrol valfi vardır.



Şekil 3.33 MOCVD reaktöründe değişken basınç ortamlarında büyütme yapabilmek için kullanılan EBARA A25 S ana pompa.

Ana pompa ve atık temizleme ünitesi, tamamen izole paslanmaz çelik boru ile birbirine bağlıdır. Şekil 3.34' de gösterilen atık temizleme ünitesinde toplamda üç adet tank bulunmaktadır ve tanklar uygun kimyasal çözeltiler ile doldurulmuştur. Büyütmede kullanılan zehirli gazlar ve artık gazlar bu kabinlerdeki kimyasal reaksiyonlar sonucunda zararsız hale getirilir. A tankının çözeltisi, sülfürik asit ve iyonsuzlaştırılmış (deionize) su karışımıdır ve bu tankta, gazlar detokslanır (gazların zararlı olan zehirli maddelerden temizlenmesi anlamına gelir). B kabininde sodyum bromat, sülfürik asit ve iyonsuzlaştırılmış suyun karışımı vardır ve bu tankta gazlar okside edilir. C kabini sodyum hidroksit ve iyonsuzlaştırılmış deiyonize suyun bir karışımıdır. Bu tankta gazlar nötralizasyon, kimyasal tepkime (disproportionation) ve hidroliz olaylarına maruz kalır. Atık temizleme ünitesinde bulunan kontrol ve gözlem

ekranı vasıtasıyla çeşitli alarm durumlarında (kimyasal çözelti seviyesi düşük olduğunda, sıvı kaçağında, giriş ve çıkış basınç farklılıkları vb. durumlarda) uyarı verir. Çözeltiler kullanma sıklığına göre işlevselliğini kaybettiğinden belirli periyotlarla yeniden hazırlanması gerekmektedir.



Şekil 3.34 MOCVD reaktöründe büyütme sırasında kullanılan ve büyütme sonrasında ortaya çıkan zehirli atık gazların tehlikesiz hale getirilmesi için çeşitli kimyasal çözeltiler içeren 3 aşamalı atık temizleme ünitesi.

3.1.8. Hidrit gaz kabinetleri

MOCVD büyütmelerinde hidrit kaynağı olarak kullanılan Arsin, fosfin, amonyak ve n tipi katkılama için kullanılan silan gazlarının yer aldığı kabinetler Şekil 3.35'te gösterilmektedir. Burada arsin ve fosfin gazlarının açma ve kapanması pnömatik vanalar kullanarak gerçekleştirilirken, silan ve amonyak gazları manuel valfler kullanılarak açılıp kapatılmaktadır. Arsin ve fosfin tüplerinin açılması için gereken gaz basıncı 5 bar olmalıdır. Gaz kabinetlerinin sisteme kaynak gaz gönderebilmesi için kabinetlerin servis modunda olması gerekmektedir. Herhangi bir kaçak durumu için kabinetler sürekli olarak havalandırılır ve bu havalandırma kanalında drager kaçak gaz algılama sensörleri mevcuttur. Eğer kaçak seviyesi kritik değeri aşarsa drager sensörü SCS'yi tetikler ve kabinetleri servis modundan çıkarır. Servis modundan çıkan kabinetler ESO (Emergency Shut Off) aracılığıyla tüplerden gaz akışını keser. Ayrıca kabinet içerisindeki tüplerin değiştirilme aşamasında her bir kabinete ait ayrı bir azot temizleme hattı vardır. Ayrıca tüm kaynak tüpleri hassas teraziler üzerinde tutulmaktadır. Böylece hem tüketim miktarı güvenilir bir şekilde kontrol edilir hem de

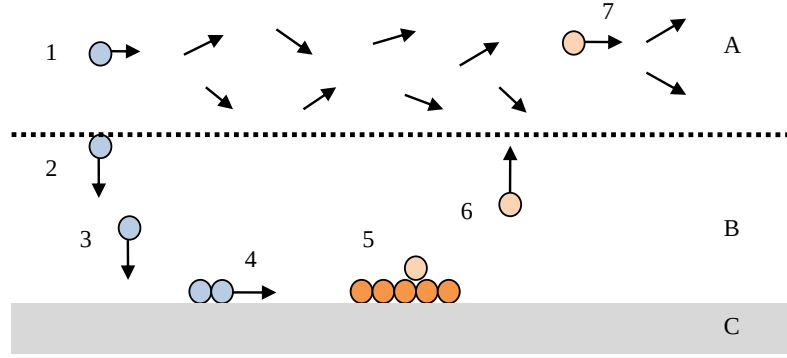
güvenlik amacıyla tüp ağırlıklarında ani bir değişim olması durumunda ESO vasıtasıyla gaz akışı otomatik olarak kesilmektedir.



Şekil 3.35 MOCVD büyütmelerinde hidrit kaynağı olarak kullanılan Arsin, fosfin, amonyak ve n tipi katkılama için kullanılan silan gazlarının yer aldığı kabinetler.

3.2. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi

Kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD), ince filmlerin büyütülmesi için kullanılan yaygın bir yöntemdir. CVD tekniğinde genel olarak gaz formundaki iki veya daha fazla malzeme reaksiyon bölgesine kontrollü bir şekilde gönderilerek kimyasal olarak reaksiyona sokulurlar ve alttaş üzerinde yeni bir malzeme türü olarak büyütülürler. Şekil 3.36 ile tipik bir kimyasal buhar biriktirme prosesi gösterilmektedir.



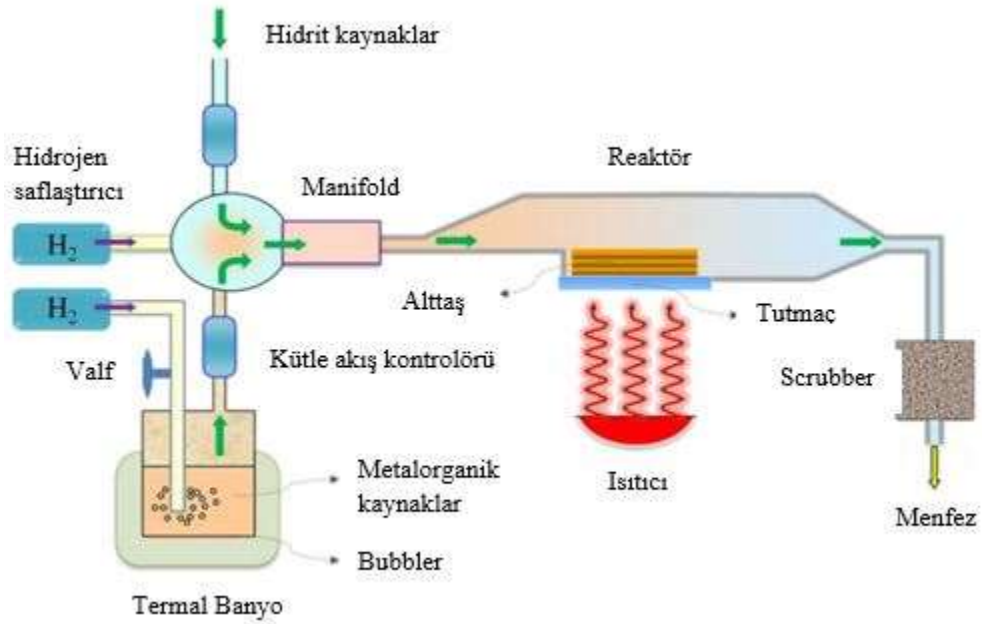
Şekil 3.36 Tipik bir kimyasal buhar biriktirme reaksiyonuna ait adımlar. Burada A gaz fazı, B sınır tabakası (boundary layer), C ise alttaşı göstermektedir (MOCVD Manuel 2006).

Şekil 3.36 ile verilen tipik bir kimyasal buhar biriktirme prosesindeki adımlar şu şekilde verilmektedir;

- 1 Gaz fazındaki reaktiflerin taşıyıcı gaz ile alttaş üzerine taşınması
- 2 Reaksiyon ortamına moleküllerin difüzyonu
- 3 Alttaş yüzeyi üzerinde adsorpsiyon (moleküllerin, temas ettikleri yüzeydeki çekme kuvvetlerine bağlı olarak o yüzeyle birleşmesi)
- 4 Moleküllerin kristalleşme bölgelerine hareketi
- 5 Kimyasal ayrışma
- 6 Yan ürünlerin desorpsiyonu ve reaksiyon ortamından difüzyon ve konveksiyonu
- 7 Yan ürünlerin reaktörden uzaklaştırılması

En yaygın kullanılan kimyasal buhar biriktirme tekniklerinden birisi olan metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tekniği de buhar fazındaki metalorganik öncüllerin (precursors) ve hidritlerin (V grubu element ile hidrojenin yaptığı AsH_3 , NH_3 , PH_3 vb bileşikler) katı fazdaki alttaş üzerine ince film halinde epitaksiyel olarak büyütülmesi olarak adlandırılmaktadır. Metalorganik (veya organometalik) ve hidrit kaynaklar ile III-V yarıiletken bileşik büyütülmesi ilk kez 1960'da Didchenko ve ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir (Didchenko, Alix ve Toeniskoetter 1960). Bu büyütme deneyinde trimetilindiyum (TMIn) ve fosfin (PH_3) kullanılarak InP elde edilmiştir. Daha sonra 1970'lerde Manasevit birçok metalorganik kaynaktan çeşitli yarıiletken

bileşikler elde etmeyi başarmıştır ve bu tekniğe metalorganik kimyasal buhar biriktirme (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) adını vermiştir (Manasevit, Erdmann ve Simpson 1971). MOCVD veya OMCVD şeklinde kısaltılabilir. Tipik bir MOCVD sisteminin çalışma prensibi şematik olarak Şekil 3.37’de gösterilmektedir (Ekinci 2008). Çalışılan basınç değerini belirtmek amacıyla MOCVD kelimesinin önüne atmosferik basınç için AP (atmospheric pressure) veya düşük basınç için LP (low pressure) şeklinde kısaltmalar getirilebilir. Aynı zamanda bu büyütme yöntemi bazı kaynaklar tarafından metalorganik buhar faz epitaksi (MOVPE veya OMVPE) olarak da adlandırmaktadır. MOCVD, buhar faz epitaksinin gelişmiş bir üst modelidir. VPE ile daha ziyade homoepitaksiyel büyütme mümkün iken bu teknik yüksek kalitede heteroepitaksiyel büyütme için geliştirilmiştir. Bu teknik ile farklı konsantrasyonlu farklı katkılama düzeyli ve hatta alttaştan farklı bir katkılama tipinde epitaksiyel tabakalar büyütülebilmektedir.



Şekil 3.37 Tipik bir MOCVD sisteminin çalışma prensibinin şematik gösterimi.

III-V bileşenlerini içeren tipik bir MOCVD sisteminde büyütme süreci, genellikle bir önceki bölümde donanımsal parçaları detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere kuvars veya çelik olan bir reaktör içine kontrollü miktarda V grubu hidritler ile III grubu metalorganikler alınarak başlatılır. Bu tüpün içinde bir ısıtıcı sistem (genellikle radyo frekansı (RF) ısıtılan bir karbon tutmaç (susceptor) ve bunun üzerinde de bir alttaş

(substrate) bulunmaktadır. Isınan alttaş öncüllerin ayrışmasında katalitik bir etkiye sahiptir ve bu etkiyle gaz fazda ve katı yüzeyde ilgili türlerin kimyasal reaksiyonları sonucu epitaksiyel tabakaların üretilmesi gerçekleşir. Tipik bir III-V grubu büyütme için genel reaksiyon biçimi Denklem [3.1] ile gösterilmektedir,



Bu denklemde R, metil (CH₃) ya da etil (C₂H₅) gibi alkil grubunu, M galyum (Ga), alüminyum (Al) ya da indiyum (In) gibi III grubu metalleri, N, nitrat büyütme için azotu, diğer III-V bileşikleri için ise fosfor (P), arsenik (As) ve antimonu (Sb), H ise hidrojeni temsil etmektedir.

Metalorganik öncüller kullanılarak epitaksiyel büyütme yapabilen bu teknik daha sonra hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. Önemli epitaksiyel büyütme teknikleri arasında kendini ispatlayan metalorganik kimyasal buhar biriktirme tekniği için geçmişte karşılaşılan en büyük problem istenilen saflıkta kaynakların bulunamamasıydı. Ancak, tekniğin çok yararlı ve hızlı olduğunun görülmesi üzerine oldukça hızlı bir şekilde geliştirilen yüksek saflıkta öncüller sonucunda bu teknik MBE'ye çok önemli bir alternatif haline gelmiştir. Özellikle yüksek kalitede düşük boyutlu yapıları hassas ve hızlı bir şekilde üretebilen MOCVD çok önemli bir epitaksiyel kristal büyütme tekniği olarak AR-GE ve sanayi dünyasında yerini almıştır. MOCVD sisteminin çalışır durumda tutulabilmesi diğer epitaksiyel büyüme metodlarına (örneğin MBE) göre nispeten daha kolaydır. Ancak büyütme kinetiğinin çok daha karmaşık olması nedeni ile de daha zor bir kullanıma sahiptir. Kompozisyon geçişleri çok hassas bir şekilde anahtarlanarak (açma/kapama) yüksek kaliteli heteroyapılar, çoklu-kuantum kuyuları (MQW) ve süperörgüler (SL) üretilir. Büyütme süreci devam ederken reaktör odasındaki gaz kompozisyonun değişiminde yüksek hassasiyette kontrol imkanı sunduğu için keskin arayüzeyli homojen tabakalar büyütebilme kabiliyeti, düşük arkaplan katkılama yoğunluğu, büyütme hızlarının MBE'den çok daha büyük olması ve seri üretim kabiliyeti gibi bir takım üstünlükler bu tekniği cazip kılan diğer hususlardır.

3.3. Yerinde (In-Situ) Karakterizasyon

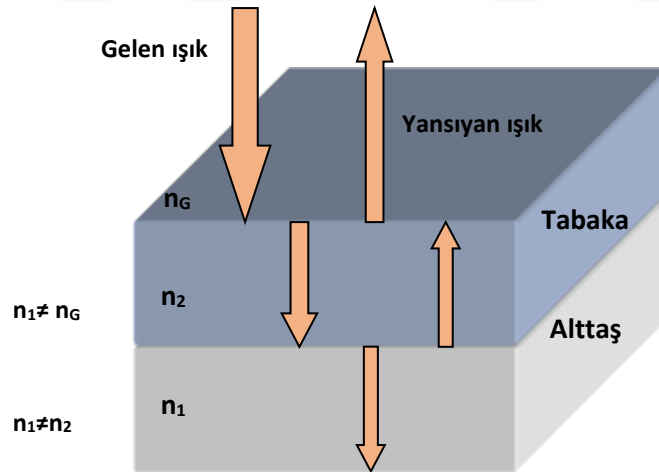
Epitaksiyel büyütme tekniklerinin hemen hemen tümünde, büyütülen tabakaları karakterize etmek temelde 2'ye ayrılır. Bunlar, yerinde (in situ) yani büyütme sırasında yapılan karakterizasyonlar ve büyütme bittikten sonra (ex-situ) yapılan karakterizasyonlardır. Büyütme sırasında uygulanan karakterizasyon teknikleri birçok bilinmeyen etkinin kaynağını yerinde ve anında görmek dolayısıyla etkili çözüm üretmek açısından oldukça faydalı ve pratiktir. Yapılan tez çalışması kapsamında MOCVD sisteminde bulunan ve donanımsal detayları özetle verilmiş olan yerinde yansıma ölçümünden çok faydalandığı için bu bölümde çalışma prensibi detaylı olarak anlatılacaktır.

Moleküler demet epitaksi (MBE) tekniği yüksek vakum ortamı sebebiyle birçok yerinde karakterizasyon tekniğinden faydalanmaktadır. Örneğin RHEED (reflection high energy electron diffraction) tekniği MBE büyütme şartlarını optimize etmek için kullanılan ve kristal malzemelerin yüzey karakterizasyonuna dayanan bir tekniktir. MOCVD için ise reaktör geometrisi, ultra yüksek vakum ortamı eldesinin yetersizliği ve büyütme süresince reaksiyonda kullanılan kimyasalların ve reaksiyon artığı ürünlerin reaktör çeperlerine birikmesi gibi bir kısım zorluklardan dolayı yerinde karakterizasyon teknikleri MBE sistemine göre kısıtlıdır (Razeghi 1995). MOCVD tekniğinde yerinde karakterizasyon için elektron demeti ve kütle spektrofotometrisi gibi teknikler yerine daha çok ışık tabanlı teknikler kullanılmaktadır. Fotonlar gaz fazı boyunca kolayca nüfuz ederler ve ilgilenilen yapıyı moleküler modifikasyona uğratmazlar (Razeghi 1995).

Gerçek zamanlı elipsometrik ölçümler yıkıcı olmadığından, yüksek basınç ve çeşitli geometrik tasarımlara uygunluğundan dolayı büyütülen yüzeyin karakterizasyonunda MOCVD'ye çok iyi uyum sağlamış bir tekniktir (Aspness 1988), (Drevillon, ve diğerleri 1989), (Collins 1989). Elipsometrik ölçümler belirli bir açıda gelen ışık demetinin polarizasyon bağımlılığını analiz eder ve elde edilen data direk olarak ilgili yapının dielektrik fonksiyonu ile ilgilidir. Numune yüzeyi ile ilgili bilgi içermesine rağmen külçeden gelen katkıdan yüzey katkısını ayırt etmek oldukça zordur. Bu sebeple büyüyen yüzeyden bilgi alabilmek amacıyla nüfuz derinliğini 10 nm civarına azaltmak için morötesi ışık kullanılmalıdır (Razeghi 1995).

Yerinde karakterizasyon için yoğun olarak kullanılan bir diğer teknik ise yansıma anizotropisi (reflectance anisotropy-RA) veya yansıma farkı spektroskopisi (reflectance difference spectroscopy-RDS) tekniğidir (Aspnes 1985), (Aspnes ve Studna 1985). Bu teknikte yüzeye hemen hemen dik gönderilen polarize ışığın yansdıktan sonraki polarizasyonu ölçülmektedir. Bu yönüyle elipsometrik ölçümlere benzeyen teknik yüzeye geliş açısı yönünden farklıdır. III-V yarıiletken alaşımların kübik simetrisinden dolayı yüzey veya arayüz gibi düşük simetrlili bölgeler simetriyi bozabilirler. Bu durumda elipsometri ile karşılaştırıldığında kullanılan ışığın dalga boyu ne olursa olsun RDS direk olarak yüzeye (ya da arayüzeye) duyarlıdır.

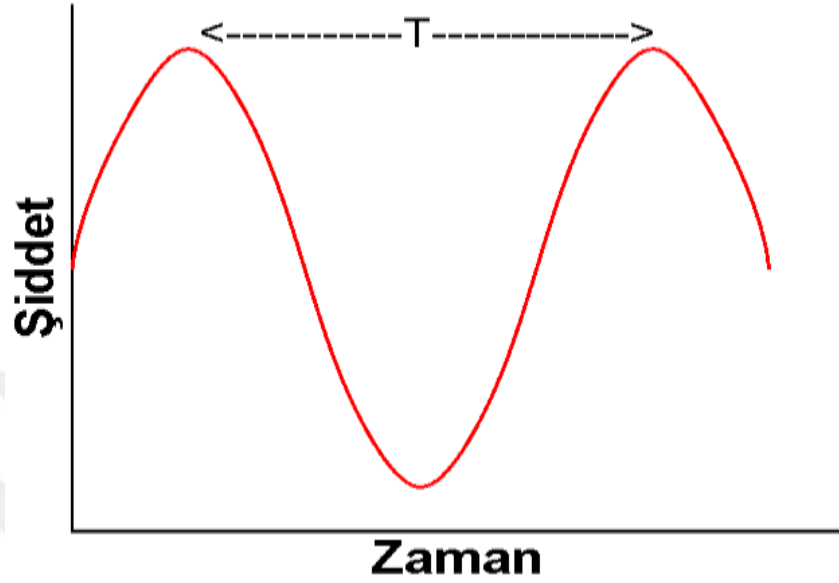
Literatürde ve sanayi üretimlerinde yoğun olarak kullanılan bir diğer teknik ise RDS'ye benzer olan yansıma ölçümleridir. Bu ölçümlerde kullanılan alttaş ve üzerine büyütülen epitaksiyel tabakaların kırılma indisi farkından yararlanılmaktadır. Yansıma ölçümünde alttaş yüzeyine dalga boyu bilinen monokromatik ışık (lazer) gönderilir. Bu ışık alttaşa doğru ilerlerken, ortamın kırılma indisi (n_G), epitaksiyel tabakanın kırılma indisi (n_2) ve alttaşın kırılma indisi (n_1) birbirlerinden farklı olduklarından her bir arayüzde belirli bir kısmını geri yansıtır (Şekil 3.38). Ölçüm ünitesi gelen ışığın şiddetini ölçtüğünden büyüyen yüzeyin özellikleri hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 3.38 Yerinde yansıma ölçümünde alttaş, epitaksiyel tabaka ve ortamın kırılma indisi farkından dolayı gelen ve yansıyan ışığın şiddet değişiminin şematik gösterimi.

Ayrıca yüzeye gönderilen ve yüzeyden yansıyan ya da arayüzden yansıyan monokromatik ışıklar birbirleriyle girişim deseni oluştururlar (Şekil 3.39). Oluşan girişim deseni zamana karşı girişim şiddetini vermektedir ki bu bilgi büyütülen

tabakanın parmak izi niteliğindedir. Şayet ortamın, büyütülen tabakanın ve alttaşın kırılma indisleri biliniyorsa epitaksiyel büyütme için çok önemli olan epitaksiyel tabakaya ait büyüme oranı (hızı) ve toplam film kalınlığı bu veriler yardımıyla hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.39 Yerinde yansıma ölçümünde yüzeyden ve arayüzlerden yansıyan ışıkların oluşturduğu girişim deseninin zamana göre şiddet grafiği. Burada T tam bir osilasyon oluşması için geçen zamanı belirtmektedir.

Alttaş üzerine büyütülen filmin kalınlığını ve büyüme oranını yukarıda anlatılan yerinde yansıma ölçümü ve Şekil 3.39 da verilen girişim deseni vasıtasıyla belirlemek için Denklem [3.2] ve [3.3] ile verilen formüller kullanılmaktadır.

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2n} \quad [3.2]$$

$$r = \frac{\Delta d}{T} \quad [3.3]$$

Burada;

Δd : T osilasyon zamanı boyunca büyütülen filmin kalınlığı,

λ : Kullanılan ışık kaynağının dalga boyu,

n: Büyütülen tabakanın kırılma indisi,

T: Osilasyon için geçen süre,

r: Büyüme oranı (hızı),

olarak tanımlanmaktadır.

3.4. Yapısal Karakterizasyon

Herhangi bir yarıiletken cihazın davranışı güçlü bir şekilde üretilen materyalin kalitesine bağlıdır. Malzeme kalitesinin en önemli testlerinden birisi de yapısal karakterizasyondur. Özellikle cihaz performansı açısından tabaka kalınlıklarının kesin olarak tespiti ve minimum arayüz pürüzlülüğü en önemli parametrelerden bazılarıdır. Bu amaçla bu bölümde optik mikroskop, x ışını kırınımı ve x ışını yansıması teknikleri yardımıyla MOCVD ile büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ve InP tek tabakların ve kuantum çağlayan lazer yapılarının yapısal olarak karakterizasyonundan kullanılan teknikler ve bu tekniklerin çalışma prensiplerinden bahsedilecektir.

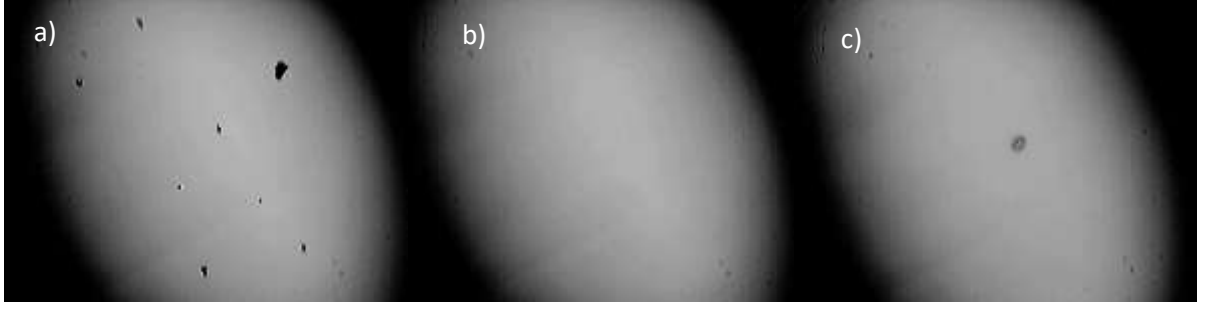
3.4.1. Optik mikroskop

Optik mikroskop ölçümü numune yüzeyinin beyaz ışık altında genel olarak yüzey kalitesinin incelendiği oldukça hızlı, basit fakat büyütülen numuneler hakkında en önemli bilgileri verebilen ölçümlerden birisidir. Epitaksiyel olarak büyütülen ince filmler veya külçe filmler reaktörden çıkarıldıktan sonra aynen ticari alttaşlar gibi aynamsı parlaklıkta yüzeye sahip olmalıdır. Eğer filmler reaktörden yüzeyi sisli, bulanık veya kusur ile çıkıyorsa bu ölçüm film kalitesinin kötü olduğunun belirlendiği ilk karakterizasyondur. Reaktörden çıkarılan numuneler ilk olarak optik mikroskop ile incelenir. Optik mikroskop diğer ölçümlere nazaran düşük çözünürlük sunmakla birlikte tüm film boyunca incelememize olanak sağlayan tek ve önemli bir karakterizasyon aracıdır. Tez çalışması boyunca hem Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında (Şekil 3.40-a) hem de Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (Şekil 3.40-b) kurulu bulunan optik mikroskoplar kullanılarak gerekli karakterizasyonlar yapılmıştır. Her iki mikroskop ile de 2x, 5x, 10x, 40x, 50x, 60x ve 100x büyütme özelliklerine sahip objektifler ile görüntü alınabilmektedir.



Şekil 3.40 Center for Quantum Devices laboratuvarlarında (a) ve Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (b) kurulu bulunan optik mikroskoplar.

InP alttaş üzerine büyütülen EMC5775 numaralı n-InP numunesine ait 40x büyütme ile alınmış görüntüler Şekil 3.41'de gösterilmektedir. Şekil 3.41-a ve Şekil 3.41-c, 5mm x 8mm boyutlarındaki örneğin kenar kısımlarına yakın bölgelerden alınmıştır. Şekil 3.41-b ise numunenin orta bölgesidir. Şekillerden de açıkça görüleceği üzere küçük ve asimetrik alttaş kullanımında ve kenar etkilerinden dolayı kenarlarda kusurlar mevcutken orta bölgede herhangi bir kusur gözlenmemiştir.



Şekil 3.41 MOCVD ile InP alttaş üzerine büyütülen EMC5775 numaralı n tipi InP numunesine ait 40x büyütme ile alınmış optik mikroskop görüntüleri, kenar (a, c), orta (b).

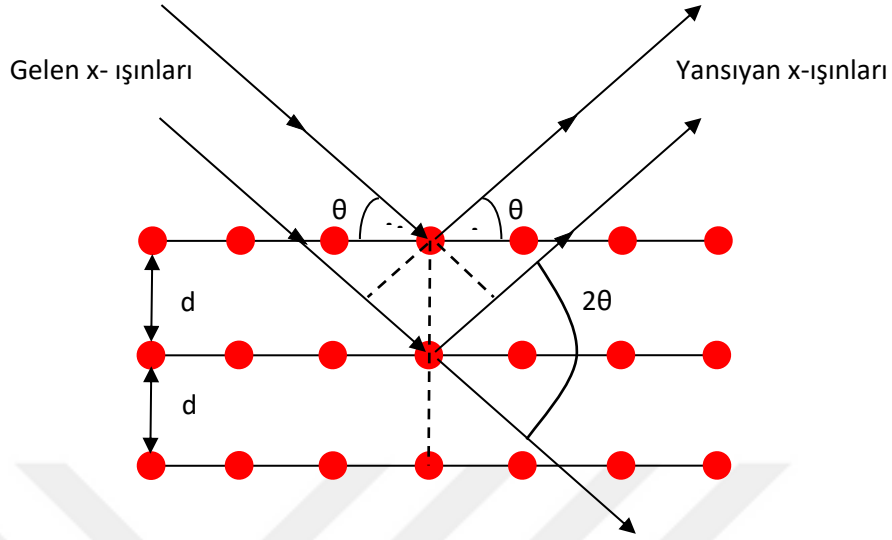
Optoelektronik cihazlarda ve özellikle tez çalışması kapsamındaki kuantum çağlayan lazerlerde film yüzeyinin ve tabakalar arasındaki arayüzlerin epitaksiyel seviyede düzgün (uniform), pürüzsüz ve kusursuz olması gerekmektedir. Aksi takdirde bu filmler ile üretilen cihazların kalitesi olumsuz bir şekilde etkilenecektir.

3.4.2. X ışını kırınımı (XRD) ve x ışını yansıması (XRR)

X-ışını kırınımı (XRD) tekniği yarıiletken ince filmlerin yapısal karakteristiklerini ve kalitesini belirlemek, üçlü alaşımların alaşım oranlarını ve örgü sabitlerini belirlemek için kullanılan, malzemeye hasar vermeyen en temel tekniktir. Bu teknik, malzemelerin kimyasal bileşimi, tabaka yönelimi, epitaksiyel tabakaların kalınlığı, tabakalar arası geçişler, gerilmeler ve dislokasyonlar hakkında nanometre altı mertebelerde çok önemli bilgiler elde edilmesini sağlamaktadır. X-ışını kırınımı çeşitli kristal düzlemlerinden saçılan x-ışınlarını dedekte etme prensibine dayanır. Kristal düzlemlerine birbirlerine paralel olarak gelen x-ışınları periyodik düzlemdeki atomlarla etkileşir ve bu etkileşim sonucunda oluşan kırınım deseni Bragg şartı Denklem [3.4] ile açıklanmaktadır. Bragg şartı;

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad [3.4]$$

olarak verilmekte, burada λ kullanılan x-ışınının dalga boyu, d_{hkl} örgü düzlemleri arasındaki uzaklık, $h k l$ tam sayıları Miller indisleri, n yansıma mertebesi ve θ ise Bragg açısı olarak adlandırılmaktadır. Burada eğer ardışık iki kristal düzleminden yansıyan x-ışınlarının aldıkları yollar arasındaki uzaklık, kullanılan x-ışınının dalgaboyunun tam katlarına eşit ise maksimum kırınım (yapıcı), yarım katlarına eşit ise minimum kırınım (yıkıcı) oluşmaktadır (Şekil 3.42).



Şekil 3.42 Bragg yasasının şematik gösterimi. Burada d kristal düzlemleri arasındaki mesafe, θ gelen x-ışını ile yüzey arasındaki açı 2θ ise gelen ve yansıyan x-ışınları arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Kübik kristal sistemleri için örgü düzlemleri arasındaki uzaklık;

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad [3.5]$$

denklemini elde edilmektedir. İkili bileşiklerden oluşan üçlü alaşımların alaşım oranları elde edilirken Vegard yasası kullanılmaktadır. İki adet ikili AB ve AC bileşiklerinin belirli alaşım oranlarıyla bir araya gelerek oluşturduğu herhangi bir $A_xB_{1-x}C$ üçlü alaşımının örgü düzlemleri arasındaki uzaklığı hesaplamak için bu yasa

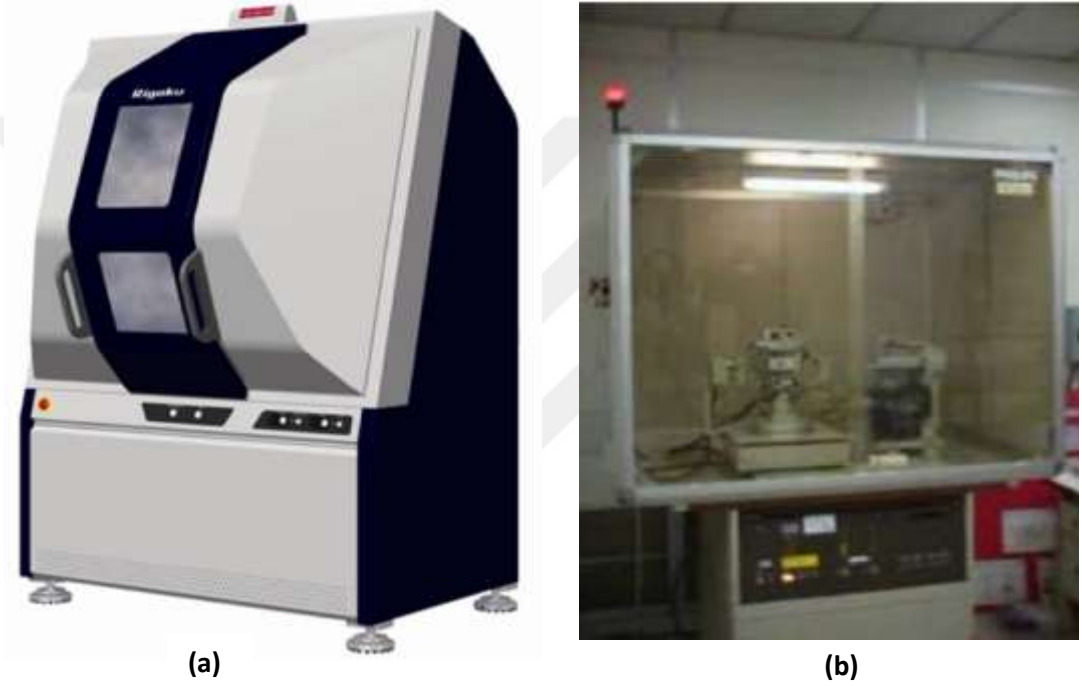
$$d_{A_xB_{1-x}C} = x d_{AC} + (1 - x) d_{BC} \quad [3.6]$$

denklemini öngörmektedir, burada x üçlü alaşımdaki AC bileşiğinin, $(1-x)$ ise BC bileşiğinin oranını vermektedir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan X-ışını kırınımı sistemleri Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu bulunan Phillips HRD 1880 model x-ışını kırınımı sistemi ve Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik

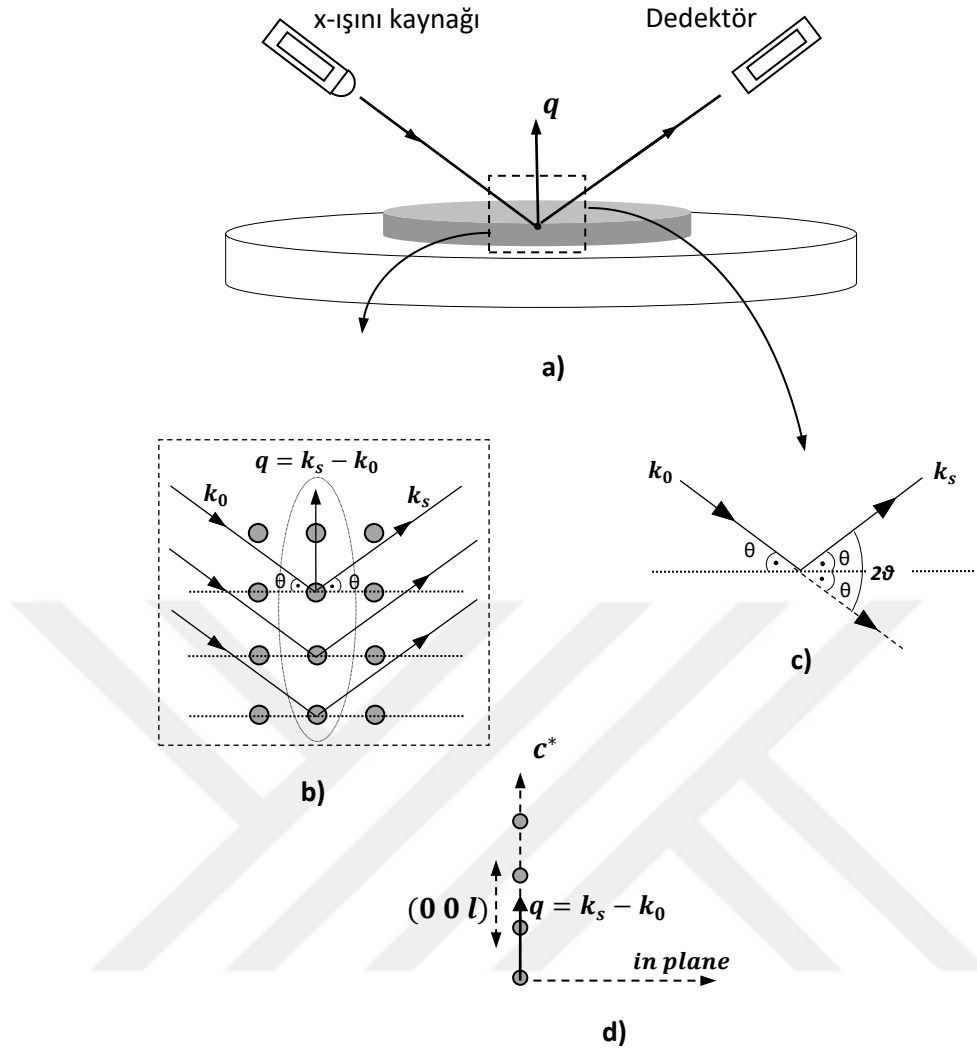
Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan Rigaku Smart-lab X-ışını difraktometresidir (Şekil 3.43).

Rigaku SmartLab cihazı ince filmlerin, toz ve külçe numunelerin yapısal analizini yapmaktadır. Ayrıca cihaz x-ışını kaynağı olarak döner anodlu bakır (Cu) hedef kullanmaktadır. Üretilen karakteristik x-ışınlarının dalgaboyu $K_{\alpha 1}=0.154059$ nm, gücü 9kW'dir (max voltaj 45 kV, max akım 200 mA). Ayrıca Cu kaynak, 4-kristalli Ge (022) yönelimli monokromatör kullanmaktadır ve monokromatörün çözünürlüğü (002) yönelimli Si alttaşı için $0,003^\circ$ olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.43 Tez çalışması kapsamında kullanılan X-ışını kırınımı sistemleri. Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan Rigaku SmartLab model X-ışını difraktometresi (a) ve Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu bulunan Phillips HRD 1880 model X-ışını difraktometresi (b).

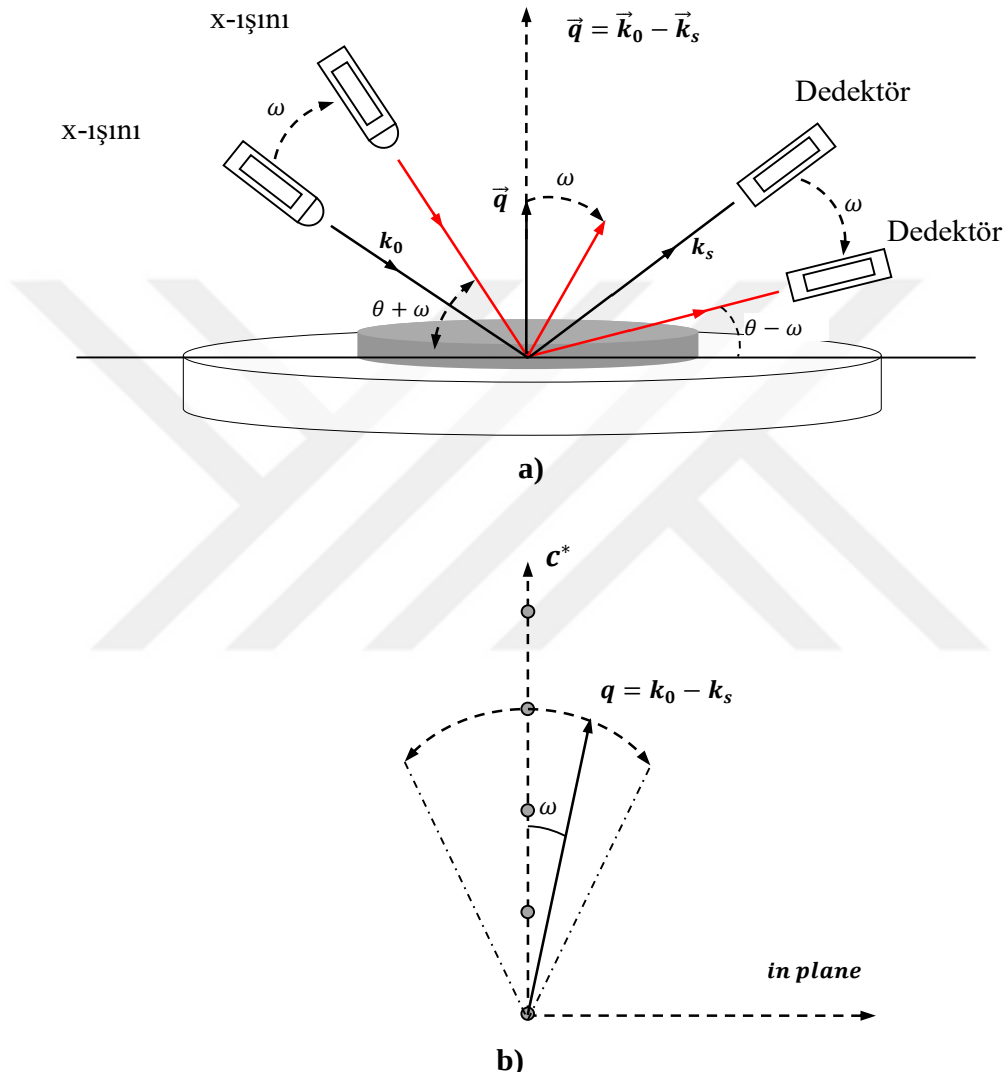
Tez çalışması kapsamında büyütülen numunelerin kristal kalitesini araştırmak, örgü sabitlerini ve alaşım oranlarını bulmak için kullanılan en genel iki tarama tekniği olan $2\theta/\theta$ ve ω taramaları kısaca açıklanacaktır. Şekil 3.44'te $2\theta/\theta$ taraması geometrisinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.44 2θ/θ tarama geometrisine ait şematik gösterim. Numune, x-ışını ve dedektörün konumu (a), numuneye ait kristal düzlemleri (b), gelen, yansıyan ve geçen x-ışınlarına ait dalga vektörleri (c), ters uzayda örgü düzlemleri (d) (Bulut 2010).

Bu taramada eğer x-ışını kaynağı ile dedektör örnek yüzeyi ile θ açısı yapıyor ise tarama 2θ/θ adını alır. Numuneden maksimum x-ışını şiddetini almak için yapılan eksen düzenlemelerinde bazen θ açısı 2θ açısının yarısına eşit olmayabilir ve başlangıç olarak θ açısına çok küçük bir açı miktarı kadar fark eklenip çıkarılabilir. Bu durumda yapılan tarama 2θ/θ ile tamamen aynı olup sadece başlangıçtaki referans farklılığından kaynaklı olarak 2θ/ω taraması adını almaktadır. Bu tip taramalarda Şekil 3.44'te görüldüğü gibi belirlenen Bragg açısı civarında x-ışını kaynağı ile dedektör örnek yüzeyine göre aynı miktarda hareket ettirilerek tarama gerçekleştirilir. Bu arada $\mathbf{q}$ momentum geçiş vektörü numunenin ilgili kristal düzlemlerine dik olarak hareket

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen ve genel olarak yarıiletken kristallerin kalitesini araştırmak için yapılan bir diğer önemli taramada ω taraması olarak adlandırılmaktadır. Bu taramaya ait geometrik gösterim Şekil 3.45 ile verilmektedir.

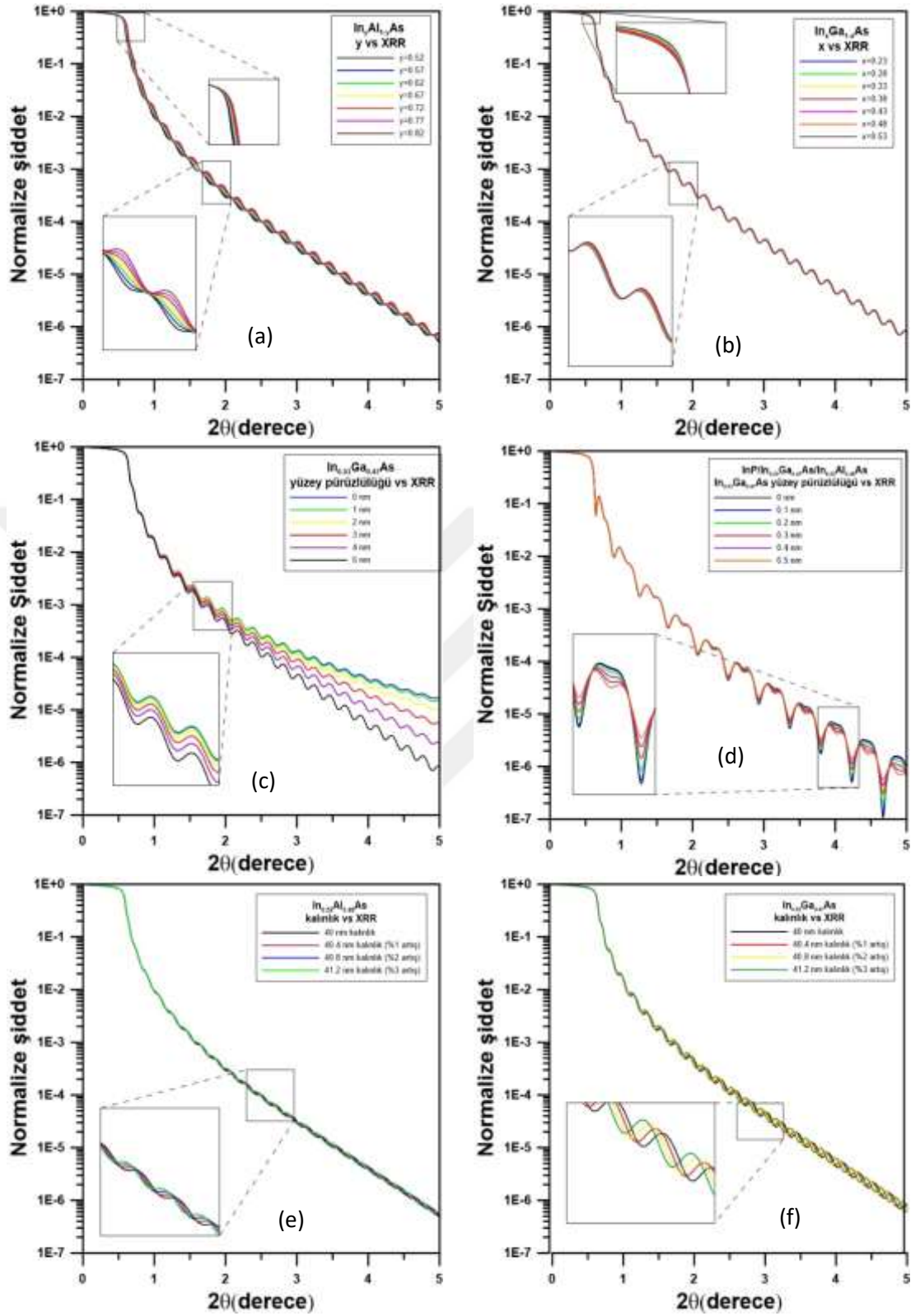


Şekil 3.45 ω taraması geometrisine ait şematik gösterim. Numune, x-ışını ve dedektörün konumu (a), ters uzayda momentum geçiş vektörünün tarama sırasında hareketi (b) (Bulut 2010).

Bu taramada ilgili numuneye ait ilgili düzlemin Bragg açısı bulunduğundan sonra Şekil 3.45’ te görüleceği üzere x-ışını kaynağı ile dedektör aynı yönde ve aynı θ açısı kadar ilerletilerek tarama devam ettirilir. Böylece momentum geçiş vektörünün büyüklüğü

düşey yönde sabit iken yatay yönde değiştirilerek kristalin düzlemdeki kalitesi ve arayüz etkisi elde edilebilmektedir.

X ışını yansıması (XRR) $2\theta/\theta$ taraması ile tarama yapılan açı değerleri haricinde tamamen aynıdır. XRR taramalarında genel olarak θ açısı $0^\circ < \theta < 4^\circ$ aralığında değişmektedir. Bu taramada x-ışını kırınımından farklı olarak, x-ışınlarının örgüdeki periyodik atomlardan kırınımı yerine farklı arayüzlerden yansıyan x-ışınlarının girişi oluşmaktadır. X ışınları çok düşük açıda yüzeye çarptıklarında eğer yüzey pürüzsüz ise yüzeyden olduğu gibi yansır fakat yüzey pürüzlü ise ya da bir film ile kaplanmışsa yüzeyden yansıma değişebilir. XRD ile karşılaştırıldığında XRR yüzey duyarlı bir tekniktir ve kristal hakkında birçok bilgi verebilir. XRR ayrıca yüzey ve arayüz keskinliği hakkında, kütle yoğunluğu ve tabaka kalınlıkları hakkında da birçok bilgi verebilmektedir. Şekil 3.46 ile malzemeye ait bir takım özelliklerin XRR taramasında ortaya çıkardığı değişiklikler tez çalışması kapsamında yapılan simülasyonlar ile birlikte verilmektedir. Şekil 3.46-a ve Şekil 3.46-b ile $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ve $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımlarının değişen indiyum oranlarının XRR karakteristiğine etkisi gösterilmektedir. Her iki alaşım da genel olarak benzer karakteristiklere sahip olmakla birlikte $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ alaşımının periyodik osilasyonlarının arasındaki fark biraz daha belirgindir ki bu değişim elektron yoğunluğunun değişiminden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.46-c ve Şekil 3.46-d ile yüzey ve arayüz pürüzlülüğünün XRR karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Şekil 3.46-c'de InP alttaş üzerine örgü uyumlu olarak büyütülmüş $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ alaşımının yüzey pürüzlülüğü 0-5 nm aralığında değiştirilmiştir. Bu değişimin XRR davranışını oldukça ciddi bir biçimde etkilediği ve artan pürüzlülüğün XRR eğrisinin eğimini aşağı yönde olacak şekilde değiştirdiği görülmektedir. Şekil 3.46-d'de ise InP alttaş üzerine örgü uyumlu olarak büyütülmüş $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ alaşımlarından aradaki tabaka olan $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 'ın yüzey (arayüz) pürüzlülüğü 0-0.5 nm aralığında değiştirilmiştir. Şekil 3.46-c'de yüzey pürüzlülüğünün etkisine benzer bir şekilde arayüz pürüzlülüğü de benzer bir etkiyi yaratmaktadır.



Şekil 3.46 Büyütülen malzemelerdeki birtakım değişikliklerin XRR taramalarına etkisi incelenmiştir. InAlAs (a) ve InGaAs (b) alaşımlarındaki indiyum konsantrasyonu, yüzey (c) ve arayüz pürüzlülüğü (d) ve büyütülen InAlAs (e) ve InGaAs alaşımlarının kalınlıklarının (f) XRR'ye etkisi.

Şekil 3.46-e ve Şekil 3.46-f’de sırasıyla InP alttaş üzerine başlangıçta 40 nm kalınlığında örgü uyumlu olarak büyütülmüş $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ alaşımlarının %1 lik kalınlık değişimlerinin XRR davranışına etkisi incelenmiştir. Daha önce açıklandığı üzere XRR ölçümleri kalınlık değişimlerine oldukça hassastır. Her iki şekilde incelendiğinde alaşımlardaki %1 lik bir kalınlık değişimi (0.4 nm) XRR tarama eğrisinin eğimine herhangi bir etkide bulunmazken osilasyonlar arasındaki açı farkını değiştirmektedir. İlerleyen bölümlerde de anlatılacağı gibi tez çalışması kapsamında birçok kalınlık ölçüm tekniğinden faydalanılmıştır. XRR’ de bunlardan birisi olup yapılan simülasyonlardan da görüleceği üzere 0.1 nm kalınlık farkına bile oldukça hassas bir tekniktir.

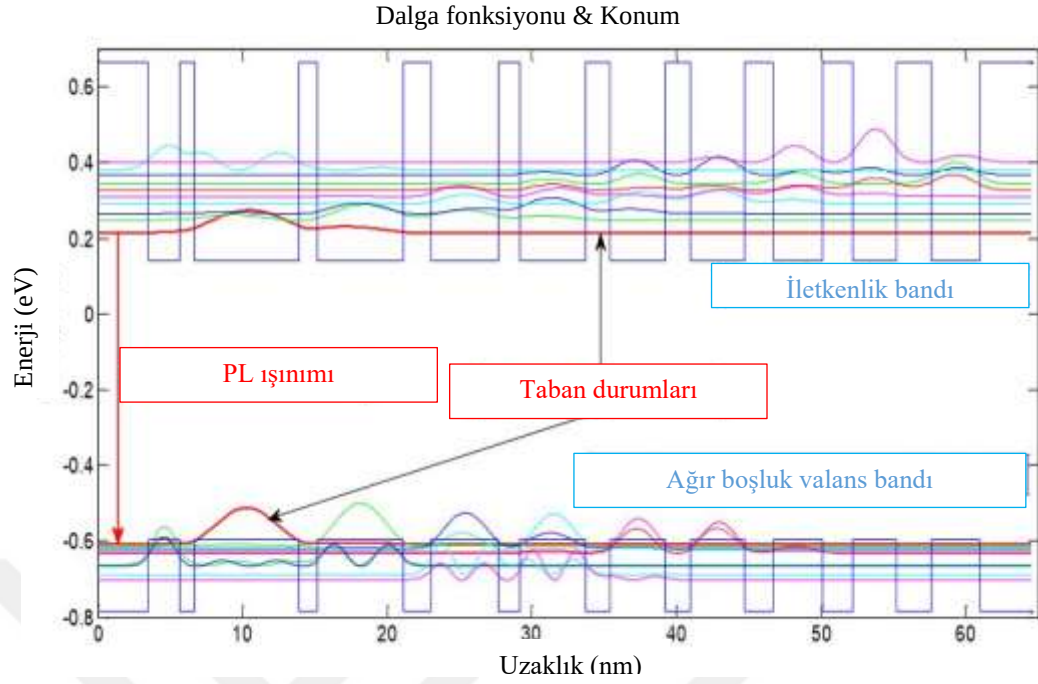
3.5. Optiksel Karakterizasyon

Optiksel karakterizasyon teknikleri genel olarak ölçüm yapılan numuneye zarar vermeyen (non-destructive), hızlı ve numune hazırlama gereği duyulmayan tekniklerdir. Bu teknikler ışığın malzeme ile etkileştikten sonra şiddetinin, enerjisinin, fazının yönünün veya polarizasyonunun değişimini incelemektedir. Tüm bu özelliklerle ilişkili olarak malzemenin optik özelliklerinin aslında onun yapısal, yüzeysel, elektronik ve fiziksel özellikleri ile ilişkili olması optik karakterizasyonu çok güçlü bir konuma getirmektedir. Bu bölümde tez çalışması kapsamında MOCVD tekniği ile üretilen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ve InP tek tabakların ve kuantum çağlayan lazer yapılarının optiksel olarak karakterizasyonundan ve karakterizasyon için kullanılan fotolüminesans sisteminin çalışma prensibinden bahsedilecektir.

3.5.1. Fotolüminesans

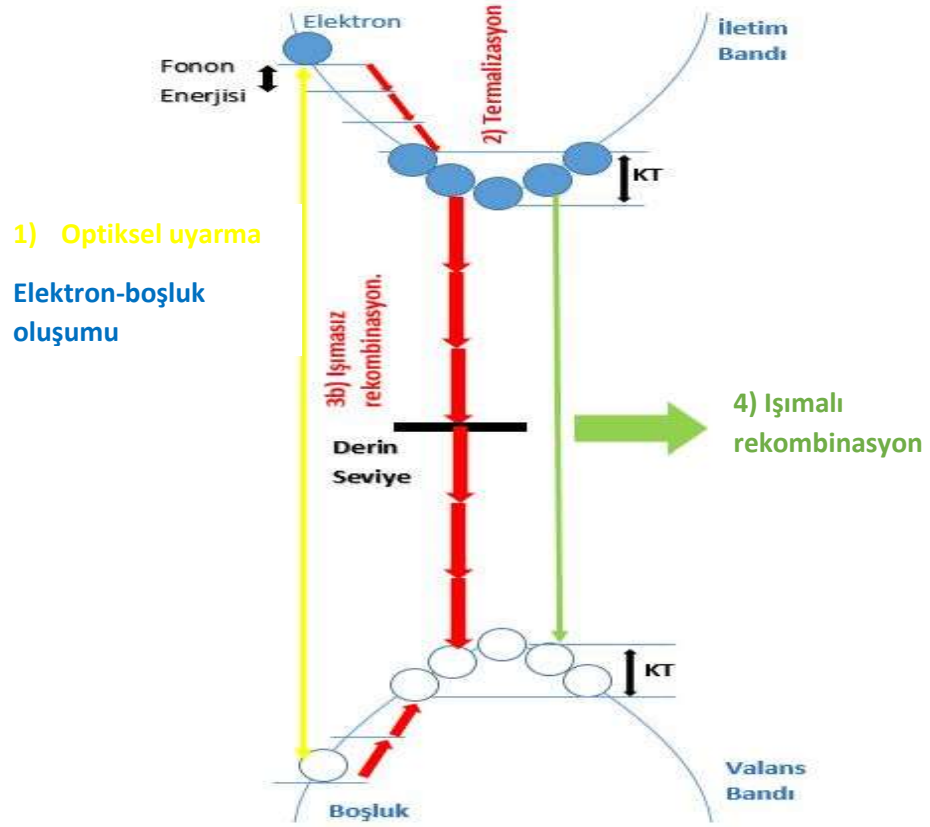
Fotolüminesans (Photoluminescence-PL) direk bant aralığına sahip yarıiletken malzemelerin enerji bant aralığı, elektronik durumları ve optik kalitesini belirlemek için kullanılan çok önemli bir tekniktir. Çoğu yarıiletken cihazın çalışma prensibi ve kullanım amacı üretildiği malzemelerin bant aralığına ve safsızlıklara bağlıdır ve bu özellikler en yaygın biçimde fotolüminesans tekniği ile ilgilenilen malzemeye herhangi bir zarar vermeden elde edilmektedir. Kuantum çağlayan lazerler daha önce belirtildiği gibi elektronların alt bantlar arası geçişlerinden faydalanmaktadırlar. Dolayısıyla ışıyım dalgaboyu kullanılan yarıiletken malzemelerin doğal bant aralığından bağımsızdır. Bu sebeple kuantum çağlayan lazere ait cihaz yapısının ışıyım dalga boyu diğer bantlar arası geçiş prensibine göre çalışan lazerler gibi

fotolüminesans ölçümü ile direk olarak belirlenemez. Tez çalışması kapsamında fotolüminesans ölçümleri büyütülen tek tabaka $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ alaşımlarının ve InP bileşiğinin optik karakterizasyonunu yapmak için kullanılmıştır. Fotolüminesans ölçümü sonucunda elde edilen ışıma ait pikin şiddeti ve pik FWHM değerleri, ilgili materyal kalitesi hakkında oldukça önemli bilgiler vermektedir. Bu sebeple büyütülen tek tabaka veya kuantum çağlayan lazer yapısına ait aktif tabakalar ya da enjektör tabakaları olsun sadece ışıma pik şiddeti ve piklere ait FWHM değerleri karşılaştırılarak büyütülen örneklerle (bantlar arası geçişe dayalı cihaz yapıları olsa bile) ait kalite karşılaştırılması yapılabilmektedir. Tipik bir kuantum çağlayan lazer yapısından elde edilecek olan fotolüminesans ışımasına ait şematik gösterim Şekil 3.47’de gösterilmektedir. Yukarıda anlatıldığı üzere ve şekilden de açıkça görüleceği gibi kuantum çağlayan lazerler de fotolüminesans ölçümü ile alt bantlar arası geçişlere ait herhangi bir ışıma elde edilemez. Bu ışıma sadece iletkenlik bandı ve valans bandının taban durumları arasındaki geçişten elde edilebilecektir. Fakat büyütülen kuantum çağlayan lazer yapısının optiksel kalitesi karşılaştırılmak isteniyorsa aktif bölgede yapılacak herhangi bir deneme veya tasarım değişikliği fotolüminesans ışımasının pik şiddetini veya FWHM değerini değiştireceğinden dolayı yapılan değişiklikler hakkında bilgi verecektir.



Şekil 3.47 Tipik bir kuantum çağlayan lazer yapısından elde edilecek olan fotolüminesans ışınımının şematik gösterimi.

Fotolüminesans ölçümünde ilgili yarıiletken malzeme, enerjisi bu malzemenin bant aralığı enerjisinden büyük olan bir ışık kaynağı ile uyarılır (Şekil 3.48). Optik olarak uyarılmış yarıiletkende elektron boşluk çifti oluşturulur. İletkenlik bandına geçen enerjik elektron termal olarak enerjisini kaybeder ve iletkenlik bandı içinde fonon saçılmalarıyla taban durumuna ulaşır. İletkenlik bandında taban durumu veya en yakın enerjisine ulaşmış elektronların valans bandındaki boşluklar ile yeniden birleşmek için izleyebileceği iki yol vardır. İlki ışınım oluşturacak şekilde boşluklar ile birleşerek foton üretmektir (radiative recombination) ikincisi ise herhangi bir foton üretimi olmaksızın fonon yayınımları şeklinde birleşmektir (non-radiative recombination). Bant aralığının ortası civarlarında derin seviye tuzakları (deep level traps) var ise ışıınımsız birleşimler bu tuzaklar ile desteklenirler. Ayrıca safsızlıklar ve yüzey durumları da ışıınımsız birleşimlere olanak sağlamaktadır. Şayet derin seviye tuzakları az sayıda ise ışıınımlı birleşmelerden fotolüminesans sinyali elde edilebilir.



Şekil 3.48 Yarıiletken bir malzemede fotolüminesans prosesinin şematik gösterimi. Elektronların optik olarak uyarılması ve elektron-boşluk çifti oluşturulması (1), enerjili elektronların fazla enerjilerini kaybederek iletkenlik bandı taban durumuna geçişi (2), tuzak seviyeleri sebebiyle ışımasız geçiş (3), veya ışımalı geçiş (4). (Bandyopadhyay 2015).

Bant aralığı boyunca elde edilen ideal bir geçiş çok keskin bir fotolüminesans ışınım piki verir. Fakat bu ışınım piki tabakalar ve alttaş arasındaki veya her bir tabaka arasındaki arayüzeylerden saçılmalar, özellikle üçlü alaşımlardaki alaşım salınmaları vb. birçok etkiden dolayı genişler. Fotolüminesans ışınım piki ve pozisyonunun yanısıra ışınım şiddeti de oldukça önemlidir. Çünkü yapıdaki kusurla, safsızlıklar ve yüzey durumları gibi lüminesansı azaltan veya engelleyen durumlar ışımasız geçişler oluşturacaklarından ışınım şiddetini düşürebilirler.

Çalışmalar kapsamında fotolüminesans ölçümleri için kullanılan hem Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarındaki Argon iyon lazere sahip oda sıcaklığı fotolüminesans ölçüm sistemi hem de Ermaksan Optoelektronik

laboratuvarlarında kurulu bulunan Nanometrics-RPM Blue marka model fotolüminesans ölçüm sistemi Şekil 3.49’da gösterilmektedir.



Şekil 3.49 Çalışmalar kapsamında fotolüminesans ölçümleri için kullanılan Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarındaki Argon iyon lazere sahip oda sıcaklığı fotolüminesans ölçüm sistemi (sol) Ermaksan Optoelektronik laboratuvarlarında kurulu bulunan Nanometrics-RPM Blue marka model fotolüminesans ölçüm sistemi (sağ).

Tez çalışması kapsamında her bir tek tabaka, çoklu tabakalar ve kuantum çağlayan lazer yapılarına ait büyütmelemlerde yapılan optimizasyonlar ile maksimum fotolüminesans ışınlımı elde edilmeye çalışılmıştır.

3.6. Elektriksel Karakterizasyon

Yarıiletkenlerin elektriksel karakterizasyonunda, iletkenlik, mobilite ve taşıyıcı yoğunluğu gibi parametrelerin bulunması amaçlanmaktadır. Tüm bu nicelikler Denklem [3.7] ile ilişkilidir (Slivken 2002)

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p \quad [3.7]$$

Burada σ iletkenlik, n ve p elektron ve boşluk konsantrasyonu, μ_n ve μ_p ise sırasıyla elektron ve boşluk mobilitesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölümde hepsi n tipi

iletkenliğe sahip tek tabaka InP , $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ malzemelerinin elektriksel karakterizasyonlarının yapıldığı Hall etkisi sistemi ve elektrokimyasal kapasitans voltaj ölçümü (ECV) sistemlerinden ve çalışma prensiplerinden detaylı bir şekilde bahsedilecektir.

Hall etkisi ölçümü ve ECV tekniklerinin birbirleri ile karşılaştırıldığında hem dezavantajları hem de avantajları bulunmaktadır. Tez çalışması kapsamında elektriksel karakterizasyonu yapılan tüm katkısız ve n tipi katkılı tabakalar bu iki tekniğin avantajları kullanılarak ölçülüp birbirleri ile karşılaştırarak gerekli çalışmalar yapılmıştır.

3.6.1. Hall etkisi ölçümü

Kuantum çağlayan lazer yapılarına ait katkısız ve n tipi katkılı tüm tek tabaka $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ve InP tabakalarının elektriksel ölçümleri ve karakteristikleri Hall etkisi yardımıyla elde edilmiştir. Hall etkisi ölçümü, detayları bir sonraki bölümde verilecek olan ECV tekniği ile kıyaslandığında büyütülen tabakaya ait hem taşıyıcı yoğunluğu hem de mobilite elde edilebildiği için yarıiletken çalışmalarında kullanılan en yaygın ve etkin tekniklerden birisidir. ECV tekniğine göre mobilite elde edilmesi avantaj iken tabakaların alttaş etkisini ayırt etmek için çok kalın filmlerin büyütülme gereği ya da katkısız veya yarı yalıtkan (semi-insulate) alttaş üzerine büyütülme gereği dezavantajdır.

Manyetik alan altında ($\mathbf{B}_z$) tutulan bir iletkenin manyetik alan yönüne dik olacak şekilde ($\mathbf{I}_x$) bir akım geçiyorsa, manyetik alan hareket eden yüklü parçacıklara hareket doğrultusu ve manyetik alana dik olacak şekilde bir kuvvet ($\mathbf{F}_B$) uygular. Şekil 3.50’de gösterilen manyetik kuvvet ($\mathbf{F}_B$) iletkenin bir kenarına yüklü taşıyıcıları itme eğilimindedir. İletkenin kenarındaki yük birikimi iletkenin iki kenarı arasındaki oluşan ölçülebilir voltaj (Hall voltajı- V_H) ile ve dolayısıyla manyetik alana dik yönde oluşacak bir elektrik alanla (dolayısıyla elektriksel kuvvet $\mathbf{F}_E$) dengelenecektir. Bu ölçülebilir enine voltajın varlığı 1879 da E. H. Hall tarafından keşfedildikten sonra Hall olayı olarak adlandırılmıştır (E. Hall 1879).

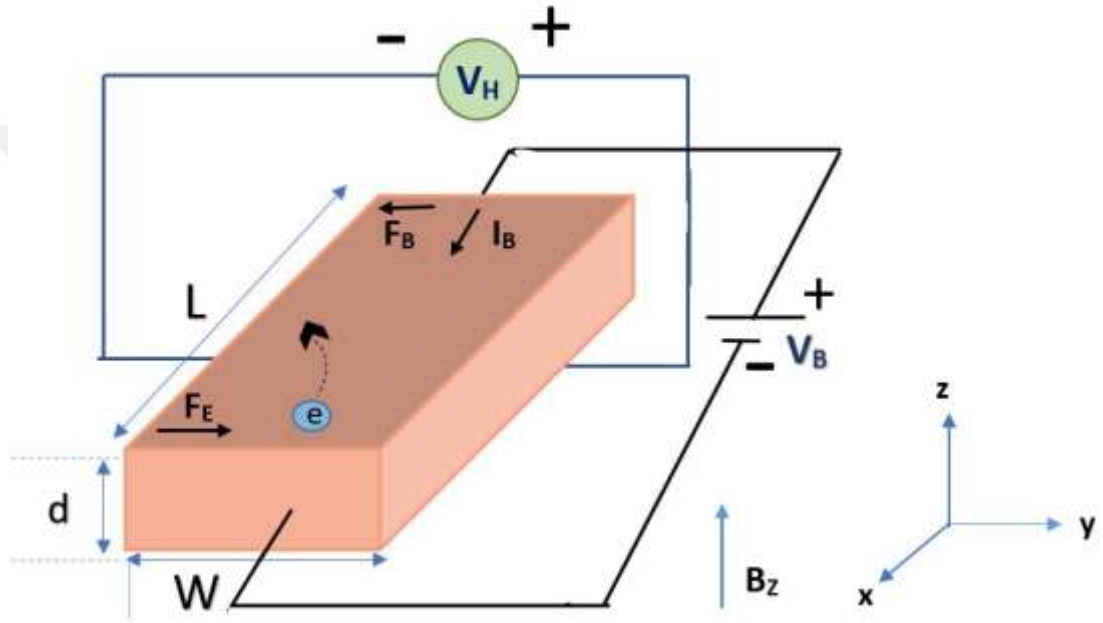
Ortaya çıkan Hall voltajı (V_H), malzeme üzerinden geçen akım (I_x), uygulanan manyetik alan (B_z), numunenin kalınlığı (d) gibi makroskobik parametreler yardımıyla numuneye ait çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu (n) Hall etkisi yardımıyla Denklem [3.8] ile verilmektedir

$$n = \frac{I_B B_z}{edV_H} \quad [3.8]$$

Ayrıca taşıyıcı yoğunluğu (μ), iletkenlik (σ) ile de ilişkisi olduğundan buradan da basit bir biçimde elde edilebilir.

$$\mu = \frac{\sigma}{nq} = \frac{L}{RA} \quad [3.9]$$

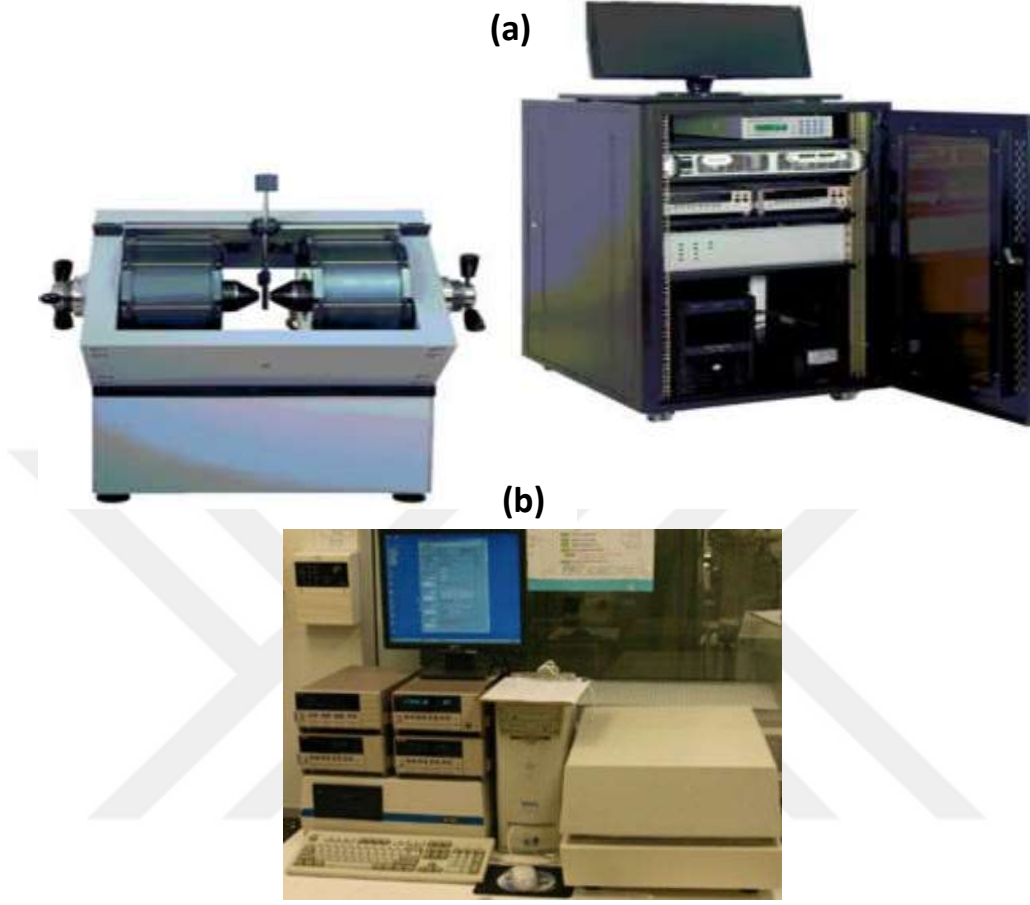
Burada L ilgili kısmın uzunluğu, A örneğin enine kesit alanı, R ise ölçülen direnç değeridir.



Şekil 3.50 Hall etkisi olayının şematik gösterimi (Bandyopadhyay 2015).

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalarda dört nokta geometrilili Van der Pauw tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Omik kontaklar örneğin dört köşesinden indiyum ile alınmıştır. Büyütülen örneklerin kalitesini arttırmak için yapılan çalışmalarda büyütme koşulları her durumda katkısız örnekler için en düşük taşıyıcı yoğunluğu ve en yüksek mobilité eldesi tabanında yapılmıştır. Katkılı örneklerde ise istenilen katkılama yoğunluğu elde edilirken tabakaların maksimum mobilité ve minimum yüzey, kristal, optik ve arayüz deformasyonu ile büyütülmesi hedeflenmektedir. Çalışmalar kapsamında hem Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan HEMS model 2 T (tesla) manyetik alan şiddetine sahip elektromıknatıslı sistem (a) hem de Northwestern

Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu bulunan sabit 0.6 T manyetik alana sahip Hall etkisi ölçüm sistemleri kullanılmıştır (Şekil 3.51)



Şekil 3.51 Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan HEMS model 2T manyetik alan şiddetine sahip elektromıknatıslı sistem (a) ve Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu bulunan sabit 0.6 T manyetik alana sahip Hall etkisi ölçüm sistemi (b).

3.6.2. Elektrokimyasal kapasitans voltaj ölçümü

Elektrokimyasal kapasitans voltaj (electrochemical capacitance voltage - ECV) ölçümü, yarıiletken filmlerin aktif taşıyıcı yoğunluğunu ölçmek için kullanılan en etkili tekniklerden biridir. Bu teknik vasıtasıyla derinliğin fonksiyonu olarak etkin taşıyıcı konsantrasyonu değişimi ölçülebilmektedir ve temelde yapılan kapasitans-voltaj (C-V) ölçümüdür. Hall etkisi ölçümünde olduğu gibi bu da ölçüm yapılan örneğe zarar veren bir tekniktir. Tez çalışması kapsamında hem Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices (CQD) laboratuvarlarında hem de Ermaksan Optoelektronik şirketinde kurulu bulunan Nanometrics marka ECV PRO model ECV cihazları (Şekil 3.52) büyütülen ince filmlerin elektriksel özelliklerini araştırmak için kullanılmıştır.



Şekil 3.52 Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında ve Ermaksan Optoelektronik laboratuvarlarında kurulu bulunan Nanometrics ECV-PRO cihazı.

C-V ölçümü yarıiletkenden alınan bir omik ve bir Schottky kontağı ile başlar. Bu kontağın kapasitansı Denklem [3.10] ile

$$C = A \left[\frac{eN\varepsilon_0\varepsilon_r}{2(\phi-V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [3.10]$$

şeklinde verilmektedir. Burada A eklem alanı, N tüketim bölgesi dışındaki taşıyıcı konsantrasyonu, $\varepsilon_0\varepsilon_r$ yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϕ Schottky bariyer yüksekliği ve V ise uygulanan potansiyel farkı göstermektedir. Paralel düzlem yaklaşımını kullanarak tüketim bölgesi genişliği ve taşıyıcı konsantrasyonu Denklem [3.11] ve Denklem [3.12] ile şu şekilde belirlenebilir:

$$W_d = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r A}{C} \quad [3.11]$$

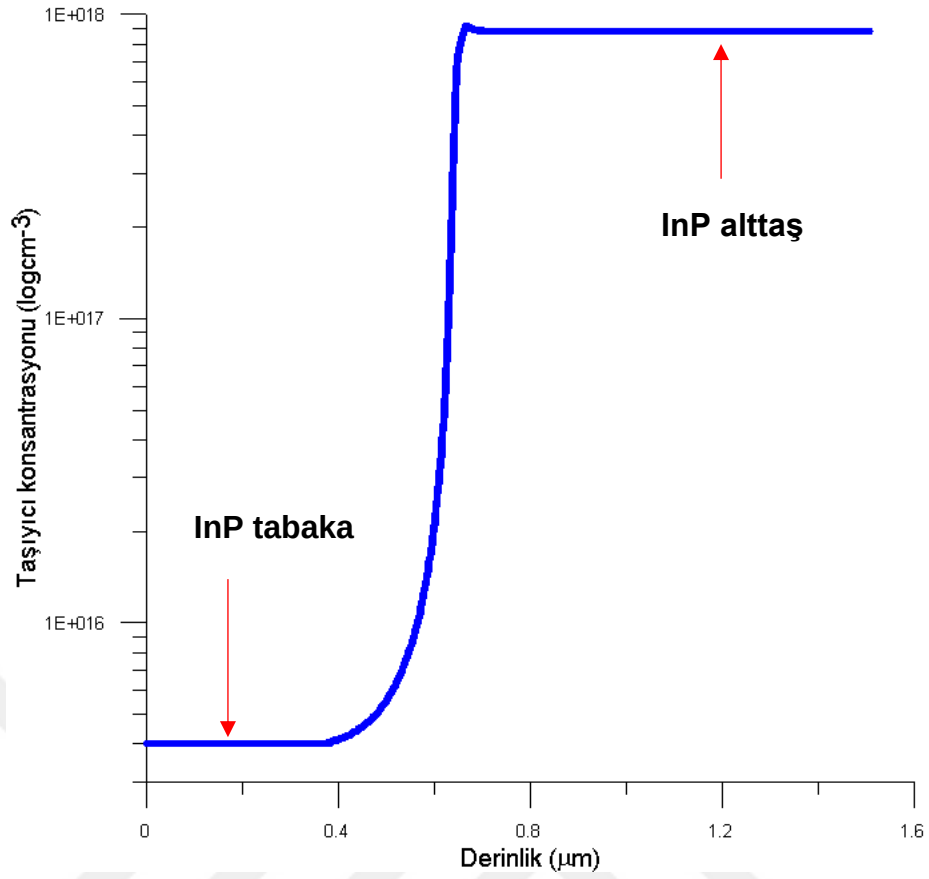
$$N = \frac{C^3}{e\varepsilon_0\varepsilon_r A^2 \left(\frac{dC}{dV}\right)} \quad [3.12]$$

burada dC/dV eklem C-V eğrisinin eğimini göstermektedir.

Elektrokimyasal C-V ölçümü tekniğinde, Schottky kontağı metal yerine elektrolit ve kilit halkası yardımıyla oluşturulmaktadır. Uygulanan besleme ve ölçülen materyale göre özel olarak hazırlanmış elektrolit yardımı ile yarıiletken yüzeyi elektrokimyasal olarak aşındırılır. Böylece periyodik olarak aşındırma ve C-V ölçümü yapılarak derinliğe bağlı olarak katkılama seviyesi ölçülebilmektedir. Yarıiletkenin aşındırılması boşlukların varlığına veya üretilmesine bağlıdır. P-tipi yarıiletkenler için boşluklar bol miktarda bulunduğundan aşındırma işlemi yarıiletken elektrolit eklemine herhangi ek bir işlem yapılmadan ileri yönde beslenmesiyle kolayca yapılabilir. Bu olay n-tipi yarıiletkenlerde ve dolayısıyla tez çalışması kapsamında üretilen tabakalarda, elektrolit yarıiletken eklemine elektron boşluk çifti üretebilecek kadar kısa dalgaboylu ışık yardımıyla fazladan boşluk üretimi vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu koşulun oluşabilmesi için Denklem [3.13] ile verilen şartın gerçekleştirilmesi gerekmektedir:

$$\lambda \leq \frac{h_c}{E_g} \quad [3.13]$$

Aşındırma işleminin n tipi ve p tipi yarıiletken materyaller için şematik gösterimi Şekil 3.53'de gösterilmektedir.



Şekil 3.54 n-InP alttaş üzerine büyütülmüş katkısız InP tabakasına ait ECV ölçümü.

İlerleyen bölümlerde de bahsedileceği üzere InP alttaş üzerine büyütülen InAlAs alaşımının Hall etkisi ölçümü sonucundan elde edilen taşıyıcı konsantrasyonu ölçümü biraz zahmetli ve diğerlerine göre daha az güvenilir olduğundan yapılan her Hall etkisi ölçümü ECV ölçümleri ile karşılaştırılmıştır.

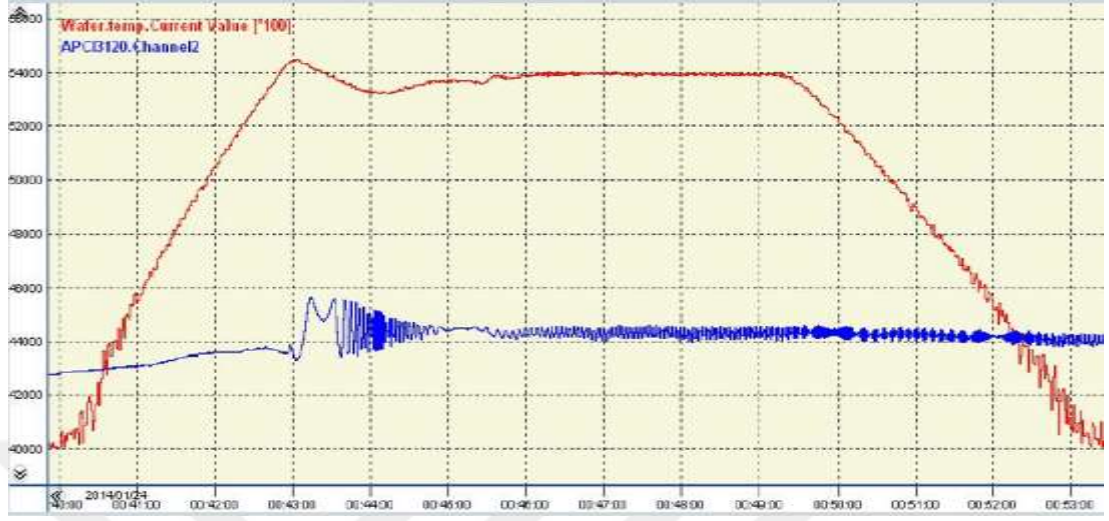
4. KUANTUM ÇAĞLAYAN LAZER YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde kuantum çağlayan lazer yapılarının aktif bölgesini, enjektör bölgesini, yelek tabakasını ve dalga kılavuzunu oluşturan InP, InGaAs ve InAlAs tek tabakalarının MOCVD ile büyütülme aşamaları ve detaylı karakterizasyonu ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca bu tabakaların kristal, optiksel, elektriksel arayüz vb. özelliklerine birçok büyütme parametresinin etkisi araştırılmıştır. Optimum büyütme parametreleri elde edildikten sonra çok ince tabaka kalınlıklarına sahip olan kuantum çağlayan lazer yapıları büyütebilmek için büyüme oranları düşürülmeye çalışılmıştır. Ayrıca büyüme oranı da epitaksiyel büyütmelelerde tabakaların çoğu özelliğini değiştirdiğinden birçok büyütme parametresinin tabakalar üzerine etkisi düşük büyüme oranı için de araştırılmıştır. Daha sonra bu tabakalardan oluşturulan süperörgülerin kalınlıkları parametrik yapılan büyütmelelerden sonra hassas bir biçimde HRXRD tekniği ile belirlenmiştir. Kalınlıkları belirlenen tabakalar yardımıyla tabakalar arası geçiş optimizasyonu yapılarak ideal bekleme süresi elde edilmiştir. Örgü uyumlu yapılardan sonra düşük dalga boylu kuantum çağlayan lazer yapıları büyütebilmek için aralarında ciddi miktarda örgü uyumsuzluğu bulunan yapılar ilk önce tek tabaka halinde daha sonra ise süperörgü şeklinde büyütülmüştür.

4.1. Tek Tabaka InP Büyütülmesi Ve Karakterizasyonu

Epitaksiyel büyütmelelerin hemen hepsinde büyütülmek istenen tabaka ya da tabakalardan önce alttaş üzerine ilk olarak homoepitaksiyel büyütme yapılmaktadır. Bu büyütmenin amacı, alttaş yüzeyinden gelecek olası istenmeyen, düzenli veya düzensiz yapıların büyütülen tabakaya ilerlemesini engellemek ve büyütme için daha esnek bir ortam hazırlamaktır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan alttaşlar InP olduğundan yapılan her büyütmeden önce minimum 500 nm kalınlığında (kuantum çağlayan lazerlerin yapısına bağlı olarak katkılı veya katkısız InP) ara tabaka büyütmesi yapılmıştır. Ayrıca n tipi katkılı InP tabakaları kuantum çağlayan lazer yapılarında yelek tabakası olarak kullanıldığından bu çalışma kapsamında $3 \times 10^{16} - 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ yoğunluğunda külçe taşıyıcıya sahip tabakalar büyütülmeye çalışılmıştır. Daha önce yerinde yansıma ölçümünün çalışma prensibini açıklarken bahsedildiği üzere bu teknik kırılma indisi farkına dayanarak çalışmaktadır. InP alttaş üzerine büyütülecek olan InP tabakası ile alttaş arasında herhangi bir kırılma indisi farkı

olmayacağından (her ikisi de aynı türden malzeme olduğu varsayımıyla) yerinde yansıma grafiğinde herhangi bir osilasyon gözlenmeyecektir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 InP alttaş üzerine büyütülen InP tabakasına ait yerinde yansıma eğrisi.

Bu durum hem alttaş hem de üzerine büyütülen tabaka aynı taşıyıcı konsantrasyonuna sahip olduğunda veya her ikisinin istemsiz katkılı olduğu durumlarda geçerlidir. Örneğin eğer InP alttaş n tipi katkılanmış ve üzerine InP tabakası istemsiz katkılı olarak büyütüldüyse her iki tabaka arasında katkılama seviyesi kaynaklı kırılma indisi farkı olduğundan bu büyütmelemlerde de Fabry-Perot osilasyonu gözlenmektedir. Bu duruma ait grafikler ilerleyen bölümlerde gösterilecektir.

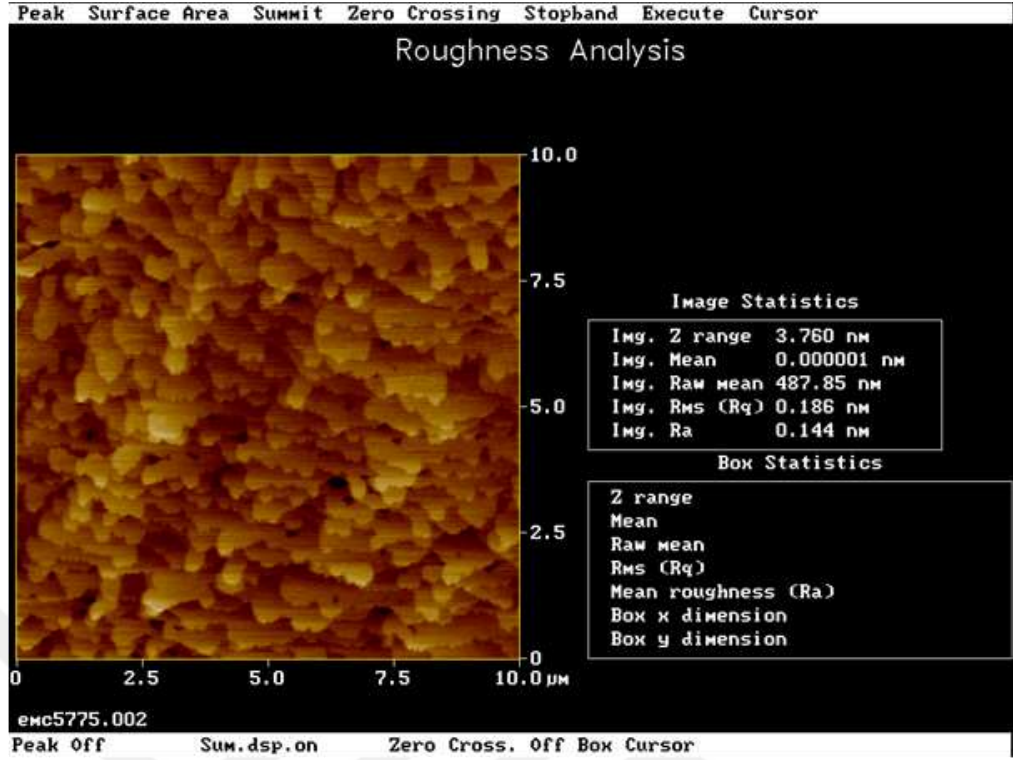
4.1.1. Katkısız ve n-katkılı InP büyütülmesi ve karakterizasyonu

InGaAs ve InAlAs tek tabakalarının ve kuantum kuyularının büyütülmesi, katkılanması ve detaylı karakterizasyonlarının yapılmasından önce ilk olarak InP alttaş üzerine katkılı ve katkısız InP tabakasının ideal kalitede büyütüldüğünden emin olunması gerekmektedir. Fotoluminesans karakteristiği, kristal kalitesi, mobilite, arkaplan taşıyıcı seviyesi ve yüzey morfolojisi InP kalitesinin ortaya konulmasında en belirgin özelliklerdir. Bu amaçla hem Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında (ikinci satır) hem de Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (ilk satır) MOCVD tekniği ile n-tipi katkılı ve katkısız InP büyütmelemleri yapılmıştır. Yapılan büyütmelemlerden katkısız olanlarından birer tanesine ait bazı parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 SI-InP alttaş üzerine büyütülen katkısız InP büyütme parametreleri

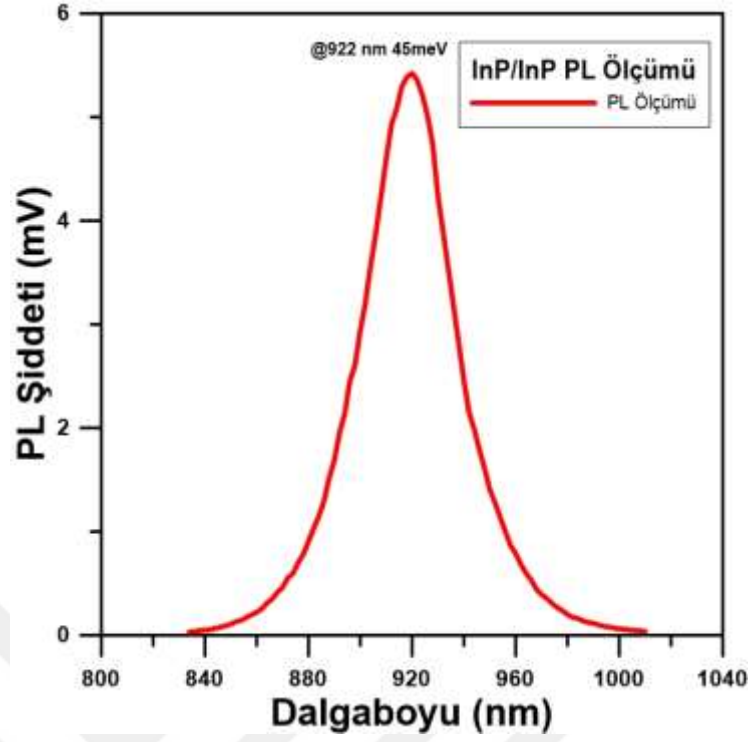
TMIIn akışı (sccm)	PH ₃ akışı (sccm)	Reaktör basıncı (mbar)	Büyütme sıcaklığı (C)	Toplam gaz akışı (sccm)	Dönme (rpm)
150	200	50	580	6000	60
200	100	80	560	18000	1000

Çizelge 4.1 incelendiğinde toplam gaz akışı ve dönme değerlerinin her iki büyütme için oldukça farklı olduğu görülmektedir. Genel olarak hem dönme hem de toplam gaz akış miktarı CQD laboratuvarında kurulu bulunan Emcore dikey akışlı reaktör büyütme mekanizması gereği fazladır. Her iki laboratuvar da büyütülen katkısız InP tabakalarının Van der Pauw geometrisi Hall etkisi ölçüm sonuçlarından $\sim 3E+15 \text{ cm}^{-3}$ arkaplan taşıyıcı yoğunluğu ve $>2200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite değerleri elde edilmiştir. Bu değerler katkısız olarak büyütülen InP tabakalarının oldukça kaliteli olduğunun göstergesidir. Ayrıca büyütülen tabakaların yüzey pürüzlülüğünü belirlemek amacıyla Atomik Kuvvet Mikroskobu ölçümleri yapılmış olup bunlardan EMC5775 numaralı katkısız InP büyütmesine ait $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m}^2$ lik ölçüm Şekil 4.2’de gösterilmektedir. InP yüzeyine ait karekök ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0.186 nm olarak edilmiştir.

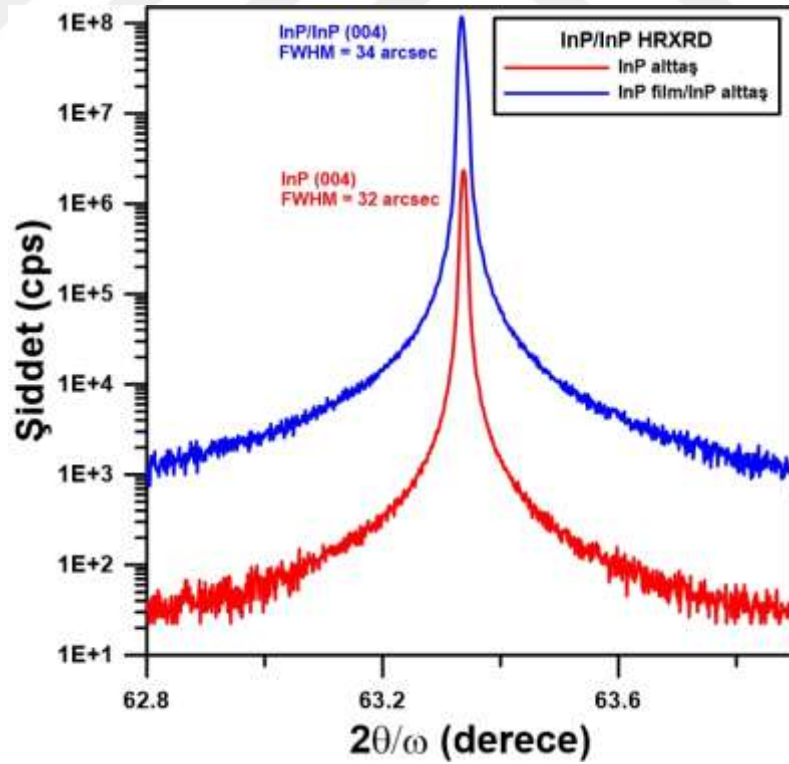


Şekil 4.2 EMC5775 numaralı katkısız InP büyütmesine ait Atomik kuvvet mikroskobu ölçümü. Karekök ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0.186 nm.

Katkısız InP tabakasına ait oda sıcaklığı fotoluminesans ölçümü ve $2\theta/\omega$ HRXRD taraması sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ile gösterilmektedir. Oda sıcaklığı fotoluminesans ölçümü 922 nm dalgaboyunda pik vermiştir. Pike ait FWHM değeri 45 meV olup bu pik InP bant kenarına aittir. Bu tabakanın ve InP alttaşın ayrı ayrı yapılmış $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları da Şekil 4.4 ile gösterilmektedir. Her ikisinin de FWHM değerleri hemen hemen aynı olup bu davranış büyütülen InP kalitesinin oldukça iyi olduğunun göstergesidir.



Şekil 4.3 EMC5775 numaralı katkısız InP büyütmesine ait oda sıcaklığı fotoluminesans ölçümü.



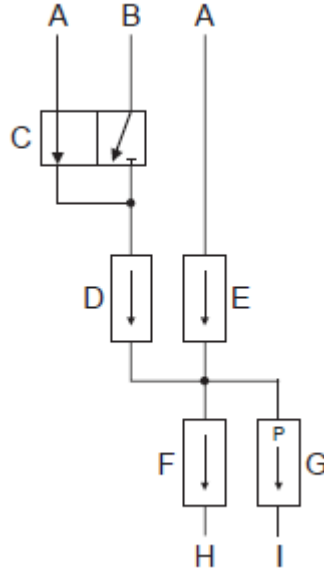
Şekil 4.4 InP alttas (kırmızı) üzerine büyütülen katkısız 2 µm kalınlığındaki InP (mavi) tabakasına ait 2θ/ω HRXRD taraması.

InP alttaşı üzerine epikristal katkısız InP tabakasının sorunsuz bir şekilde büyütebildiği gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında büyütülecek InP tabakaları üretilecek kuantum çağlayan lazer yapılarında yelek tabakası ve dalga kılavuzu tabakası olarak kullanılmak üzere değişen katkılama seviyelerinde (10^{16} - 10^{18} cm⁻³) n-tipi katkılı olarak büyütülmesi gerekmektedir. Bu amaçla her biri ortalama 375 nm kalınlığa sahip n-InP tabakalar SI-InP alttaşlar üzerine MOCVD ile büyütülmüştür. Büyütmelerde indiyum ve fosfat kaynağı olarak sırasıyla metal organik kaynak olan TMI_n ve hidrit kaynak olan PH₃ gazı kullanılmıştır. N tipi katkılama için ise hidrit bir kaynak olan %2 derişime sahip SiH₄ gazı kullanılmıştır. Yapılan büyütmelere ait büyütmeye parametreleri ve Hall ölçümü ile elde edilen külçe taşıyıcı yoğunluğu ve Hall mobilitesi değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Ölçümlerde ~5mm boyutunda kare şeklinde kesilen numunelerin köşelerinden indiyum ile alınan kontaklar vasıtasıyla van der Pauw tekniği kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 n-InP yelek tabakasında katkılama çalışmaları için yapılan büyütmelere ait büyütmeye detayları ve Hall ölçümü ile elde edilen külçe taşıyıcı yoğunluğu ve Hall mobilitesi değerleri

Numune Numarası	TMI _n akışı (sccm)	PH ₃ akışı (sccm)	SiH ₄ akışı (sccm) S/D/İ	R (sccm)	Külçe n (cm ⁻³)	Mobilite (cm ² /Vs)
QCL208	100	100	10/65/20	2.67	5.3E+018	1256
QCL207	100	100	10/250/20	0.769	1.4E+018	1840
QCL209	100	100	10/550/6	0.107	3.0E+017	2573
QCL211	100	100	2/1000/5	0.001	3.2E+016	2660

Çizelge 4.2 incelendiğinde büyütmelerde değiştirilen tek parametrenin katkılama için kullanılan SiH₄ gazının akış değişimi olduğu görülmektedir. SiH₄ kaynağı diğer hidrit kaynaklardan ve metal organik kaynaklarının çoğundan farklı olarak birden fazla kütle akış kontrolcüsüne sahiptir. Bu tasarım ilerleyen bölümlerde de görüleceği üzere ikinci AsH₃ hattı ile hemen hemen aynıdır. Bu tasarımın amacı n tipi katkılama seviyesini geniş bir aralığa yayabilmek ve gerektiğinde aşırı seyreltik veya aşırı derişik SiH₄ silindiri satın alındığında katkılama parametrelerini daha esnek bir biçimde ayarlayabilmek içindir. MOCVD reaktöründe bulunan SiH₄ hattının şematik gösterimi Şekil 4.5’de verilmektedir.



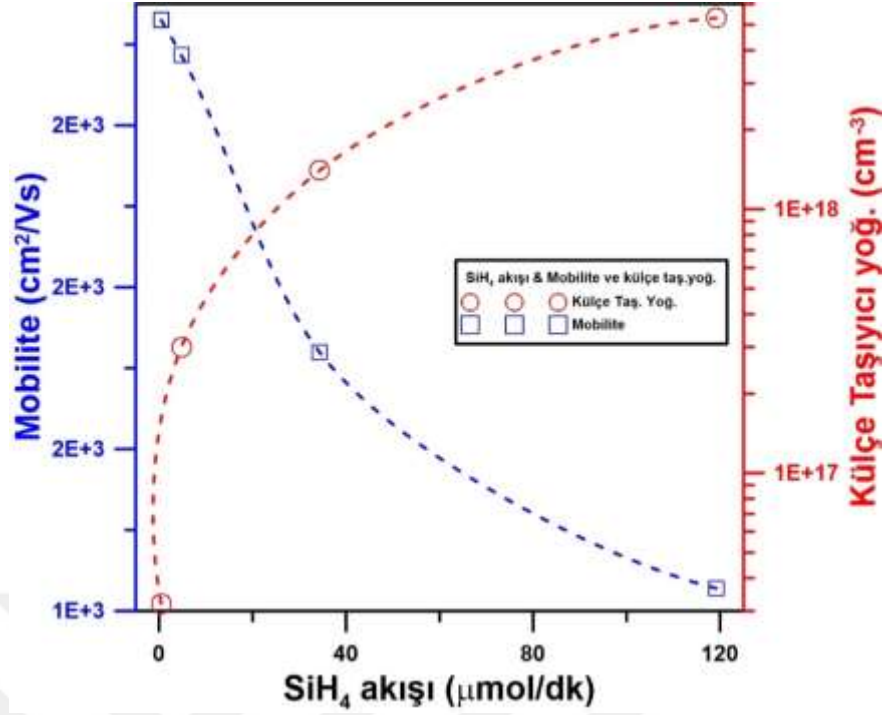
Şekil 4.5 MOCVD büyütmelelerinde n tipi katkılama için kullanılan SiH₄ hattının şematik gösterimi.

Burada A katkılama gazını taşıyacak hidrojen veya azot kaynağını, B SiH₄ gazı kaynağını, C 3/2-yol valfi, D reaktöre gönderilecek gazın miktarını ayarlamaya yarayan kaynak kütle akış kontrolcüsünü, E düşük katkılama miktarları için seyreltme gazı kütle akış kontrolcüsünü, F enjeksiyon kütle akış kontrolcüsünü, G basınç kontrolcüsünü, H SiH₄ gazı reaktör/egzoz hattını ve I ise hattın aşırı basınçlanması durumunda tahliye için SiH₄ gazı egzoz hattını göstermektedir.

Çizelge 4.2 ile verilen S, D ve İ harfleri sırasıyla source (kaynak), dilute (seyreltme) ve inject (enjekte) anlamına gelmektedir. R ise reaktöre gönderilen gerçek SiH₄ miktarı olup bu değeri hesaplayabilmek için Denklem [4.1] kullanılmaktadır:

$$R = \dot{I} * \frac{S}{S+D} \quad [4.1]$$

Çizelge 4.2’de gösterilen büyütmelelerden Hall ölçümü ile elde edilen Hall mobilitesi ve külçe taşıyıcı yoğunluğu değerlerinin SiH₄ akışıyla değişimi Şekil 4.6’de gösterilmektedir. Şekil 4.6 ve Çizelge 4.2’den görüleceği üzere sadece SiH₄ akışı değişimiyle geniş bir katkılama aralığı elde edilmiştir. Bu aralıkta elde edilecek düşük ve yüksek taşıyıcı yoğunluğuna sahip n-tipi InP tabakaları kuantum çağılayan lazer yapılarında yelek tabakası ve dalga kılavuzu tabakası olarak kullanılacaktır.



Şekil 4.6 SiH₄ akışının MOCVD ile büyütülen n tipi katkılı InP tabakasına ait külçe taşıyıcı yoğunluğu (kırmızı) ve mobilite (mavi) değişimine etkisi.

Şekil 4.6'den de görüleceği üzere 0-120 μmol/dk aralığında artan SiH₄ akışı için Hall etkisi ölçümü ile logaritmik bir biçimde değişen ve oldukça geniş bir aralıkta külçe taşıyıcı yoğunluğu elde edilmektedir. Ayrıca belirtilen SiH₄ aralığında artan taşıyıcı yoğunluğu sebebiyle taşıyıcılara ait mobilite değerlerinin logaritmik olarak azaldığı ortaya çıkmaktadır.

4.2. Tek Tabaka In_xGa_{1-x}As ve In_yAl_{1-y}As Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

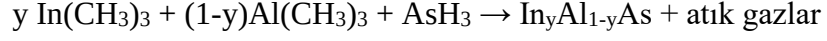
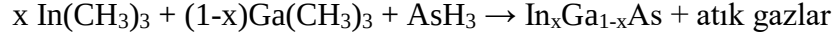
Bu bölümde tez çalışması kapsamında InP alttaş üzerine katkısız ve n tipi katkılı InP epitaksiyel büyütmeleleri başarılı bir şekilde büyütüldükten sonra ilgilenilen kuantum çağılayan lazer yapılarının temel iki alaşımından birisi olan In_xGa_{1-x}As ve In_yAl_{1-y}As alaşımlarının MOCVD tekniğiyle epitaksiyel olarak büyütülmesi ve karakterizasyonlarından bahsedilecektir. Bu kapsamda deneysel çalışmalara ilk olarak katkısız In_xGa_{1-x}As (Indium gallium arsenide) ve In_yAl_{1-y}As (Indium aluminum arsenide) alaşımlarının epitaksiyel büyütmeleleri ile başlanmıştır. III-V grubu bileşiklerinden oluşan In_xGa_{1-x}As ve In_yAl_{1-y}As In (İndiyum), Ga (Galyum), Al

(Alüminyum) ve As (Arsenik) elementlerinin oluşturduğu üçlü (ternary) alaşımlardır. Bu alaşımda x (y) miktarda InAs ve $(1-x)$ ($(1-y)$) miktarda ise GaAs (AlAs) bileşiği mevcuttur. In, Ga ve Al elementleri periyodik cetvelin III grubuna As ise V grubuna ait elementlerdir. Yapılan büyütmeler hem sarf malzeme bakımından hem de kullanılan cihazlar bakımından çok pahalı olduğundan büyütmelerde genellikle 2 inç veya 3 inç çapında, yarı-yalıtkan (semi-insulating), (100) kristal yönelimine sahip InP (Indium phosphide) alttaşları belirli şekiller halinde kesilerek kullanılmıştır. In, Ga ve Al kaynağı olarak sırasıyla ultra yüksek saflıkta (epipure) trimethylindium (TMIn, $\text{In}(\text{CH}_3)_3$), trimethylgallium (TMGa, $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$) ve trimethylaluminum (TMAI, $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$) metalorganik bileşikleri, As kaynağı olarak ise inorganik bir bileşik olan arsine (AsH_3) hidriti kullanılmıştır. Taşıyıcı gaz olarak ise genellikle hidrojen gazı veya hidrojen/azot karışımı kullanılmıştır. Büyütmeler daha önceki bölümlerde tüm bileşenleri detaylı bir şekilde anlatılan Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan Aixtron marka AIX 200/4 RF-S model yatay akışlı MOCVD reaktörü ve TÜBİTAK 2214/A Yurtdışı doktora sırası araştırma bursu kapsamında 1 yıl çalışmalarda bulunduğum Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu Emcore marka dikey akışlı MOCVD reaktörü kullanılmıştır (Şekil 4.7).



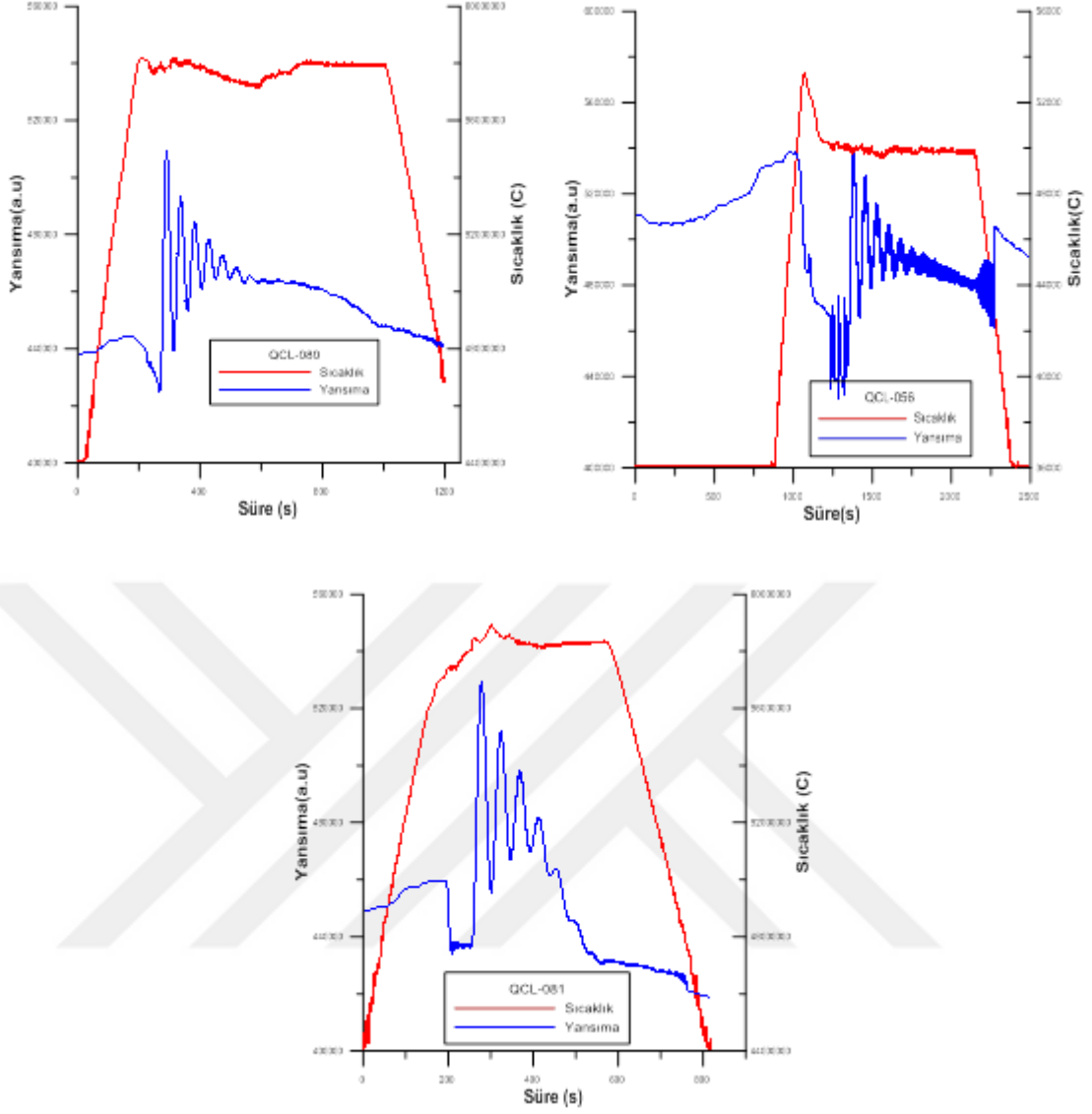
Şekil 4.7 Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan Aixtron marka AIX 200/4 RF-S model yatay akışlı MOCVD reaktörü (üst) ve TÜBİTAK 2214/A Yurtdışı doktora sırası araştırma bursu kapsamında 1 yıl çalışmalarda bulunulan Northwestern Üniversitesi Center for Quantum Devices laboratuvarlarında kurulu Emcore marka dikey akışlı MOCVD reaktörü (alt).

MOCVD ile $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ alaşımlarının büyütülmesinde ortaya çıkan en olası kimyasal süreç şu şekildedir:



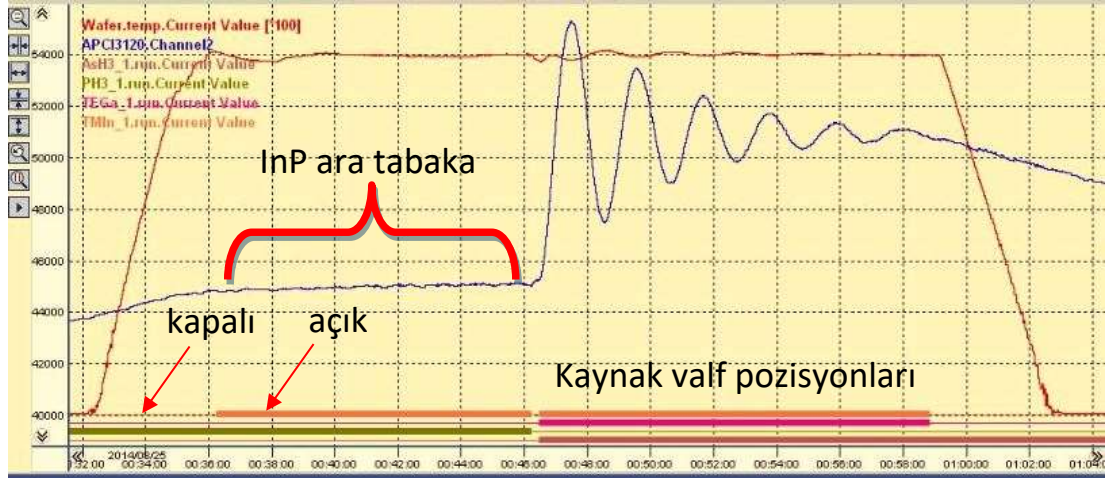
daha önce de bahsedildiği üzere reaksiyon sonucu ortaya çıkan atık gazlar atık temizleme ünitesi sistemi ile zararsız hale getirilmektedir.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ alaşımlarının sadece uygun büyütme parametrelerini belirleyebilmek amacıyla tez çalışması kapsamında 200'ün üzerinde büyütme yapılmıştır. Bu büyütmelerde genel olarak sıcaklık, V/III oranı, reaktör basıncı vb. parametreler göz önüne alınmıştır. Deneme büyütmelerinde büyütme sonunda numune durumunu anlayabilmek için çok detaylı karakterizasyon yapmak yerine çoğu zaman sadece yerinde yansıma ölçümü sonuçlarını incelemek yeterlidir. Şekil 4.8 yerinde yansıma ölçümlerinden başarısız büyütme olduğu anlaşılan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmelerine ait yerinde yansıma ölçümlerini göstermektedir.



Şekil 4.8 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmelelerinin optimizasyonu süresinde karşılaşılan başarısız büyütmelelere ait yerinde yansım ölçümleri.

Yapılan optimizasyon büyütmelelerinden elde edilen tecrübe ile $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ büyütmelelerinden önce hem alttaştan gelecek kusurların yapı içerisine ilerlemesini engellemek hem de büyütme için daha esnek bir ortam ayarlamak için ilk önce aynı sıcaklıkta (veya birkaç derece daha yüksek sıcaklıkta) InP ara tabaka büyütmesi yapılmıştır. Şekil 4.9 InP alttaş üzerine ilk önce ara tabaka InP daha sonra da $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesine ait yerinde yansım eğrisini göstermektedir.

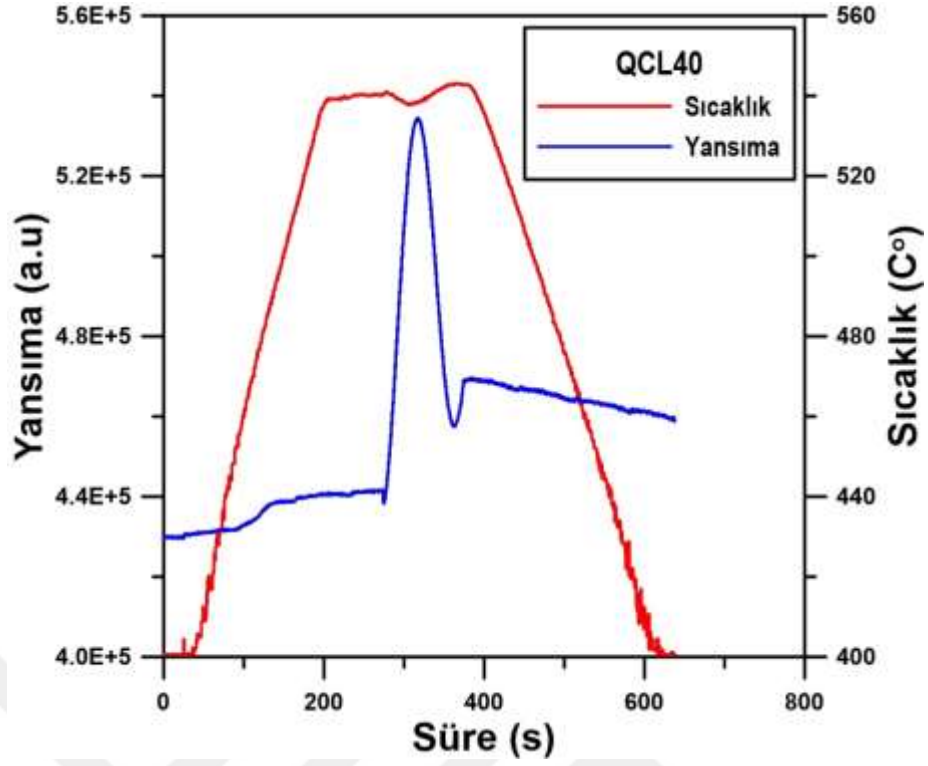


Şekil 4.9 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmelerinden önce hem alttaştan gelecek kusurların yapı içerisine ilerlemesini engellemek hem de büyütme için daha esnek bir ortam ayarlamak için ilk önce aynı sıcaklıkta InP ara tabaka büyütmesi ve daha sonra $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrisi.

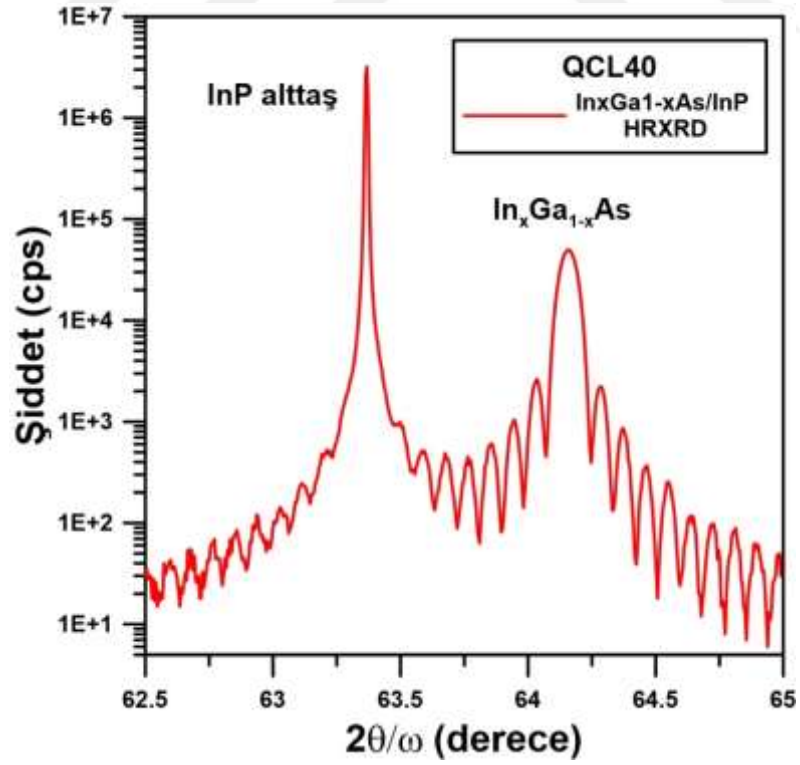
Şekil 4.9’da kırmızı eğri alttaş sıcaklığını, mavi eğri ise yerinde yansımayı göstermektedir. Büyütmeye başlamadan önce InP alttaş yüzeyi yavaş bir biçimde ($1\text{C}^\circ/\text{s}$) ısıtılmaktadır. Isıtılan InP alttaş yüzeyinden fosfat atomlarının kaçışını engellemek amacıyla ısıtma boyunca yüzeye PH_3 gazı akışı sağlanmaktadır. Şekil 4.9’un alt kısımlarında görülen bar şeklindeki kalın ve ince çizgiler kullanılan kaynakların valf pozisyonlarını göstermektedir. Çizgi ince olduğunda kullanılan valfin kapalı, kalın olduğunda ise açık olduğunu belirtmektedir. InP ara tabaka büyütmesi başlayana kadar PH_3 gazı akışı devam etmektedir. Sıcaklık stabilizasyonu sağlandığında artık TMIn kaynağı da açılarak InP büyütmesi başlatılır. Bu aşamada istenilen ara tabaka kalınlığı (kullanılan alttaşın yüzey durumuna, reaktörün durumuna vb gibi şartlar göz önüne alınarak) elde edildikten sonra hem TMIn hem de PH_3 valfleri yüzeyde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ dörütlü alaşımı oluşumunu engellemek için kısa bir süreliğine kapatılmaktadır. Daha sonra Şekil 4.9’dan da görüleceği üzere $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesi için TMIn, TMGa ve AsH_3 kaynakları açılmaktadır. İstenilen kalınlıkta $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesi yapıldıktan sonra III grubu kaynaklar TMIn ve TMGa valfleri kapatılırken $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yüzeyinden As atomlarının kaçışını engellemek amacıyla AsH_3 akışı soğuma esnasında devam eder. Detaylı bir şekilde anlatılan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesine

ait bu süreçler $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ alaşımı için de TMGa yerine TMAI kayağı kullanılması dışından bire bir geçerlidir.

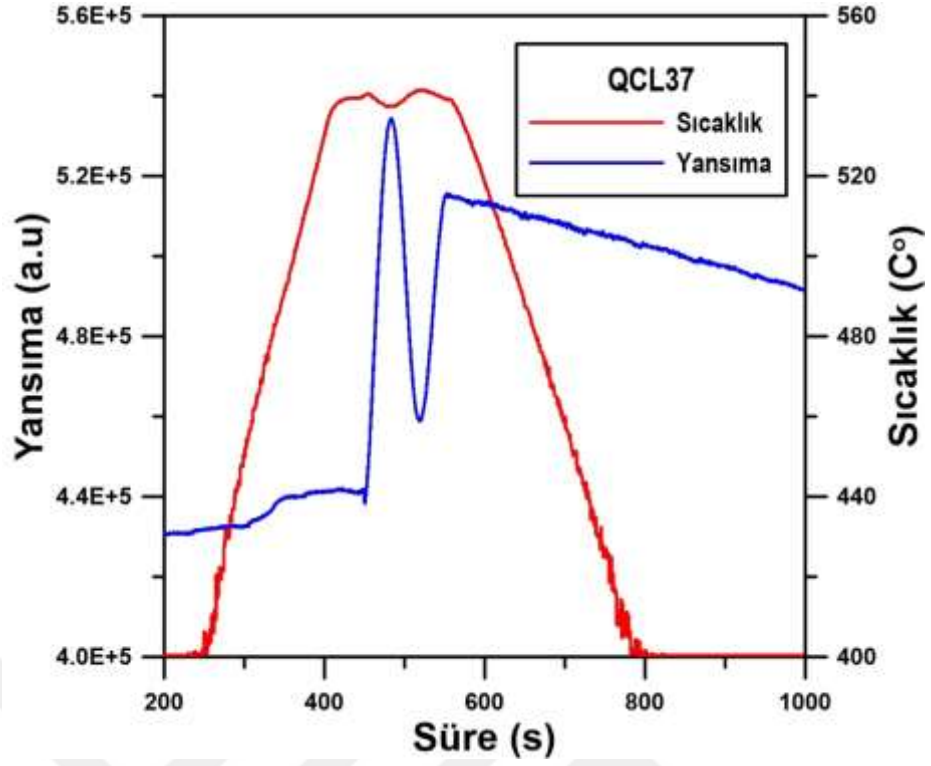
Yapılan birçok deneme ve optimizasyon büyütmesinden sonra InP alttaş üzerine değişen alaşım oranlarında (x) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesi başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Bu büyütme örneklerinden QCL36, 37, 40, 43 ve 57 numaralı numunelere ait yerinde yansıma ve HRXRD ölçümlerine ait grafikler sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.19 aralığında gösterilmektedir. Bu büyütme örnekleri çeşitli kalınlıklarda ve çeşitli alaşım oranları elde edilecek şekilde kaynak akışları değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. QCL40 ile başlayan büyütme serisinde örgü uyumsuzluğu ile büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ numunesi için QCL57 numaralı büyütmede mükemmel bir örgü uyumu ile $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ alaşımı büyütülmüştür. Daha sonra devam eden büyütme örneklerinde de artan In oranı ile büyütme yapılmıştır. Büyütme örneklerinin hemen hepsine ait HRXRD taramalarında kalınlık osilasyonları periyodik ve belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır ki bu davranış hem büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımlarının kristal kalitesinin yüksek olduğunu hem de InP alttaş ile alaşım arasındaki arayüz kalitesinin keskin olduğunu göstermektedir.



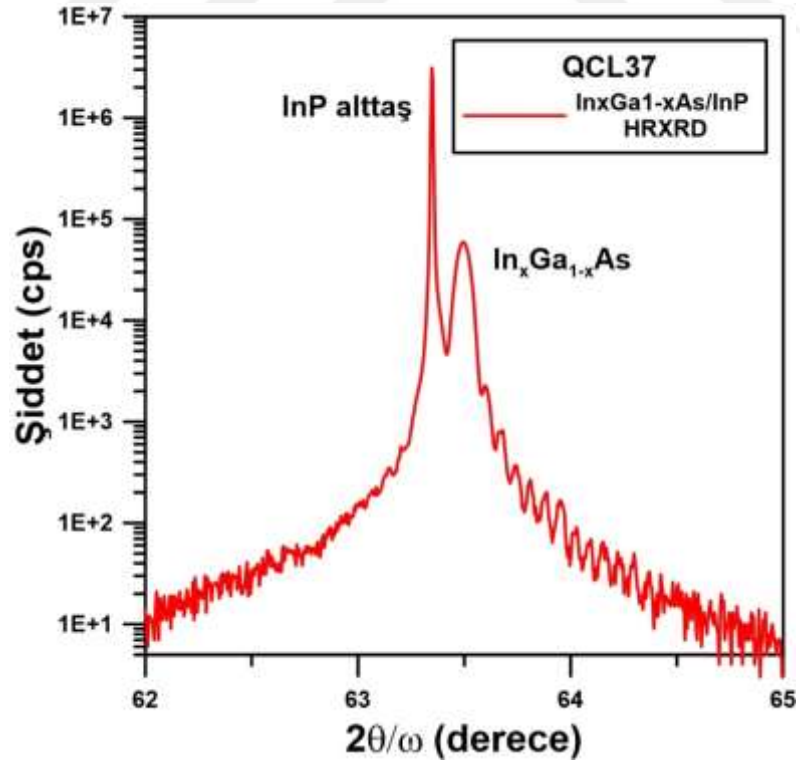
Şekil 4.10 QCL040 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyümesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.



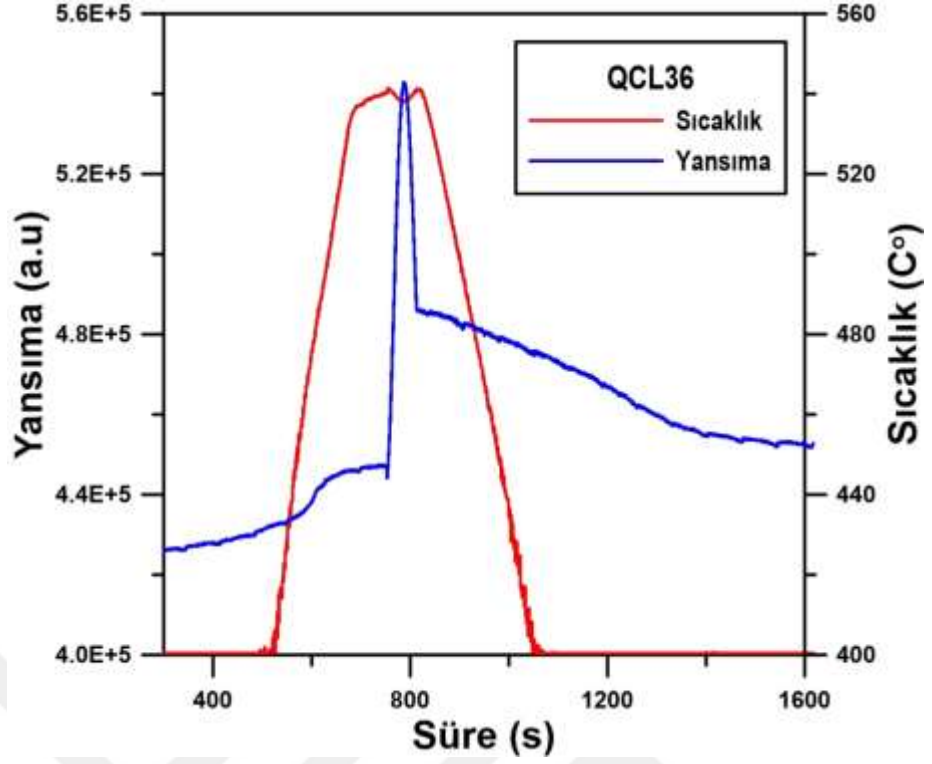
Şekil 4.11 QCL40 numaralı büyütme için HRXRD taraması.



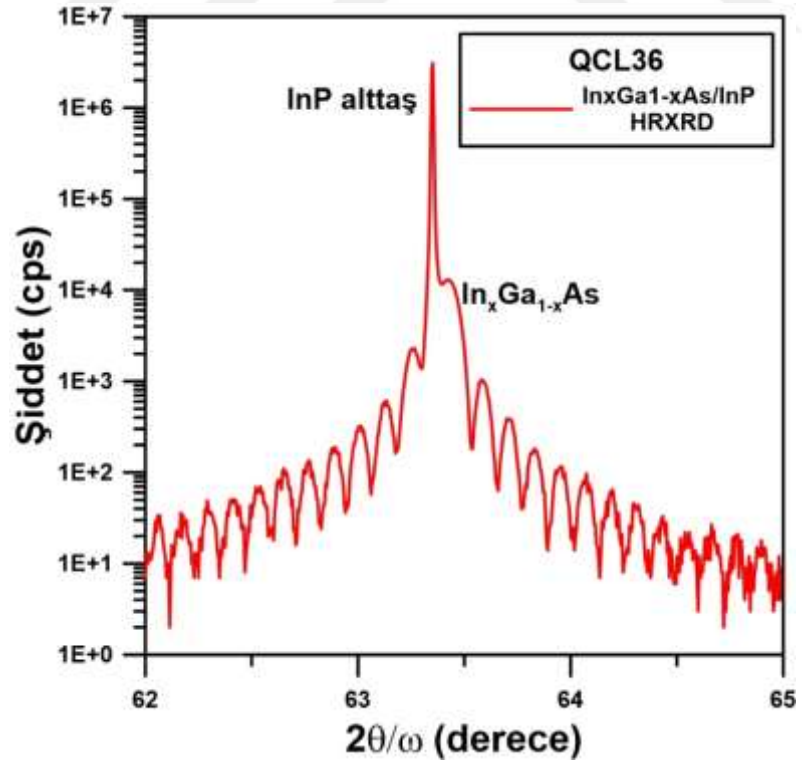
Şekil 4.12 QCL037 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyümesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.



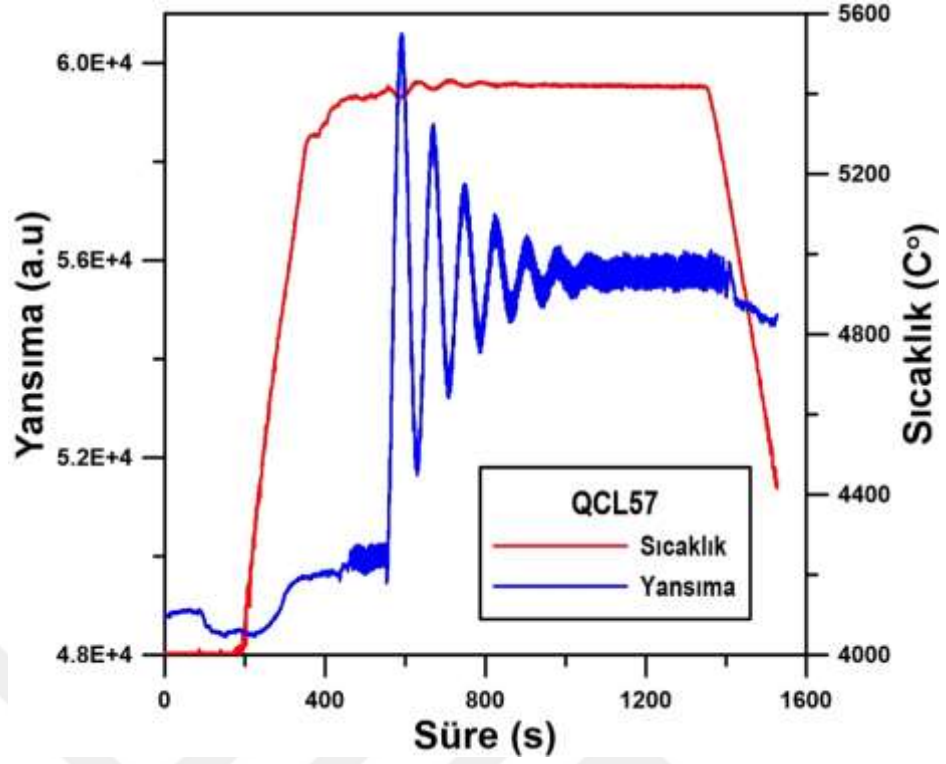
Şekil 4.13 QCL37 numaralı büyötmeye ait HRXRD taraması.



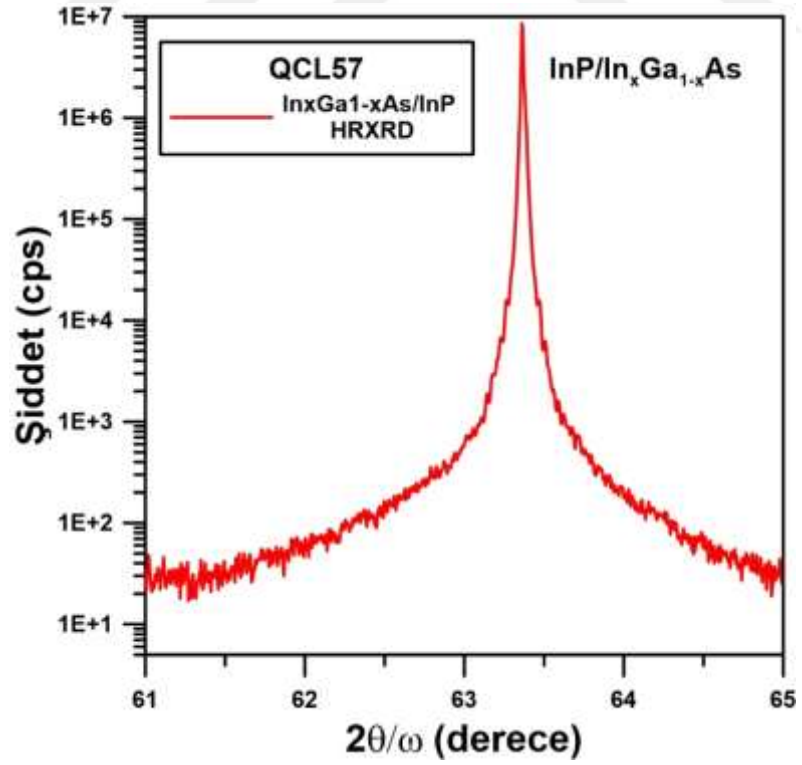
Şekil 4.14 QCL36 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.



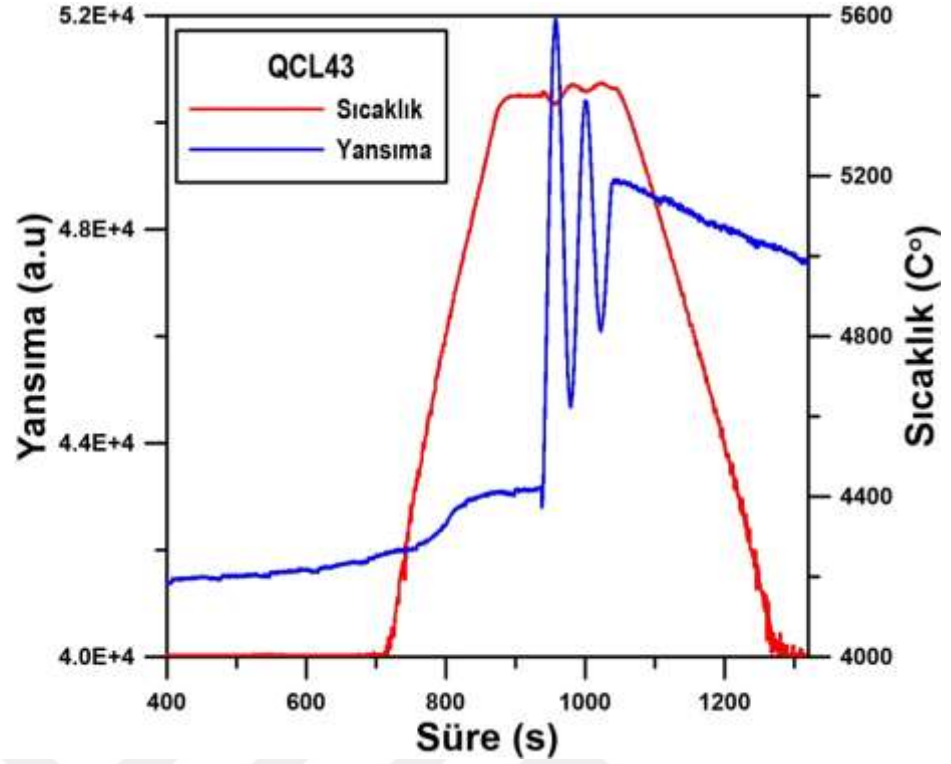
Şekil 4.15 QCL36 numaralı büyütme için HRXRD taraması.



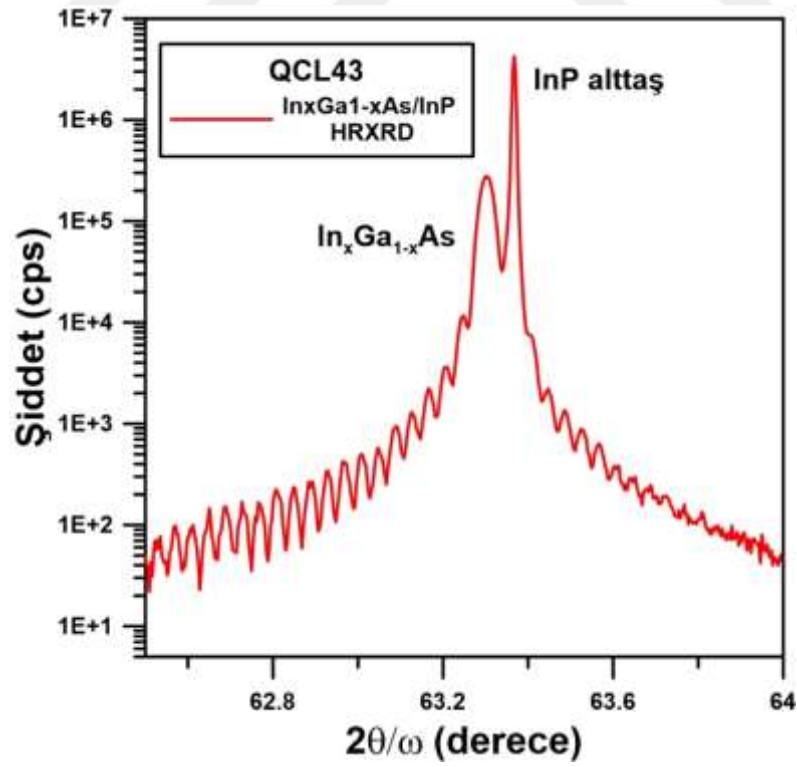
Şekil 4.16 QCL57 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.



Şekil 4.17 QCL57 numaralı büyütme için HRXRD taraması.

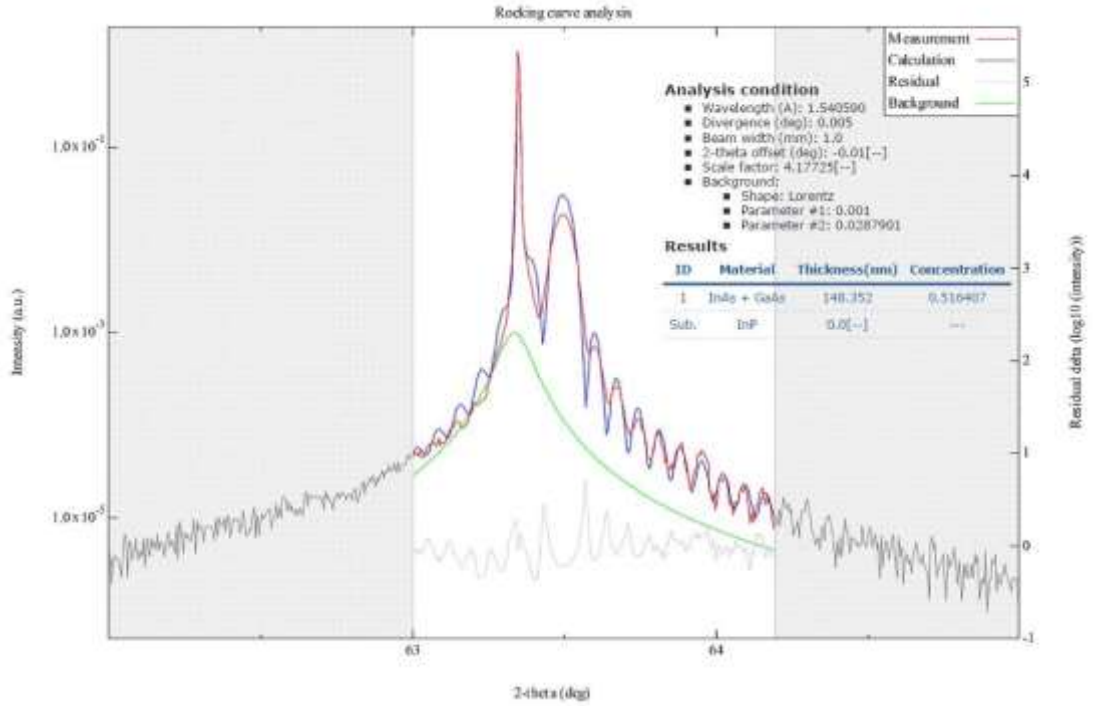


Şekil 4.18 QCL043 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütmesine ait yerinde yansımaya (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri.



Şekil 4.19 QCL43 numaralı büyütme için HRXRD taraması.

Buraya kadar tez çalışması kapsamında $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımlarının MOCVD tekniği için standart büyütme hızlarında istenilen alaşım oranlarında büyütülebildiği gösterilmiştir. Epitaksiyel tabaka büyütmelelerinde elde edilmesi en önemli bilgilerden birisi de kalınlıktır. İlerleyen bölümlerde çok ince tabakalar içeren süperörgü yapıları için tez çalışması kapsamında geliştirilen teknik yardımıyla kalınlık hesaplamasından bahsedilecektir. Külçe yapılar için tez çalışması kapsamında birden fazla teknik kullanılmıştır. Bunlardan bir tanesi mikroskobik teknikler yardımıyla kalınlık ölçmektir ve ilerleyen bölümlerde bu teknik kısaca açıklanacaktır. Bir diğer teknik daha önce bahsedilen yerinde yansıma ölçümleri vasıtasıyla elde edilen osilasyonlar yardımıyla kalınlık ölçülmesidir. Son olarak da tez çalışması kapsamında HRXRD tekniği yardımıyla kalınlık ölçülmüştür. Şekil 4.20 InP alttaş üzerine MOCVD ile büyütülmüş $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisini göstermektedir.



Şekil 4.20 InP alttaş üzerine MOCVD ile büyütülmüş $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi.

Daha önce de bahsedildiği üzere eğer büyütülen alaşımın kristal kalitesi yüksek, alttaş ile arasındaki arayüz keskin ise bunların yanı sıra uygun kalınlıkta büyütülmüş ise Şekil 4.20'teki HRXRD ölçümüne benzer kalınlık osilasyonları elde etmek mümkün

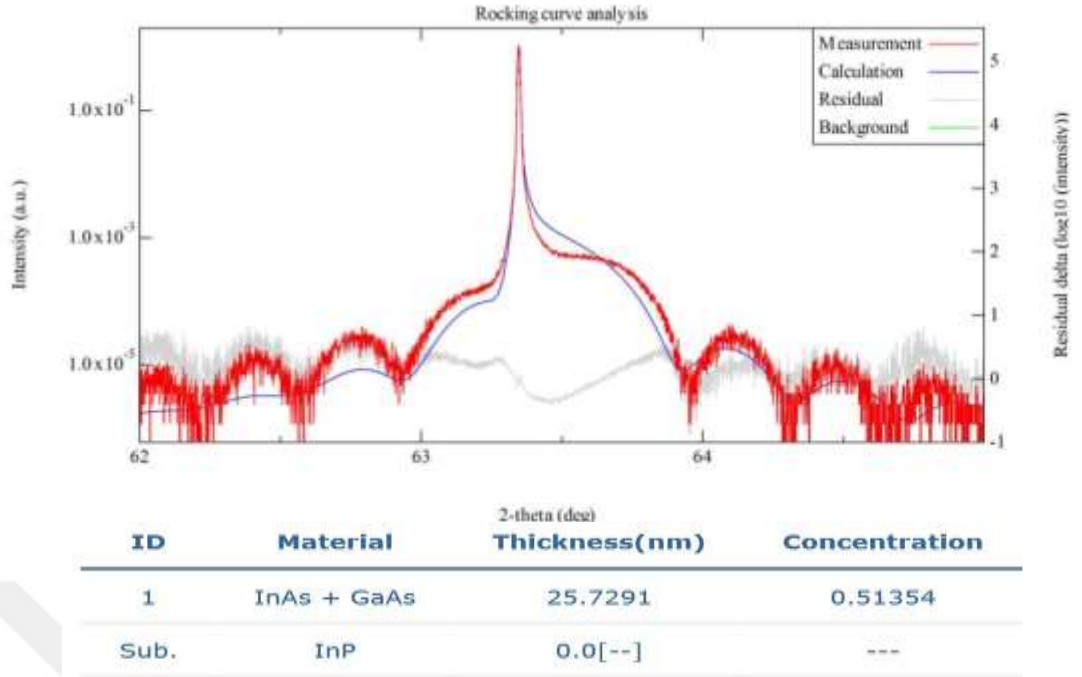
olabilmektedir. Alttaş üzerine direk olarak büyütülen tek tabaka büyütme için elde edilen kalınlık osilasyonları arasındaki mesafe yardımıyla büyütülen tabakanın kalınlığı XRD tekniği ile çok hassas bir biçimde elde edilebilmektedir. Şekil 4.20 ile gösterilen ölçüm ve simülasyon sonucunda tabaka kalınlığı ~148 nm alaşım oranı ise $x \sim 0.516$ olarak elde edilmiştir.

Hem yapılan büyütme tekrar edilebilirliğini hem de yerinde yansıma ölçümleri ve HRXRD taramalarından elde edilen kalınlık ölçümlerini senkronize ederek büyütme devam etmek açısından 3 tane büyütme art arda yapılmıştır. Numunelerin HRXRD taramaları yapıldıktan sonra yapılar için gerçekleştirilen simülasyonlar yardımıyla hem kalınlıklar hem de alaşım oranları elde edilmiştir. Yapılan büyütme parametreleri Çizelge.4.3’de verilmiştir.

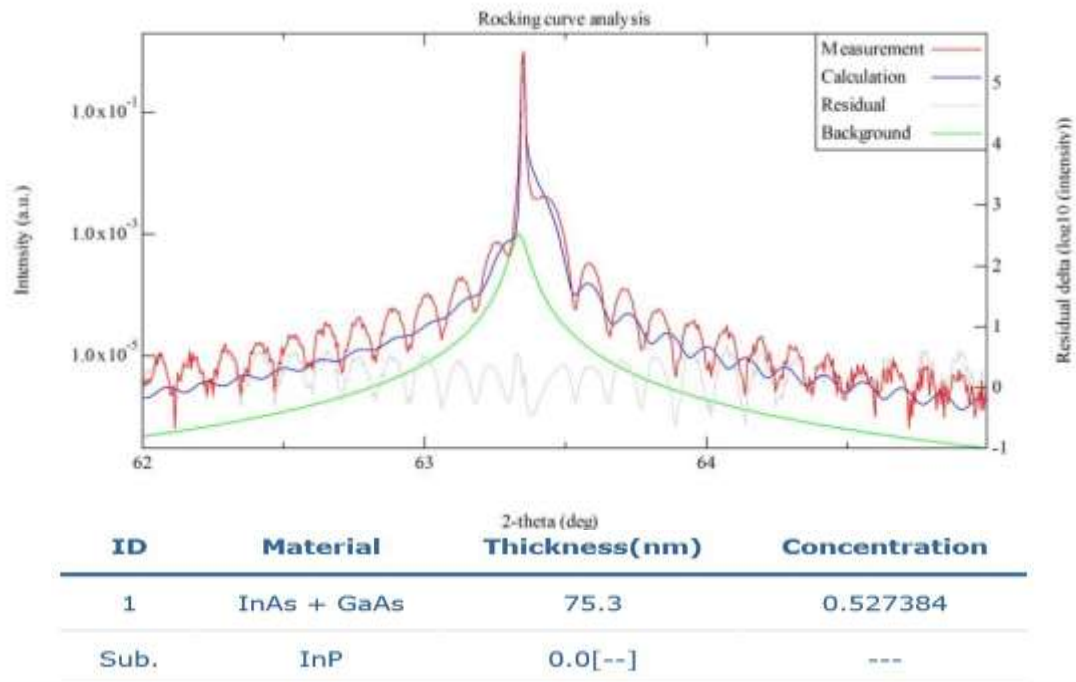
Çizelge 4.3 Büyütme tekrar edilebilirliğini ve yerinde yansıma ölçümleri ve HRXRD taramalarından elde edilen kalınlık ölçümlerini senkronize ederek büyütme devam etmek açısından yapılan büyütme parametreleri

Numune Numarası	TMIn akışı (sccm)	TMGa akışı (sccm)	AsH ₃ akışı (sccm)	Büyütme süresi (s)
QCL35	116	8	94	20
QCL36	116	8	94	60
QCL37	116	8	94	100

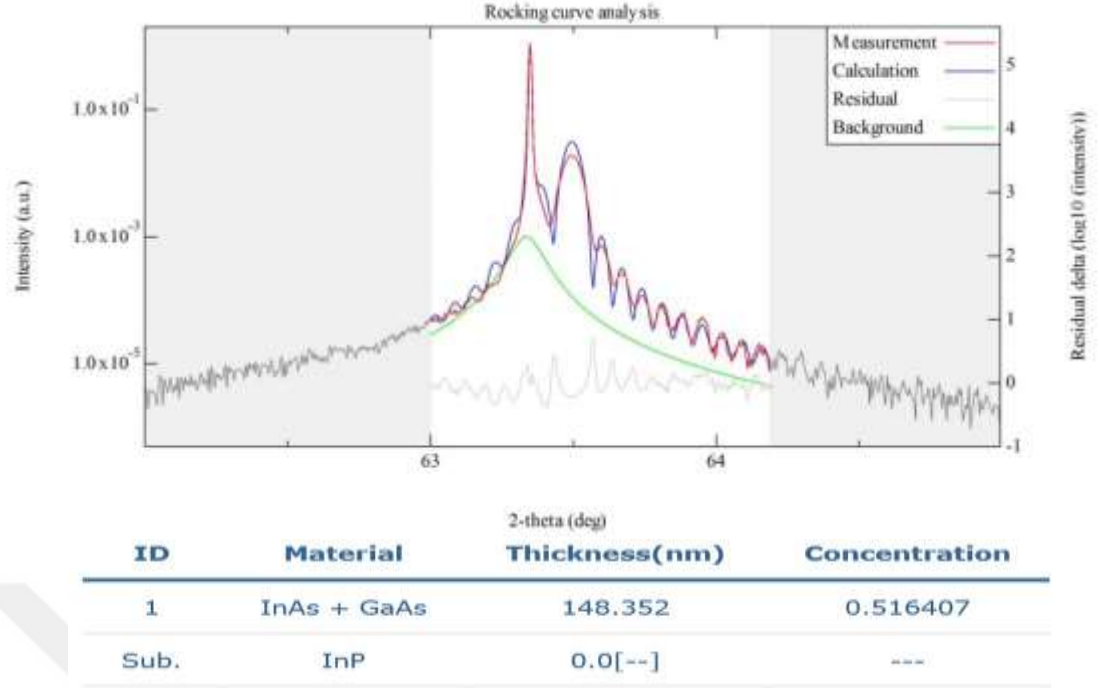
Çizelge 4.3’ deki büyütme parametreleri incelendiğinde tek değişkenin büyütme süresi olduğu görülmektedir. Diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Bu numunelere ait HRXRD taramaları ve simülasyonlar sırasıyla Şekil 4.21– Şekil 4.23 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.21 QCL35 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi. Büyütme süresi 20s.



Şekil 4.22 QCL36 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi. Büyütme süresi 60s.



Şekil 4.23 QCL37 numaralı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen dinamik simülasyon (mavi) eğrisi. Büyütme süresi 100s.

QCL35-37 numaralı örneklerle ait simülasyon sonuçlarından elde edilen kalınlıkların kendi aralarında oldukça tutarlı oldukları ortaya çıkmaktadır. 20s büyütme yapılan QCL35 numaralı örneğe ait kalınlık ~25nm olarak elde edilirken 60s büyütme yapılan QCL36 numaralı örneğe ait kalınlık ise ~75 nm olarak elde edilmiştir. Fakat 100 s büyütülen QCL37 numaralı örneğe ait elde edilen kalınlık bilgisi (Şekil 4.23) beklenti ile bir miktar farklılık göstermektedir. Bu farklılık alttaş ile örgü uyumsuzluğu kaynaklı gerilme ve rahatlama mekanizmalarından gelmekte olup önceki bölümlerde kısmen anlatılmıştır ve ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak anlatılacaktır.

4.2.1. Düşük büyüme oranlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonları

Önceki bölümlerde genel olarak MOCVD ile $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ alaşımlarının büyütülebildiği ve büyütme mekanizmaları kısaca anlatılmıştır. MOCVD tekniğinin MBE tekniğine kıyasla en genel farklarından bir tanesi büyüme oranıdır. MOCVD tekniği ile genellikle daha yüksek büyüme oranları ile kaliteli büyütme yapılabilmektedir. Tipik bir kuantum çağlayan lazer yapısının aktif bölgesindeki yarıiletken alaşımların kalınlıklarının çok ince (<5nm) olmasından dolayı geleneksel

MOCVD yüksek büyütme oranları ile bu yapıların tek tabaka olarak büyütülmesi ve bu yapıların tekrarlanması en büyük zorluklardan biridir. Bu sebeple, bu bölümde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ alaşımlarının ilk olarak herhangi bir donanım değişimi olmaksızın büyüme oranlarının düşürülerek kalınlıkların hassas olarak kontrol edilmesi için gerekli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda asıl amaç büyüme oranını düşürmek olmakla birlikte aynı zamanda örgü uyumu, kristal kalitesi, büyüme esnasında yüzey durumu vb özellikler de korunmaya çalışılmıştır. Bu bölümde büyüme oranları yerinde yansıma ölçümleri kullanılarak hesaplanmıştır.

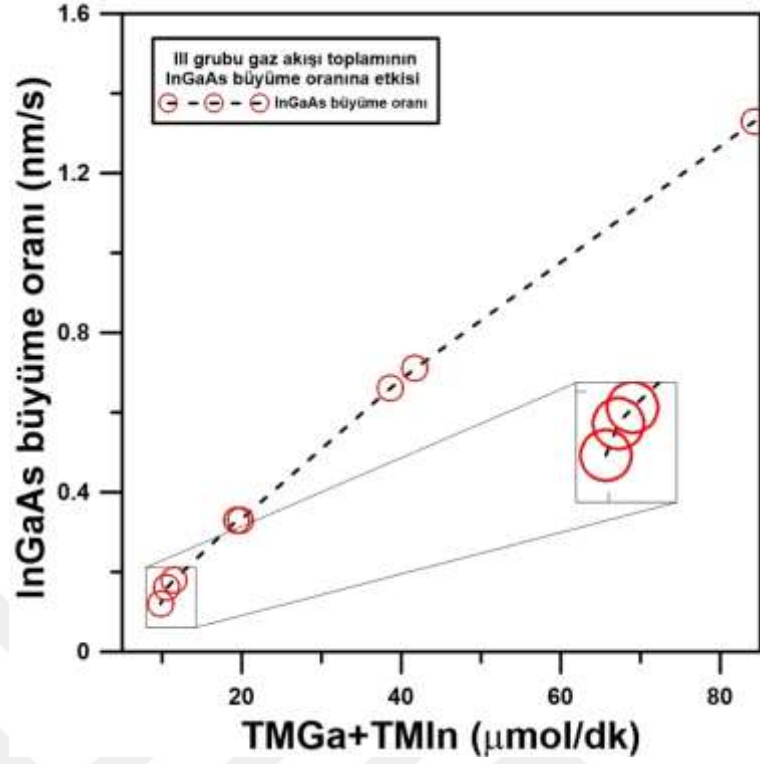
4.2.1.1. Düşük büyüme oranlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ büyütülmesi ve karakterizasyonları

İlk olarak $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alaşımının büyüme oranını düşürmek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 4.4’ de bu çalışmaların bazılarına ait büyütme parametreleri özet olarak verilmiştir.

Çizelge 4.4 Büyüme oranı çalışmasına ait örnekler için büyütme detayları

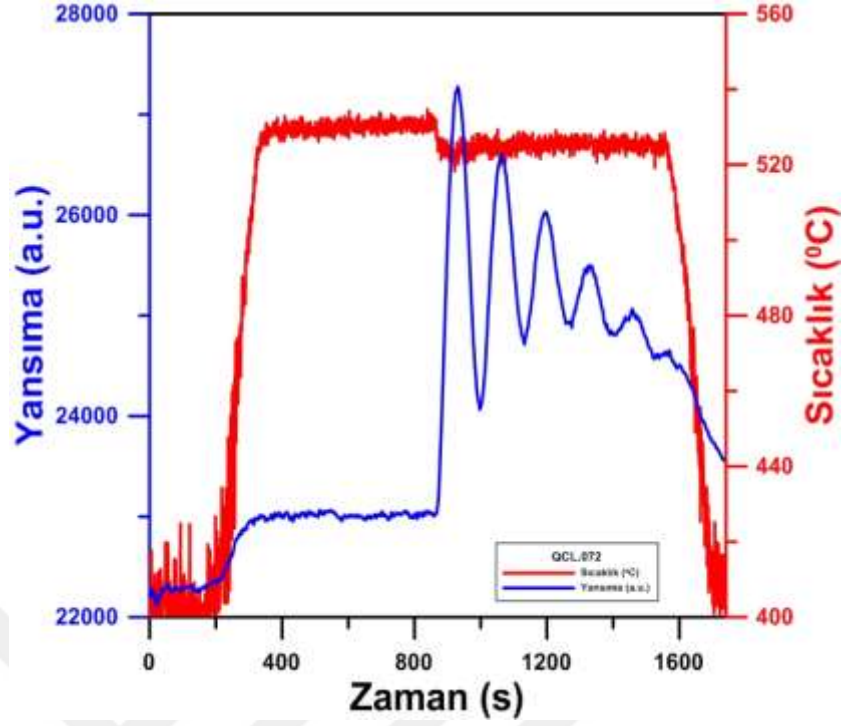
Numune Numarası	TMIn akışı (sccm)	TMGa akışı (sccm)	AsH ₃ akışı (sccm)	Büyüme oranı (nm/s)
QCL72	255	9	200	1,33
QCL73	125	4,5	100	0,71
QCL74	107	4,5	100	0,66
QCL75	50	2,5	50	0,33
QCL76	48	2,5	50	0,33
QCL77	28	1,5	30	0,18
QCL78	23	1,5	30	0,16
QCL79	18	1,5	20	0,12

Genel davranışı görmek amacıyla kristal kalitesi, büyüme esnasında ve sonrasındaki yüzey kalitesi gibi özellikler dikkate alınmadan Şekil 4.24 ile toplam III grubu (TMGa ve TMIn) kaynak akışlarının InGaAs büyüme oranını etkisini göstermektedir. Buradan aralarında lineer bir ilişki olduğu ortaya çıkmaktadır. Yani artan toplam III grubu kaynak akışı büyüme hızına direk olarak etki etmektedir.

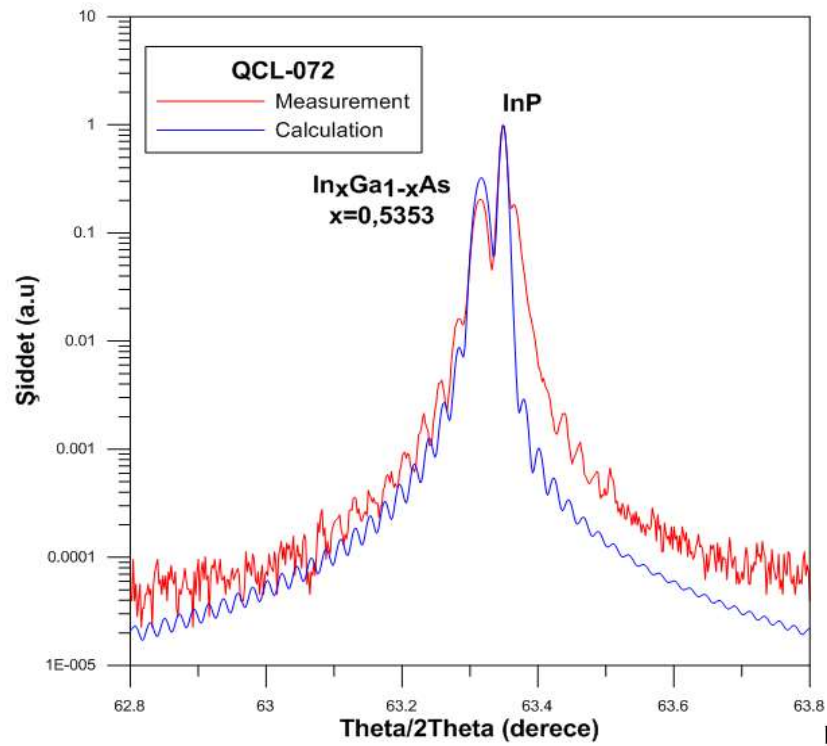


Şekil 4.24 Toplam III grubu (TMGa ve TMIn) kaynak akışlarının InGaAs büyüme oranına etkisini.

Bu büyütmelelerde ilk olarak QCL72 numaralı büyütme ile Çizelge 4.4 de gösterilen kaynak akışları kullanılarak büyütme yapılmıştır. Büyüme oranı (1.33 nm/s) MOCVD standartlarında olan bu örneğe ait yerinde yansıma ölçümü ve $2\theta/\omega$ HRXRD taraması sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26' de gösterilmektedir.

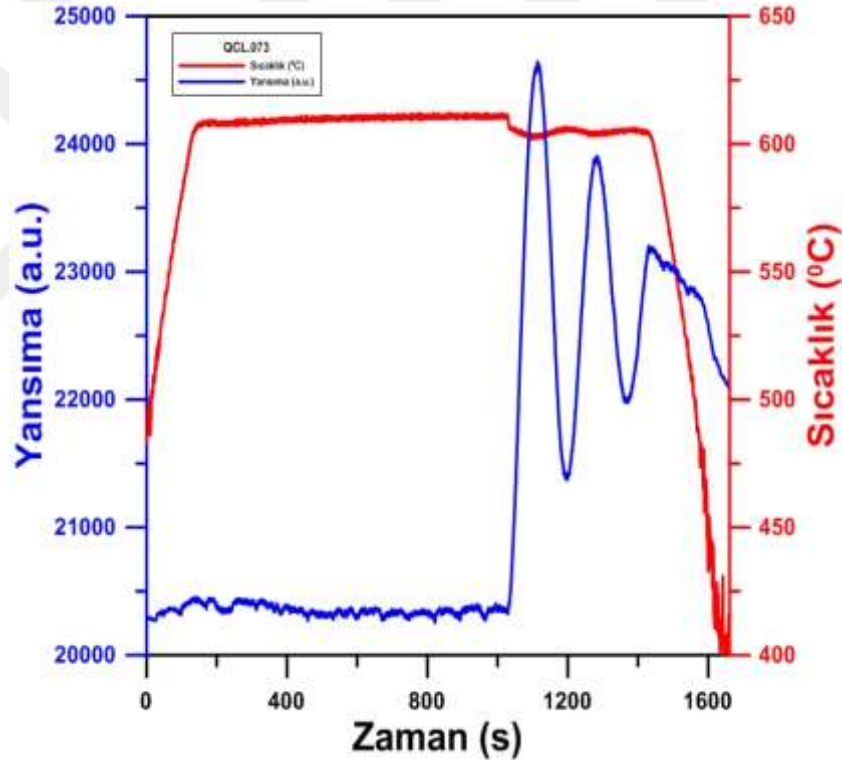


Şekil 4.25 QCL72 numaralı büyütme için yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.

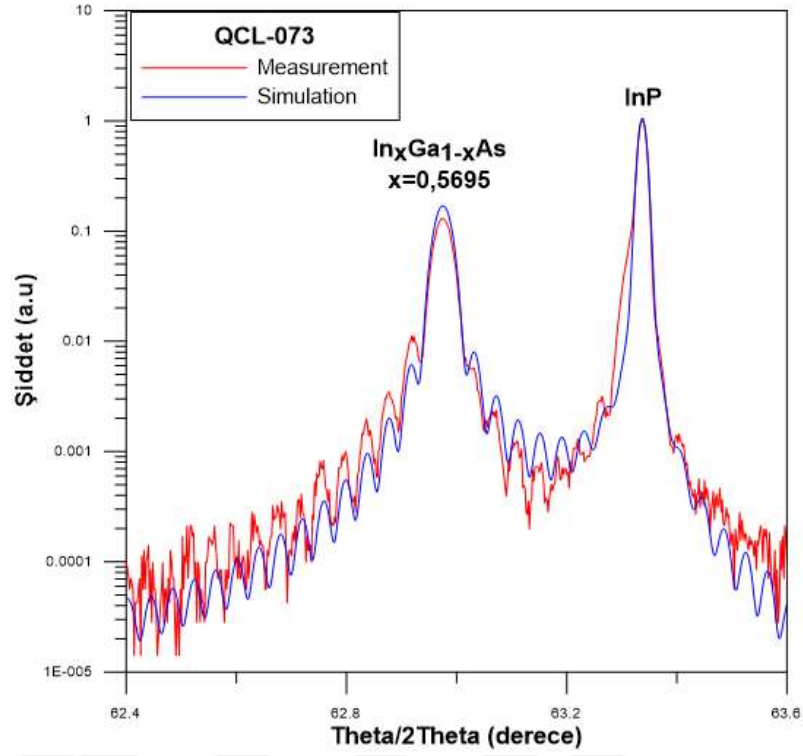


Şekil 4.26 QCL72 numaralı büyütme için $2\theta/\omega$ HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).

Yapılan büyütmede büyüme süresince herhangi bir sıkıntı gözlenmeyip HRXRD taraması ve analizi sonucunda InP alttaşı ile hemen hemen örgü uyumlu InGaAs alaşımı büyütülmüştür. Bu büyütmeden sonra büyüme oranını düşürmek amacıyla QCL73 numaralı büyütme ile TMI_n, TMGa ve AsH₃ akışları yarıya düşürülmüştür. Yapılan yerinde yansıma ölçüm sonucu büyüme oranının bu akışlarla 1,326 nm/s'den 0,705 nm/s değerine azaldığını göstermiştir. Bu büyütmeyle ait yerinde yansıma ölçümü ve 2 θ/ω HRXRD taraması sırasıyla Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 'te gösterilmektedir. Yerinde yansıma ölçümünden büyütme esnasında herhangi bir sıkıntı olmadığı, yüzey kalitesinin bozulmadığı gözlenmiştir. HRXRD taramasında kalınlık piklerinin simetrik ve periyodik bir biçimde ortaya çıkması büyütülen örneğin kristal kalitesi ve InP alttaşı ile keskin bir arayüze sahip olduğunun göstergesidir.

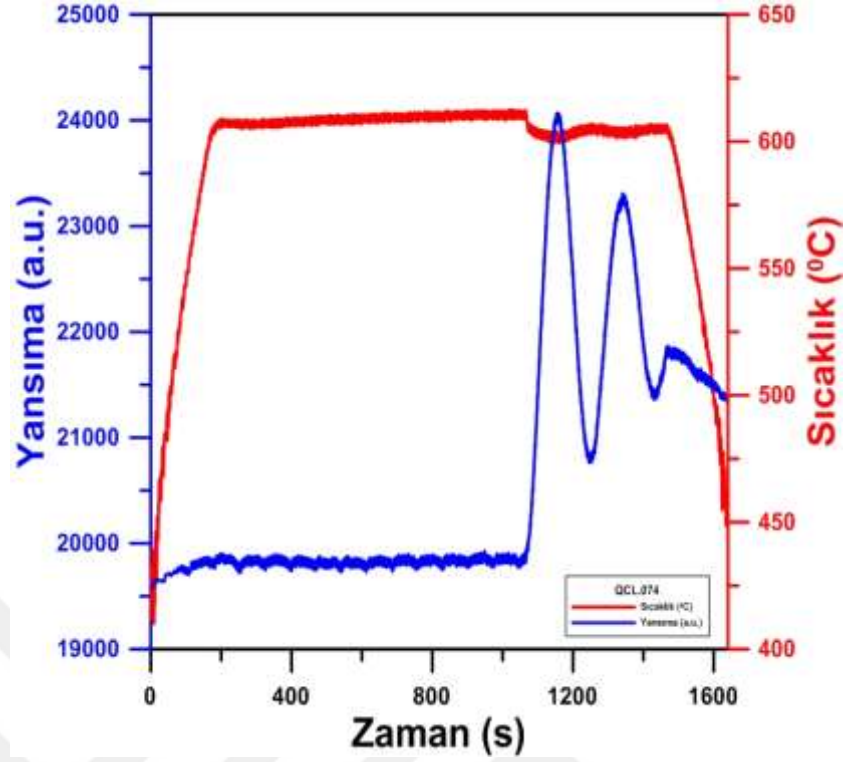


Şekil 4.27 QCL73 numaralı büyütmeyle ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.



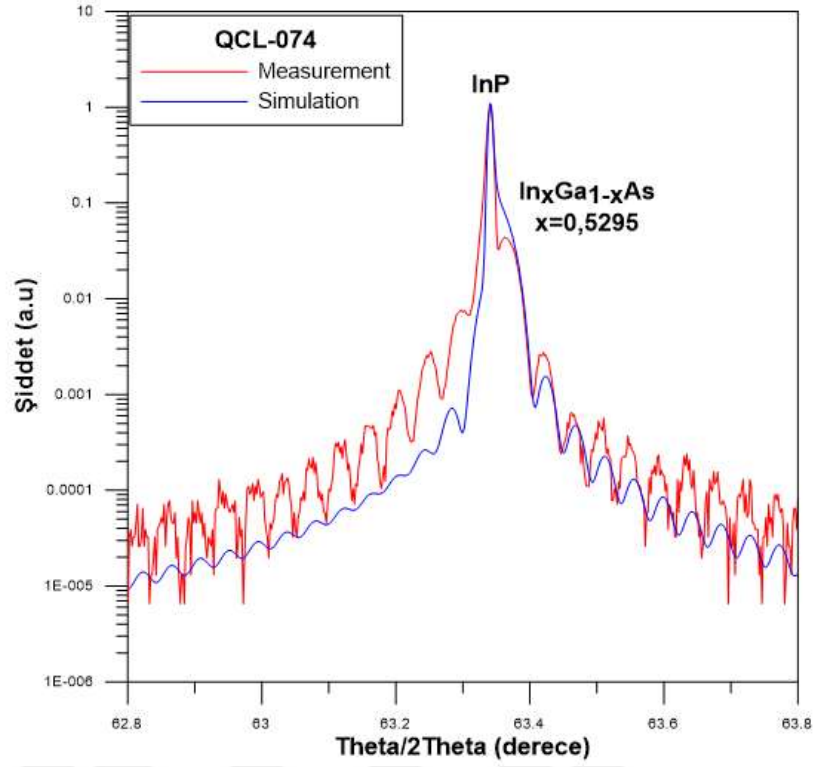
Şekil 4.28 QCL73 numaralı büyütme için XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).

QCL73 numaralı büyütmede InGaAs alaşımındaki In oranı yapılan simülasyon sonucunda $x=0.57$ olarak bulunmuştur. Büyütmelere devam ederken gaz akışlarının yarıya düşürülmesi yapıdaki alaşım oranlarını aynı oranda koruyamadığından bu büyütmeden sonra QCL74 numaralı büyütme ile InGaAs yapısındaki In oranının InP alttaş ile örgü uyumuna yaklaşması için TMIn kaynağı akışı 125 sccm den 107 sccm'e düşürülüp AsH₃ ve TMGa akışları sabit tutulmuştur. Büyütmeye ait yerinde yansıma ve HRXRD ölçümleri sırasıyla Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmektedir.



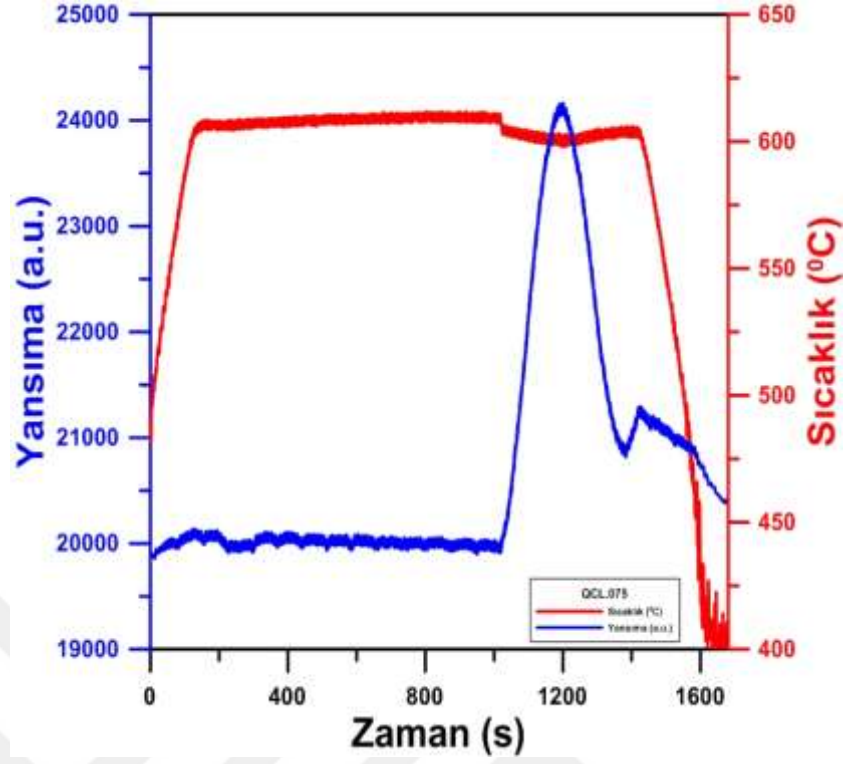
Şekil 4.29 QCL74 numaralı büyütmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.

Yerinde yansıma ölçümünden büyütme esnasında yüzeyde herhangi bir sıkıntı olmadığı, yüzey kalitesinin bozulmadığı gözlenmiştir. Ayrıca düşürülen TMIn akışı için QCL74 numaralı örneğin büyüme oranının 0.71 nm/s'den 0.66 nm/s değerine azaldığı görülmüştür. HRXRD ölçümünde kalınlık piklerinin simetrik ve periyodik bir biçimde ortaya çıkmıştır. QCL74 numaralı büyütmede InGaAs alaşımındaki In oranı yapılan simülasyon sonucunda hemen hemen mükemmel örgü uyumlu olan $x=0.53$ olarak bulunmuştur.

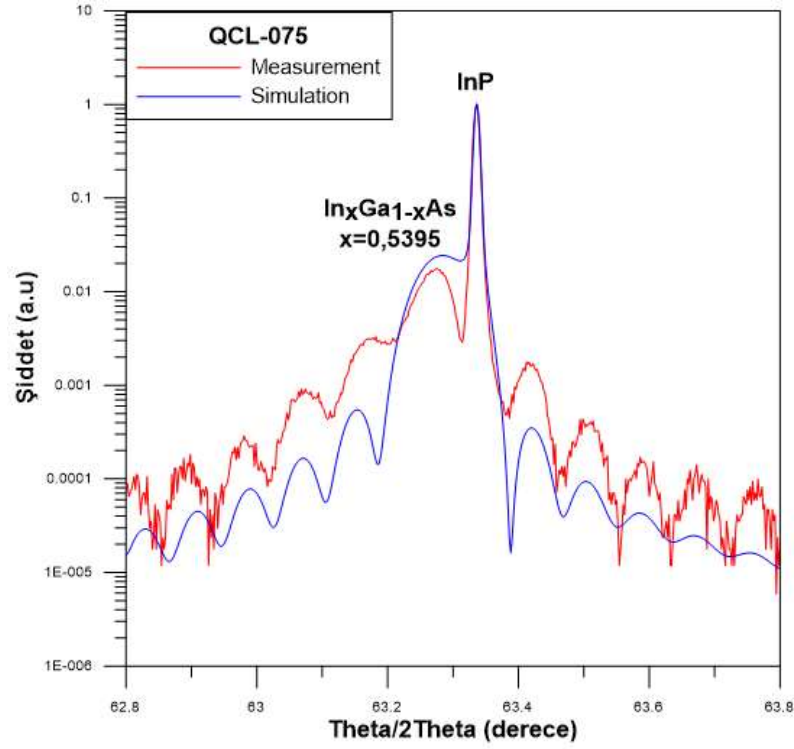


Şekil 4.30 QCL74 numaralı büyütmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).

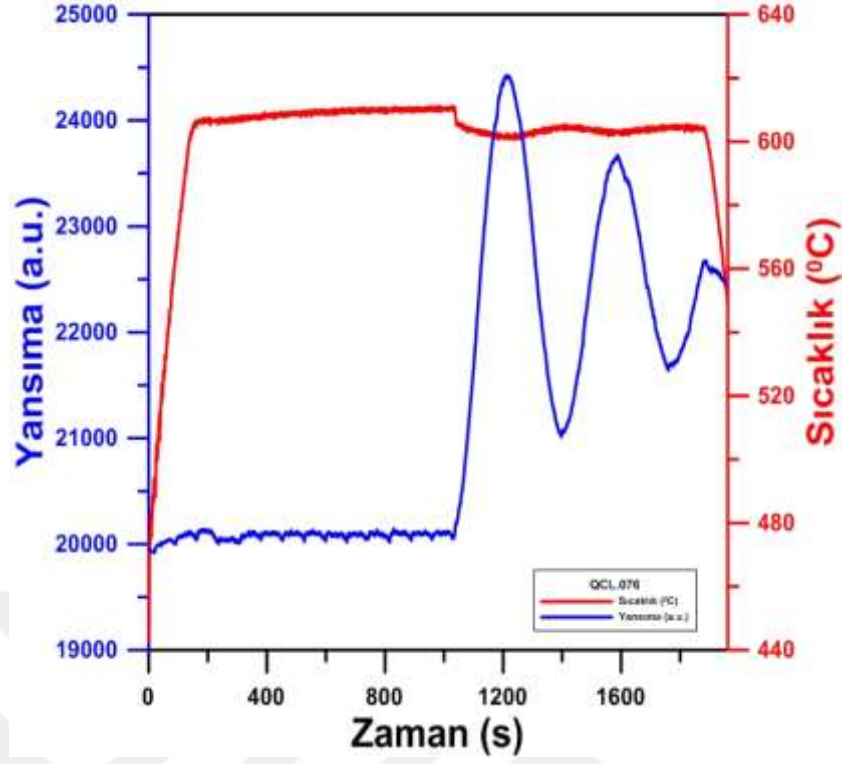
Büyüme oranı düşürülmesi için yapılan 3 adet büyütme ve detaylı analizler ışığında art arda 5 büyütme daha yapılarak hem büyüme oranını düşürüp hem de yapıdaki örgü uyumunu mümkün olduğu kadar korumak amacıyla QCL75-79 numaralı büyütme ve ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.31–Şekil 4.40 arasındaki grafikler bu büyütmelere ait yerinde yansıma ve HRXRD ölçümlerini göstermektedir.



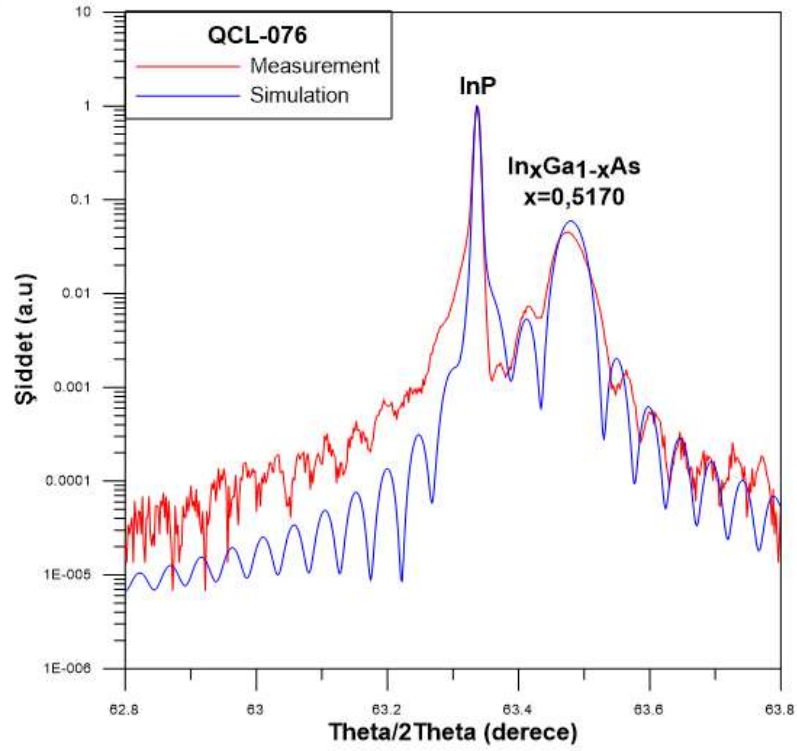
Şekil 4.31 QCL75 numaralı büyötmeye ait yerinde yansima (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.



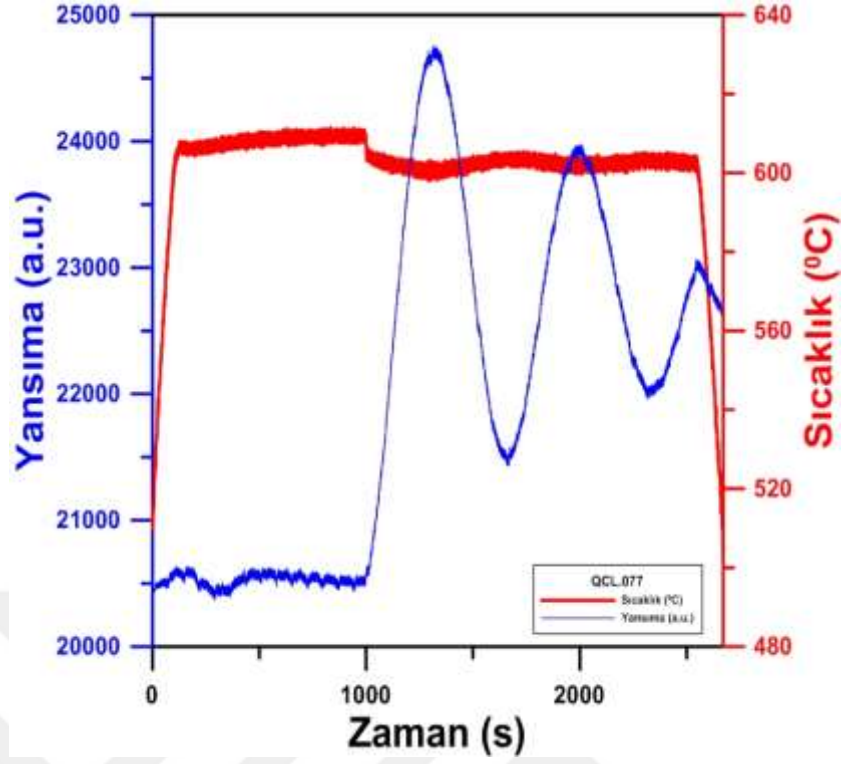
Şekil 4.32 QCL75 numaralı büyötmeye ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiği (mavi).



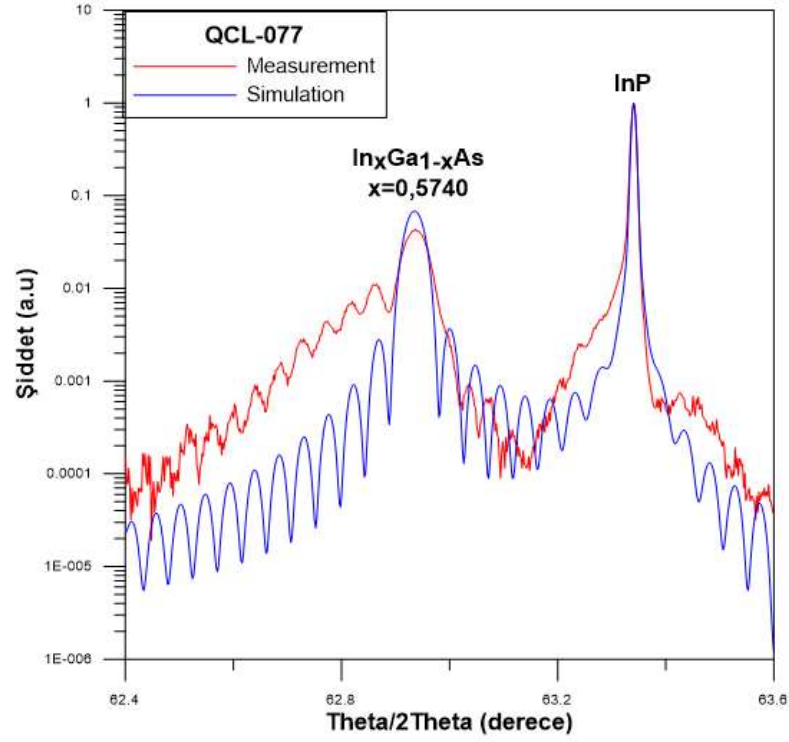
Şekil 4.33 QCL76 numaralı büyütme aletinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.



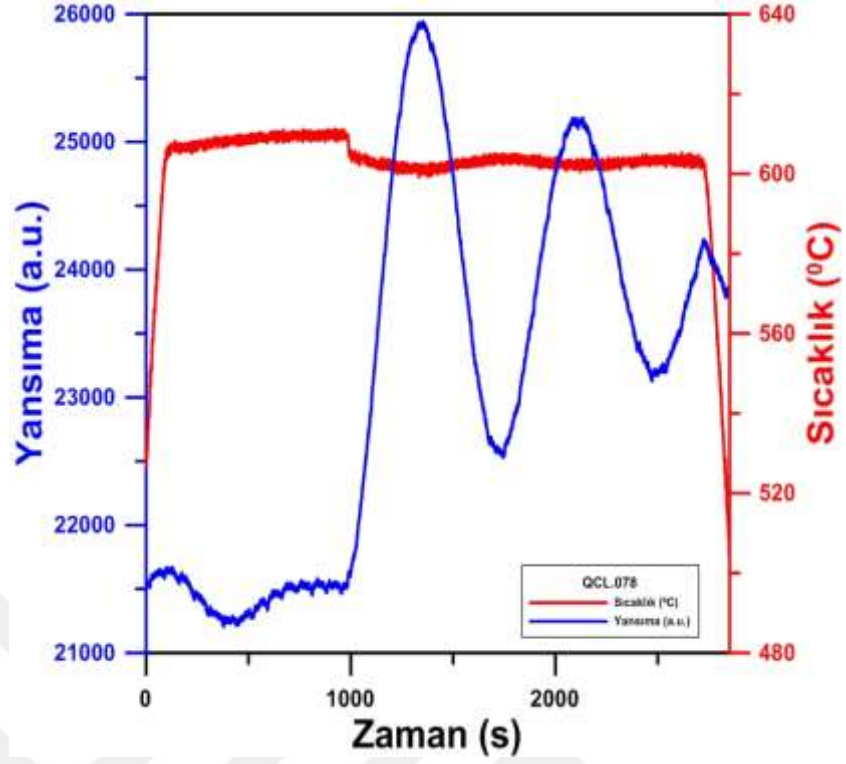
Şekil 4.34 QCL76 numaralı büyütme aletinde XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).



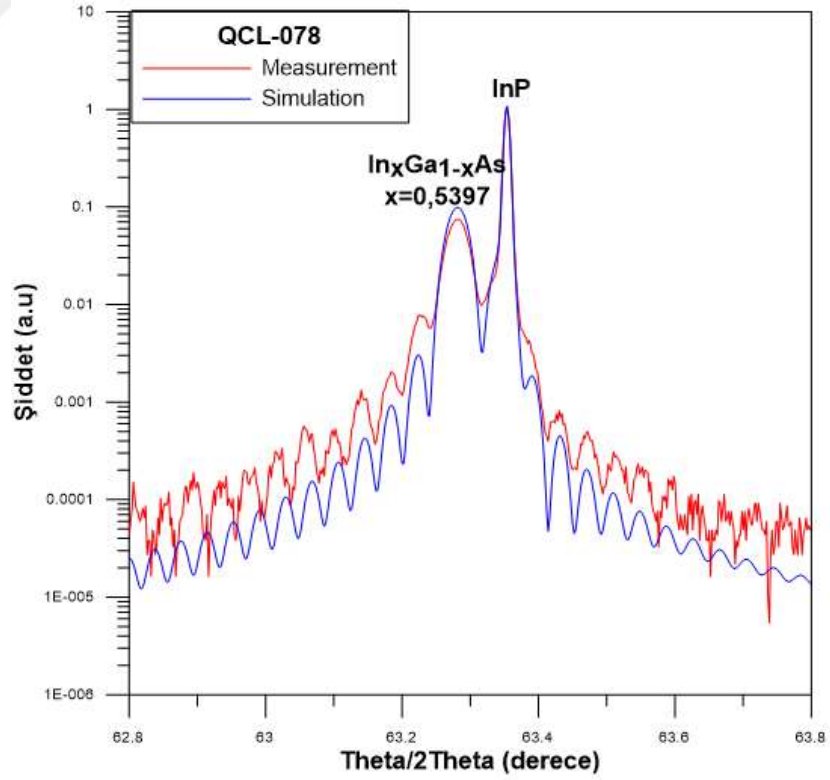
Şekil 4.35 QCL77 numaralı büyütme için yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.



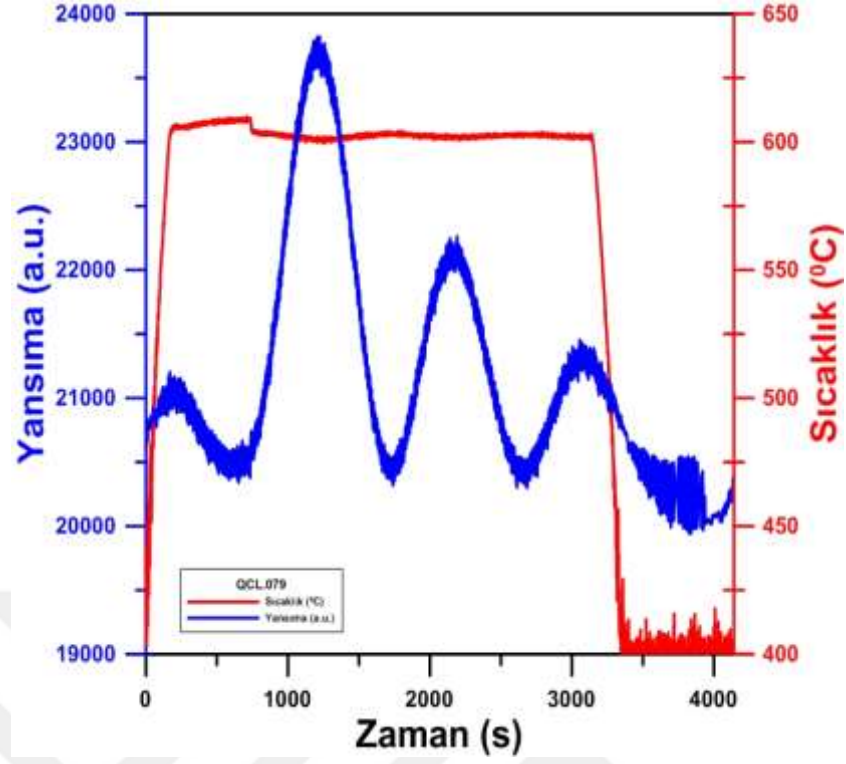
Şekil 4.36 QCL77 numaralı büyütme için HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).



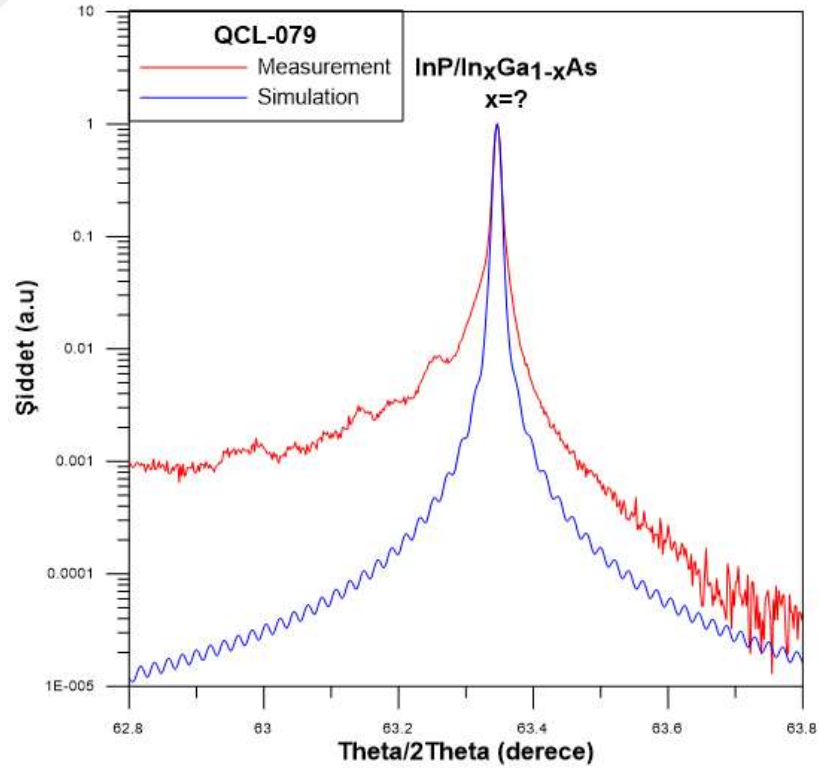
Şekil 4.37 QCL78 numaralı büyütme aletinde yansima (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiği.



Şekil 4.38 QCL78 numaralı büyütme aletinde HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).



Şekil 4.39 QCL79 numaralı büyütmeye ait yerinde yansima (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiği.



Şekil 4.40 QCL79 numaralı büyütmeye ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).

Son olarak büyütülen QCL79 numaralı InGaAs numunesi için TMIn, TMGa ve AsH₃ akışları sırasıyla 18, 1.5 ve 20 sccm şeklindedir. Bu akış oranları ile InGaAs alaşımı için 1.33 nm/s ile başlanılan büyüme oranı ~0.12 nm/s değerine kadar düşürülmüştür. Fakat Şekil 4.39 dikkatli olarak incelenirse büyütme sırasında yansıma osilasyonu aşağı doğru ilerlemiştir ki bu yüzeyde bozulma olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca Şekil 4.40'ya bakılacak olursa yapıda birden fazla In (veya Ga) oranına sahip alaşımlar olduğu görülmektedir. Bu sorunu çözmek için ilerleyen bölümlerde yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Bu aşamada InGaAs alaşımının büyüme oranını düşürmek için yapılan büyütmelemlere ait yerinde yansıma ölçümlerinden elde edilmiş büyüme oranları ve HRXRD taramaları ve simülasyonlarından elde edilen alaşımlardaki indiyum oranları Çizelge 4.5 InGaAs büyüme oranı çalışmasına ait örnekler için yerinde yansıma ölçümlerinden elde edilmiş büyüme oranları ve HRXRD taramaları ve simülasyonlarından elde edilen alaşımlardaki indiyum oranları 'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.5 InGaAs büyüme oranı çalışmasına ait örnekler için yerinde yansıma ölçümlerinden elde edilmiş büyüme oranları ve HRXRD taramaları ve simülasyonlarından elde edilen alaşımlardaki indiyum oranları

Numune Numarası	Büyüme oranı (nm/s)	Indiyum oranı (x)
QCL72	1,33	0,54
QCL73	0,71	0,57
QCL74	0,66	0,53
QCL75	0,33	0,54
QCL76	0,33	0,52
QCL77	0,18	0,57
QCL78	0,16	0,54
QCL79	0,12	~

4.2.1.2. Düşük büyüme oranlı $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ büyütülmesi ve karakterizasyonları

InGaAs tabakasının hem kristal hem de büyütme kalitesi korunarak büyüme oranı 0,1 nm/s'ye kadar düşürüldükten sonra kuantum çağılayan lazer aktif bölge tabaklarında kullanılacak olan diğer alaşım InAlAs için de aynı miktarlarda büyüme oranı elde edilmesi gerekmektedir. Çünkü iki ince tabaka arasında geçiş yaparken sıcaklık, basınç vb gibi kritik büyütme parametrelerini değiştirmek hem büyütme dinamiği açısından hem de tüm kuantum çağılayan lazer yapısı açısından düşünüldüğünde toplam büyütme zamanı bakımından hemen hemen imkansızdır. Ayrıca InAlAs tabakasında da indiyum kullanılacak olması, kullanılan MOCVD sisteminde de yalnızca bir adet TMin kaynağının olmasına bağlı olarak InGaAs tabakası için kullanılan TMin kaynak akışı, bubbler basıncı ve sıcaklığı gibi parametreler tabakalar arasında değiştirilemeyecektir. Bu sebeple InAlAs büyütmesinde elimizde InGaAs 'da olduğu kadar fazla değiştirilebilecek büyütme parametresi bulunmamaktadır ve ilk aşamada sadece TMAI bubbler ile ilgili parametreler gözönüne alınacaktır. Bu yüzden reaktör basıncı, sıcaklığı, TMin parametreleri sabit tutularak ilk aşamada TMAI parametreleri ile büyüme oranını azaltmaya çalışılmıştır.

Her ne kadar büyüme oranına normal büyütme şartları altında etki etmese de malzeme özellikleri bakımından V/III oranı, dolayısıyla AsH_3 akışı çok önemlidir. Yüksek kristal ve optik kaliteli InGaAs bileşiği yapısı gereği yüksek V/III oranı ihtiyacı duyarken InAlAs bileşiği ise düşük V/III oranı ihtiyacı duymaktadır (Y.-Y. Li 2007). Yapıdaki alüminyum atomu galyuma kıyasla düşük mobiliteye sahiptir. Bu yüzden InAlAs büyütmeleri yüksek sıcaklık ile büyütülerek alüminyum atomuna gerekli enerjiyi ve serbestliği sıcaklık ile sağlanabilir. Eğer V/III oranı çok arttırılırsa zaten düşük olan mobilité yeteneği arsenik ile birleşen alüminyum atomu için iyice düşer ve düşük kristal kaliteli bileşik oluşur. Bu yüzden InAlAs bileşiği için düşük V/III oranı gerekmektedir. Bu sebeple MOCVD cihazına yapılan modifikasyonla ikinci bir AsH_3 hattı eklenmiş ve büyütmelerde iki adet AsH_3 hattı ile ayrı ayrı bileşikler için kullanıma olanak sağlanmıştır. InAlAs bileşiği için InGaAs 'dan farklı AsH_3 hattı kullanılarak gerekli optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

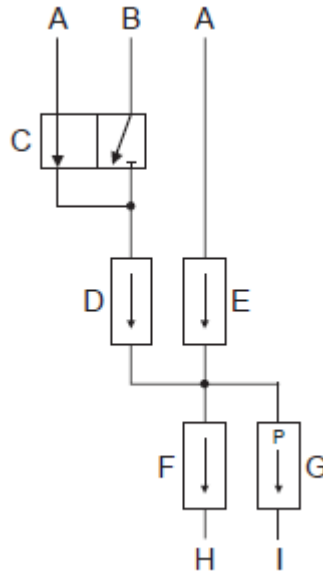
Yapılan ilk çalışma örgü uyumlu InAlAs alaşımı büyütme çalışmasıdır. Bu amaçla dört adet parametrik büyütme yapılmıştır. Bu büyütmelerde değişken parametre ilk

aşamada TMAI akışıdır. Çizelge 4.6' te bu büyütme parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.6 Örgü uyumlu InAlAs büyütme çalışmalarına ait büyütme parametreleri

Numune Numarası	TMI _n akışı (sccm)	TMAI akışı (sccm)	AsH ₃ akışı (s/d/i) (sccm)	Büyüme oranı (nm/s)
QCL86	17,6	12	40/80/60	~
QCL85	17,6	8	40/80/60	0,17
QCL87	17,6	6	40/80/60	0,15
QCL88	17,6	4	40/80/60	~

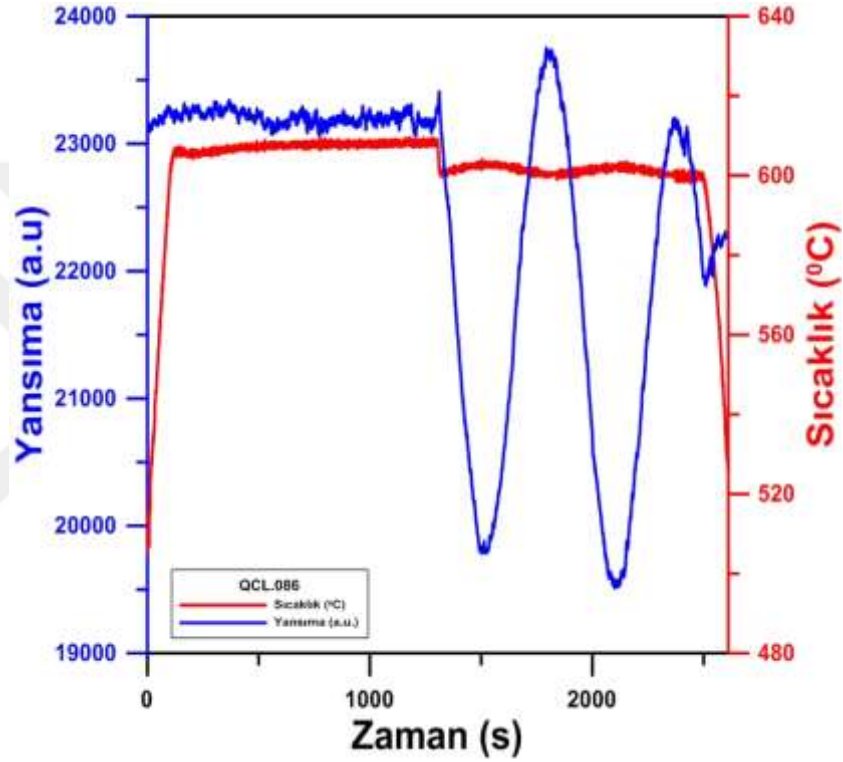
Çizelge 4.6'da gösterilen parametreler içinde AsH₃ akışı altında bir takım parametreler bulunmaktadır. InGaAs tabakasında kullanılan AsH₃ kaynağı MOCVD' de kullanılan geleneksel hidrit akışları için kurulan bir hattır. Yeni kurulan AsH₃ hattı ise InGaAs ve InAlAs alaşımları birbirlerinden farklı V/III oranı karakteristiğine sahip olduğundan tabakalar arası geçişte bu oranı yeniden ayarlamak yerine her ikisi için optimize edilmiş oranları kullanarak büyütme yapmak için kurulmuştur. Bu hatta diğer AsH₃ hattında da bulunan kütle akış kontrolcülerine ek olarak seyreltme (dilute) ve enjeksiyon (inject) kütle akış kontrolcülerine ek olarak bulunmaktadır. Bu hatta ait şematik gösterim Şekil 4.41'de gösterilmektedir;



Şekil 4.41 InAlAs büyütmelerinde kullanılan AsH₃ hattının şematik gösterimi.

Burada A hidrojen veya azot kaynağını, B AsH₃ gazı kaynağını, C 3/2-yol valfi, D reaktöre gönderilecek gazın miktarını ayarlamaya yarayan kaynak kütle akış kontrolcüsünü, E seyreltme gazı kütle akış kontrolcüsünü, F enjeksiyon kütle akış kontrolcüsünü, G basınç kontrolcüsünü, H AsH₃ gazı reaktör/egzoz hattını ve I ise AsH₃ gazı egzoz hattını göstermektedir.

QCL86 numaralı büyütme aletinde yansıma ve optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’de gösterilmektedir.



Şekil 4.42 QCL86 numaralı büyütme aletinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.

Bu ölçümde daha önceki bölümlerde açıklamaları yapılan InGaAs bileşiğinden farklı olarak göze çarpan ilk değişim yansıma ölçümünün davranışındır. Daha önce InGaAs büyütmesine başlarken yukarı doğru yönelen salınım bu büyütmede aşağı yönlü olarak başlamıştır. Bu davranışın temel sebebi kırılma indisi farkından kaynaklanmakta olup ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

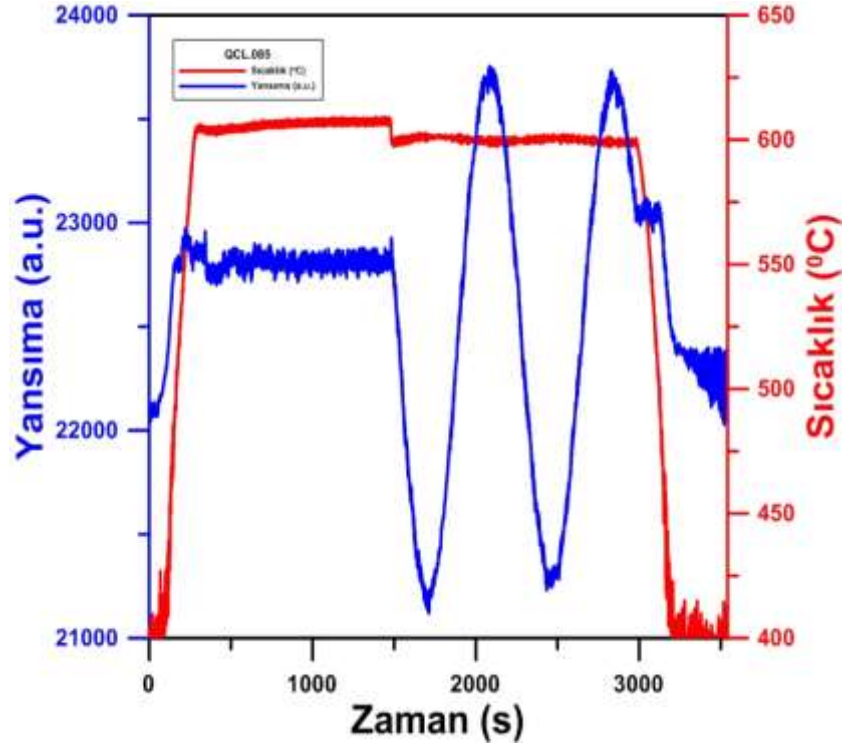
Şekil 4.42 incelendiğinde Büyütme anında yansıma ölçümünden ikinci osilasyonun şiddetinin ilk osilasyondan daha düşük olması sebebiyle yüzeyde bir sıkıntı olduğu anlaşılmaktadır. Büyütmeden sonra optik mikroskop ile elde edilen

görüntüsü de (Şekil 4.43) bu sorunu doğrulamaktadır. Beklenildiği üzere bu büyütme şartlarında büyütme ortamındaki TMAI (alüminyum kaynağı) fazla geldiğinden yüksek örgü uyumsuzluğu ortaya çıkmıştır ve yapıda kırılmalar meydana gelmiştir.



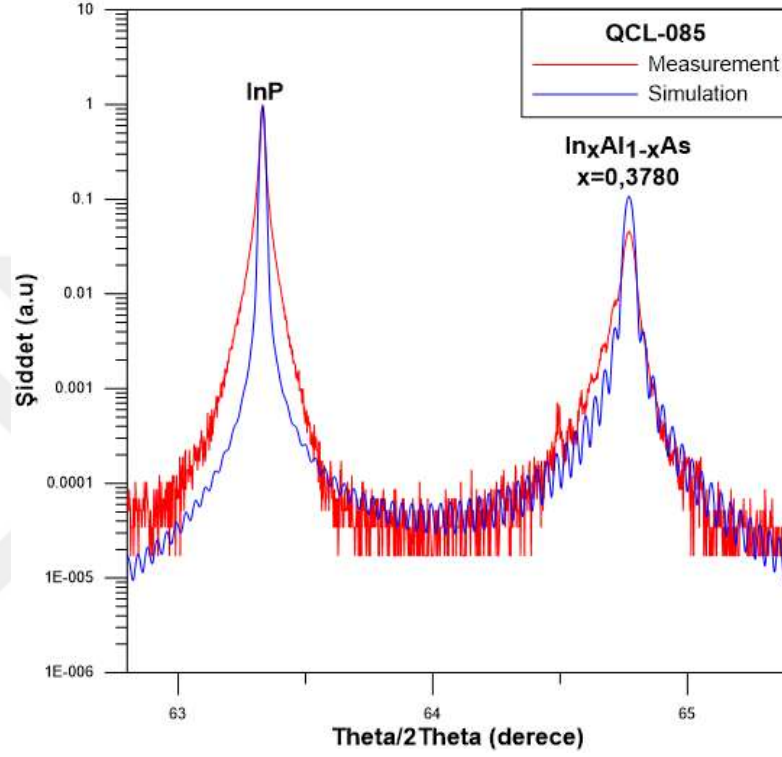
Şekil 4.43 QCL86 numaralı büyütmeye ait 200x büyütmeli optik mikroskop görüntüsü.

QCL85 numaralı büyütmede TMAI akışı 12sccm'den 8 sccm'e düşürülmüştür. Bu büyütmeye ait yerinde yansıma ölçümü ve HRXRD taraması sırasıyla Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'de gösterilmiştir.



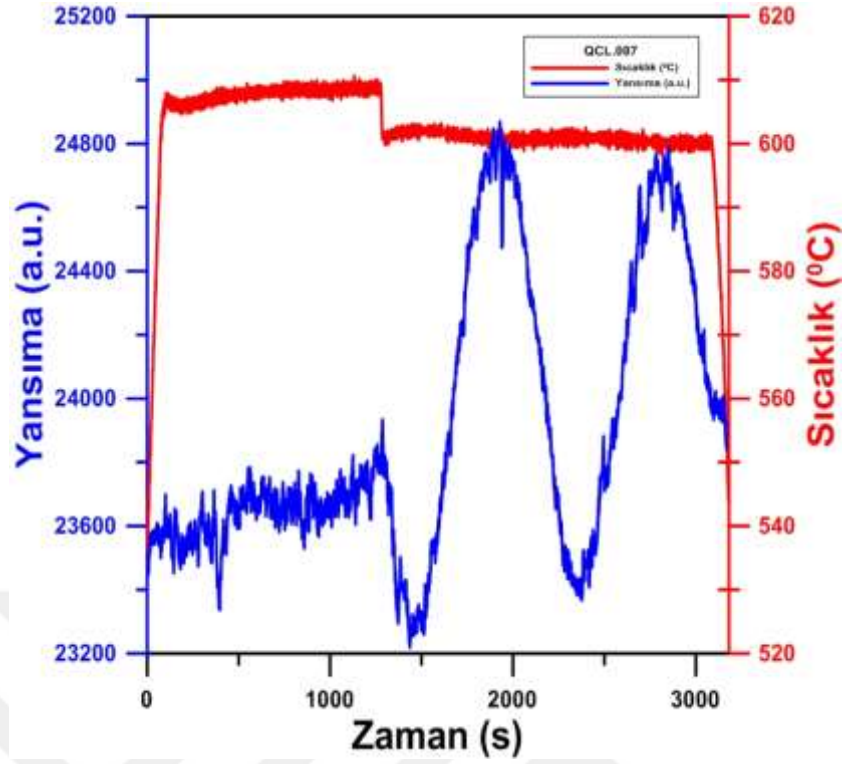
Şekil 4.44 QCL85 numaralı büyütmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiği.

Şekil 4.39'dan görüleceği üzere ikinci osilasyonun alt noktası birinci osilasyondan yüksekte kalmıştır ve büyütmede herhangi ciddi bir sorun görülmemiştir. QCL86 numaralı örneğin HRXRD ölçümüne bakıldığında alaşımdaki indiyum oranının simülasyon yardımıyla $x=0.38$ olarak hesaplandığı görülmektedir. Yapıdaki yüksek örgü uyumsuzluğu sebebiyle pik genişlikleri InGaAs bileşiklerine kıyasla biraz daha fazladır.

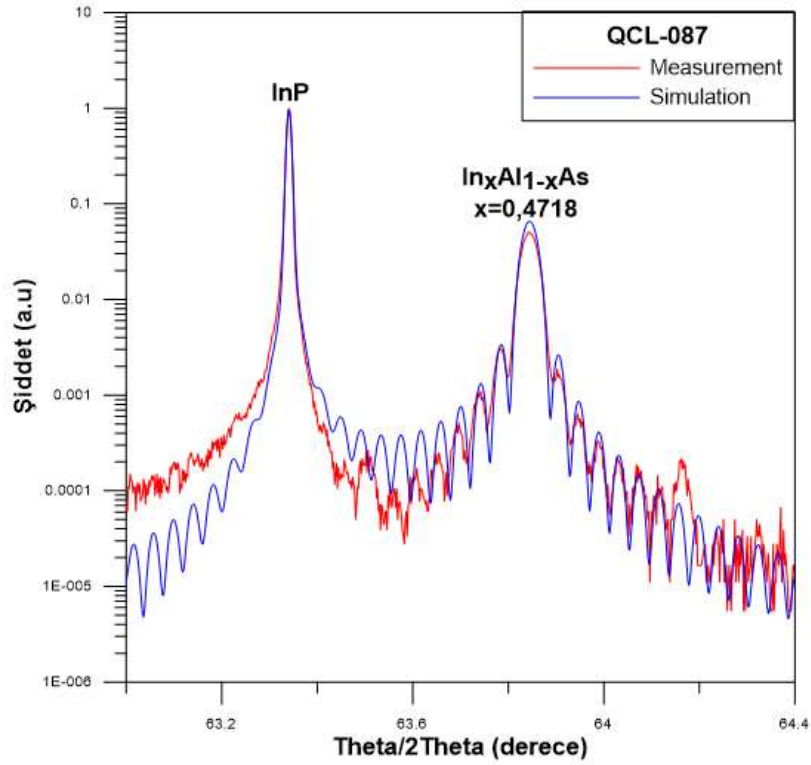


Şekil 4.45 QCL85 numaralı büyütmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).

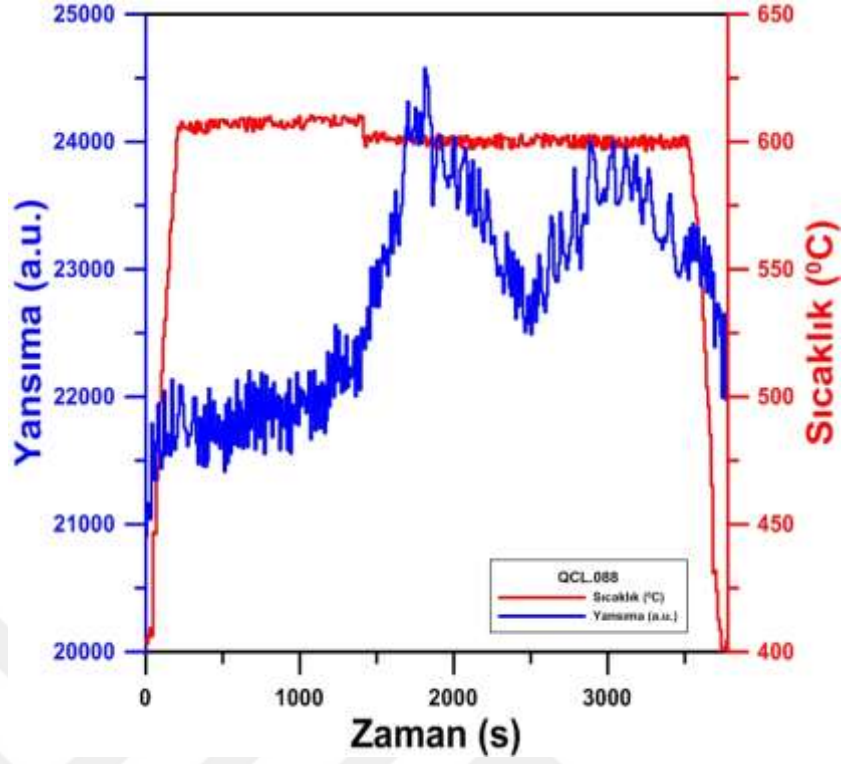
Yüksek örgü uyumsuzluğunu gidermek amacıyla QCL87 ve QCL88 numaralı büyütmeler ile TMAI akışı sırasıyla 6 sccm ve 4 sccm değerlerine düşürülerek 2 adet büyütme yapılmıştır. Yapılan büyütmelere ait yerinde yansıma ve XRD ölçümleri Şekil 4.46 ve Şekil 4.49 aralığında gösterilmektedir.



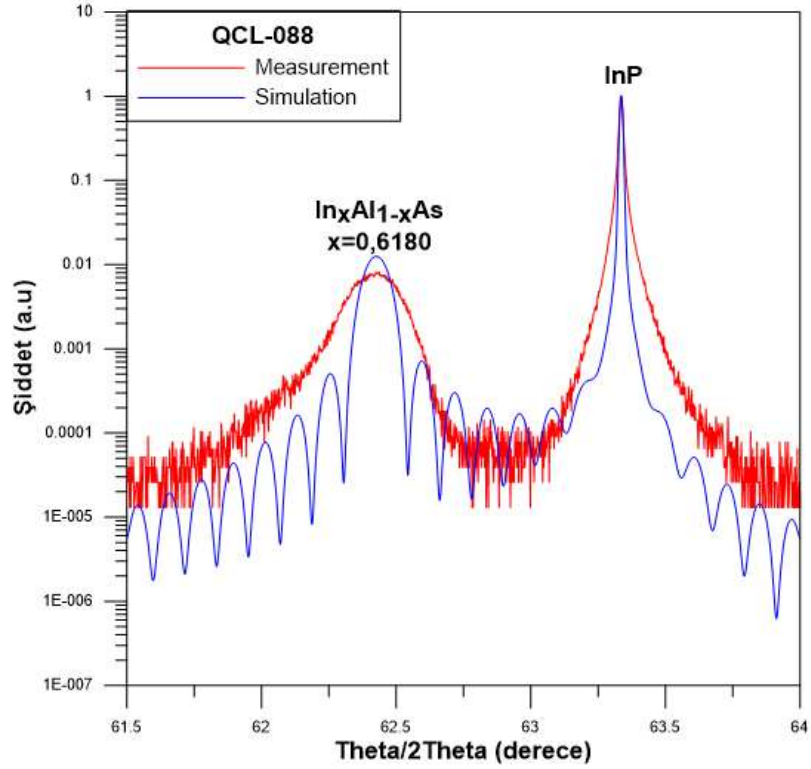
Şekil 4.46 QCL87 numaralı büyötmeye ait yerinde yansima (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.



Şekil 4.47 QCL87 numaralı büyötmeye ait XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simölasyon grafiği (mavi).



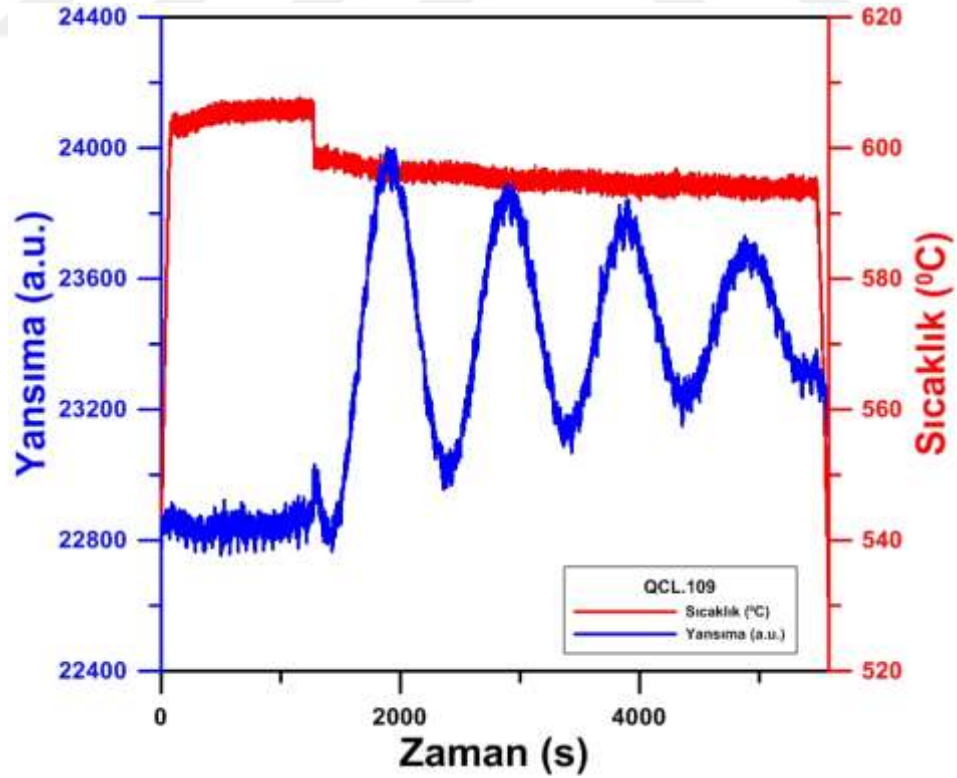
Şekil 4.48 QCL88 numaralı büyütme aletinde yansima (mavi) ve sıcaklık (yeşil) grafiği.



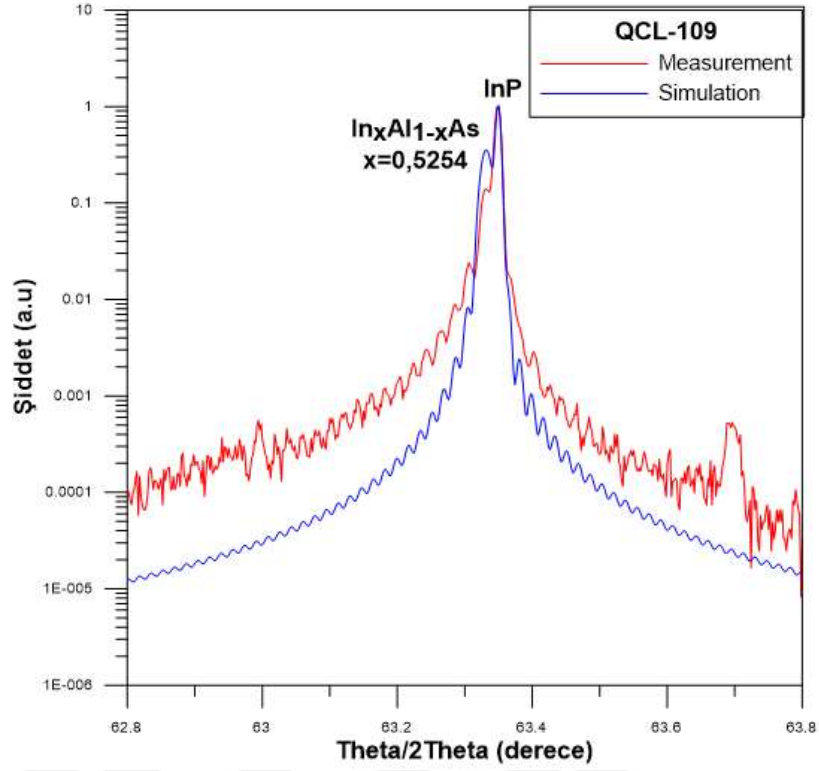
Şekil 4.49 QCL88 numaralı büyütme aletinde XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).

TMAI akışına göre InAlAs alaşımındaki In (veya Al) oranlarının değişimi kabaca elde edildikten sonra büyüme oranı genel olarak ~ 0.13 nm/s civarındadır. Daha önce de açıklandığı üzere hem büyüme oranını düşürmek hem de örgü uyumlu bir alaşım elde etmek için elimizde sadece TMAI bubbler ile ilgili kaynak akışı, bubbler sıcaklığı ve bubbler basıncı parametreleri bulunmaktadır. Kaynak akışı büyüme oranını düşürmek için zaten limit seviyelerinde kullanılmaktadır. Ayrıca kaynak akışındaki çok küçük değişimler InAlAs alaşımındaki alüminyum oranını kütle akış kontrolü limitlerde çalıştığı için aynı hassasiyette değiştirmemektedir.

Bubbler sıcaklığı değişimi reaktöre gönderilen TMAI akışını ciddi oranla değiştirebilmekle birlikte CÜNAM bünyesinde yürütülmekte olan diğer projeler düşünüldüğünde bu seçim bubbler stabilizasyonu için ciddi problemler yaratacağından tercih edilmemiştir. Kullanılacak en güvenli parametre olarak bubbler basıncı seçilerek InAlAs alaşımı hemen hemen örgü uyumlu hale getirilmek için birçok büyütme ve karakterizasyon yapılmıştır. Bu amaçla yapılan büyütme örnek olması açısından QCL109 numaralı büyütme için yerinde yansıma ve HRXRD ölçümleri sırasıyla Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de gösterilmektedir.



Şekil 4.50 QCL109 numaralı büyütme için yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.



Şekil 4.51 QCL109 numaralı büyütme için XRD taraması (kırmızı) ve bu taramaya ait simülasyon grafiği (mavi).

Bu bölümde genel olarak MOCVD standartlarındaki büyütme oranlarının çok altına inerek hem InAlAs hem de InGaAs alaşımları için hem düşük büyüme oranına sahip hem de altaş ile örgü uyumlu yapılar büyütülüp karakterize edilmiştir. Büyütmeler ve detaylı karakterizasyonlar incelendiğinde büyüme oranları her iki malzeme için ~0.1 nm/s civarında elde edilmiştir. MOCVD ile elde edilen bu büyüme oranı literatür ile kıyaslandığında neredeyse limit sayılabilecek değerler arasındadır. Her ne kadar büyüme oranı çok küçük değerlere düşürülmüş olsa da kuantum çağılayan lazer yapılarında büyütülen film kalınlıkları çok ince olduğundan büyüme oranlarının yüksek hassasiyetle tespiti için ilerleyen bölümlerde HRXRD tekniği yardımıyla yeniden hesaplanmaya çalışılacaktır.

4.2.2. V/III oranının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tek tabakasına etkisi

V/III oranının InGaAs tabakalarına ve bir sonraki bölümde InAlAs tabakalarına etkisini araştırmadan önce kısaca V/III oranının ne olduğunu açıklayacak olursak; reaktöre gönderilen V grubu kaynakların III grubu kaynaklara molar olarak oranı şeklinde tanımlanır. Kısaca Denklem [4.2] ile formüle edilecek olursa;

$$V/III = r_V/r_{III}$$

$$r_V = \text{sccm birimindeki akış} * 1/22400 \quad [4.2]$$

$$r_{III} = [P/P_0 * \text{taşıyıcı gaz akışı (sccm)}]/22400$$

$$\log[P]_{Torr} = A - B/T$$

burada r_V ve r_{III} sırayla V grubu ve III grubu kaynakların molar akışlarını, P ve P_0 metalorganik kaynakların verilen herhangi bir T ve T_0 sıcaklığındaki buhar basınçlarını göstermektedir. A ve B ise her bir metalorganik kaynağa ait sabitlerdir. Bu sabitler her ne kadar metalorganik kaynaklara ait olsa da üretici firmalar arasında da çok küçük farklılık gösterdiklerinden kaynak değişimlerinden sonra akış hesaplamalarında göz önüne alınmalıdır. Büyütmelerde genellikle V/III oranı 3 farklı yolla değiştirilebilir;

- V grubu akışını değiştirmeden sadece III grubu kaynak (veya kaynakların) akışlarının değiştirilmesi,
- III grubu akışını değiştirmeden sadece V grubu kaynak (veya kaynakların) akışlarının değiştirilmesi,
- Her iki kaynak grubu akışlarının birlikte farklı oranlarla değiştirilmesi,

Sistematik yapılan çalışmalarda V/III oranının ilk 2 teknikten birisiyle değiştirilmesi çıkan sonuçların yorumlanması bakımından her zaman daha sağlıklıdır.

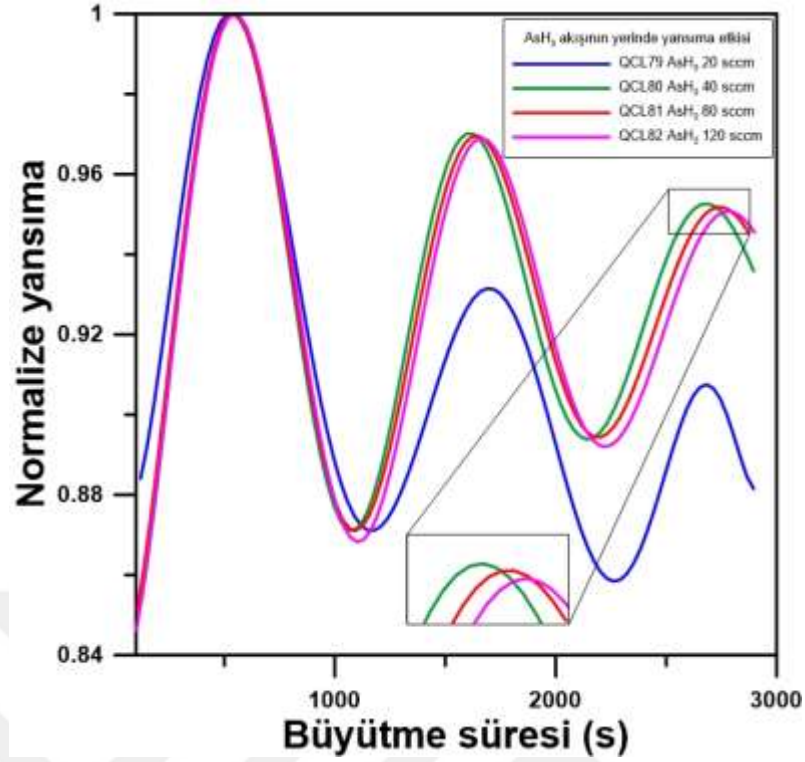
Önceki bölümlerde açıklandığı üzere InGaAs bileşiği InAlAs bileşiğine göre daha yüksek V/III oranı ile daha kaliteli olarak büyütülebilmektedir. Bu kapsamda birçok büyütmeye yapılmış olup tez çalışması kapsamında sadece genel davranışı açıklayan sistematik büyütmeler ile ilgili olan büyütmeler ve karakterizasyon sonuçları konulmuştur. Daha önce belirtildiği üzere epitaksiyel büyütmelerde kristal kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden birisi olan V/III oranının InGaAs tabakalarına etkisini araştırmak amacıyla gerekli literatür taraması yapıldıktan sonra yapılan birçok büyütmeden 4 adet büyütmeye (QCL79-82) seçilerek gerekli açıklamalar yapılmıştır. Bu

kapsamda yapılan büyütmelerde kullanılan büyütme parametreleri Çizelge 4.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 SI-InP alttaş üzerine büyütülen katkısız InGaAs tabakalarına V/III oranı etkisinin araştırılması için yapılan büyütmelere ait parametreler

Numune Numarası	TMIIn akışı (sccm)	TMGa akışı (sccm)	AsH ₃ akışı (sccm)
QCL79	17.6	1,5	20
QCL80	17.6	1,5	40
QCL81	17.6	1,5	80
QCL82	17.6	1,5	120

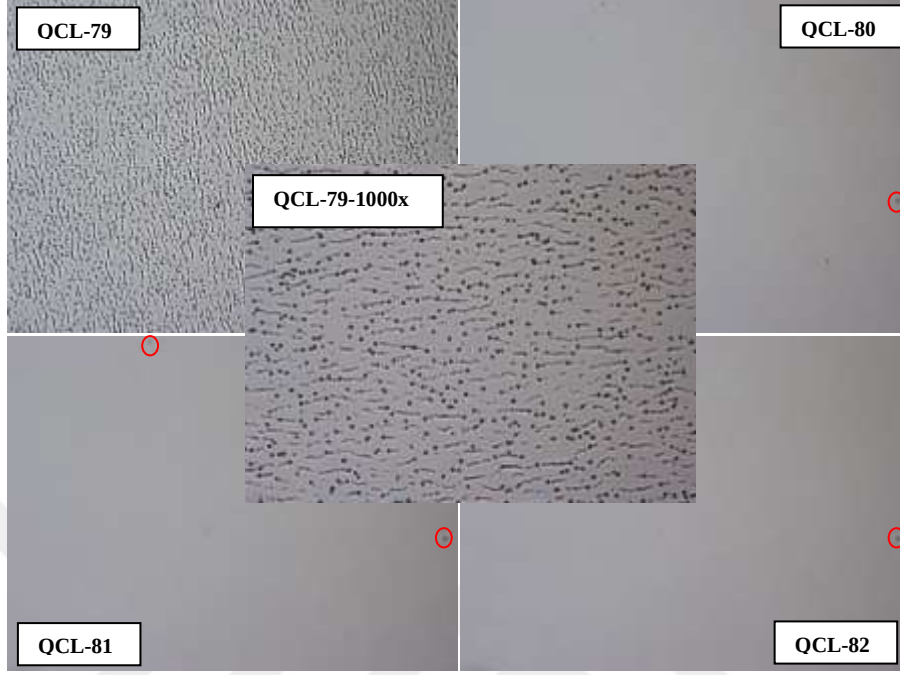
Çizelge 4.7 incelendiğinde yapılan büyütmelerde InGaAs alaşımına V/III oranı değişiminin incelenmesinde değişen tek parametrenin sabit III grubu gaz akışı altında AsH₃ akışı olduğu görülmektedir. Diğer tüm kaynak akışları ve büyütme parametreleri sabit tutulmuştur. Büyütme süresince AsH₃ akışının büyüyen yüzeyin durumuna etkisini incelemek amacıyla ilk olarak yerinde yansıma ölçümleri incelenmiştir. QCL79-82 numaralı InGaAs büyütmelerine ait normalize edilmiş yerinde yansıma ölçüm sonuçları Şekil 4.52’de verilmiştir. 20 sccm AsH₃ akışına sahip QCL79 numaralı örneğin yerinde yansıma ölçümünde (mavi) osilasyonun genel itibarı ile aşağı yönlü ilerlediği görülmektedir ki bu davranış büyütme süresince örnek yüzeyinde bozulma olduğu anlamına gelmektedir. QCL80-82 numaralı büyütmelerde artan AsH₃ akışı için yüzeyde herhangi bir bozulma gözlenmemektedir. Her ne kadar tüm büyütmelerde osilasyonun maksimum noktası aynı noktada duruyor olsa da büyütmenin ilerleyen aşamalarında osilasyonlar arasındaki mesafenin açılması artan AsH₃ akışının, InGaAs alaşımının büyüme oranını azalttığını göstermektedir. Artan AsH₃ akışının büyüme oranına etkisi Şekil 4.52 içinde gösterilen bölgeden daha net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.52 QCL79 (mavi), QCL80 (yeşil), QCL81 (kırmızı) ve QCL82 (pembe) numaralı InGaAs büyütme sürelerine ait AsH_3 akışı değişiminin yerinde yansıma ölçümlerine etkisi.

Yerinde yansıma ölçümünden yüzey hakkında elde edilen bilgiyi büyütme sonrasında da doğrulayabilmek için reaktörden çıkarılan QCL79-82 numaralı InGaAs numuneleri optik mikroskop altında incelenmiştir. Şekil 4.53 bu örneklerin optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.53’de açıkça görüleceği üzere 20 sccm AsH_3 akışına sahip QCL79 numaralı örneğin yüzeyi diğerlerine kıyasla oldukça pürüzlüdür ki bu davranış yerinde yansıma ölçümlerini doğrulamaktadır. Örnekler için 500x büyütme mikroskop görüntülerinin ortasında QCL79 numaralı örneğin 1000x büyütme mikroskop görüntüsü bulunmaktadır. Bu görüntünün sebebinin büyüyen InGaAs yüzeyinde AsH_3 yetersizliğinden kaynaklı metal topluluklarının oluşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Her ne kadar 20 sccm AsH_3 akış değeri ve metalorganik akışları literatür ile uyumlu V/III oranı vermiş olsa da çok düşük büyüme oranları ile büyütme yapılmış olunmasından kaynaklı olarak yüzeyde yeterli miktarda As atomu bulunmaması veya yüzeyden As atomlarının kaçışlarının engellenememesi gibi nedenlerden dolayı yüzeyde böyle bir sorunla karşılaşıldığı

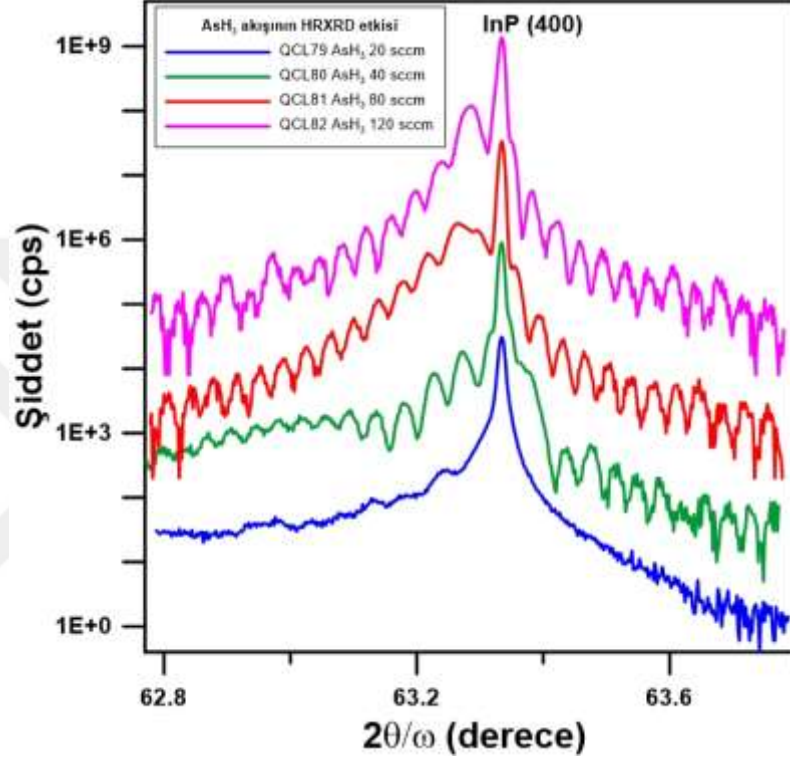
düşünülmektedir. Fakat artan AsH_3 akışı ile iyileşen QCL80-82 numunelerinin yüzeyleri arasında herhangi bir fark gözlenmemektedir.



Şekil 4.53 QCL79-80 numaralı numunelerin 500x büyütme (QCL79 için 1000x ayrıca koyulmuştur) optik mikroskop görüntüleri. Görüntülerdeki kırmızı çemberler mikroskop kaynaklı kusurları göstermektedir.

Yerinde yansıma ve optik mikroskop analizlerinden sonra artan AsH_3 akışının kristal kalitesine etkisini araştırmak amacıyla QCL79-82 numaralı örneklerin $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları yapılmıştır. Örnekler için tüm taramalar Şekil 4.54’de gösterilmektedir. QCL79-82 numaralı InGaAs örneklerine ait HRXRD taramaları incelendiğinde 20 sccm AsH_3 akışı için taramada bir asimetrik davranış mevcuttur. Bu davranış InGaAs örgü parametresinde düzgünlük (uniformity) olmadığından yapıda gerilme meydana gelmesinin bir sonucu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca tek bir In alaşımı yerine birden çok In alaşımına sahip bir davranış çizmekle birlikte yapıya ait kalınlık osilasyonları net bir şekilde görülmemektedir. AsH_3 akışı QCL80 numaralı örnekte 40 sccm değerine artırıldığında kalınlık osilasyonları net bir şekilde ortaya çıkmaya başlamakla birlikte taramadaki asimetrik davranış azalmıştır. Bu seviyeden sonra artan AsH_3 akışı InGaAs alaşımındaki In oranını arttırmaya veya Ga oranını azaltmaya başlamakla birlikte artık asimetrik davranışı tamamen ortadan kaldırmıştır. HRXRD taramalarından genel itibarı ile çıkarılacak sonuçlardan birisi de artan AsH_3 akışının InGaAs alaşımındaki

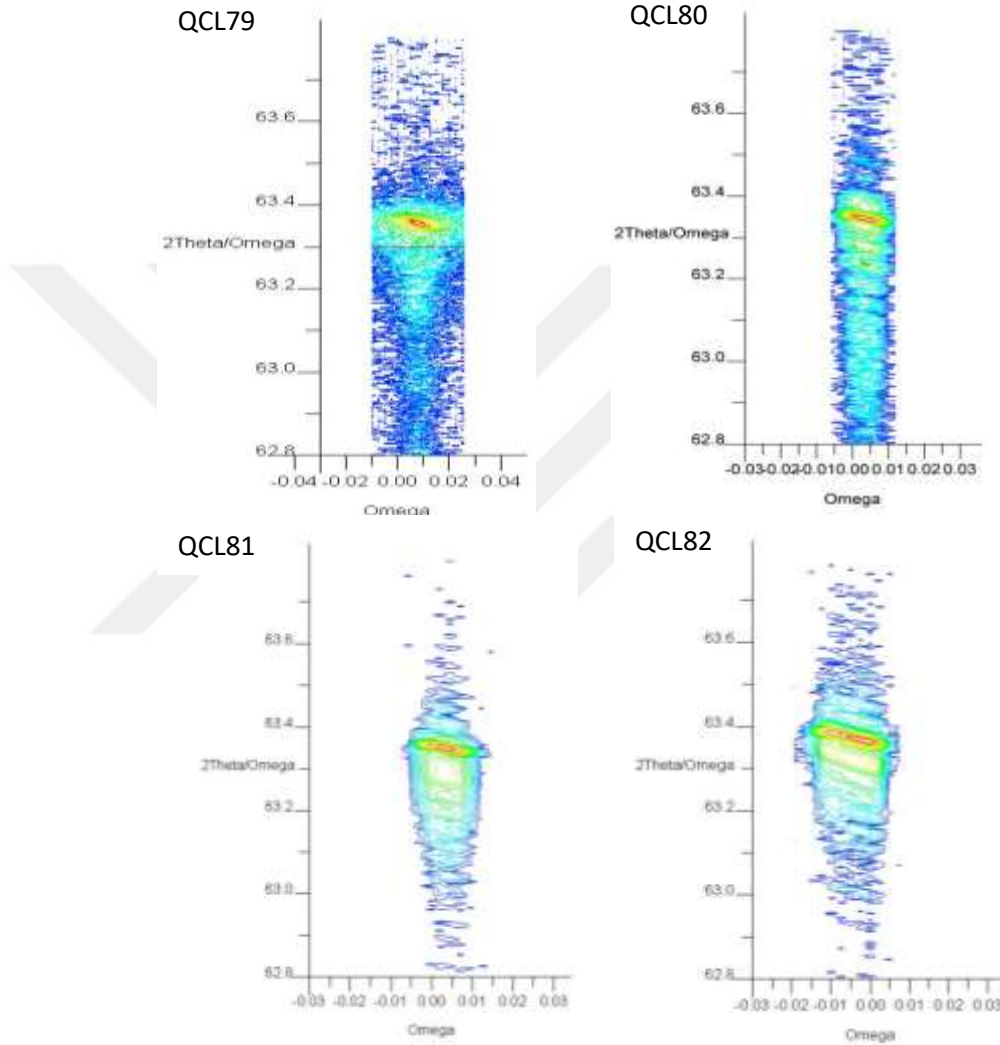
In oranını (veya InAs oranını) arttırmasıdır. In atomları As atomları ile yüzeyde bağ yapmaya daha çok meyillidir. Bunun sebebi de In-As ile Ga-As bağ güçleri karşılaştırıldığında In-As daha zayıf bağ yapısına sahip olması ve Ga-As'ın görece daha stabil bir yapıya sahip olmasıdır (Luo 2007). Dolayısıyla büyüme ortamındaki AsH₃ miktarı arttığında In atomu için ortamda bağ yapacak daha çok sayıda As atomu bulunduğundan yapıdaki InAs oranı artmaktadır.



Şekil 4.54 Artan AsH₃ akışının (V/III oranı) InGaAs alaşımına ait HRXRD taramalarına etkisi.

Yapılan RSM (reciprocal space mapping-ters uzay haritalama) taramalarından yukarıda bahsedilen asimetrik davranış, kalınlık osilasyonları vb. detaylar da 3 boyutlu olarak açıkça ortaya çıkmaktadır. Ayrıca InP alttaş piki, kalınlık osilasyon pikleri ve InGaAs tabakalarına ait piklerin tamamı aynı omega (ω) açısı değerinde ortaya çıkmaktadır. Bu davranış aralarında herhangi bir açı farkı (tilt) olmadığına bir göstergesidir. HRXRD taramalarına ek olarak sadece InGaAs tabakaları ve InP alttaşın büyüme doğrultusuna paralel yönelimlerinin arasında herhangi bir fark olup olmadığını anlamak ve kristal düzlemlerinde olağan dışı bir davranışı ortaya çıkarmak için ters uzay haritalama taramaları yapılmıştır. Yapılan RSM taramaları Şekil 4.55'de gösterilmektedir. Bu taramalarda QCL79 numaralı örnek için herhangi bir kalınlık

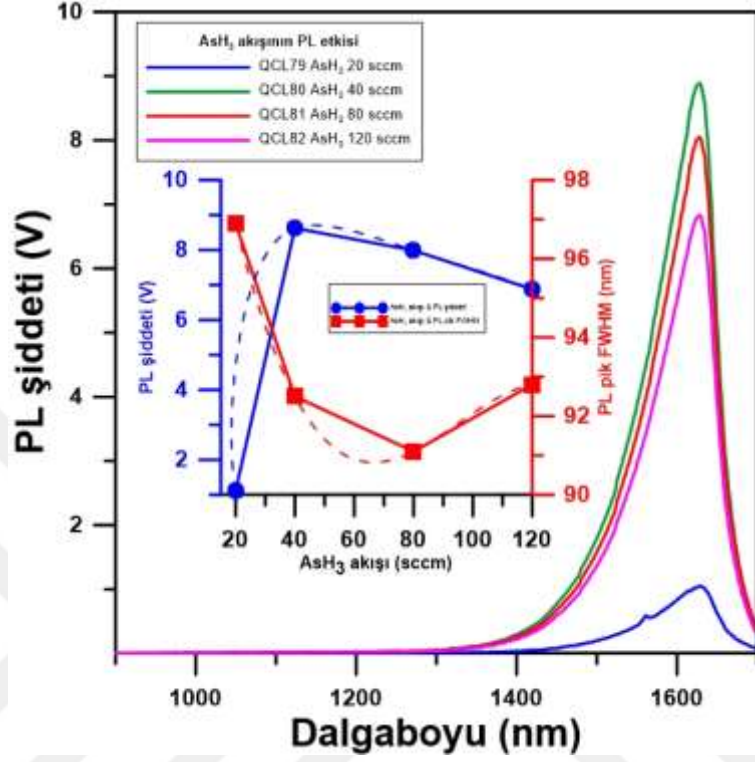
osilasyonu ortaya çıkmamaktadır. Diğer numuneler (QCL80-82) için elde edilen RSM taramalarında tüm kalınlık pikleri açıkça ortaya çıkmıştır. Örneklerin hiç birinde alttaş ile büyütülen tabakaların büyütme doğrultusuna paralel yönelimlerinin arasında herhangi bir fark görülmemiştir.



Şekil 4.55 Artan AsH_3 akışının (V/III oranı) InGaAs alaşımına ait RSM taramalarına etkisi.

Yapısal karakterizasyonun ardından artan AsH_3 akışının InGaAs tabakalarının optik kalitesine etkisini araştırmak amacıyla oda sıcaklığında fotoluminesans ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.56 QCL79-82 numunelerine ait 900-1700 nm aralığındaki oda sıcaklığı fotoluminesans ölçümlerini göstermektedir. Ayrıca şekil içindeki küçük

grafik ise bu taramalardan elde edilen fotolüminesans şiddetlerinin sayısal değerlerinin (mavi) ve taramalara ait FWHM değerlerinin (kırmızı) artan AsH_3 akışına göre değişimini göstermektedir.

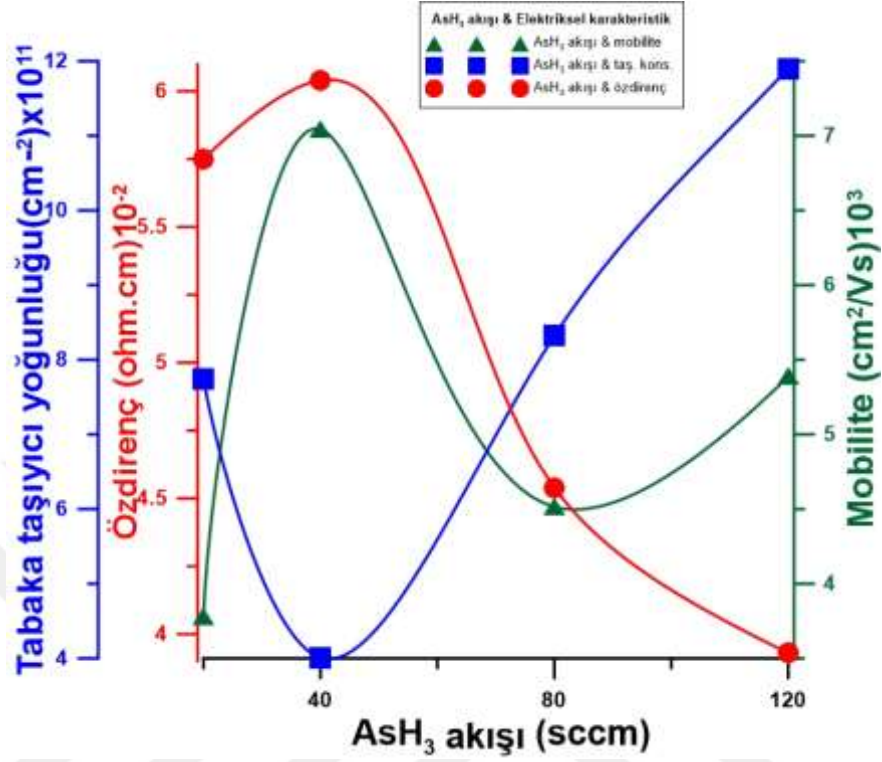


Şekil 4.56 Artan AsH_3 akışının (V/III oranı) QCL79-82 numaralı InGaAs tabakalarının fotolüminesans karakteristiklerine etkisi. Şekil içindeki grafik elde edilen ışımaya piklerinin şiddetinin (mavi) ve pik FWHM değerlerinin (kırmızı) AsH_3 akışına göre değişimini göstermektedir.

Fotolüminesans ölçümlerinden açıkça görüleceği üzere düşük AsH_3 akışı için (20 sccm-QCL79) InGaAs band kenarına ait en düşük şiddetli (~1V) pik ortaya çıkmaktadır. AsH_3 akışı 40 sccm'e arttırıldığında pik şiddeti en yüksek seviyeye (~9V) çıkmaktadır. Bu seviyeden sonra artan AsH_3 akışı InGaAs band kenarı ışımaya pik şiddetini düşürmeye başlamaktadır. Şekil içindeki grafik incelendiğinde her ne kadar en düşük FWHM değeri 80 sccm AsH_3 akışına sahip QCL81 numaralı numuneye ait olsa da 40, 80 ve 120 sccm AsH_3 akışları için FWHM değerleri (91-93 arcsec) birbirleriyle hemen hemen aynıdır.

InGaAs tabakalarının değişen AsH_3 akışına göre elektriksel karakteristikleri hem ECV hem de Hall etkisi ölçümleri ile yapılmıştır. Şekil 4.57 artan AsH_3 akışına göre InGaAs

tabakasının özdirenç (kırmızı), mobilite (yeşil) ve tabaka taşıyıcı yoğunluğunun (mavi) değişimini göstermektedir.



Şekil 4.57 Artan AsH₃ akışının (V/III oranı) QCL79-82 numaralı InGaAs tabakalarının tabaka taşıyıcı yoğunluğuna (mavi), özdirenç (kırmızı) ve mobilite (yeşil) değişimine etkisi.

InGaAs tabakalarının elektriksel karakteristikleri Şekil 4.57 vasıtasıyla incelendiğinde 20 sccm AsH₃ akışı (QCL79) diğer tüm karakterizasyon tekniklerinde olduğu gibi elektriksel olarak da iyi sonuçlar ortaya çıkarmamıştır. Mobilite değeri ~3700 cm²/Vs civarındadır ki bu değer tipik InGaAs mobilite değerleri için oldukça düşüktür. AsH₃ akışı 40 sccm değerine arttırıldığında (QCL80) mobilite değeri (~7000 cm²/Vs) 2 katına çıkmıştır. Bu değer bu büyütme serisinde elde edilen en yüksek mobilite değeridir ayrıca taşıyıcı yoğunluğu düşmüş ve özdirenç değeri de artmıştır. Daha sonra artan AsH₃ akışı mobiliteyi (~4500 cm²/Vs) ve özdirenci (4.5E-2 ohm.cm) ciddi miktarda azaltırken taşıyıcı yoğunluğu da (1.2E+12 cm⁻²) ciddi miktarda artmıştır. Katkısız olarak büyütülen InGaAs tabakasının tabaka veya külçe taşıyıcı yoğunluğunun artması veya azalması direk olarak yapıdaki istenmeyen safsızlıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan AsH₃ oranının tabaka taşıyıcı yoğunluğunu arttırması yapının elektriksel olarak daha kötü bir davranış gösterdiğinin belirtisidir.

Bu bölümde kuantum çağlayan lazerlerin dalga kılavuzu, yelek tabakası, aktif bölgesi ve injektör bölgesi büyütülen InGaAs alaşımlarının yerinde yansıma, yüzeysel, yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerine V/III oranının etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan büyütme ve detaylı karakterizasyonlar ile V/III oranının tüm bu özellikler bakımından çok kritik bir önem sahip olduğu ve yapıya ait özellikleri yüzeysel, yapısal, optiksel ve elektriksel olarak dramatik bir biçimde değiştirdiği ortaya konulmuştur. Kuantum çağlayan lazer yapılarının büyütülmesinde katkısız tabakalar için minimum taşıyıcı yoğunluğu, maksimum mobilite, katkılı tabakalar için de istenilen katkılama seviyesinde maksimum mobilitenin elde edildiği tabakalar kullanılacaktır.

4.2.3. V/III oranının $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ tek tabakasına etkisi

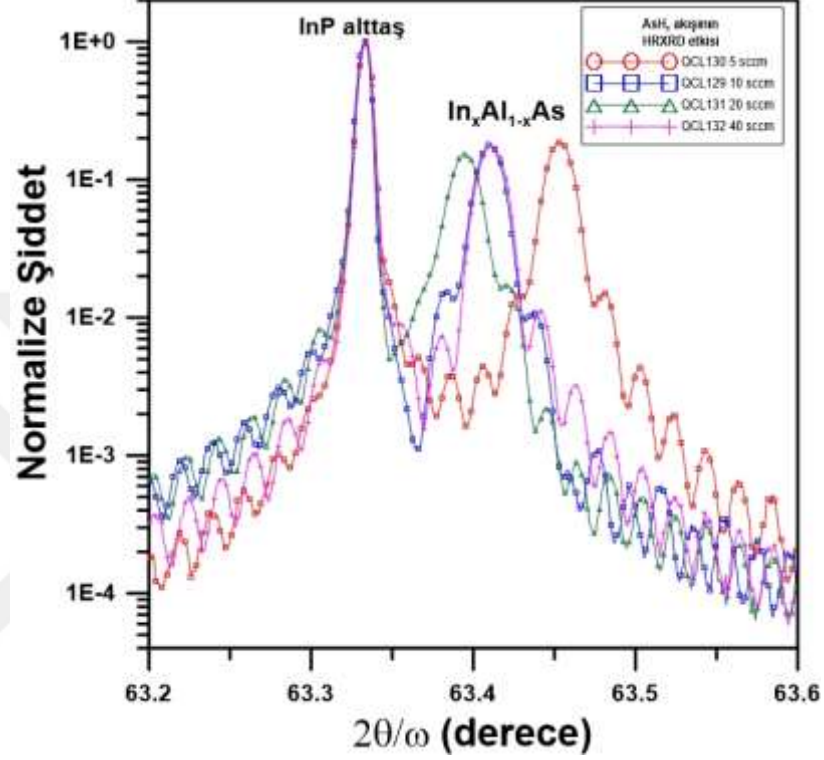
Düşük büyüme oranlı InGaAs bileşiğine AsH_3 akışının (V/III oranı) etkisi incelendikten sonra benzer büyütme ve karakterizasyonlar InAlAs bileşiği için de yapılmıştır. Önceki bölümlerde açıklandığı üzere InAlAs bileşiği InGaAs bileşiğine göre daha düşük V/III oranı ile daha kaliteli olarak büyütülebilmektedir. Bu amaçla birçok büyütme yapılmış olup tez çalışması kapsamında sadece genel davranışı açıklayan sistematik büyütme ile ilgili olan büyütme ve karakterizasyon sonuçları ortaya konulmuştur. Bu çalışma için 4 adet büyütme için parametreler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8 InAlAs büyütmelerine V/III oranının etkisini araştırmak için yapılan büyütmelere ait detaylar

Numune Numarası	TMIn akışı (sccm)	TMAI akışı (sccm)	AsH_3 akışı (sccm)
QCL132	17.6	4	40
QCL131	17.6	4	20
QCL129	17.6	4	10
QCL130	17.6	4	5

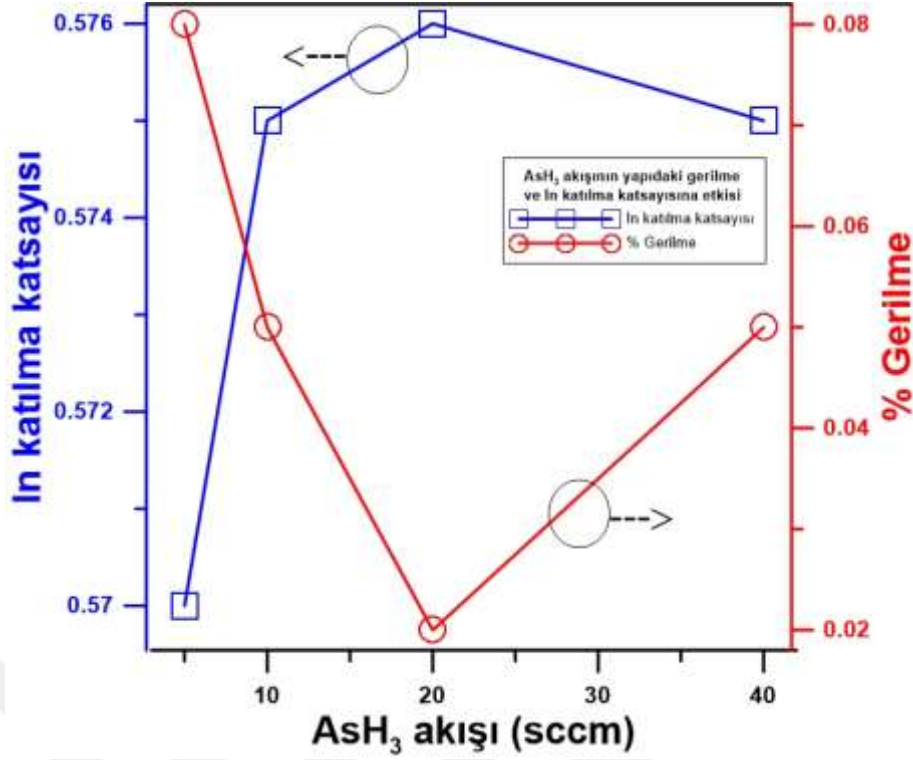
Çizelge 4.8 incelendiğinde V/III oranı değişiminin InAlAs üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla TMIn ve TMAI akışları sabit tutularak sadece AsH_3 akışı 5-40 sccm aralığında değiştirilmiştir. Burada gösterilen parametrik büyütme setindeki TMIn akışları ile bir önceki bölümde InGaAs büyütmelerindeki TMIn akışları aynı değerlere sahiptir. MOCVD sisteminde tek bir TMIn kaynağı olduğundan her ikisinde

de akış sabit tutularak, TMGa (InGaAs için) ve TMAI (InAlAs için) akışları ile tüm parametreler (örgü uyumluluğu, büyüme oranı vs.) ayarlanmaya çalışılmıştır. Büyütmelerden sonra ilk olarak HRXRD taramaları yapılarak V/III oranının büyütilen tabakaların kristal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.58 tüm bu büyütmelere ait normalize edilmiş HRXRD $2\theta/\omega$ taramalarını içermektedir.



Şekil 4.58 Artan AsH_3 akışının HRXRD $2\theta/\omega$ taramaları üzerine etkisinin incelenmesi için yapılan taramalar.

Şekil 4.58’de en yüksek şiddete ve en dar FWHM değerine sahip pikler her bir tarama için InP alttaşının (400) düzlemine aittir. Yapılan taramalarda her örnek periyodik, belirgin ve şiddetli bir şekilde kalınlık osilasyonları vermektedir. Bu osilasyonlar büyütilen InAlAs tabakalarının yüksek kristal kalitesine sahip olduğunu ve InP alttaş ile arasındaki arayüzeyin keskin olduğunu göstermektedir. 5-40 sccm aralığında değişen AsH_3 akışı InAlAs materyalindeki In alaşım oranını (veya InAlAs örgü sabitini) eser miktarda $x=0.511$ ile $x=0.517$ aralığında değiştirdiği gözlenmiştir. 5 sccm ile başlayan ve 20 sccm’e kadar değişen AsH_3 akışı için yapıdaki In oranı artarken AsH_3 40 sccm’e arttırıldığında bu oran azalmaya başlamaktadır. AsH_3 akışının InAlAs yapısındaki gerilme (strain) ve In atomunun InAlAs yapısına katılma katsayısı (incorporation coefficient) ile ilişkisi Şekil 4.59’de verilmiştir.

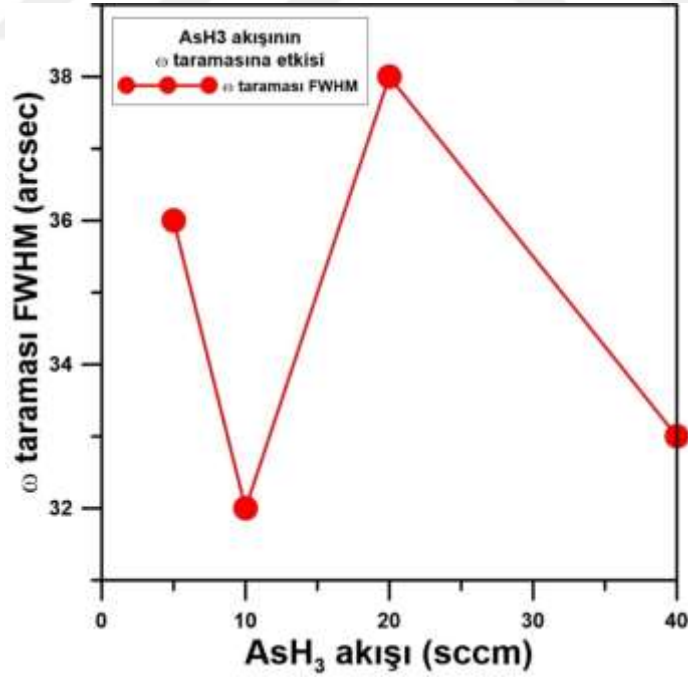


Şekil 4.59 AsH₃ akışının InAlAs yapısındaki gerilme (kırmızı) ve In atomunun InAlAs yapısına katılma katsayısı (incorporation coefficient) (mavi) ile ilişkisi.

Şekil 4.59 incelendiğinde InAlAs bileşiğindeki gerilmenin 5 sccm ile başlayarak 20 sccm'e kadar azaldığı, 40 sccm değerinden sonra ise yeniden artmaya başladığı görülmektedir. Ayrıca In (indiyum) atomunun InAlAs bileşiğine katılma katsayısı gerilmenin tam tersi bir davranış göstermektedir. 20 sccm AsH₃ akışına kadar In atomlarının yapıya daha fazla girdiği gözlenirken daha fazla arttırılan AsH₃ akışı ile yapıdaki In atomları azalmaktadır. Buradan InAlAs yapısındaki gerilmenin veya In atomlarının yapı içine girme yeteneklerinin güçlü bir AsH₃ bağımlılığı olduğu ortaya çıkmaktadır. Düşük AsH₃ akışında büyüme yüzeyinde daha az As atomu bulunmaktadır. Al-As ile In-As arasındaki bağlanma enerjileri karşılaştırıldığında Al-As daha yüksek bağlanma enerjisine sahip olduğundan (Luo 2007) As atomları istatistiksel olarak Al atomlarına daha çok bağlanırlar ve bunun sonucu olarak da InAlAs alaşımında daha çok AlAs bileşeni bulunmaktadır (Bhat, ve diğerleri 1991) (Y.-Y. Li 2007). Dolayısıyla In katılma katsayısı azalan AsH₃ akışıyla azalmaktadır. Ters durum için şayet AsH₃ akışı arttırıldığında As ile Al atomlarının birleşme, bağ yapma istekleri yine yüksektir fakat artık In atomları için de büyüme ortamında bağ yapmak için daha çok As atomu olduğundan yapıya In katılma oranı artmaya

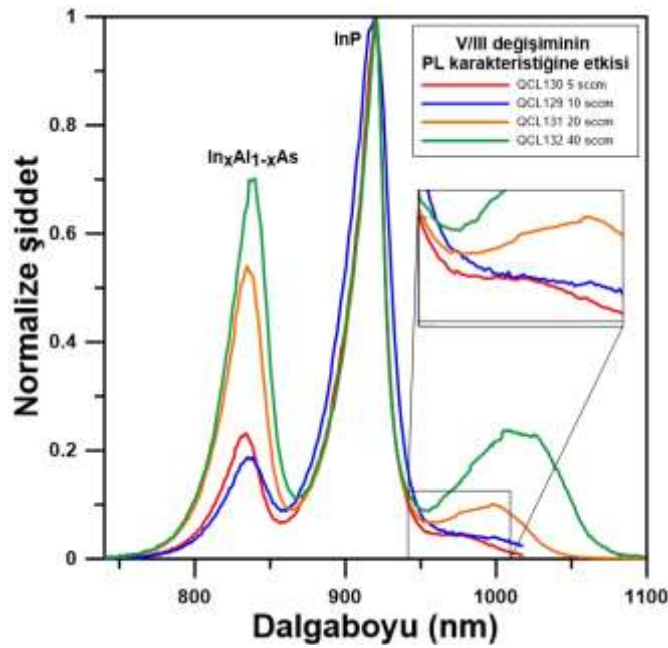
başlamaktadır. Büyütme esnasında AsH_3 akışı çok fazla arttırılmaya başlandığında (40 sccm) yapıdaki In atomlarının azalması (veya InAs oranının azalması) ise InP alttaş ile InAlAs tabakasının arayüzeyinde oluşan tip I-II heteroyapı rekombinasyonundan olduğu düşünülmektedir (Vignaud, ve diğerleri 1998).

V/III oranı değişiminin InAlAs bileşiğinin kristal kalitesine gerçek etkisini araştırmak amacıyla bu numunelere ω (rocking curve) HRXRD taramaları yapılmıştır. Yapılan taramalar analiz edilerek piklere ait FWHM değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.60). Genel olarak InAlAs tabakalarının ω taramalarına ait FWHM değerleri birbirine çok yakın değerlere (32-38 arcsec aralığı) sahip olmakla birlikte en düşük değer (en iyi kristal kalitesi) 10 sccm AsH_3 akışına sahip QCL129 numaralı numuneye aittir. AsH_3 akışı 10 sccm den 20 sccm'e arttırıldığında ω taramasına ait FWHM değeri de artarak en yüksek değerine (en düşük kristal kalitesi) çıkmıştır. Fakat AsH_3 akışının daha da arttırılması ile (40 sccm) ω taramasına ait FWHM değeri azda olsa azalma eğilimi göstermektedir. 40 sccm değerinden daha fazla AsH_3 akışının kristal kalitesine etkisini incelemekten önce bu numunelere oda sıcaklığında fotoluminesans ölçümü yapılarak bu artışın devam ettirilip ettirilmeyeceğine karar verilmek istenmiştir.



Şekil 4.60 AsH_3 akışının InAlAs ω (rocking curve) taramalarına ait FWHM değerlerine etkisi.

Şekil 4.60 artan AsH_3 akışına göre QCL129-132 numunelerine ait 750-1100 nm aralığında normalize edilmiş oda sıcaklığı fotoluminesans karakteristiklerini göstermektedir. Her bir örneğe ait fotoluminesans ölçümünde Şekil 4.61’de 3 farklı pik görülmektedir. Bunlardan ilk pik (sol) ~ 835 nm civarında ortaya çıkmaktadır ve bu pik $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ tabakasının band kenarına aittir. İkinci ve en yüksek şiddet-en düşük FWHM’ a sahip pik (orta) ~ 920 nm civarında ortaya çıkmaktadır ve InP alltaşının band kenarına aittir. Son pik ise (sağ) 950-1050 nm aralığında ortaya çıkmakta olup InP ile $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ arayüzeyinde oluşan ince InAsP tabakasından kaynaklanan kusur pikidir. Bu pik literatürde enerjisine (dagaboyuna) göre tip II ya da karışık tip I-II heteroyapı rekombinasyonu olarak bilinmektedir (Vignaud, ve diğerleri 1998) (Sayari, ve diğerleri 2009). Fotoluminesans ölçümleri $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımlarındaki In oranları bakımından HRXRD taramaları ile uyumludur. Fotoluminesans ölçümlerinde band kenarı ışınım şiddetinin yüksek olması kristalin optik kalitesinin iyi olduğu anlamına gelmekle birlikte, ortaya çıkan kusur piklerinin ışınım şiddeti de değerlendirme açısından önemlidir. AsH_3 akışının 5sccm’den (QCL95) 40 sccm’e (QCL88) artmasıyla birlikte $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ’a ait band kenarı ışınım şiddeti artmaktadır. Diğer taraftan arayüz kaynaklı kusur piki şiddeti de artan AsH_3 akışı ile artma eğilimi göstermektedir. Bu eğilimin sebebinin kümelenme etkisinden (clustering effect) kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.61 V/III oranı değişiminin $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaışımının 750-1100 nm aralığında oda sıcaklığı fotoluminesans karakteristiğine etkisi.

Şekil 4.61 yardımıyla QCL129 ve QCL130 numaralı örneklerin fotoluminesans karakteristikleri karşılaştırıldığında QCL130 daha yüksek şiddetli band kenarı pikine sahip olmasına rağmen QCL129 numaralı örneğin arayüz kaynaklı kusur piki QCL129 da ki omuzun aksine daha düzdür. HRXRD sonuçları ile birleştirildiğinde sonraki tek tabaka InAlAs ve InGaAs/InAlAs süperörgü çalışmaları için 10 sccm AsH₃ akışı ile büyütme yapmaya karar verilmiştir.

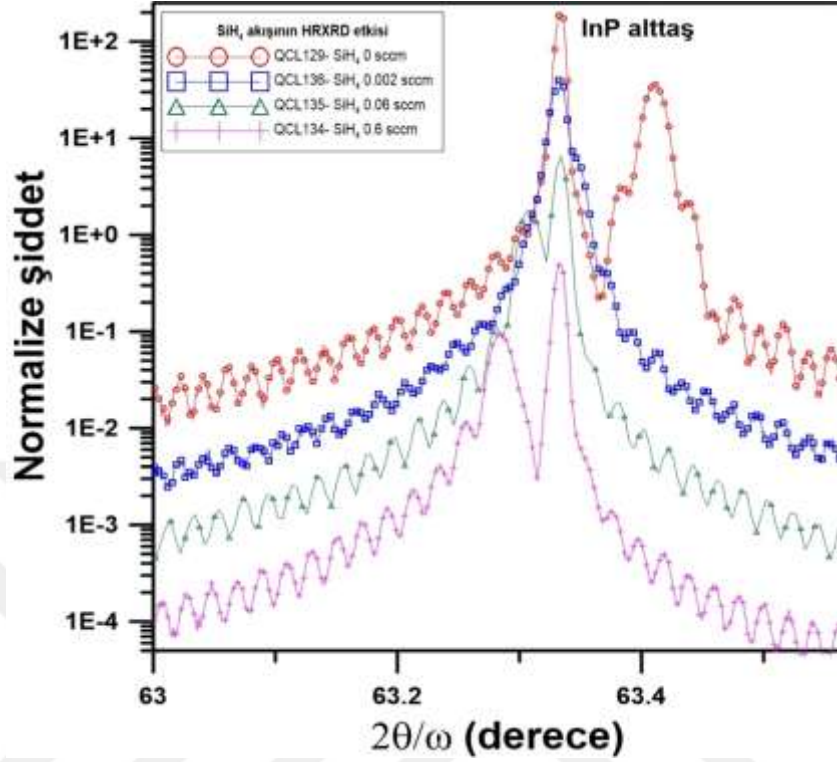
Literatürde kuantum çağılayan lazer yapılarında gerçekleştirilen aktif bölge katkılama çalışmalarında çok büyük oranla sadece InGaAs alaşımının n tipi katkılama değeri ölçülmektedir. InAlAs alaşımı mobilite ölçümleri yapmak için dirençli bir davranış gösterdiğinden ve büyütmeden sonra reaktörden çıkarıldığında çok hızlı bir şekilde oksitlendiğinden istenen katkılama değerleri InGaAs tabakası üzerinde optimize edilmeye çalışılır (Evans, Allan Joseph 2008), (Slivken 2002). Ayrıca InAlAs alaşımının Hall ölçümü yapılabilmesi için bazı litografik tekniklerle ve metal buharlaştırma teknikleriyle omik kontak alınması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında yapılan Hall ölçümleri kontrol amaçlı olarak ECV ölçümleri ile de doğrulanmıştır. Bu kapsamda tez çalışması kapsamında büyütülen InAlAs alaşımlarının değişen SiH₄ akışına karşı davranışını incelemek amacıyla AsH₃ akışı 10 sccm değerinde sabit tutularak SiH₄ akışı 0-0.6 sccm arasında değiştirilmiştir. Bu amaçla yapılan 4 adet büyütmeye ait büyütme parametreleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Sabit AsH₃ akışı altında (sabit V/III) SiH₄ akışının etkisini araştırmak için yapılan büyütmelere ait büyütme detayları

Numune Numarası	TMin akışı (sccm)	TMAI akışı (sccm)	AsH ₃ akışı (sccm)	SiH ₄ akışı (sccm)
QCL129	17.6	4	10	0
QCL136	17.6	4	10	0.002
QCL135	17.6	4	10	0.06
QCL134	17.6	4	10	0.6

Çizelge 4.9 incelendiğinde daha önceki büyütmelerde olduğu gibi burada da etkisini araştırmak istediğimiz değişken (SiH₄ akışı) haricindeki tüm parametreler sabit tutulmuştur.

Sabit AsH_3 akışı altında (sabit V/III) değişen SiH_4 akışının kristal kalitesine etkisini incelemek amacıyla yapılan $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları Şekil 4.62’de gösterilmektedir.

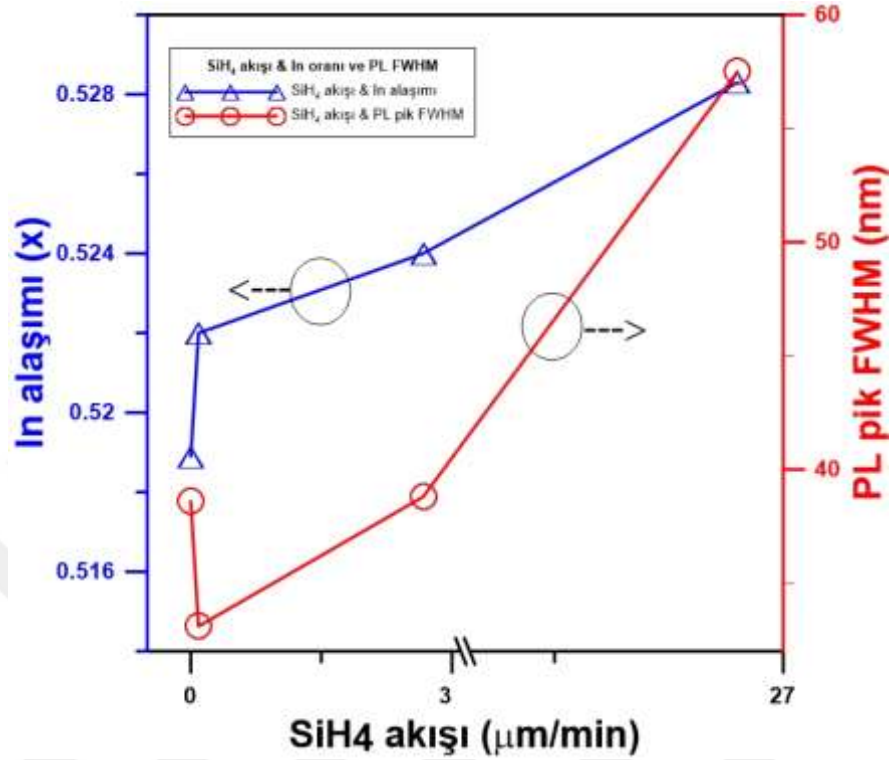


Şekil 4.62 Sabit AsH_3 akışı altında (sabit V/III) değişen SiH_4 akışının $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ tabakalarına ait $2\theta/\omega$ HRXRD taramalarına etkisi.

$2\theta/\omega$ HRXRD taramalarından artan SiH_4 akışının $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımındaki In oranının $x = 0.5189-0.5283$ aralığında değiştirdiği görülmektedir. Ayrıca taramalarda bir önceki grup büyütmelerinde olduğu gibi kalınlık osilasyonları periyodik ve çok açık bir şekilde görülmektedir. Bu osilasyonlar büyütülen $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ tabakalarının yüksek kristal kalitesine sahip olduğunu ve InP alttaşı ile arasındaki arayüzeyin keskin olduğunu göstermektedir.

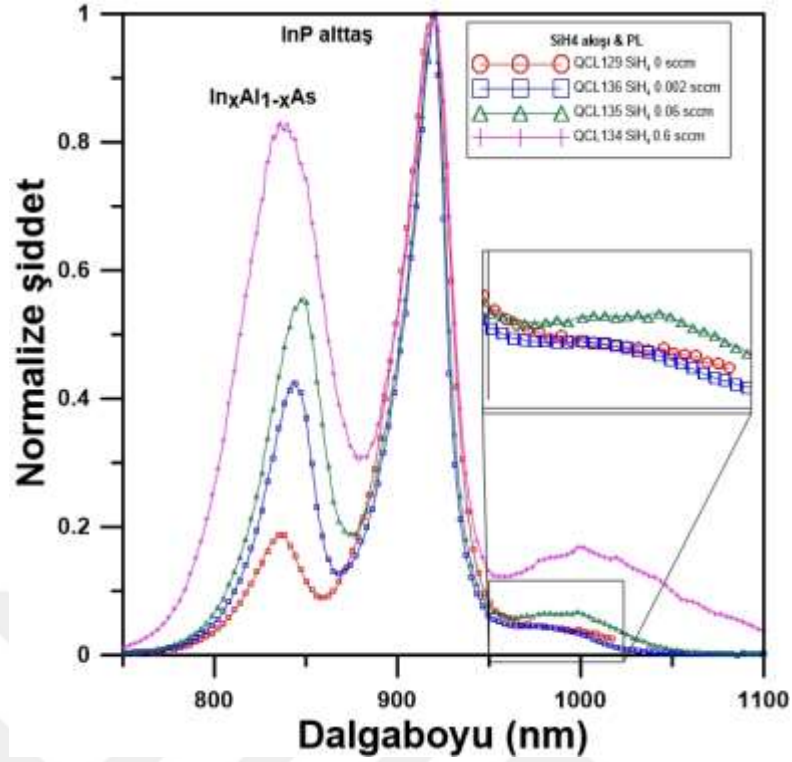
$2\theta/\omega$ HRXRD taramalarından elde edilen hesaplamalarla, artan SiH_4 akışı ile $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımındaki In oranının değişimi ve $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımlarına ait oda sıcaklığı fotoluminesans ölçümlerinden elde edilen pik FWHM değerleri Şekil 4.63’de gösterilmiştir. SiH_4 akışı olmadığında (katkısız) $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ bileşiği $x = 0.5189$ In oranına sahiptir ve fotoluminesans pik FWHM değeri 38.6 nm olarak elde edilmiştir. 0.002 sccm SiH_4 akışı için bu değerler sırasıyla $x=0.522$ ve FWHM=33.1 nm olmuştur ki bu değer bu gruba ait örneklerin fotoluminesans ölçümlerinde elde edilen en düşük FWHM değeridir. Bu noktadan sonra artan SiH_4 değeri $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımındaki In

oranını ve fotolüminesans pik FWHM değerini arttırmaktadır ki bu artış optik kalitenin azaldığı anlamına gelmektedir.



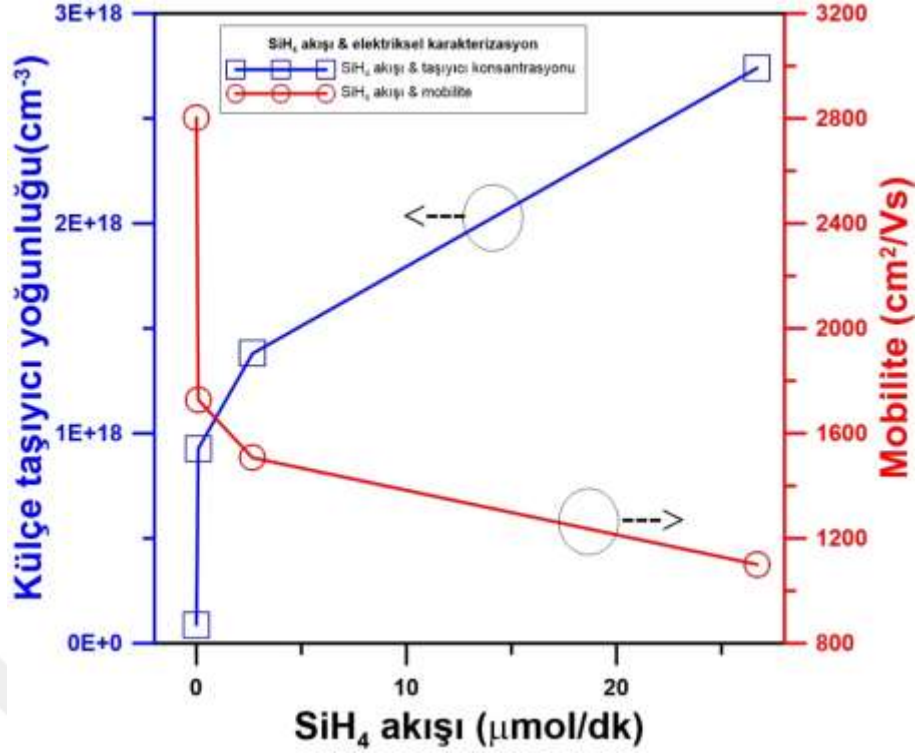
Şekil 4.63 Sabit AsH₃ akışı (sabit V/III oranı) ile artan SiH₄ akışının In_xAl_{1-x}As alaşımındaki In oranı (mavi) ve fotolüminesans pik FWHM değerine (kırmızı) etkisi.

Artan SiH₄ akışının In_xAl_{1-x}As bileşiğinin optiksel kalitesine etkisini araştırmak amacıyla QCL129, QCL134-136 numaralı örneklerin 750-1100nm aralığında oda sıcaklığı fotolüminesans ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına ait normalize edilmiş grafikler Şekil 4.64'da gösterilmektedir. Pik pozisyonları ve piklerin açıklaması bir önceki grup büyütmelerine ait fotolüminesans ölçümleri (Şekil 4.51) ile örtüşmektedir. Şekilden de görüleceği üzere In_xAl_{1-x}As bant kenarına ait ışıma şiddeti ve arayüz kaynaklı kusur ışıma şiddeti katkısız olan QCL129 için katkılı diğer örneklerle göre düşük şiddete sahiptir. Artan SiH₄ akış oranı ile In_xAl_{1-x}As alaşımı bant kenarı ışıma şiddeti artmakla birlikte en yüksek SiH₄ akışına sahip QCL134 (SiH₄ = 0.6 sccm) numaralı örnek için maksimum seviyeye ulaşmıştır. Ayrıca bu ışıma pik FWHM bakımından da diğerlerine oranla en büyük değere sahiptir. Arayüz kaynaklı kusur ışıma piki de bir önceki grup büyütmelerinde AsH₃ bağımlılığında olduğu gibi artan SiH₄ akışı ile artmaktadır.



Şekil 4.64 Sabit AsH_3 akışı (sabit V/III oranı) ile artan SiH_4 akışının $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımının oda sıcaklığı fotoluminesans karakteristiğine etkisi.

SiH_4 akışı değişiminin $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ alaşımının külçe taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite gibi elektriksel karakteristikleri üzerine etkisini araştırmak için Hall etkisi ve ECV ölçümleri yapılmış olup her iki yöntemle de birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan ölçümlere ait grafikler Şekil 4.65’de gösterilmektedir. SiH_4 akışının değişimiyle külçe taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerleri $n = 8.8 \times 10^{16} - 2.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ve $\mu = 2803 - 1100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ aralığında değişmektedir. Grafikten açıkça görüleceği üzere artan SiH_4 akışıyla külçe taşıyıcı yoğunluğu herhangi bir doyuma ulaşmadan iki katından fazla artarken mobilite üstel olarak azalmaktadır. Mobilite, beklenildiği gibi artan taşıyıcı yoğunluğu sebebiyle iyonize safsızlıklardan saçılmanın artmasıyla azalmaktadır.



Şekil 4.65 Sabit AsH₃ akışı (sabit V/III oranı) ile artan SiH₄ akışının In_xAl_{1-x}As alaşımının kütle taşıyıcı yoğunluğu (mavi) ve mobilite (kırmızı) üzerine etkisi.

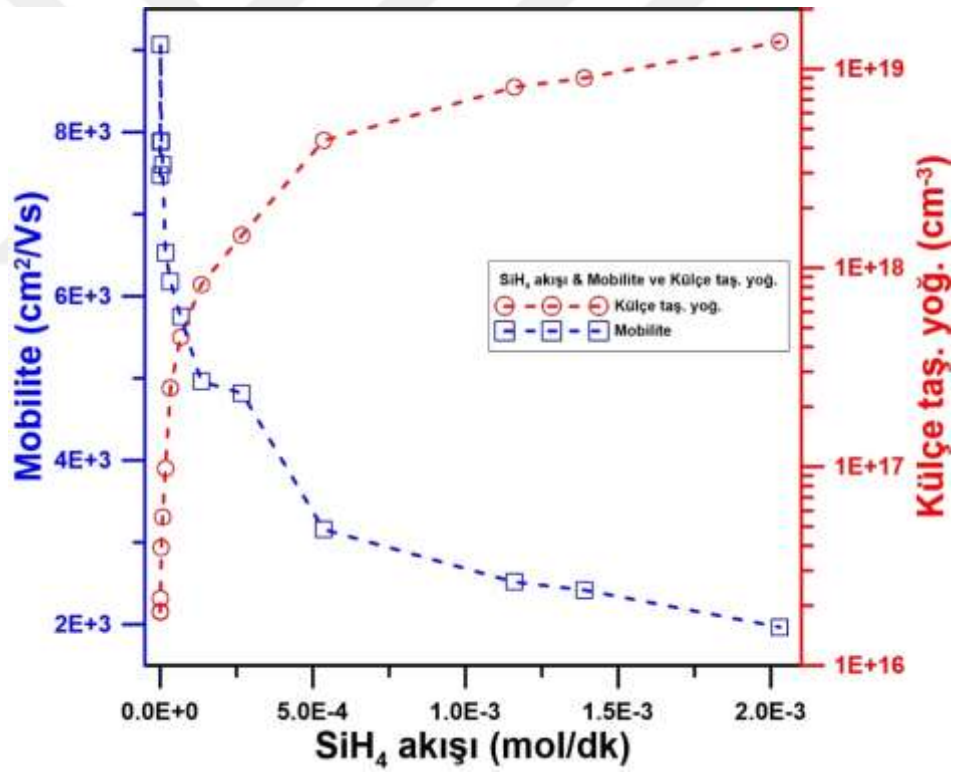
Özetle bu bölümde kuantum çağılayan lazerlerin aktif bölgesi, injektör bölgesi ve kimi zaman yelek tabakalarında büyütülen InAlAs alaşımlarının yerinde yansıma, yüzeysel, yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerine V/III oranının etkisi incelenmiştir. Ayrıca sabit V/III oranı ile artan SiH₄ akışının InAlAs alaşımı üzerine etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan büyütmeler ve detaylı karakterizasyonlar ile V/III oranının tüm bu özellikler bakımından InAlAs alaşımı için çok kritik bir önem sahip olduğu ortaya konulmuştur.

4.2.4. n-tipi katkı In_xGa_{1-x}As ve In_yAl_{1-y}As yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonu

Bölüm 4.2.2 kapsamında InGaAs alaşımı karakteristiklerinin V/III oranı değişimine karşı davranışı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Özel olarak Şekil 4.57 incelendiğinde V/III oranı değişiminin InGaAs alaşımının mobilite ve taşıyıcı yoğunluğunu önemli derecede etkilediği gösterilmiştir. Bu bölümde daha önce elde edilen V/III oranı ve diğer çalışmalarda elde edilen parametreler göz önüne alınarak sadece InGaAs alaşımının SiH₄ ile n-tipi katkılanması incelenmiştir. Daha sonra V/III oranı önceki

bölümlerde optimize edilen InAlAs alaşımı için sabit SiH₄ akışı ile n tipi katkılanması hedeflenen InAlAs alaşımının değişen AsH₃ akışı altında karakteristikleri incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında büyütülecek InGaAs tabakası aktif bölgede injektör bölgesinde, yelek tabakasında ve kontak bölgelerinde kullanılmak üzere geniş bir aralıkta ($1E+16-2E+19 \text{ cm}^{-3}$) n-tipi katkılamaya ihtiyaç duymaktadır. Bu amaçla daha önce optimize edilmiş yapılar ve parametreler yardımıyla sadece SiH₄ akışı değiştirilerek SI-InP alttaş üzerine büyütülen InGaAs için yukarıda belirtilen aralıkta taşıyıcı konsantrasyonu elde edilmeye çalışılmıştır. Büyütmelerden sonra Hall ölçümleri ve ECV ölçümleri yapılarak külçe taşıyıcı yoğunluğu ve mobilité değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.66 artan SiH₄ akışına karşılık ölçülen InGaAs külçe taşıyıcı yoğunluğu (kırmızı) ve mobilité (mavi) değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.66 Artan SiH₄ akışının n-InGaAs külçe taşıyıcı yoğunluğu (kırmızı) ve mobilité (mavi) değişimine etkisi.

Şekil 4.66'den n-InGaAs tabakasının katkılanmasında sadece SiH₄ miktarının değişimi ile $1E+16-2E+19 \text{ cm}^{-3}$ aralığında külçe taşıyıcı yoğunluğu elde edilebileceği açıkça görülmektedir. Ayrıca bu aralıktaki külçe taşıyıcı yoğunluğu için mobilité

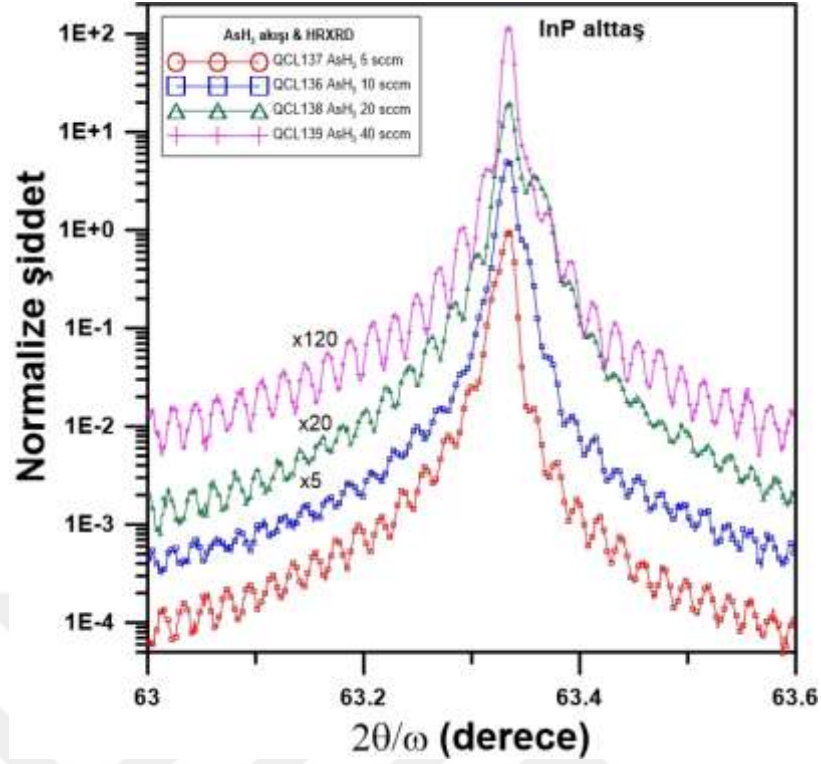
değeri ise 9060-1950cm²/V.s aralığında elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler InP alttaş üzerine büyütülen örgü uyumlu InGaAs tabakası için yakın geçmişteki literatür ile karşılaştırıldığında oldukça iyi değerlerdir (Bandyopadhyay 2015).

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere literatürde aktif bölgedeki InGaAs ve InAlAs tabakalarının katkılanmasında InGaAs tabakası referans alınmaktadır (Slivken 2002) (Evans, Allan Joseph 2008). Fakat hem büyütme ile ilgili tekniklerin geliştirilmesi hem de InGaAs tabakasına referans olması açısından. SI-InP alttaş üzerine daha önceki bölümlerde büyütülen n katkılı InAlAs tabakalarına bu bölümde AsH₃ akışının etkisi elektriksel, optiksel ve yapısal olarak incelenmiştir. Buraya kadar ilk önce katkısız In_xAl_{1-x}As bileşiklerinin V/III oranına bağlı davranışları araştırıldı daha sonra en iyi sonucu veren AsH₃ akışı sabit tutularak SiH₄ akışı değiştirildi ve aynı davranışlara ek olarak elektriksel karakteristikleri araştırıldı. Bu aşamadan sonra SiH₄ akışı 0.002 sccm değerinde sabit tutularak n-katkılı In_xAl_{1-x}As bileşiğinin AsH₃ değişimi ile kristal, optik ve elektriksel özellikleri araştırılması amacıyla bir grup büyütme yapılmıştır. Yapılan büyütmelere ait büyütme parametreleri Çizelge 4.10'da gösterilmektedir. Bu büyütmelerde diğer tüm parametreler sabit tutularak AsH₃ akışının 5-40 sccm aralığındaki değişimin etkisi incelenmiştir.

Çizelge 4.10 Sabit SiH₄ akışı altında AsH₃ akışının etkisini araştırmak için yapılan büyütmelere ait büyütme detayları

Numune Numarası	TMin akışı (sccm)	TMAI akışı (sccm)	AsH ₃ akışı (sccm)	SiH ₄ akışı (sccm)
QCL137	17.6	4	5	0.002
QCL136	17.6	4	10	0.002
QCL138	17.6	4	20	0.002
QCL139	17.6	4	40	0.002

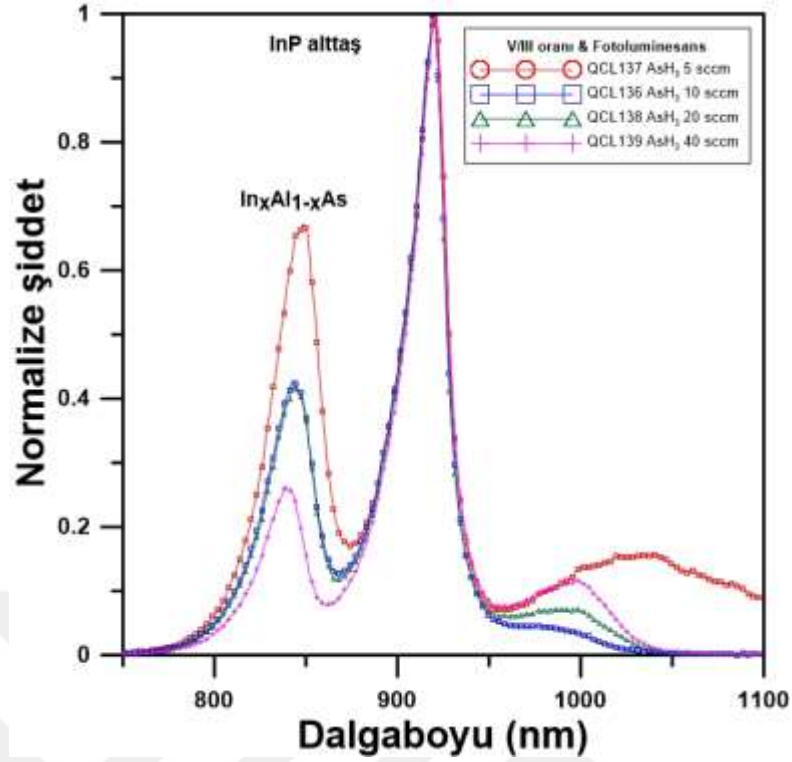
Daha öncede yapıldığı gibi ilk olarak kristal kalitesinin etkisinin araştırılması amacıyla 2 θ / ω HRXRD taramaları yapılmıştır. Yapılan taramalar Şekil 4.62'de gösterilmektedir.



Şekil 4.67 AsH_3 akışının n-InAlAs tabakası HRXRD taramasına etkisi.

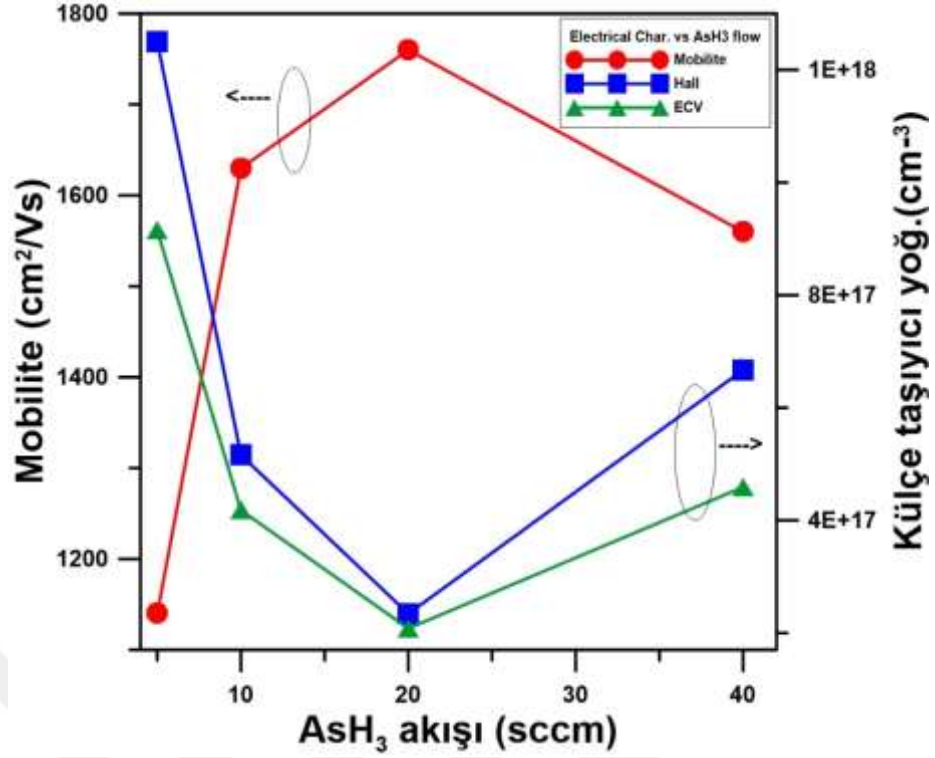
Sabit SiH_4 akışı (0.002 sccm) altında değişken AsH_3 akışının HRXRD taramalarına etkisinin incelenmesinde tüm örnekler belirli, periyodik ve simetrik kalınlık osilasyonları göstermektedir. Bu osilasyonlar daha önce de açıklandığı gibi hem kristal kalitesinin iyi olduğu hem de InP alttaş ile InAlAs tabakası arasındaki arayüzün keskin olduğu anlamına gelmektedir. n-InAlAs tabakalarının örgü sabitinin AsH_3 akışı bağımlılığı bu büyütme rejiminde yok denecek kadar azdır.

Katkılı $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ bileşiğine V/III oranı değişiminin optiksel olarak etkisini araştırmak amacıyla öncekiler ile aynı koşullarda olan fotoluminesans ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler Şekil 4.68’de gösterilmektedir. En düşük AsH_3 akışına sahip QCL137 numaralı numune en şiddetli $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ band kenarı pikine ve en şiddetli arayüz kaynaklı kusur pikine sahiptir. AsH_3 akışı 10 sccm değerine arttırıldığında $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ band kenarı piki ikinci en yüksek şiddetli pik olurken arayüz kaynaklı kusur piki şiddeti de en düşük seviyeye sahip olmuştur. Bu seviyeden sonra artan AsH_3 akışı band kenarı ışıma şiddetini azaltırken kusur ışıma şiddetini arttırmaya başlamıştır.



Şekil 4.68 Sabit SiH_4 akışı altında AsH_3 akışı değişiminin (V/III oranı) InAlAs tabakası fotoluminesans karakteristiklerine etkisi.

Sabit SiH_4 akışı altında artan AsH_3 akışının (V/III oranı) $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ bileşiğinin elektriksel karakteristiklerine etkisini araştırma amacıyla oda sıcaklığı Hall ölçümleri ve ECV ölçümleri yapılmıştır. Külçe taşıyıcı konsantrasyonları ve mobilite değerlerinin AsH_3 akışına göre değişimi Şekil 4.69’de gösterilmektedir. En düşük V/III oranına sahip 5 sccm AsH_3 akışı ile QCL137 numaralı örnek en düşük mobilite ($1140 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) ve en yüksek külçe taşıyıcı yoğunluğu ($1.25\text{E}+18 \text{ cm}^{-3}$) değerlerine sahiptir. 20 sccm değerine kadar artan AsH_3 akışları için mobilite değeri $1760 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ değerine kadar artarken külçe taşıyıcı yoğunluğu $2.34\text{E}+17 \text{ cm}^{-3}$ değerine kadar düşmüştür. Elde edilen bu değerler elektriksel karakteristikler bakımından en iyi değerlerdir. AsH_3 akışı 40 sccm değerine çıkarıldığında mobilite düşmeye başlarken külçe taşıyıcı yoğunluğu seviyesi artmaya başlar.



Şekil 4.69 Sabit SiH₄ akışı altında V/III oranı değişiminin In_xAl_{1-x}As mobilite ve külçe taşıyıcı yoğunluğuna etkisi.

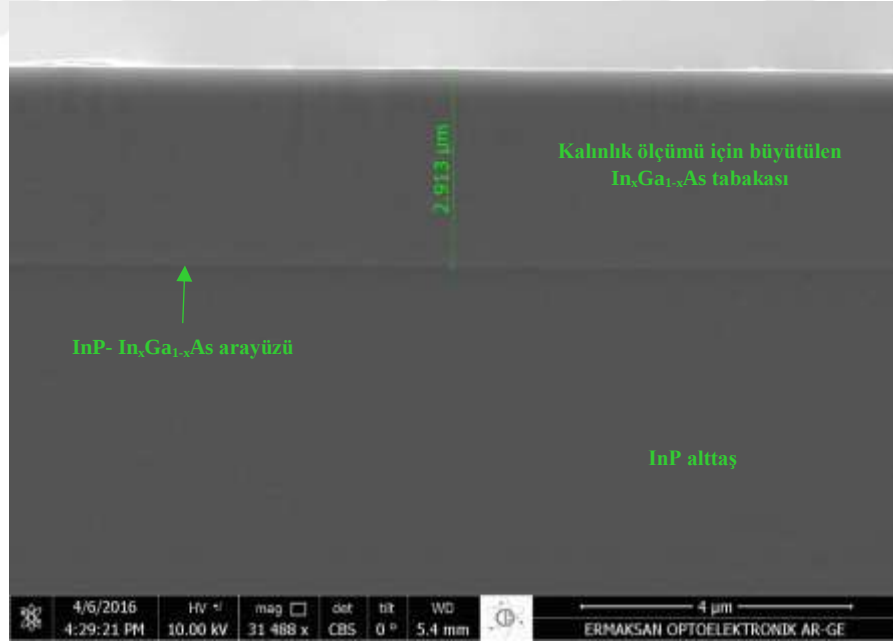
Özetle bu bölümde kuantum çağlayan lazerlerin özellikle aktif bölge, enjektör bölgesi, yelek tabakası ve dalga kılavuzu tabakalarında kullanılacak olan geniş aralıklı katkılama yoğunluğuna sahip InGaAs tabakası ve enjektör bölgesinde kullanılacak olan InAlAs tabakasının SiH₄ ile n tipi katkılanması üzerine çalışılmıştır. Yapılan büyütme ve detaylı karakterizasyonlar ile InGaAs alaşımı için 1E+16-2E+19 cm⁻³ aralığında katkılama yoğunluğu seviyesi elde edilmiştir. InAlAs için ise bir önceki bölümde büyütülmüş olan n-InAlAs örneklerinden SiH₄ akışı 0.002 sccm olan seçilerek elektriksel, optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir.

4.2.5. In_xGa_{1-x}As/In_yAl_{1-y}As süperörgülerinin büyütülmesi ve kalınlık tayini

Önceki bölümlerde detayları açıklandığı üzere tek tabaka In_xGa_{1-x}As ve In_yAl_{1-y}As büyütme parametreleri ve katkılama seviyeleri optimize edilmiştir. Ek olarak aynı tabakaların düşük büyüme oranları ile MOCVD büyütülmesi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ise kuantum çağlayan lazer yapısında çok ince kalınlıklara sahip In_xGa_{1-x}As ve In_yAl_{1-y}As tabakalarının büyüme oranlarının

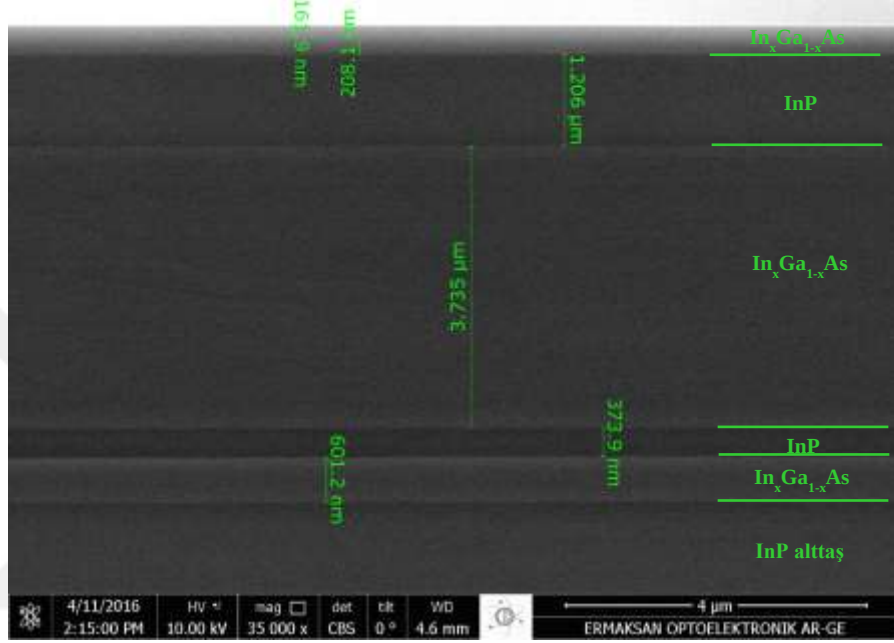
(dolayısıyla kalınlıklarının) çok hassas bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalardan bahsedilecektir.

Bilindiği üzere epitaksiyel tabakaların kalınlık veya büyüme oranı ölçümleri direk (taramalı elektron mikroskobu, geçirimli elektron mikroskobu vb.) ve dolaylı (elipsometre, XRD, yansıma vb.) olarak birçok teknik yardımıyla ölçülebilmektedir. Detayları önceki bölümlerde verilen yerinde yansıma ölçümü tekniği külçe yapılar hakkında yüksek hassasiyetle bilgi vermekle birlikte yapı içindeki çok ince kalınlıklara sahip süperörgü tabaka kalınlıklarını ölçmek hemen hemen imkansızdır. Direk ölçümlerden taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) yardımıyla ilk önce uygun alttaş (üstteki tabaka ile kontrast oluşturacak) üzerine kalın bir tabaka büyütülür, daha sonra büyütülen örnekten enine kesit alınarak mikroskop yardımıyla kalınlık ölçülür ve bulunan bu kalınlık toplam büyütme süresine bölünerek büyüme oranı hesaplanır. (Şekil 4.70)'da MOCVD ile InP alttaş üzerine büyütülmüş olan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasının Ermaksan Optoelektronik tesislerinde kurulu bulunan taramalı elektron mikroskobu ile alınan enine kesitin görüntüsü ve kalınlık ölçümü gösterilmektedir.



Şekil 4.70 InP alttaş üzerine MOCVD ile büyütülmüş olan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasının enine kesitinin taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmesi ve kalınlık ölçümü.

Eğer kalınlığı ölçülecek tabaka, alttaş ile aynı ise (InP alttaş üzerine InP tabakasının büyütülmesi) çalışma prensibi gereği taramalı elektron mikroskobundan kontrast elde edilemeyeceğinden kullanılan en genel teknik iki tabaka (bu çalışmada InP) arasına kontrast oluşturacak başka bir tabakanın ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) büyütülmesidir. Şekil 4.71 InP alttaş üzerine büyütülmüş farklı kalınlıklara sahip $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve InP tabakalarının taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenene enine kesitini göstermektedir.

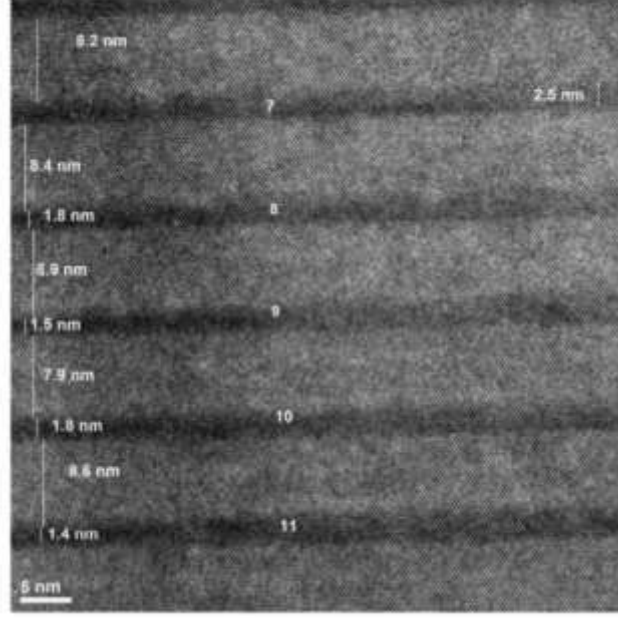


Şekil 4.71 InP alttaş üzerine büyütülmüş olan farklı kalınlıklara sahip InP ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakalarını içeren yapının enine kesitinin taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmesi ve elde edilen kontrast farkından yapılan kalınlık ölçümleri.

Diğer bir direk kalınlık ve dolayısıyla büyüme oranı ölçüm tekniği ise geçirimli elektron mikroskobudur (Transmission Electron Microscope-TEM). Bu teknik yardımıyla epitaksiyel tabakaların kalınlıkları çok hassas bir biçimde ölçülebilmektedir. Şekil 4.72 InGaAs/InAlAs tabanlı kuantum çağılayan lazer yapısının aktif bölgesinin geçirimli elektron mikroskobu görüntüsünü göstermektedir (Mawst, ve diğerleri 2013).

Yukarıda anlatılan iki mikroskop tekniği karşılaştırıldığında her ne kadar geçirimli elektron mikroskobunun daha net sonuçlar verdiği görülse de birçok dezavantaja sahiptir. Cihaz çok yüksek maliyetli olduğundan sadece birkaç merkezde kurulu bulunması, ölçüm yapılacak numunenin hazırlanma aşamasının çok zahmetli olması,

ölçüm ve numune hazırlanması için malzemeye özel tekniklerin geliştirilmesi gereği, numuneye zarar vererek tekrar kullanılamayacak duruma getirmesi ve pahalı bir ölçüm tekniği olması gibi birçok dezavantajı bulunmaktadır.



Şekil 4.72 InGaAs/InAlAs tabakalarına sahip kuantum çağılayan lazer yapısının aktif bölgesinin geçirimli elektron mikroskobu ile enine kesitinin görüntülenmesi ve kalınlık ölçümü. Koyu bölgeler InGaAs tabakalarını açık bölgeler ise InAlAs tabakalarını göstermektedir (Mawst, ve diğerleri 2013).

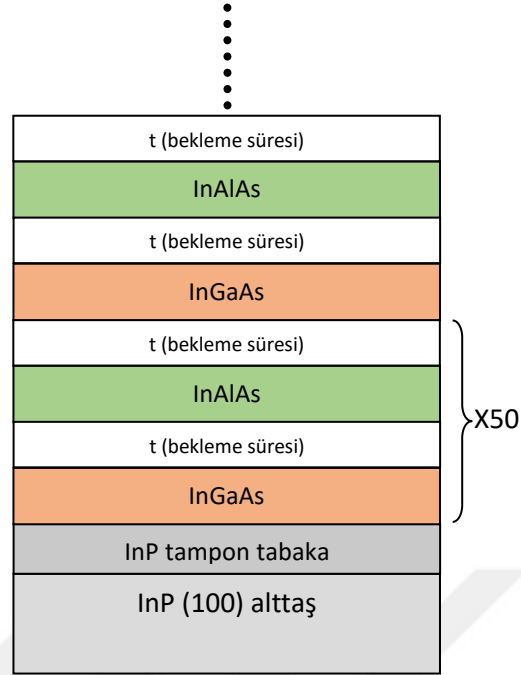
Taramalı elektron mikroskobu yukarıda bahsedilen zorlukları (malzemenin zarar görmesi bu teknik içinde geçerlidir) kısmen aşmaktadır. Hem ölçümü çok daha kolay hem de özel bir numune hazırlama tekniği gerektirmemektedir. Fakat gerçek bir kuantum çağılayan lazer yapısında büyütülen tabakaların kalınlığının çok ince olduğu göz önüne alındığında ($\sim 7-40 \text{ Å}$) ortalama seviyedeki bir laboratuvarında kurulu bulunan mikroskobun hassasiyet düzeyi ile üretilen lazerin çalışmasını etkileyecek düzeyde tabaka kalınlık değişimleri gösterebilmektedir. Ayrıca tez çalışması kapsamında edinilen tecrübe ile külçe olarak büyütülen tabakalardan elde edilen kalınlık ve büyüme oranı ile o tabakanın bir süperörgü içindeki kalınlık ve büyüme oranı farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada kuantum çağılayan lazer yapısının aktif bölgesindeki ince tabakaların kalınlık ölçümü ve büyüme oranlarını hesaplamak için HRXRD tekniği kullanılmıştır. Bu teknik yukarıda bahsedilen mikroskobik tekniklere kıyasla daha ucuz, malzemeye

zarar vermeyen, daha büyük bir bölgeden ölçüm alındığından malzeme geneli hakkında daha çok bilgi veren bir teknik olduğundan tercih edilmiştir. Bu amaçla 3 adet 50 tekrarlı InGaAs ve InAlAs tabakalarını içeren süperörgü büyütmesi yapılmıştır (Demir ve Elagöz 2016). InGaAs ve InAlAs malzemelerini bir arada ve yüksek kaliteli büyütebilmek için daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi farklı sıcaklıklarda ve farklı V/III oranlarında büyütme gerekmektedir. Art arda ve çok ince kalınlıklara sahip tabakalar için sıcaklık değişimi çok tercih edilen bir teknik olmamakla birlikte gerek toplam büyütme süresini uzatması açısından pratik değildir gerekse de çok ince tabakalar arası sıcaklık değişiminin arayüz kalitesini olumsuz etkileyeceği düşünülmektedir. Bu sebeple bu büyütmelerde daha önce optimize edilmiş sıcaklık değeri kullanılmıştır. Ayrıca MOCVD sistemine eklenen ikinci bir AsH₃ hattı ile her iki tabaka için gerekli olan farklı V/III oranlarını büyütmeyi herhangi bir kesintiye uğratmadan elde etmek mümkündür. Büyütmelerde her bir tabakadan sonra reaktöre sadece büyütülen tabaka yüzeyinden As atomlarının kaçışını engellemek amacıyla AsH₃ (InGaAs için AsH₃_1 veya InAlAs için AsH₃_2) ve taşıyıcı gaz H₂ gönderilmektedir. Büyütülen InGaAs/InAlAs tabakalarının büyütme sürelerine ait parametreler ve şematik gösterimi sırasıyla Çizelge 4.11 ve Şekil 4.73’de verilmiştir (Demir ve Elagöz 2016)

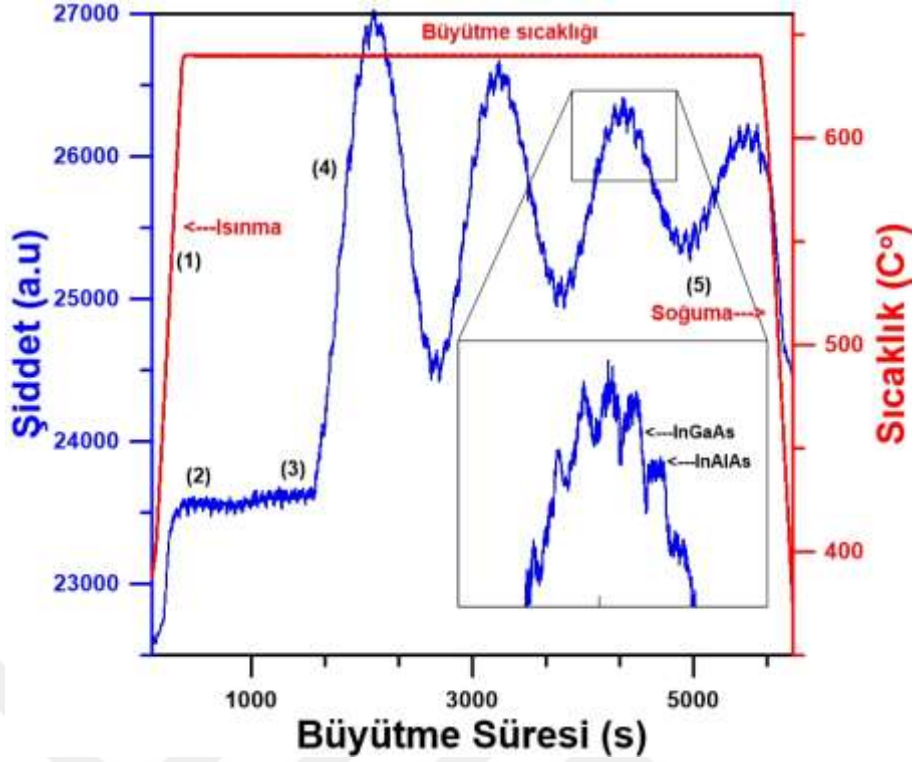
Çizelge 4.11 Kalınlık ve büyüme oranını HRXRD tekniğiyle ölçebilmek için yapılan QCL111-113 numaralı süperörgü büyütmelerine ait parametreler

Numune Numarası	InGaAs büyütme süresi (s)	InAlAs büyütme süresi (s)
QCL111	49.18	21.28
QCL112	49.18	35.46
QCL113	35.71	21.28



Şekil 4.73 Kalınlık ve büyüme oranını belirlemek amacıyla yapılan süperörgü büyütmelerinin şematik gösterimi. Bekleme süresi boyunca reaktöre herhangi bir 3 grubu kaynak akışı olmamakla birlikte sadece AsH_3 (AsH_3_1 veya AsH_3_2) ve taşıyıcı gaz H_2 akışı sağlanmıştır (Demir ve Elagöz 2016).

Büyütmelerde kullanılan tüm parametreler aynı olmakla birlikte tek değişken Çizelge 4.11'den görüleceği üzere süperörgü içindeki InGaAs ve InAlAs büyüme süreleridir. QCL111 numaralı örnekte süperörgünün her bir tabakasında InGaAs büyüme süresi 49.18s, InAlAs büyüme süresi ise 21.28s olarak ayarlanmıştır. QCL112 numaralı örnekte ise InGaAs süresi QCL111 numaralı örnek ile aynı tutulup InAlAs büyüme süresi arttırılmıştır. Dolayısıyla yapılacak analizlerde bu iki örnek karşılaştırılacak ve aradaki kalınlık farkının InAlAs tabakası kaynaklı olacağı göz önüne alınacaktır. Şekil 4.74, QCL111 numaralı büyütme için yerinde yansıma ve sıcaklık eğrisini göstermektedir. QCL112 ve QCL113 numaralı büyütmelere ait yerinde yansıma ve sıcaklık eğrileri hemen hemen aynı davranışı gösterdiğinden konulmamıştır.



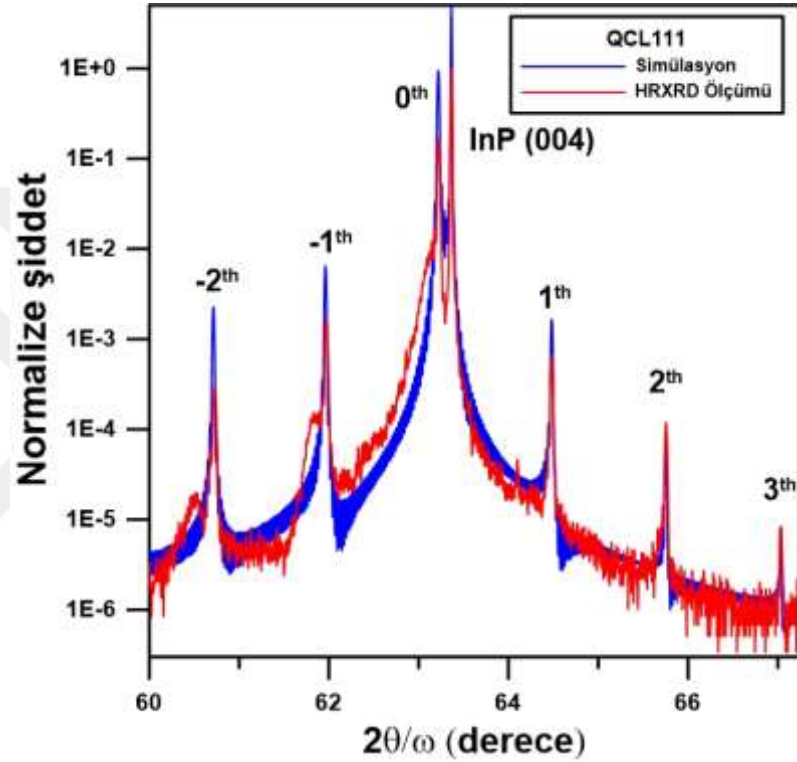
Şekil 4.74 QCL111 numaralı büyütmeye ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık eğrisi (kırmızı) (Demir ve Elagöz 2016).

Bu grafikte mavi eğri yerinde yansımayı, kırmızı eğri ise reaktörün sıcaklık değerini göstermektedir. Grafikte 1-5 etiketlenmesi sırasıyla büyütmenin aşağıda verilen aşamalarını göstermektedir;

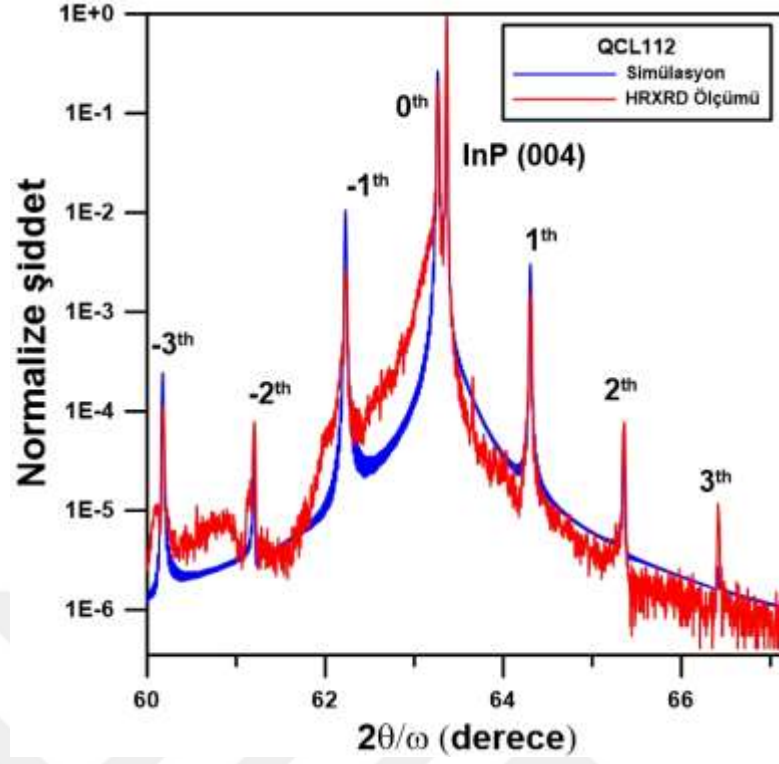
- 1) Alttaşın büyütme sıcaklığına kadar PH_3 akışı altında (InP alttaş yüzeyinden P kaçıışının engellenmesi amacıyla) ısıtılması,
- 2) InP tampon tabakasının büyütülmesi,
- 3) Süperörgü büyütmelerinden önce tüm kaynak akış değerlerinin ayarlanması ve kararlı hale gelmesi (süperörgü büyütmesi için hazırlık),
- 4) InGaAs ve InAlAs süperörgü tabakalarının büyütülmesi,
- 5) AsH_3 akışı altında (InGaAs veya InAlAs yüzeyinden As kaçıışını engellemek için) reaktörün kontrollü bir şekilde soğutulması.

Şekil 4.75, Şekil 4.76 ve Şekil 4.77 sırasıyla QCL111-112 ve QCL113 numaralı numunelere ait $2\theta/\omega$ HRXRD taramalarını göstermektedir. Taramalarda kalınlık pikleri arasındaki açı farkı $\delta\theta$ ve süperörgü pikleri arasındaki açı farkı $\Delta\theta$

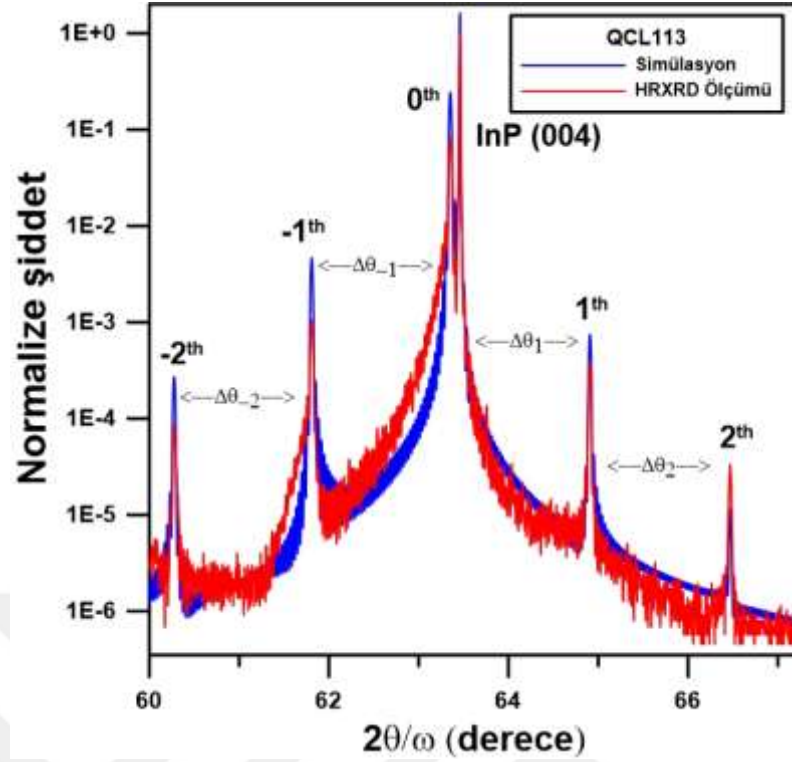
gösterilmektedir. Bu grafiklerde kırmızı eğriler ölçümleri, maviler ise ölçüm yapılan tabakalara ait üretilen simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Bu iki eğri ne kadar birbirine yakın ise büyütülen numune hakkında o kadar detaylı bilgi elde edilebilir. Ayrıca bu taramalarda hem her bir InGaAs/InAlAs çiftinden gelen süperörgü pikleri hem de toplam kalınlıktan gelen kalınlık pikleri açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu piklerin ortaya çıkması hem kristal kalitesinin hem de tabakalar arası arayüz kalitesinin yüksek olduğunun göstergesidir



Şekil 4.75 HRXRD tekniği ile epitaksiyel tabakalara ait kalınlıkların hassas bir biçimde belirlenebilmesi için büyütülen QCL111 numaralı InGaAs/InAlAs süperörgü yapısına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen simülasyon eğrisi (mavi) (Demir ve Elagöz 2016).



Şekil 4.76 HRXRD tekniği ile epitaksiyel tabakalara ait kalınlıkların hassas bir biçimde belirlenebilmesi için büyütülen QCL112 numaralı InGaAs/InAlAs süperörgü yapısına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen simülasyon eğrisi (mavi) (Demir ve Elagöz 2016).



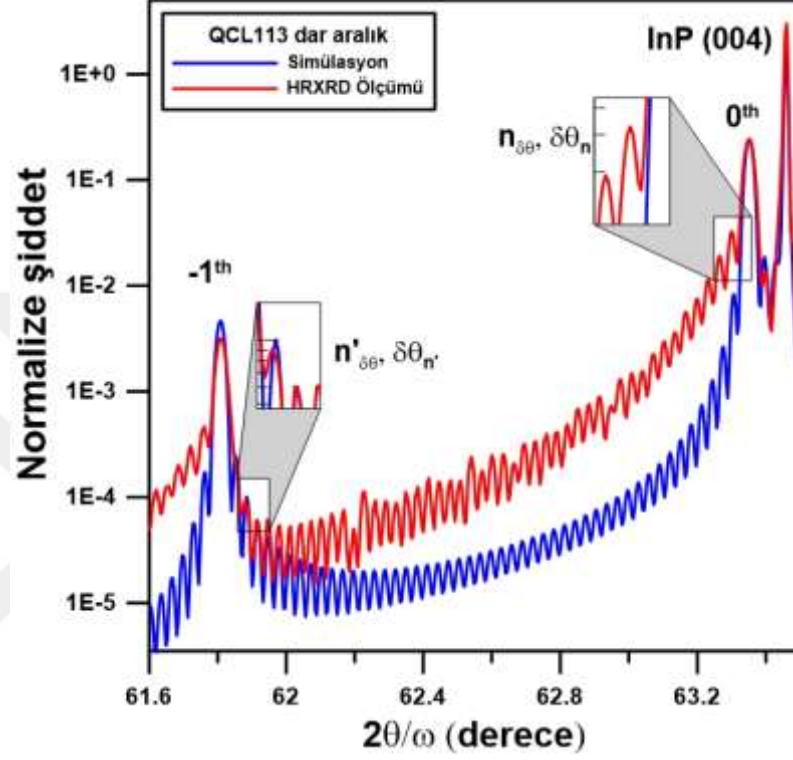
Şekil 4.77 HRXRD tekniği ile epitaksiyel tabakalara ait kalınlıkların hassas bir biçimde belirlenebilmesi için büyütülen QCL113 numaralı InGaAs/InAlAs süperörgü yapısına ait HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için üretilen simülasyon eğrisi (mavi) (Demir ve Elagöz 2016).

Süperörgü piklerinden yararlanarak her bir InGaAs/InAlAs tabaka çiftinin kalınlığını hesaplamak için Denklem [4.3] kullanılmıştır.

$$\frac{2 \sin \theta_n - 2 \sin \theta_{n+1}}{\lambda} = \pm \frac{n}{\Lambda} \quad [4.3]$$

Burada Λ , şayet süperörgü pikleri arasındaki açı farkı $\Delta\theta$ kullanılırsa süperörgünün periyot kalınlığı kalınlık pikleri arasındaki açı farkı $\delta\theta$ ($\delta\theta < \Delta\theta$) kullanılırsa toplam film kalınlığı elde edilmektedir. $\lambda_{CuK\alpha} = 0.15405$ nm gelen X ışınının dalgaboyunu, θ_n (θ_{n+1}) $2\theta/\omega$ XRD taramasındaki n. (n+1) mertebe Bragg açısını göstermektedir. Buradan dikkatli bir analiz yapıldığında periyot kalınlığı ve filmin toplam kalınlığı elde edilebilir fakat tek bir tabakanın kalınlığı elde etmek mümkün değildir. Bu sebeple her bir büyütmede tabakalardan birinin büyütme süresi (kalınlığı) sabit tutularak diğeri değiştirilmiştir. Karşılıklı kontrol içinde QCL113 numaralı büyütme yapılmıştır.

QCL113 numaralı numunenin HRXRD $2\theta/\omega$ taraması Şekil 4.77 ve Şekil 4.78 üzerinde gösterilen $n_{\Delta\theta}$, $n+1_{\Delta\theta}$, θ_n , ve θ_{n+1} değerleri ve denklem [4.3] kullanılarak süperörgü periyodu, $n_{\delta\theta}$, $n+1_{\delta\theta}$, θ_n' , ve $\theta_{(n+1)'}'$ değerleri ve denklem [4.3] kullanılarak da toplam film kalınlığı hesabı yapılmıştır. Hesaplardan ve elde edilen periyot ve toplam kalınlık değerleri Çizelge 4.12’de gösterilmektedir.



Şekil 4.78 Şekil 4.73 ile gösterilen HRXRD taramasında iki süperörgü piki arasındaki kalınlık piklerini daha net ortaya çıkararak kalınlık hesabı yapabilmek için yapılan dar aralık HRXRD taraması (kırmızı) ve simülasyon eğrisi (mavi).

Çizelge 4.12 QCL111-113 örneklerine yapılan HRXRD taramaları ve Denklem [4.3] vasıtasıyla elde edilen periyot ve toplam kalınlık değerleri

Numune Numarası	Periyot kalınlığı (nm)	Toplam kalınlık (nm)
QCL111	8.27	409
QCL112	9.97	480
QCL113	6.67	348

Daha öncede belirtildiği gibi QCL111 ile QCL112 arasındaki tek fark her bir periyottaki InAlAs büyütme süresidir, bu süre QCL111 için 21.28s QCL112 için 35.46 s fark ise 14.18 s'dir. Bu zaman farkı bir periyotta 1.70 nm kalınlık farkı (9.97nm - 8.27nm) getirmektedir. Kalınlık farkı büyütme süreleri arasındaki farka oranlandığında InAlAs tabakasına ait büyüme oranı 0.119 nm/s olarak bulunmaktadır. Aynı yaklaşım ile QCL111 ve QCL113 numaralı örnekler karşılaştırılırsa bu iki büyütme arasındaki tek fark her bir periyotta InGaAs büyütme süresidir. QCL111 de bu süre 49.18s iken QCL113 de 35.71s fark ise 13.47s dir. Bu fazla süre için kalınlık farkı 1.60 nm olup aynı hesaplama InGaAs tabakasının büyüme oranı 0.118nm/s olarak elde edilir.

Aynı büyütme parametreleri ile külçe olarak büyütülen InGaAs ve InAlAs tabakalarının yerinde yansıma eğrileri ile yapılan hesaptan sırasıyla 0.125 nm/s ve 0.139 nm/s büyüme oranları elde edilmiştir. Her iki tabaka için de büyüme oranlarındaki fark süperörgü için daha küçük bir değere sahiptir. Bunun sebebinin büyütme ortamından kaynaklandığı düşünülmektedir. Külçe büyütme ortamı sanki homoepitaksi gibi davranırken süperörgü büyütme ortamı heteroepitaksi büyütme ortamıdır. Külçe büyütme ortamında büyüme oranları ile süperörgü büyütme ortamındaki büyüme oranları karşılaştırıldığında aradaki fark InGaAs için 0.007 nm/s InAlAs için ise 0.02 nm/s dir. Genel olarak MOCVD büyütme ortamında bu seviyedeki farklar dikkate alınmazlar fakat bu tez çalışması kapsamında büyütülen kuantum çağılayan lazer yapılarının kalınlıkları çok ince olduğu için büyüme oranında yapılacak hatalar kuantum kuyusu ve bariyerlerin kalınlıklarının hedeflenen yapıdan farklı kalınlıklarda büyütülmesine sebep olacaktır. Bu farklılıklar cihaz performansı ve ışınım dalgaboyunun beklentilerden farklı çıkmasına sebep olacaktır.

Özetle bu bölümde süperörgü tabakalarının kalınlıklarının hassas bir biçimde ölçülebilmesi için HRXRD ölçümleri kullanılmıştır. Bu ölçümlerde ilk önce InGaAs ve InAlAs tabakalarını içeren bir süperörgü büyütme yapılmıştır. Daha sonra yapılan iki adet büyütmede tabakalardan sadece bir tanesinin kalınlığı değiştirilmiştir. Değişen kalınlıklar HRXRD ölçümlerinden elde edilen süperörgü piklerinin aralarındaki açı farklarını değiştirdiğinden yapılan hesaplamalarla her bir tabakanın kalınlığı ve büyüme oranı hassas bir biçimde elde edilmiştir. Ayrıca yapılan parametrik büyütme ile bu yapıların tekrarlanabilirliği test edilmiştir.

4.2.6. Örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ süperörgülerin büyütülmesi

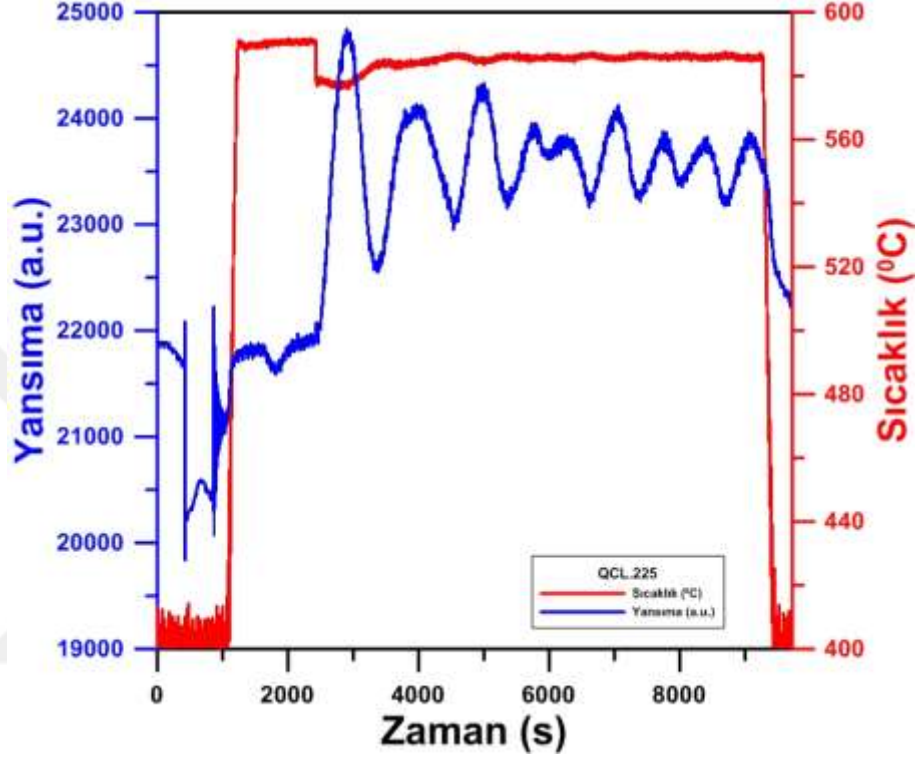
Bundan önceki bölümlerde tek tabaka InGaAs ve InAlAs büyütmeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan büyütmelerde sıcaklık, büyüme oranı, V/III oranı gibi birçok büyütme parametresi optimize edilmiştir. Ayrıca değişen indiyum oranlarında InGaAs ve InAlAs alaşımları elde edilmiştir. Bir önceki bölümde ise parametrik ve birbirleri ile uyumlu 3 adet $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ süperörgü büyütmesi yapılmış ve HRXRD ölçümleri ile büyüme oranları ve kalınlıklar çok hassas bir biçimde elde edilmiştir.

Bu bölümde tek tabaka büyütmelerinde InP alttaş ile örgü uyumlu olarak büyütülebilen $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ alaşımlarının çok ince kalınlıklara sahip tabakalar halinde süperörgü oluşturacak şekilde büyütülmelerinden bahsedilecektir. Tez çalışması kapsamında büyütülen bu tabakalar kuantum çağılayan lazer yapılarının aktif bölgesini oluşturacak tasarıma uygun olarak büyütülmüştür.

İlerleyen bölümlerde süperörgü olarak büyütülen bu yapıların optiksel, yapısal yüzeysel vb. özelliklerini arttırmaya yönelik çalışmalardan bahsedilecektir. Bu sebeple bu bölümde genel olarak Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan MOCVD sistemi ve karakterizasyon alt yapısı ile bahsedilen süperörgü büyütme çalışması kısaca anlatılacaktır.

Süperörgü büyütmesine örnek olması açısından QCL225 numaralı büyütmenin MOCVD ile ilgili tüm büyütme detayları adım adım anlatılacaktır. Bu yapıya ait tabaka bilgileri şu şekildedir; Büyütülen yapı InP alttaş ile örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ tabakaları olup tabakaların sıralaması ve kalınlıkları şu şekildedir; 29/31/31/27/31/21/29/20/32/15/35/12/40/20/48/7/51/8/55/8/56/7/19/38 Å kalın fontta yazılı olanlar $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ diğerleri ise $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ tabakalarına aittir. QCL225 numaralı büyütmeye ait yerinde yansıma ve sıcaklık eğrisi Şekil 4.79'de gösterilmektedir. Süperörgü büyütmelemin de daha önceki tek tabaka büyütmelerinde elde edilen tecrübeler yardımıyla ilk olarak InP alttaş 640 C° büyütme sıcaklığına kadar saniyede ortalama 1C°'lik sıcaklık artışıyla ısıtılmaktadır. Sıcaklığın artırılması esnasında ~200 C° den sonra InP alttaş yüzeyinden kaçan fosfat (P) atomları yüzünden alttaş yüzeyinin bozulmasını engellemek amacıyla reaktöre (dolayısıyla alttaş yüzeyine) PH_3 gazı gönderilmektedir. Sıcaklık büyütme sıcaklığına geldiğinde InP alttaş, bu sıcaklıkta yaklaşık 5 dk PH_3 akışı altında olası yüzey oksitlerinin vs. temizlenebilmesi için bekletilmektedir. Bu aşamadan sonra alttaş yüzeyinden gelecek

olası kusurların büyütülecek tabakalar ilerlemesini engellemek ve büyütmeye daha uygun bir altyapı hazırlamak amacıyla InP ara tabaka büyütülmektedir. Daha öncede açıklandığı üzere kullanılan katkılı alttaş ile üzerine büyütülen katkısız InP ara tabaka arasındaki kırılma indisi farkından dolayı bu aşamada yerinde yansıma grafiğinde bir osilasyon ortaya çıkmaktadır.



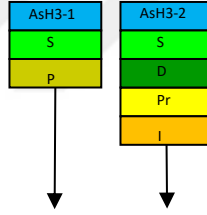
Şekil 4.79 QCL225 numaralı $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ süperörgülerinden oluşan ve kuantum çağlayan lazer aktif bölgesini oluşturan büyütmeye ait yerinde yansıma ve sıcaklık eğrileri.

InP ara tabaka büyütüldükten sonra kullanılacak kaynak gazlarının akışları vs. gibi diğer tüm parametreler ayarlandıktan sonra süperörgü büyütmelerine geçilmiştir. Süperörgü büyütme karakteristikleri bakımından göz önüne alınması gereken birçok parametre bulunmaktadır. Bunlardan ilki büyütme sıcaklığıdır. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ alaşımları farklı büyütme sıcaklıklarına sahiptir. Dolayısıyla ilk bakışta süperörgü kalitesinin iyi olması açısından her iki alaşımında kaliteli büyütülebildiği sıcaklıklarda büyütülmesi akla ilk gelen çözümdür. Bu çözüm birçok geleneksel kuantum kuyulu yarıiletken cihazda çalışmaktadır. Örnek olarak mavi LED yapıları GaN bariyerini ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ kuyusunu içeren çoklu (3-10) kuantum kuyularının oluşturduğu tabakalara sahiptir. MOCVD

tekniki ile epitaksiyel olarak kaliteli bir GaN bileşimi Ga kaynağı olarak TMGa kullanıldığında $\sim 1000-1100\text{ C}^\circ$ aralığında büyüme sıcaklığına sahiptir. Kuyu tabakası olarak büyütilen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alaşımı ise $700-800\text{ C}^\circ$ sıcaklık aralığında kaliteli bir şekilde büyütebilmektedir. Kaliteli mavi LED yapılarında bu iki tabakayı kaliteli bir şekilde bir arada büyütebilmek için her iki tabaka da farklı sıcaklıklarda büyütmektedir (Kim, ve diğerleri 2003). İki tabaka arasındaki sıcaklık farkının çok açılması düşük sıcaklıkta büyütilen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ tabakasının kalitesini de olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklık değişiminden etkilenmeyi en aza indirmek için kullanılan birçok teknikten iki tanesi şu şekildedir; daha düşük sıcaklıktaki büyütme süreçlerinde daha fazla pirolize uğrayan (TEGa) kaynaklar kullanılması ve değişik büyüme teknikleri kullanılmasıdır. Toplam kuantum kuyu ve bariyer sayısı göz önüne alındığında tabakalar arasındaki çok yüksek olmayacak sıcaklık değişimi toplam büyüme süresini dramatik bir şekilde etkilememektedir. Fakat tipik bir kuantum çağlayan lazer yapısı göz önüne alındığında yaklaşık 900 tabaka olduğu varsayımıyla bu tabakalar arasında sıcaklık değişimi ve stabilizasyonu için bekleme yapıldığında toplam büyüme süresi dramatik bir şekilde artacak ve hem zaman hem de kaynak açısından sürdürülemeyen bir durum ortaya çıkacaktır. Tüm bu nedenlerden dolayı tez çalışması kapsamında $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ alaşımlarının büyütülmesinde $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ alaşımına göre kısmen yüksek $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ alaşımına göre ise kısmen alçak olacak tek bir sıcaklık ile büyüme yapılmıştır.

Süperörgü büyütme süreçlerinde büyüme karakteristikleri bakımından göz önüne alınması gereken bir diğer önemli parametre ise detayları ve açıklamaları daha önceki bölümlerde yapılan V/III oranıdır. Sıcaklıkta olduğu gibi $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ alaşımlarının ikisi de çok farklı V/III oranı karakteristiğine sahiptir. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ alaşımı yüksek V/III oranı ile kaliteli bir şekilde büyütülürken kaliteli $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ alaşımı ise sebepleri daha önce açıklandığı üzere kısmen düşük V/III oranına ihtiyaç duymaktadır. Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde MOCVD sisteminin kurulum aşamasında tek hat olarak kurulan AsH_3 gazı hattı ile yapılan süperörgü büyütme süreçlerinde bu problemi çözmek için iki farklı çözüm bulunmaktadır. Bunlardan ilki her bir tabaka arasında V/III oranını değiştirmek için AsH_3 gaz akışı değiştirmektir. Bu öneri her ne kadar bir çözüm olarak görülse de büyüme açısından sebepleri sıcaklık değişimi kısmında açıklandığı üzere pek mümkün değildir. Diğer bir çözüm ise tıpkı sıcaklıktaki gibi her iki alaşımın ideal

V/III oranı değerlerinin arasında tek bir değer ile iki farklı tabakayı büyütmektir. Bu öneri ilkinde göre biraz daha makul görülse de V/III oranı katkılama seviyeleri, arayüz keskinliği ve kristal kalitesi bakımından çok önemli bir parametre olduğundan yapılan süperörgü büyütmelerde çok başarılı sonuçlar vermemiştir. Bu sebeple doktora tez çalışması kapsamında çalışmaların desteklendiği 0573.STZ.2013-2 numaralı ve Kızılötesi Uzun Dalgaboylu Kuantum Çağlayan Lazerler başlıklı Aselsan ve Sanayi ve Ticaret Bakanlığı destekli SAN-TEZ projesi yardımıyla MOCVD sistemine ikinci bir AsH₃ hattı kurulmuştur. Kurulan AsH₃ hattının detayları önceki bölümlerde paylaşılmış olup özel olarak tasarlanıp düşük V/III oranına sahip tabaka büyütmelerde kullanılmak üzere diğer AsH₃ hattında olmayan kütle akış kontrolcülerini ile birlikte kurulumu yaptırılmıştır. Şekil 4.80’ da iki AsH₃ hattına ait dizayn şematik olarak gösterilmektedir. MOCVD sisteminde yapılan bu modifikasyon ile her iki tabakanın ihtiyaç duyduğu farklı V/III oranları sağlanmış olup hem büyütmeye süresini trajik bir şekilde uzatmadan, hem de tek bir akış değerlerini kullanarak süperörgü kalitesini düşürmeden süperörgü büyütmeleri yapılabilmektedir.



Şekil 4.80 MOCVD sisteminde kurulu bulunan yüksek (AsH₃_1) ve düşük (AsH₃_2) V/III oranlı tabaka büyütmelerinde kullanılan AsH₃ hatlarının şematik gösterimi. Standart hidrit hatlarında sadece 2 adet kütle akış kontrolcüsü bulunurken modifikasyon sonrası 4 adet kütle akış kontrolcülü hat eklenmiştir.

Süperörgü büyütmelerde kullanılacak tek bir sıcaklık değeri ve iki adet V/III oranı değerinin altında yatan fiziksel nedenler yukarıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır. InP ara tabakası büyütülüp kaynak gaz akışlarının ayarlanması ve stabilizasyon için beklendikten sonra süperörgü büyütmelerine geçilmiştir. Geçiş esnasında yüzeye akışı sağlanan PH₃ gazı kapatıldıktan birkaç saniye sonra süperörgü büyütmelerinin ilk tabakası olan In_{0.53}Ga_{0.47}As büyütme için AsH₃_1, TMGa ve TMIn valfleri aynı anda açılmaktadır. Bu geçiş te kritik bir öneme sahiptir; eğer PH₃ gazı kapatılmadan veya

kapatıldıktan çok kısa bir süre içerisinde AsH_3 valfi açılırsa yüzeyde çok ince bir $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ tabakası oluşacağından üzerine büyütülecek tabakaları genel özellikler bakımından olumsuz yönde etkileyecektir. Geçiş sırasında iki kaynağın açılması arasındaki süre çok uzarsa bu sefer daha önce açıklandığı üzere InP yüzeyinden fosfat atomları kaçacağından epitaksiyel büyütme için uygun olmayan pürüzlü bir yüzey oluşacaktır.

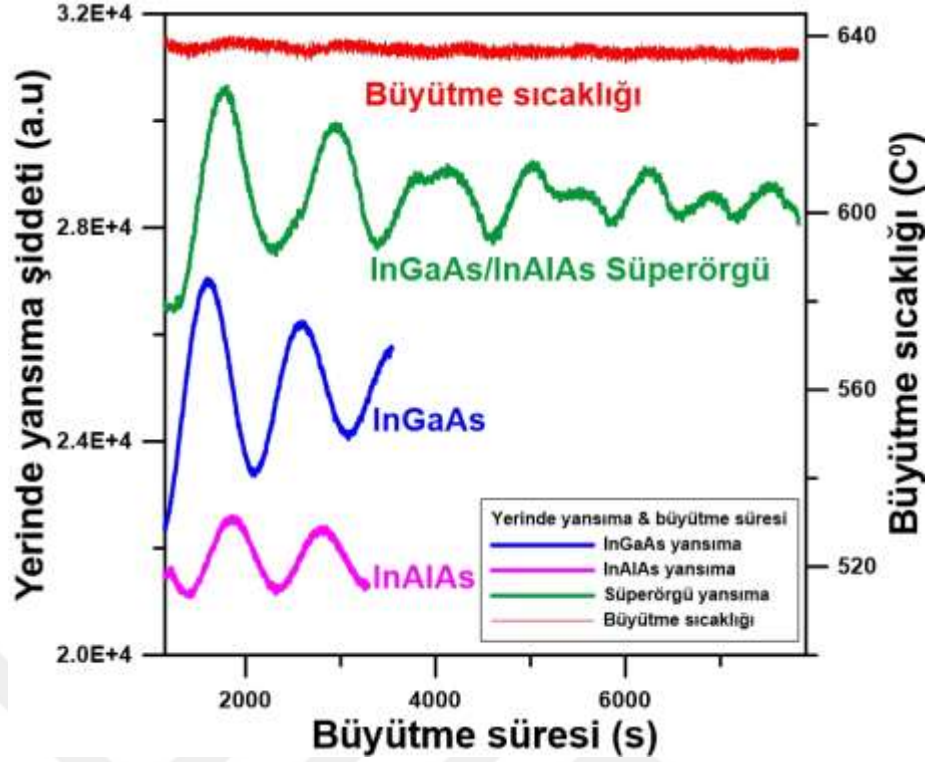
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ tabakası büyütüldükten sonra TMGa ve TMIIn valfleri kapatılırken bu tabakada As kaynağı olarak kullanılan AsH_3_1 valfi $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ büyütmesi başlayana kadar yüzeyden As atomlarının kaçışını engellemek için açık bırakılmaktadır. Reaktör stabilizasyonu ve büyütülen $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ yüzeyinin dengesi açısından 5 saniyelik bir bekleme süresi ardından $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ büyütmesine geçilmiştir. Her iki tabakadan sonra uygulanan bekleme süresi optiksel, yapısal ve arayüz kalitesini ciddi miktarda etkilediğinden bu parametreye ait parametrik çalışmalar yapılmıştır ve bir sonraki bölümde detaylı olarak tartışılacaktır. $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ büyütmesi için ilk önce AsH_3_1 valfi kapatılarak TMIIn, TMAI ve AsH_3_2 valfleri aynı anda açılmaktadır. Bu tabaka büyütüldükten sonra da aynı şekilde AsH_3_2 valfi $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ tabaka büyütmesi başlanana kadar açık bırakılmaktadır. Kuantum çağlayan lazer yapısı aktif ve enjektör bölgesi büyüttmeleri bu şekilde hazırlanan reçetelere göre bir birini takip eden tabakaların farklı sürelerde büyütülmesi ile devam etmektedir. Şekil 4.79 incelendiğinde yerinde yansıma ölçümü kimi zaman periyodik olmayan davranışlar göstermektedir. Bu davranışın sebebi daha önce detaylı bir şekilde anlatılan $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ tabakalarının kırılma indisi farkından kaynaklanmaktadır. Eğer büyütülen her bir tabaka eşit kalınlıkta olsa idi daha önce karşılaştığımız yerinde yansıma ölçümlerine benzer bir davranış ortaya çıkması muhtemel olabilirdi. Fakat genel davranış itibarı ile osilasyonlarda her hangi bir aşağı yönlü salınım olmadığından büyütülen kuantum çağlayan lazer yapısında büyütme açısından bir sıkıntı olmadığı söylenebilmektedir. Son tabaka olan $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ tabakası büyütüldükten sonra reaktör sıcaklığı azaltılırken AsH_3_2 valfi açık bırakılarak diğer tüm büyüttmelerde olduğu gibi yüzeyden As atomlarının kaçışı engellenmektedir.

Bu bölümde kuantum çağlayan lazer aktif bölge büyüttmelerinde göz önüne alınacak en önemli parametrelerden olan sıcaklık ve V/III oranı $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ için farklı davranışlar gösterdiğinden yapılan büyüttmelerde dikkat edilen noktalara

detaylı bir şekilde değinilmiştir. Ayrıca kuantum çağlayan lazer yapısını oluşturan ve tez çalışması kapsamında büyütülen örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ süperörgülerinin büyütülmesi her aşaması ile detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

4.2.7. Örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ süperörgü büyütmelerine tabakalar arası bekleme süresi etkisi

Bu bölümde daha önceki bölümlerde kaliteli bir şekilde büyütüldüğü gösterilen kuantum çağlayan lazer yapılarının aktif bölgesini oluşturan örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ süperörgülerinin kristal, optik ve arayüz kalitesini arttırmak için tabakalar arasındaki bekleme süresine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Büyütülen yapı örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ tabakaları olup tabakaların sıralaması ve kalınlıkları şu şekildedir; 29/**31**/31/**27**/31/**21**/29/**20**/32/**15**/35/**12**/40/**20**/48/7/51/**8**/55 /**8**/56/7/19/**38** Å kalın (bold) olanlar $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ diğerleri ise $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ tabakalarına aittir. Bu çalışmada birçok büyütme yapılmış olup çalışmanın mantığını ve sistematüğini açıklamak amacıyla 3 adet büyütme (QCL119-120-123) ile ilgili detaylar paylaşılmıştır. Büyütmelerde her bir tabaka büyütüldükten sonra 1.5s, 3s ve 6s beklenmiştir, bekleme süresi boyunca reaktöre sadece büyütülen tabakaya ait (AsH_3_1 veya AsH_3_2) AsH_3 gazı gönderilmiştir. Büyütme ve bekleme süresince kullanılan gazlara ait valflerin pozisyonu ve bekleme süresine ait şematik Şekil 4.81 ile gösterilmektedir.

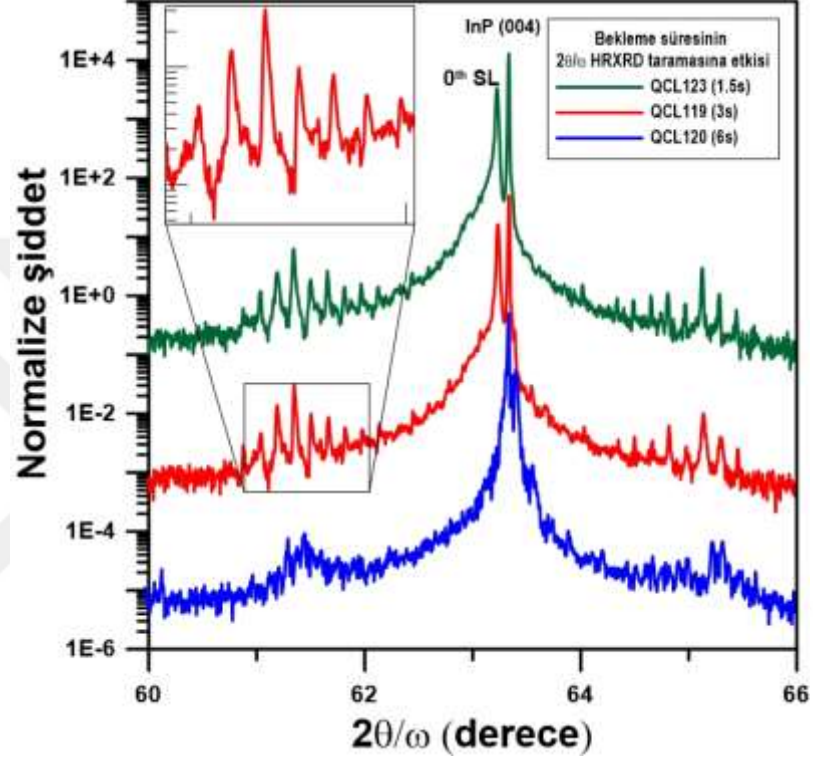


Şekil 4.82 Tek tabaka $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (mavi), $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (eflatun) ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ süperörgülerine (yeşil) ait yerinde yansıma ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri (Demir ve Elagöz 2016).

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere yerinde yansıma ölçümü art arda büyütülen tabakalar arasındaki kırılma indisi farkına dayandığı için her bir tabaka büyütülmesinde kullanılan alttaşın aynı olması durumunda aynı noktadan başlamasına rağmen farklı davranış göstermektedir. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ tabakasına ait yansıma eğrisi ilk aşamada yukarı yönlü bir davranış gösterirken $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ tabakasına ait yansıma eğrisi aşağı yönlü bir davranış göstermektedir. Bu iki farklı davranışa sahip tabakalar düzenli olmayan bir kalınlık profili ile süperörgü büyütecek şekilde üst üste büyütüldüğünde Şekil 4.82’de gösterilen davranış ortaya çıkmaktadır. Burada süperörgü yansımasında osilasyon şiddetinin zarf fonksiyonu şeklinde azalması, büyütülen süperörgü kristalinin lazer ışığını soğurduğunun bir göstergesi olup büyütülen örnek ile ilgili yüzey bozulması, kristal kalitesinde azalma gibi herhangi bir sıkıntı olmadığını ortaya koymamaktadır.

QCL119 (kırmızı), QCL120 (mavi) ve QCL123 (yeşil) numaralı numunelere ait $2\theta/\omega$ HRXRD taraması Şekil 4.83’da gösterilmektedir. Şekilde en yüksek şiddet InP (InP (004)) alttaşına ait iken ikinci en yüksek şiddetli pikler ise sıfırıncı (0^{th}) süperörgü

pikleridir. Şekil içindeki büyütülmüş bölge ise QCL119 numaralı numuneye aittir. Genel olarak her 3 örneğin sıfırıncı süperörgü piki InP alttaş pikinden ayrılmıştır ki bu ayrılma büyütülen süperörgü ile InP alttaş arasında çok az miktarda da olsa örgü uyumsuzluğu (aradaki açı farkına göre) olduğunu göstermektedir. 1.5s, 3s ve 6s bekleme süreleri için örgü uyumsuzlukları sırasıyla %0.157, %0.146 ve -%0.102 olarak hesaplanmıştır.

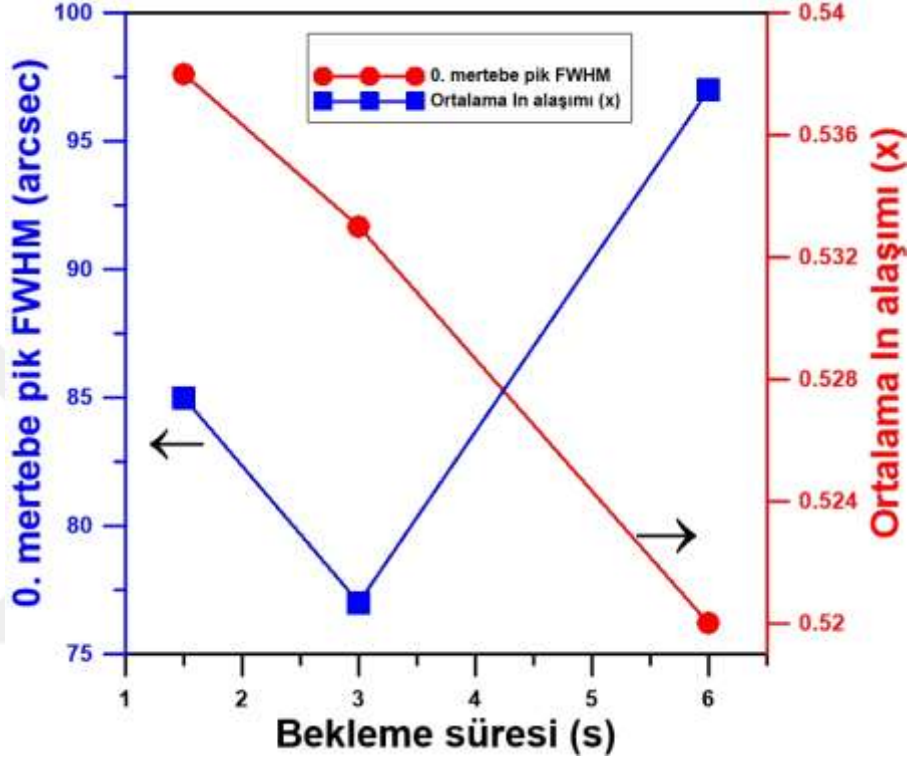


Şekil 4.83 QCL119 (kırmızı), QCL120 (mavi) ve QCL123 (yeşil) numaralı numunelere ait $2\theta/\omega$ HRXRD taraması. Tarama sonuçlarının kıyaslanması amacıyla QCL119 ve QCL123 bir katsayı ile çarpılmıştır. Büyütülen grafik QCL119'a aittir (Demir ve Elagöz 2016).

QCL119 (3s) ve QCL123 (1.5s) numaralı örneklerin her ikisi de belirgin, periyodik ve şiddetli süperörgü piklerine sahiptir. Bu özellikler genel olarak süperörgülerin iyi kristal kalitesine sahip olduklarının göstergesidir. QCL120 (6s) numaralı örnek ise diğerlerine kıyasla belirsiz ve keskin olmayan süperörgü piklerine sahiptir, hatta süperörgü piki yoktur denebilir. Ayrıca tüm örnekler aynı kalınlığa sahip olmalarına rağmen 6s bekleme süresi numunenin sıfırıncı süperörgü pik şiddetini yani süperörgü kristal kalitesini kötü yönde etkilemiştir. Denklem [4.3] kullanılarak örneklerin periyot

kalınlığı QCL123 için 66.1 nm ve QCL119 için 65.8nm olarak hesaplanmıştır. QCL120 için belirgin süperörgü piki olmadığından hesaplama yapılamamıştır.

Değişen bekleme süresine karşılık süperörgülerin ortalama In alaşım oranı (kırmızı) ve sıfırıncı süperörgü piki FWHM değerlerinin (mavi) karşılaştırması Şekil 4.84’ de gösterilmektedir.

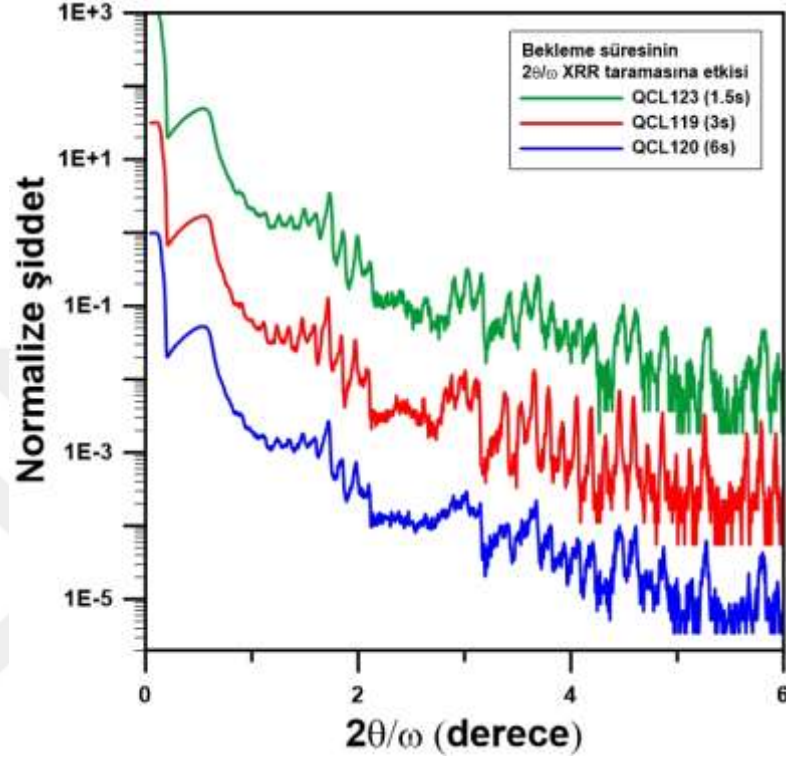


Şekil 4.84 Sıfırıncı mertebeli (0^{th}) süperörgü piki FWHM değeri (mavi) ve süperörgüdeki ortalama In alaşımının (kırmızı) bekleme süresi ile değişimi (Demir ve Elagöz 2016).

Şekil 4.84’den açıkça görüleceği üzere en düşük FWHM değeri (77arcsec) 3s bekleme süresine ait olan QCL119 numaralı numuneye aittir. 3s’den sonra artan bekleme süresi için süperörgü kristal kalitesi azalmaktadır. Ortalama In alaşım oranı ise artan bekleme süresi ile azalmaktadır. Buradan bekleme süresinin artmasının büyütülen film yüzeyinden In atomlarının uzaklaştığı yorumu yapılabilir. Ayrıca bu analiz sonucunda süperörgüye ait sıfırıncı pik pozisyonunun bekleme süresi ile ayarlanabileceği görülmektedir.

Karakterizasyon kısmında açıklandığı üzere x-ışınları XRR taramalarında XRD taramalarından farklı olarak arayüzlerden yansıyan ışınların girişimini

oluşturmaktadır. Dolayısıyla bu tarama ile yüzey ve arayüz pürüzlülüğü ve tabaka kalınlıkları hakkında çok daha detaylı bilgi elde edilmektedir. QCL119 120 ve 123 numaralı örnekler için XRR $2\theta/\omega$ taramaları $0^\circ < \theta < 6^\circ$ aralığı Şekil 4.85’de gösterilmektedir.

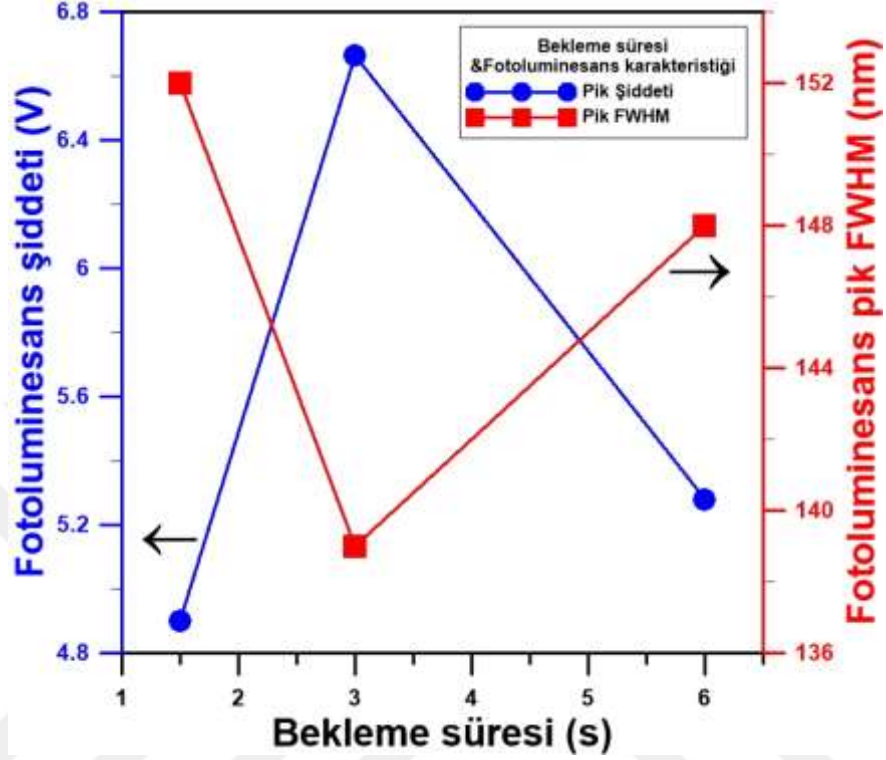


Şekil 4.85 QCL119 (kırmızı), QCL120 (mavi) ve QCL123 (yeşil) numaralı numunelere ait $2\theta/\omega$ XRR taraması. Tarama sonuçlarının kıyaslanması amacıyla QCL119 ve QCL123 bir katsayı ile çarpılmıştır (Demir ve Elagöz 2016).

XRR taramalarında her örnek belirgin Kiessig desenleri göstermekle birlikte QCL119 numaralı örnek 3s bekleme süresi ile en şiddetli ve en dar FWHM değerlerine sahiptir. Bu sonuçlar HRXRD taramaları ile örtüşmektedir.

Fotoluminesans ölçümü yapıların optik özelliklerinin ve band kenarı ile ilgili özelliklerinin anlaşılmasında kullanılan hızlı, pratik ve örneğe zarar vermeyen bir tekniktir. Çalışma mantığı gereği bantlararası taşıyıcı rekombinasyonu ile ilgili sonuç veren bu teknik kuantum çağılayan lazerler gibi tek kutuplu cihaz yapıları hakkında direkt bilgi vermezler. Karakterizasyon bölümünde detayları anlatıldığı üzere bu çalışmada fotoluminesans ölçümleri temel olarak yapıların optik kalitesini karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. Bu amaçla da Şekil 4.86 QCL119, 120 ve QCL123

numaralı örnekler için bekleme süresine karşılık fotolüminesans pik şiddeti ve pik FWHM gibi fotolüminesans karakteristiklerinin oda sıcaklığında değişimini göstermektedir.



Şekil 4.86 Tabakalar arası bekleme süresinin değişimine karşılık fotolüminesans pik şiddeti (mavi) ve pik FWHM (kırmızı) değerinin davranışı (Demir ve Elagöz 2016).

1.5s bekleme süresi için fotolüminesans şiddeti ve pik FWHM değerleri sırasıyla 4.9V ve 152 nm olarak belirlenmiştir. 3s bekleme süresi ile büyütülen kuantum çağılayan lazer yapısı için fotolüminesans şiddeti 6.7V değerine yükselirken pik FWHM değeri ise 139 nm'ye düşmüştür. Bu değerler en iyi optik kalitenin, arayüz keskinliğinin, en az sayıda hetero arayüz saçılmasının ve en az oranda alaşım dalgalanmasının 3s bekleme süresi ile elde edildiğini göstermektedir. 6s'ye arttırılan bekleme süresi için fotolüminesans şiddeti 5.2V değerine azalırken FWHM değeri de 148 nm'ye artmıştır. Fotolüminesans ölçümleri her ne kadar incelenen bu örneklerin lazer özellikleri için bilgi vermese de yapıya ait ışıma şiddeti ve FWHM değerleri yapıdaki kusurlardan, safsızlıklardan ve arayüz kalitesinden ortaya çıkan ışımasız geçişlerden (non-radiative transitions) etkilenmektedir.

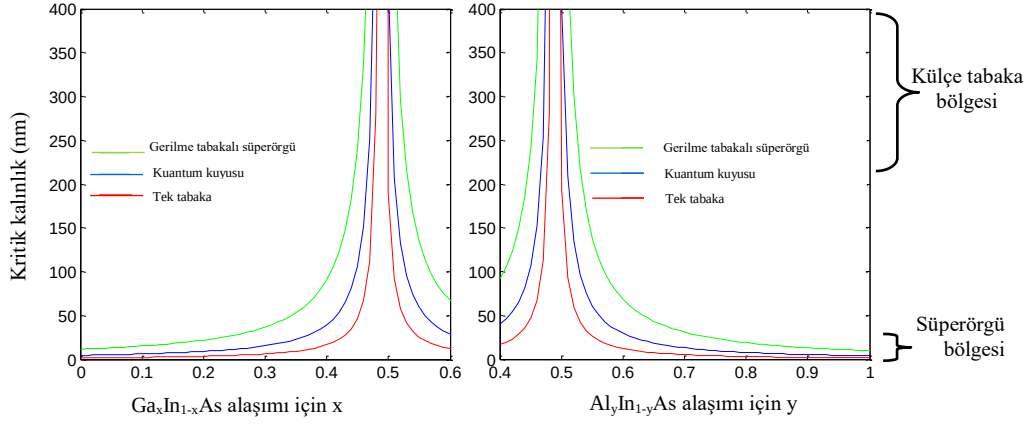
Özetle bu bölümde örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ yapıları kuantum çağılayan lazer aktif bölgesini oluşturacak şekilde MOCVD ile büyütülmüştür. Büyütmede her bir kaynak için bir adet metalorganik kullanılırken $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ tabakalarının farklı V/III oranlarına sahip olması nedeniyle MOCVD reaktörü modifiye edilerek AsH_3 kaynağı olarak iki adet ayrı hat kullanılmıştır. Büyütülen yapıda her bir $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ tabakasından sonra 1.5s, 3s ve 6s beklenmiştir. Bekleme süresince reaktöre sadece ilgili yapıya ait AsH_3 gazı ve taşıyıcı gaz akışı sağlanmıştır. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda 3s bekleme süresinin belirlenen büyütme şartlarında en iyi yapısal (HRXRD) optiksel (fotoluminesans) ve arayüz (XRR) kalitesini verdiği belirlenmiştir.

4.2.8. Örgü uyumsuz ($x \neq 0.53$, $y \neq 0.52$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ tabakalarının büyütülmesi ve karakterizasyonu

Bu bölümde önceki bölümlerde anlatılan gerilme dengeli ve kısa dalgaboylu kuantum çağılayan lazer yapıları için örgü uyumsuz $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \neq 0.53$) ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ($y \neq 0.52$) tabakalarının MOCVD ile büyütülmesi ve karakterizasyonundan bahsedilecektir. Bu yapılar başarılı bir şekilde büyütülüp karakterize edildikten sonra kısa dalgaboylu kuantum çağılayan lazer yapıları için süperörgü büyütmelerine geçilecektir.

Örgü uyumsuz tek tabaka $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \neq 0.53$) ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ($y \neq 0.52$) külçe tabakalarının kalınlıkları yerinde yansıma ölçümleri ile belirlenmiştir. Ayrıca her bir alaşımdaki In oranları (x ve y) ve alttaş ile epi tabaka arasındaki örgü uyumsuzlukları da HRXRD ölçümlerinden sonra yapılan dinamik x-ışını simülasyonları yardımıyla elde edilmiştir. Yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip tabakaların kalınlıklarının HRXRD tekniğiyle ölçülmesi çok zordur. En önemli problem örgü rahatlamasıdır (lattice relaxation), gerilme altında büyütülen epikristal kalınlığı kritik kalınlığı aştığında kristal örgü sabiti artık alttaş örgü sabitini taşıyamaz ve rahatlama oluşarak yapı kendi rahatlamış örgü sabitiyle büyümeye devam eder. Bu durumda daha önce gösterilen HRXRD taramalarında elde edilen kalınlık osilasyonları çok net bir biçimde ortaya çıkmaz veya çıksa bile yapı hakkında elde edilmek istenen doğru bilgiyi veremez. InP alttaş üzerine büyütülecek tek tabaka $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ ve $\text{Al}_y\text{In}_{1-y}\text{As}$ üçlü alaşımları için (kırmızı), kuantum kuyuları için (mavi) ve gerilme altındaki süperörgü tabakaları için

(yeşil) değişen In ve Al alaşım oranlarına göre kritik kalınlığın değişimi Şekil 4.87’de gösterilmektedir (Evans, Allan Joseph 2008).



Şekil 4.87 Tek tabaka $Ga_xIn_{1-x}As$ (a) ve $Al_yIn_{1-y}As$ (b) üçlü alaşımları için (kırmızı), kuantum kuyuları için (mavi) ve gerilmiş süperörgü tabakaları için (yeşil) değişen In ve Al alaşım oranlarına göre kritik kalınlığın değişimi (Evans, Allan Joseph 2008).

Şekil 4.87’de yatay eksenler $Ga_xIn_{1-x}As$ için Ga alaşımını ve $Al_yIn_{1-y}As$ için Al alaşımını düşey eksenler ise değişen alaşım oranlarının kritik kalınlıklara etkisini göstermektedir. $x = 0.47$ ve $y = 0.48$ için InP alttaş üzerine büyütülecek tek tabaka örgü uyumlu InGaAs ve InAlAs kalınlıklarında teorik olarak herhangi bir sınırlama yoktur fakat bu değerlerden farklı alaşım oranları için epikristal kritik kalınlığı çok hızlı bir şekilde azalmaktadır. Tek tabaka yerine kuantum kuyusu olarak büyütülen InGaAs ve InAlAs alaşımları için yatay eksenindeki serbestlik derecesi bir miktar artmaktadır, yani bu durumda kısmen gerilme altında görece daha kalın yapılar büyütülebilmektedir. InGaAs ve InAlAs alaşımlarının gerilme dengeli süperörgü büyütmelerinde ise yatay eksenindeki serbestlik derecesi oldukça ciddi miktarda artmıştır. Bu durumda x ve y değerleri (alaşımlardaki Ga veya Al oranları) birbirlerini dengeleyici biçimde ayarlanarak çok kalın yapılar herhangi bir rahatlama olmaksızın büyütülebilir. Buradan gerilme dengeli süperörgü büyütmenin kritik kalınlık limitini aşmada kullanılabilecek en önemli tekniklerden birisi olduğu anlaşılmaktadır.

Gerilme dengeli süperörgü büyütmelerinden önce ilk olarak InP alttaş üzerine yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip InGaAs ve InAlAs büyütme yapılmıştır. Yapılan büyütmelelere ait büyütme parametreleri Çizelge 4.14’te gösterilmektedir.

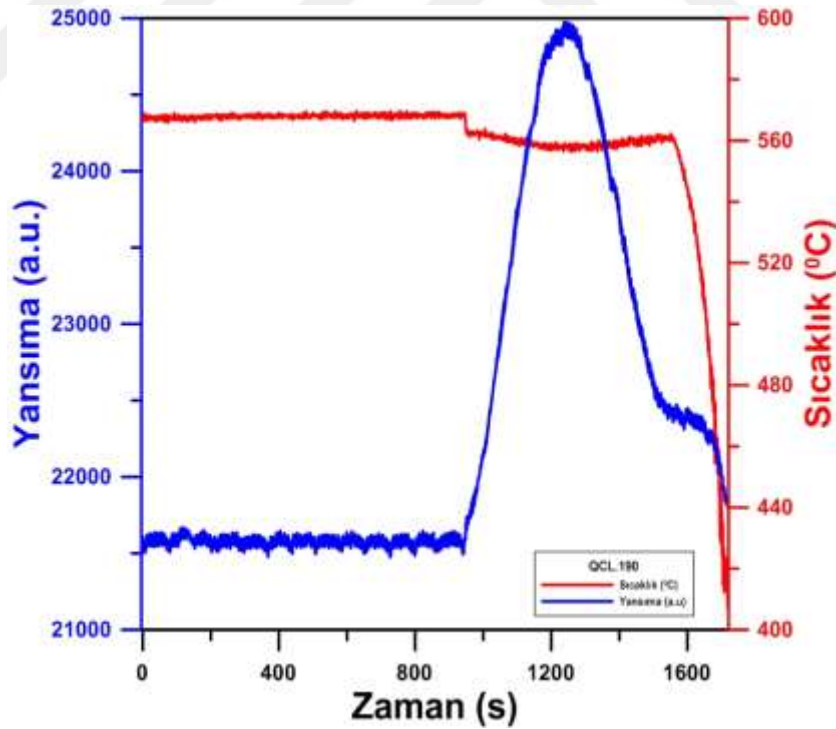
Çizelge 4.13 Yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip InGaAs ve InAlAs büyütmelerine ait büyütme parametreleri

Numune Numarası	TMIn akışı (sccm)	TMAI akışı (sccm)	TMGa akışı (sccm)
QCL190	37	-	0.85
QCL192	39	-	0.85
QCL229	42	-	0.85
QCL191	42	15	-
QCL197	42	17	-
QCL230	42	20	-

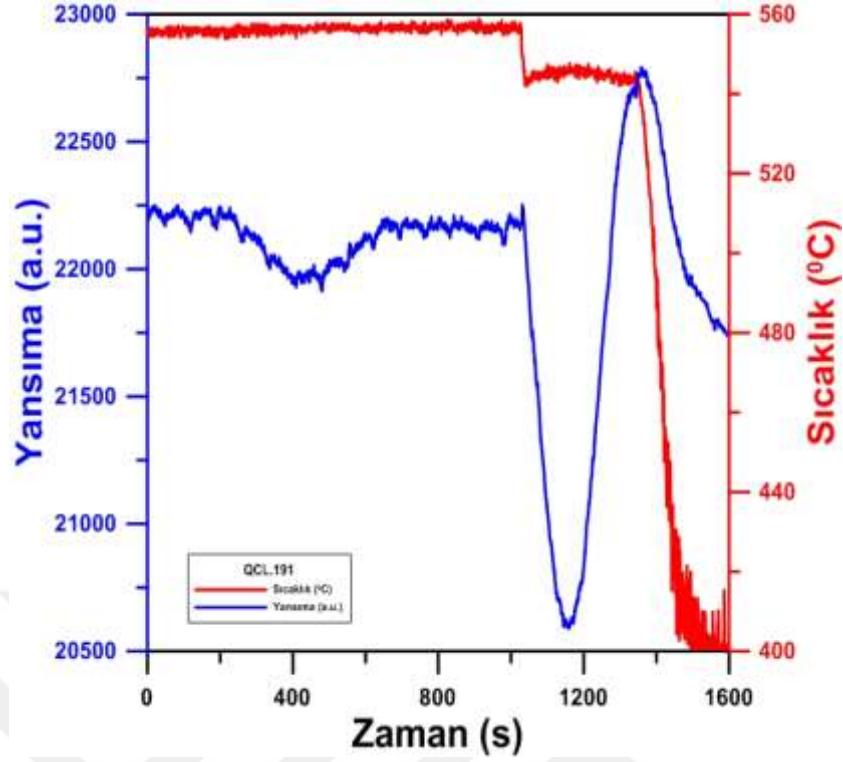
Çizelge 4.13 incelendiğinde ilk önce InGaAs alaşımındaki In oranını arttırmak (veya Ga oranını azaltmak) için TMIn akışı 37-42 sccm aralığında değiştirilmiştir. Bu sırada TMGa akışı değiştirilmemiştir. Burada dikkat edilecek olursa TMGa akışı daha önce düşük büyüme oranlı InGaAs büyütmelerindeki akıştan farklıdır. Tez çalışmasının bu kısmında TMGa kütle akış kontrolcülerinden kaynağa (source) ait olan kontrolcü, gaz akışlarını daha hassas kontrol etmek amacıyla 200 mln/dk (dakikada normal mililitre) maksimum akışlı kütle akış kontrolcüsü 20 mln/dk maksimum akışlı kütle akış kontrolcüsü ile değiştirilmiştir. Her ne kadar gaz akışı eski büyütmelere oranla farklı görülse de net akış aynı olup sadece gaz akışının kontrol hassasiyeti eskiye kıyasla 10 kat daha iyidir. Net akışın aynı olduğu hem yerinde yansıma ölçümlerinden elde edilen büyüme oranı hesaplamalarıyla hem de diğer tekniklerle karşılıklı olarak kontrol edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi In kaynağı bir adet olduğundan TMIn akışını belirli bir seviyeye çıkardıktan sonra sabitleyip InAlAs büyütmelerinde Al oranını arttırmak (veya In oranını azaltmak) için TMAI akışı 15-20 sccm aralığında değiştirilmiştir. Örnek olması amacıyla her iki alaşım büyütmesinden birer tane yerinde yansıma ölçümü grafiği konulmuştur. Şekil 4.88 ve Şekil 4.89 sırasıyla QCL190 ve QCL191 numaralı InGaAs ve InAlAs büyütmelerine ait yerinde yansıma ölçümlerini göstermektedir. Her iki büyütmede de bir osilasyon tamamlandığında (<200nm) büyütme sonlandırılmıştır. Kalınlıklar daha önce belirtilen yüksek örgü uyumsuzluğu kaynaklı erken rahatlamadan dolayı bilinçli olarak küçük tutulmuştur. Ayrıca yapılan büyütmelerde InGaAs ve InAlAs alaşımları InP alttaş üzerine InP ara tabaka büyütüldükten sonra direk olarak büyütülmüştür. Cihaz yapımında eğer

aralarında yüksek örgü uyumsuzluğu olan kalın külçe yapılar kullanılacak araya süperörgü, düşük sıcaklık ara tabakası veya kademeli geçişlerden oluşan birden fazla geçiş tabakası konularak büyütülmektedir (Li, ve diğerleri 2017), (E.L. ve A.F. 2010).

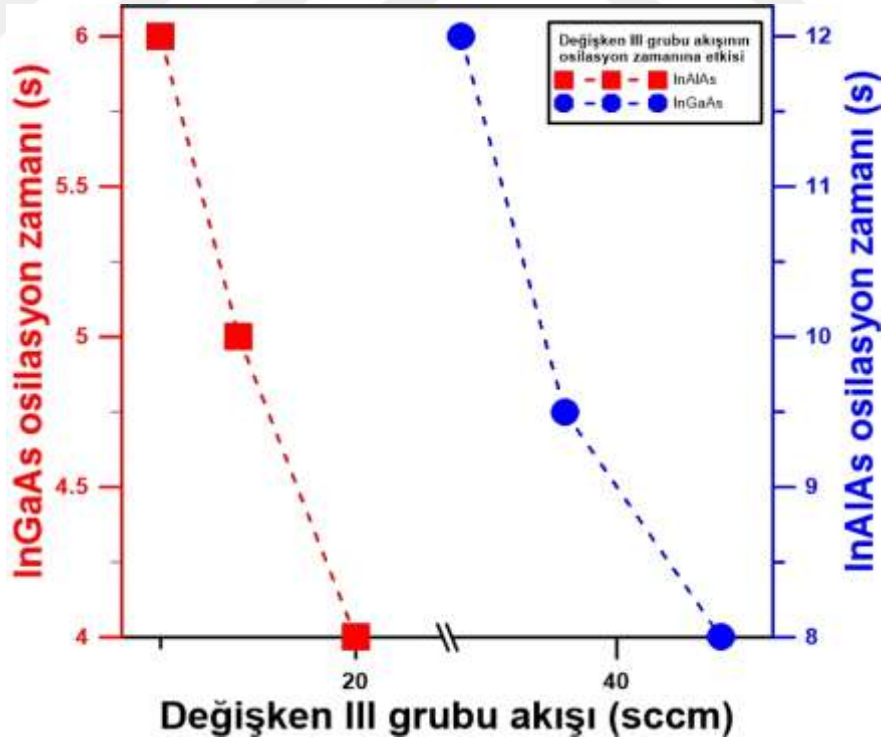
Şekil 4.88 ve Şekil 4.89 incelendiğinde yansıma karakteristiklerinin birbirlerine zıt olduğu açıkça görülmektedir. QCL190 numaralı InGaAs büyütmesinde yukarı doğru bir davranış gözlenirken QCL191 numaralı InAlAs büyütmesinde aşağı yönlü bir davranış gözlenmektedir. Daha önce de detaylı bir şekilde açıklandığı üzere bu davranışlar tamamen iki tabaka arasındaki kırılma indisi farkına bağlı olduğundan her iki örnekteki In (dolayısıyla Ga ve Al) alaşımlarına oldukça bağımlıdır. Diğer tüm büyütmelerde olduğu gibi büyütme tamamlandığında tüm III grubu kaynaklar kapatılırken yüzeye AsH_3 akışı belirli bir sıcaklığa ($<300\text{ }^{\circ}\text{C}$) kadar devam etmektedir. Ayrıca beklenildiği gibi tüm örnekler için artan TMI (InGaAs için) ve TMAI (InAlAs için) akışları büyüme oranını arttırdığından bir osilasyonu tamamlamak için geçen süre azalmıştır. Şekil 4.90 artan değişken kaynak akışlarına göre bir tam osilasyon elde etmek için geçen sürelerle ait grafiği göstermektedir.



Şekil 4.88 Yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip QCL190 numaralı InGaAs büyütmesine ait yerinde yansıma (mavi) ve sıcaklık eğrisi (kırmızı).



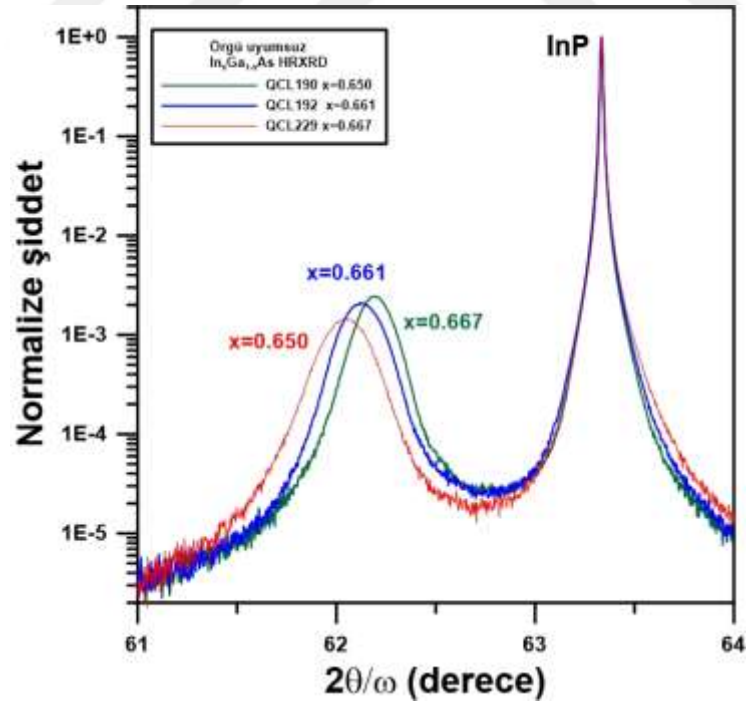
Şekil 4.89 Yüksek örgü uyumsuzluğuna sahip QCL191 numaralı InAlAs büyütmesine ait yerinde yansırma (mavi) ve sıcaklık eğrisi (kırmızı).



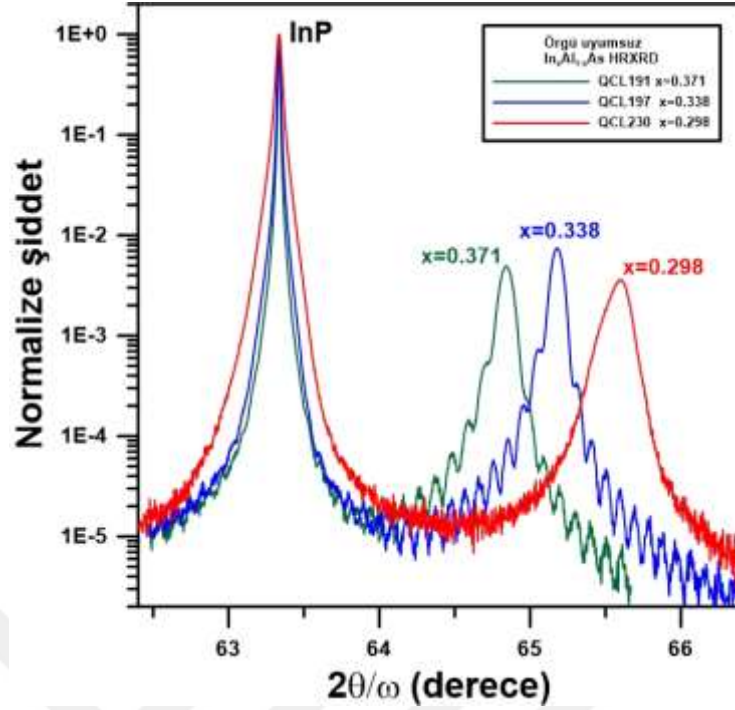
Şekil 4.90 Çizelge 4.13 ile verilen değişken III grubu akışının InGaAs (kırmızı) ve InAlAs (mavi) büyütmelelerinde yerinde yansırma eğrilerinde tam bir osilasyon için geçmesi gereken süreye etkisi .

Şekil 4.90 incelendiğinde hem örgü uyumsuz InGaAs için hem de InAlAs büyütmeleeri için artan III grubu (InGaAs için TMIIn, InAlAs için TMAI) kaynak akışları tam bir osilasyon için geçen zamanı hızlı bir şekilde düşürmektedir ve bu davranış artan büyüme oranının etkisidir. InGaAs ve InAlAs büyütmeleerinin osilasyon süreleri kabaca karşılaştırıldığında InAlAs InGaAs'ın iki katına yakındır. Bu fark daha önce örgü uyumlu büyütülen yapılardaki dengeli III grubu kaynak akışlarından farklı olarak örgü uyumsuz tabakalar büyütebilmek için arttırılan TMIIn ve TMAI akışlarından kaynaklanmaktadır.

Örgü uyumsuz olarak büyütülen InGaAs ve InAlAs alaşımlarına ait normalize $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları sırasıyla Şekil 4.91 ve Şekil 4.92'de gösterilmektedir. Şekil 4.91 incelendiğinde 37-42 sccm aralığında değiştirilen TMIIn akışı, InGaAs alaşımındaki In oranını $x=0.650-0.667$ aralığında değiştirdiği gözlenmektedir. 37 sccm TMIIn akışına sahip $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ ile 42 sccm TMIIn akışına sahip $\text{In}_{0.667}\text{Ga}_{0.333}\text{As}$ alaşımlarının HRXRD taramaları karşılaştırıldığında azalan TMIIn akışı için InGaAs piklerinin şiddetleri artmakla birlikte FWHM değerleri de azalmaktadır ki bu davranış azalan örgü uyumsuzluğunun doğal bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.91 37-42 sccm aralığında değişen TMIIn akışı ile büyütülen InGaAs alaşımlarına ait $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları.



Şekil 4.92 15-20 sccm aralığında değişen TMAI akışı ile büyütülen InAlAs alaşımlarına ait $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları.

Ayrıca artan örgü uyumsuzluğu şekilden açıkça görüleceği üzere InP alttaş pik FWHM değerini de arttırmakta olup, bu davranış yüksek örgü uyumsuzluğunun InP alttaş üzerinde In oranına göre eğilme oluşturmamasından kaynaklanmaktadır (Pal, ve diğerleri 1998) (Panish ve Temkin 1993). Şekil 4.92 incelendiğinde ise 15-20 sccm aralığında değiştirilen TMAI akışının InAlAs alaşımındaki In oranını $x=0.298-0.371$ aralığında değiştirdiği gözlenmektedir. 15 sccm TMAI akışına sahip QCL191 numaralı $\text{In}_{0.371}\text{Al}_{0.629}\text{As}$ ile 20 sccm TMAI akışına sahip QCL230 numaralı $\text{In}_{0.298}\text{Al}_{0.602}\text{As}$ alaşımlarının HRXRD taramaları karşılaştırıldığında artan TMAI akışı için kalınlık osilasyonları çok net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu davranış direk olarak örgü uyumsuzluğunun azalması sebebiyle kusur yoğunluğunun azalmasının bir sonucudur. Ayrıca InGaAs örnekleri için anlatılan InP alttaş pikinin FWHM genişlemesi InAlAs örnekleri için çok daha net bir biçimde görülmektedir.

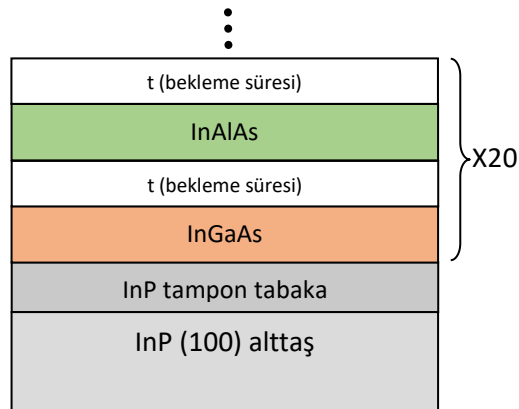
4.2.9. Örgü uyumsuz ve gerilme dengeli $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{As}$ süperörgülerinin büyütülmesi ve karakterizasyonu

Bir önceki bölümde gerilme altındaki ve kısmen rahatlamış tek tabaka $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \neq 0.53$) ve $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ($y \neq 0.52$) yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölümde bu tabakalar ile kısa dalgaboylu ($\lambda \cong 5\mu\text{m}$)

kuantum çağlayan lazer yapıları oluşturulacak şekilde büyütme yapılmış ve karakterize edilmiştir. Aktif bölge büyütme yapılmadan önce bölüm 4.2.5’de açıklanan teknik ile tabaka kalınlıklarını ve büyüme oranlarını belirlemek amacıyla QCL198 ve QCL199 numaralı 2 adet 20 tekrarlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ süperörgü büyütme yapılmıştır. Büyütmelere ait detaylar ve tabaka yapısı sırasıyla Çizelge 4.14 ve Şekil 4.93’de gösterilmektedir. QCL 198 numaralı büyütmede 15s InGaAs büyütme 25s ise InAlAs büyütme yapılmıştır. QCL199 numaralı büyütmede ise InAlAs büyütme süresi sabit tutularak InGaAs tabakasının büyütme süresi 25s’ye arttırılmıştır. Böylece her iki örneğe ait $2\theta/\omega$ HRXRD taramalarından hesaplanan kalınlıklar karşılaştırıldığında aradaki fark 15s fazladan büyütülen InGaAs tabakasına ait olduğundan ilk önce InGaAs daha sonrada InAlAs tabakalarının kalınlıkları ve büyütme sürelerinden yararlanarak her bir tabakaya ait büyüme oranı elde edilecektir.

Çizelge 4.14 Gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapılarındaki tek tabakaların kalınlık ve büyüme oranını HRXRD tekniğiyle ölçebilmek için yapılan süperörgü büyütme yapılarına ait parametreler

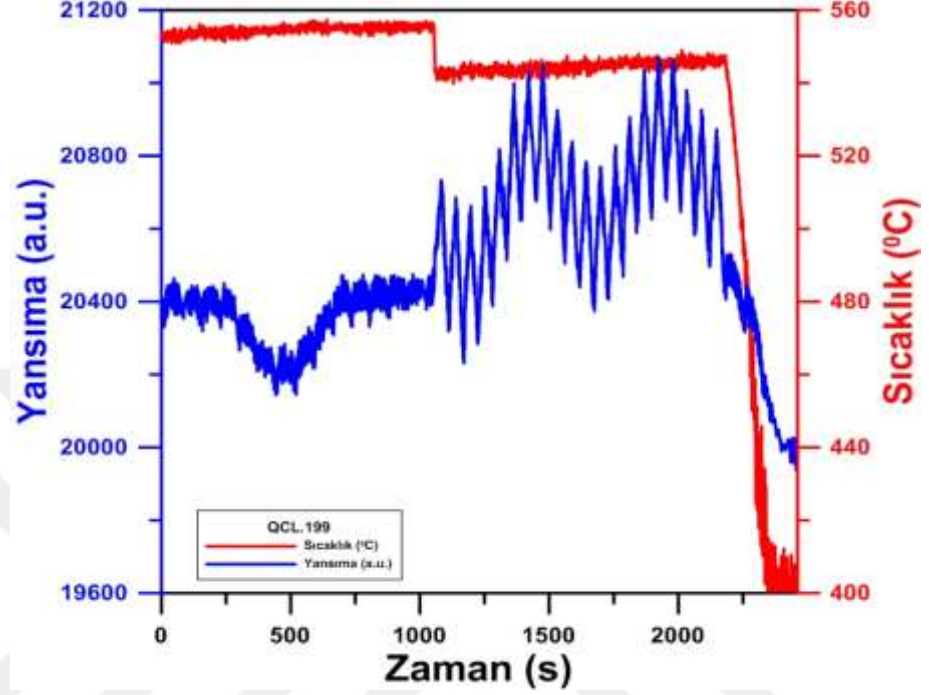
Numune Numarası	InGaAs büyütme süresi (s)	InAlAs büyütme süresi (s)
QCL198	15	25
QCL199	25	25



Şekil 4.93 Gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapılarının kalınlık ve büyüme oranını belirlemek için yapılan büyütme yapılarına ait şematik gösterimi

QCL199 numaralı büyütme yapılarına ait yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) eğrileri Şekil 4.94’de gösterilmektedir. Süperörgü büyütme yapıları başlamadan önce ~ 200 nm

katkısız InP ara tabakası büyütülmüştür. InP ara tabakası büyütülürken şiddeti çok yüksek olmayan bir osilasyonun ortaya çıktığı görülmüştür. Her iki tabaka da (alttaş ve ara tabaka) aynı tip bileşik olmasına rağmen ortaya çıkan bu osilasyonun kaynağı her iki tabaka arasındaki katkılardan kaynaklı kırılma indisi farkıdır.

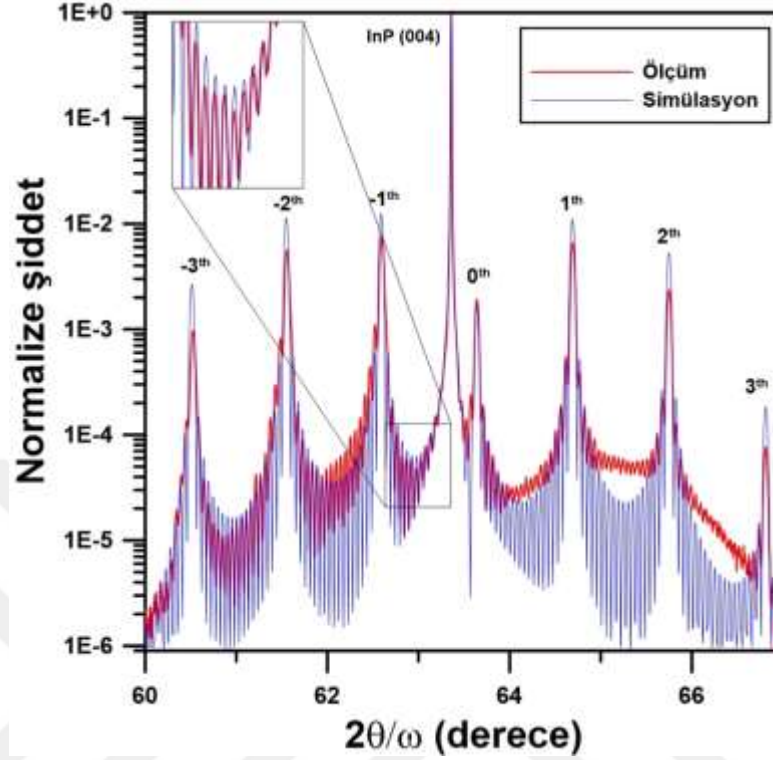


Şekil 4.94 Gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapılarının kalınlık ve büyüme oranını belirlemek için yapılan QCL199 numaralı büyütme sürecinin yansıma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) grafiği.

Şekilden de açıkça görüleceği üzere örgü uyumsuz InGaAs ve InAlAs alaşımları arasındaki kırılma indisi farkından dolayı yansıma davranışları farklıdır. Bu büyütmelerde de büyütülen yüzeyden As atomlarının kaçışını engellemek amacıyla her bir tabakadan sonra o tabakada kullanılan AsH₃ kaynağı kapatılmadan diğer tabaka büyütmesi başlayana kadar açık bırakılmaktadır. Ayrıca her bir tabakadan sonra daha önceki bölümlerde kullanılan büyütme şartlarında ve reaktör ortamında ideal olarak elde edilen 3s bekleme süresi uygulanmıştır.

Her iki büyütme tamamlandıktan sonra yapıların kalınlık ve büyüme oranı analizi için $2\theta/\omega$ HRXRD taramaları yapılmıştır. Örnek olması amacıyla QCL199 numaralı büyütme sürecine ait tarama Şekil 4.95’de gösterilmektedir. Taramada hem süperörgü pikleri hem de kalınlık pikleri belirgin, keskin ve periyodik bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca şekil içinde büyütülerek gösterilen bölgede de görüleceği üzere iki süperörgü

arasında toplamda 20 adet (süperörgü tekrar sayısı) belirgin osilasyonlar ortaya çıkmıştır.



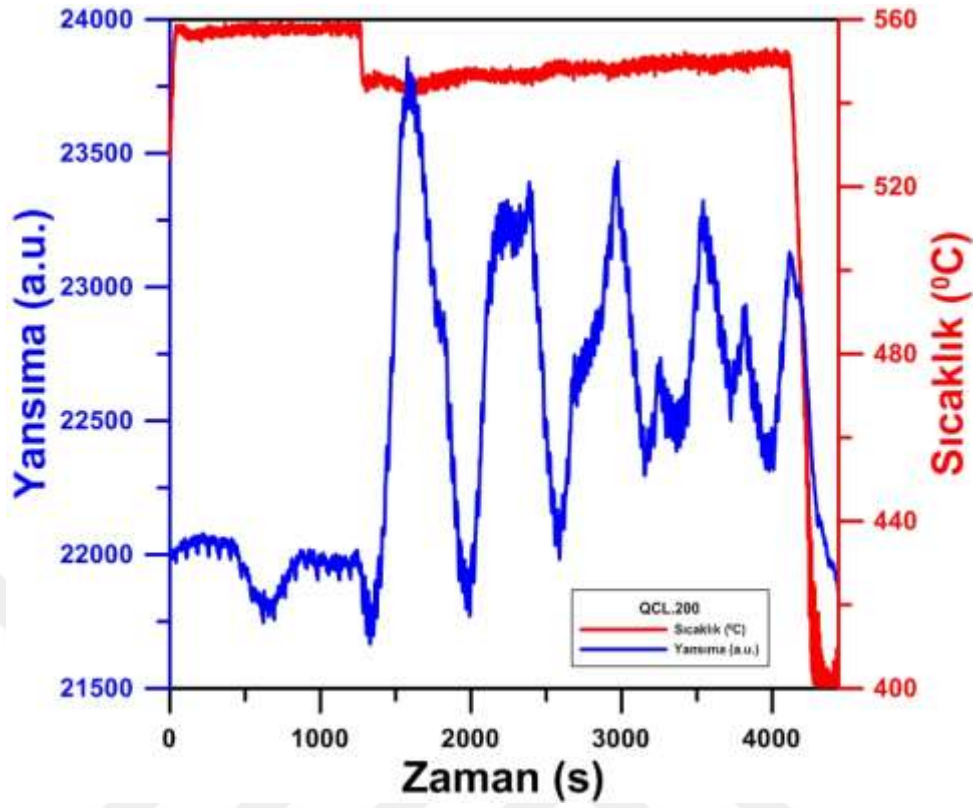
Şekil 4.95 Gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapılarının kalınlık ve büyüme oranını belirlemek için yapılan QCL199 numaralı büyütme için $2\theta/\omega$ HRXRD taraması (kırmızı) ve bu yapı için oluşturulan simülasyon (mavi) eğrisi.

Bu osilasyonların ortaya çıkması hem kristal kalitesinin hem de iki tabaka arasındaki arayüz kalitesinin çok iyi olduğunun bir göstergesidir. Şekilde kırmızı eğri ölçüm sonucunu mavi eğri ise büyütülen yapı için oluşturulan simülasyon sonucunu göstermektedir. Her iki eğrinin hem süperörgü pikleri hem de iki süperörgü arasındaki toplam kalınlığın oluşturduğu kalınlık osilasyonları mükemmel bir şekilde üst üste oturmuştur ki bu uyum büyütülen yapı hakkında istenilen gerilme, alaşım vb detayların yüksek hassasiyetle elde edilmesi için oldukça faydalıdır.

Yapılan büyütme, detaylı HRXRD analizleri ve tez çalışması kapsamında yayınlanan çalışmalardan (Demir ve Elagoz, Growth of InGaAs/InAlAs superlattices by MOCVD and precise thickness determination via HRXRD 2016), (Demir ve Elagoz, Interruption time effects on InGaAs/InAlAs superlattices of quantum cascade laser structures grown by MOCVD 2016) faydalanarak elde edilen veriler ile örgü

uyumsuz InGaAs ve InAlAs tabakalarının büyüme oranları sırasıyla 0.186 ve 0.351 nm/s olarak belirlenmiştir. Örgü uyumlu kuantum çağlayan lazer yapılarından farklı olarak burada iki alaşımın büyüme oranlarının birbirlerinden çok farklı çıkmıştır. Bunun sebebi daha önce de açıklandığı üzere yüksek örgü uyumsuzluğu oluşturabilmek için TMIn akışı sabitlendikten sonra akışı arttırılan TMAI kaynağıdır. Bu durumu iki farklı TMIn kaynağı kullanarak aşmak mümkün olmakla birlikte reaktörde modifikasyon gerektirmektedir. Diğer bir seçenek ise kullanılmayan diğer metal organik kaynakların hattına fazladan bir TMIn kaynağı takmaktır. Fakat bu seçeneği kullanmadan önce hattın çok uzun işlemler ile temizlenmesi gerekmektedir ki yapılan temizliklerin de kaynak hattında kirlilik veya hafıza etkisi (memory effect) oluşturmayaacağına garantisi yoktur. Tüm bu seçenekler değerlendirildiğinde mevcut şartları değiştirmeden reaktörün sınırları zorlanarak çalışmaya devam edilmesi uygun görülmüştür. Alınan bu kararın altında devam etmekte olan diğer proje gereksinimleri ve şimdiye kadar MOCVD tekniğinin ve kullanılan deney sistemlerinin çok iyi tanınması sonucunda elde edilen bilgi beceri ve tecrübe yatmaktadır.

Gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapılarını büyütebilmek için kullanılacak örgü uyumsuz InGaAs ve InAlAs yapılarının kalınlıkları ve büyüme oranları detaylı bir şekilde analiz edildikten sonra 4-5µm dalga boyu aralığında ışınım yapacak olan kuantum çağlayan lazer yapısının MOCVD ile büyütülmesine geçilmiştir. Şekil 4.96 QCL200 numaralı gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapısının kor bölgesinin 10 tekrarlı büyütmesine aittir. Yapı sırasıyla $\text{In}_{0.667}\text{Ga}_{0.333}\text{As}/\text{In}_{0.338}\text{Al}_{0.662}\text{As}$ alaşımlarını içermektedir ve bu tabakaların kalınlıkları sırasıyla 1.2/1.3/4.3/1.3/3.8/1.4/3.7/2.2/2.8/1.8/2.5/1.9/2.3/1.9/2.2/2.1/2.1/2.1/1.8/2.8 /1.8/3.9 nm şeklindedir.

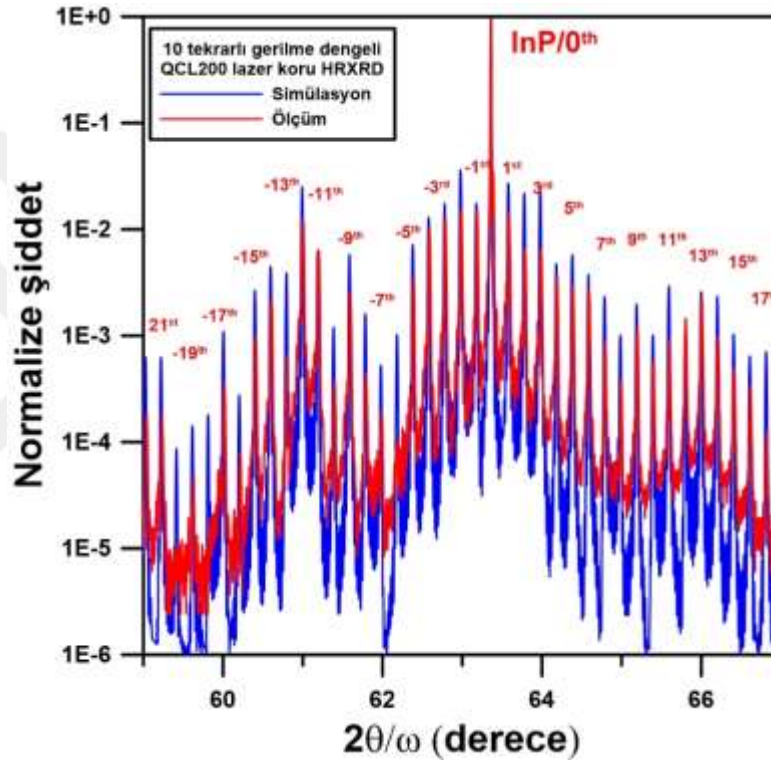


Şekil 4.96 QCL200 numaralı gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapısının 10 tekrarlı kor bölgesine ait yerinde yansırma (mavi) ve sıcaklık (kırmızı) ölçümü.

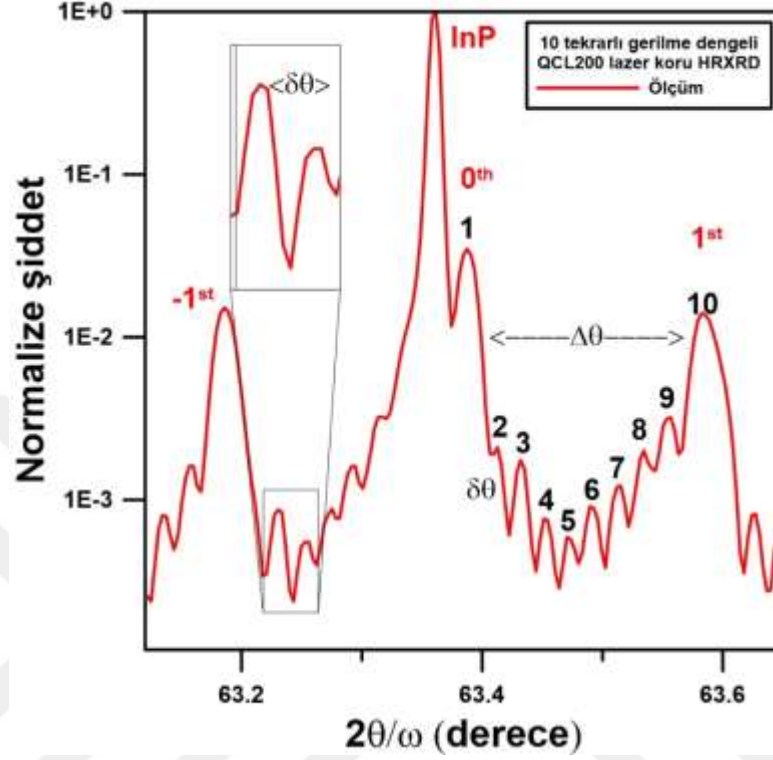
Şekil 4.96 incelendiğinde genel olarak $\text{In}_{0.667}\text{Ga}_{0.333}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.338}\text{Al}_{0.662}\text{As}$ tabakalarının kırılma indisi farkından dolayı büyütmenin her bir aşaması yansırma ölçümünde ayırt edilebilmektedir. Yansırma eğrisi Şekil 4.94 ile karşılaştırıldığında asimetrik bir davranış gözlenmektedir. Bu davranışın sebebi her bir tekrar içindeki $\text{In}_{0.667}\text{Ga}_{0.333}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.338}\text{Al}_{0.662}\text{As}$ tabakalarının kalınlıklarının farklı olmasıdır. Yansırma eğrisi bir bütün olarak incelendiğinde büyütülen toplam tabaka kalınlığı arttığından dolayı osilasyon şiddetinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma simetrik bir zarf fonksiyonu şeklinde olduğundan yapıda büyütme süresince her hangi bir sıkıntı olmadığı anlaşılmaktadır. Büyütmede daha önceki büyütmelelerde olduğu gibi $\text{In}_{0.667}\text{Ga}_{0.333}\text{As}$ ve $\text{In}_{0.338}\text{Al}_{0.662}\text{As}$ tabakaları arasında AsH_3 gazı açık bırakılmıştır ve 3s bekleme süresi uygulanmıştır.

QCL200 numaralı gerilme dengeli kuantum çağlayan lazer yapısına ait $2\theta/\omega$ HRXRD taraması $2\theta = 59.5^\circ\text{--}66.5^\circ$ aralığında Şekil 4.97’de gösterilmektedir. Şekilde kırmızı

eğri yapılan ölçüme mavi eğri ise yapı için oluşturulan simülasyona aittir. Taramada en yüksek pik InP alttaşına aittir. Ayrıca süperörgü sıfırıncı (0th) piki InP alttaş piki birbirlerine çok yakındır ki bu büyütülen tüm yapının InP alttaş ile hemen hemen gerilme dengeli olarak büyütüldüğünün açık göstergesidir. Taramada çok yüksek mertebeli süperörgü pikleri ortaya çıkmıştır, bu pikler periyodik, belirgin ve dar FWHM değerlerine sahiptir. Tüm bu özellikler büyütülen kuantum çağlayan lazer yapısının yüksek kristal kalitesine sahip olduğunun göstergesidir. Ayrıca simülasyon ve ölçüm eğrileri hemen hemen tamamen üst üste oturmuştur (R factor 0.13).



şekilde görülmektedir. $\Delta\theta$ açısından yararlanarak büyütülen kuantum çağılayan lazer yapısının her bir tekrarının kalınlığı, $\delta\theta$ açısından yararlanarak da büyütülen filmin toplam kalınlığı hesaplanabilmektedir.



Şekil 4.98 Şekil 4.97’de gösterilen HRXRD taramasının $2\theta = 63.1^\circ$ - 63.7° aralığının geniş gösterimi. $\Delta\theta$ süperörgü pikleri arasındaki açıyı, $\Delta\delta$ iki süperörgü piki arasındaki toplam kalınlık piklerinin her biri arasındaki açıyı temsil etmektedir. 1-10 arasındaki rakamlar ise toplam kalınlık piklerini göstermektedir.

Şekil 4.97 ve Şekil 4.98 den faydalananarak yapılan hesaplamalardan gerilme dengeli kuantum çağılayan lazer yapısının toplam film kalınlığı 514 nm, her bir periyodunun kalınlığı ise 51 nm olarak hesaplanmıştır. Bu yapıya ait teorik toplam kalınlık 512 nm, periyot kalınlığı ise 51.2 nm olarak öngörülmüştür. Teorik varsayım ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında yapılan büyütmelerin teorik hesaplarla oldukça uyumlu olduğu ortaya çıkmaktadır.

5. SONUÇ

Günümüz teknolojisinde özellikle optoelektronik cihazların gelişen performanslarıyla özellikle orta ve kısa dalgaboyu kızılötesi bölgede her geçen gün yeni uygulama alanları ortaya çıkmaktadır. Tüm bu uygulama alanlarının ortak ihtiyaçları makul fiyat, taşınabilirlik, uygulama alanına göre yüksek güç ve fiyat gibi parametrelerin etrafında toplanmaktadır. Diğer lazer kaynakları ile karşılaştırıldığında kuantum çağılayan lazerler tüm bu istekleri karşılayan bir teknolojiye sahiptir.

Bu çalışmada genel olarak kısa kızılötesi dalgaboylu ($\sim 4 \mu\text{m}$) ve orta kızılötesi ($\sim 10 \mu\text{m}$) dalgaboyuna sahip kuantum çağılayan lazer yapıları MOCVD ile üretilmiştir. Kuantum çağılayan lazer yapıları üretilmeden önce tek tabaka InGaAs, InAlAs ve InP n-tipi katkı ve katkısız olarak büyütülmüş ve birçok büyütme parametresinin kristal, optik, elektriksel ve arayüz etkisi incelenmiştir. Kuantum çağılayan lazer yapıları çok ince tabaka kalınlıklarına ($\sim 0.5 \text{ nm}$) sahiptir. MOCVD tekniği MBE ile kıyaslandığında yüksek büyütme oranlarında oldukça başarılı epitaksiyel büyütme yapabilirken, MBE çok düşük büyütme oranları bakımından MOCVD'ye kıyasla kuantum çağılayan lazerlerin gelişimi aşamalarında daha çok tercih edilmiştir. Fakat MOCVD'nin yüksek büyütme oranı özelliği kuantum çağılayan lazer yapılarının dalga kılavuzu ve yelek tabakası gibi kalın tabakalarının büyütülmesinde MBE'ye karşı büyük bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca çalışmada bahsedilen uygulama alanlarında sıkça kullanılmaya başlanan ve ileride daha çok uygulama alanı bulacak olan kuantum çağılayan lazerlerin seri üretimi ve maliyet göz önüne alındığında MOCVD kaçınılmaz bir tercih olacaktır. Bu sebeple tez çalışması kapsamında büyüme oranının azaltılması ($\sim 0.1 \text{ nm/s}$) ve kalınlıkların çok hassas bir biçimde kontrolü için sistemde kurulu bulunan standart kütle akış kontrolcüler daha hassas akışları kontrol edebilen muadilleri ile değiştirilmiştir. Böylece yapılan değişiklikler ile hem çok düşük kalınlıklara sahip aktif bölgedeki tabakalar çok düşük büyüme oranları ile büyütülebilmüş hemde dalgakılavuzu ve yelek tabakası gibi kalın tabakalar yüksek büyüme oranı ile büyütülebilmıştır. Özellikle büyütülen süperörgü tabakalarının kalınlıkları HRXRD ölçümleri ile öne sürülen teknik vasıtasıyla çok hassas bir biçimde kontrol edilmiştir. Kuantum çağılayan lazer yapıları ve epitaksiyel tabakalar için çok önemli olan diğer bir parametre ise V/III oranıdır. Kuantum çağılayan lazer yapılarını oluşturan InGaAs ve InAlAs tabakaları birbirlerinden çok farklı V/III oranı karakteristiklerine sahiptir. Tez kapsamında avantaj ve dezavantajlarından bahsedilen

özüm önerilerinden MOCVD sistemine SAN-TEZ projesi kapsamında yeni bir AsH₃ hattı eklenmiştir. Böylece her tabaka için yüksek kristal kalitesi ile sonuçlanan değerler optimize edilerek kullanılmıştır.

Sonuç olarak MOCVD tekniğinin MBE'ye kıyasla dezavantaj olarak görülen özellikleri, öne sürülen çözüm önerileri ile avantaja çevrilerek yüksek optiksel, elektriksel ve kristal kaliteli, keskin arayüze sahip epitaksiyel tabakalar MOCVD ile başarılı bir şekilde büyütülebilmekmiştir.



KAYNAKLAR

- Adachi, S.** (1992). Physical properties of III-V semiconductor compounds. *John Wiley and Sons*, New York, 336p
- Alferov, Z.I., V.M. Andreev, D.Z. Garbuzov, Y.V. Zhilyaev, E.P. Morozov, E.L. Portnoi, and V.G. Trofim.** (1970). Investigation of the influence of the AlAs-GaAs heterostructure parameters on the laser threshold current and the realization of continuous emission at the room temperature. *Fiz. Tekh. Poluprovodn* 1826-1829.
- Aspnes, D.E.** (1985). Above bandgap optical anisotropies in cubic semiconductors: a visible near ultraviolet probe of surfaces. *Journal of Vacuum Science and Technology B* 1498-1506.
- Aspnes, D.E., and A.A. Studna.** (1985). Anisotropies in the above band gap optical spectra of cubic semiconductors. *Physical Review Letters* 1956-1959.
- Aspnes, D.E.** (1988). Analysis of semiconductor materials and structures by spectroellipsometry. *SPIE*. Newport.
- Nelson, B.** (1997). Punched Cards to Bar Codes. *Helmerts Publishing*. Dublin
- Bandyopadhyay, Neelanjana** (2015). Modelling, Design, Growth and Characterization of Strain Balanced Quantum Cascade Lasers (3-11 μ m), grown by Gas Source Molecular Beam Epitaxy. *Northwestern University, Department of Electrical and Computer Engineering* (PhD Thesis), 183p, Evanston, Illinois.
- Bayram, B.** (2016). *Yıldız Teknik Üniversitesi*. http://www.yildiz.edu.tr/~bayram/uz_al/uzal.htm. Erişim tarihi: 10. 02. 2016
- Bennett, W.R.** (2000). Background of an inversion: the first gas laser. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 869-875.
- Bennett, W.R., A. Javan, and D.R. Herriot.** (1964). Gas Optical Maser. USA Patent 3 149 290. September 15.
- Besson, J.P., S. Schilt, and L. Thevenaz.** (2005). Sub-ppm ammonia detection based on photoacoustic spectroscopy. *SPIE*. Bellingham, WA. 415-418.
- Bhat, R., M.A. Koza, K. Kash, S.J Allen, W.P. Hong, S.A. Schwarz, G.K. Chang, and P. Lin.** (1991). Growth of high quality AlInAs by low pressure organometallic chemical. *Journal of Crystal Growth* 441-448.
- Bulut, A.** (2010). Epitaksiyel Tek Kristal İnce Filmlerin XRD Yöntemi İle İncelenmesi. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), 108s, Sivas.
- Collins, R.W.** (1989). Advances in disordered semiconductors. *World scientific* Singapore, 1003p.
- Colombelli, R., F. Capasso, C. Gmachl, A.L. Hutchinson, D.L. Sivco, A. Tredicucci, M.C. Wanke, A.M. Sergent, and A.Y. Cho.** (2001). Far infrared surface plasmon quantum cascade lasers at 21.5 μ m and 24 μ m wavelengths. *Applied Physics Letters* 2620-2622.
- Demir, I, and S. Elagoz.** (2016). Interruption time effects on InGaAs/InAlAs superlattices of quantum cascade laser structures grown by MOCVD. *Superlattices and Microstructures* 723-729.

- Demir, I. , and S. Elagoz.** (2016). Growth of InGaAs/InAlAs superlattices by MOCVD and precise thickness determination via HRXRD. *Gazi University Journal of Science* 947-951.
- Denker, B., and E. Shklovsky.** (2013). Handbook of solid state lasers: materials, systems and applications . *Woodhead Pub Ltd*, United Kingdom, 688p.
- Devenson, J., D. Barate, O. Cathabard, R. Teissier, and A.N. Baranov.** (2006). Very short wavelength ($\lambda = 3.1\text{-}3.3\text{ }\mu\text{m}$) quantum cascade lasers. *Applied Physics Letters* 191115-191115-3.
- Didchenko, R., J.E. Alix, and R.H. Toeniskoetter.** (1960). Reactions of phosphine with trimethylindium. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* 35-37.
- Diehl, L., D. Bour, S. Corzine , J. Zhu, G. Höfler, M. Loncar, M. Troccoli, and F. Capasso.** (2006). High temperature continuous wave operation of strained balanced quantum cascade lasers grown by metal organic vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters* 081101-1-081101-3.
- Drevillon, B., J.Y. Parey, M. Stchakovsky, R. Benferhat, Y. Josserand, and B. Schlayen.** (1989). Design of a new in situ spectroscopic phase modulated ellipsometer. *SPIE* 1188.
- Duarte, F.J.** (1995). Tunable Lasers Handbook. *Academic Press*, Rochester, 471p.
- Dumitras, D.C., G. Giubileo, and A. Puiu.** (2005). Investigation of human biomarkers in exhaled breath by laser photoacoustic spectroscopy. *SPIE*. Bellingham, WA. 111-121.
- Kenneth E.L., , and Eugene A.F.** (2010). High-quality metamorphic compositionally graded InGaAs buffers. *Journal of Crystal Growth*, 312, 250-257.
- Ekinci, H.** 2008. Metal organik kimyasal buharlaştırma yöntemi ile kristal büyütme (MOCVD) sisteminin incelenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), 222s, Sivas.
- Evans, Allan Joseph.** (2008). GasMBE Growth and Characterization of Strained Layer InP-GaInAs-AlInAs. *Northwestern University, Department of Electrical and Computer Engineering* (PhD Thesis), 328p, Evanston, Illinois.
- Evans, C.A., V.D. Jovanovic, D. Indjin, Z. Ikonic, and P. Harrison.** (2005). Design and simulation of InGaAs/AlAsSbInGaAs/AlAsSb quantum-cascade lasers for short wavelength emission, *Applied Physics Letters* 87, 141109-141111.
- Faist, J., F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, and A.Y. Cho.** (1994). Quantum Cascade Lasers, *Science* 553-556.
- Faist, J., M. Beck, T. Aellen, and E. Gini.** (2001). Quantum cascade lasers based on a bound to continuum transition. *Applied Physics Letters* 147-149.
- Fang, Q., G. Jin, S. Jun-feng, and W. Ting-feng.** (2013). Study of jamming of the frequency modulation infrared seekers: infrared imaging and applications. *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013*. SPIE. 890722-9.
- Feit, Z., P. Mak, R. Woods, and M. McDonald.** (1996). MBE grown buried heterostructure separate confinement multiple quantum well $\text{Pb}_{0.9854}\text{Eu}_{0.0146}\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x/\text{Pb}_{0.981}\text{Sn}_{0.019}\text{Te}$ tunable diode lasers for high resolution spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 851-855.

- Hall, Edwin.** (1879). On a New Action of the Magnet on Electric Currents. *American Journal of Mathematics* 287-292.
- Hall, R.N., G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, and R.O. Carlson.** (1962). Coherent light emission from GaAs junctions. *Physical Review Letters* 366-368.
- Hayashi, I., M.B. Panish, P.W. Foy, and S. Sumski.** (1970). Junction lasers which operate continuously at room temperature. *Applied Physics Letters* 109-111.
- Hofstetter, D., M. Beck, T. Aellen, and J. Faist.** (2001). High temperature operation of distributed feedback quantum cascade lasers at 5.3 μm . *Applied Physics Letters* 396-398.
- Holonyak, N., and S.F. Bevacqua.** (1962). Coherent (visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions. *Applied Physics Letters* 82-83.
- Kazarinov, R.F., and R.A. Suris.** (1971). Possibility of the Amplification of Electromagnetic Waves in a Semiconductor With a Superlattice. *Soviet Phys. Semiconductors* 707-709.
- Kim, S., K. Lee, K. Park, and C.S. Kim.** (2003). Effects of barrier growth temperature on the properties of InGaN/GaN multi-quantum wells. *Journal of Crystal Growth* 62-68.
- Kittel, C.** (2005). Introduction to solid state physics. *John Wiley & Sons, USA*, 704 p.
- Koechner, W.** (2006). Solid state laser engineering. *Springer-Verlag*, New York, 750p.
- Lambrecht, A., M. Braun, S. Hartwig, J. Nurnus, J. Wöllenstein, F. Weik, and J.W. Tamm.** (2006). New infrared sources for breath analysis. *SPIE*. San Jose, CA. 60930B-9.
- Lee, M.L., E.A. Fitzgerald, M.T. Bulsara, M.T. Currie, and A. Lochtefeld.** (2005). Strained Si, SiGe, and Ge channels for high mobility metal oxide semiconductor field effect transistors. *Journal of Applied Physics* 011101-27.
- Li, Jinping, Guoqing Miao, Yugang Zeng, Zhiwei Zhang, Dabing Li, Hang Song, Hong Jiang, Yiren Chen, Xiaojuan Sun, and Zhiming Li.** (2017). Relationship between dislocations and misfit strain relaxation in InGaAs/GaAs heterostructures. *Crystal Engineering Communication* 19 (88).
- Li, Yiun-Yun.** (2007). Material Growth of InGaAs/InAlAs Superlattices for Quantum Cascade Laser Application, University of Maryland Department of Computer Science and Electrical Engineering (Master of Science Thesis), 94p, Baltimore County.
- Lu, Q.Y., N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Y. Bai, and M. Razeghi.** (2014). Continuous operation of a monolithic semiconductor terahertz source at room temperature. *Applied Physics Letters* 221105.
- Luo, Y.R.** (2007). Comprehensive Handbook of Chemical Bond Energies. *CRC Press*, 1688p.
- Maiman, T.H.** (1960). Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature* 493-494.
- Majumdar, A., and J.C. Ricklin.** (2007). Free-Space Laser Communications. Springer Science, California, 418p.
- Manasevit, H.M., P.M. Erdmann, and W.I. Simpson.** (1971). The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials IV. The nitrides

- of aluminum and gallium. *Journal of the electrochemical society*, 118, 1864-1868.
- Mawst, L. J., J. D. Kirch, C. C. Chang, T. Kim, T. Garrod, D. Botez, S. Ruder, ve diğ erleri.** (2013). «InGaAs/AlInAs strain-compensated superlattices grown on metamorphic buffer layers for low- strain, 3.6 μm emitting quantum cascade lasers active region.» *Journal of Crsytal Growth* 370: 230-235.
- MOCVD Manuel, (2006) Aixtron.
- Olafsen, L. J., E. H. Aifer, I. Vurgaftman, W. W. Bewley, C. L. Felix, J. R. Meyer, D. Zhang, C.-H. Lin, and S. S. Pei.** (1998). Near-room-temperature mid-infrared interband cascade laser. *Applied Physics Letters*, 2370-2372.
- Olesberg, J.T., M.A. Arnold, C. Mermelstein, J. Schmitz, and J. Wagner.** (2005) Tunable laser diode system for noninvasive blood glucose measurements. *Applied Spectroscopy* 1480-1484.
- Overton, Gail, Allen Noguee, David A. Belforte, and Conart Holton.** (2016). Annual Laser Market Review & Forecast: Can laser markets trump a global slowdown. (<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-52/issue-01/features/annual-laser-market-review-forecast-can-laser-markets-trump-a-global-slowdown.html>). Erişim Tarihi: 10.02.2016.
- Pal, R., M. Singh, R. Murlidharan, S.K. Agarwal, D. Pal, and D.N. Bose.** (1998). Lattice mismatch and surface morphology studies of In_xGa_{1-x}As epilayers grown on GaAs substrates. *Bulletin of Materials Science* 313-316.
- Panish, M.B., and H. Temkin.** (1993). Gas Source Molecular Beam Epitaxy Growth and Properties of Phosphorus Containing III-V Heterostructures. *Springer*, Berlin, 428p.
- Patel, C.K.N.** (1964). Continuous wave laser action on vibrational rotational transitions of CO₂. *Physical Review A* 1187.
- Patel, C.K.N.** (1964). Interpretetion of CO₂ optical maser experiments. *Physical Review Letters* 588-590.
- Rana, Farhan.** (2009). *Cournel Courses*. Accessed February 2, 2017. <https://courses.cit.cornell.edu/mse5470/handout4.pdf>.
- Razeghi, M.** (1995). The MOCVD Challenge. *IOP Publishing*, Bristol, 443p.
- Revin, D.G., L.R. Wilson, E.A. Zibik, R.P. Green, J.W. Cockburn, M.J. Steer, R.J. Airey, and M. Hopkinson.** (2004). λ 4-5.3 μm intersubband emission from InGaAs-AlAsSb quantum cascade lasers. *Applied Physics Letters* 1447-1449.
- Rong, Y.Q., Y.Q. Ang, S.P. Pei, N.Q. Li, L.S. Ti, and Z. Yong.** (2013). A dual blue light emitting diode based on strain compensated InGaN-AlGaN/GaN quantum wells. *Chinese Physics B* 026102-4.
- S.A.Brown.** (1997). Revolution at the Checkout Counter: The Explosion of the Bar Code, *Harvard University Pres*, Cambridge, 320p.
- Salisbury, D.F.** 2001. *Vanderbilt University*. October 9. Accessed January 5, 2017. http://exploration.vanderbilt.edu/news/news_fel_surgery.htm.
- Sayari, A., N. Yahyaoui, M. Oueslati, H. Maaref, and K. Zellama.** (2009). Raman study of V/III flux ratio effect in InP/InAlAs/InP heterostructures grown by MOCVD. *Journal of Raman Spectroscopy* 1023-1027.

- Sayed, I.E.H., C.Z. Carlin, B.G. Hagar, P.C. Colter, and S.M. Bedair.** (2016). Strain balanced InGaAsP/GaInP multiple quantum well solar cells with a tunable bandgap (1.65-1.82eV). *IEEE Journal of Photovoltaics* 997-1003.
- Singh, Jasprit.** (2001). *Semiconductor Devices Basic Principles*, Wiley, New York, 576p.
- Sirtori, C., H. Page, C. Becker, and V. Ortiz.** (2002). GaAs-AlGaAs Quantum cascade lasers: physics, technology and prospects. *IEEE Journal of quantum electronics* 547-558.
- Slivken, Steven Boyd.** (2002). Quantum Cascade Lasers Grown by Gas-Source Molecular Beam Epitaxy. *Northwestern University, Department of Electrical and Computer Engineering* (PhD Thesis), 1288p, Evanston, Illinois.
- Tredicucci, A., C. Gmachl, F. Capasso, D.L. Sivco, A.L. Hutchinson, and A.Y. Cho.** (1999). Long wavelength superlattice quantum cascade lasers at $\lambda = 17 \mu\text{m}$. *Applied Physics Letters* 638-640.
- Tredicucci, A., F. Capasso, C. Gmachl, D.L. Sivco, A.L. Hutchinson, and A. Cho.** (1998). High performance interminiband quantum cascade lasers with graded superlattices. *Applied Physics Letters* 2101-2103.
- Url-1** <<http://hcphotonics.com/applications.asp?sn=1009>>, alındığı tarih 05.01.2017.
- Url-2** <<https://scholar.google.com/citations?user=AfqWB1oAAAAJ&hl=fr>> alındığı tarih 05.01.2017.
- Vignaud, D., X. Wallart, F. Mollot, and B. Sermage.** (1998). Photoluminescence study of the interface in type II InAlAs-InP heterostructures. *Journal of Applied Physics* 2138-2145.
- Wagner, J., Ch. Mann, M. Rattunde, and G. Weimann.** (2004). Infrared semiconductor lasers for sensing and diagnostics. *Applied Physics A* 505-512.
- Wang, C.A., R.K. Huang, A. Goyal, J.P. Donnelly, D.R. Calawa, S.G. Cann, F. O'Donnell, J. J. Plant, L. J. Missaggia, G. W. Turner, A. S. Rubio.** (2008). OMVPE growth of highly strain balanced GaInAs/AlInAs/InP for quantum cascade lasers. *Journal of Crystal Growth* 5191-5197.
- Wirth, K.** (2015). *IDC: Slight Decline in Worldwide Printer/MFP Market for First-Quarter 2015*. May 25. <http://wirthconsulting.org/2015/05/26/idc-slight-decline-in-worldwide-printermfp-market-for-first-quarter-2015/>.
- Wu, D., B. Lane, H. Mohseni, J. Diaz, and M. Razeghi.** (1999). High power asymmetrical InAsSb/InAsSbP/AlAsSb double heterostructure lasers emitting at $3.4 \mu\text{m}$. *Applied Physics Letters*. 1194-1196.
- Yank, Q.K., Ch. Mann, F. Fuchs, K. Köhler, ve W. Bronner.** (2005). High temperature ($T > 400 \text{ K}$) operation of strain compensated quantum cascade lasers with thin InAs insertion layers and AlAs blocking layers. *Journal of Crystal Growth* 714-717.
- Zhang, J., X.B. Li, J.H. Neave, D.J. Norris, A.G. Cullis, R.W. Kelsall, S. Lynch, P. Townsend, D.J. Paul, and P.F. Fewster.** (2005) SiGe quantum cascade structures for light emitting devices. *Journal of crystal growth* 488-494.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	İlkay Demir
Doğum Yeri ve Tarihi	Bafra, 23.06.1984
Medeni Hali	Evli
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi Müh. Fak. Nanoteknoloji Müh. Bölümü 58140 Sivas
E-posta Adresi	idemir@cumhuriyet.edu.tr

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	STFA Anadolu Teknik Lisesi, 2002
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Edebiyat Fak. Fizik Böl. 2008
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 2011

İş Tecrübesi

Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma Görevlisi, 2009-

Yayınlar

- I. **I. Demir** and Sezai Elagoz, V/III ratio effects on high quality InAlAs for Quantum Cascade Laser structures, Superlattices and Microstructures 104, 2017, 140-148
- II. B. O. Alaydin, E. S. Tuzemen, **I. Demir** and S. Elagoz, Optical and structural properties of lattice matched and slightly lattice mismatched MOCVD grown InxGa1-xAs epilayers, 2017, Submitted
- III. **I. Demir** and S. Elagoz, Interruption time effects on InGaAs/InAlAs superlattices of quantum cascade laser structures grown by MOCVD, Superlattices and Microstructures 100, 2016, 723-729.

- IV. **I. Demir** and S. Elagoz, Growth of InGaAs/InAlAs superlattices by MOCVD and precise thickness determination via HRXRD, Gazi University Journal of Science, 29 (4), 947-951, 2016
- V. P. Baser, H. D. Karki, **I. Demir** and S. Elagoz, The hydrostatic pressure and temperature effects on the binding energy of magnetoexcitons in cylindrical quantum well wires, Superlattices and Microstructures, 63, 100-109, 2013

Uluslararası toplantılarda sunulan bildiriler

- **I. Demir**, B. O. Alaydin, I. Altuntas and S. Elagoz, High Quality InGaAs/InAlAs Superlattices Growth by MOCVD, 3th International Nanoscience and Nanotechnology for Next Generation (NanoNG) 2016, 20-22 October 2016, Antalya, Turkey
- I. Altuntas, **I. Demir**, A. A. Kizilbulut, B. Bulut and S. Elagoz, The effects of carrier gas on 3D-2D transition of GaN, 3th International Nanoscience and Nanotechnology for Next Generation (NanoNG) 2016, 20-22 October 2016, Antalya, Turkey
- **I. Demir**, B. O. Alaydin and S. Elagoz, V/III Ratio Effect on Electrical and Optical Properties of Nearly Lattice Matched In_xGa_{1-x}As Epilayers on InP, Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress , 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey
- S. Horoz, **I. Demir**, A. Ekicibil, S. Elagoz and O. Sahin, Structural, Optical, Electrical, and Magnetic Properties of Undoped and Ni Doped CdZnS, Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress , 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey
- A. A. Kizilbulut, **I. Demir**, I. Altuntas and S. Elagoz The Effects of Nucleation Layer Thickness on Quality of GaN Film, Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress , 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey
- B. Bulut, **I. Demir**, I. Altuntas and S. Elagoz Ammonia Pre-Flow Effects in Growth of Epitaxial GaN on Sapphire Substrate, Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress , 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey
- I. Altuntas, **I. Demir** and S. Elagoz, Effect of Recrystallization Time on Two Steps MOCVD Grown GaN, Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress , 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey
- D. Altun, **I. Demir**, I. Altuntas, E. S. Tuzemen and S. Elagoz, A Systematical Study of Nucleation Layer Growth Temperature Effects of GaN Buffer Layer, Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress , 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey
- B.O. Alaydin, **I. Demir**, S. Elagoz, Growth And Characterization of High Aluminium Alloy Concentration $x > 0.9$ Al_xGa_{1-x}As for Optoelectronic

Application, Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress , 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey

- **I. Demir** and S. Elagoz, V/III Ratio Effect on Doping of High Quality InAlAs for Quantum Cascade Laser Structures, International Balkan Workshop on Applied Physics 2016, Constanta, Romania, 2016
- **I. Demir**, A. A. Kizilbulut, B. Bulut and S. Elagoz, Ellipsometry and Photoluminescence Characterization of MOCVD Grown Al_xGa_{1-x}As Layers (x = 0.21, 0.33, 0.42), International Balkan Workshop on Applied Physics 2016, Constanta, Romania, 2016
- A. A. Kizilbulut, **I. Demir**, I. Altuntas and S. Elagoz, Determine the Refractive index of wurtzite GaN on Sapphire by Spectroscopic Ellipsometry, International Balkan Workshop on Applied Physics 2016, Constanta, Romania, 2016
- B. O. Alaydin, E. S. Tuzemen, **I. Demir** and S. Elagoz, Optical and Structural Properties of Lattice Matched and Slightly Lattice Mismatched MOCVD Grown In_xGa_{1-x} Epilayers, International Balkan Workshop on Applied Physics 2016, Constanta, Romania, 2016
- **Ilkay Demir**, Yoann Robin, Ryan McClintock, Sezai Elagoz, Konstantinos Zekentes and Manijeh Razeghi, Direct growth of thick AlN layers on nanopatterned Si substrates by cantilever epitaxy, E-MRS Spring Meeting, Lille, France, 2016
- A. Kızılbulut, **I. Demir**, B. Bulut, S. Elagoz, Optical and Structural Characterization of Al_xGa_{1-x}As/GaAs Epilayers, NanoTr 12, Gebze, 2016
- Ismail Altuntas, B. Bulut, **I. Demir**, S. Elagoz, Growth Studies Of Lattice Matched GaInAs and AlInAs Layers For Quantum Cascade Laser by MOCVD, Balkan Physics Union 9, 2015
- İ. Altuntaş, **İ. Demir**, S.Elagoz, Relation Between Crystalline Quality and Electrical Properties of InGaAs InP Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition, TFD 30, İstanbul, 2013
- D.Altun, B.Bulut, **İ.Demir**, İ.Altuntas, S.Elagoz, A Systematic Study of Mobility And Carrier Concentration with (0001) GaN Grown on c- sapphire by MOCVD, TFD 30, İstanbul, 2013
- M.Balci, M.A.Boz, **İ.Demir**, I.Altuntas, D.Kilic, S.Elagoz, Growth Temperature Effects On Surface Morphology of Epitaxial GaAs Layers Grown by MOCVD, TFD 30, İstanbul, 2013
- **Ilkay Demir**, Ismail Altuntas, B. Ozgur Alaydin, A. Alev Kizilbulut, M. Ali Boz, H. Dogan Karkı, Sezai Elagoz, Epitaxial Growth by Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) and Structural Characterization of GaAs Films on Ge Substrates, NanoTr-9, 24-28 June 2013, Erzurum, TURKEY

- A. Alev Kizilbulut, Ebru Senadim Tuzemen, **Ilkay Demir**, Ismail Altuntas, G. Didem Bayhan, H. Dogan Karki, Sezai Elagoz, Specular reflectance spectra of GaAs on Ge substrate grown by MOCVD, NanoTr-9, 24-28 June 2013, Erzurum, TURKEY
- Ismail Altuntas, **Ilkay Demir**, Deniz Kartal, H. Dogan Karki, Sezai Elagoz, Growth Conditions and Electrical Characterization of GaAs Grown on Ge substrates by MOCVD, NanoTr-9, 24-28 June 2013, Erzurum, TURKEY
- **Ilkay Demir**, Ismail Altuntas, B.Ozgur Alaydin, Sezai Elagoz, H. Dogan Karki, The effect of growth rate with constant V/III ratio to the crystal quality of GaAs grown by MOCVD NanoTr-9, 24-28 June 2013, Erzurum, TURKEY
- **Demir, İ.** Yallı, M. Elagöz, S. MOCVD İle Büyütülmüş Epitaksiyel GaN Tabakasının Vida Tipi (Screw Type) Dislokasyon Yoğunluğunun X- Işını Kırınımı Tekniğiyle Ölçülmesi TFD 28, BODRUM, 2011
- Bulut, A. Altuntaş, İ. **Demir, İ.** Elagöz, S. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Heteroyapıların x-Işını Kırınım Yöntemi İle Yapısal Analizi TFD 28, Bodrum, 2011

Projeler

- LED Çip Prototipi Geliştirilmesi, 113G103, Proje Doktora Öğrencisi, TÜBİTAK-1007 KAMAG 2015-2018
- Safir Alttaşı Üzerine Büyütülen GaN Epitaksiyel Tek Kristal İnce Filmlerin XRD Yöntemi ile İncelenmesi, F-341, 2011-2012, Yardımcı Araştırmacı, Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP)
- SWIR Dedektörü Geliştirme Projesi, KANGAL, Proje Asistanı, Aselsan-Savunma Sanayi Müsteşarlığı (SSM), 2012-2016,
- Kızılötesi Uzun Dalgaboylu Kuantum Çağlayan Lazerler, Aselsan-SANTEZ, 2014-2017
- GaAs/Ga_{1-x}In_xAs Kuantum Kuyularının Elektronik Enerji Spektrumu ve Safsızlık Bağlanma Enerjisi, Yardımcı Araştırmacı, CÜBAP, 2014-2015

Ödüller

- Avrupa Malzeme Araştırma Topluluğu (European Materials Research Society) Genç Bilim İnsanı Ödülü (Young Scientist Award), E-MRS 2016 Spring Meeting, Lille-France,
- Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu, 2214/A-TÜBİTAK, 2014
- Yurt İçi Lisansüstü (Doktora Bursu), 2211-TÜBİTAK, 2011
- Son Sınıf Lisans Öğrencileri için Lisansüstü (Yüksek Lisans) Burs, 2228-A TÜBİTAK, 2008
- Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Birinciliği, 2008
- Üstün Başarı Ödülü, Türk Fizik Vakfı, 2007