

**KIZILÖTESİ ALGILAMADA KULLANILAN  
KENDİLİĞİNDEN OLUŞAN InAs/GaAs  
KUANTUM NOKTA YAPILARIN MBE  
TEKNİĞİYLE BÜYÜTÜLMESİ VE  
KARAKTERİZASYONU**

Samet ÖZDEMİR  
Yüksek Lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı-Nanoteknoloji

Temmuz 2014

Bu tez çalışması BAP-1205F086 numaralı proje kapsamında Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Samet ÖZDEMİR'in "Kızılötesi Algılamada Kullanılan Kendiliğinden Oluşan InAs/GaAs Kuantum Nokta Yapıların MBE Tekniğiyle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu" başlıklı İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, Nanoteknoloji Bilim Dalındaki Yüksek Lisans Tezi 14.07.2014 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.**

	<b>Adı- Soyadı</b>	<b>İmza</b>
Üye (Tez Danışmanı):	<b>Doç. Dr. Bülent ASLAN</b>	.....
Üye	<b>: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN</b>	.....
Üye	<b>: Yrd. Doç. Dr. Aykutlu DÂNA</b>	.....

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.**

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KIZILÖTESİ ALGILAMADA KULLANILAN KENDİLİĞİNDEN OLUŞAN InAs/GaAs KUANTUM NOKTA YAPILARIN MBE TEKNİĞİYLE BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Samet Özdemir

Anadolu Üniversitesi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Nanoteknoloji Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent ASLAN

2014, 103 sayfa

Bu tez kapsamında, tek katman ve çok katman InAs/GaAs kuantum nokta yapıların moleküler demet epitaksi sistemi ile büyütülmesi ve karakterizasyonları yapılmıştır. Kuantum nokta yapıların, fotoluminesans (PL) spektrumunda görülen enerji seviyelerinin belirgin ve daha iyi tanımlanması amacıyla büyüme parametrelerinin değiştirildiği grup örnekler büyütülerek kuantum nokta büyüme kinetikleri incelenmiştir.

Malzeme miktarı ve büyüme sıcaklığı başta olmak üzere büyüme koşullarının sistematik olarak değiştirildiği tek katman örnekler büyütülmüştür. Başta PL tekniği olmak üzere farklı tekniklerin kullanılmasıyla kuantum noktaların yoğunlukları, dağılımları, büyüklükleri belirlenmiştir. PL ölçümleri ile kuantum noktaların enerji seviyeleri belirlenerek, büyüklükleri ve dağılımları hakkında yapılan çıkarımlar diğer tekniklerden elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır. En düzgün (homojen) kuantum nokta büyüklük dağılımı, InAs malzeme miktarının 2,5 ML olduğu, 490 °C sıcaklıkta 0,11 ML/s büyüme oranı ile büyütülen örnekte elde edilmiştir. Büyüme oranının 0,14 ML/s olması durumunda, benzer özellikte kuantum noktalar oluşturabilmek için koşulların yeniden iyileştirilmesi gerekmiştir. Aynı malzeme miktarı (2,5 ML) için 505 °C büyüme sıcaklığında daha küçük ama benzer büyüklük dağılımı düzgünlüğünde kuantum nokta oluşumu sağlanmıştır. Ayrıca büyüme sonrasında tavlama işlemi yapılarak kuantum noktaların enerji seviyelerinin ayarlanabilirlikleri gösterilmiştir.

Aktif bölgesinde bulunan InAs QD katman sayısının değiştirildiği çok katman kızılötesi foto-algılayıcı yapılar büyütülmüş, aygıt haline getirilerek PL, tayfsal fototepki ve karanlık akım ölçümleri yapılmıştır. Üretilen fotodiyotlarda, katman sayısının artmasıyla, diyot üzerinden geçen akımın azaldığı ve tayfsal fototepki sinyalinde iyileşme olduğu gösterilmiştir. Kızılötesi algılama dalgaboyunda ayarlama yapabilmek için büyüme sonrasında farklı sıcaklıklarda tavlanaarak üretilen fotodiyotlarda, tavlama sıcaklığının artmasıyla, fototepki sinyalinin daha küçük enerji bölgesine kaydığı ve diyot üzerinden geçen akımın arttığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kuantum Nokta; InAs/GaAs; Kendiliğinden Oluşan; Moleküler Demet Epitaksi; Kızılötesi Fotodedyör

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### MBE GROWTH and CHARACTERIZATION OF SELF-ASSEMBLED InAs/GaAs QUANTUM DOT STRUCTURES FOR INFRARED DETECTION

Samet Özdemir  
Anadolu University  
Advanced Technologies Program  
Nanotechnology

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bülent ASLAN  
2014, 103 pages

In the scope of this thesis, single and multi-layered InAs/GaAs quantum dot structures have been grown and characterized. The growth kinetics of quantum dots have been investigated through a set of samples having different growth parameters for the purpose of clear and well-defined energy levels in the photoluminescence (PL) spectra.

Single-layered samples whose growth conditions, particularly the amount of material and the growth temperature, are systematically changed have been grown. By use of different techniques, primarily the PL, the density, distribution, size of the quantum dots have been determined. The inferences on the size and distribution drawn from the PL technique by determining the energy levels of the quantum dots have been confirmed with other techniques. The most homogeneous quantum dot size distribution was obtained from the sample grown with 0.11 ML/s at 490 °C for the InAs amount of 2.5 ML. The re-optimization of the growth conditions was required to obtain the quantum dots having similar properties when the growth rate was changed to 0.14 ML/s. The formation of the quantum dots that are smaller in size and having similar size distribution have been obtained at 505 °C growth temperature for the same material amount (2.5 ML). Additionally, the tunability of the energy levels by post-growth thermal treatment has been demonstrated.

Multi-layered infrared detector structures having different number of InAs QD active layers were grown. PL, spectral photoresponse and dark current measurements have been performed once the devices were fabrication. It has been shown that the dark current in the fabricated photodiodes was reduced and the photoresponse spectra were improved as the number of the layers are increased. It has been observed from the photodiodes annealed at different temperatures after their growth to tune the spectral detection range that the photoresponse spectra was shifted towards lower energy region and the dark current was reduced.

**Keywords:** Quantum Dot; InAs/GaAs; Self-Assembled; Molecular Beam Epitaxy; Infrared Photodetector.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve yaptığım çalışmaların her aşamasında engin bilgileri ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, doğru ve sistematik çalışmayla birçok ölçümün yapılabilmesinde elinden gelen imkânı sunan, samimiyetini ve arkadaşça yaklaşımını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Bülent Aslan'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında değerli bilgilerini ve yorumlarını paylaşan, arkadaşlığını hiç eksik etmeyen, zor zamanlarda motivasyon sağlayan, tez çalışmam boyunca geçen zamanı daha eğlenceli kılan değerli hocalarım Doç. Dr. Uğur Serincan'a ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kulakçı'ya çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezim kapsamında, çalıştığım örneklerin AFM görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Doç. Dr. Aykutlu Dâna'ya ve Yrd. Doç. Dr. Erhan Ayas'a teşekkür ederim. Tez çalışmama olan değerli öneri ve yorumları için Doç. Dr. Aykutlu Dâna'ya ayrıca teşekkür ederim.

Aygıt fabrikasyonu öğrenim sürecinde, yardımları ve tecrübelerini paylaştıkları için Seval Şahin'e ve Melih Korkmaz'a başta olmak üzere Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı üyeleri olan: Bülent Arıkan'a, Güven Korkmaz'a, Burcu Arpapay'a, Ayşe Şevik'e ve Mehmet Erkuş'a arkadaşlıkları ve hoş sohbetleri için hepsine ayrı ayrı teşekkür ederim.

Kendilerini ailem gibi gördüğüm, desteklerini hiç eksik etmeyen ve birçok açıdan bana katlanan dostlarım, Ömer Faruk Erol'a, Yusuf Eren Suyolcu'ya, Emin Yağcıoğlu'na ve Latif Korkmaz'a, içtenlikleri ve samimi dostlukları için çok ama çok teşekkür ederim. Ayrıca lisans eğitimim sırasında ve sonrasında, zor zamanlarımda bana destek olan kadim dostum İlker Sarıoğlu'na çok teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi tez çalışmam sırasında da yanımda olan, destekleri ve fedakârlıkları olmadan bitiremeyeceğim bu çalışmada sevgili aileme çok teşekkür ederim. Zor zamanların üstesinden gelme cesaretini veren, bana olan inancına ve ümidine hep ihtiyaç duyduğum, tez çalışmamı başarılı olarak bitirmemde en büyük fedakârlığın sahibi Yasemin Özgen'e en derin duygularla teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
TABLolar DİZİNİ .....	xi
<b>1.GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. KUANTUM NOKTA YARIİLETKEN YAPILAR</b>	<b>5</b>
2.1. InAs ve GaAs: Kristal ve Bant Yapısı.....	5
2.2. Temel Kuantum Nokta Özellikleri ve Epitaksiyel Olarak Büyütülmesi .....	8
2.3. Başlıca Büyütme Parametreleri .....	12
2.3.1. Malzeme miktarı .....	13
2.3.2. Büyütme sıcaklığı .....	15
2.3.3. Büyüme oranı.....	16
2.3.4. V/III oranı .....	18
2.4. Uygulama: Kızılötesi algılama ve öngörülen avantajları .....	20
<b>3. DENEYSEL YÖNTEMLER</b>	<b>23</b>
3.1. Büyütme Çalışmaları .....	23
3.1.1. MBE sistemi .....	24
3.1.2. RHEED cihazı.....	28
3.2. Aygıt Fabrikasyonu .....	30

3.3. Opto-Elektronik Karakterizasyon Teknikleri .....	32
3.3.1. Fotolüminesans karakterizasyonu .....	33
3.3.2. Tayfsal fototepki ölçümleri .....	35
3.3.3. Karanlık akım ölçümleri .....	36
3.4. Yapısal karakterizasyon çalışmaları .....	37

#### **4. EPİTAKSİYEL OLARAK KUANTUM NOKTA BÜYÜTME VE KARAKTERİZASYONU** **41**

4.1. InAs/GaAs Kendiliğinden Oluşan Kuantum Nokta Büyütme .....	41
4.1.1. Malzeme miktarı .....	45
4.1.2. Büyütme sıcaklığı .....	51
4.1.3. Büyüme oranı .....	57
4.1.4. Alttaş bağımlılığı .....	58
4.2. Büyütme Sonrası Tavlama .....	62

#### **5. KIZILÖTESİ FOTO-ALGILAYICI YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE OPTO-ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU** **64**

5.1. Kızılötesi Foto-Algılayıcı Yapıların Opto-Elektronik Karakterizasyonu ...	66
5.2. Kızılötesi Foto-Algılayıcılarda Tayfsal Tepki Bölgesinin Ayarlanması .....	71

#### **6. SONUÇLAR** **81**

#### **KAYNAKLAR** ..... **84** |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

1.1. QDIP yapıların MIR (3-5µm) ve LIR (8-12 µm) bölgede düşük sıcaklık (~77K) alıcılığının yıllara göre değişimi .....	3
2.1. GaAs çinko sülfür kristal yapısı .....	5
2.2. (a) Çinko sülfür kristal yapıda GaAs için düzlemler, (b) GaAs için (001) düzlemine dik yan kesit şematik gösterim, siyah noktalar As, gri noktalar Ga atomlarını temsil etmektedir .....	6
2.3. (a) GaAs ve (b) InAs için E-k diagramı .....	7
2.4. (a) Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletken malzeme (InAs ve GaAs) için şematik bant yapısı, (b) GaAs ve InAs'in bant hizalanması ve kuantum kuyu oluşumu .....	8
2.5. (a) Külçe, (b) kuantum kuyu ve (c) kuantum nokta yarıiletken yapıların ideal durum yoğunlukları .....	8
2.6. QD boyutlarının (a) ve potansiyel sınırlamanın büyütme doğrultusundaki (b) ve büyütme doğrultusuna dik doğrultudaki (c) etkisinin şematik gösterimi .....	9
2.7. (a) QD içindeki enerji seviyeleri ve elektron boşluk yeniden birleşmesini gösteren şematik bant yapısı. (b) QD yapılarında enerji seviyelerini ve durum doldurma etkisini gösteren PL spektrumu (örnek bu tez çalışması kapsamında büyütülmüştür) .....	10
2.8. Farklı büyüme kiplerinin şematik gösterimi: (a) 2 boyutta katman-katman büyüme: Frank-van der Merwe, (b) 3 boyutta ada büyümesi: Volmer-Weber, (c) katman-katman büyümeyi takiben 3 boyutta ada büyümesi: Stranski-Krastanov .....	11
2.9. Örgü uyumsuzluklarına bağlı olarak kristal yapıda (a) kusur oluşarak, (b) kusur olmadan adalar oluşarak rahatlatma (A: Alttaş, B: Epikatman) .....	12
2.10. 0,07 ML/s büyüme oranıyla 475 °C sıcaklıkta büyütülen örneklerde; (a) QD yoğunluğunun, (b) QD çapının ve (c) QD yüksekliğinin InAs malzeme miktarına göre değişimi .....	14
2.11. 0,1 ML/s büyüme oranıyla 500 °C sıcaklıkta büyütülen örneklerde QD nokta yoğunluğunun InAs malzeme miktarına göre değişimi .....	15



2.12. 0,053 ML/s büyüme oranıyla, 2,4 ML InAs malzeme miktarı ile büyütülen örneklerde; (a) QD çapının, (b) QD yüksekliğinin ve (c) QD yoğunluğunun büyütme sıcaklığına göre değişimi .....	16
2.13. Büyüme oranının fonksiyonu olarak QD yoğunluğunun değişimi .....	17
2.14. InAs QD'ların farklı V/III oranları ile büyütülmesi sonucu QD yoğunluğu değişimi .....	19
2.15. As <sub>2</sub> ve As <sub>4</sub> akısının büyüme oranının fonksiyonu olarak nokta yoğunluğuna etkisinin karşılaştırılması. ....	19
2.16. QDIP ve QWIP için (a) yan kesit katman yapısının, (b)voltaj altındaki potansiyel profili ve bant içi foto-algılama mekanizmasının şematik gösterimi.....	20
3.1. Moleküler demet epitaksi (MBE) sisteminin şematik gösterimi.....	26
3.2. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sistemi.....	28
3.3. RHEED cihazının çalışma geometrisinin şematik gösterimi .....	29
3.4. (a) İki boyutlu büyüme yüzeyine sahip GaAs ve (b) üç boyutlu büyüme yüzeyine sahip InAs QD'nın RHEED kırınım deseni görüntüsü .....	30
3.5. Kristal yüzeyin değişimi ile RHEED salınımları arasındaki ilişkiyi veren şematik gösterim .....	30
3.6. (a) Taşıyıcı paket üzerine yerleştirilmiş ölçüme hazır örnek, (b) 400×400 µm <sup>2</sup> büyüklükteki diyotları gösteren SEM fotoğrafı ve (c) QDIP örnek yapısının şematik gösterimi .....	32
3.7. PL spektrumu ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği .....	34
3.8. Tayfsal fototepki ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği ve FTIR içindeki optik yol .....	36
3.9. Karanlık akım ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği.....	37
3.10. AFM cihazının çalışma mekanizmasının şematik gösterimi .....	38
3.11. SEM cihazının şematik gösterimi .....	39
4.1. InAs büyüme oranını belirleyebilmek için büyütülen süperörgü yapı için GaSb (004) simetri eksenine etrafında alınan XRD sallantı eğrisi.....	42
4.2. Tek katman örneklerde gömülü kuantum noktalar ve yüzey kuantum noktaları için örnek yapısının şematik gösterimi .....	44
4.3. InAs malzeme miktarının sırasıyla 1,9 ML, 2,2 ML ve 2,5 ML olduğu S01, S02 ve S03 kod numaralı örneklerin 80 K PL spektrumu .....	45

4.4. 490 °C sıcaklıkta büyütülen (a) S01,(b) S02 ve (c) S03 kod numaralı örneklerle ait farklı uyarma şiddeti ile alınan 80 K PL spektrumları.....	47
4.5. Farklı InAs malzeme miktarı kullanılan S01, S02 ve S03 kod numaralı örneklerin 80 K PL spektrumu ölçümleri ile elde edilen s ve p enerji seviyelerine ait eğriler; (a) şiddet, (b) enerji ve (c) FWHM değişimi.....	48
4.6. S01 (sol), S02 (orta) ve S03 (sağ) kod numaralı örneklerin AFM (üst) ve SEM (alt) görüntüleri .....	49
4.7. (a) Yüzeyde (siyah renk oklar) ve gömülü (kırmızı renk oklar) InAs QD'ların TEM-BF görüntüsü. (b) Yüzeydeki QD'nın yüksek çözünürlük TEM görüntüsü: kırmızı renkte oklar QD çevresindeki gerilim alanını göstermektedir.....	50
4.8. S03 kod numaralı örneğe ait (a) STEM-ADF ve (b) STEM-BF görüntüleri .	51
4.9. 490 °C (S02), 505 °C (S04) ve 525 °C (S05) büyütme sıcaklıklarına sahip örneklerin düşük sıcaklık PL spektrumları .....	52
4.10. Aynı InAs malzeme miktarı için farklı sıcaklıklarda büyütülen (a) S02, (b) S04 ve (c) S05 kod numaralı örneklerle ait 80 K sıcaklıkta farklı uyarma şiddeti altında alınan PL spektrumları .....	53
4.11. Aynı InAs malzeme miktarı için farklı sıcaklıklarda büyütülen örneklerin 80 K PL ölçümlerinin analizi ile elde edilen s ve p enerji seviyelerine ait eğriler; (a) şiddet, (b) enerji ve (c) FWHM değişimi .....	54
4.12. 490 °C (sol), 505 °C (orta) ve 525 °C (sağ) büyütme sıcaklıklarına sahip örneklerin AFM (üst) ve SEM (alt) görüntüleri.....	55
4.13. QD yoğunluğunun büyütme sıcaklığı ve malzeme miktarının fonksiyonu olarak değişimi .....	56
4.14. (a) S03 ve S06 kod numaralı örneklerin aynı koşullar altında alınan kıyaslamalı PL spektrumları ve (b) S06 kod numaralı örneğin 80 K'de lazer şiddeti bağımlı PL spektrumu .....	57
4.15. 3 inç tüm alttaş üzerine (S06) ve çeyrek 4 inç alttaş üzerine (S07) büyütülen InAs QD yapıların düşük sıcaklık PL spektrumları .....	58
4.16. (a) S06 (3 inç alttaş) ve (b) S07 ( çeyrek 4inç alttaş) kod numaralı örneklerin lazer şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumları.....	59
4.17. 4 inç çeyrek alttaş üzerine 490 °C (S07), 505 °C (S08) ve 520 °C (S09) sıcaklıklarda büyütülenörneklerin 80 K PL spektrumları .....	60

4.18. (a) S08 ve (b) S09 kod numaralı örneklerin lazer şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumları ile örneklerin $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ alanından alınan AFM görüntüleri .....	61
4.19. (a) S03 kod numaralı örneğinin farklı sıcaklık ve sürelerde tavlandıktan sonra yapılan 80 K PL grafikleri, (b) tavlamanın etkisiyle enerji seviyelerindeki değişim.....	63
5.1. Tez kapsamında büyütülen QDIP yapısının şematik gösterimi .....	65
5.2. Çok tekrarlı QDIP örneklerinin GaAs (004) simetri eksenine etrafında alınan XRD sallantı eğrileri: (a) QDIP-1, (b) QDIP-2 ve (c) QDIP-3.....	66
5.3. 10 tekrar (QDIP-1), 40 tekrar (QDIP-2) ve 80 tekrar (QDIP-3) fotoalgılayıcıların 8 K PL spektrumları.....	67
5.4. InAs büyüme oranının belirsiz olduğu (a) S10, QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerin kıyaslamalı, (b) S10 kod numaralı örneğin uyarma şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumları .....	68
5.5. InAs QD katman sayısı 10 (QDIP-1), 40 (QDIP-2) ve 80 (QDIP-3) olan fotoalgılayıcıların 8 K sıcaklıkta alınan (a) kıyaslamalı, (b) düzgelemiş tayfsal fototepki spektrumları .....	69
5.6. InAs QD aktif katman sayısı 10 (QDIP-1), 40 (QDIP-2) ve 80 (QDIP-3) olan fotoalgılayıcıların 6 K sıcaklığında alınan karanlık akım ölçümleri K sıcaklığında alınan karanlık akım ölçümleri .....	71
5.7. 10 tekrar InAs QD aktif katman içeren QDIP-1 örneğinin (a) tavlansız ve iki farklı sıcaklıkta tavlansız parçaların kıyaslamalı PL spektrumları. (b), (c) ve (d) sırasıyla tavlansız, 800 °C'de 1 dk ve 850 °C 1 dk tavlansız parçaların lazer şiddeti bağımlı PL spektrumları.....	72
5.8. QDIP-1 kod numaralı örnekte tavlamanın etkisiyle enerji seviyelerinin değişimi.....	73
5.9. 40 tekrar InAs QD aktif katman içeren QDIP-2 örneğinin (a) tavlansız ve iki farklı sıcaklıkta tavlansız parçaların kıyaslamalı PL spektrumları. (b), (c) ve (d) sırasıyla tavlansız, 800 °C'de 1 dk ve 850 °C 1 dk tavlansız parçaların lazer şiddeti bağımlı PL spektrumları.....	74
5.10. 80 tekrar InAs QD aktif katman içeren QDIP-3 örneğinin (a) tavlansız ve iki farklı sıcaklıkta tavlansız parçaların kıyaslamalı PL spektrumları. (b), (c) ve (d) sırasıyla tavlansız, 800 °C'de 1 dk ve 850 °C 1 dk tavlansız parçaların lazer şiddeti bağımlı PL spektrumları.....	75

- 5.11. (a) QDIP-1, (b) QDIP-2 ve (c) QDIP-3 kod numaralı örneklerin tavlansayan ve iki farklı sıcaklıkta tavlansayan parçalarından üretilen fotodiyotların akım-voltaj eğrileri.....77
- 5.12. (a) QDIP-2 ve (b) QDIP-3 kod numaralı örneklerin tavlansayan ve iki farklı sıcaklıkta tavlansayan parçalarından üretilen foto-diyotların fototepki spektrumları .....78
5. 13. QDIP-1 kod numaralı örneğin düşük sıcaklık (8 K) (a) PL ve (b) tayfsal fototepki ölçümlerinin karşılaştırılması. PL spektrumunda enerjiler, WL enerjisi referans alınarak çizilmiş ve bu enerjilerin %70'ine karşılık gelen iletkenlik bandındaki enerji değerleri kırmızı kesikli çizgiyle gösterilmiştir .79
- 5.14. QDIP-3 kod numaralı örneğin tavlansayan ve tavlansayan parçalarına ait FIR bölgedeki fototepki spektrumları .....80

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa

Tablo 2.1. İki farklı büyüme oranı ile elde edilen QD'ların fiziksel özellikleri ....	17
Tablo 3.1. Literatürde yaygın olarak kullanılan InAs QD yapılar için temel büyüme parametreleri.....	24
Tablo 3.2. Tez kapsamında büyütülen tek ve çok katman QD örnekler .....	24
Tablo 4.1. Tez kapsamında büyütülen InAs QD'lar için kullanılan temel büyüme parametreleri.....	43
Tablo 4.2. AFM ve SEM görüntüleri ile PL spektrum analizlerinden elde edilen yapısal parametreler. ....	49
Tablo 4.3. AFM ve SEM görüntüleri ile PL spektrum analizlerinden elde edilen yapısal parametreler .....	56
Tablo 5.1. QDIP-1 kod numaralı örneğe ait tavlanmayan ve tavlanan parçaların 8 K PL spektrumundan elde edilen enerji seviyeleri.....	73
Tablo 5.2. QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerden üretilen fotodiyotların fototepki ölçümlerinde kullanılan voltaj ve diyot üzerinden okunan akım değerleri .....	77

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi yarı-iletken aygıt uygulamalarının hızla ilerlemesini sağlarken yeni nesil yüksek performanslı aygıtların keşfinin önünü açmış ve bu aygıtların üretim ve gelişimini kolaylaştırmıştır. Yarıiletken teknolojisi, tıp, askeri ve uydu/uzay araştırmaları gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanlarında bilgi depolama, veri aktarımı, ışık yayıcı/algılayıcı ve görüntüleme gibi uygulamaları bulunmaktadır. Uygulama alanları arasında olan algılayıcıların (özellikle kızılötesi algılayıcıların), uydu/uzay araştırmaları gibi çok özel konular, askeri ve sıradan sivil uygulamalar için önemi gittikçe artmakta bu nedenle de çalışmalar hız kesmeden uzun yıllardır devam etmektedir.

Yüksek performansları nedeniyle Cıva Kadmiyum Tellür (Mercury Cadmium Telluride, MCT, HgCdTe) tabanlı kızılötesi algılayıcılar uzun yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. MCT kızılötesi algılayıcıların üretim maliyetinin yüksek olması ve bu malzeme gurubu ile çalışmanın zorlukları alternatif malzeme arayışını arttırmıştır. Farklı bant aralığına sahip malzemelerin birbiri üzerine büyütülebilmesi, yapı içerisindeki taşıyıcılar üzerinde kuantum sınırlamanın etkisini arttırmış, düşük boyutlu yarıiletken aygıtların üretiminin yolunu açmıştır. Taşıyıcıların sınırlanmasındaki çeşitliliğin artmasıyla, kuantum yapılı kızılötesi foto-algılayıcılar (QSIP) olarak adlandırılan yeni bir algılayıcı sınıfı çıkmıştır [1].

QSIP sınıfındaki algılayıcıların gelişim sürecinde kuantum kuyu kızılötesi foto-algılayıcılar (QWIP), ilk akla gelen yapılardan biridir. Bu yapı, temel olarak kuantum kuyu içindeki izinli enerji seviyelerdeki taşıyıcıların kızılötesi ışımaya ile uyularak, kuyuyu sınırlayan potansiyel engeli aşarak, foto-akımı oluşturmasına dayanır. QWIP algılayıcı yapılarının en belirgin özelliği, optik soğurmanın gerçekleşmesi için gelen ışığın elektrik alan polarizasyon bileşeninin kuantum sınırlamayla aynı yönde olması zorunluluğudur [2]. Yapı, yüzeyine dik doğrultuda gelen fotonların algılanabilmesi ve soğurmanın artırılabilmesi için kırınım ızgaralarına ihtiyaç duymaktadır. QWIP'lerin, kuantum veriminin MCT'ye kıyasla düşük olmasına karşın malzeme üretiminin kararlı olması geniş formatlı [3], birden fazla bantta [4] ve renkte [5] algılama yapabilen algılayıcıların üretilmesi, kızılötesi algılayıcılar arasında yer edinmesini sağlamıştır. QWIP

yapıların normal doğrultuda algılama yapamaması ve düşük sıcaklıklarda çalışmaya ihtiyaç duymaları bilim insanlarını yeni arayışlara yönlendirmiştir.

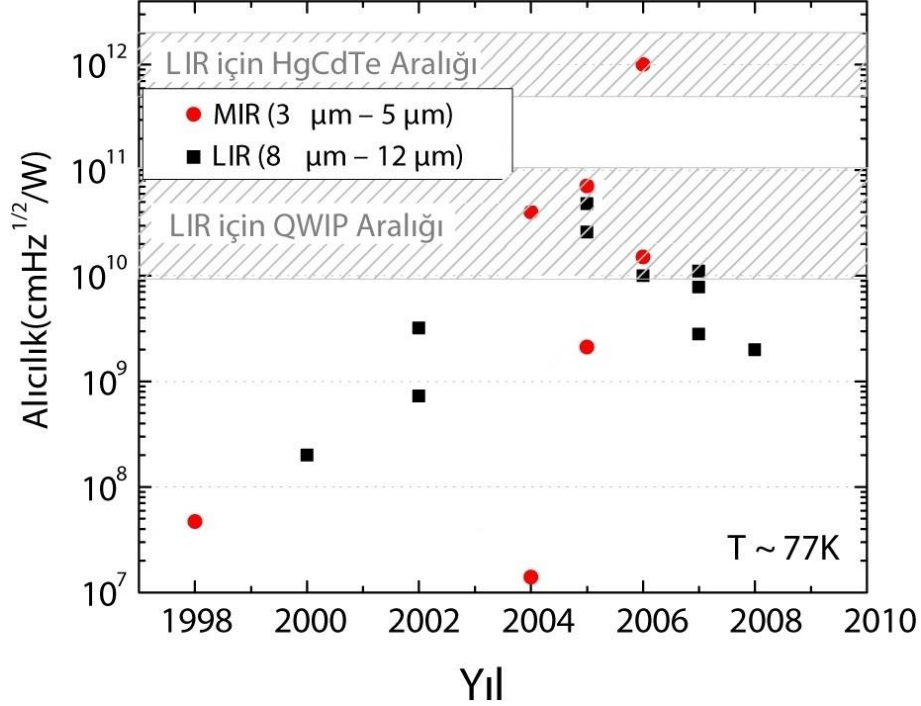
Kuantum nokta yapılar, taşıyıcıların üç boyutta hareketlerinin sınırlandırılmasıyla oluşan sistemlerdir. Sınırlandırılan bölgenin nanometre ölçeğinde olması, kuantum etkilerin baskın olduğu ve sınırlı bölge içinde kesikli enerjilerin olduğu duruma karşılık gelmektedir. Bu üç boyutlu sınırlandırılmış ve kuantum nokta olarak adlandırılan fiziksel bölge farklı teknikler ve yöntemler kullanılarak oluşturulabilmektedir. Kuantum nokta yoğunluğunun ve dağılımının en fazla kontrol edilebildiği yöntem epitaksiyel olarak büyütme yöntemidir: En yaygını moleküler demet epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) sistemidir.

Kuantum nokta yapıların uygulama alanları arasında yer alan kuantum nokta kızılötesi foto-algılayıcı (quantum dot infrared photodetector, QDIP) yapıların çalışma ilkesi QWIP yapılarla benzerlik göstermektedir. QDIP yapıların QWIP'lere kıyasla öngörülen bazı avantajlarının olması nedeniyle özel ilgi görmektedir. Başlıca avantajları şöyle sıralanabilir;

- Taşıyıcıların üç boyutta sınırlandırılması, normal doğrultuda gelen ışığın algılanabilesini sağlamaktadır. Böylece foto-algılayıcıların üretiminde hem zorluk hem de ek maliyet gerektiren, kırınım ızgaralarına duyulan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır [6].
- Durum yoğunluklarının daha az olması nedeniyle, kuantum nokta yapılar hem daha düşük karanlık akım değerlerine hem de daha yüksek sıcaklıklarda çalışma özelliklerine sahiptir
- Taşıyıcıların yaşam sürelerinin QWIP yapılardakine kıyasla 10 ile 100 kat daha fazla olduğundan, QDIP yapılarda foton soğurma verimi, foto-iletkenlik kazancı ve foto-tepkisellik daha yüksektir [6].

QDIP algılayıcılar bahsi geçen bu avantajları nedeniyle geçtiğimiz birkaç on yıl içinde hızla gelişmiş ve orta, uzun ve uzak dalgaboyu kızılötesi bölgelerinde tek ve çift renk/bantta çalışan yapılar raporlanmıştır [7-13 ve içlerindeki referanslar]. Şekil 1.1'de orta kızılötesi (mid infrared, MIR) ve uzun kızılötesi (long infrared, LIR) bölgede sıvı azot sıcaklığında çalışan, literatürde yayınlanmış bazı çalışmalarda verilen QDIP yapıların alıcılık (detectivity) değerlerinin yıllara göre değişimi verilmiştir [14, ve içindeki referanslar]. LIR bölge için QDIP

yapıların genel olarak QWIP performansı ile kıyaslanabilir olduğu ancak MCT değerlerini yakalayamadığı görülmektedir.



Şekil 1.1. QDIP yapıların MIR (3-5μm) ve LIR (8-12 μm) bölgede düşük sıcaklık (~77K) alıcılığının yıllara göre değişimi [14]

Kuantum nokta kızılötesi dedektörler, öngörülen avantajlarının uygulamada yaratacağı performans artışını yakalayamamıştır. Bunun en büyük sebebi epitaksiyel olarak büyütülen kuantum noktaların kontrollerindeki zorluktur. Özellikle epitaksiyel olarak kendiliğinden oluşan (self-assembled) yapıların kullanıldığı uygulamalarda, istenilen performans değerlerine ulaşabilmek için kuantum nokta büyüklüğünde ve dağılımında hassas bir kontrol gerekmektedir. Nokta oluşumunun karmaşık doğası, bu sürecin ayrıntılı olarak çalışılmasını, nokta oluşum dinamiklerinin anlaşılmasını ve kullanılan sistemin amaca uygun koşullandırılmasını gerekli kılmaktadır. Literatürde, epitaksiyel sistemlerde nokta oluşumunu etkileyen etmenlerin (parametrelerin) sistematik olarak çalışıldığı çok sayıda çalışma olmasına rağmen kontroldeki zorluklar tam olarak aşılabilmemiş değildir.

Bu tez çalışmasının kapsamı, kızılötesi algılamada kullanılan kendiliğinden oluşan InAs/GaAs QD yapıların MBE sistemi ile üretimini ve karakterizasyonunu



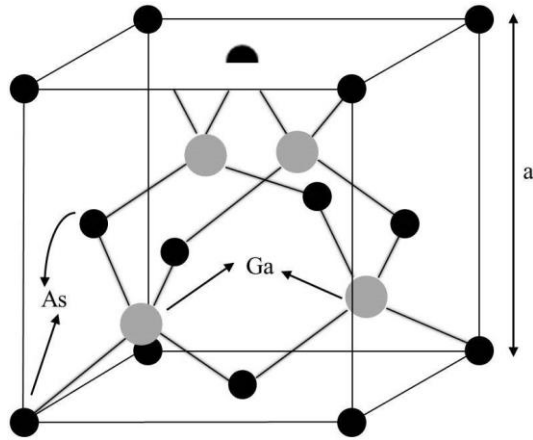
içermektedir. Giriş bölümünde yarıiletken teknolojisinin gelişim sürecinden ve bu süreçteki kuantum nokta kızılötesi algılayıcıların yerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde InAs/GaAs kuantum nokta yapıların genel özellikleri ve üretimi anlatılmıştır. Bölüm 3’de, tez kapsamında kuantum nokta yapıların üretim ve karakterizasyonunda kullanılan yöntemler ve teknikler, Bölüm 4’de ise tek katman kuantum nokta büyütme ve büyütme parametrelerinin kuantum nokta oluşumu üzerine etkisi anlatılmıştır. Beşinci bölümde QDIP yapıların büyütme çalışmaları ile opto-elektronik karakterizasyon çalışmaları anlatılmıştır. Altıncı bölümde ise elde edilen sonuçlar verilmiştir.

## 2. KUANTUM NOKTA YARIİLETKEN YAPILAR

Bu bölümde, ilerleyen bölümlerde anlatılacak konular için temel bilgiler verilecektir. Kullanılan malzeme sistemi için kristal yapı, bant yapısı ve durum yoğunlukları ifadeleri kısaca anlatılıp tez kapsamına giren ilgili kısımlar vurgulanacaktır. Kuantum nokta yapılar hakkında temel bilgiler verilerek kuantum nokta oluşumundaki önemli etmenler anlatılacak daha sonra tez kapsamında ele alınan yapıların büyüme kinetiklerinden bahsedilecektir. Ayrıca büyüme için önemli olan başlıca büyütme parametreleri ve etkileri anlatıldıktan sonra son olarak çalışılan malzeme gurubu için uygulama alanlarından kısaca bahsedilecektir.

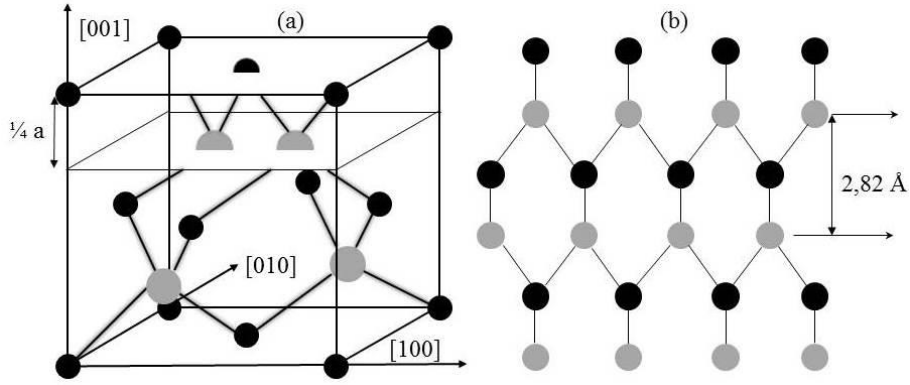
### 2.1. InAs ve GaAs: Kristal ve Bant Yapısı

GaAs ve InAs, III-V grubu bileşik yarıiletkenlerde en yaygın olan çinko-sülfür (zinc-blend) kristal yapıya sahiptirler. Bu yapı, iki tane kübik yapının iç içe ve birbirine dik biçimde geçmesinden meydana gelir. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, bir çinko sülfür yapı iki farklı atomdan oluşur: Ga/In atomları içteki, As atomları ise dıştaki kübik yapıyı oluşturarak en temel birim hücreyi meydana getirir. Bir birim hücrede, “a” örgü sabiti olmak üzere, As atomları kübik yapının köşelerinde ve her yüzeyin merkezinde konumlanırken, her bir Ga/In atomları tetrahedral olarak dört As atomuna bağlanır [14-19].



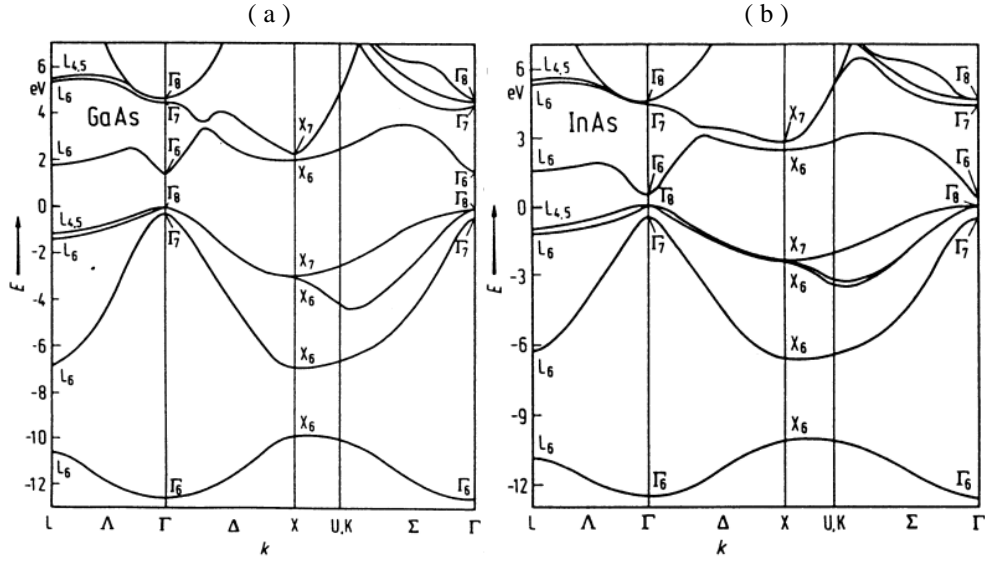
Şekil 2.1. GaAs çinko sülfür kristal yapısı [16]

Çoklu eklem III/V grubu yarıiletken yapılarda, GaAs için genellikle (001) kristal yönelimi olan alttaş kullanılır ve her (001) düzlemi farklı atomlardan oluşan alt düzlemler ile ayrılır (Şekil 2.2a) [16]. Alt düzlemlerin her biri sadece As ya da sadece Ga/In atomlarından oluşmaktadır ve alt düzlemler arası mesafe (001) doğrultusunda GaAs için  $\frac{1}{4} a = 1,4133 \text{ \AA}$ 'dur. Ga/In ve As atomlarından oluşan periyodik katmanların her birine bir atomik katman (monolayer, ML) adı verilir ve GaAs için 1 ML kalınlık  $2,8266 \text{ \AA}$  değerine karşılık gelmektedir (Şekil 2.2b) [18]. Dolayısıyla, GaAs ve InAs için oda sıcaklığında örgü sabitleri sırasıyla  $5,6533 \text{ \AA}$  ve  $6,0584 \text{ \AA}$ 'dur [19].



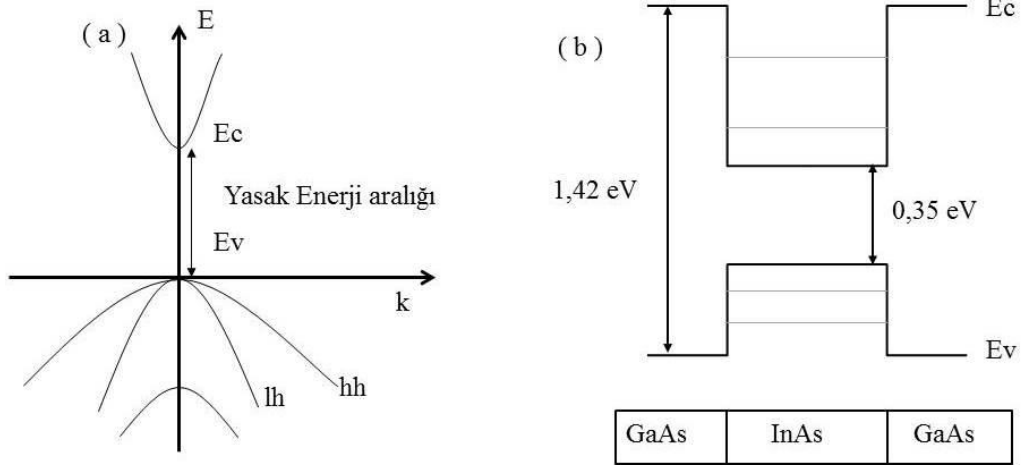
**Şekil 2.2.** (a) Çinko sülfür kristal yapıda GaAs için düzlemler, (b) GaAs için (001) düzlemine dik yan kesit şematik gösterim, siyah noktalar As, gri noktalar Ga atomlarını temsil etmektedir [16,18]

InAs ve GaAs, doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerdir. GaAs ve InAs yarıiletkenler için hesaplanmış bant yapıları Şekil 2.3'de verilmiştir. Bütün III-V grubu yarıiletkenlerde değerlik bandının en büyük değerini oluşturan ağır boşluk (heavy hole, hh) ve hafif boşluk (light hole, lh) bantları  $\Gamma$  noktasında konumlanmaktadır [11]. Buna karşılık, iletkenlik bandında  $\Gamma$ ,  $L$  ve  $X$  vadisi olmak üzere üç tane minimum noktası vardır. Bu minimum noktalarının birbirine göre dizilimi yarıiletkenin bant aralığını belirlemektedir. İletkenlik bandının minimumu ve değerlik bandının maksimumu aynı  $\Gamma$  noktasına ( $k=0$ ) karşılık geldiğinden GaAs ve InAs doğrudan bant aralıklı malzemelerdir ve bantlar arası elektronik geçişlerde momentum korunumu için ek bir etmene (fonon gibi) ihtiyaç duymazlar (Şekil 2.4) [20].

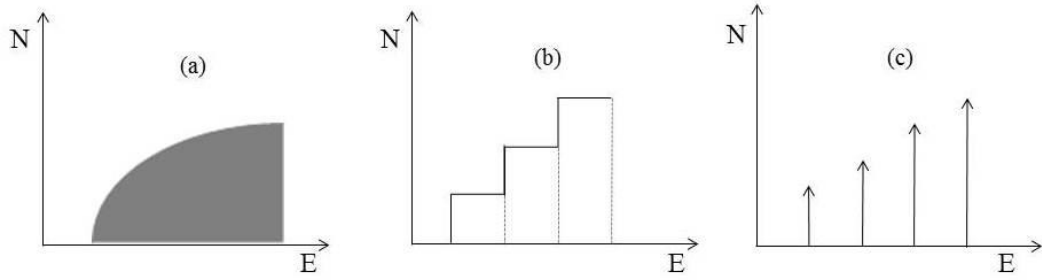


Şekil 2.3. (a) GaAs ve (b) InAs için E-k diagramı [16]

Oda sıcaklığında GaAs ve InAs külçe malzemelerinin bant aralıkları sırasıyla 1,42 eV ve 0,35 eV'dur. Daha küçük yasak enerji aralığına sahip InAs, yasak bant aralığı daha büyük olan GaAs ile bir araya getirildiğinde InAs'ın değerlik ve iletkenlik bant kenarları GaAs'in bant aralığı içerisinde kalır. Tip-I bant yapısı olarak bilinen bu hizalanma şeklinde GaAs, elektron ve boşluklar için bir potansiyel engel gibi davranır. Bu tabakaların ardışık ve çok tekrarlı olarak sıralanması, kuantum kuyu yapısının oluşmasına yani taşıyıcıların bir boyutta sınırlanmasına ve dolayısıyla kesikli enerji seviyelerinin oluşmasına sebep olur (Şekil 2.4b). Kuantum kuyu sistemlerinde taşıyıcılar diğer iki boyutta serbest hareket edebildikleri için, alt sınırı bir boyuttaki sınırlamayla belirlenen enerji seviyeleri üzerinde her enerji seviyesinde bulunabilirler. Bu sistemler için elektronların izinli enerji durumlarını gösteren *durum yoğunluğu* – enerji grafiği şematik olarak Şekil 2.5b'de gösterilmiştir. Bir boyutta GaAs matris içinde kendiliğinden oluşan InAs kuantum nokta sistemlerinde ise sınırlama üç boyutta olduğundan, tıpkı atomda olduğu gibi kesikli enerji seviyeleri oluşur [21]. Durum yoğunluğu – enerji grafiğinin şematik olarak Şekil 2.5c'de gösterilen InAs/GaAs kuantum nokta sisteminin bant yapısı ise yine Şekil 2.4b'de gösterilen kuantum kuyu sistemleriyle aynı şekilde yapılmaktadır.



**Şekil 2.4.** (a) Doğrudan bant aralığına sahip yarıiletken malzeme (InAs ve GaAs) için şematik bant yapısı, (b) GaAs ve InAs'in bant hizalanması ve kuantum kuyu oluşumu [20]

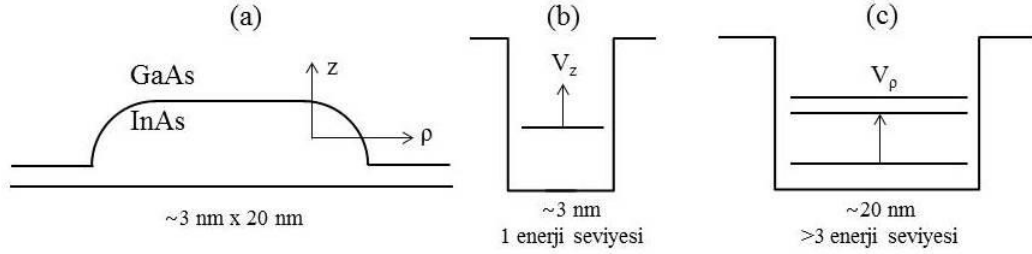


**Şekil 2.5.** (a) Külçe, (b) kuantum kuyu ve (c) kuantum nokta yarıiletken yapıların ideal durum yoğunlukları [21]

## 2.2. Temel Kuantum Nokta Özellikleri ve Epitaksiyel Olarak Büyütülmesi

Kuantum nokta (QD) kristal yapılar, taşıyıcıların üç boyutta sınırlandırılmalarından oluşan nano ölçekli kristal yapılardır. QD büyüklüklerinin değişmesi, kuantum sınırlamanın etkisini değiştirdiği için nokta içerisinde bulunan izinli enerji seviyelerinin sayısı ve enerji seviyelerinin konumları değişmektedir. Atoma olan benzerliklerinden dolayı yarıiletken kuantum nokta yapılar *yapay atom* olarak da adlandırılmakta ve oluşan enerji seviyeleri de atomlardaki gibi “s, p, d, f” gibi harflerle tanımlanmaktadır. Disk şeklindeki bir kuantum nokta için yan kesit şematik gösterim Şekil 2.6a’da verilmiştir. QD’larda, büyütme doğrultusunda ve büyütme düzleminde farklı sınırlanma koşulları vardır. Şekil 2.6’da gösterildiği gibi, büyütme doğrultusundaki 3-4 nm’lik yükseklik nokta içinde sadece bir tane enerji seviyesi oluşmasına imkân

sağlarken, büyütme düzlemindeki yaklaşık 20 nm en az üç farklı enerji seviyesine izin vermektedir [22].

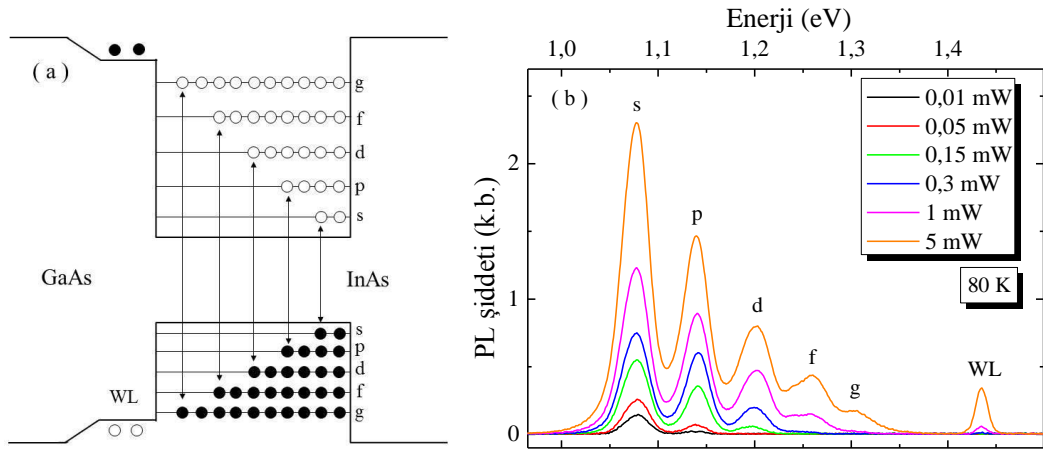


**Şekil 2.6.** QD boyutlarının (a) ve potansiyel sınırlamanın büyütme doğrultusundaki (b) ve büyütme doğrultusuna dik doğrultudaki (c) etkisinin şematik gösterimi. [22]

QD'ların büyüklüğündeki değişim, sınırlanma koşullarını değiştirdiği için enerji seviyelerini değiştirecek, böylece herhangi bir uyarma altında nokta içindeki elektronların ışınım dalgaboyunu değiştirecektir. Dolayısıyla QD'ların enerji seviyelerinin ayarlanması veya istenilen dalga boyunda ışınım yapması, QD büyüklüğünü değiştirmekle mümkün olmaktadır. Nokta büyüklüğünün ayarlanması/değiştirilmesi ise büyütme parametrelerinin değiştirilmesi ile yapılabilmektedir. QD'ların opto-elektronik karakterizasyonunda çok yaygın kullanılan fotoluminesans (photoluminescence, PL) tekniği, QD'ların ışınım dalga boyunun dolayısıyla enerji seviyelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. QD yapılarında, sistemin yüksek enerjili fotonla uyarılmalarıyla oluşturulan ve QD içine düşen elektron ve boşluklar, iletkenlik ve değerlik bandındaki sınırlandırılmış enerji seviyelerinde yeniden birleşerek ışınım yaparlar. GaAs matris içine gömülen ve her tarafından sınırlandırılmış potansiyelle çevrili InAs QD'lardan alınan PL sinyali, kuantum noktaların büyüklükleri, yoğunlukları gibi parametreler hakkında bilgi verir.

QD'larda durum yoğunluklarının kesikli olmasından dolayı PL spektrumu da kesiklidir (Şekil 2.7). Ayrıca enerji seviyelerini işgal eden elektron sayısı enerji seviyesine göre farklılık göstermektedir. İletkenlik (değerlik) bandındaki her enerji seviyesinde belirli sayıda elektron (boşluk) bulunabilmektedir. Dolayısıyla, özellikle katkısız sistemlerde uyarma şiddetinin (birim zamanda gelen foton sayısı) artmasıyla, elektron ve boşlukların yeniden birleşmesine fırsat vermeden

yenilerin oluşturulduğu için sadece taban durumu değil üst enerji seviyeleri de dolmaktadır. Düşük uyarma şiddeti ile sadece s enerji seviyelerinden elektron boşluk yeniden birleşmesi gözlenirken, uyarma şiddetinin artması ile daha yüksek enerji seviyelerinde (p, d, f, g vb) bulunan elektron ve boşluklar da birleşerek ışığa yayırlar. Bu durum Şekil 2.7’de şematik olarak gösterilmiş ve uyarma şiddeti arttıkça farklı enerji seviyelerinin gözlemlendiği PL spektrumu verilmiştir.



**Şekil 2.7.** (a) QD içindeki enerji seviyeleri ve elektron boşluk yeniden birleşmesini gösteren şematik bant yapısı. (b) QD yapılarında enerji seviyelerini ve durum doldurma etkisini gösteren PL spektrumu (örnek bu tez çalışması kapsamında büyütülmüştür).

QD kristal yapıları elde etmek için, kimyasal sentez, litografi ya da epitaksiyel olarak büyütme gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Yüksek yoğunluk ve düzgün dağılım elde edilebilmesi aygıt performansı açısından önemli olup epitaksiyel yöntemler kullanılarak söz konusu değişkenlerin kontrol edilebilirliği artırılabilir [23]. Epitaksiyel yöntemin kullanıldığı en yaygın sistemler ise metal organik kimyasal buhar biriktirme (Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) ve moleküler demek epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) sistemleridir [23]. Bu yöntemlerle üç boyutlu ve kristal kusuru olmayan adacıklar (kuantum nokta yapıları) büyütülmek istendiğinde, seçilen malzeme birleşiminin büyüme kinetiklerinin bilinmesi oldukça önemlidir [24].

Kullanılan malzeme sisteminin örgü sabitleri ve kimyasal bağlanma arasındaki ilişki, malzemelerin külçe ve yüzey enerjileri ile etkileşim enerjileri

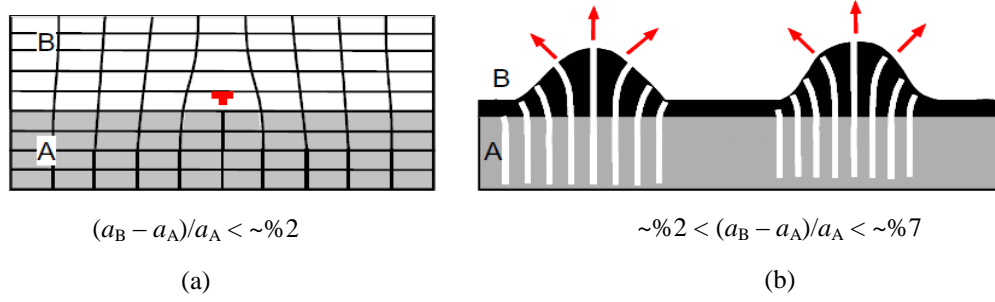
farklı durumlara sebep olmaktadır: Herhangi bir A alttaşı üzerine bir B kristali epitaksiyel olarak büyütüleceğinde gözlenmesi muhtemel büyüme kinetikleri Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilmiştir. A ve B bağlanması çok sıkı olduğu durumda, B’nin yüzey alanı azalırken ara yüzey etkileşim alanı artma eğiliminde olacaktır. Böylece yapı, Şekil 2.8a’da gösterildiği gibi ve Frank van der Merwe (FM) olarak adlandırılan tabaka-tabaka yani iki boyutta büyüyecektir [24]. Bu durum, A ve B malzemelerinin örgü sabitlerinin birbirleriyle uyumlu olduğu duruma karşılık gelmektedir. Diğer yandan A-B bağlanması zayıf ise kristal yapıda bir gerilme meydana gelecektir. Dolayısıyla yapı Volmer-Weber (VW) olarak adlandırılan üç boyutlu olarak büyüyecektir (Şekil 2.8b): Bu durum ise, A ve B malzemelerinin örgü sabitlerinin birbirlerinden çok farklı olduğu duruma karşılık gelmektedir [24].



**Şekil 2.8.** Farklı büyüme kiplerinin şematik gösterimi: (a) 2 boyutta katman-katman büyüme: Frank-van der Merwe, (b) 3 boyutta ada büyümesi: Volmer-Weber, (c) katman-katman büyümeyi takiben 3 boyutta ada büyümesi: Stranski-Krastanov. [24]

Bu iki büyüme kipi arasında bulunan ve Stranski-Krastanov (SK) olarak adlandırılan diğer büyüme kipinde, yapı başlangıçta iki boyutlu olarak büyümeye başlar, sonra B-B bağlanma enerjisi A-B bağlanma enerjisini aştığı için yapıda gerginlik meydana gelir [24]. Oluşan bu gerginlik büyüme devam ettikçe yerini rahatlamaya bırakır ve üç boyutlu büyüme başlar; böylece, QD yapılar oluşur (Şekil 2.8c). Bu durum Şekil 2.9b’de şematik olarak gösterilmiştir. Yapının iki boyutlu büyüdüğü kritik kalınlık bölgesi *ıslanma katmanı* (wetting layer, WL) olarak adlandırılır. GaAs üzerine büyütülen InAs QD yapılar Stranski-Krastanov kipine örnektir.





**Şekil 2.9.** Örgü uyumsuzluklarına bağlı olarak kristal yapıda (a) kusur oluşarak, (b) kusur olmadan adalar oluşarak rahatlama (A: Alttaş, B: Epikatman) [24].

III-V grubu yarıiletken malzemeler kullanılarak; InGaAs/GaAs [25-27], InAs/InGaAs [28-31], InAs/InP [32-41], InAs/AlAs [42-46] ve InAs/GaAs [47-77] sitemleri için epitaksiyel olarak SK kipi ile QD büyütme çalışmaları yapılmıştır. Bunlar arasında en yaygın çalışılan yapılar, *kendiliğinden oluşan* (self-assembled) InAs/GaAs QD yapılarıdır. InAs ve GaAs kristallerinin örgü sabitleri (sırası ile 6,0584 Å ve 5,65325 Å) arasında yaklaşık % 7 örgü uyumsuzluğu vardır. Bu nedenle, GaAs üzerine büyütülmek istenen InAs kristali, kritik kalınlığa ulaşana kadar iki boyutlu büyüyecek sonrasında rahatlayarak *kendiliğinden* topaklar oluşturacaktır.

Atomik mertebede kontrol sağlayan MBE sistemi, kendiliğinden oluşan InAs/GaAs QD kristal yapıları elde etmek için ideal bir sistemdir. Örgü uyumsuz malzemelerin kullanılmasından dolayı her ne kadar kendiliğinden oluşan olarak adlandırılırsalar da, InAs/GaAs QD yapıları elde etmek için hassas büyütme kontrolü gerekmektedir. QD yoğunluğu, büyüklüğü, yüzey dağılımındaki düzgünlüğü gibi parametrelerin istenildiği gibi ayarlanabilmesinde çok sayıda parametre etkin rol oynamaktadır: Kristal yapının büyüme oranı, alttaş sıcaklığı ve malzeme miktarı en önemli parametrelerden bir kaçıdır.

### 2.3. Başlıca Büyütme Parametreleri

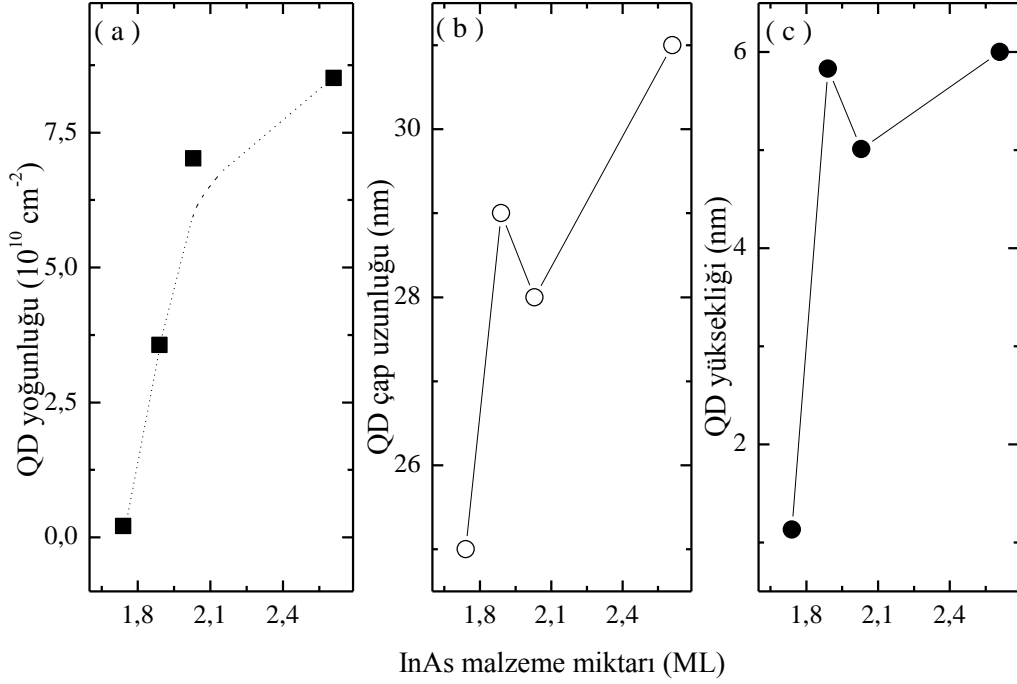
InAs/GaAs QD'lar bir MBE siteminde büyütülmek istenildiği zaman öncelikli olarak başlıca büyütme parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Kullanılan malzeme miktarı, büyütme sıcaklığı, V/III oranı, büyüme oranı gibi kontrol edilebilir büyütme parametreleri, kuantum nokta oluşumunu etkilediği için

farklı optik ve elektriksel özellikler gösteren kuantum nokta sistemleri üretmek mümkündür.

### 2.3.1. Malzeme miktarı

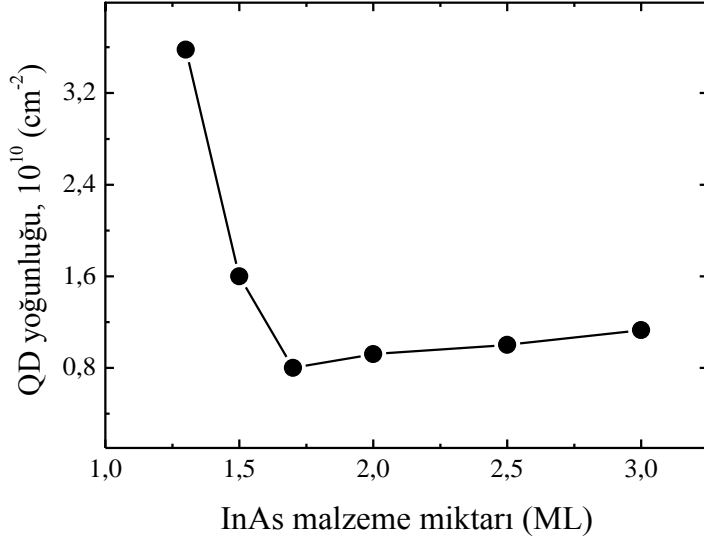
Kullanılan malzeme miktarı, QD yapıların şekil, büyüklük ve dağılımlarını etkileyen en etkin parametrelerden biridir. Değişen malzeme miktarı QD'ların hem büyütme doğrultusunda hem de düzlemsel doğrultuda büyüklüklerini değiştirmektedir. Her iki doğrultudaki büyüklüğün değişmesi kuantum sınırlamanın etkisini değiştirdiği için nokta içerisinde bulunan enerji seviyelerinin konumlarında kaymalar meydana gelmektedir. Literatürde, malzeme miktarının QD oluşumu üzerine etkisinin, yapısal ve opto-elektronik olarak incelendiği pek çok çalışma bulmak mümkündür [48-55]. Ancak konunun daha kolay anlaşılır olması için sadece birkaç çalışmadan bahsedilecektir.

Diğer bütün büyütme parametrelerinin sabit tutulup, farklı miktarlarda InAs kullanılarak büyütülmüş yapılardan elde edilen QD'lara ait bilgiler Şekil 2.10'da verilmektedir. Kullanılan malzeme miktarının artmasıyla oluşan nokta yoğunluğu artmaktadır. 1,74 ML InAs kullanılması durumunda nokta yoğunluğu en düşük seviyelerdeyken ( $\sim 10^9/\text{cm}^2$ ), InAs miktarı arttıkça ( $\sim 2$  ML) nokta yoğunluğu hızla artmaktadır. InAs miktarının daha fazla arttırılması durumunda ise ( $>2$ ML) nokta yoğunluğundaki artış hızı yavaşlamakta ve doyuma (saturation) ulaşmaktadır [52]. Doygunluğa ulaşması sadece yeni QD oluşumundan değil aynı zamanda In atomlarının, olmuş QD'lardan ayrılıp yeni noktalar oluşturması olabilmektedir. Malzeme miktarının artmasıyla In atomlarının ilk oluşmuş QD'lardan ayrılarak yeni QD'lar oluşturması nokta büyüklüğünün azalmasına neden olmuş, bu yüzden başlangıç durumundaki kuantum nokta oluşum hızı yavaşlamıştır. InAs QD çap büyüklüğü ve yüksekliğindeki eğilim de benzer sonuçlar vermektedir. 1,89 ML malzeme kullanıldığı durumda nokta çapı ve yüksekliği en büyük değerlere ulaşmaktadır [52].



**Şekil 2.10.** 0,07 ML/s büyüme oranıyla 475 °C sıcaklıkta büyütülen örneklerde; (a) QD yoğunluğunun, (b) QD çapının ve (c) QD yüksekliğinin InAs malzeme miktarına göre değişimi (referans 52'deki Şekil 2 ve Şekil 3'den alınarak yeniden çizdirilmiştir)

Daha az InAs malzemesi kullanımında QD oluşumu daha farklı davranabilmektedir. Düşük miktarlarda InAs kullanılması durumunda nokta yoğunluğunun nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 2.11'de verilmiştir [53]. 1,3 ML InAs malzeme miktarı kullanıldığı durumda QD yoğunluğu yüksek iken malzeme miktarı 1,5 ML ve 1,7 ML olduğunda QD yoğunluğunda belirgin bir şekilde düşüş görülmektedir. Bu durumun, malzeme miktarının artması sonucu daha büyük çapta QD'lar oluştuğu, böylece de birim alana düşen QD sayısının azalmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Ayrıca 2 ML ve fazla malzeme miktarı kullanılarak büyütülen QD yapıların nokta yoğunluklarında malzeme miktarı artışı ile ciddi şekilde değişmediği görülmektedir. Bunun nedeni artan malzeme miktarının nokta yüksekliğini arttırması olarak ifade edilmektedir [53]. Gönderilen InAs malzeme miktarındaki değişimin nokta oluşumuna etkisi görüldüğü gibi farklılıklar göstermektedir. Bu durum, nokta oluşum dinamiklerinin sadece madde miktarına bağlı olmadığını, diğer büyüme parametrelerin de bu süreçte etkin rol aldığını göstermektedir.



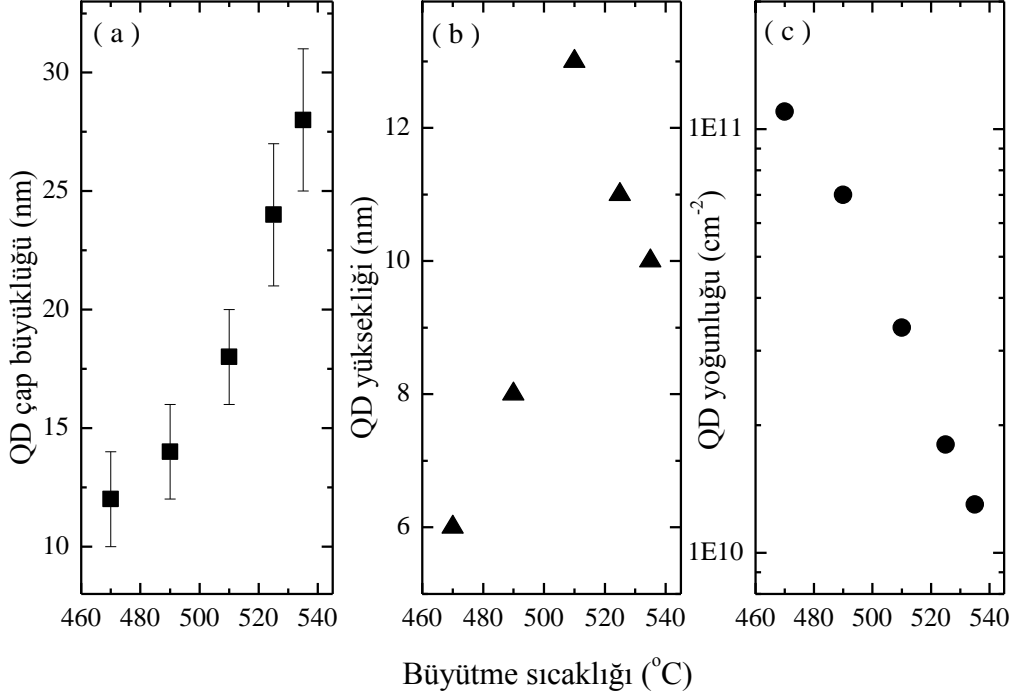
**Şekil 2.11.** 0,1 ML/s büyüme oranıyla 500 °C sıcaklıkta büyütülen örneklerde QD nokta yoğunluğunun InAs malzeme miktarına göre değişimi (grafikteki veriler referans 53'deki Şekil 4'den alınarak yeniden çizdirilmiştir)

### 2.3.2. Büyütme sıcaklığı

Büyütme sıcaklığının değişmesi, QD kristal yapıların büyütüleceği yüzeydeki atomik hareketliliği etkilediğinden nokta oluşumunda çok etkin rol oynamaktadır. Büyütme sıcaklığının artırılması ya da azaltılması, büyüme yüzeyinde meydana gelen atomik/moleküler hareketliliğin artırılmasına ya da azaltılmasına neden olmaktadır. Büyütme sıcaklığı, kristal büyütülecek yüzeye gelen atom/molekül demetinin, hem büyüme yüzeyindeki difüzyon hareketini hem de yüzeye bağlanma enerjisini etkilemektedir. Bu etkiler göz önüne alındığında, sıcaklıktaki artış, başta QD'ların büyüklükleri olmak üzere, yoğunluklarını ve dağılımlarını değiştirmektedir [49, 50, 53-58].

Büyütme sıcaklığının artması ile QD büyüklüklerinin ve nokta yoğunluğunun değişimini veren grafik Şekil 2.12'de verilmiştir. Düşük büyüme sıcaklıklarında, QD yükseklik ve çap büyüklüğünün daha küçük değerlerde olduğu görülmektedir. Büyütme sıcaklığı arttıkça, yüzeye tutunan In atomlarının (In adatom) hareket mesafeleri (migration length) arttığı için nokta büyüklükleri de artmaktadır [58]. 470 °C büyüme sıcaklığı olan QD'lar ~12 nm çapında ve 6 nm yüksekliğe sahip iken 530 °C büyüme sıcaklığı olan QD'lar ~28 nm çapında ve 10 nm yüksekliğe sahip oldukları görülmektedir. Büyütme sıcaklığının

artmasıyla daha büyük noktalar oluşmakta, bu durum sonucunda ise birim alana düşen nokta sayısı azalmaktadır (Şekil 2.12c) [58].



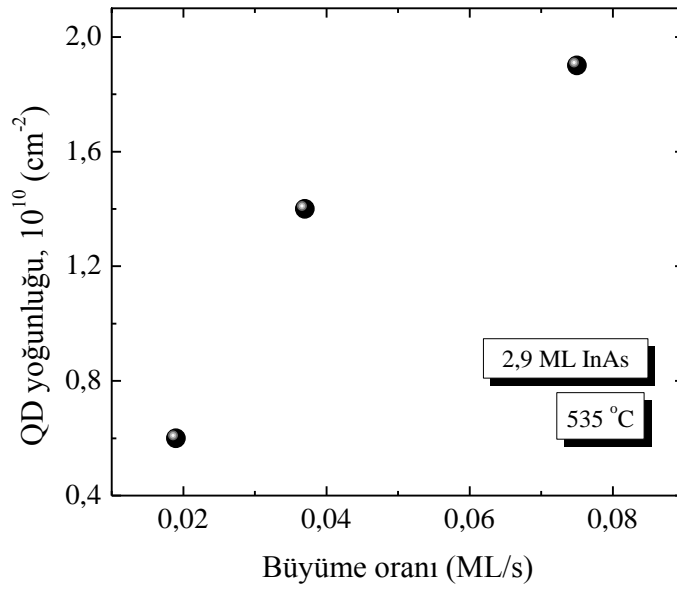
**Şekil 2.12.** 0,053 ML/s büyüme oranıyla, 2,4 ML InAs malzeme miktarı ile büyütülen örneklerde; (a) QD çapının, (b) QD yoğunluğunun ve (c) QD yüksekliğinin büyüme sıcaklığına göre değişimi (grafikler, verilerin referans 58'deki Tablo 1'den alınmasıyla çizdirilmiştir.)

### 2.3.3. Büyüme oranı

Büyüme sıcaklığı ve malzeme miktarı değişiminde olduğu gibi, büyüme oranının değişmesi de QD oluşumunu etkileyen önemli bir değişkendir. Büyüme oranını belirleyen etken III grubu malzemenin akı miktarıdır. Akı miktarı ise kaynak malzemenin sıcaklığı ile orantılıdır. Büyüme oranının artırılması, III grubu kaynak malzemenin sıcaklığının artırılması ile, azaltılması ise kaynak malzemenin sıcaklığının azaltılması ile sağlanmaktadır.

QD oluşum sürecinde büyüme oranının değiştirilmesi en başta nokta yoğunluğunu, buna paralel olarak nokta şekil/büyükülüğü ve dağılımını etkilemektedir [54, 55, 59-63]. Şekil 2.13'de QD yoğunluğu büyüme oranının fonksiyonu olarak verilmiştir [63]. Büyüme oranının düşük olduğu durumda QD

yoğunluğunun da düşük olduğu, bunun nedeninin ise düşük büyüme oranlarında daha büyük QD'lar oluştuğu ifade edilmektedir [63]. Düşük büyüme oranlarında In atomlarının hareket mesafelerinin daha uzun olması, daha büyük QD'lar oluşmasına neden olabilmektedir. In atomlarının hareket mesafeleri büyüme oranı arttıkça azalmaktadır. Dolayısı ile daha küçük noktalar oluşmakta, böylece QD yoğunluğu artmaktadır. Şekil 2.13'de büyüme oranı 0,019 ML/s'den 0,075 ML/s'ye artırılması ile QD yoğunluğunun yaklaşık üç kat arttığı görülmektedir [63].



Şekil 2.13. Büyüme oranının fonksiyonu olarak QD yoğunluğunun değişimi [63]

Tablo 2.1. İki farklı büyüme oranı ile elde edilen QD'ların fiziksel özellikleri [60]

Büyüme oranı (ML/s)	QD yoğunluğu ( $10^{11}/\text{cm}^2$ )	QD yüksekliği, h (Å)	QD çapı, d (Å)	Yükseklik dalgalanması ( $\Delta h/h$ )
0,016	0,2	35	200	%16
0,094	1,0	20	150	%22

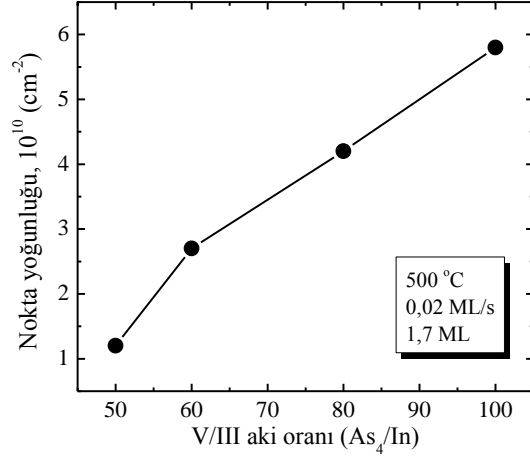
Tablo 2.1'de iki farklı büyüme oranı ile elde edilen nokta yoğunluğu ve büyüklük bilgileri verilmektedir. Düşük büyüme oranlarında hem nokta çapının hem de nokta yüksekliğinin daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla daha büyük QD'ların oluşması daha az yoğunlukta QD oluşumuna

neden olmaktadır. Diğer yandan büyüme oranının yüksek olması durumunda QD'ların yükseklik ve çap büyüklüklerinde azalma görülmüş, bunun sonucunda ise daha yüksek yoğunlukta QD elde edilmiştir. Ayrıca tabloda verilen yükseklik dalgalanması bilgisi nokta büyüklük dağılımındaki homojenliği göstermektedir. Büyüme oranının düşük olması durumunda yükseklik dalgalanması daha düşük yani daha homojen QD dağılımı elde edilmektedir. Bunun nedeni yine In atomlarının hareket mesafelerinin daha fazla olmasıdır.

#### 2.3.4. V/III oranı

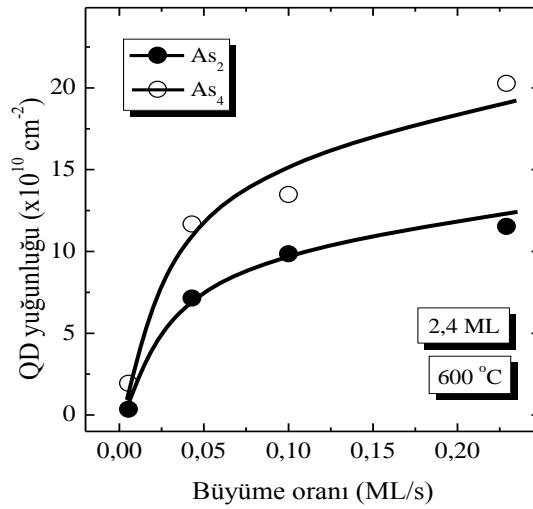
V/III oranı ile söylenmek istenen ifade, V grubu malzemenin akısının III grubu malzemenin akısına oranıdır. Bir önceki kısımda, büyüme oranını III grubu malzeme akısının belirttiği ifade edilmişti. Akı miktarı, MBE sisteminde bulunan akı ölçerler kullanılarak okunmaktadır. V grubu malzeme olan Arsenik (As) akısı, III grubu malzemenin, büyüme yüzeyinde *tek kristal* olarak büyümesini sağlamaktadır. Bu yüzden V/III oranı sadece QD büyütmede değil epitaksiyel yöntemle büyütülen bütün kristal yapılarda önemli olmaktadır. Ayrıca As malzemesinin, ikili ( $As_2$ ) moleküler ve dörtlü ( $As_4$ ) moleküler halde de kullanılması karşımıza ayrı bir değişken olarak çıkmaktadır.  $As_2$  ya da  $As_4$  molekülü kullanılmasını kırıcı bölgesi (Cracker) efüzyon hücreleri sağlamaktadır. Literatürde bir dizi farklı V/III oranlarında büyütülmüş QD çalışmaları bulmak mümkündür [64-68]. Fakat örneklendirmek için burada sadece birkaç çalışmadan bahsedilecektir.

Şekil 2.14'de farklı oranlarda  $As_4/In$  akısı kullanılması durumunda, 0,02 ML/s büyüme hızıyla, 500 °C sıcaklıkta büyütülen QD'ların yoğunluğundaki değişim gösterilmektedir. V/III oranının iki kat artması QD yoğunluğunu yaklaşık altı kat arttırmış, buna paralel olarak daha küçük noktalar oluştuğu görülmüştür. Yüksek oranda As kullanılması durumunda In atomlarının yüzey hareketinde azalma olduğu bunun sonucunda ise nokta yoğunluğunun arttığı görülmektedir [67].



**Şekil 2.14.** InAs QD'ların farklı V/III oranları ile büyütülmesi sonucu QD yoğunluğu değişimi (referans 67'deki Şekil 2'den alınıp yeniden çizilmiştir)

Şekil 2.15'de As<sub>2</sub> ve As<sub>4</sub> akılarının büyüme oranının fonksiyonu olarak nokta yoğunluğuna etkisi karşılaştırılmıştır. Her iki akı kullanımında da düşük büyüme oranlarında ve 600 °C büyütme sıcaklığında QD yoğunluğu benzer davranmaktadır. Ancak yüksek büyüme oranlarında As<sub>2</sub> akısı kullanılmasıyla, QD yoğunluğunda azalma görülmektedir. Bunun nedeni, As<sub>2</sub> kullanımında In atomlarının daha uzun hareket mesafeleri olması, dolayısıyla da nokta büyüklüğünün fazla olmasıdır [68]. In atomlarının hareket mesafelerinin daha uzun olması ise daha homojen büyüklükte QD'lar elde edilebilmemizi sağlamaktadır.



**Şekil 2.15.** As<sub>2</sub> ve As<sub>4</sub> akısının büyüme oranının fonksiyonu olarak nokta yoğunluğuna etkisinin karşılaştırılması [68].

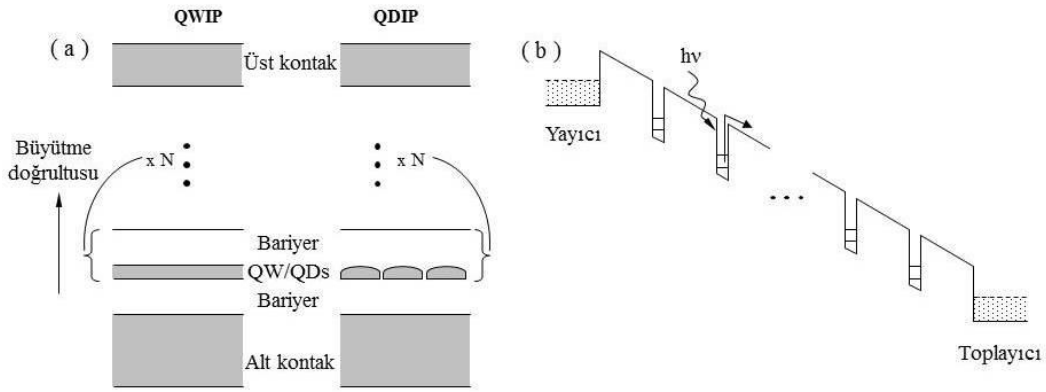


## 2.4. Uygulama: Kızılötesi Algılama ve Öngörülen Avantajları

Yarıiletken üretim yöntemlerinin gelişmesiyle yüksek performanslı aygıt teknolojisi de buna paralel olarak gelişmiştir.

InAs/GaAs QD yapılar; güneş pilleri [69-73], lazerler [74-77] ve kızılötesi foto-algılayıcılar (QDIP) [78-88] gibi pek çok uygulama alanı mevcut olan yapılardır. Ancak bu tez bünyesinde kızılötesi algılayıcı çalışmaları kapsamında kuantum nokta büyütmesi yapıldığı için, bu bölümde sadece QDIP yapılardan kısaca bahsedilmiştir.

Genel olarak QDIP yapılar, QWIP yapılar ile çok benzerlik göstermektedir. QDIP yapılarda kuantum kuyu yerini kuantum noktalar almaktadır. QDIP ve QWIP yapıların katman yapılarına ait şematik gösterim Şekil 2.16a'da verilmiştir. QDIP aygıtlarda, soğurulan fotonlar yapı içerisinde bulunan taşıyıcıların uyarılarak nokta dışına (potansiyel kuyu dışına) çıkmasına sebep olurlar. Süreklilik bandına çıkan bu taşıyıcılar sisteme uygulanan yönlendirme voltajı ile kontak bölgelerine sürüklenirler ve böylece yapıda bir foto-akım oluşturur (Şekil 2.16b). QDIP'ler, QWIP'lere kıyasla öngörülen bazı avantajlarından dolayı kızılötesi algılayıcılara alternatif olması nedeniyle özel ilgi görmektedir.



Şekil 2.16. QDIP ve QWIP için (a) yan kesit katman yapısının, (b) voltaj altındaki potansiyel profili ve bant içi foto-algılama mekanizmasının şematik gösterimi [22]

Öngörülen önemli avantajlarından birisi, QDIP'lerin normal doğrultuda gelen ışığı algılayabilmesidir. Normal doğrultuda gelen ışığın algılanabilmesi geleneksel QWIP yapılarda kullanılan kırınım ızgaralarına duyulan ihtiyacı

ortadan kaldırmıştır. Kırınım ızgaraları, sadece aygıt üretim aşamasında ek basamak olması değil, aynı zamanda ızgara yapıların boyutlarının ayarlanmasından kaynaklanan geniş ve çoklu dalgaboyunda algılama yapabilmeyi zorlaştıran bir etmen olmasıyla aygıt üretimini zorlaştırmaktadır [2].

QDIP yapıların öngörülen diğer bir avantajı da düşük karanlık akıma sahip yapılar olmasıdır. Karanlık akım, aygıt üzerinde gürültüye sebep olduğu için daha düşük karanlık akım daha yüksek algılama hassasiyeti sağlamaktadır. Karanlık akım temel olarak bariyer içerisindeki hareket eden taşıyıcı yoğunluğunun hesaplanmasıyla ve taşıyıcıların hızının çarpımıyla bulunabilir. Bu ifade için şu denklem kullanılabilir [89].

$$j_{karanlık} = evn_{3D} \quad (3.1)$$

Burada,  $v$  hızı,  $n_{3D}$  üç boyutlu bariyer içerisindeki elektron yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem 3.1'de difüzyonun katkısı ihmal edilmiş olup elektron yoğunluğu;

$$n_{3D} = 2 \left( \frac{m_b k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\left( -\frac{E_a}{k_B T} \right)} \quad (3.2)$$

ifadesi ile hesaplanabilir [89]. Burada  $m_b$  bariyer için etkin kütle ve  $E_a$  aktivasyon enerjisidir. Aktivasyon enerjisi algılama kesim dalgaboyu (cut-off wavelength,  $\lambda_c$ ) ile ilgili olup kuantum noktalar için;

$$E_a^{QDIP} = \frac{hc}{\lambda_c} \quad (3.3)$$

ifadesi ile verilmektedir [89]. Dolayısıyla, aynı kesim dalgaboyuna sahip kuantum kuyulu yapılarla kıyaslandığında, daha büyük aktivasyon enerjisine sahip olmaları nedeniyle kuantum nokta yapıların karanlık akımlarının daha düşük olması beklenmektedir.

QDIP yapıların QWIP yapılara kıyasla avantajlı olmasının diğer nedeni uyarılan elektronların daha uzun yaşam süreleri olmasıdır. Enerji seviyeleri

arasındaki farkın fonon enerjisinden daha büyük olduğu durumda, taşıyıcıların rahatlaması (relaxation) önemli derecede baskılanmaktadır. Fonon tıkanıklığı etkisi (phonon bottleneck) olarak bilinen bu durumun QDIP yapılarda uygulanabilmesi taşıyıcı ömrünün uzun olması, daha yüksek tepkisellik ve daha yüksek çalışma sıcaklığı sağlamaktadır. Fotoiletken tepkiselliği (Responsivity),

$$R = \frac{e}{h\nu} \eta g \quad (3.4)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada  $\nu$  foton frekansı,  $\eta$  ise soğurma verimliliği ve  $g$  ise fotoiletken kazancı belirtmektedir [89]. Kazanç mekanizması, taşıyıcıların yaşam süreleriyle orantılı olduğundan, kuantum nokta yapılardan elde edilecek tepkisellik değerlerinin de yüksek olması beklenmektedir.

### 3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, tez kapsamında çalışılan örneklerin, büyütme ve karakterizasyon çalışmalarında kullanılan deneysel yöntemler ve kullanılan cihazlar anlatılacaktır.

MBE sisteminde InAs/GaAs QD yapılar büyütme amacıyla, literatürden elde edilen bilgiler ile temel parametreler belirlenmiş ve farklı büyüme koşullarında tek katman ve çok katman örnekler büyütülmüştür. Çok katman QD yapılar, tek katman örneklerin yapısal ve opto-elektronik karakterizasyonları yapılarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda kızılötesi foto-algılayıcı olarak tasarlanmış ve büyütülmüştür. Büyütülen QDIP yapılar, standart fotolitografi ve ıslak aşındırma yöntemiyle aygıt haline getirilip opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır. Yapısal karakterizasyon çalışmalarında atomik kuvvet mikroskobu (atomic force microscopy, AFM), taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy, SEM) ve yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (high resolution transmission electron microscopy, HRTEM) teknikleri kullanılmıştır. Opto-elektronik karakterizasyon çalışmalarında ise PL, karanlık akım ve tayfsal fototepki ölçümleri yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan büyütme ve karakterizasyon çalışmalarının detayları sonraki bölümlerde anlatılacaktır.

Yapılan büyütme çalışmaları, aygıt fabrikasyonu ve opto-elektronik ölçümlerin tamamı Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Örneklerin yüzey karakterizasyonunda, hem Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde hem de Bilkent Üniversitesi UNAM'da bulunan AFM cihazları kullanılmıştır. Tez kapsamında sonuçları verilen SEM ve TEM görüntüleri, Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan elektron mikroskopları kullanılarak alınmıştır.

#### 3.1. Büyütme Çalışmaları

Öncelikli olarak literatürde yayınlanan çalışmalar incelenerek InAs QD'lar için temel büyütme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan literatür

araştırması sonucunda elde edilen temel büyütme parametreleri için kullanılan değer aralıkları Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

**Tablo 3.1.** Literatürde yaygın olarak kullanılan InAs QD yapılar için temel büyütme parametreleri

	<b>InAs QD</b>			
	Malzeme miktarı (ML)	Büyüme oranı (ML/s)	Büyütme sıcaklığı (°C)	V/III oranı (As/In)
Literatürde kullanılan değerler	1,3-3	0,05-0,2	450-520	20-50
Referans	[48-55]	[59-63]	[53-58]	[64-68]

Yayınlanan çalışmalardan yola çıkılarak büyütme sıcaklığı, malzeme miktarı ve özellikle büyüme oranı gibi temel parametrelerde kullanılan değer aralıkları belli edildikten sonra kendi sistemimiz için büyütme koşullarının sistematik olarak değiştirildiği Tablo 3.2’de kod numaraları ile verilen grup örnekler büyütülmüştür.

**Tablo 3.2.** Tez kapsamında büyütülen tek ve çok katman QD örnekler

<b>Örnek kodu</b>	<b>Örnek yapısı</b>
S01	Tek katman InAs QD
S02	Tek katman InAs QD
S03	Tek katman InAs QD
S04	Tek katman InAs QD
S05	Tek katman InAs QD
S06	Tek katman InAs QD
S07	Tek katman InAs QD
S08	Tek katman InAs QD
S09	Tek katman InAs QD
QDIP-1	10 katman InAs/GaAs
QDIP-2	40 katman InAs/GaAs
QDIP-3	80 katman InAs/GaAs
S10	Tek katman InAs QD

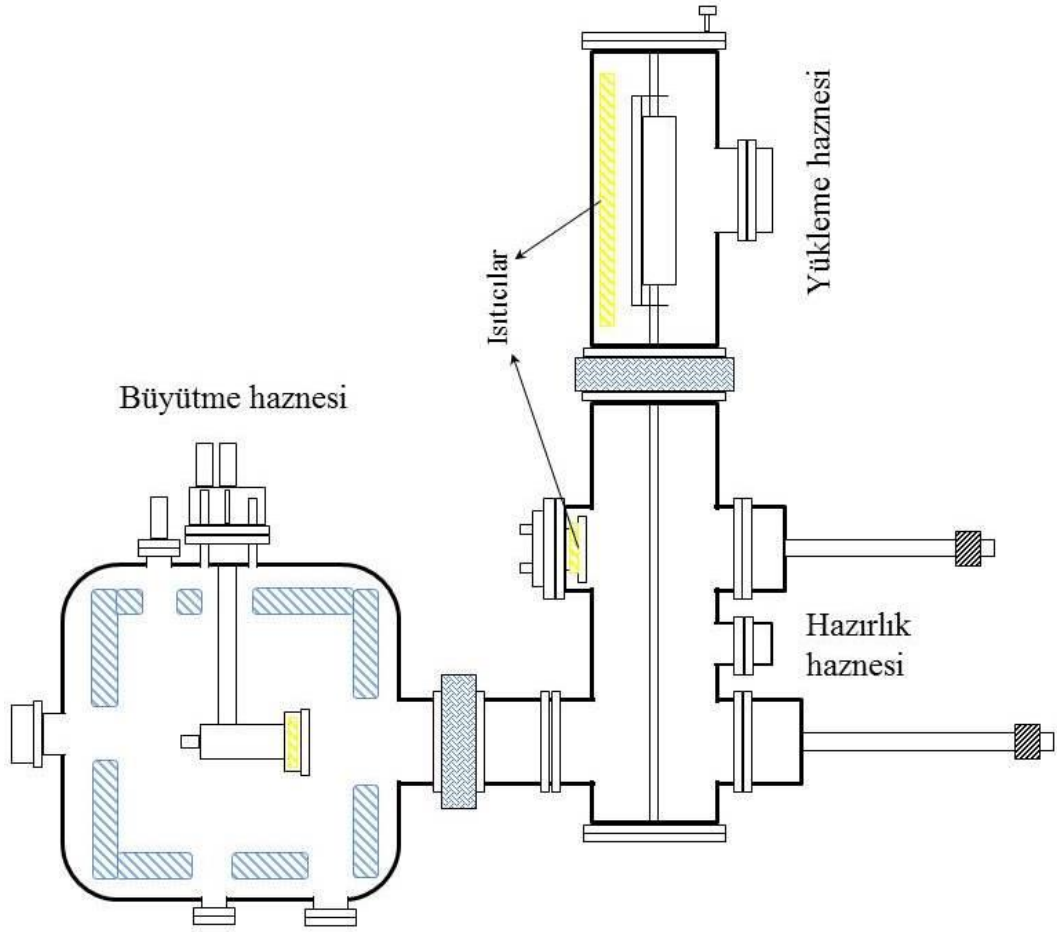
### 3.1.1. MBE sistemi

Tez kapsamında yapılan büyütme çalışmaları Veeco GEN20MC model MBE sistemi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.1’de şematik gösterimi verilen MBE

sistemi, *yükleme haznesi*, *hazırlık haznesi* ve *büyütme haznesi* olmak üzere üç vakum haznesinden oluşmaktadır.

Yükleme haznesi olarak isimlendirilen kısım, üzerine kristal yapıların büyütüleceği alttaşların, haznenin atmosfere açılması suretiyle sisteme yüklendiği ve çıkarıldığı kısımdır. Sistemin bu kısmının taban vakum seviyesi, uygun vakum pompaları kullanılarak yaklaşık olarak  $10^{-8}$  Torr basınç seviyelerinde tutulmaktadır. Bu hazne, alttaşlar yüklendikten sonra yaklaşık  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılarak, alttaşların üzerinde bulunan su buharının ve varsa diğer uçucu atıkların uzaklaştırılması sağlanır. Bu ilk kusturma (degas) işlemi esnasında, haznenin vakum seviyesi sürekli kontrol edilerek  $\sim 10^{-7}$  Torr seviyesinin altına inmesi engellenir. Kusturma işlemi tamamlanıp haznenin vakum seviyesi iyileştikten sonra, alttaşların yerleştirildiği ve sistem dışındaki miktatısla hareket ettirilen tekerlekli *araba* (trolley), *raylı sistem* üzerinde kaydırılarak hazırlık haznesine aktarılır.

Hazırlık haznesi, yükleme haznesinde ısı işleminden geçirilen alttaşların bireysel olarak ikinci ve daha yüksek sıcaklıkta ( $\sim 350 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ısı işleme tabi tutuldukları, büyütme haznesi kısmıdır. Burada yapılan ısı işlemi sayesinde, alttaşlar üzerlerinde bulunabilecek olası karbon tabanlı gazların ve eğer varsa artık su buharının uzaklaştırılması sağlanır. Bu yapılan ısı işleminin diğer önemli bir amacı alttaşın ne kadar kustuğunun görülmesidir. Hazırlık haznesi, büyütme yapılacak alttaşların yüklenmesi amacıyla, yüksek saflıkta kaynak malzemelerinin bulunduğu büyütme haznesine açılmaktadır. Bu nedenle hazırlık haznesi, ultra yüksek vakum koşullarına uygun olmalıdır. Bu yüzden hazırlık haznesinin taban vakum seviyesi  $10^{-10}$  Torr basınç değerlerinde tutulmaktadır. Alttaşların yüksek sıcaklıkta tavlama esnasında bozulan vakum seviyesinin sürekli kontrol edilerek  $\sim 10^{-8}$  Torr mertebelerinde tutulması önemlidir. Alttaşların her biri ayrı ayrı kusturulduktan ve haznenin vakum seviyesinin taban vakum seviyesine kadar iyileşmesi beklendikten sonra, üzerine büyütme yapılacak alttaş iletim kolu aracılığıyla büyütme haznesine alınabilir duruma gelmektedir.



Şekil 3.1. Moleküler demet epitaksi (MBE) sisteminin şematik gösterimi

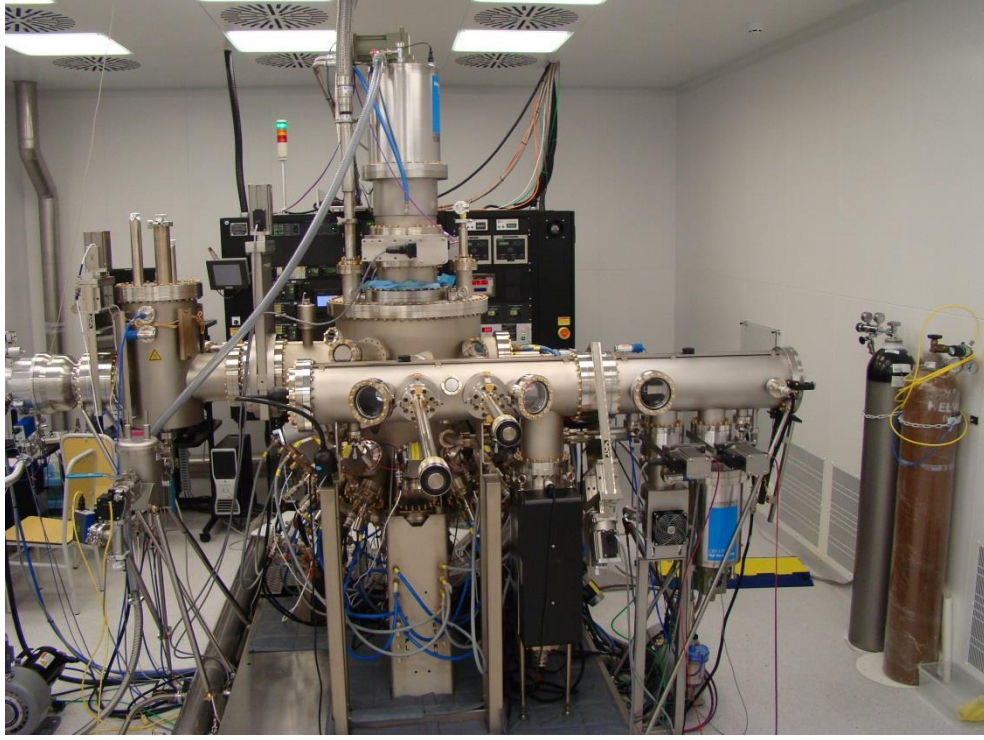
Ana hazne ya da büyüme odası olarak da adlandırılan büyüme haznesi sistemde büyütme yapıldığı kısımdır. Hazırlık haznesindeki işlemleri biten alttaşlar, transfer kolu yardımıyla taban basıncı  $5 \times 10^{-11}$  Torr seviyesine kadar inebilen büyüme haznesine alınıp burada bulunan örnek tutucuya yerleştirilmektedir. Söz konusu örnek tutucu, alttaşı büyüme sıcaklığına ısıtılmak için hem ısıtıcıya hem de büyütmenin homojenliğini sağlamak için sürekli dönebilme kabiliyetine sahiptir. Dönme hızı, *dakika başına tur* (rpm) olarak tanımlanır ve büyüme oranı ile ilişkilidir. Bu durumda büyüme süresi bir dakikaya tamamlandığında, bir tam atomik katman (monolayer – ML) büyütülmüş olması gerekmektedir. Örnek olarak, büyüme hızı 0,5 ML/s olması durumunda örneğin dönme hızı 30 rpm olmalıdır.

Büyütme odasına alınan örnek, tekrar ısıtma işlemine tabi tutulur. Burada ısıtmanın amacı, örnek üzerinde bulunan doğal ve/veya koruyucu oksit tabakasını

kaldırmak ve malzemenin büyütüleceği sıcaklığa getirmektir. Koruyucu oksit kaldırma sıcaklığı GaAs alttaş için 600 °C civarında olup sistem kalibrasyonuna bağlı olarak değişimler gösterebilmektedir. Alttaş sıcaklığının 400 °C'nin üzerine çıktığı durumlarda, malzeme yapısının bozulmaması için yüzeyin As akısı altında olması gerekmektedir. Oksit kaldırıldıktan sonra örnek, büyütme istediğimiz malzemenin büyüme sıcaklığına ısıtılarak veya soğutularak büyütme işlemi başlatılır. Yapılan büyütme çalışmaları sonraki bölümde detaylı olarak anlatılacağı için bu bölümde daha fazla ayrıntı verilmeyecektir.

Büyütme haznesi, MBE sisteminde kullanılan yüksek saflıkta Ga, In ve As malzemelerinin (örn: Ga ve In için sırasıyla %99,99999 ve As %99,999995) içlerinde olduğu efüzyon hücrelerini barındırmaktadır. Sistem, Ga ve In malzemelerinin konulduğu çift filamanlı SUMO hücrelerine, As malzemesinin konulduğu vana kontrollü kırıcı bölge (valved cracker) efüzyon hücresine sahiptir. Kırıcı bölge sıcaklığı, As<sub>2</sub> akısı elde edebilmek için 900 °C sıcaklıkta tutulmuştur. Ayrıca katkı atomu olarak kullanılan Silisyum (Si) malzemesi için sistem tek filamanlı efüzyon hücresine sahiptir. Kullanılan malzemelerin akı değerleri (özellikle In ve As için) MBE sisteminde bulunan iyonizasyon ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Her malzeme için okunan akı değerlerinden arka plan vakum değerinin çıkarılması ile demet eşdeğer basıncı (Beam equivalent pressure, BEP) hesaplanmıştır. Ek olarak sistemde, optik pirometre (Pyrometer) olarak adlandırılan ve büyüme sıcaklığını kontrol etmekte kullanılan bir cihaz ile büyütme esnasında yüzey morfolojisi hakkında bilgi veren yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (reflection high energy electron diffraction, RHEED) cihazı mevcuttur. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulmuş olan MBE sistemi Şekil 3.2'de verilmiştir.





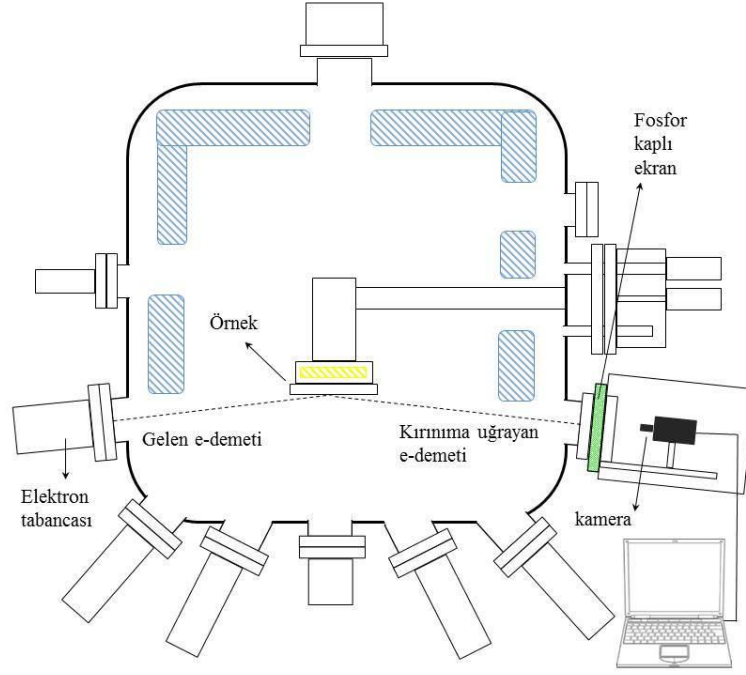
Şekil 3.2. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sistemi

### 3.1.2. RHEED cihazı

RHEED cihazı, epitaksiyel sistemlerde büyütme işlemlerini, büyümeye eş zamanlı olarak karakterize etme imkânı sunan önemli bir araçtır. Kristal büyüme yüzeyi üç boyutlu olan yapılarda, RHEED karakterizasyonu yapmak, iki boyutlu yüzeye sahip yapılara kıyasla daha zor olmasına rağmen, büyüme yüzeyi hakkında verdiği kıymetli bilgiler nedeniyle önemli bir karakterizasyon tekniğidir.

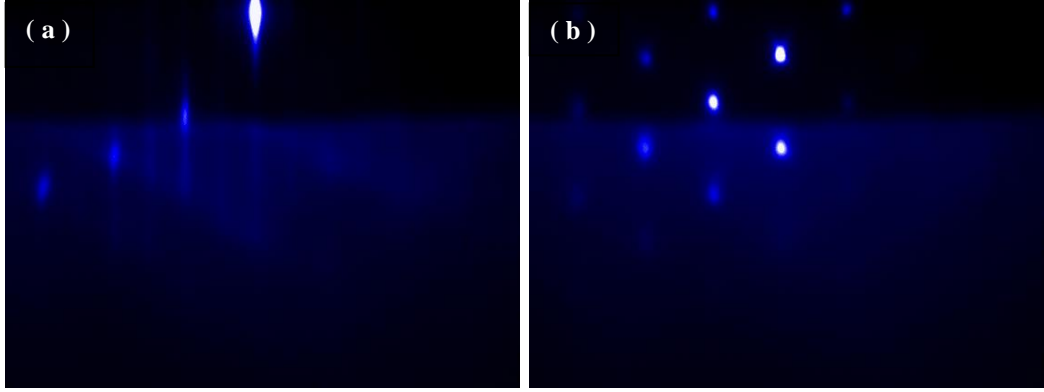
Şematik gösterimi Şekil 3.3'de verilen bir RHEED cihazı, elektron tabancası, fosfor kaplı ekran ve kamera ile görüntünün aktarıldığı bilgisayar donanımı olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Büyütme haznesine bağlı elektron tabancası tungsten flamana sahiptir ve flaman ısıtılarak elektron üretilmektedir. Üretilen elektronlar uygun bir voltaj değeri (~15 kV) ile hızlandırılarak örnek yüzeyine gönderilir. Elektron demetinin çapı ve hareketinin kontrolü ızgara mercekle sistemi ile kontrol edilmektedir. Sadece birkaç ML kalınlığındaki kristal yapıdan bilgi alınabileceği için, elektron demeti örnek yüzeyine küçük açılar ile ( $1^{\circ}$ - $3^{\circ}$ ) gönderilmektedir. Örnek yüzeyine gelen elektron demeti kristal örgüden kırınımına uğrayarak fosfor kaplı ekran üzerine

yansıtılmaktadır. Elektronların, haznede arka plan gaz ya da parçacıklar tarafından saçılmaması için ortamın vakum değeri önem kazanmaktadır. Fosfor kaplı ekrana gelen elektronlar, ekran üzerinde *kırınım deseni* oluşturmaktadır. Ekran üzerinde oluşan desenler bir kamera yardımıyla bilgisayara aktarılmakta ve bir yazılım kullanılarak elde edilen desenlerin analizleri yapılabilmektedir.

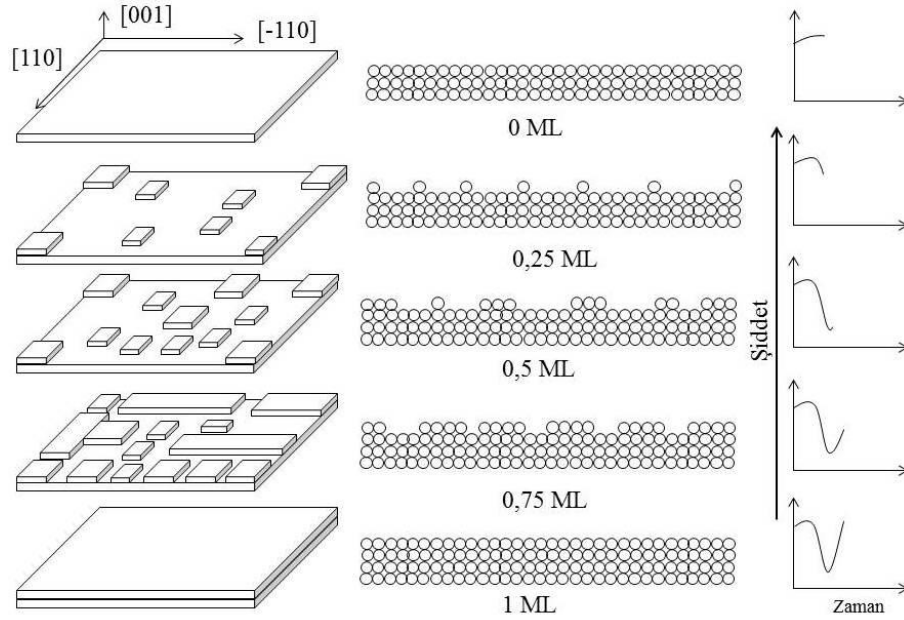


Şekil 3.3. RHEED cihazının çalışma geometrisinin şematik gösterimi

Fosfor kaplı ekrana yansıyan RHEED kırınım desenleri büyüme yüzeyinin morfolojisi hakkında bilgiler verir. Şekil 3.4’de yüzey morfolojisinin iki boyutta ve üç boyutta büyüdüğünü gösteren RHEED kırınım deseni görüntüleri verilmiştir. Ayrıca RHEED salınımları olarak bilinen bir yöntem kullanılarak büyüme hızının belirlenmesi ve büyütme kipinin anlaşılması da mümkündür [90]. Şekil 3.5’de gösterildiği gibi, bahsi geçen salınımların her bir periyodu, tam bir atomik katmana karşılık gelmektedir. Salınım şiddetinin zaman bağımlı eğrisi elde edildiğinde, tanımlı zaman aralığındaki salınım sayısı belirlenerek büyüme oranı hesaplanabilmektedir [90].



Şekil 3.4. (a) İki boyutlu büyüme yüzeyine sahip GaAs ve (b) üç boyutlu büyüme yüzeyine sahip InAs QD'nın RHEED kırınım deseni görüntüsü



Şekil 3.5. Kristal yüzeyin değişimi ile RHEED salınımları arasındaki ilişkiyi veren şematik gösterim [90]

### 3.2. Aygıt Fabrikasyonu

MBE sisteminde büyütülen QDIP yapılarının opto-elektronik ölçümlerinin yapılabilmesi için aygıt üretimlerinin yapıp ölçümlere hazır hale getirilmesi gerekmektedir. QDIP'lerin fabrikasyon sürecinde, masatepe ve kontak desenleri, standart fabrikasyon teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Aygıt üretim basamakları alt başlıklar halinde aşağıda kısaca anlatılmıştır.

*Örnek Temizliği;* Örnek yüzeyinde oluşan kirlilikler aygıtın performansını etkileyen önemli etmenlerdir. Bu nedenle, örnek üzerinde bulunan olası organik kirlilik ve tozların temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla örnekler, sırasıyla aseton ve alkol (izopropanol) içinde 5'er dk bekletilerek kimyasal olarak temizlenmiştir. Daha sonra örnek de-iyonize su ile yıkanarak kimyasal kalıntılardan arındırılmış ve gaz azot (N<sub>2</sub>) ile kurutulmuştur. Son olarak örnekler 120 °C'de 2 dk ısıtılarak, yüzey üzerine tutunan su buharı ve olası kimyasal kalıntılar buharlaştırılmıştır.

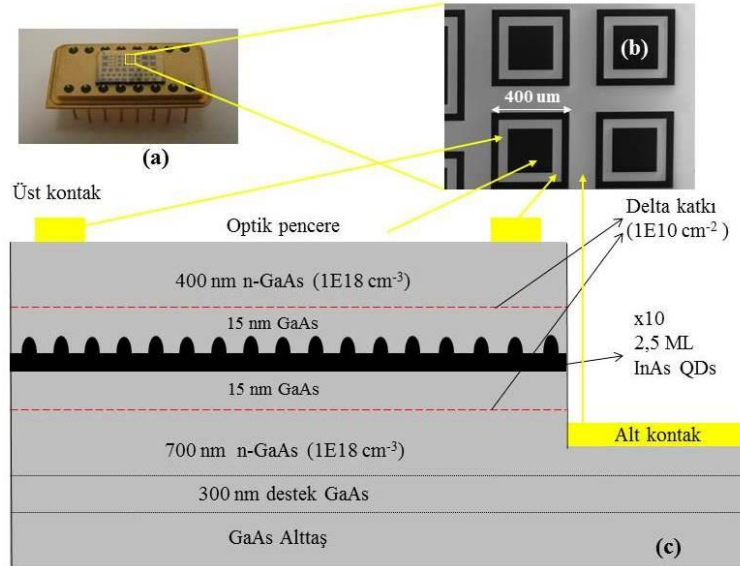
*Fotolitografi;* Temizlik işleminden sonra, örnekler UV ışığa duyarlı olan AZ5214E-IR fotorezist ile kaplanmıştır (45 s 5000 rpm). Fotorezistin örnek yüzeyine daha iyi tutunmasını sağlamak amacıyla hafif ısıtma işlemi (110 °C'de 1 dk) gerçekleştirilmiştir. Maske hizalayıcısı (MIDAS, MDA-400M-6) yardımıyla, fotorezist kaplı örnekler üzerine masatepe deseni hizalanarak 15 s boyunca UV ışığa maruz bırakılmıştır. Daha sonra örnekler üzerine aktarılan masatepe desenini ortaya çıkarmak için 1:4 oranında AZ400K:H<sub>2</sub>O tab (developer) çözeltisi hazırlanarak örnekler çözelti içerisine daldırılmıştır. Aktarılan desen belirgin hale gelene kadar çözelti içinde bekletilen örnekler, daha sonra çözelti içerisinden çıkartılarak de-iyonize su ile arındırılmış ve gaz azot (N<sub>2</sub>) ile kurutulmuştur. Masatepe deseni aktarılan örnek yüzeyindeki fotorezistin, kimyasal aşındırıcı içerisindeki dayanıklılığını arttırmak amacıyla örnekler 5 dk 120 °C'de bekletilerek sert ısıtma (hard-bake) işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda fotorezistin kalınlığı profilometre (KLA Tencor P 6) yardımıyla 1,3 µm olarak ölçülmüştür.

*Islak aşındırma;* Masatepe deseni aktarılan örneklerin, kimyasal çözelti yardımıyla alt kontak bölgesine kadar aşındırılma sürecini kapsamaktadır. Aşındırıcı çözelti olarak GaAs tabanlı aygıt fabrikasyonunda yaygın kullanılan sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) çözeltisi kullanılmıştır. Çözelti, aşındırma derinliğinin göreceli olarak az olmasından dolayı kontrollü aşındırma yapabilmek için seyreltik olarak hazırlanmıştır. Çözelti bileşimi sırasıyla 480 ml H<sub>2</sub>O + 3 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 24 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (160:1:8) kullanılmıştır. Örneklerin, alt kontak bölgesinin bir kısmını da içerecek şekilde aşındırılmasıyla, masatepe tanımlaması yapılmıştır. Masatepe tanımlaması yapılan örnekler, yüzeyindeki artık fotorezistin kimyasal

temizlik ile (aseton, alkol, de-iyonize su) uzaklaştırılmasıyla kontak bölgelerinin metalizasyon işlemine hazır hale getirilir.

*Alt ve üst metal kontak metalizasyonu;* QDIP diyotun, alt ve üst kontak bölgelerinin omik davranış göstermesini sağlayan metal (Nikel/Germanyum/Altın - Ni/Ge/Au), her iki bölge için de aynıdır. Bu yüzden tek bir fotolitografi işlemi ile yüzey üzerine alt ve üst kontak deseni aktarılmıştır. Desen aktarma işleminden sonra örnekler üzerine, elektron demeti buharlaştırma (E-Beam Evaporation, VAKSİS MİDAS) yöntemiyle, sırasıyla 25 nm Ni, 55 nm Ge ve 80 nm Au (biriktirme oranları: 0,3, 0,3 ve 0,5 Å/s) kaplanmıştır. Metalizasyon işleminden sonra, örnekler aseton içerisine konularak yüzey üzerindeki fotorezist ve istenmeyen kısımlardaki metal kaplamasının kaldırılması sağlanmıştır (lift-off). Son olarak kaplanan metallerin omik davranış göstermesini sağlamak için örnekler 425 °C sıcaklıkta 1 dk hızlı tavlama işlemine tabi tutulmuştur.

Fabrikasyon işlemleri sonlandırılan örnekler kesilerek örnek taşıyıcı paket üzerine yapıştırılmış ve tel bağlayıcı ile alt ve üst kontak bağlantıları yapılarak karakterizasyon işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Taşıyıcı paket üzerine yerleştirilmiş örnek, 400×400  $\mu\text{m}^2$  büyüklükteki diyotları gösteren SEM fotoğrafı ve şematik örnek yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



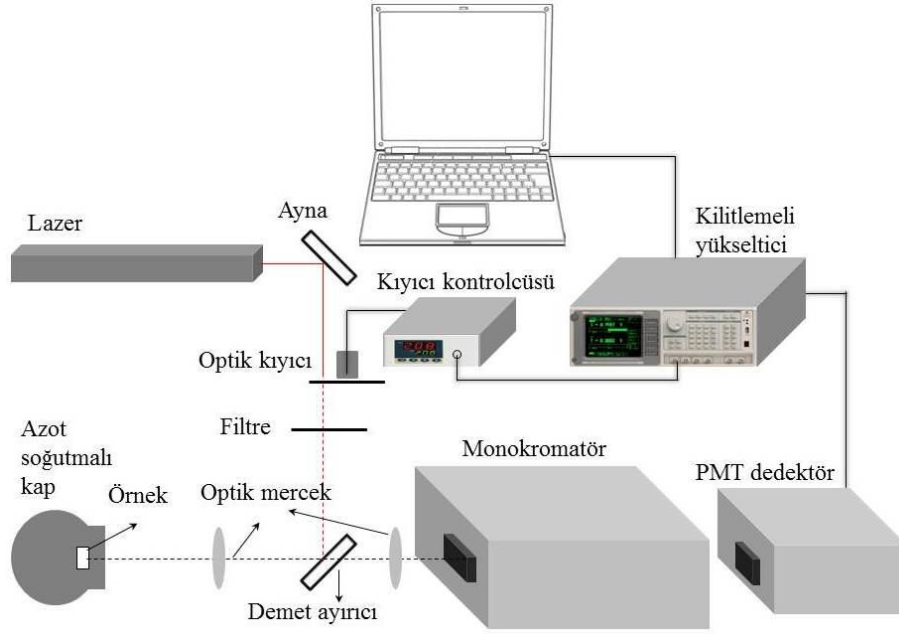
**Şekil 3.6.** (a) Taşıyıcı paket üzerine yerleştirilmiş ölçüme hazır örnek, (b) 400×400  $\mu\text{m}^2$  büyüklükteki diyotları gösteren SEM fotoğrafı ve (c) QDIP örnek yapısının şematik gösterimi

### 3.3. Opto-Elektronik Karakterizasyon Teknikleri

Tez kapsamında büyütülen/çalışılan QD yapıların opto-elektronik karakterizasyonunda farklı teknikler kullanılmıştır. QD'ların karşılaştırmalı olarak taban büyüklükleri ve yükseklikleri ile büyüklük dağılımları ve nokta içindeki enerji seviyeleri hakkında bilgi edinmemizi sağlayan fotoluminesans (photoluminescence, PL) tekniği temel karakterizasyon aracı olarak kullanılmıştır. QDIP yapıların algılama yaptıkları bölgelerin anlaşılması için tayfsal fototepki ve bütünlüğü elektriksiz karakterizasyon için karanlık akım ölçümleri yapılmış, sonuçlar birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Her teknik alt başlıklar altında detaylı olarak ele alınacaktır.

#### 3.3.1. Fotoluminesans karakterizasyonu

PL karakterizasyon tekniğinde, yapı içindeki elektronlar örnek üzerine gönderilen yüksek enerjili lazer demeti ile uyarılarak, değerlik bandından iletkenlik bandına geçerler ve böylece elektron-boşluk çifti oluştururlar. QD yapılarda, oluşturulan elektron ve boşluklar, iletkenlik ve değerlik bandındaki sınırlandırılmış kuantum nokta enerji seviyelerinde yeniden birleşerek ışımaya yaparlar. GaAs matris içine gömülen ve her tarafından sınırlandırılmış potansiyelle çevrili QD'lardan alınan PL sinyali, QD'ların büyüklükleri, yoğunlukları gibi parametreler hakkında bilgi vermektedir. PL spektrumu ölçümünde kullanılan düzenek Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. PL spektrumu ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği

Şekil 3.7’de verilen PL ölçüm düzeneğinde 35 mW maksimum çıkış gücü olan 632 nm HeNe lazer kullanılmıştır. Lazer demeti, belirli bir frekansta kıyılarak ve lazer şiddetini ayarlamaya yarayan filtreden geçirildikten sonra optik mercekler yardımıyla örnek üzerine odaklanmıştır. Örnekten gelen ışınım (PL sinyali), monokromatörde dalgalılarına ayrılarak, -80 °C’de çalışan foton çoğaltıcı tüp (photomultiplier tube, PMT: Hamamatsu R5509-72) dedektöre gönderilmiştir. Dedektörün çıkışı, optik kısıyıcı ile aynı frekansta ölçüm yapılmasını sağlayan kilitlemeli yükselticiye (lock-in amplifier: SR850) bağlanmış ve bir yazılım sayesinde sinyalin dalga boyuna bağlı olarak değişimi kaydedilerek PL spektrumu elde edilmiştir. PL ölçümleri, bahsedilen ölçüm düzeneğine ek olarak ayrıca Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR: Bruker VERTEX 80v) sistemi kullanılarak da yapılmıştır. Bu sistemde 100 mW maksimum güç çıkışı olan 532 nm lazer kullanılmıştır. Demet bölücü olarak  $\text{CaF}_2$  ve dedektör olarak, soğutmasız oda sıcaklığında çalışabilen yüksek kazançlı InGaAs dedektör kullanılmıştır.

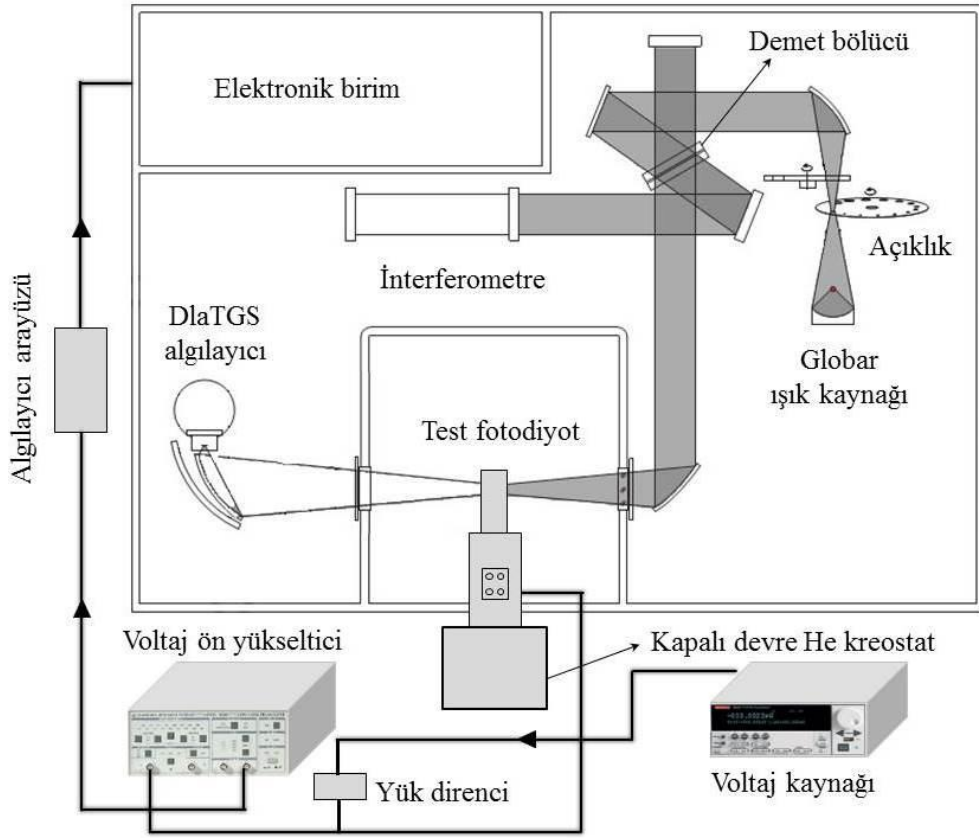
Örneklerin PL sinyallerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda, oluşan kuantum noktaların fiziksel yapıları hakkında edinilen bilgiler, AFM ve SEM görüntüleriyle desteklemiştir. PL sinyalinin görüldüğü enerji değeri, görünen

karakterler arasındaki enerji farkları ve sinyalin şiddeti, oluşan kuantum noktaların büyütme ve düzlemsel doğrultusundaki büyüklükleri, kıyaslamalı olarak kuantum nokta yoğunlukları ve nokta başına düşen elektron sayıları hakkında çok sayıda bilgi içerir.

### 3.3.2. Tayfsal fototepki ölçümleri

Üretilen QDIP aygıtlardan paketlenmiş tek piksel foto-diyotların tayfsal olarak hangi bölgede algılama yaptıklarını test edebilmek için fototepki ölçümleri yapılmıştır. Fototepki spektrumu ölçüm düzeneği ve kullanılan donanımlar şematik olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Test edilecek foto-diyotların ~8 K sıcaklığına soğutulması için kapalı devre helyum kreostat sistemi kullanılmıştır. QDIP foto-diyotların farklı bölgelerde (MIR ve FIR) algılama kabiliyetinin test edilebilmesi için, söz konusu bölgelerde geçirgenliği yüksek olan pencereler ve demet bölücüler kullanılmıştır. ZnSe pencere ile KBr demet bölücü kullanılırken, Polietilen pencere ile Mylar çok katman (multilayer) demet bölücü kullanılmış, her iki optik kombinasyon sayesinde QDIP foto-diyotların farklı dalga boylarında algılama yapabilme yeteneği test edilmiştir. Ayrıca atmosferik soğurmanın etkin olduğu bölgelerde fototepki spektrumunun iyileştirilmesi ve atmosferik soğurmanın etkisinin en aza indirilmesi için ölçümlerin vakum altında alınabilmesi sağlanmıştır. Bütün ölçümler için Glober ışık kaynağı kullanılmıştır. Foto-diyot üzerinde kaynak tarafından yaratılan foto-elektronların toplanabilmesi için gerilim uygulanmış, diyot üzerinden geçen akımı kontrol edebilmek için yük direnci kullanılmıştır. Ayrıca fototepki spektrumunun iyileştirilmesi ve gürültü sinyallerinin devre dışı bırakılması için voltaj ön yükseltici kullanılmıştır.

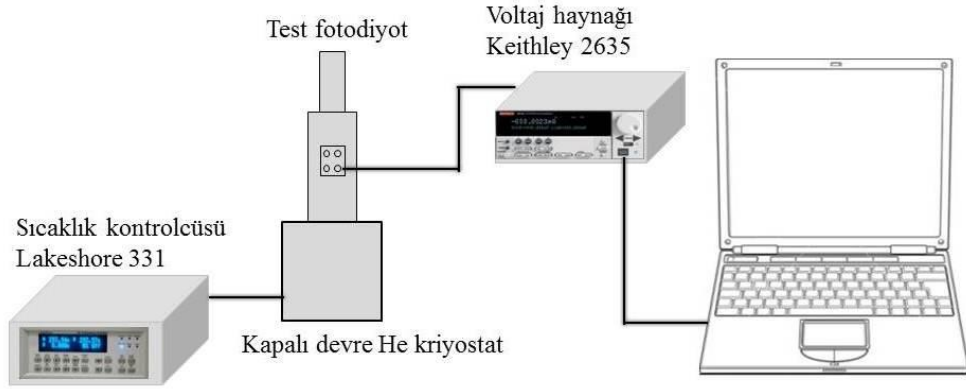




Şekil 3.8. Tayfsal fototepki ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği ve FTIR içindeki optik yol

### 3.3.3. Karanlık akım ölçümleri

Karanlık akım herhangi bir optik uyarma olmadan aygıt içerisinde oluşan akım anlamına gelir. Üretilen aygıtların akım-voltaj ölçümleri 50 mV adımlarla voltaj uygulanarak ~6 K sıcaklıkta yapılmıştır. Örnekler kapalı devre helyum kreostat içerisine yerleştirildikten sonra, aygıt üzerine herhangi bir kızılötesi ışınım düşmesini engellemek amacıyla kreostatın soğuk bölgesine temas edecek şekilde bir radyasyon kalkanı (radiation shield) yerleştirilmiştir. Ölçümler Şekil 3.9'da şematik olarak gösterilen düzenek yardımıyla yapılmış olup voltaj kaynağı olarak Keithley 2635 model cihaz ve LabView tabanlı yazılım kullanılmıştır.



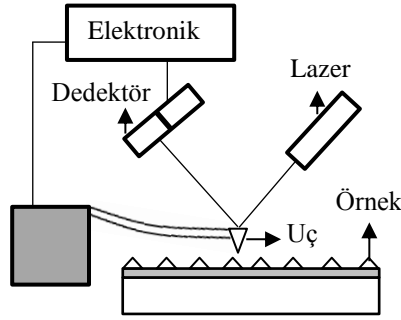
Şekil 3.9. Karanlık akım ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği

### 3.4. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları

QD yapıların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için farklı teknikler kullanılmış elde edilen sonuçlar birbiri ile ilişkilendirilmiştir. Tek katman yapılarda yüzey topografyasını belirlemek için AFM (Veeco Multimod V) ve SEM (ZEISS SUPRA 50 VP) teknikleri kullanılmış, önceki bölümde bahsedilen PL tekniği ile elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Her iki tekniğin kullanılması ile noktaların farklı fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca başlıca büyütme parametreleri kısmında bahsedilen atomik süreçlerden dolayı, GaAs arasına gömülü olarak büyütülen ve yüzeyde kalan QD'lar farklı büyüklüklere sahip olabileceği için, tek bir örnek üzerinden, gömülü QD'ların fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla HRTEM (JEOL JEM-2100F) tekniği kullanılmıştır. Ek olarak, periyodik olarak büyütülen yapılardaki kalınlıkları ölçebilmek için yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım (X-ray diffraction, XRD: Panalytic X-Pert Pro MRD) cihazı kullanılmıştır.

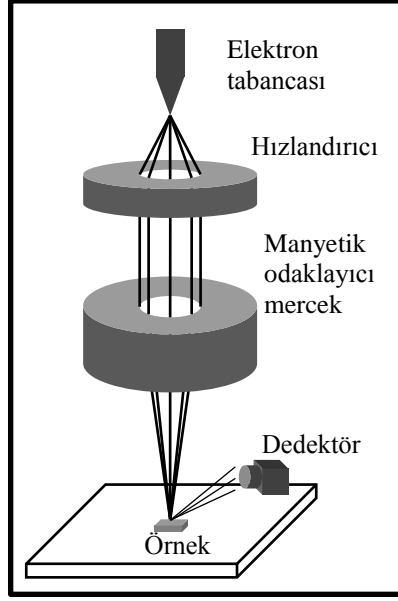
*AFM tekniği;* Bir AFM cihazı temel olarak, yüzeyi taramak için kullanılan sivri bir uç, sivri ucun takıldığı esnek kol, örneğin/ucun hareketini sağlayan piezoelektrik öğeler ve bütün bunların hassas bir şekilde yapılmasını sağlamak için bilgisayar donanımından oluşmaktadır. Tez kapsamında sonuçları verilen ve bu teknikle alınan bütün görüntüler temassız ölçüm kipinde alınmıştır. Bu kipte, Şekil 3.10'da gösterilen sivri ucun bağlı olduğu esnek kolun belirlenen frekansta salınması sağlanır. Yüzeyde bulunan yükselti ve alçaltılar nedeniyle salınım genliği değişir ve genlik değişimi bir yazılım yardımıyla görüntüye dönüştürülür.

Böylece yüzey topografyası elde edilmiş olur. Bu teknik sayesinde örneklerin yüzey topografyası, yüzeyde bulunan QD yoğunluğu ve büyüklükleri (yükseklik ve çap) belirlenmiştir. Kullanılan sivri uç çapının QD çapı ile kıyaslanabilir mertebede olması nedeniyle nokta yüksekliği bilgisinin kesinliği ön plana çıkmaktadır. Bir AFM cihazının çalışma mekanizmasını gösteren temsili düzenek Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. AFM cihazının çalışma mekanizmasının şematik gösterimi

*SEM tekniği;* Bir SEM cihazı temel olarak, elektron tabancası, üretilen elektronların hızlandırıldığı bir ara basamak, odaklayıcı manyetik mercekle, saçılan elektronların toplandığı dedektörlerden ve elektron tabancasından çıkan elektronların dedektöre gelene kadar, ortamda bulunan parçacıklardan kaynaklı saçılmalarının en aza indirilmesi için vakum haznesinden oluşmaktadır (Şekil 3.11). Elektron tabancasında üretilen elektronlar hızlandırılarak ve manyetik mercekten geçirilip odaklanarak incelemesi yapılacak örnek yüzeyine gönderilir. Örnek yüzeyine gelen elektronlar, örneğin yüzeyi ile etkileşimleri sonucu düşük enerjili elektronlar oluşturur. Yüzeyden saçılan ve dedektöre gelen elektronlar, bir yazılım yardımıyla görüntüye dönüştürülür. SEM görüntüsü alma işleminde 4 mm çalışma uzaklığında In-Lens dedektörü kullanılmıştır. SEM tekniği, tez kapsamında büyütülen örneklerin bir kısmında yüzey karakterizasyonu yapmak amacıyla kullanılmış, bu sayede yüzeyde oluşan QD'ların çap, büyüklük dağılımı ve yoğunluk bilgileri elde edilmiştir. AFM tekniğinin aksine SEM tekniğinde QD çap bilgisinin kesinliği ön plana çıkmaktadır. Şekil 3.11'de SEM cihazının çalışması temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. SEM cihazının şematik gösterimi

*TEM tekniği*; Bir TEM cihazı temel olarak elektron tabancası, hızlandırma voltaj kaynağı, odaklayıcı elektromanyetik mercekler, dedektörler ve elektronların saçılmamaları için vakum haznesi bileşenlerinden oluşur. TEM tekniği ile incelenecek örneklerin elektron geçirgen olacak kadar ince olması için özel hazırlanması gerekmektedir. Örnek hazırlama işlemleri ve TEM tekniğiyle ilgili ayrıntılı bilgi, laboratuvarımızda yapılan bir başka tez kapsamında verildiğinden [91] burada anlatılmayacaktır. TEM tekniğinde, SEM’de olduğu gibi elektron tabancası ile üretilen elektronlar hızlandırma voltajı ile hızlandırılır. Fakat TEM tekniğinde, daha yüksek çözünürlük elde etmeye olanak sağladığı için elektronların hızlandırma voltajı SEM’den daha fazladır. Hızlandırılan elektronlar odaklayıcı elektromanyetik lensler yardımıyla örnek üzerine odaklanmaktadır. Örnek üzerine gelen elektron demeti örnek içinden geçerken kristal yapı ile etkileşerek farklı açılarda saçılırlar. Elektronlar saçılma açılarına göre değişik dedektörler kullanılarak farklı bilgiler elde etmemize olanak sağlar. Elektronlar örneğin içinden geçtiği için, yan kesit karakterizasyonu ile kristal kusurları ve arayüz bilgilerini elde etmemiz mümkün olmaktadır. Bu teknik kullanılarak, gömülü QD’ların yükseklik ve çap gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca şapka katmanı olarak büyütülen GaAs kalınlığı bilgisi de elde edilmiştir.

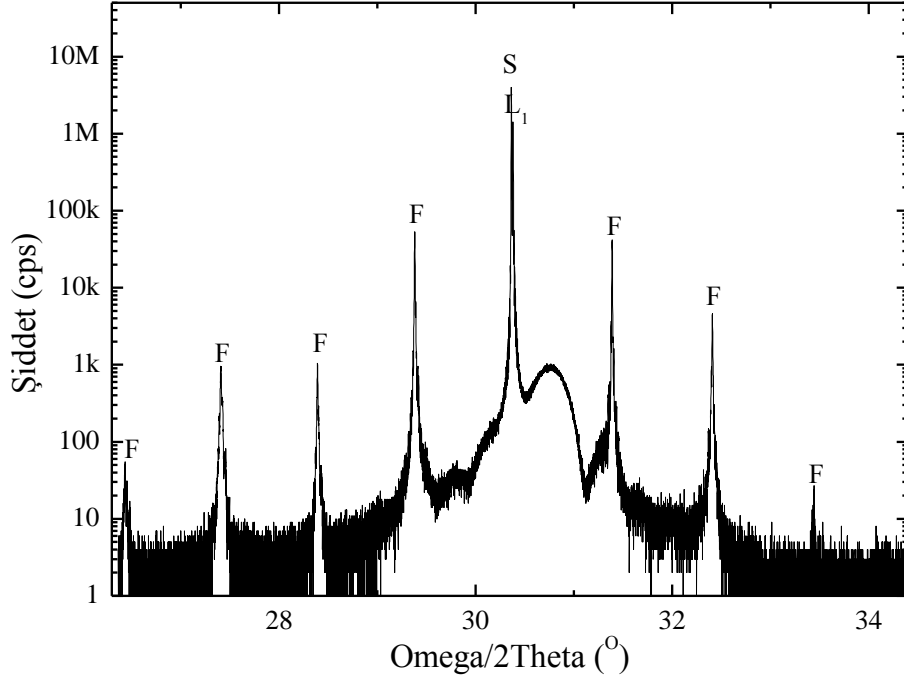
*XRD karakterizasyon tekniği*; Kullanılan XRD cihazının ana bileşenleri, Cu-K $\alpha$  X-ışını tüpü, piksel yapılı x-ışını dedektörü ve bilgisayar donanımdır. Ayrıca X ışını demetinin istenilen genişlikte ve yükseklikte olması için farklı genişlikte yarıkların bulunduğu aparatlar ve maskeler kullanılmıştır. Ölçümlerde, x ışını tüpünden çıkan demet paralel hale gelmesi için Cu W/Si aynaya ve oradan hibrit monokromatöre gelmektedir. Daha sonra örneğe gönderilen x ışını kristal yapının farklı düzlemlerin kırınımına uğrayan x ışınları, oluşan faz farkı ile, daha önceden belirlenmiş açıklıktan geçmek suretiyle dedektöre gelir. Detektöre gelen kırınım demetleri, bir yazılım yardımıyla incelenen örnek hakkındaki bilgileri içeren sinyale dönüştürülür. Bu yöntem kullanılarak, örneğin kristal kalitesi ve katman kalınlıkları belirlenebilmektedir. Tez kapsamında büyütülen örneklerin, GaAs (004) simetri ekseninde etrafında sallantı eğrisi ölçümleri alınmış ve katman kalınlıkları belirlenmiştir. Ayrıca iki set örnek için yine aynı ölçüm yöntemi kullanılmış, büyütme parametresi olarak kullanılan malzeme miktarının etkisi görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ve analizleri sonraki bölümde detaylı olarak anlatılacaktır.

#### 4. EPİTAKSİYEL OLARAK KUANTUM NOKTA BÜYÜTME VE KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde, kuantum nokta oluşumuna etkilerini inceleyebilmek amacıyla, büyüme parametrelerinin değiştirildiği tek katman QD yapılar sistematik olarak büyütülmüş ve farklı karakterizasyon yöntemleri ile davranışları incelenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda QD'ların fiziksel ve opto-elektronik özellikleri birbirleri ile ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir. Ek olarak, büyüme sonrasında farklı sıcaklık ve sürelerde tavlama işlemine tabi tutulan örnekler PL tekniği ile incelenmiş, kuantum nokta özelliklerinin ayarlanabilirlikleri gösterilmiştir.

##### 4.1. InAs/GaAs Kendiliğinden Oluşan Kuantum Nokta Büyütme

Öncelikli olarak literatürde yayınlanan çalışmalar incelenerek InAs QD'lar için büyüme sıcaklığı, malzeme miktarı ve V/III akı oranları belirlenmiştir. Literatürde raporlanan ve Tablo 2.1'de verilen InAs QD büyüme oranları, laboratuvarımızdaki MBE sisteminde kullanılan InAs büyüme oranından çok daha düşüktür. Bu nedenle, düşük miktarlardaki InAs büyüme oranını belirleyebilmek için, InAs ile arasında örgü sabiti farkının çok az olduğu GaSb alttaş üzerine, çok tekrarlı InAs/GaSb süperörgü epi-katman yapı büyütülmüştür. Düşük büyüme oranının yakalanabilmesi için In hücre sıcaklık ve As vana açıklık değerleri düşürülerek keskin bir değişiklik yapılmıştır. Büyütülen bu kontrol örneğini kullanarak katman kalınlıklarını belirleyebilmek için GaSb (004) simetri eksenini etrafında alınan XRD sallantı eğrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekilde F ile gösterilen GaSb/InAs süperörgü periyodik yapısından kaynaklanan tepe noktaları arasındaki açısız farklar kullanılarak bulunan periyot kalınlığı (InAs+GaSb)  $50,9 \pm 0,1 \text{ \AA}$ 'dur. Büyütme esnasında kullanılan süreler göz önüne alındığında, InAs büyüme oranının  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  In hücre sıcaklığı ve 100 birim As vana açıklığı için 0,11 ML/s gibi bir değere karşılık geldiği hesaplanmıştır.



**Şekil 4.1.** InAs büyüme oranını belirleyebilmek için büyütülen süperörgü yapı için GaSb (004) simetri eksenini etrafında alınan XRD sallantı eğrisi

InAs büyüme oranı belirlendikten sonra büyütme koşullarının sistematik olarak değiştirildiği tek katman QD örnekler büyütülmüştür. Kullanılan/değiştirilen temel büyütme parametreleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Örnekler grup halinde büyütülmüş, her grup içinde sadece bir parametre değiştirilmiş ve diğer bütün parametreler sabit tutulmuştur. Büyütülen tek katman yapılar Şekil 4.2’de şematik olarak gösterildiği gibi, hem GaAs matris içine gömülü QD’lar hem de yüzeyde üstleri kapatılmamış QD’lar olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece gömülü QD’ların fiziksel ve opto-elektronik özellikleri TEM ve PL teknikleri kullanılarak; yüzeyde bulunan QD’ların fiziksel özellikleri AFM ve SEM teknikleri kullanılarak belirlenmesi hedeflenmiştir.

**Tablo 4.1.** Tez kapsamında büyütülen InAs QD'lar için kullanılan temel büyütme parametreleri

Örnek Kodu	Katman kalınlığı (ML)	Büyütme sıcaklığı (°C)	Büyüme oranı (ML/s)	Alttaş büyüklüğü (inç)
S01	1.9	490	0.11	3
S02	2.2	490	0.11	3
S03	2.5	490	0.11	3
S04	2.2	515	0.11	3
S05	2.2	525	0.11	3
S06	2.5	490	0.14	3
S07	2.5	490	0.14	¼ 4
S08	2.5	505	0.14	¼ 4
S09	2.5	520	0.14	¼ 4
S10*	2.5	505	0.14	¼ 4

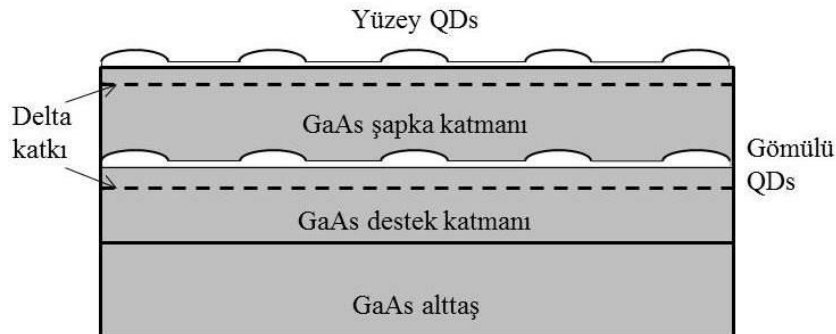
\* Büyüme oranı ve kullanılan malzeme miktarından emin olunmayan örnek.

Bütün büyütme (001) kristal yönelimine sahip yarıiletken GaAs alttaşlar üzerine yapılmıştır. Her bir örneğin oksit kaldırma ve büyütme işleminin tamamında, soğutma işleminin ise bir kısmında V gurubu malzemesi olarak As<sub>2</sub> kullanılmış, büyütme süreci içerisinde QD büyüyen zaman aralıkları RHEED sistemi ile eş zamanlı olarak görüntülenmiştir. Ayrıca, alttaş sıcaklığı optik pirometre (pyrometer) sıcaklık ölçer ile kontrol edilmiştir. Pirometre cihazının kalibrasyonu, GaSb (1x3)-(2x5) RHEED deseninin geçiş sıcaklığı 418 °C olacak şekilde yapılmıştır [92].

Bütün örneklerde büyütme işleminden alttaşlar yüzeyinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması sağlanmıştır. Oksit kaldırma sıcaklığı ve süresi, 3 inç alttaşlar için  $598 \pm 2$  °C ve 3 dk iken, ¼ (çeyrek) 4 inç alttaşlar için  $593 \pm 2$  °C ve 5 dk olarak belirlenmiştir. Oksit kaldırma işleminden sonra, 590 °C'de ve 0,5 ML/s büyüme oranı ile 300 nm GaAs destek katmanı büyütülmüştür. Daha sonra As<sub>2</sub> akısı altında alttaş sıcaklığı 20 °C/dk ile QD büyütme için hedeflenen sıcaklığa düşürülerek bu sıcaklıkta 65 nm GaAs büyütülmüştür. GaAs büyütmesi bittikten sonra 0,11 ve 0,14 ML/s büyüme oranları ile Tablo 4.1'de verilen,



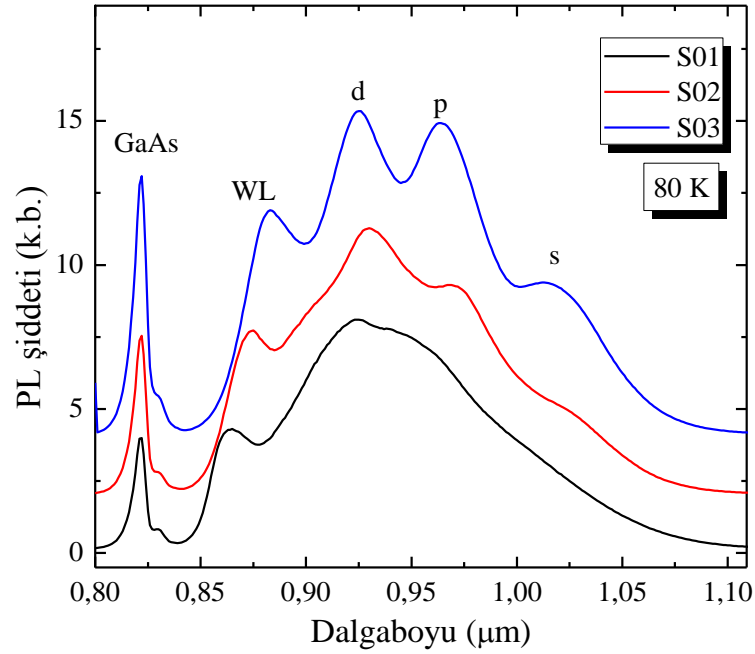
hedeflenen malzeme miktarı kadar InAs QD büyütülmüştür. Kullanılan büyüme oranları düşünülerek hedeflenen malzeme miktarı buharlaşınca kadar InAs QD büyütülmüş ve  $As_2/In$  oranı yaklaşık 10 olarak hedeflenmiştir. QD büyütmesi bitip In hücre kepengi kapatıldıktan sonra 30 s  $As_2$  akısı altında bekletilerek QD'ların büyüklük dağılımının homojen olması sağlanmaya çalışılmıştır [93]. 30 s bekleme süresinin hemen ardından kuantum sınırlamanın oluşturulabilmesi için QD'ların üzerine 65 nm GaAs şapka katmanı büyütülmüştür. Son olarak yüzey karakterizasyonu yapmak amacıyla, üzerine GaAs şapka katmanı büyütülen QD'ların büyütme parametrelerine sahip ikinci bir QD katmanı büyütülmüştür. PL sinyalini iyileştirmek amacıyla QD katmanların 15 nm alt kısmına Si atomları ile delta katkılama yapılmıştır. Katkı miktarının belirlendiği kalibrasyon örnekleri ve yapılan çalışmalar hakkında daha fazla bilgiye laboratuvarımızda yapılan başka bir tez çalışmasından ulaşılabilir [94]; bu tez kapsamında olmadığından bu konunun ayrıntılarından daha fazla bahsedilmeyecektir. Katkı kalibrasyonu örneklerinden belirlenen ve QD örneklerin büyütülmesinde kullanılan delta katkı miktarı  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 'dir. Yüzeyde büyütülen InAs QD büyütme işleminin ardından In hücre kepengi kapatılarak örnek  $As_2$  akısı altında soğutulmaya başlanmıştır. Örnek sıcaklığı  $430 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye geldiği andan itibaren As vanası ve kepengi kapatılarak örneğin  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğutulmasıyla büyütme işlemi sonlandırılmıştır. GaAs ve InAs malzemeleri büyütme esnasında haznenin vakum seviyesi sırasıyla  $2 \times 10^{-6}$  ve  $3 \times 10^{-7}$  Torr olarak ölçülmüştür. Tek katman QD örneklerin yapısına ait şematik gösterim Şekil 4.2'de verilmiştir.



**Şekil 4.2.** Tek katman örneklerde gömülü kuantum noktaları ve yüzey kuantum noktaları için örnek yapısının şematik gösterimi

#### 4.1.1. Malzeme miktarı

Farklı InAs malzeme miktarı ile aynı koşullar altında 3 (üç) adet örnek büyütülmüş ve temel büyütme parametreleri Tablo 4.1’de S01, S02 ve S03 kod numaraları ile verilmiştir. QD’ların karşılaştırmalı olarak nokta büyüklükleri (çap ve yükseklik), yoğunlukları ve büyüklük dağılımlarının belirlenmesi için PL ölçümleri yapılmıştır. PL sinyallerinin yorumlanması ile elde edilen QD’lar hakkındaki bilgiler AFM, SEM ve TEM görüntüleri ile desteklenmiştir. S01, S02 ve S03 kod numaralı örnekler için düşük sıcaklık (80 K) PL spektrumları Şekil 4.3’de verilmiştir. Grafikte “s, p, d ve WL” ile belirtilen ve spektrumun tepe noktalarını oluşturan eğriler, bölüm 2.4’de bahsedilen kuantum nokta enerji seviyeleri ve ıslanma katmanı (WL) geçişlerini ifade etmektedir.

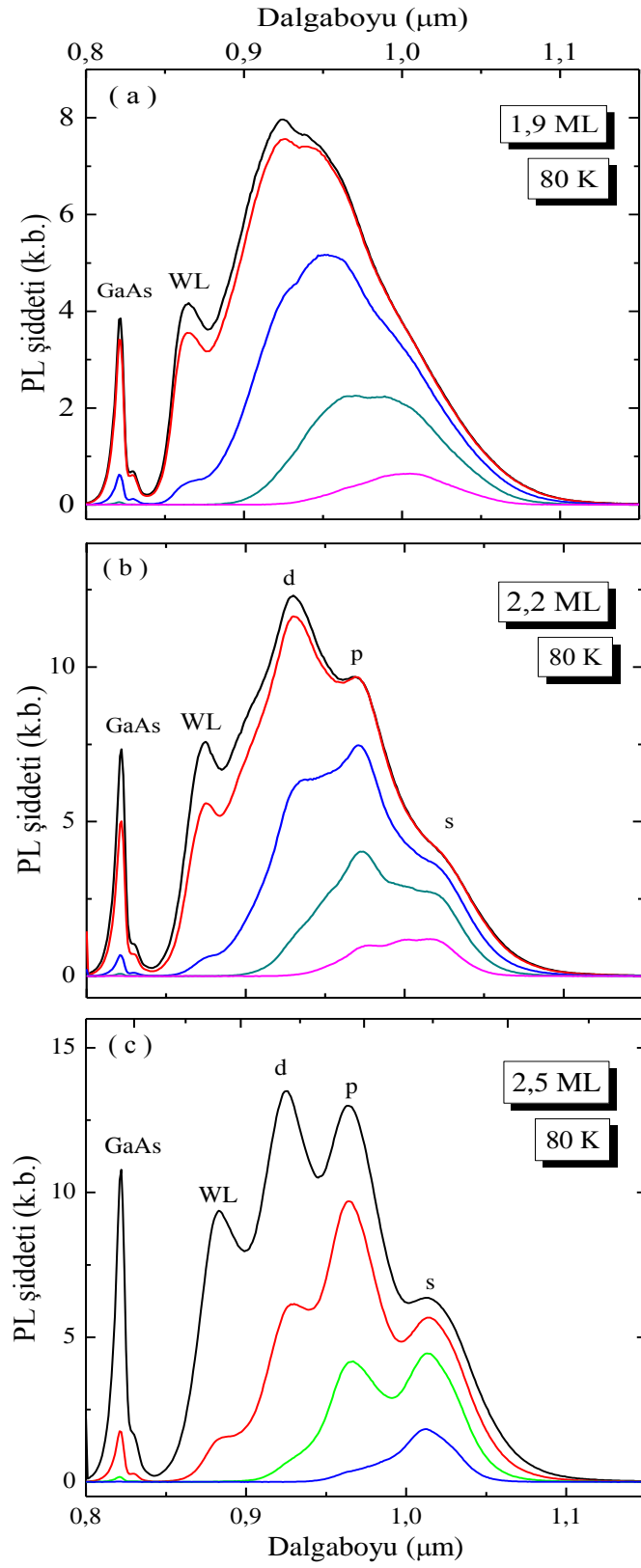


Şekil 4.3. InAs malzeme miktarının sırasıyla 1,9 ML, 2,2 ML ve 2,5 ML olduğu S01, S02 ve S03 kod numaralı örneklerin 80 K PL spektrumu

InAs malzeme miktarının en az (1,9 ML) kullanıldığı S01 kod numaralı örneğin genel davranışı incelendiğinde, enerji seviyelerine ait sinyallerin net olarak ayrışmadığı ve birbirine geçmiş durumda olduğu görülmektedir (Şekil 4.3). Bunun nedeni, QD büyüklük dağılımının düzgün (homojen) olmamasıdır. Farklı

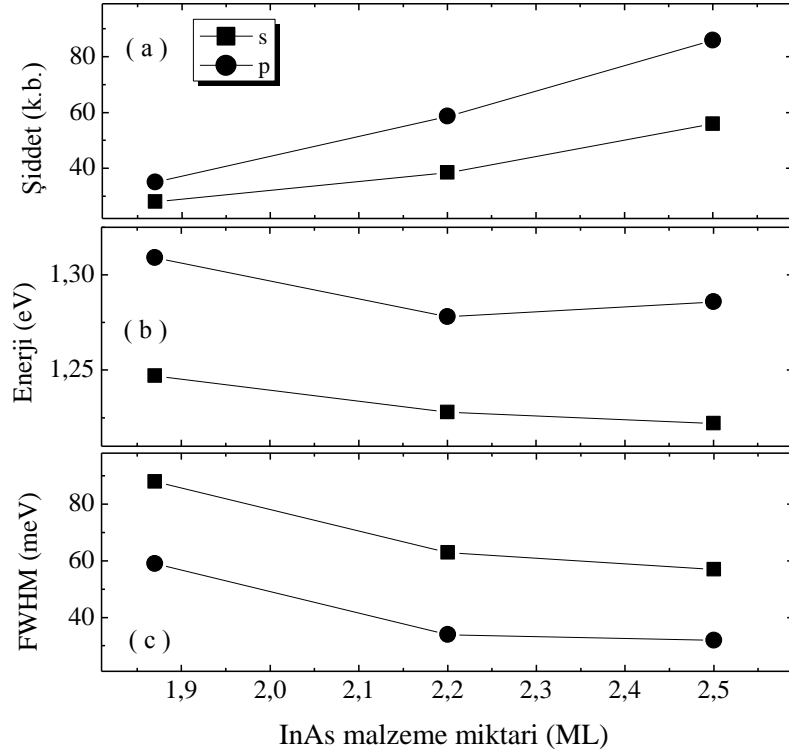
büyüklerdeki kuantum nokta yapıları üzerindeki kuantum sınırlama etkisi farklı olduğundan, oluşan enerji seviyeleri de farklılık göstermektedir. Bu enerji seviyeleri arasındaki geçişler farklı dalga boylarında gerçekleştiğinden, PL spektrumunda QD enerji seviyelerine ait sinyallerin belirginliği kaybolmaktadır. Malzeme miktarı arttıkça (1,9 ML  $\rightarrow$  2,5 ML), PL spektrumundaki enerji seviyelerine ait sinyaller birbirinden ayrılmaktadır. Enerji seviyelerine ait eğrilerin daha belirgin ve ayırık olması QD dağılımının daha düzgün olduğunu göstermektedir. Şekil 4.3’de gösterilen PL spektrumları incelendiğinde, en düzgün nokta dağılımına sahip örneğin S03 kod numaralı örnek olduğu görülmektedir. Ayrıca malzeme miktarındaki artış kalınlık artışı nedeniyle ısınma tabakasındaki kuantum sınırlamanın etkisini azalttığı için WL sinyali daha büyük dalga boyuna doğru kaymaktadır.

QD büyüklüklerinin, nokta içindeki sınırlı enerji seviyesi sayısını belirlediğinden bahsedilmiştir. Dolayısıyla PL spektrumundaki enerji seviyelerinin konumu, sayısı ve enerji seviyeleri arasındaki farklar, QD büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir. PL spektrumundaki sinyallerin QD’lerden kaynaklı olup olmadığını anlamak ve nokta içindeki enerji seviyelerinin uyarılan elektronlarla doldurulmasını görebilmek için uyarma şiddeti bağımlı PL ölçümleri alınmıştır. Uyarma şiddeti bağımlı PL ölçümü, nokta dağılımının düzgünlüğünü görmek açısından da önemli bir yöntemdir. Uyarma şiddetinin düşük olduğu durumda, PL spektrumunda sadece taban enerji durumuna ait sinyal görülmektedir. Bunun nedeni, uyarmanın etkisiyle birim zamanda üretilen elektron sayısı, elektron-boşluk birleşme oranından daha yavaş olduğu için üst enerji seviyelerinde elektron-boşluk çifti oluşumunun gözlenmemesidir. Ancak uyarma şiddetinin artmasıyla birim zamanda üretilen elektron sayısı, elektron-boşluk çifti oluşma oranından daha fazla olduğu için üst enerji seviyeleri dolmaya başlar. Üst enerji seviyelerinden elektron-boşluk yeniden birleşmesi durumunda, PL spektrumunda söz konusu enerji seviyelerine ait sinyaller de görülmeye başlamaktadır. Uyarma şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumu ölçümleri bütün örneklerde yapılmış ve her bir örnek için elde edilen sonuçlar Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. 490 °C sıcaklıkta büyütülen (a) S01,(b) S02 ve (c) S03 kod numaralı örneklerle ait farklı uyarma şiddeti ile alınan 80 K PL spektrumları

S01, S02 ve S03 kod numaralı örneklerin aynı koşullar altında yapılan uyarma şiddeti bağımlı PL ölçümleri detaylı olarak incelenerek enerji seviyelerinin kullanılan malzeme miktarı ile değişimi analiz edilmiştir. Söz konusu örneklerin PL spektrumları, Gaussian dağılım fonksiyonu kullanılarak karakterlerin üzerine oturtulmuş (fit) eğrilerden elde edilen s ve p enerji seviyeleri, şiddeti ve FWHM değerleri Şekil 4.5’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

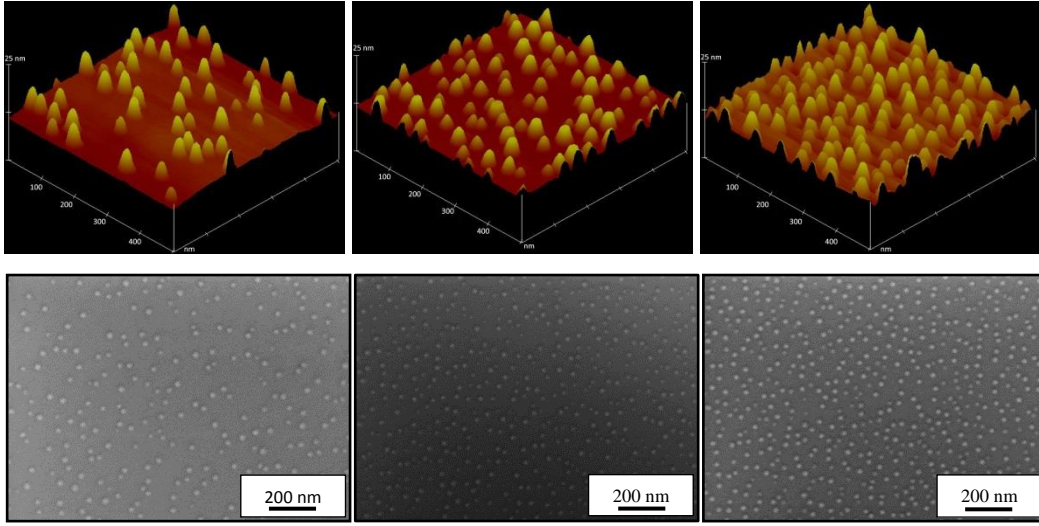


**Şekil 4.5.** Farklı InAs malzeme miktarı kullanılan S01, S02 ve S03 kod numaralı örneklerin 80 K PL spektrumu ölçümleri ile elde edilen s ve p enerji seviyelerine ait eğriler; (a) şiddet, (b) enerji ve (c) FWHM değişimi

PL sinyal şiddeti birim alan başına düşen QD sayısı ile ilgili olduğu için malzeme miktarının artması QD yoğunluğunu arttırdığı görülmektedir. QD şekil ve büyüklüğünün değişmesi, büyütme doğrultusunda ve düzlemsel doğrultuda kuantum sınırlanmanın etkisini değiştirdiğinden daha önce bahsedilmişti (Bakınız Şekil 2.5). Büyütme doğrultusundaki sınırlanma PL spektrumunda s enerji seviyesini belirlerken, düzlemsel doğrultudaki sınırlanma diğer enerji seviyelerinin sayısını ve s enerji seviyesine göre konumlarını belirlemektedir. S enerji seviyesinin düşük enerjilere kayması kullanılan malzeme miktarının artması

ile nokta yüksekliğindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Ayrıca malzeme miktarının artması ile PL spektrumundaki enerji seviyelerine ait sinyallerin FWHM değerinin azalması, QD büyüklük dağılımının daha homojen olduğunu göstermektedir.

PL spektrumu ile elde edilen QD'ların fiziksel özellikleri hakkında yapılan yorumları doğrulamak amacıyla örneklerin AFM ve SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.6'da verilen AFM ve SEM görüntülerinden InAs malzeme miktarının artmasıyla nokta yoğunluğunun arttığı ve nokta büyüklük dağılımının daha homojen olduğu görülmektedir. Görüntülerin detaylı analizleri sonucunda, her bir örnek için elde edilen QD yoğunluğu, ortalama nokta yüksekliği ve nokta çapı bilgileri elde edilmiş ve Tablo 4.2'de özet halinde verilmiştir.

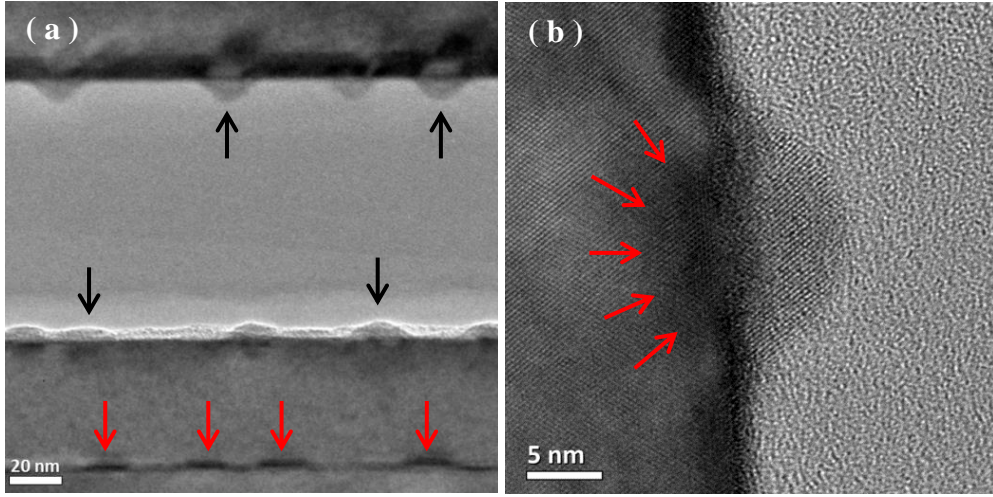


**Şekil 4.6.** S01 (sol), S02 (orta) ve S03 (sağ) kod numaralı örneklerin AFM (üst) ve SEM (alt) görüntüleri

**Tablo 4.2.** AFM ve SEM görüntüleri ile PL spektrum analizlerinden elde edilen yapısal parametreler.

Örnek kodu	QD yoğunluğu (#/cm <sup>2</sup> )	Ort. QD çapı (nm)	Ort. QD yüksekliği (nm)	S enerji seviyesi (nm/eV)	S enerjisi FWHM (meV)
S01	$1,6 \times 10^{10}$	$34 \pm 3$	$13 \pm 0,8$	994 / 1,247	88
S02	$3,0 \times 10^{10}$	$32 \pm 3$	$11 \pm 0,5$	1009 / 1,229	63
S03	$3,5 \times 10^{10}$	$31 \pm 2$	$13 \pm 0,6$	1014 / 1,223	57

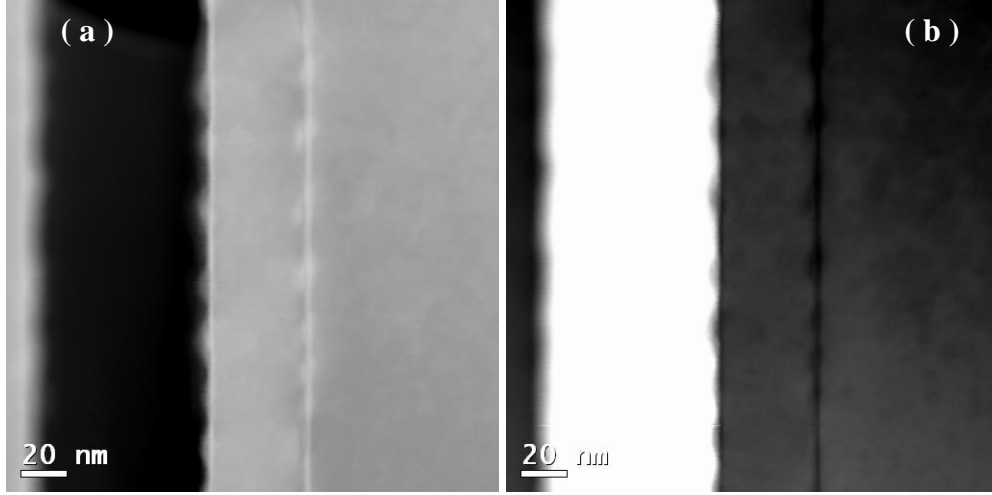
Kuantum noktaların yapısal oluşumlarını ve fiziksel büyüklüklerini daha detaylı olarak belirlemek amacıyla S03 kod numaralı örnek TEM tekniği kullanılarak incelenmiştir. Yapılan TEM analizlerinde 200 kV alan yayılımına sahip (JEOL™ JEM-2100F) TEM cihazı kullanılmıştır. Hem GaAs içine gömülü hem de üzeri kapatılmadan yüzeyde bırakılan QD katmanı kırmızı ve siyah renkli oklarla Şekil 4.7a’da verilen TEM aydınlık alan (bright field, BF) görüntüsü üzerinde gösterilmiştir. TEM numunesinin hazırlanması aşamasında, örneğin iki parçası, büyütme yüzeyleri birbirine bakacak şekilde yapıştırıldığından [91], yüzeyde bulunan QD’lar yapıştırıcı madde içine gömülü olarak gözükmemektedir.



**Şekil 4.7.** (a) Yüzeyde (siyah renk oklar) ve gömülü (kırmızı renk oklar) InAs QD’ların TEM-BF görüntüsü. (b) Yüzeydeki QD’nın yüksek çözünürlük TEM görüntüsü: kırmızı renkte oklar QD çevresindeki gerilim alanını göstermektedir

Şekil 4.7b’de verilen yüksek çözünürlük (high resolution, HR) TEM görüntüsü yapı hakkında daha detaylı bilgi vermektedir. Kullanılan malzeme sisteminin örgü sabiti farkından dolayı yapıda oluşan gerilimin etkisi kırmızı renk oklarla gösterilmiştir. Yüzey QD’ları yaklaşık 20 nm çap ve 10 nm yükseklikte kubbe şeklinde görüntülenirken, gömülü QD’lar yüzeyde olanlardan daha küçük olduğu görülmüştür. Yüzey ve gömülü QD’ların çaplarında ciddi bir fark görülmezken, gömülü QD’ların yükseklikleri belirgin şekilde azalmasının nedeni, In atomlarının yüzey hareket mesafesinin, QD üzerine GaAs şapka katmanı büyütülmesi esnasında azalmasıdır. Yüksekliğindeki azalma ile daha yassı kubbe

(disk benzeri) şeklinde olan QD'ların yükseklikleri yaklaşık 5 nm olarak belirlenmiştir (Şekil 4.7b). Elde edilen bu bulgular, kırınım farkı üstünlüğü olmasından dolayı [91], taramalı TEM dairesel karanlık alan (scanning TEM annular dark field, STEM-ADF) ile STEM-BF teknikleri kullanılarak doğrulanmış ve elde edilen görüntüler Şekil 4.8'de verilmiştir.

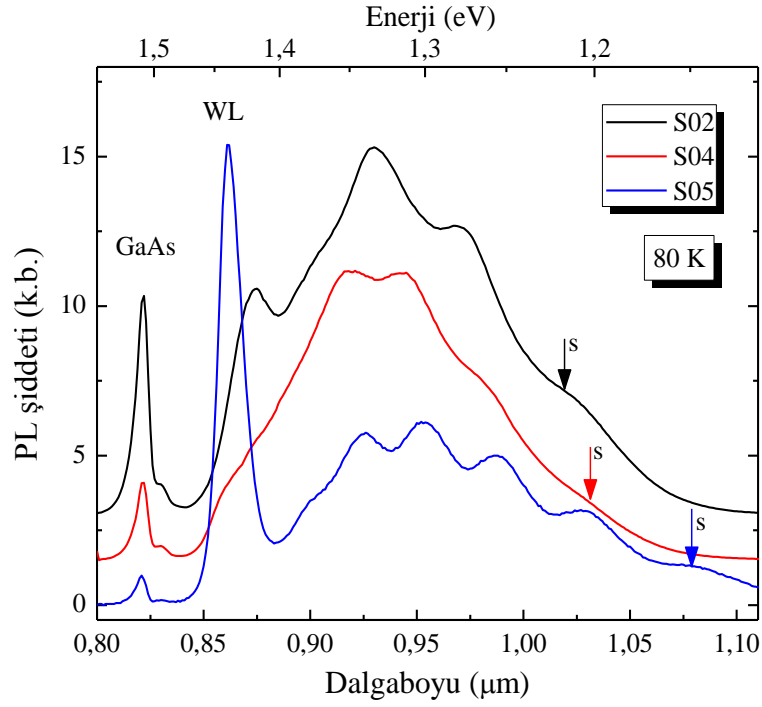


Şekil 4.8. S03 kod numaralı örneğe ait (a) STEM-ADF ve (b) STEM-BF görüntüleri

#### 4.1.2. Büyütme sıcaklığı

Farklı büyütme sıcaklıklarında, diğer tüm parametrelerin sabit tutulduğu iki grup örnek büyütülmüştür. Birinci grup için, 3 inç alttaş kullanılarak 3 adet QD örnek büyütülmüş ve temel büyütme parametreleri Tablo 4.1'de S02, S04 ve S05 kod numaraları ile verilmiştir. İkinci örnek grubu ise ¼ 4 inç alttaş üzerine büyütülmüş ve temel büyütme parametreleri Tablo 4.1'de S07, S08 ve S09 kod numaraları ile verilmiştir. Büyütme sıcaklığının kuantum nokta oluşumuna etkileri birinci gruptaki örnekler üzerinden bu bölümde bahsedilecek, çeyrek alttaş üzerine büyütülen örneklerin sonuçları ise alttaş bağımlılığının tartışıldığı sonraki bölümde ele alınacaktır.

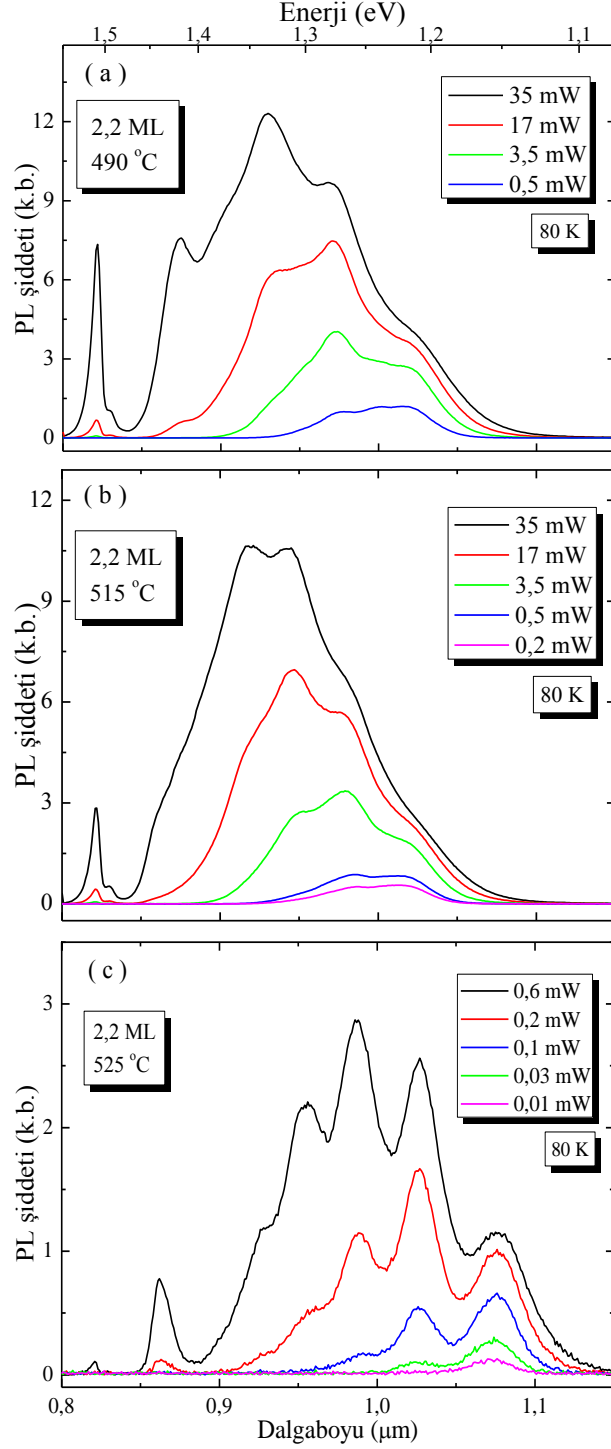




**Şekil 4.9.** 490 °C (S02), 505 °C (S04) ve 525 °C (S05) büyütme sıcaklıklarına sahip örneklerin düşük sıcaklık PL spektrumları

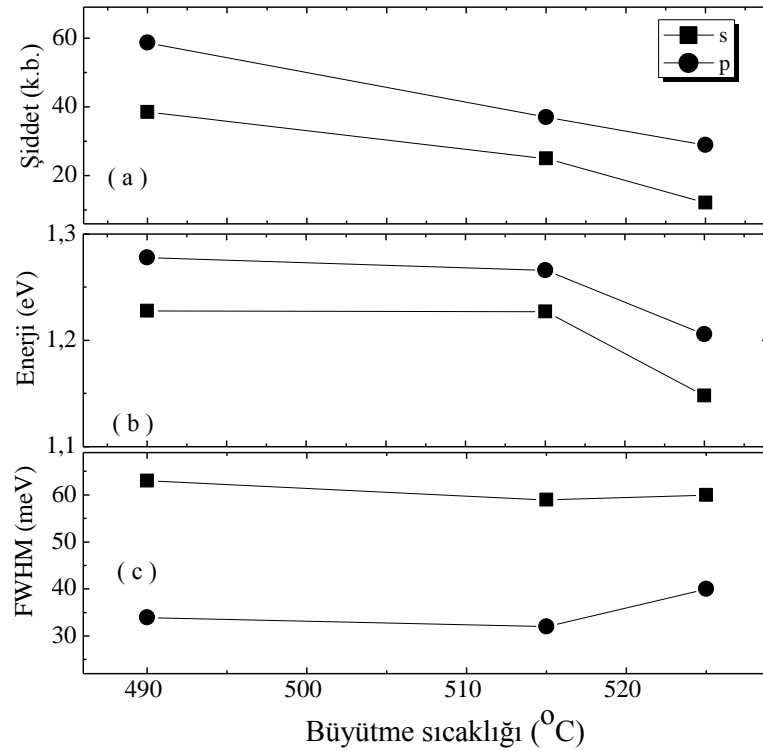
2,2 ML sabit InAs miktarıyla 490 °C, 515 °C ve 525 °C’de büyütülen S02, S04 ve S05 kod numaralı örneklerin 80 K sıcaklıktaki PL spektrumları Şekil 4.9’da verilmiştir. S05 kod numaralı örnekte kullanılan uyarma lazeri şiddeti (~0,6 mW), diğer örneklerde kullanılan değerden yaklaşık 50 kat daha düşüktür. Bu durum şu şekilde yorumlanmaktadır; söz konusu olan ve en yüksek sıcaklıkta büyütülen bu örnek, diğer örneklerle kıyasla daha az yoğunlukta ama daha büyük kuantum noktalara sahiptir. Her örnek için kullanılan delta katkı seviyesi aynı olduğu için, S05 kod numaralı örnek daha az nokta yoğunluğuna sahip olduğundan, nokta başına düşen elektron sayısı bu örnekte en fazladır. Bu nedenle, üst enerji seviyelerine ait sinyallerin gözlenebilmesi için QD’lar yüksek uyarma şiddetine ihtiyaç duymazlar. Büyütme sıcaklığı arttıkça QD büyüklüğü artmakta, dolayısıyla sınırlamanın etkisi azalmakta ve bunun sonucu olarak enerji seviyelerine ait sinyaller daha küçük enerjilere kaymaktadır. Ayrıca, büyütme sıcaklığının artmasıyla (490 °C → 525 °C) In atomlarının yüzey hareketindeki iyileşmesi, S05 kod numaralı örneğin enerji seviyelerine ait sinyallerin birbirinden ayrık ve iyi tanımlanmış daha homojen nokta dağılımına sahip olmasını sağlamıştır (Şekil 4.9). Örneklerin enerji seviyelerinin daha kesin belirlenmesi için

her örnekte uyarma şiddeti bağımlı düşük sıcaklık PL ölçümleri yapılmış ve sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Aynı InAs malzeme miktarı için farklı sıcaklıklarda büyütülen (a) S02, (b) S04 ve (c) S05 kod numaralı örneklere ait 80 K sıcaklıkta farklı uyarma şiddeti altında alınan PL spektrumları

Farklı sıcaklıklarda büyütülen S02, S04 ve S05 kod numaralı örneklerin aynı koşullar altında yapılan uyarma şiddeti bağımlı PL ölçümleri (Şekil 4.10) detaylı olarak incelenerek enerji seviyelerinin büyütme sıcaklığı ile değişimi analiz edilmiştir. Söz konusu örneklerin PL spektrumları, çoklu Gaussian dağılım fonksiyonu kullanılarak karakterlerin üzerine oturtulmuş eğrilerden elde edilen s ve p enerji seviyelerinin şiddetleri, enerji ve FWHM değerleri Şekil 4.11’de grafik olarak gösterilmiştir.

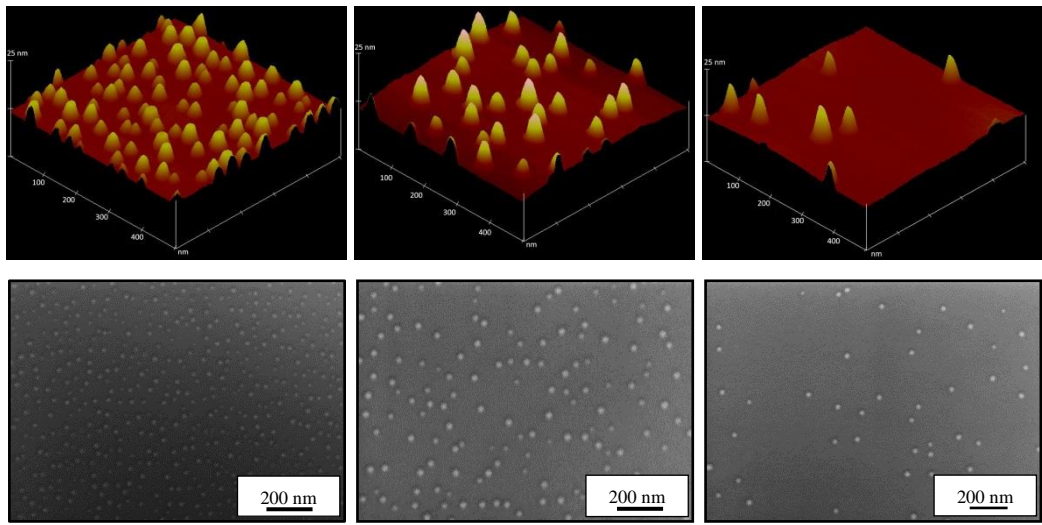


**Şekil 4.11.** Aynı InAs malzeme miktarı için farklı sıcaklıklarda büyütülen örneklerin 80 K PL ölçümlerinin analizi ile elde edilen s ve p enerji seviyelerine ait eğriler; (a) şiddet, (b) enerji ve (c) FWHM değişimi

Büyütme sıcaklığının artması QD yoğunluğunu azalttığı için PL sinyalinin şiddetinde azalma görülmektedir. QD yoğunluğunun azalmasına paralel olarak nokta büyüklüğü artmaktadır. Büyüklükleri her yönde artan noktaların üzerindeki büyütme doğrultusunda ve düzlemsel doğrultuda kuantum sınırlanmanın etkisi azaldığından PL spektrumunda görülen enerji seviyelerine ait sinyaller daha düşük enerjilere kaymaktadır (Şekil 4.11). Ayrıca büyütme sıcaklığının artması In atomlarının hareket mesafesini iyileştirdiği (enhanced migration length) için daha

düzgün dağılımlı kuantum noktalar elde edilmektedir. Bunun sonucunda ise PL spektrumundaki enerji seviyelerine ait sinyallerin FWHM değerinde azalma gözlenmiştir.

PL spektrumu ile elde edilen bulguları doğrulamak amacıyla örneklerin yüzeyleri AFM ve SEM teknikleri ile incelenmiş ve örnek görüntüleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Büyütme sıcaklığının artışı ile QD’ların büyüklük dağılımı ve yoğunluğundaki değişim açıkça görülmektedir: Büyütme sıcaklığı arttıkça nokta yoğunluğu azalmış, nokta büyüklük dağılımı ise daha düzgün hale gelmiştir.



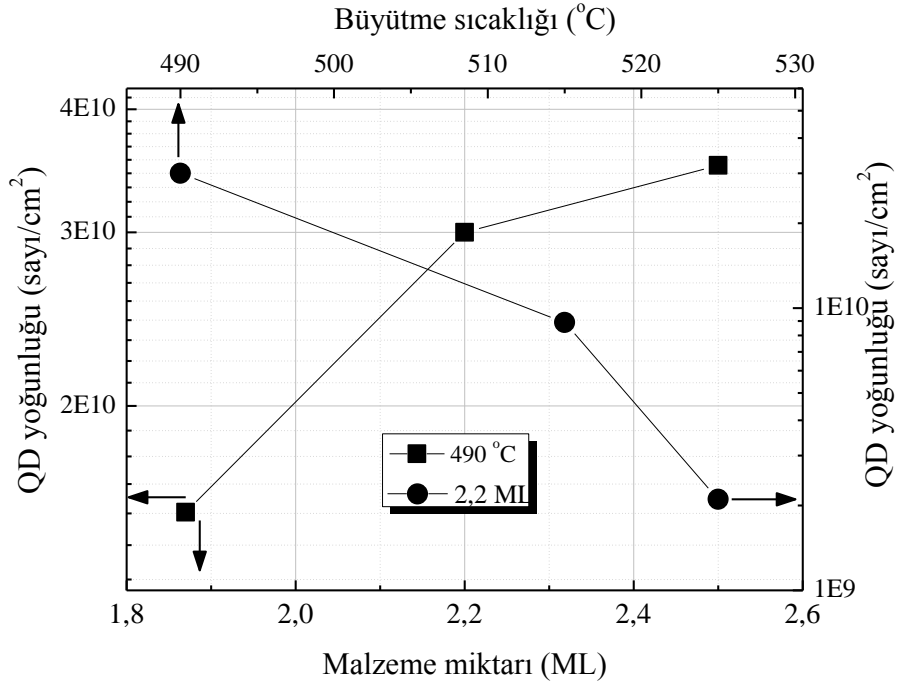
Şekil 4.12. 490 °C (sol), 505 °C (orta) ve 525 °C (sağ) büyütme sıcaklıklarına sahip örneklerin AFM (üst) ve SEM (alt) görüntüleri

Şekil 4.12’de gösterilen AFM ve SEM görüntülerinden yola çıkarak büyütme sıcaklığının artması sonucunda QD büyüklüğünün arttığı görülmektedir. AFM tekniğinde QD yükseklik bilgisi hassasiyeti ön plana çıkmaktadır. Her iki teknik için hata payının az olduğu yönleri göz önünde bulundurularak; büyütme sıcaklığındaki artışın QD’ların hem nokta yüksekliğini arttırdığı (AFM görüntülerinden), hem de nokta çapını arttırdığı (SEM görüntülerinden) sonuçları elde edilmiş böylece PL ölçümleri sonucunda yapılan yorumlar desteklenmiştir. PL, AFM ve SEM teknikleri ile belirlenen QD’ların özellikleri Tablo 4.3’de özetlenmiştir.

**Tablo 4.3.** AFM ve SEM görüntüleri ile PL spektrum analizlerinden elde edilen yapısal parametreler

Örnek kodu	QD yoğunluğu (#/cm <sup>2</sup> )	Ort. QD çapı (nm)	Ort. QD yüksekliği (nm)	S enerji seviyesi (nm/eV)	S enerjisi FWHM (meV)
S02	$3,0 \times 10^{10}$	$32 \pm 3$	$11 \pm 0,5$	1009 / 1,229	63
S04	$8,9 \times 10^9$	$42 \pm 3$	$17 \pm 1,1$	1014 / 1,223	59
S05	$2,1 \times 10^9$	$47 \pm 6$	$19 \pm 1,4$	1080 / 1,148	60

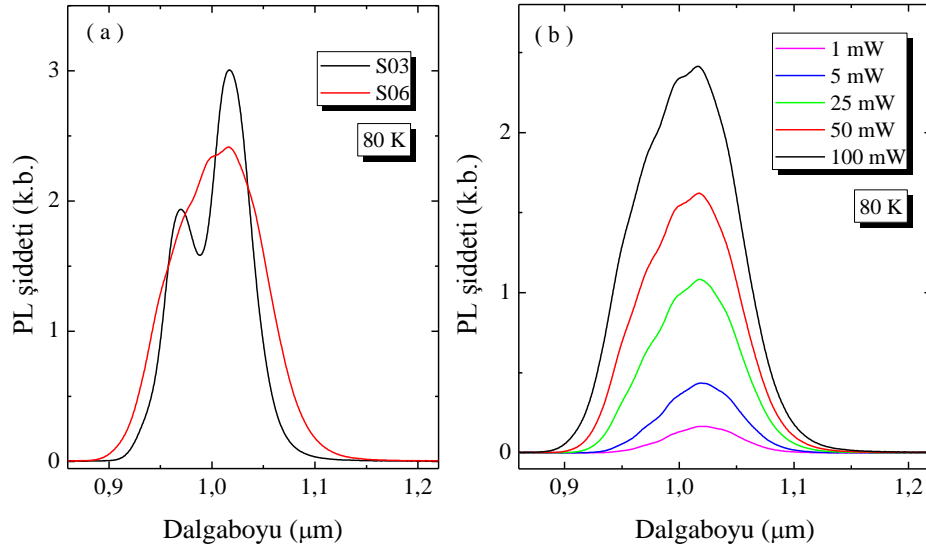
Tablo 3 ve Tablo 4’de sayısal değerleri verilen, kullanılan malzeme miktarının ve büyütme sıcaklığının değiştirilmesi sonucunda QD yoğunluğunun değişimi Şekil 4.13’de özetlenmiştir. Malzeme miktarının artması nokta yoğunluğunu arttırmakta, büyütme sıcaklığının artması ise nokta yoğunluğunu azaltmaktadır.



**Şekil 4.13.** QD yoğunluğunun büyütme sıcaklığı ve malzeme miktarının fonksiyonu olarak değişimi

### 4.1.3. Büyüme oranı

Büyüme oranının kuantum nokta oluşumuna etkisini inceleyebilmek için temel büyütme parametreleri aynı olacak şekilde (Tablo 4.1) 0,11 ML/s ve 0,14 ML/s oranlarında S03 ve S06 kod numaralı örnekler büyütülmüştür. Örneklere ait 80 K sıcaklıkta alınan kıyaslamalı PL spektrumları Şekil 4.14a'da ve S06 kod numaralı örneğe ait uyarma şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumu Şekil 4.14b'de verilmiştir. S03 kod numaralı örnek için uyarma şiddeti bağımlı PL ölçüm sonuçları Şekil 4.4'de verildiğinden burada yeniden gösterilmemiştir.



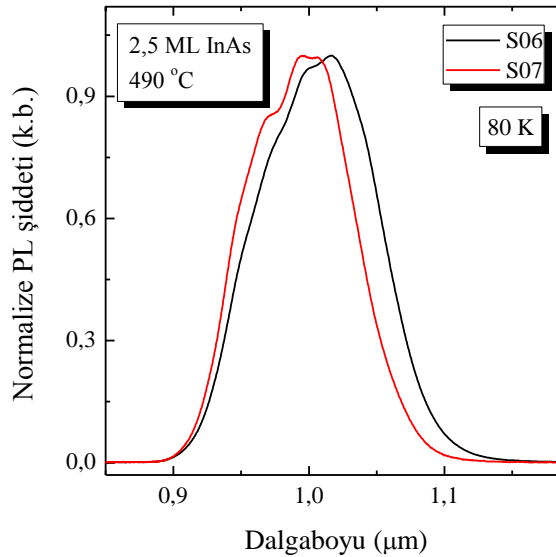
**Şekil 4.14.** (a) S03 ve S06 kod numaralı örneklerin aynı koşullar altında alınan kıyaslamalı PL spektrumları ve (b) S06 kod numaralı örneğin 80 K'de lazer şiddeti bağımlı PL spektrumu

Şekil 4.14a'da S03 kodlu örneğin PL spektrumunda QD enerji seviyelerine ait sinyaller birbirinden ayrı ve iyi tanımlanmış olmasının homojen nokta dağılımından kaynaklandığından bahsedilmiştir. S06 kod numaralı örnekte büyüme oranının artması, In atomlarının hareket mesafesini azalttığı için farklı büyüklüklerde kuantum noktalar oluşmuştur. Büyüklükleri farklı olan QD yapılar farklı dalgaboyunda ışımaya yaptıkları için PL spektrumunda enerji seviyelerine ait sinyaller birbiri içine geçmiş ve daha geniş olarak gözükmektedir. Enerji seviyelerinin birbiri içine geçmiş olması, QD büyüklük dağılımının homojen

olmamasının bir göstergesidir. Ayrıca S06 kod numaralı örneğin PL spektrumunun daha geniş olmasının sebebi ise, örnek genelinde S03 kod numaralı örneğe kıyasla daha büyük ve daha küçük QD'lar olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, düşük büyüme oranıyla büyütülen örnekte kuantum nokta büyüklük dağılımının daha düzgün olduğu gözlenmiştir.

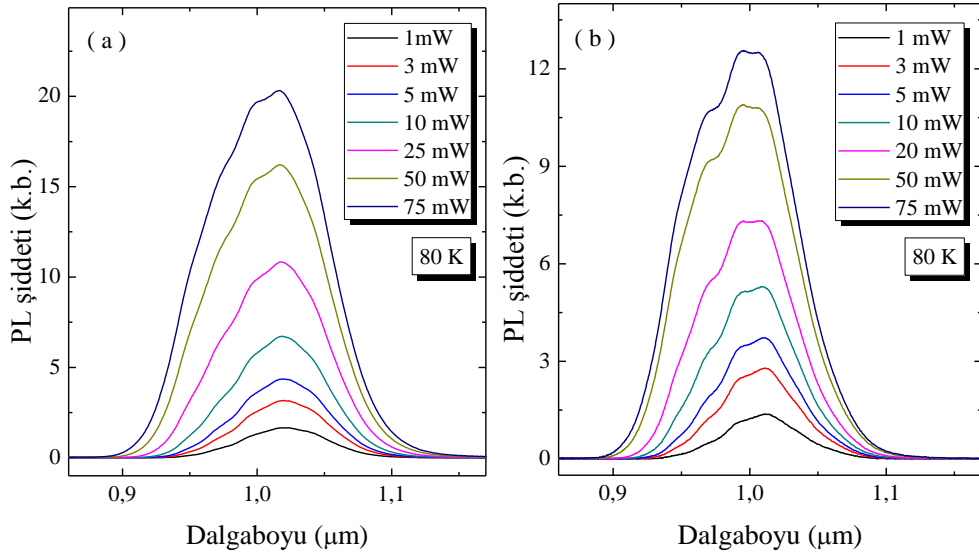
#### 4.1.4. Alttaş bağımlılığı

Tek kristal epitaksiyel yapıların büyütülmesinde kullanılan alttaşların büyüklüğü ve şekli, alttaşa uygulanmak istenen ısı miktarını ve ısınan alttaşın sıcaklık dağılımını doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla sadece QD yapıların değil, bütün kristal yapıların büyütülmesinde alttaş büyüklüğü ve şekli ayrı bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Büyütme sıcaklığı, QD oluşumunda önemli ve etkin bir parametre olduğundan ve kullanılan alttaş şekli ile büyüklüğünün değişimi nokta oluşumunu etkilemektedir. Büyütme koşullarının aynı olup sadece alttaş büyüklüğünün/şeklinin değiştirildiği S06 ve S07 kod numaralı örneklere ait temel büyüme parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir. İlgili örneklerin düşük sıcaklıkta PL spektrumları kıyaslamalı olarak Şekil 4.15'de gösterilmektedir.



Şekil 4.15. 3 inç tüm alttaş üzerine (S06) ve çeyrek 4 inç alttaş üzerine (S07) büyütülen InAs QD yapıların düşük sıcaklık PL spektrumları

Genel olarak S06 ve S07 kod numaralı örneklerin PL spektrumları benzer davranış göstermekle birlikte (Şekil 4.15), S06 kod numaralı örneğin spektrumunun uzun dalgaboyuna doğru genişlediği görülmektedir. Bunun nedeni örneğin küçük farkla da olsa daha büyük QD'lara sahip olmasıdır (destekleyici başka yöntem kullanılmadı). Bahsi geçen iki örnekte de enerji seviyelerine ait sinyallerin birbirine içine geçtiği görülmektedir. Bu durum, iki örnek için de QD büyüklük dağılımının homojen olmadığını ve durumun alttaş büyüklüğünden kaynaklanmadığını göstermektedir (Şekil 4.14a). Ayrıca her iki örneğin uyarma şiddeti bağımlı PL ölçümleri yapılmış ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Her iki örnek için de QD enerji seviyelerine ait sinyallerin birbirine geçmesi uyarma şiddeti bağımlı ölçümlerde de görülmektedir. Bu yüzden çeyrek 4 inç alttaş üzerine tekrardan büyütme sıcaklığını optimize etmek için ayrıca grup örnek büyütme çalışması yapılmıştır.

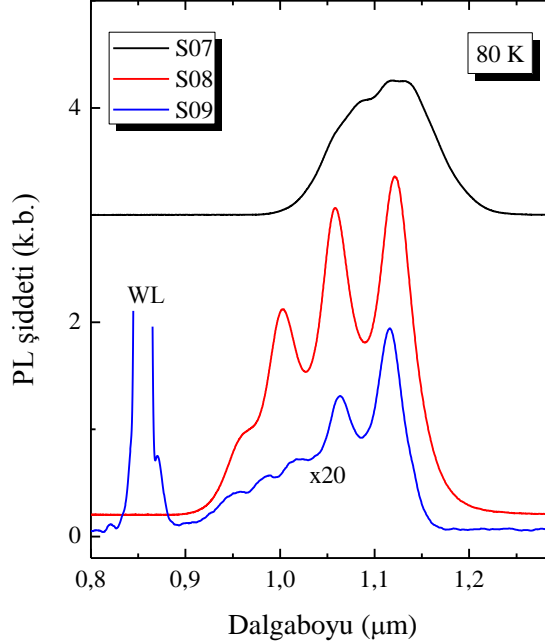


Şekil 4.16. (a) S06 (3 inç alttaş) ve (b) S07 ( çeyrek 4 inç alttaş) kod numaralı örneklerin lazer şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumları

Çeyrek 4 inç alttaş üzerine büyütülen ve Şekil 4.16'da verilen, PL spektrumlarında QD enerji seviyelerine ait sinyallerin daha iyi tanımlanması amacıyla bütün büyütme parametrelerinin sabit tutulduğu ancak büyütme sıcaklığının değiştirildiği 3 örnek büyütülmüştür. Örneklere ait temel büyütme parametreleri Tablo 4.1'de S07, S08 ve S09 kod numaralarıyla verilmiştir.



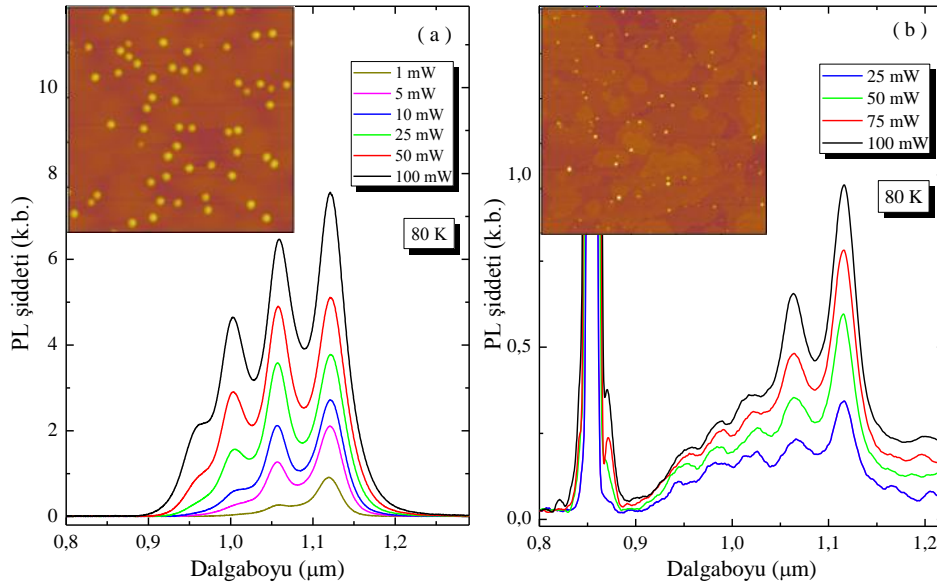
Örnekler arasında daha rahat kıyaslama yapabilmek için aynı koşullar altında alınmış PL spektrumlarına ait eğriler aynı grafikte Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4.17. 4 inç çeyrek alttaş üzerine 490 °C (S07), 505 °C (S08) ve 520 °C (S09) sıcaklıklarda büyütülenörneklerin 80 K PL spektrumları

Büyütme sıcaklığının 490 °C’den 505 °C (S08) ve 520 °C’ye (S09) atmasıyla, PL spektrumunda görülen enerji seviyelerine ait sinyaller belirginleşmiş ve daha iyi tanımlanmış, QD büyüklük dağılımındaki homojenlik artmıştır. S08 ve S09 kod numaralı örneklerin, nokta dağılımının düzgünlüğünü teyit etmek amacıyla her iki örneğin de uyarma şiddeti bağımlı PL ölçümleri yapılmış, sonuçlar Şekil 4.18’de verilmiştir. S08 kod numaralı örneğin, PL spektrumunda QD enerji seviyelerine ait sinyallerin belirgin ve iyi tanımlanmış olması daha homojen nokta dağılımına sahip olduğunu göstermekte olup, grafik içinde verilen AFM görüntüsünden anlaşılmaktadır (Şekil 4.18a). S08 ve S09 kod numaraları ile verilen örneklerin PL spektrumundaki taban enerji seviyelerinin yakın değerlerde olması, her iki örneğin nokta yüksekliğinin yakın ölçelerde olduğunu göstermektedir. Ancak S09 kod numaralı örneğin PL spektrumunda, WL sinyal şiddetinin fazla olması ve QD enerji seviyelerine ait sinyallerin

şiddetinin düşük olması, bu örneğin nokta yoğunluğunun daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca S09 kod numarası ile verilen örneğin QD'lara ait sinyallerin şiddetindeki azalma şu şekilde açıklanmıştır: S09 kod numaralı örnek iki farklı büyüklükte QD'lardan oluşmaktadır. Bu örneğin taban durum enerjisinin sinyali, S08 kod numaralı örneğin sahip olduğu büyüklükteki kuantum noktalardan kaynaklanırken diğer sinyaller farklı büyüklükte olan QD'lardan gelmektedir. Enerji seviyelerine ait sinyallerin şiddetinin düşük olması farklı büyüklükteki noktaların kendi içinde yoğunluğunun çok az olmasından kaynaklanmaktadır. PL ölçüm sonuçlarından elde edilen, örneklerin QD dağılımları hakkında yapılan yorumların desteklenmesi amacıyla AFM tekniğinden yararlanılmıştır. Söz konusu örneklerin AFM görüntüleri Şekil 4.18'de PL grafikleri içinde gösterilmiştir.



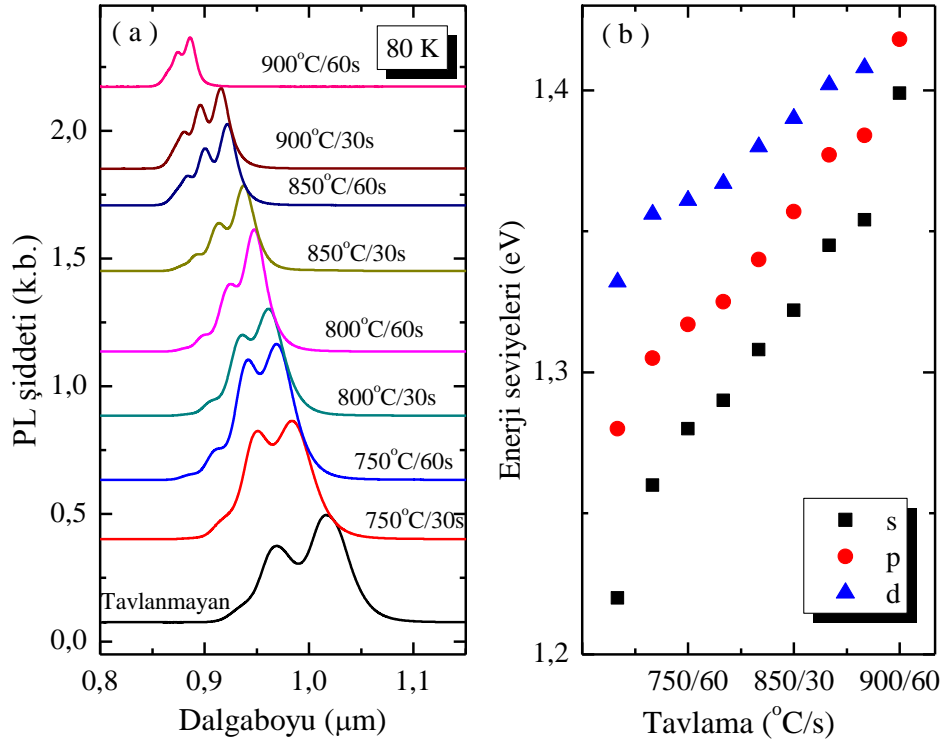
**Şekil 4.18.** (a) S08 ve (b) S09 kod numaralı örneklerin lazer şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumları ile örneklerin  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  alanından alınan AFM görüntüleri

Şekil 4.18'de verilen AFM görüntülerinden S08 kod numaralı örneğin nokta dağılımının düzgün olduğu görülmektedir. S09 kod numaralı örneğin AFM görüntüsü QD yoğunluğunun hem daha az olduğunu hem de farklı büyüklükte noktalar olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar PL ölçüm sonuçlarından yola çıkılarak yapılan yorumları desteklemektedir.

## 4.2. Büyütme Sonrası Tavlama

QD yapıların büyüklüklerini ve dolayısıyla enerji seviyelerinin konumlarını ve arasındaki farkları değiştirebilmek için farklı büyütme koşullarında yeni büyütme yapmak tek koşul değildir. Büyütme sonrasında yapılan tavlama işlemiyle de benzer sonuçlar elde edilebilir: Isıya maruz kalan QD'lerin çaplarında ve yüksekliklerinde değişim olur. Böylece elektronlar için oluşturulan üç boyutta sınırlandırılma durumu değişir. Bu etkiyi görebilmek ve sonuçlarını inceleyebilmek amacıyla örneklerden kesilen küçük parçalar, çabuk ısıl tavlama (Rapid Thermal Annealing, RTA) işlemine tabi tutulmuştur. Farklı sıcaklıklarda ve sürelerde yapılan tavlama etkisi, düşük sıcaklık PL ölçümleri ile incelenmiştir. Yukarıda ayrıntıları verilen S01-S05 kod numaralı QD örnekler üzerinde bu çalışma yapılmış ancak sonuçlar, sadece S03 kod numaralı örnekler üzerinden gösterilmiştir. Seçilen tavlama sıcaklıkları ve süreleri, Şekil 4.19a'da S03 kod numaralı örnek seti için elde edilen PL grafiklerinin üzerinde gösterilmiştir. Kullanılan sıcaklık ve süre değerleri tavlama işlemi yapılan bütün örnek grupları için aynıdır.

Şekil 4.19a'da tavlama sıcaklığının ve süresinin artmasının sonucunda PL spektrumunun daha kısa dalgaboyuna kaydığı, farklı enerji seviyelerinden gelen sinyallerin genişliği ve enerji seviyeleri arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Görülen değişimlerin nedeni, arayüz kısımlarından başlayarak, InAs ve GaAs malzemelerinin ısının etkisiyle birbiri içine geçmesidir. Isının etkisiyle birbiri içine geçen InAs QD ve GaAs bariyer malzemeleri, yüksekliği daha az, taban çapı daha büyük ve sınırlarda InGaAs malzemenin yaratıldığı kuantum noktaların oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda da PL spektrumları daha kısa dalgaboyuna kaymaktadır. Ayrıca ısının etkisiyle In/Ga atomlarının kristal içindeki hareket etmesi sonucunda daha homojen büyüklükte QD dağılımı elde edildiği PL spektrumunda enerji seviyelerine ait sinyallerin genişliğindeki azalmayla görülmektedir. S03 kod numaralı örnek için Şekil 4.19a'da PL spektrumları gösterilen her parçası üzerinde yapılan lazer şiddeti bağımlı PL ölçümlerinin analizleri sonrasında, enerji seviyeleri belirlenmiş ve sonuçları Şekil 4.19b'de gösterilmiştir.

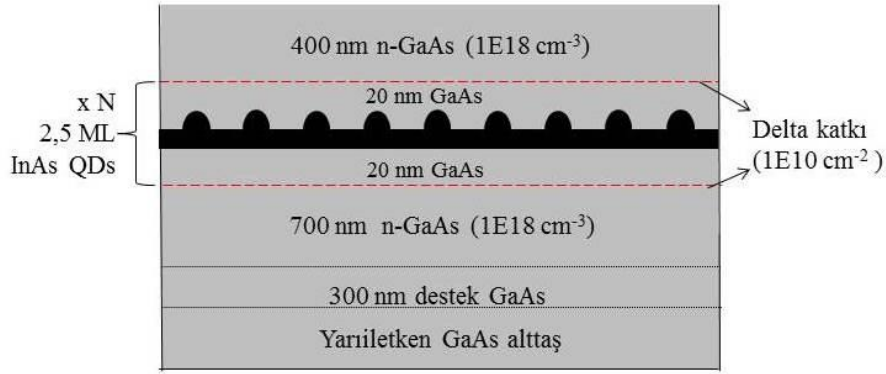


Şekil 4.19. (a) S03 kod numaralı örneğinin farklı sıcaklık ve sürelerde tavlandıktan sonra yapılan 80 K PL grafikleri, (b) tavlamanın etkisiyle enerji seviyelerindeki değişim

## 5. KIZILÖTESİ FOTO-ALGILAYICI YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE OPTO-ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde kızılötesi bölgede algılayıcı olarak çalışması öngörülen kuantum nokta yapıların (QDIP) büyütülmesi ve karakterizasyonlarından bahsedilecektir. QDIP foto-algılayıcı yapının aktif bölgesini oluşturan kuantum nokta katman sayısının değiştirildiği örnekler büyütülmüş ve PL, fototepki ve karanlık akım ölçümleri yapılmıştır. Yapılan karakterizasyon sonucunda, her örneğin farklı teknikler kullanılarak elde edilen sonuçları, hem kendi içinde hem de diğer örneklerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

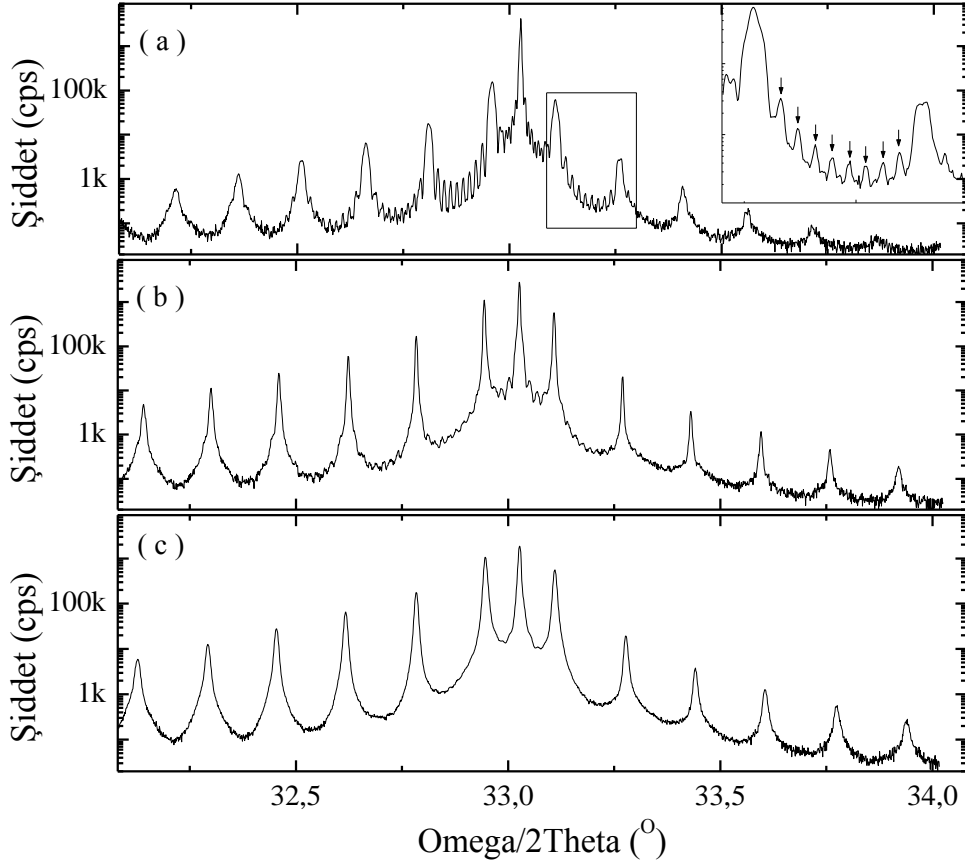
Tez kapsamında kızılötesi algılayıcı olarak çalışması öngörülen ve temel büyütme parametreleri Tablo 3.2’de verilen üç örnek büyütülmüştür. Kuantum nokta katmanlarda kullanılan temel büyütme parametreleri, önceki bölümde detaylı olarak tartışılan tek katman QD yapıların karakterizasyonu sonucu elde edilen bilgiler doğrultusunda belirlenmiştir. Şematik olarak Şekil 5.1’de gösterilen QDIP yapısı ve büyütme parametreleri şu şekilde sıralanabilir:  $\frac{1}{4}$  4 inç GaAs alttaş üzerine 300 nm katkısız destek katmanı 590 °C sıcaklıkta büyütülmüştür. Aynı sıcaklıkta büyütülen  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  seviyesinde Si katkılı 700 nm kalınlığındaki GaAs alt kontak tabakası sonrasında alttaş sıcaklığı 505 °C’ye 20 °C/dk hızla düşürülmüş ve sonraki katmanlar bu sıcaklıkta büyütülmüştür. 5 nm kalınlığında katkısız GaAs ayırıcı tabaka (spacer) ve QDIP yapının çok tabakalı aktif bölgesini takiben  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  seviyesinde Si katkılı 400 nm GaAs üst kontak tabakası büyütülmüştür. QDIP yapının aktif bölgesi 10, 40 ve 80 tekrar 2,5 ML InAs QD katmanından oluşup her bir katman 40 nm GaAs tabakası ile birbirinden ayrılmıştır. Büyütme işlemi boyunca GaAs için 0,5 ML/s, InAs için 0,14 ML/s büyüme oranları kullanılmıştır. Kuantum nokta tabakalarını ayıran GaAs katmalarının tam ortasına 2 s süre ile Si atomları gönderilerek delta katkılama yapılmıştır. Katkı miktarı, kuantum nokta başına 2 (iki) elektron olacak şekilde hedeflenmiştir (kuantum nokta yoğunluğu AFM görüntüleri ile hesaplanmıştır).



Şekil 5.1. Tez kapsamında büyütülen QDIP yapısının şematik gösterimi

QDIP-1 kod numaralı örnek büyütüldükten sonra MBE sisteminde sorunlar yaşanmış ve yapılan büyüme oranı kalibrasyonları değişmiştir. Bu nedenle, QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örnekler, QDIP-1 kod numaralı örneğin büyütülmesinde kullanılan hücre sıcaklıkları, vana açıklığı değerleri ve süreler referans alınarak büyütülmüş ancak farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.2’de bu üç örneğin GaAs (004) simetri eksenini etrafında alınan XRD sallantı eğrileri verilmiştir: Ardışık tepe noktaları (saçaklar) arasındaki açısal fark kullanılarak QDIP-1, QDIP-2 ve QDIP-3 örnekleri için periyot kalınlıkları sırasıyla  $351 \pm 5 \text{ \AA}$ ,  $324 \pm 5 \text{ \AA}$  ve  $321 \pm 4 \text{ \AA}$  olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler, kuantum nokta tabakalar arasındaki GaAs tabakasının hedeflendiği gibi 40 nm ( $400 \text{ \AA}$ ) değil, daha düşük olduğunu yani GaAs büyütme oranının bilinenden daha düşük olduğunu göstermektedir. QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerdeki periyot kalınlıklarının birbirlerine yakın ama QDIP-1 örneğinden daha düşük olması ise, bahsedilen sorun sonrasında büyüme oranının biraz daha düşmüş olduğunu göstermektedir. Ek olarak, özellikle InAs büyüme oranının değişmiş olması QD oluşumunu etkilediğinden örneklerin birbirleriyle karşılaştırılmasında zorluklar yaşanmıştır. Şekil 5.2(a)’da ardışık iki uydu sinyali arası büyütülerek verilen iç grafikte oklarla gösterilen yüksek frekans modülasyonlu sinyaller, toplam aktif bölge kalınlığından kaynaklı kalınlık saçaklarıdır. Ardışık iki uydu sinyali arasında (uydu sinyalleri dâhil) toplam katman sayısı kadar olması gereken bu saçaklar arasındaki açısal fark yapıdaki tekrarlı aktif bölgenin toplam kalınlığına karşılık gelmektedir. Şekilde oklarla gösterilen saçak noktaları kullanılarak

yapılan hesap sonrasında bu toplam kalınlık değeri  $0,351 \pm 0,05 \mu\text{m}$  olarak bulunmuştur. Yukarıda bahsedilen periyot kalınlığı ve toplam periyot sayısı düşünüldüğünde bulunan bu değerin kendi içinde uyumlu olduğu görülmektedir:  $(351 \text{ \AA}) \times (10 \text{ periyot}) = 3510 \text{ \AA} = 0,351 \mu\text{m}$ . Periyot sayısı daha fazla olan örneklerde bu saçaklar arasındaki mesafe azalmakta ve fark edilmesi zorlaşmaktadır.

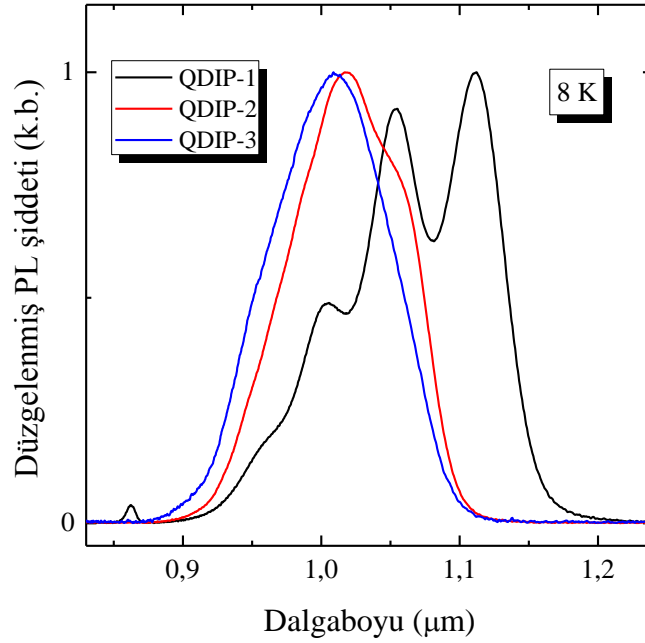


Şekil 5.2. Çok tekrarlı QDIP örneklerinin GaAs (004) simetri ekseninde alınan XRD sallantı eğrileri: (a) QDIP-1, (b) QDIP-2 ve (c) QDIP-3

### 5.1. Kızılötesi Foto-Algılayıcı Yapıların Opto-Elektronik Karakterizasyonu

Kızılötesi foto-algılayıcı yapılarda InAs QD katman sayısı sistematik olarak değiştirilen örneklerin genel davranışlarının anlaşılabilmesi için fotoluminesans, tayfsal fototepki ve karanlık akım ölçümleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

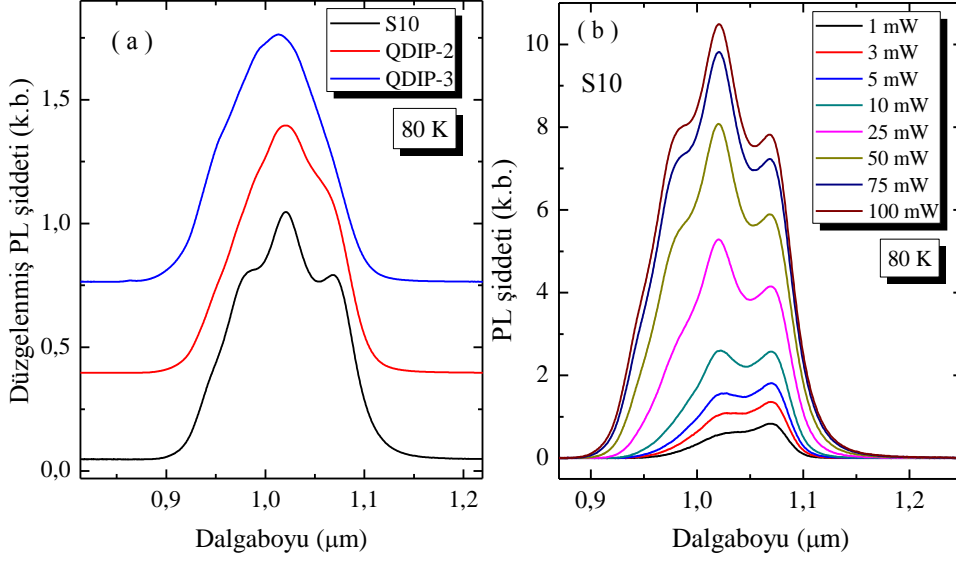
Aktif bölgesi 10, 40 ve 80 tekrar 2,5 ML InAs QD içeren QDIP-1, QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklere ait 80 K PL spektrumları Şekil 5.3’de verilmiştir. QDIP-1 kod numaralı örnek diğerleriyle kıyaslandığında, PL spektrumunun daha uzun dalgaboyunda ve kuantum nokta enerji seviyelerine ait sinyallerin de birbirinden ayrı ve belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum, QDIP-1 örneğindeki kuantum noktaların diğer örneklerdekine kıyasla daha yüksek ve dağılımının daha düzgün olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3. 10 tekrar (QDIP-1), 40 tekrar (QDIP-2) ve 80 tekrar (QDIP-3) foto-algılayıcıların 8 K PL spektrumları

QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerdeki kuantum noktaların büyüklük dağılımlarındaki bu fark, MBE sistemindeki farklı büyüme koşullarından kaynaklanmaktadır. Nokta oluşumundaki bu farkın, çoklu katman yapısından ziyade hassas büyüme koşullarındaki farklılıktan kaynakladığını teyit etmek amacıyla aynı koşullar altında Tablo 4.1’de S10 kod numarası ile verilen tek katman örnek (Şekil 4.2) büyütülmüştür. InAs QD büyüme oranını tam olarak bilinmeden 505 °C’de büyütülen bu örneğin, QDIP yapılar ile aynı koşullar altında alınan, kıyaslamalı (100 mW lazer şiddeti ile) ve uyarma şiddeti bağımlı PL spektrumları Şekil 5.4’de verilmiştir.

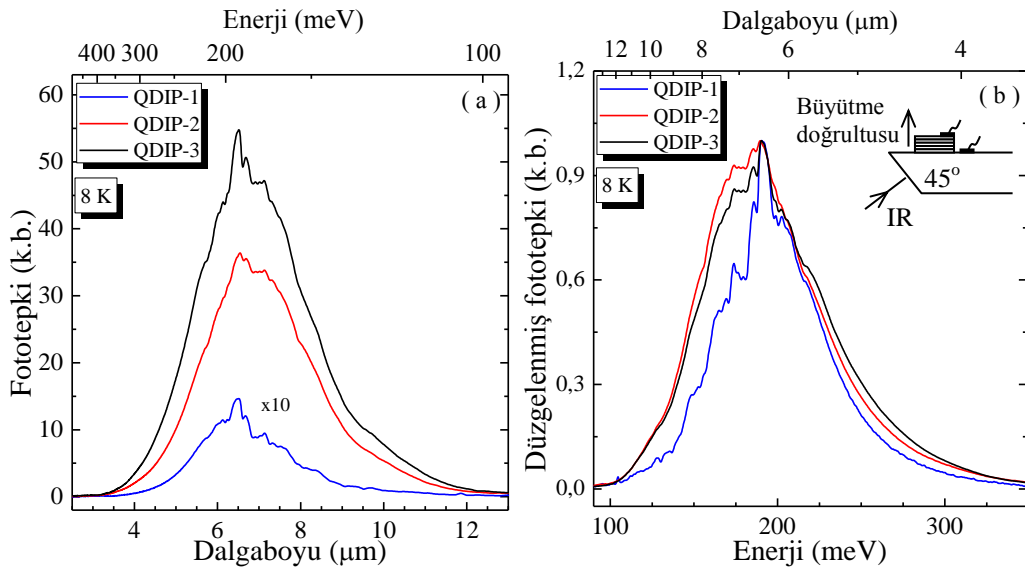




**Şekil 5.4.** InAs büyüme oranının belirsiz olduğu (a) S10, QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerin kıyaslamalı, (b) S10 kod numaralı örneğin uyarma şiddeti bağımlı 80 K PL spektrumları

S10 kod numaralı QD örneğinin PL spektrumunda, kuantum nokta enerji seviyelerinin 10 tekrarlı QDIP-1 örneğindeki kadar net tanımlanamıyor olması, bu örnekteki nokta büyüklük dağılımının yeterince düzgün olmadığını ve büyütme koşullarının yeni dinamiklere göre yeniden ayarlanması gerektiğini göstermektedir. Buna rağmen, elde edilen PL spektrumunun QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerle aynı enerji bölgesinde olması, yeni örneklerin kendi içinde tutarlı ancak MBE büyütme koşullarının QDIP-1 örneğinin büyütüldüğü koşullardan farklı olduğunu göstermektedir. QDIP yapıların PL spektrumlarında InAs katman sayısının artmasıyla QD enerji seviyelerine ait sinyaller birbiri içine geçtiği ve belirginliğinin kaybolduğu görülmektedir. Bunun nedeni, artan katman sayısı ile nokta dağılımındaki düzgünlüğün giderek bozulmasıdır. Bu durum, her tabakadaki düzensizliğin farklılığından ve/veya alt tabakalardaki kuantum noktaların üstteki nokta oluşumunu etkilemesi sonucunda oluşabilmektedir. Örgü uyumsuz malzeme sistemi kullanılmasından dolayı kristal yapının alt katmanlarında oluşan gerilim, daha üst InAs katmanlarına etki etmektedir. Özellikle ince GaAs tabaka kullanılan yapılarda kendini gösteren bu ek gerilimden dolayı QD'ların büyüklüğü dolayısıyla kuantum sınırlama etkisi değişmekte ve oluşan enerji seviyeleri farklılık göstermektedir.

Şekil 5.5’de aygıt haline getirilen (bakınız Bölüm 3) örneklerin tayfsal fototepkileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ölçümler, 8 K sıcaklıkta, 400  $\mu\text{m}$  kenar uzunluğuna sahip kare diyotlardan ve devreye bağlanan yük direnci üzerinden yapılmıştır. Ölçüm koşulları Bölüm 3’de ayrıntılı olarak anlatıldığından burada yeniden bahsedilmeyecektir. Şekil 5.5’de verilen fototepki ölçümlerinde QDIP-1, QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklere sırasıyla 2,5, 2,0 ve 4,0 V yönlendirme voltajı uygulanmıştır. Her örnek için farklı yük direncinin kullanıldığı bu voltaj değerlerinde diyotlar üzerinden geçen akım değerleri ise sırasıyla 0,10 mA, 0,50  $\mu\text{A}$  ve 0,65  $\mu\text{A}$  olarak ölçülmüştür. Kuantum nokta kızılötesi fotodetektörler yüzeye normal doğrultuda gelen ışığa tepki veriyor olmasına rağmen fototepki ölçümleri Şekil 5.5’de şematik olarak gösterilen 45-derece ölçüm geometrisinde yapılmıştır [78, 79].

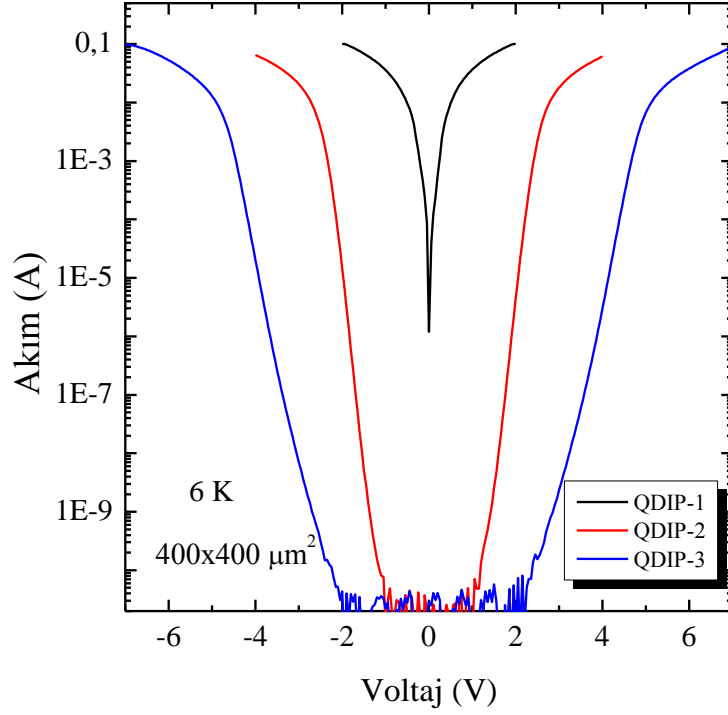


Şekil 5.5. InAs QD katman sayısı 10 (QDIP-1), 40 (QDIP-2) ve 80 (QDIP-3) olan fotoalgılayıcıların 8 K sıcaklıkta alınan (a) kıyaslamalı, (b) düzgelennmiş tayfsal fototepki spektrumları

Benzer koşullar altında alınan ölçüm sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.5), QDIP-1 kod numaralı örneğin fototepkisinin diğer örneklere kıyasla düşük olduğu görülmektedir. Bu durum aktif bölgede bulunan InAs QD katman sayısının daha az olmasından kaynaklanmaktadır. QD katman sayısının artmasıyla kızılötesi ışınımın daha çok soğurulması sağlanmaktadır. Soğurulan kızılötesi ışınım yapı

içinde daha fazla taşıyıcı uyararak daha fazla foto-akım oluşturur. Böylece tepki sinyalinin şiddetinde artma görülmektedir. Şekil 5.5 (b)'de düzelenmiş (normalized) fototepki spektrumları verilmiştir. QDIP-1 kod numaralı örneğin tepki spektrumunun daha dar olduğu, büyük dalgaboyu (küçük enerji) bölgesindeki tepkisinin diğer örneklere kıyasla daha zayıf olduğu görülmektedir. Şekil 5.3'de verilen PL grafikleriyle uyumlu olan bu durum, QDIP-1 kod numaralı örnekteki kuantum noktaların hem daha büyük hem de büyüklük dağılımlarının daha düzgün olmasından kaynaklanmaktadır. Daha küçük noktalara sahip olan QDIP-2 ve QDIP-3 örneklerinde, üst enerji seviyelerinden nokta içindeki elektronların dışarıya çıkartılabilmeleri daha düşük enerjili fotonlar yardımıyla olabilirken, QDIP-1 örneği daha büyük enerjili fotonlara ihtiyaç duymaktadır.

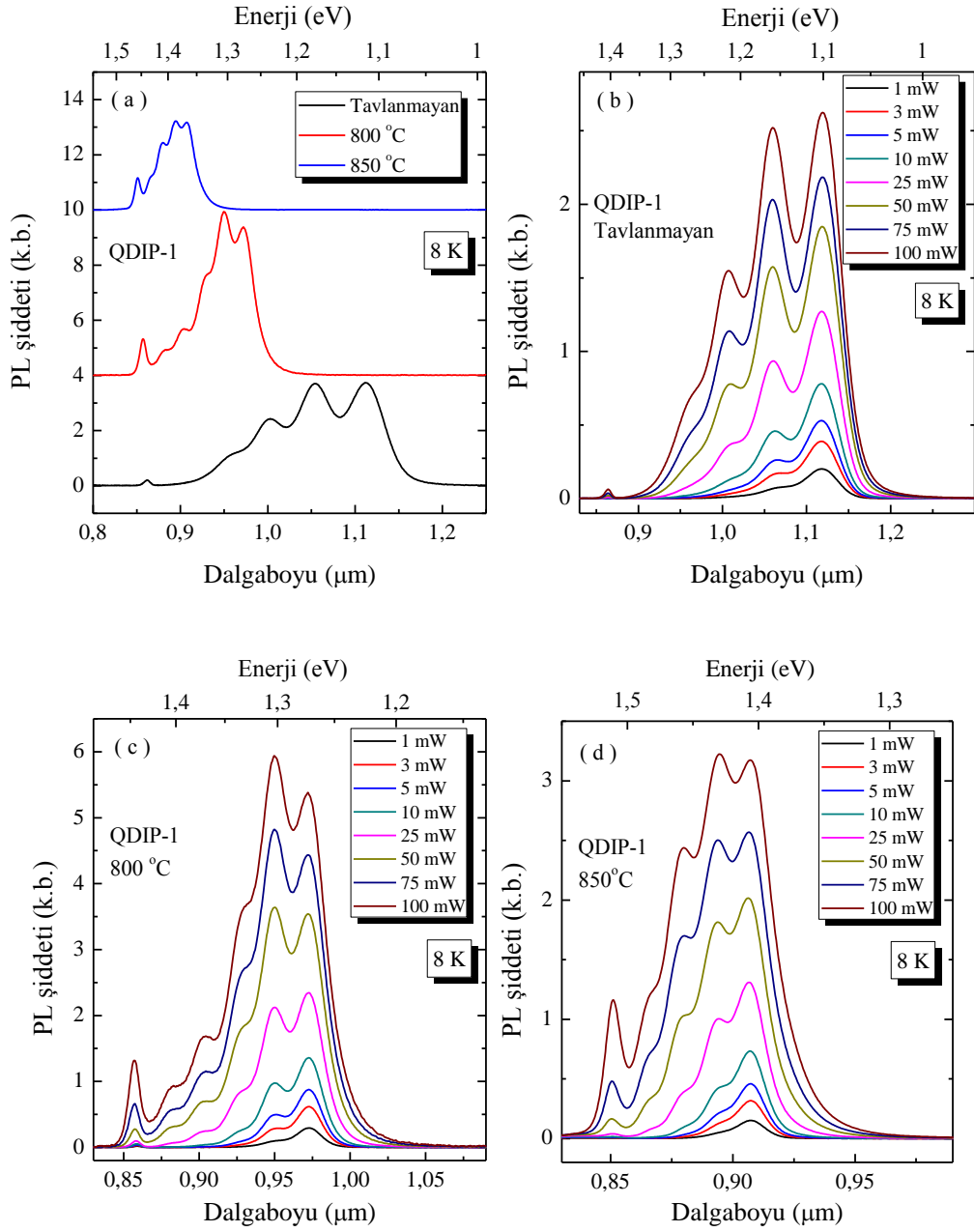
Örneklerin 6 K'deki karanlık akım karakteristikleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Aktif bölgenin içerdiği kuantum nokta katman sayısının artması, karanlık akımı önemli derecede azaltmıştır. QDIP-1 kod numarası ile verilen ve InAs QD katman sayısının 10 olduğu aygıt üzerindeki karanlık akımın yüksek olması, aygıtın fototepki spektrumunda sinyal-gürültü oranının düşük olmasına neden olmuştur. Şekil 5.6'da QDIP-2 ve QDIP-3 örneklerinde 60 pA akım seviyesinin altında görünen düzensizlikler, ölçüm düzeneğinin elektriksel gürültü sınırına karşılık gelmektedir.



Şekil 5.6. InAs QD aktif katman sayısı 10 (QDIP-1), 40 (QDIP-2) ve 80 (QDIP-3) olan fotoalgılayıcıların 6 K sıcaklığında alınan karanlık akım ölçümleri K sıcaklığında alınan karanlık akım ölçümleri

## 5.2. Kızılötesi Foto-Algılayıcıların Tayfsal Tepki Bölgesinin Ayarlanması

QD yapıların büyüklüklerini ve dolayısıyla enerji seviyelerinin konumlarını ve arasındaki farkları değiştirebilmek için farklı büyütme koşullarında yeni büyütme yapmanın tek koşul olmadığından Bölüm 4.1.5’de bahsedilmişti. Tez kapsamında büyütülen QDIP örneklerin algılama bölgesinde ayarlama yapabilmek için örneklerden kesilen küçük parçalar, çabuk ısıl tavlama (Rapid Thermal Annealing, RTA) işlemine tabi tutulmuşlardır. Büyütme sonrasındaki ısıl işlemin fotodetektör özelliklerine etkisini görebilmek için örnekler 800 ve 850 °C’de azot gazı altında 1 dk süreyle tavllanmışlardır. Tavlanan QDIP-1, QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerin kendi içlerinde karşılaştırmalı ve uyarma lazeri şiddeti bağımlı düşük sıcaklık (8 K) PL spektrumları sırasıyla Şekil 5.7, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da gösterilmiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça bütün örneklerden alınan PL sinyalleri beklendiği gibi küçük dalgaboyu (büyük enerji) bölgesine doğru kaymış ve görünen enerji seviyeleri arasındaki fark da azalmıştır.

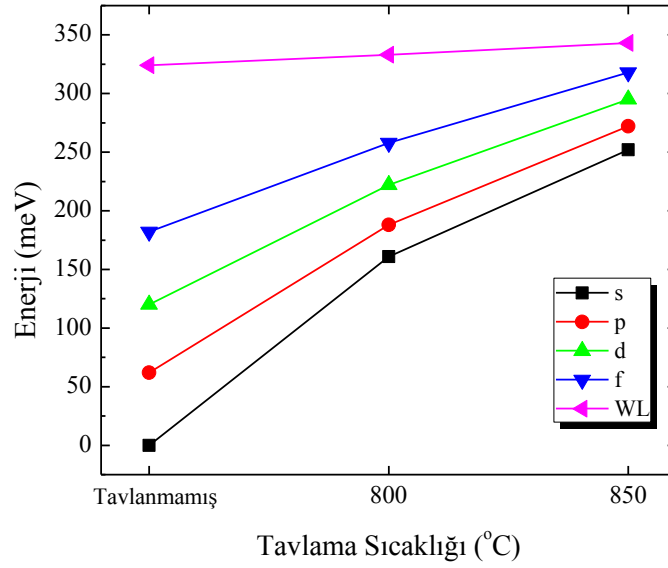


Şekil 5.7. 10 tekrar InAs QD aktif katman içeren QDIP-1örneğinin (a) tavlınmayan ve iki farklı sıcaklıkta tavlınan parçaların kıyaslamalı PL spektrumları. (b), (c) ve (d) sırasıyla tavlınmayan, 800 °C’de 1 dk ve 850 °C 1 dk tavlınan parçaların lazer şiddeti bağımlı PL spektrumları

Enerji seviyelerinin belirgin olarak görüldüğü 10 tekrarlı QDIP-1 kod numaralı örnekte tavlamanın etkisini gösteren analiz sonuçları Tablo 5.1’de verilerek enerji seviyelerinin değişimi Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.1.** QDIP-1 kod numaralı örneğe ait tavlınmayan ve tavlınan parçaların 8 K PL spektrumundan elde edilen enerji seviyeleri

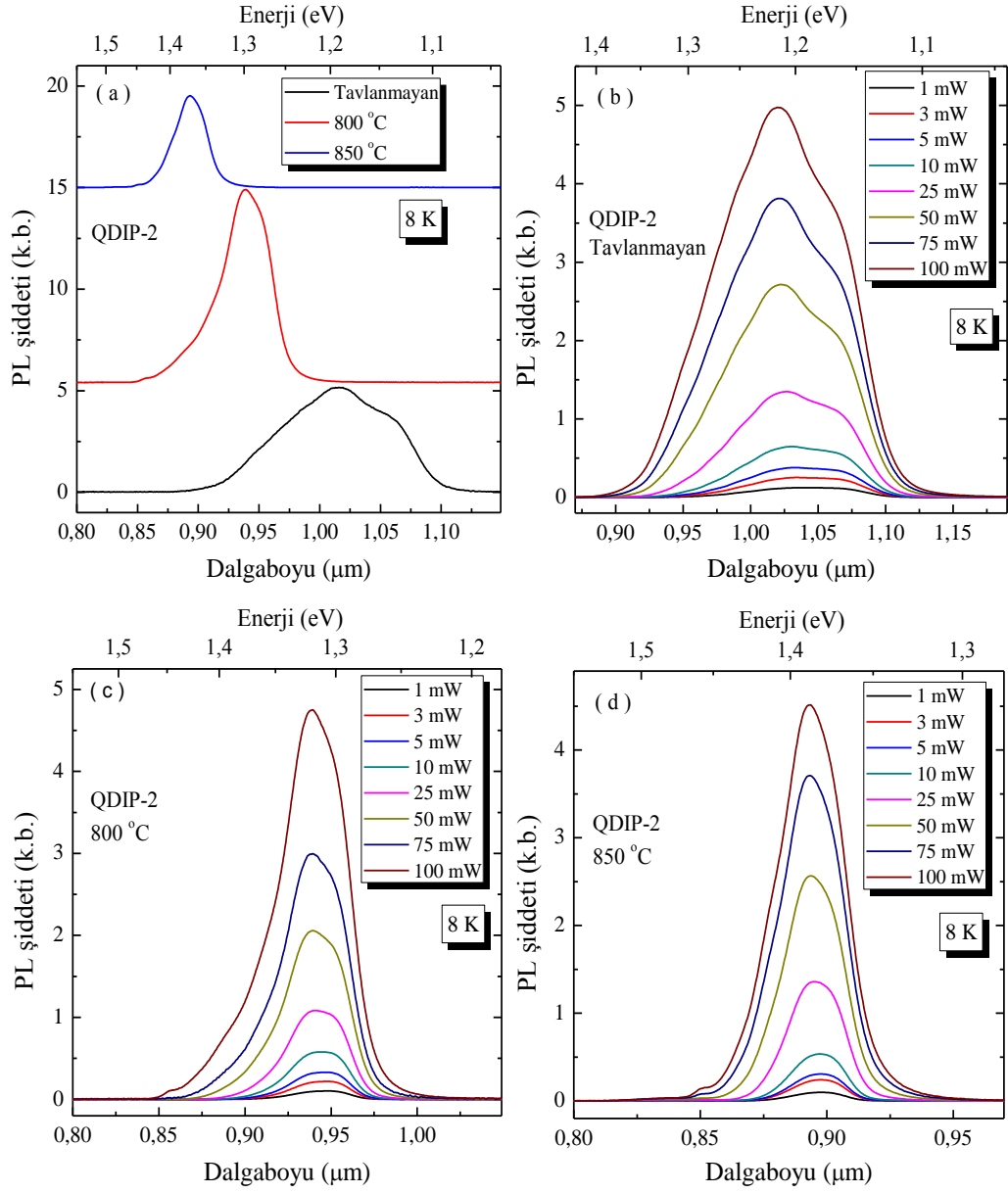
QDIP-1	Enerji seviyeleri (eV)				
	s	p	d	f	WL
Tavlınmayan	1,114	1,176	1,234	1,296	1,438
800 °C	1,275	1,302	1,336	1,372	1,447
850 °C	1,366	1,386	1,409	1,432	1,457



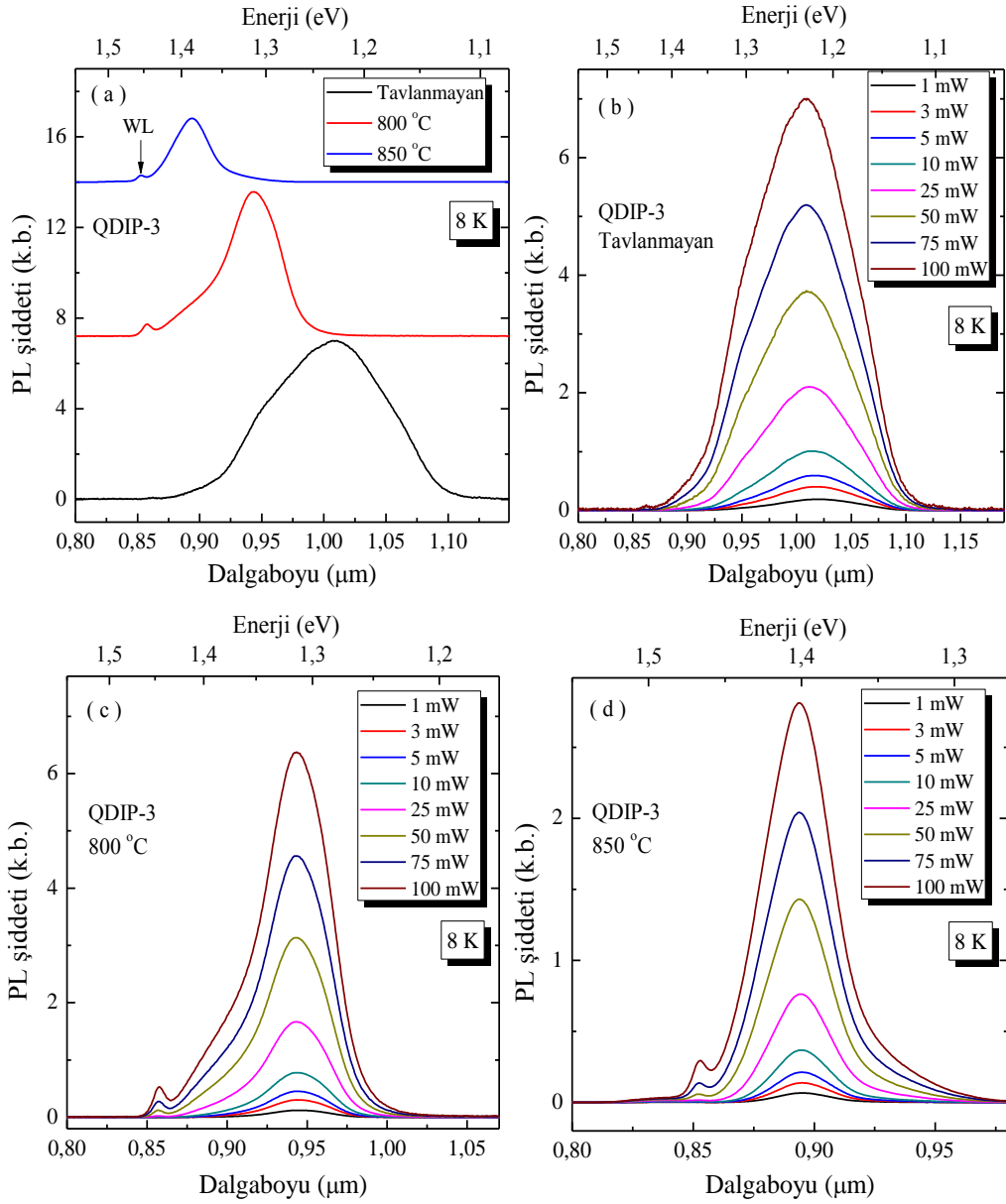
**Şekil 5.8.** QDIP-1 kod numaralı örnekte tavlamanın etkisiyle enerji seviyelerinin değişimi

Şekil 5.8’de QDIP-1 kod numaralı örneğin tavlınmayan ve tavlınan parçalarının PL spektrumlarından elde edilen QD enerji seviyelerinin değişimi verilmiştir. Tavlınmayan parçanın s enerji durumu sıfır “0” kabul edilip diğer enerji durumları, s durumu ile aralarındaki farklar göz önüne alınarak konumlandırılmıştır. Tavlama sıcaklığının artmasıyla enerji seviyeleri ilk durumlarından uzaklaşırken (daha büyük enerjilere kayarken) aynı zamanda enerji seviyelerinin arasındaki farklar da azalmaktadır. Bu durumun nedeni daha önceki bölümlerde açıklandığı için burada yeniden açıklanmayacaktır (Bakınız Bölüm 4.1.5)

Düşük sıcaklık PL sonuçları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilen QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerde enerji seviyeleri ayırımı kesin olarak yapılamadığı için benzer analizler adı geçen örneklerde yapılamamıştır.



**Şekil 5.9.** 40 tekrar InAs QD aktif katman içeren QDIP-2örneğinin (a) tavlınmayan ve iki farklı sıcaklıkta tavlınan parçaların kıyaslamalı PL spektrumları. (b), (c) ve (d) sırasıyla tavlınmayan, 800 °C'de 1 dk ve 850 °C 1 dk tavlınan parçaların lazer şiddeti bağımlı PL spektrumları



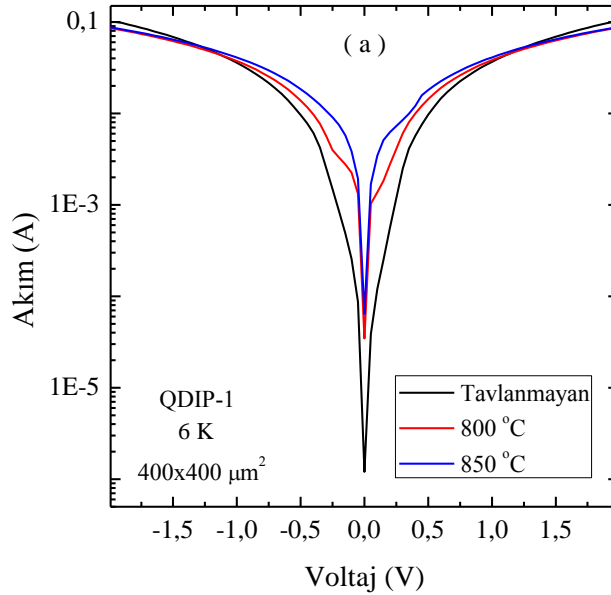
**Şekil 5.10.** 80 tekrar InAs QD aktif katman içeren QDIP-3örneğinin (a) tavlınmayan ve iki farklı sıcaklıkta tavlınan parçaların kıyaslamalı PL spektrumları. (b), (c) ve (d) sırasıyla tavlınmayan, 800 °C’de 1 dk ve 850 °C 1 dk tavlınan parçaların lazer şiddeti bağımlı PL spektrumları

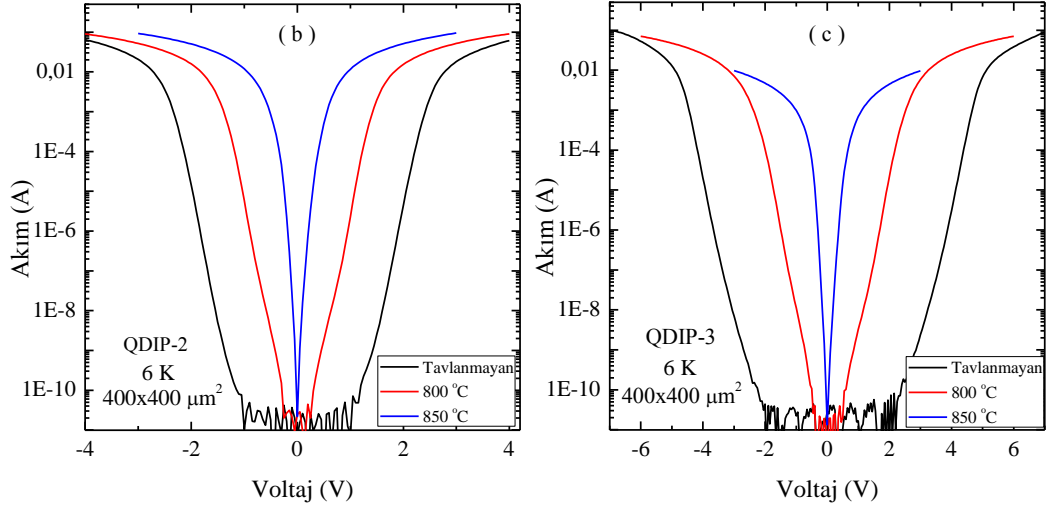
PL ölçümlerinden alınan bilgiler doğrultusunda, QDIP yapılarından kesilen yeni parçalar aynı koşullar altında (800 °C ve 850 °C’de azot gazı altında 1 dk süreyle) tavlandıktan sonra aygıt fabrikasyon işlemleri yapılmıştır. Fabrikasyonu yapılan aygıtlar paketlenmiş ve tek piksel foto-diyotların genel davranışlarının anlaşılabilmesi için düşük sıcaklık karanlık akım ve tayfsal fototepki ölçümleri



yapılmıştır. Sonuçları verilen ölçümler,  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  büyüklüğündeki diyotlar kullanılarak elde edilmiştir.

QDIP yapılı örneklerin tavlanan ve tavlansınayan parçalarından üretilen fotodiyotların düşük sıcaklık (~6 K) karanlık akım davranışları kıyaslamalı olarak Şekil 5.11'de verilmiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça, diyot üzerinden geçen ve aynı voltaj değerine karşılık gelen akım miktarının özellikle QDIP-2 ve QDIP-3 örnekleri için önemli derecede ( $10^5$ - $10^6$  kat) arttığı görülmektedir. Bu durum, kuantum noktaların iletkenlik bandındaki sınırlamanın etkisinin azalması sonucunda taşıyıcıların yapı içinde daha rahat akmasından ve sıcaklığın yapı içindeki muhtemel kusur mekanizmaları üzerindeki rastgele etkisinden kaynaklanmaktadır. QDIP-1 kod numaralı örnekte, tavlamanın etkisiyle akım miktarındaki artışın diğer örneklerde olduğu kadar etkin olmamasının nedeni ise, bu örneğin tavlansınamış durumunda bile yüksek karanlık akım değerine sahip olmasıdır. Yüksek karanlık akım değerleri, bu örneğin tavlansınmış olanlarının fototepki ölçümlerinde sinyal alınamamasına sebep olmuştur. Şekil 5.11'de verilen grafiklerde 60 pA akım seviyesinin altında görünen düzensizlikler, ölçüm düzeneğinin elektriksel gürültü sınırına karşılık gelmektedir.



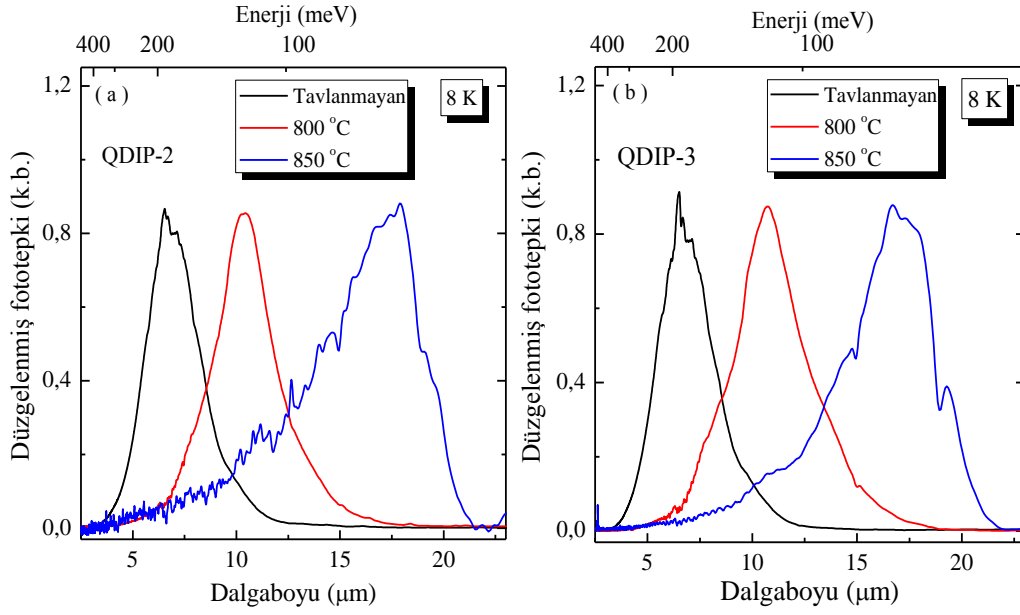


**Şekil 5.11.** (a) QDIP-1, (b) QDIP-2 ve (c) QDIP-3 kod numaralı örneklerin tavlanmayan ve iki farklı sıcaklıkta tavlanan parçalarından üretilen fotodiyotların akım-voltaj eğrileri

QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaraları ile verilen kuantum nokta yapıların tavlanan ve tavlanmayan parçalarından üretilen fotodiyotların kıyaslamalı fototepki spektrumları Şekil 5.12’de verilmiştir. Ölçümlerde yük direnci üzerinden uygulanan voltaj ve yapı üzerinden geçen akım değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Tavlama sıcaklığının artmasıyla fototepki spektrumunun daha büyük dalgaboylarına doğru (küçük enerji bölgesi) kaydığı ve eş zamanlı olarak da sinyaldeki şiddette azalma olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.2.** QDIP-2 ve QDIP-3 kod numaralı örneklerden üretilen foto-diyotların fototepki ölçümlerinde kullanılan voltaj ve diyot üzerinden okunan akım değerleri

Örnek kodu		Diyota uygulanan voltaj (V)	Diyot üzerinden geçen akım ( $\mu\text{A}$ )
QDIP-2	Tavlanmayan	2,0	0,5
	800 °C/1dk	2,0	1,0
	850 °C/1dk	1,0	10
QDIP-3	Tavlanmayan	4,0	0,65
	800 °C/1dk	3,0	0,23
	850 °C/1dk	2,0	2,0

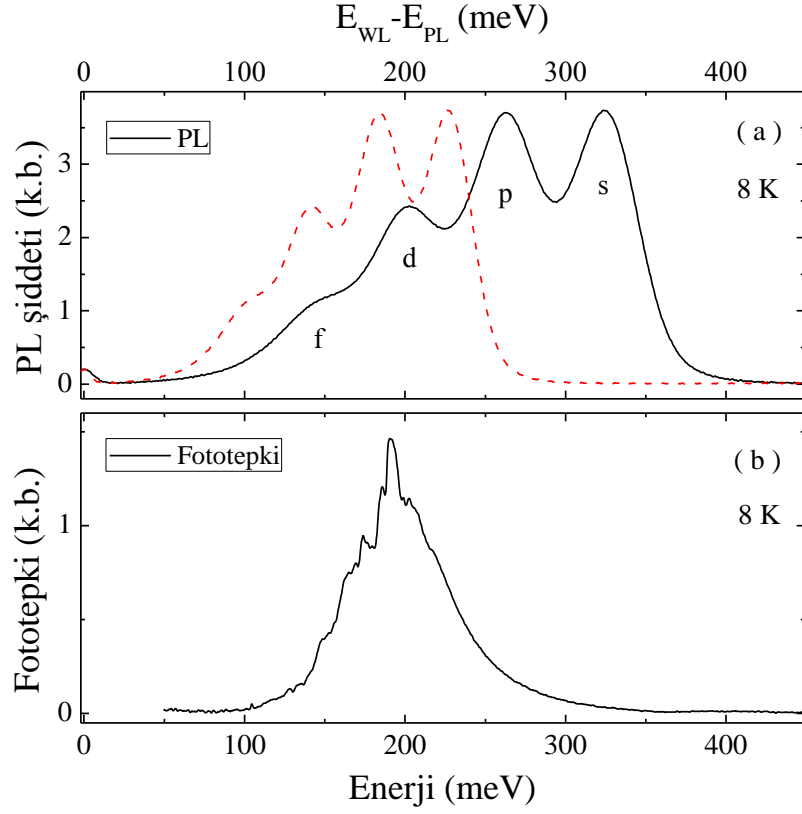


**Şekil 5.12.** (a) QDIP-2 ve (b) QDIP-3 kod numaralı örneklerin tavlınmayan ve iki farklı sıcaklıkta tavlanan parçalarından üretilen foto-diyotların fototepki spektrumları

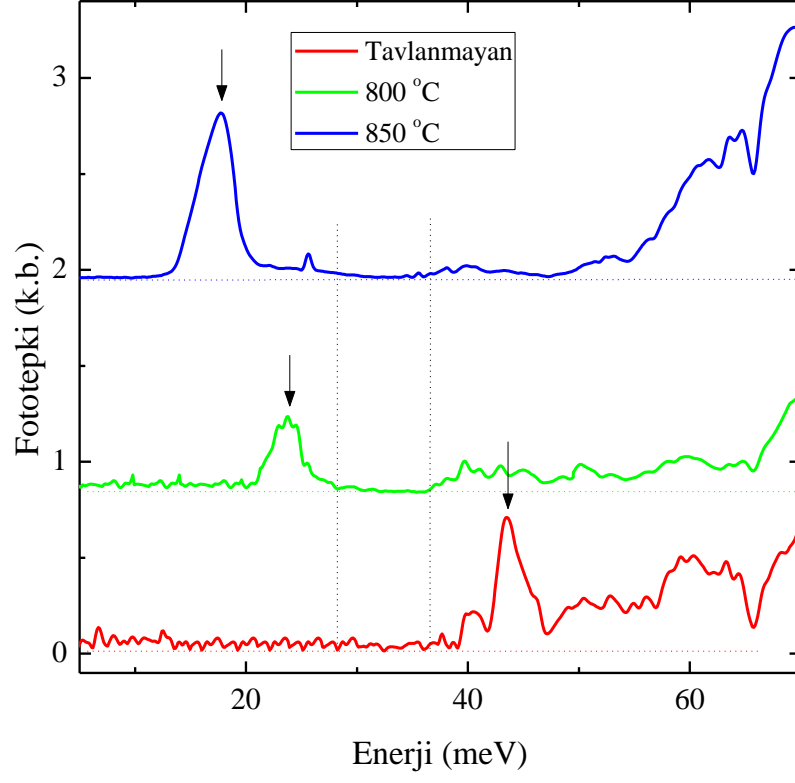
QDIP-1 kod numaralı örneğin tavlınmayan parçasından üretilen fotodiyotun düşük sıcaklıkta alınan PL ve fototepki spektrumları Şekil 5.13’de kıyaslamalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi ve fototepki sinyalinin hangi temel enerji seviyelerinden geldiğinin anlaşılabilmesi için PL spektrumundaki enerjiler, WL enerjisi referans alınarak çizilmiştir. Bulunan bu enerjiler hem iletkenlik hem değerlik bandı enerji seviyeleri arasındaki farkı da içermektedir. Fototepki sinyaline sebep olan iletkenlik bandı enerjileri bu değerlerin %70’ine karşılık gelmektedir [78, 79]. PL sinyalinin iletkenlik bandındaki bu enerji değerleri kırmızı kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Şekil 5.13a’da verilen PL spektrumunda, taban enerji seviyesi ve WL arasındaki enerji farkı  $\sim 324$  meV olarak belirlenmiştir. Bu değer’in %70’ine karşılık gelen  $\sim 226$  meV, Şekil 5.13b’de gösterilen fototepki tepki spektrumunda görünen  $\sim 231$  meV değeriyle uyumludur. Buradan QDIP-1 kod numaralı örnek için temel fototepki sinyalinin kuantum nokta içindeki s ve p enerji seviyelerinden geldiği anlaşılmaktadır.

Son olarak QDIP yapıların tavlınmayan ve tavlınan parçalarından üretilen fotodiyotların, FIR bölgedeki algılama kabiliyetleri test edilmiştir. QDIP-3 kod numaralı örneğin FIR bölgedeki tayfsal fototepki ölçümleri Şekil 5.14’de verilmiştir. Tavlama sıcaklığı arttıkça tepki spektrumunun daha küçük enerjilere

kaydığı görülmektedir. ~28-37 meV aralığındaki bölge, fonon soğurmalarının gerekleŖtiđi bölge olarak bilinmektedir. 800 °C’de tavlanan fotodiyotun tepki spektrumunun bir kısmının bu bölge içinde kaldığı için görülemediği dŖnlmektedir.



**Ŗekil 5. 13.** QDIP-1 kod numaralı örneğin dŖk sıcaklık (8 K) (a) PL ve (b) tayfsal fototepki ölçümlerinin karŖılaŖtırılması. PL spektrumunda enerjiler, WL enerjisi referans alınarak izilmiŖ ve bu enerjilerin %70’ine karŖılık gelen iletkenlik bandındaki enerji değerleri kırmızı kesikli çizgiyle gsterilmiŖtir



Şekil 5.14. QDIP-3 kod numaralı örneğin tavlanmayan ve tavlanan parçalarına ait FIR bölgedeki fototepki spektrumları

## 6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, InAs/GaAs malzeme sistemi ile tek katman ve çok katman kendiliğinden oluşan kuantum nokta yapılar epitaksiyel olarak büyütülmüş, yapısal ve opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır.

InAs büyüme oranı belirlendikten sonra büyüme koşullarının sistematik olarak değiştirildiği tek katman QD örnekler büyütülmüştür. Örnekler grup halinde büyütülmüş, her grup içinde sadece bir parametre değiştirilmiş ve diğer bütün parametreler sabit tutulmuştur. Tek katman örneklerin karakterizasyon sonuçlarından elde edilen bilgiler doğrultusunda kızılötesi olarak çalışan çok katmanlı yapılar büyütülmüş, aygıt haline getirilmiş, yapısal ve opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır.

Farklı InAs malzeme miktarı ile aynı koşullar altında 3 (üç) adet örnek büyütülmüş, malzeme miktarı arttıkça, PL spektrumundaki enerji seviyelerine ait sinyaller birbirinden ayrılarak daha iyi tanımlandığı görülmüştür. Malzeme miktarı arttıkça “s” enerji seviyesinin PL sinyalinin FWHM değerinde azalma görülmüş, bu değer azalmasının düzgün nokta dağılımından kaynaklandığı anlaşılmıştır. PL ölçümleri ile elde edilen bu sonuçlar AFM ve SEM görüntülerinin alınmasıyla desteklenmiştir. AFM ve SEM görüntüleri yardımıyla, malzeme miktarı arttıkça nokta dağılımındaki homojenliğin ve nokta yoğunluğunun arttırdığı görülmüştür. Ayrıca malzeme miktarındaki artış, kalınlık artışı nedeniyle ıslanma tabakasındaki kuantum sınırlamanın etkisini azalttığı için WL sinyalini daha büyük dalgaboyuna doğru kaydıracağı PL ölçümleri ile görülmüştür.

HRTEM tekniğinin kullanılmasıyla gömülü QD’lar ile yüzey QD’larının büyüme doğrultusunda ve düzlemsel doğrultuda gösterdiği büyüklük farklılığı görüntülenmiştir. Yüzey QD’ları yaklaşık 20 nm çap ve 10 nm yükseklikte kubbe şeklinde görüntülenirken, gömülü QD’lar yüzeyde olanlardan daha küçük olduğu görülmüştür. Yüzey ve gömülü QD’ların düzlemsel doğrultudaki büyüklükleri yaklaşık olarak aynı boyutlarda olmasına karşın, gömülü QD’ların yüksekliklerinde belirgin şekilde azalma gözlenmiştir. Yükseklikteki azalma ile daha yassı kubbe (disk benzeri) şeklinde olan QD’ların yükseklikleri yaklaşık 5 nm olarak belirlenmiştir.

Farklı büyüklükte alttaşlar üzerine büyütme sıcaklığının artırıldığı iki grup örnek büyütülmüş her iki grup içinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Büyütme sıcaklığı arttıkça QD enerji seviyelerine ait sinyallerin birbirinden ayrıldığı görülmüştür. Ayrıca büyütme sıcaklığının artışı ile QD enerji seviyelerine ait sinyallerin küçük enerji bölgesine doğru kaydığı gözlenmiştir. PL ölçümlerini doğrulamak amacıyla QD'ların AFM ve SEM görüntüleri alınmış, görüntüler yardımıyla, büyütme sıcaklığının artması ile nokta yoğunluğunun azaldığı, nokta büyüklüğünün ise arttığı görülmüştür.

Büyüme oranının artmasıyla, QD'ların PL spektrumunda enerji seviyelerine ait sinyallerin birbiri içine geçtiği ve daha geniş PL spektrumlarına sahip oldukları görülmüştür. Yapılan ölçümlerden yola çıkılarak bu durumun düzgün olmayan nokta dağılımından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Değiştirilen büyüme oranı ile farklı büyüklükte alttaş üzerine QD yapılar büyütülmüş ancak yapılan PL ölçümleri ile alttaş büyüklüğünün etkisinin ihmal edilebilir derecede az olduğu görülmüştür.

Tek katman örneklerde yapılan tavlama işleminde tavlama sıcaklığının ve süresinin artmasının sonucunda, PL spektrumunun daha kısa dalgaboyu (büyük enerjilere) bölgesine doğru kaydığı, farklı enerji seviyelerinden gelen sinyallerin genişliği ve enerji seviyeleri arasındaki farkın azaldığı görülmüştür. PL spektrumunun daha kısa dalgaboyuna kaymasının, arayüz kısımlarından başlayarak, InAs ve GaAs malzemelerinin ısının etkisiyle birbiri içine geçmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ayrıca PL spektrumunda enerji seviyelerine ait sinyallerin genişliğindeki azalmanın, ısının etkisiyle daha homojen QD dağılımına neden olduğu görülmüştür.

Kızılötesi foto-algılayıcı yapılarda InAs QD katman sayısı sistematik olarak değiştirilen örneklerin genel davranışlarının anlaşılabilmesi için fotoluminesans, tayfsal fototepki ve karanlık akım ölçümleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

QDIP yapılarda, aktif bölgede bulunan InAs QD katman sayısının artmasıyla, kızılötesi ışınımın daha çok soğurulması sayesinde tepki sinyalinin şiddetinde artma, karanlık akım da ise önemli derecede azalma görülmüştür. InAs QD katman sayısının 10 olduğu aygıt üzerindeki karanlık akımın yüksek olması, aygıtın fototepki spektrumunda sinyal-gürültü oranının düşük olmasına neden olduğu anlaşılmıştır.

QDIP örneklerin algılama bölgesinde ayarlama yapabilmek için tavlanan örneklerde, tavlama sıcaklığı arttıkça PL sinyallerinin küçük dalgaboyu (büyük enerji) bölgesine doğru kaydığı ve görünen enerji seviyeleri arasındaki farkların azaldığı görülmüştür. QDIP yapılı örneklerin tavlanan ve tavlansayan parçalarından üretilen fotodiyotların düşük sıcaklık (~6 K) karanlık akım davranışları kıyaslamalı olarak incelenmiş, tavlama sıcaklığı arttıkça, diyot üzerinden geçen ve aynı voltaj değerine karşılık gelen akım miktarının önemli derecede ( $10^5$ - $10^6$  kat) arttığı görülmüştür. InAs QD katman sayısının 10 olduğu yapının tavlanan parçalarından üretilen fotodiyotlardan tepki sinyali alınamamıştır. Bunun nedeni söz konusu QDIP yapının tavlansamamış durumunda bile yüksek karanlık akım değerine sahip olmasıdır. Aktif bölgede bulunan InAs QD katman sayısının 40 ve 80 olduğu QDIP yapıların, tavlanan parçalarından üretilen diyotlarda, tavlama sıcaklığının artmasıyla fototepki spektrumunun daha büyük dalgaboylarına doğru (küçük enerji bölgesi) kaydığı ve eş zamanlı olarak da sinyaldeki şiddette azalma olduğu görülmüştür.

QDIP yapılardan üretilen bütün aygıtların FIR bölgede algılama yapabilirlikleri test edilmiş ancak söz konusu bölgede daha tutarlı açıklama yapabilmek için daha detaylı çalışılmaların yapılması gerekliliği görülmüştür.



## KAYNAKLAR

- [1] Rogalski, A., *Infrared Detectors*, CRC press, USA, 2011.
- [2] Schneider, H., Liu, H. C., *Quantum Well Infrared Photodetectors*, Springer, New York, 2006.
- [3] Schneider, H., Maier, T., Fleissner, J., Walther, M., Koidl, P., Weimann, G., Cabanski, W., Finck, M., Menger, P., Rode, W., Zeigler, J., “Dual-band QWIP focal plane array for the second and third atmospheric windows” *Infrared Phys. Techn.* **47**, 53-58, 2005.
- [4] McQuiston, B., Cho, E., Lim, W., Rafol, R., Gunapala, S. D, Bandara, S. V., Liu, J. K., “QWIP Chip Dual-Color and Multi-Color FPA’s for Military Applications” *Proc. SPIE*, **5612**, 51, 2004.
- [5] Rogalski, A., “Infrared detectors: status and trends” *Prog. Quant. Electron.* **27**, 59-210, 2003.
- [6] Zhang, H. “*Multilayer InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with high quantum efficiency*”, Yüksek lisans tezi, Southeast University, China, 2007.
- [7] Stiff, A. D., Krishna, S., Bhattacharya, P., Kennerly, S., “High-detectivity, normal-incidence, mid-infrared ( $\lambda$  4 $\mu$ m) InAs/GaAs quantum-dot detector operating at 150 K” *Appl. Phys. Lett.* **79**, 421, 2001.
- [8] Krishna, S., Raghavan, S., Winckel, G., Rotella, P., Stintz, A., Morath C. P., Le, D., Kennerly, S. “Two color InAs/InGaAs dots-in-a-well detector with background-limited performance at 91 K” *Appl. Phys. Lett.* **82**, 2574, 2003.
- [9] Kim, J. W. Oh, J. E., Hong, S. C., Park, C. H., Yoo, T. K., “Room Temperature Far Infrared (8-10  $\mu$ m) Photodetectors Using Self-Assembled InAs Quantum Dots with High Detectivity” *IEEE Electron Device Lett.* **21**, 7, 2000.
- [10] Stiff-Roberts, A. D., Su, X. H., Chakrabarti, S., Bhattacharya, P., “Contribution of Field-Assisted Tunneling Emission to Dark Current in InAs–GaAs Quantum Dot Infrared Photodetectors” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, 3, 2004.
- [11] Chakrabarti, S., Stiff-Roberts, A. D., Su, X. H., Bhattacharya, P., Ariyawansa, G., Perera, A. G. U., “High-performance mid-infrared quantum dot infrared photodetectors” *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 2135–2141, 2005.



- [12] Zhengmao, Y., Campbell, J. C., Zhonghui, C., Kim, E. T., Anupam, M., “Voltage-controllable multiwavelength InAs quantum-dot infrared photodetectors for mid- and far-infrared detection” *J. Appl. Phys.* **92**, 4141, 2002.
- [13] Aslan, B., Liu, H. C., Korkusinski, M., Cheng, S. J., Hawrylak, P., “Response spectra from mid- to far-infrared, polarization behaviors, and effects of electron numbers in quantum-dot photodetectors” *Appl. Phys. Lett.* **82**, 630, 2003.
- [14] Asona, T., “*Growth control and design principles of self-assembled quantum dot multiple layer structures for photodetector applications*” Doktora Tezi, University of Southern California, material science, USA, 2010.
- [15] Razaghi, M., *Fundamentals of Solid State Engineering*, Kluwer Academic, 2002.
- [16] Hinzer, K., “*Optical Properties of GaAs-based Self-Assembled Quantum Dots and Quantum Dot Laser*” Doktora Tezi, University of Ottawa, Ottawa-Carleton Institute for Physics, Ottawa, Canada, 2001.
- [17] Kasap, S., Capper, P., *Handbook of Electronic Materials*, Springer, New York, USA, 2006.
- [18] Bastiman, F., “*In Situ Surface Studies of III-V Semiconductor Compounds*” Doktora Tezi, University of Sheffield, U. K. 2010.
- [19] Adachi, S., *Properties of Group IV, III-V and II-VI Semiconductors*, Wiley, England, 2005.
- [20] Kim, D., “*Deterministic Control of the Quantum Properties of Single InAs Artificial Atoms with InP Nanoscale Architectures*” Doktora Tezi, Material Science and Engineering, University of Toronto, Toronto Canada, 2007.
- [21] Ye, Z., “*Design, Fabrication and Characterization of Quantum Dot Infrared Photodetectors*” Doktora Tezi, University of Austin, ABD, 2003.
- [22] Liu, H. C., “Quantum Dot Infrared Photodetector” *Opto-Electron Rev.* **11**, 1-5, 2003.
- [23] Steiner, T., *Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Application*, Artech House, USA, 2004.
- [24] Asano, T., “*Growth Control and Design Principles of Self-Assembled Quantum Dot Multiple Layer Structures for Photodetector Application*”

Doktora Tezi, Material Science, University of Southern California, ABD, 2010.

- [25] Schafer, F., Reithmaier, J. P. Forchel, A., “High-performance GaInAs/GaAs quantum dot lasers based on a single active layer” *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2915, 1999.
- [26] Xu, Z., Zhang, Y. Hvam, M. J., “long luminescence lifetime in self assembled InGaAs/GaAs quantum dots at room temperature” *Appl. Phys. Lett.* **93**, 183116, 2008.
- [27] Mazur, Y. I., Liang, B. L., Wang, Z. M., Tarasov, G. G. “Guzun, D., development of continuum states in photoluminescence of self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots” *J. Appl. Phys.* **101**, 014301, 2007.
- [28] Ustinov, V. M., Maleev, N. A., Zhukov, A. E., Kovsh, A. R., Egorov, A. Y., Lunev, A. V., Volovik, B. V., Krestnikov, I. L., Musikhin, Y. G., Bert, N. A., Kop’ev, P. S., Alferov, I. Z., Ledentsov, N. N. Bimberg, D., “InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1,3  $\mu\text{m}$ ”, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2815, 1999.
- [29] Hsu, T. M., Chang, W. H., Huang, C. C., Yeh, N. T. Chyi, J. I., “quantum confined stark shift electroreflectance of InAs/InGaAs self-assembled quantum dots” *Appl. Phys. Lett.* **78**, 1760, 2001.
- [30] Shchekin, O. B., Deppe, D. G. Lu, D., “Fermi level effect on the interdiffusion of InAs and InGaAs quantum dots” *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3115, 2001.
- [31] Seravalli, L., Frigeri, P., Trevisi, G. Franchi, S., “1.59  $\mu\text{m}$  room temperature emission from metamorphic InAs/InGaAs quantum dots grown on GaAs substrates” *Appl. Phys. Lett.* **92**, 213104, 2008.
- [32] Zhang, Z. H., Cheng, K. Y., Xu, C. F., Hsieh, K. C., “Defect-free 100-layer strain-balanced InAs quantum dot structure grown on InP substrate” *Appl. Phys. Lett.* **89**, 063115, 2006.
- [33] Mnaymneh, K., Dalacu, D. Poole, P. J., Williams, R. L., “Strain analysis of highly scalable single InAs/InP quantum dots in a stress-sensitive environment” *Appl. Phys. Lett.* **103**, 061901, 2013.
- [34] Fuster, D., Rivera, A., Alén, B. González, P. A., González Y., González, L., “Direct formation of InAs quantum dots grown on InP (001) by solid-source molecular beam epitaxy” *Appl. Phys. Lett.* **94**, 133106, 2009.



- [35] Jang, Y. D., Kim, N. J., Lee, H., Lee, D., Pyun S. H., Jeong, W. G., Jang, W. J., Oh, D. K., Kim, J. S., “Effects of band-offset on the carrier lifetime in InAs quantum dots on InP substrates” *J. Appl. Phys.* **101**, 096103, 2007.
- [36] Paki, P., Leonelli, R., Isnard, L., Masut, R. A., “Optical properties of submonolayer InAs/InP quantum dots on vicinal surfaces” *J. Appl. Phys.* **86**, 6789, 1999.
- [37] Li, H., Wang, Z., Liang, J., Xu, B., Wu, J., Gong, Q., Jiang, C., Liu, F., Zhou, F., “InAs quantum dots in InAlAs matrix on (001) InP substrates grown by molecular beam epitaxy” *J. Cryst. Growth* **187**, 564-568, 1998.
- [38] Li, Y. F., Liu, F. Q., Xu, B., Ye, X. L., Ding, D., Sun, Z. Z., Jiang, W. H., Liu, H. Y., Zhang, Y. C., Wang, Z. G., “Two-dimensional ordering of self-assembled InAs quantum dots grown on (311) B InP substrate” *J. Cryst. Growth* **219**, 17-21, 2000.
- [39] Koo, B. H., Hanada, T., Makino, H., Chang, J. H., Yao, T., “RHEED investigation of the formation process of InAs quantum dots on (100) InAlAs/InP for application to photonic devices in the 1.55 $\mu$ m range” *J. Cryst. Growth* **229**, 142–146, 2001.
- [40] Oshima, R., Akahane, K., Tsuchiya, M., Shigekawa, H., Okada, Y., “Optical properties of stacked InAs self-organized quantum dots on InP (311) B” *J. Cryst. Growth* **301–302** 776–780, 2007.
- [41] Poole, P.J., Kaminska, K., Barrios, P. Z., Lu, J. L.,” Growth of InAs/InP-based quantum dots for 1.55  $\mu$ m laser applications” *J. Cryst. Growth* **311** 1482–1486, 2009.
- [42] Lee, U. H., Lee, D., Lee, H. G., Noh, S. K., Leem, J. Y., Lee, H. J., “Visible photoluminescence from self-assembled InAs quantum dots embedded in AlAs cladding layers” *Appl. Phys. Lett.* **74**, 1597, 1999.
- [43] Ma, Z., Pierz, K., Hinze, P., “Abnormal temperature behavior of photoluminescence from self-assembled InAs/AlAs quantum dots” *Appl. Phys. Lett.* **79**, 2564, 2001.
- [44] Dawson, P., Ma, Z., Pierz, K., Göbel, E. O., “Microsecond carrier recombination times in InAs/AlAs quantum dots” *Appl. Phys. Lett.* **81**, 2349, 2002.

- [45] Meng, X. Q., Jin, P., Liang, Z. M., Liu, F. Q., Wang, Z. G., Zhang, Z. Y., “Structure and properties of InAs/AlAs quantum dots for broadband emission” *J. Appl. Phys.* **108**, 103515, 2010.
- [46] Shamirzaev, T. S., Nenashev, A. V., Gutakovskii, A. K., Kalagin, A. K., Zhuravlev, K. S., “Atomic and energy structure of InAs/AlAs quantum dots” *Phys. Rev. B* **78**, 085323 2008.
- [47] Xu, Z. Y., Lu, Z. D., Yang, X. P., Yuan, Z. L., Zheng, B. Z., Xu, J. Z., “Carrier relaxation and thermal activation of localized excitons in self-organized InAs multilayers grown on GaAs substrates” *Phys. Rev. B* **54**, 528-531, 1996.
- [48] Ngo, C. Y., Yoon, S. F., Fan, W. J., Chua, S. J., “Tuning InAs quantum dots for high areal density and wideband emission” *Appl. Phys. Lett.* **90**, 113103, 2007.
- [49] Guimard, D., Lee, H., Nishioka, H., Arakawa, Y., “Growth of high-uniformity InAs/GaAs quantum dots with ultralow density below  $10^7$  cm<sup>-2</sup> and emission above 1.3  $\mu$ m” *Appl. Phys. Lett.* **92**, 163101, 2008.
- [50] Zhou, G. Y., Chen, Y. H., Yu, J. L., Zhou, X. L., Ye, X. L., Jin, P., Wang, Z. G., “The transition from two-stage to three-stage evolution of wetting layer of InAs/GaAs quantum dots caused by postgrowth annealing” *Appl. Phys. Lett.* **98**, 071914, 2011.
- [51] Duarte, C. A., Da Silva, E. C. F., Quivy, A. A., Da Silva, M. J., Martini, S., Leite, J. R., Meneses, E. A., Lauretto, E., “Influence of the temperature on the carrier capture into self-assembled InAs/GaAs quantum dots” *J. Appl. Phys.* **93**, 6279, 2003.
- [52] Zhang, B., Solomon, G. S., Pelton, M., Plant, J., Santori, C., Vučković, J., Yamamoto, Y., “Fabrication of InAs quantum dots in AlAs/GaAs DBR pillar microcavities for single photon sources” *J. Appl. Phys.* **97**, 073507, 2005.
- [53] Dialynas, G. E., Kalliakos, S., Xenogianni, C., Androulidaki, M., Kehagias, T., Komninou, P., Savvidis, P. G., Hatzopoulos, Z., Pelekanos, N. T., “Piezoelectric InAs (211) B quantum dots grown by molecular beam epitaxy: Structural and optical properties” *J. Appl. Phys.* **108**, 103525, 2010.
- [54] Kumagai, N., Ohkouchi, S., Nakagawa, S., Nomura, M., Ota, Y., Shirane, M., Igarashi, Y., Yorozu, S., Iwamoto, S., Arakawa, Y., “Suppression of

indefinite peaks in InAs/GaAs quantum dot spectrum by low temperature capping in the indium-flush method” *Physica E* **42**, 2753–2756, 2010.

- [55] Suzuki, T., Temko, Y., Jacobi, K., “Shape, size, and number density of InAs quantum dots grown on the GaAs, (113)B surface at various temperatures” *Phys. Rev. B* **67**, 045315, 2003.
- [56] Chu, L., Arzberger, M., Böhm, G., Anstreiter, G., “Influence of growth conditions on the photoluminescence of self-assembled InAs/GaAs quantum dots” *J. Appl. Phys.* **85**, 2355, 1999.
- [57] Passow, T., Li, S., Feinäugle, P., Vallaitis, T., Leuthold, J., Litvov, D., Gerthsen, D., Hetterich, M., “Systematic investigation into the influence of growth conditions on InAs/GaAs quantum dot properties” *J. Appl. Phys.* **102**, 073511, 2007.
- [58] Torchynska, T. V., “Some aspects of exciton thermal exchange in InAs quantum dots coupled with InGaAs/GaAs quantum wells” *J. Appl. Phys.* **104**, 074315, 2008.
- [59] Amano, T., Sugaya, T., Yamauchi, S., Komori, K., “Realization of 1.3mm InAs quantum dots with high-density, uniformity, and quality” *J. Cryst. Growth* **295**, 162–165, 2006.
- [60] Joyce, P. B., Krzyzewski, T. J., Bell, G. R., Jones, T. S., “Effect of growth rate on the size, composition, and optical properties of InAs/GaAs quantum dots grown by molecular-beam epitaxy” *Phys. Rev. B* **62**, 891-895, 2000.
- [61] Alloing, B., Zinoni, C., Zwiller, V., Li, L. H., Monat, C., Gobet, M., Buchs, G., Fiore, A., Pelucchi, E., Kapon, E., “Growth and characterization of single quantum dots emitting at 1300 nm” *Appl. Phys. Lett.* **86**, 101908, 2005.
- [62] Chia, C. K., Zhang, Y. W., Wong, S. S., Yong, A. M., Chow S. Y., Chua, S. J., Guo, J., “Saturated dot density of InAs/GaAs self-assembled quantum dots grown at high growth rate” *Appl. Phys. Lett.* **90**, 161906, 2007.
- [63] Chen, J. X., Markus, A., Fiore, A., Oesterle, U., Stanley, R. P., Charlin, J. F., Houdre, R., Lazzarini, L., Nasi, L., Todaro, M. T., Piscopiello, E., Cingolani, R., Catalano, M., Katcki, J., Ratajczak, J., “Tuning InAs/GaAs quantum dot properties under Stranski-Krastanov growth mode for 1.3  $\mu\text{m}$  applications” *J. Appl. Phys.* **91**, 6710, 2002.

- [64] Kima, M.D., Kim, T.W., Woo, Y.D., “Dependence of the growth modes and the surface morphologies on the As/In ratio and the substrate temperature in InAs/GaAs nanostructures” *J. Cryst. Growth* **265**, 41–46, 2004.
- [65] Zhou, D., Sharma, G., Thomassen, S. F., Reenaas, T. W., Fimland, B. O., “Optimization towards high density quantum dots for intermediate band solar cells grown by molecular beam epitaxy” *Appl. Phys. Lett.* **96**, 061913, 2010.
- [66] Sugaya, T., Amano, T., Komori, K., “Suppressed bimodal size distribution of InAs quantum dots grown with an As<sub>2</sub> source using molecular beam epitaxy” *J. Appl. Phys.* **104**, 083106, 2008.
- [67] Kamiya, I., Shirasaka, T., Shimomura, K., Tex, D. M., “Influence of In and As fluxes on growth of self-assembled InAs quantum dots on GaAs(001)” *J. Cryst. Growth* **323**, 219–222, 2011.
- [68] Sugaya, T., Amano, T., Komori, K., “Improved optical properties of InAs quantum dots grown with an As<sub>2</sub> source using molecular beam epitaxy” *J. Appl. Phys.* **100**, 063107, 2006.
- [69] Tomić, S., “Intermediate-band solar cells: Influence of band formation on dynamical processes in InAs/GaAs quantum dot arrays” *Phys. Rev. B* **82**, 195321, 2010.
- [70] Zhou, D., Vullum, P. E., Sharma, G., Thomassen, S. F., Holmestad, R., Reenaas, T. W., Fimland, B. O., “Positioning effects on quantum dot solar cells grown by molecular beam epitaxy” *Appl. Phys. Lett.* **96**, 083108, 2010.
- [71] Tanabe, K., Watanabe, K., Arakawa, Y., “Flexible thin-film InAs/GaAs quantum dot solar cells” *Appl. Phys. Lett.* **100**, 192102, 2012.
- [72] Tutu, F. K., Lam, P., Wu, J., Miyashita, N., Okada, Y., Lee, K.-H., Ekins-Daukes, N. J., Wilson, J., Liu, H., “InAs/GaAs quantum dot solar cell with an AlAs cap layer” *Appl. Phys. Lett.* **102**, 163907, 2013.
- [73] Sablon, K. A., Little, J. W., Olver, K. A., Wang, Z. M., Dorogan, V. G., Mazur, Y. I., Salamo, G. J., Towner, T. J., “Effects of AlGaAs energy barriers on InAs/GaAs quantum dot solar cells” *J. Appl. Phys.* **108**, 074305, 2010.
- [74] Luo, K. J., Xu, J. Y., Cao, H., Ma, Y., Chang, S. H., Ho, S. T., Solomon, G. S., “Ultrafast dynamics of InAs/GaAs quantum-dot microdisk lasers” *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3397, 2001.

- [75] Liu, H. Y., Xu, B., Wei, Y. O., Ding, D., Qian, J. J., Han, Q., Liang, J. B., Wang, Z. G., “High-power and long-lifetime InAs/GaAs quantum-dot laser at 1080 nm” *Appl. Phys. Lett.* **79**, 2868, 2001.
- [76] Huang, S., Ling, Y., “Photoluminescence of self-assembled InAs/GaAs quantum dots excited by ultraintense femtosecond laser” *J. Appl. Phys.* **106**, 103522, 2009.
- [77] Yang, H.D., Gong, Q., Li, S.G., Cao, C.F., Xu, C.F., Chen, P., Feng, S.L., “InAs/GaAs quantum dot lasers grown by gas-source molecular-beam epitaxy” *J. Cryst. Growth* **312**, 3451–3454, 2010.
- [78] Aslan, B., Song, C. Y., Liu, H. C., “On the spectral response of quantum dot infrared photodetectors: Postgrowth annealing and polarization behaviors” *Appl. Phys. Lett.* **92**, 253118, 2008.
- [79] Liu, H.C., Aslan, B., Korkusinski, M., Cheng, S.-J., Hawrylak, P., “Detailed characterization of a systematic set of quantum dot infrared photodetectors” *Infrared Phys. Techn.* **44**, 503–508, 2003.
- [80] Liu, H. C., Aslan, B., Gupta, J. A., Wasilewski, Z. R., Aers, G. C., SpringThorpe, A. J., Buchanan, M., “Quantum dots for terahertz generation” *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 384211-384216, 2008.
- [81] Maimon, S., Finkman, E., Bahir, G., Schacham, S. E., Garcia, J. M., Petroff, P. M., “Intersublevel transitions in InAs/GaAs quantum dots infrared photodetectors” *Appl. Phys. Lett.* **73**, 1998.
- [82] Bhattacharya, P., Su, X. H., Chakrabarti, S., Ariyawansa, G., Perera, A. G. U., “Characteristics of a tunneling quantum-dot infrared photodetector operating at room temperature” *Appl. Phys. Lett.* **86**, 191106, 2005.
- [83] Chen, S. D., Chen, S. S., Lee, S.-C., “Transverse-electric-field-enhanced response in InAs/AlGaAs/GaAs quantum-dot infrared photodetectors” *Appl. Phys. Lett.* **86**, 253104, 2005.
- [84] Aivaliotis, P., Zibik, E. A., Wilson, L. R., Cockburn, J. W., “Tuning the photoresponse of quantum dot infrared photodetectors across the 8–12  $\mu\text{m}$  atmospheric window via rapid thermal annealing” *Appl. Phys. Lett.* **91**, 143502, 2007.
- [85] Huang, G., Yang, J., Bhattacharya, P., Ariyawansa, G., Perera, A. G. U., “A multicolor quantum dot intersublevel detector with photoresponse in the terahertz range” *Appl. Phys. Lett.* **92**, 011117, 2008.



- [86] Ma, W. Q., Yang, X. J., Chong, M., Yang, T., Chen, L. H., Shao, J., Lü, X., Lu, W., Song, C. Y., Liu, H. C., “Voltage tunable two-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector” *Appl. Phys. Lett.* **93**, 013502, 2008.
- [87] Chakrabarti, S., Stiff-Roberts, A. D., Bhattacharya, P., Kennerly, S. W., “Heterostructures for achieving large responsivity in InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors” *J. Vac. Sci. Technol. B* **22**, 3, 2004.
- [88] Aivaliotis, P., Wilson, L. R., Zibik, E. A., Cockburn, J. W., Steer, M. J., Liu, H. Y., “Enhancing the dot density in quantum dot infrared photodetectors via the incorporation of antimony” *Appl. Phys. Lett.* **91**, 013503, 2007.
- [89] Lim, H. C., “*Quantum Dot Infrared Photodetectors Operating at Room Temperature: Modeling, Experiments and Analysis*” Doktora Tezi, Northwestern University, ABD, 2007.
- [90] Rajapaksha, C. P. K., “*Epitaksiyel growth and real time characterization of self-assembled quantum dot using reflection high energy electron diffraction*” Doktora tezi, University of Houston, 2010.
- [91] Suyolcu, E., “*Characterization of epitaxially grown III-V Nanostructures by electron microscopy*” Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, 2014.
- [92] Bracker, A.S., Yang, M.J., Bennett, B.R., Culbertson, J.C., Moore, W.J., “Surface reconstruction phase diagrams for InAs, AlSb, and GaSb” *J. Cryst. Growth* **220**, 384-392, 2000.
- [93] Fafard, S., Wasilewski, Z. R., Allen, C. N., Picard, D., Piva, P. G., McCaffrey, J. P., “Self-assembled quantum dots: five years later” *Superlattices and Microstructures* **25**, 1/2, 1999.
- [94] Korkmaz M., “*Orta kızılötesi dalgaboyunda çalışan InAs/GaSb süperörgü fotodiyotların opto-elektronik karakterizasyonu*” yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen bilimler Enstitüsü, 2014.