

# GaAs基1.55微米自组织InAs量子点材料生长研究进展

曾丽娜<sup>1</sup>, 杨云帆<sup>1</sup>, 秦振<sup>2</sup>, 李林<sup>1\*</sup>, 刘兆悦<sup>1</sup>, 李再金<sup>1</sup>, 赵志斌<sup>1</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 乔忠良<sup>1</sup>, 曲轶<sup>1</sup>, 刘国军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海南师范大学物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

<sup>2</sup>吉林大学教育技术中心, 吉林 长春

Email: <sup>\*</sup>licust@126.com

收稿日期: 2021年6月13日; 录用日期: 2021年7月14日; 发布日期: 2021年7月22日

## 摘要

光纤通讯用GaAs基高性能1.55微米量子点激光器引起了人们的广泛关注。然而, 由较大晶格失配引起的应变、位错等缺陷, 导致GaAs基InAs量子点材料的光增益严重降低。目前利用低温外延生长, InGaAs或AlGaAsSb缓冲层, GaAsSb盖层, 高In组分InGaAs应变减小层技术, 以及引入Sb元素, 能拓展InAs量子点的发光波长至1.55微米, 然而量子点表面和界面缺陷导致发光特性严重变差。Sb对InAs量子点材料的缺陷、面密度、均匀性及光学特性均有影响。

## 关键词

外延生长, InAs量子点, 应变减小层, 1.55微米

# Research Progress on the Growth of 1.55 $\mu\text{m}$ Self-Assembled InAs Quantum Dots Based on GaAs

Lina Zeng<sup>1</sup>, Yunfan Yang<sup>1</sup>, Zhen Qin<sup>2</sup>, Lin Li<sup>1\*</sup>, Zhaoyue Liu<sup>1</sup>, Zaijin Li<sup>1</sup>, Zhibin Zhao<sup>1</sup>, Hao Chen<sup>1</sup>, Zhongliang Qiao<sup>1</sup>, Yi Qu<sup>1</sup>, Guojun Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

<sup>2</sup>Center of Educational Technology, Jilin University, Changchun Jilin

Email: <sup>\*</sup>licust@126.com

Received: Jun. 13<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 14<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 曾丽娜, 杨云帆, 秦振, 李林, 刘兆悦, 李再金, 赵志斌, 陈浩, 乔忠良, 曲轶, 刘国军. GaAs基1.55微米自组织InAs量子点材料生长研究进展[J]. 现代物理, 2021, 11(4): 88-97. DOI: 10.12677/mp.2021.114012

## Abstract

There has been considerable interest in the development of high performance 1.55  $\mu\text{m}$  quantum dots (QDs) lasers based on GaAs for optical communications. However, the optical gain of GaAs-based InAs quantum dot materials seriously decrease due to the large lattice mismatch defects such as strains and dislocations. Currently using low-temperature epitaxial growth, InGaAs or AlGaAsSb buffer layer, GaAsSb cap layer, high In composition InGaAs strain reduction layer, and the cooperation of Sb element can expand the emission wavelength of InAs dots up to 1.55 microns. However, the surface and interface defects of the QDs cause serious deterioration of the Photoluminescence. Sb element affects the InAs QDs material defects, density, uniformity and optical properties.

## Keywords

Epitaxial Growth, InAs Quantum Dots, Strain Reducing Layer, 1.55  $\mu\text{m}$

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

光纤通讯有更高的数据传输速率和更大的通道密度, 更远的传输距离以及更低的成本等优点。光纤系统在 0.85  $\mu\text{m}$ 、1.3  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  的吸收波段上相当于一个透明的“窗口”, 符合光通讯对激光器波长的要求。最大传输距离与波长的对应关系为 1 km 对应波长 0.85  $\mu\text{m}$ , 10 km 对应波长 1.3  $\mu\text{m}$ , 100 km 对应波长 1.55  $\mu\text{m}$ 。目前最普遍的光通讯用 1.55  $\mu\text{m}$  光源是 InP 基材料体系 InGaAsP 和 InGaAsN 异质结半导体激光器。但该材料体系存在的最大难题是晶格匹配层之间折射率差很小, 载流子的限制能力较差, 四元材料较差的导热性以及小的带隙补偿, 限制了该材料体系在激光器中的应用。

近年来, 以量子点结构为有源区的量子点激光器理论上具有更低的阈值电流密度、更高的光增益、更高的特征温度和更宽的调制带宽等优点, 极大地改善了半导体激光器的性能, 对未来半导体激光器市场的发展方向影响巨大。自组织量子点材料及器件研究是目前国际上最前沿的研究课题之一。中国、欧洲、美国、日本等国家都开展了自组织量子点材料和量子点激光器的研究, 取得了很大进展。

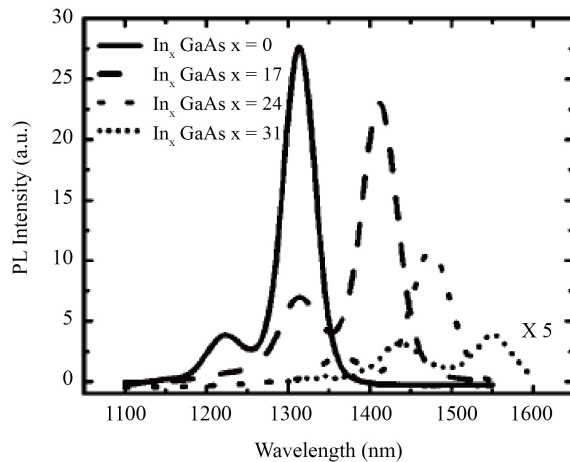
对长波长 1.55  $\mu\text{m}$  量子点材料和激光器的研究, 主要分为 InP 基和 GaAs 基材料体系。首先介绍 InP 基 InAs 量子点材料研究状况。

## 2. InP 基 InAs 量子点材料研究进展

2005 年日本富士通实验室研究结果表明, 在 InP 衬底上外延生长 InAs 量子点, 可以拓展量子点的发光波长至 1.6  $\mu\text{m}$  波段[1]。然而原子力显微镜(AFM)测试结果表明, 面密度为  $1.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ , 量子点包含有多种菱形结构的多面体, 量子点的尺寸均匀性很差, 样品 PL 光谱中多个发光峰是不同尺寸的量子点发光。

2006 年乔治亚理工学院报道了在 InP 衬底上 MOCVD 外延生长 InAlAs 量子点, 拓展了量子点的发光波长至 1.55  $\mu\text{m}$ , 但观察到量子点尺寸呈双模分布, 不同尺寸量子点发光使 PL 谱线宽较宽, 样品室温

PL 谱如图 1 所示[2]。



**Figure 1.** PL images of  $\text{In}_{0.92}\text{Al}_{0.08}\text{As}/\text{InP}$  quantum dot samples with different growth temperatures and thicknesses at room temperature [2]

**图 1.** 不同生长温度和厚度的  $\text{In}_{0.92}\text{Al}_{0.08}\text{As}/\text{InP}$  量子点样品的室温 PL 图[2]

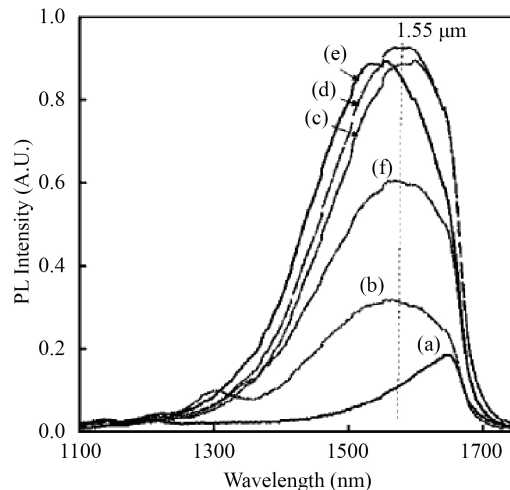
2011 年~2012 年, 丹麦科技大学和德国卡塞尔大学分别报道了 InP 衬底上外延生长 InAs 量子点激光器, 激射波长为  $1.5\sim 1.55\ \mu\text{m}$  [3] [4]。

2013 年日本国家信息通信技术研究所研究了 InP 基 InAs 量子点外延生长特性, 样品的室温发光波长达到了  $1.55\ \mu\text{m}$  [5]。研究表明, 随着量子点尺寸增大, 出现了发光波长蓝移反常现象。该样品发光现象可以理解为在 InAs 量子点外延生长过程中 In 原子的偏析和再蒸发共同作用的结果。

### 3. GaAs 基长波长量子点材料的研究进展

和 InP 基量子点材料体系相比, GaAs 基  $1.3\ \mu\text{m}$  长波长量子点材料的研究报道较多。这是因为 GaAs 基 In(Ga)As 量子点体系因其独特、优越的光电性质, 已经成为替代目前 InP 基材料, 制备光通讯用  $1.3\ \mu\text{m}$  波段长波长半导体激光器的热门材料之一, 引起各国科学家的高度重视。这不仅仅是因为 GaAs 衬底比 InP 衬底价格便宜, 而且还可以使用 AlGaAs 作为限制层和波导层, 实现对有源区载流子的更强限制特性, 更重要的是同时可以很方便地与现有的 GaAs 微电子工艺技术融合在一起。因此, GaAs 基材料体系比 InP 基材料体系则要优越得多, 目前正在逐步取代 InP 基材料, 应用在光电子器件中。

在 InAs 量子点层和 GaAs 盖层中间插入高 In 组分  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  应变减小层是量子点发光波长红移的有效方法, In 组分含量为 20% 左右即可以拓展 InAs 量子点材料的发光波长至  $1.3\ \mu\text{m}$  波段[6] [7]。虽然采用更高 In 组分(31%)可以拓展 InAs 量子点材料的发光波长至  $1.55\ \mu\text{m}$  波段[8], 不同 In 组分  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  应变减小层的量子点材料室温 PL 谱, 如图 2 所示。然而随着 In 组分的增加, 总应变不断积累, 会增大失配位错, 导致 PL 谱强度严重降低, 使其在该波段的器件应用受到了极大限制。因此, 近几年对量子点激光器的研究主要集中在  $1.3\ \mu\text{m}$  波段上。目前, 许多科研小组采用外延技术生长 GaAs 基 In(Ga)As 自组织量子点激光器, 其基态激射波长达到  $1.3\ \mu\text{m}$  以上[9] [10] [11] [12]。2006 年美国密西根大学报道了具有较好发光特性的 GaAs 基 InAs 量子点激光器材料, PL 谱线宽约为  $30\ \text{meV}$ , 获得了超低阈值电流密度量子点激光器, 激射波长达到  $1.45\ \mu\text{m}$  [13]。2008 年该小组利用渐变 InGaAs 缓冲层, 拓展量子点激光器的激射波长至  $1.52\ \mu\text{m}$  [14]。



生长温度(a): 550°C, (b): 630°C, (c)~(f): 650°C; 量子点厚度: (a): 3 ML, (b) 4 ML, (c)~(f): 5 ML

**Figure 2.** PL spectra of InAs quantum dot materials with different In composition  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  strain reducing layers at room temperature [9]

**图 2.** 不同 In 组分  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  应变减小层的 InAs 量子点材料的室温 PL 谱[9]

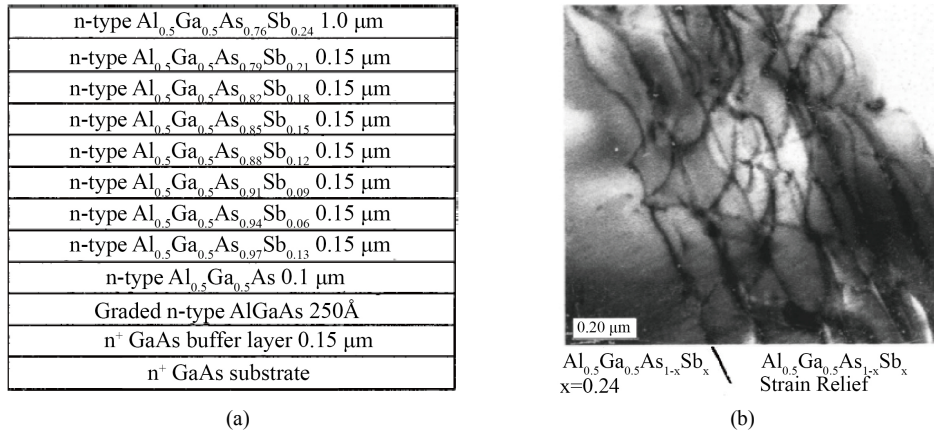
人们在研究中发现, 虽然利用低温外延生长[15], 以及高 In 组分  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  应变减小层技术能拓展 InAs 量子点的发光波长, 但其发光特性却严重变差。因此, 需要尝试新的量子点制备方法。在量子点的外延生长过程中, 引入氮(元素 N)能够拓展 InAs 量子点的发光波长从 1.3  $\mu\text{m}$  到 1.55  $\mu\text{m}$ 。日本神户大学研究了含 N 的 InAs/GaAs 量子点材料的应变状态和发光特性, 表明 N 能调控量子点尺寸, 抑制 In 的偏析, 改变由晶格失配引起量子点与盖层界面的应力, 并形成 InAsN 量子点合金, 从而增大量子点的发光波长[16]。与此同时, 美国斯坦福大学理论计算并实验验证了稀氮和锑(元素 Sb)量子阱导带补偿结构, 该结构能有效地限制电子和空穴, 实验结果表明的  $\text{Ga}_{0.62}\text{In}_{0.38}\text{N}_x\text{As}_{0.991-x}\text{Sb}_{0.009}/\text{GaN}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  量子阱样品的室温下的发光波长达到了 1.5~1.65  $\mu\text{m}$  [17]。

2003 年美国新墨西哥大学 Huffaker 等人研究了 GaAs 衬底上外延生长 AlGaAsSb 缓冲层结构, 样品的 TEM 图如图 3(a)所示。然后在 AlGaAsSb 缓冲层上外延生长 InAs 量子点。他们的研究表明, 通过渐变  $\text{AlGaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$  ( $x = 0\sim 0.24$ )缓冲层能有效过滤位错, 通过位错使应变弛豫, 如图 3(b)所示。量子点样品发光波长达到 1.63  $\mu\text{m}$ , 光谱的半峰宽度小于 50 meV [18]。

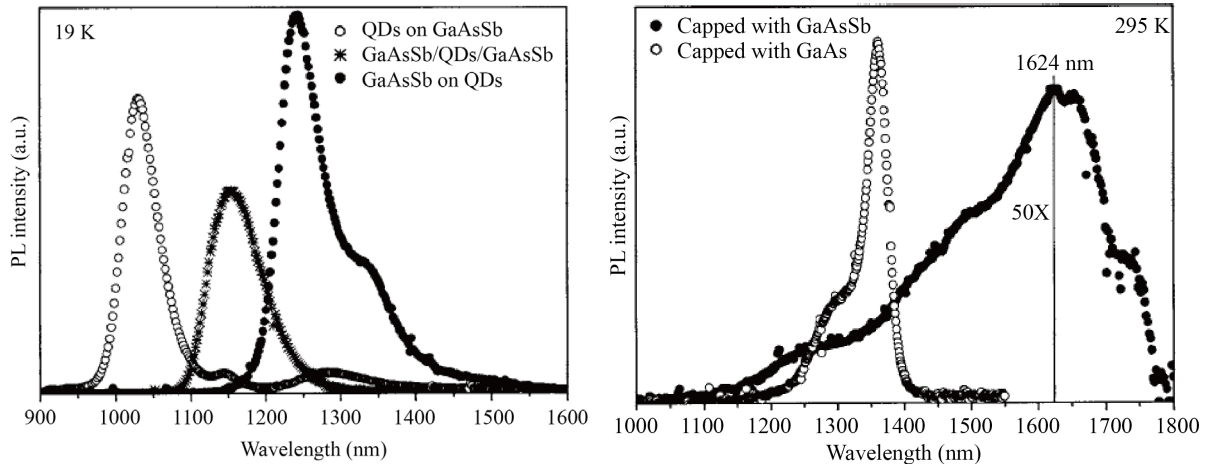
2005 年西班牙学者为了比较 GaAsSb 层的位置对 InGaAs 量子点样品的影响, 研究了具有 GaAsSb 层 (Sb 含量为 17%)的三种不同结构 InGaAs 量子点样品发光性质, 样品的低温 PL 谱如图 4(a)所示[19]。三种结构分别为 InGaAs 量子点(QDs)在 GaAsSb 层上方(QDs on GaAsSb), 中间(GaAsSb/QDs/GaAsSb)和下方(GaAsSb on QDs)。InGaAs 量子点在 GaAsSb 层上方时, PL 谱蓝移至 1.03  $\mu\text{m}$ , 这是由于增加了量子点的成核密度, 减小了量子点的尺寸。而 InGaAs 量子点在 GaAsSb 层中间和下方(以下称盖层)时, 样品的 PL 谱中心波长红移。不同盖层结构对量子点的发光性质影响较大, 与 GaAs 盖层结构相比, 采用 GaAsSb 盖层结构可以拓展 InGaAs 量子点的发光波长至 1.62  $\mu\text{m}$ , 但光谱线宽严重展宽, PL 谱如图 4(b)所示。

2006 年英国谢菲尔德大学研究了带有 GaAsSb 盖层的 InAs 量子点的发光性质, 室温下量子点样品的发光波长达到了 1.6  $\mu\text{m}$ 。研究表明, 含有 GaAsSb (Sb 组分含量分别为 22%, 26%时)盖层的 InAs 量子点的发光波长分别为 1.52  $\mu\text{m}$ 、1.60  $\mu\text{m}$ 。与 Sb 含量为 14%的量子点相比, 样品 PL 谱发光波长红移,

但发光强度大大降低，光谱线宽严重展宽。随激发功率的增加，PL 光谱发生兰移，没有观察到 GaAsSb/GaAs 导带补偿效应，表明观察到长波长的发光现象不是来源于 GaAsSb/GaAs 界面处，而是来源于 II 型结构[20]。该小组的研究结果表明含有 GaAsSb 盖层的量子点样品，Sb 含量达到 14%时，会发生 I 型向 II 型结构转变。



**Figure 3.** (a) AlGaAsSb buffer layer structure and (b) TEM image [18]  
**图 3.** (a) AlGaAsSb 缓冲层结构和(b)TEM 图[18]



**Figure 4.** (a) PL image of InGaAs quantum dots at different positions above, in the middle, and below the GaAsSb layer at low-temperature; (b) PL diagram of InGaAs quantum dots with the cap layer being GaAs and GaAsSb, respectively  
**图 4.** (a) InGaAs 量子点在 GaAsSb 层上方，中间，下方不同位置时低温 PL 图；(b) 盖层分别为 GaAs 和 GaAsSb 层的 InGaAs 量子点的 PL 图

随后谢菲尔德大学该研究小组比较研究了具有 GaAsSb 缓冲层和 InGaAs 缓冲层的 InAs 量子点材料特性[21]。PL 光谱表明，有 GaAsSb 缓冲层的 InAs 量子点样品室温下的发光波长达到了 1.55 μm，明显提高了样品的发光强度，其发光强度大约是 InGaAs 缓冲层样品的 24 倍。和 InGaAs 缓冲层相比，GaAsSb 缓冲层的样品表面更平滑，从而明显改善了 InAs 量子点样品的发光特性。这是因为在外延生长 GaAsSb 缓冲层后，GaAsSb 和 GaAs 的界面处的位错使更多应变发生弛豫。

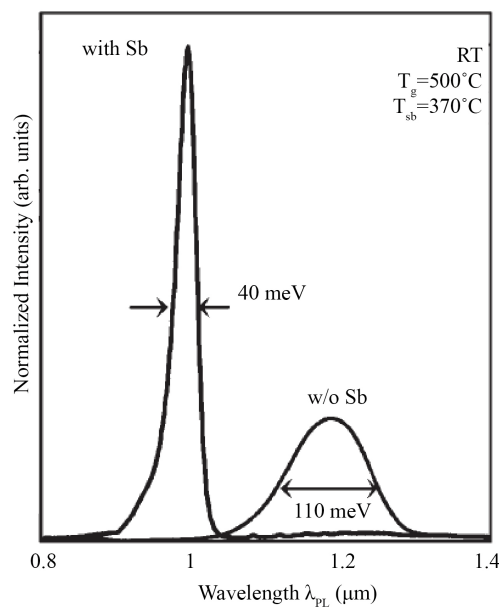
台湾学者的研究表明，GaAsSb/GaAs 导带补偿，取决于 GaAsSb 中 Sb 的组分含量。当 Sb 组分较小时，能带结构是 I 型结构，即电子在 GaAsSb 层局域化，这种 I 型结构能较好限制载流子，适于应用



在发光器件；当 Sb 组分大于 0.43 时，能带结构变成 II 型结构，即电子在 GaAs 势垒层局域化，这种 II 型结构可应用于双极晶体管 and 红外探测器[22]。

许多科研机构报道了长波长 InAs/GaAs 量子点的表面形貌、界面、缺陷和发光性质，研究了 GaAsSb 缓冲层或 GaAsSb 盖层对 InAs 量子点的作用，分析了 Sb 对 InAs 量子点材料的缺陷、面密度、均匀性及光学特性的影响。这是因为许多报道的研究结果表明，引入锑原子(无机源或有机源锑, Sb)，即在外延 InAs 量子点时采用 Sb 原子作为表面活性剂可以调节量子点的尺寸，改善量子点尺寸均匀性，量子点发光波长红移[23] [24]。更重要的是引入 Sb 的 InAs 量子点材料不仅获得了较好的荧光光谱特性，还可以抑制在高温退火过程中引起的发光波长蓝移，能够控制量子点激光器的发射波长在 1.3  $\mu\text{m}$  以上[25] [26]。引入 Sb 作为表面活性剂生长 InAs 量子点，解决了由于高温退火导致量子点发光波长蓝移的难题，获得了高密度 InAs/GaAs 量子点及实现了 1.3  $\mu\text{m}$  波段的量子点激光器。

东京工业大学研究人员分析了 Sb 原子作为表面活性剂对 InAs 量子点的影响[27]。他们分析了在外延生长量子点前与生长量子点后，Sb 源快门的开启顺序和时间对量子点尺寸和发光特性的影响。通过短时间开启 Sb 源快门，即控制少量 Sb 原子进入反应室(以下称 Sb “照射”)，能起到改变表面能量的作用，表面能量的变化可以改变量子点的稳定状态。另外，改变量子点盖层的厚度或者改变 InGaAs 应变减小层的 In 组分，都影响量子点的应力分布。在盖层的生长过程中，可以调整量子点的尺寸和形状。InGaAs 应变减小层则可以减小界面互混，抑制 In 从量子点中向外扩散，Sb 对 InAs 量子点发光性质的影响，如图 5 所示。



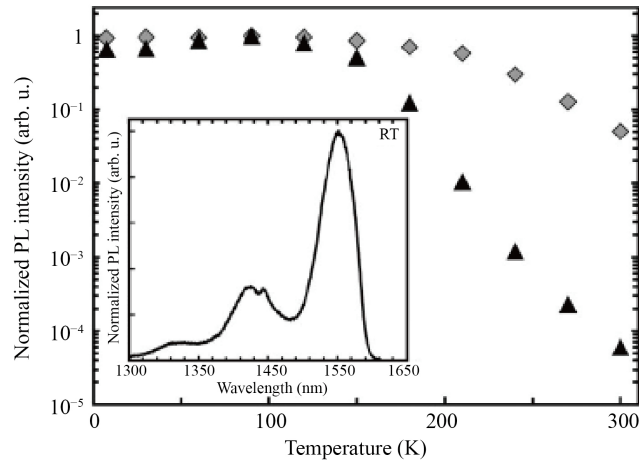
**Figure 5.** The effect of Sb on the luminescence properties of InAs quantum dots [27]

**图 5.** Sb 对 InAs 量子点发光性质的影响[27]

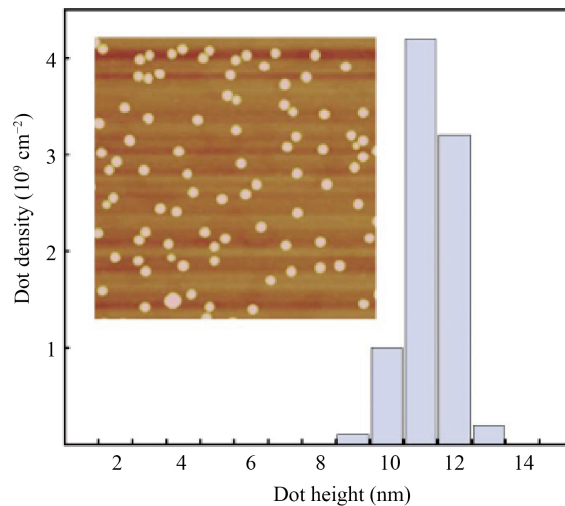
2006 年东京大学报道了 MOCVD 外延生长 1.55  $\mu\text{m}$  波段的 InAs/GaAs 量子点材料[24]。外延生长 InAs 量子点完成后，使用 Sb 照射，样品的中心发光波长拓展至 1.56 微米，室温光谱线宽为 31.1 meV。我们认为比较有意义的结果是引入 Sb 照射的 InAs 量子点外延生长方法，可以一定程度减小 InGaAs 应变减小层中 In 含量。InGaAs 应变减小层中较低含量的 In 含量的量子点样品能明显改善室温下的发光特性，如

图 6(a)所示。

然而, 在 Sb 照射后, InAs 量子点尺寸却没有明显变化, AFM 表面形貌如图 6(b)所示, 表明量子点发光波长红移的原因是 Sb 原子合并至 InAs 量子点中, 形成了 InAsSb 量子点。虽然该文献表明, 此时 Sb 的作用机理与之前报道的 Sb 作为表面活性剂的机理完全不同, 但并没有给出明确的解释。因此, 这是我们需要研究的一个主要内容, 研究 InAsSb 量子点的生长机理。



(a)



(b)

**Figure 6.** (a) The relationship between the integrated intensity of the PL spectrum of the sample and the temperature (the square point indicates that the In content in InGaAs is 0.24, and the triangle indicates that the In content is 0.36). The inset is PL spectrum of the sample at room temperature; (b) Height distribution of InAs quantum dots containing Sb (the inset is the AFM surface topography of quantum dots)

**图 6.** (a) 样品 PL 谱积分强度与温度的关系(正方形点表示 InGaAs 中 In 含量为 0.24, 三角形表示 In 含量为 0.36), 插入图为样品的室温 PL 谱; (b) 含有 Sb 的 InAs 量子点高度分布图(插入图为量子点 AFM 表面形貌图)

日本富士通研究人员研究了 InP 基 InAsSb 量子点材料特性, 表明 Sb 作为表面活性剂, 在调控量子点形状方面, Sb 含量是一个主要的影响因素。研究结果表明 Sb 不仅抑制了高应变量子阱的粗糙度, 而

且影响量子点的三维生长, Sb 含量决定着量子点的形状。随着 Sb 含量的增加, 量子点可以逐渐转变成量子线[28]。

总之, 国内外许多科研小组已进行这种材料与器件的研究。与国外许多科研机构的研究报道相比, 国内在长波长量子点激光器材料与器件应用方面的研究较少。在国内, 中国科学院半导体研究所采用 MBE 外延生长短周期 GaAs/InAs 超晶格结构, 拓展了 InAs 量子点的发光波长从 1.27  $\mu\text{m}$  到 1.53  $\mu\text{m}$  [29]。深圳信息职业技术学院和中国科学院上海微系统与信息技术研究所联合小组, 利用 GSMBE 外延生长 InAs/InP 量子点材料, 室温下获得了三种颜色的 InAs/InP 量子点激光器。长春理工大学采用 MBE 外延生长 InAs/GaAs 量子点材料, 获得了 1.5  $\mu\text{m}$  量子点激光器材料[30], 并提出一种采用 InGaSb 柱形量子点实现高效率 1.5  $\mu\text{m}$  通讯波段激光器外延结构的 MBE 外延生长新方法[31], 研究结果表明量子点的形貌和形状决定 1.55  $\mu\text{m}$  量子点激光器的输出特性。

#### 4. 总结

本文分析了高质量 1.55  $\mu\text{m}$  自组织 InAs 量子点激光器材料外延生长方法、InAs 量子点材料的缺陷、面密度、均匀性及光学特性的影响。基于量子点材料的缺陷调控技术, 降低缺陷及失配位错密度, 最大限度地消除缺陷对量子点材料质量的影响。随着研究人员对 GaAs 基半导体材料特性的深入研究, 不断改进外延生长工艺, GaAs 基 1.55  $\mu\text{m}$  自组织 InAs 量子点激光器材料质量及其器件特性将进一步得到明显改善。

#### 基金项目

海南省自然科学基金(2019RC190, 2019RC192), 海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24), 海南省高等学校教学改革项目(Hnjg2021ZD-22), 榕树基金(202011658007X), 海南省科技项目(ZDYF2020217, ZDYF2020020, ZDYF2020036), 国家自然科学基金项目(62064004, 61964007, 61864002), 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005), 和中国工程科技发展战略项目(19-HN-XZ-07)资助。

#### 参考文献

- [1] Sakuma, Y., Takemoto, K., Hirose, S., Usuki, T. and Yokoyama, N. (2005) Controlling Emission Wavelength from InAs Self-Assembled Quantum Dots on InP (0 0 1) during MOCVD. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, **26**, 81-85. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2004.08.028>
- [2] Zhang, X.B., Ryou, J.H. and Dupuis, R.D. (2006) Growth of InAlAs Self-Assembled Quantum Dots on InAlGaAs/InP for 1.55  $\mu\text{m}$  Laser Applications by Metalorganic Chemical Vapor Deposition. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 191104. <https://doi.org/10.1063/1.2385693>
- [3] Gilfert, C., Ivanov, V., Oehl, N., Yacob, M. and Reithmaier, J.P. (2011) High Gain 1.55  $\mu\text{m}$  Diode Lasers Based on InAs Quantum Dot Like Active Regions. *Applied Physics Letters*, **98**, Article ID: 201102. <https://doi.org/10.1063/1.3590727>
- [4] Semenova, S.E., Kulkova, I.V., Kadkhodazadeh, S., Schubert, F.M. and Yvind, K. (2012) Metal Organic Vapor-Phase Epitaxy of InAs/InGaAsP Quantum Dots for Laser Applications at 1.5  $\mu\text{m}$ . *Applied Physics Letters*, **99**, Article ID: 101106. <https://doi.org/10.1063/1.3634029>
- [5] Akahane, K. and Yamamoto, N. (2013) Fabrication of Low-Density Self-Assembled InAs Quantum Dots on InP(311)B Substrate by Molecular Beam Epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, **378**, 450-453. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.12.174>
- [6] Nishi, K., Saito, H., Sugou, S. and Lee, J.S. (1999) A Narrow Photoluminescence Linewidth of 21 meV at 1.35  $\mu\text{m}$  from Strain-Reduced InAs Quantum Dots Covered by In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As Grown on GaAs Substrates. *Applied Physics Letters*, **74**, 1111-1113. <https://doi.org/10.1063/1.123459>
- [7] Jia, R., Jiang, D.S., Liu, H.Y., Wei, Y.Q., Xu, B. and Wang, Z.G. (2002) Influence of Combined InAlAs and InGaAs Strain-Reducing Laser on Luminescence Properties of InAs/GaAs Quantum Dots. *Journal of Crystal Growth*, **234**, 354-358. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)01721-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)01721-3)



- [8] Hsieh, T.P., Chiu, P.C., Chyi, J.I., Yeh, N.T., Ho, W.J., Chang, W.H. and Hsu, T.M. (2005) 1.55  $\mu\text{m}$  Emission from InAs Quantum Dots Grown on GaAs. *Applied Physics Letters*, **87**, Article ID: 151903. <https://doi.org/10.1063/1.2099536>
- [9] Huffaker, D.L., Park, G., Zou, Z., Shchekin, O.B. and Deppe, D.G. (1998) 1.3  $\mu\text{m}$  Room-Temperature GaAs-Based Quantum-Dot Laser. *Applied Physics Letters*, **73**, 2564. <https://doi.org/10.1063/1.122534>
- [10] Park, G., Shchekin, O.B., Huffaker, D.L. and Deppe, D.G. (2000) Low-Threshold Oxide-Confined 1.3- $\mu\text{m}$  Quantum-Dot Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, **13**, 230.
- [11] Amano, T., Sugaya, T. and Komori, K. (2006) 1.3- $\mu\text{m}$  InAs Quantum-Dot Laser with High Dot Density and High Uniformity. *IEEE Photonics Technology Letters*, **18**, 619-621. <https://doi.org/10.1109/LPT.2006.870143>
- [12] Han, Q., Niu, Z., Ni, H., Zhang, S., Yang, X., Du, Y., Tong, C., Zhao, H., Xu, Y., Peng, H. and Wu, R. (2006) *Chinese Optics Letters*, **4**, 413.
- [13] Maximov, M.V., Tsasul'nikov, A.F., Volovik, B.V., Bedarev, D.A., Egorov, A.Yu., Zhukov, A.E., Kovsh, A.R., Bert, N.A., Ustinov, V.M., Kopev, P.S., Alferov, Zh.I., Ledetsov, N.N., Bimberg, D., Soshnikove, I.P. and Werner, P. (1999) Optical and Structural Properties of InAs Quantum Dots in a GaAs Matrix for a Spectral Range Up to 1.7  $\mu\text{m}$ . *Applied Physics Letters*, **75**, 2347-2349. <https://doi.org/10.1063/1.125010>
- [14] Mi, Z., Bhattacharya, P. and Yang, J. (2006) Growth and Characteristics of Ultralow Threshold 1.45  $\mu\text{m}$  Metamorphic InAs Tunnel Injection Quantum Dot Lasers on GaAs. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 153109. <https://doi.org/10.1063/1.2358847>
- [15] Mi, Z., Wu, C., Yang, J. and Bhattacharya, P. (2008) Molecular Beam Epitaxial Growth and Characteristics of 1.52  $\mu\text{m}$  Metamorphic InAs Quantum Dot Lasers on GaAs. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **26**, 1153-1156. <https://doi.org/10.1116/1.2889386>
- [16] Mizuno, H., Inoue, T., Kikuno, M., Kita, T., Wada, O., Mori, H. and Yasuda, H. (2007) Emission-Wavelength Extension of Nitrided InAs/GaAs Quantum Dots with Different Sizes. *Journal of Crystal Growth*, **301-302**, 709-712. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.11.082>
- [17] Kudrawiec, R., Bank, S.R., Yuen, H.B., Bee, H., Wistey, M.A., Goddard, L.L., Harris Jr., J.S., Gladysiewicz, M., Motyka, M. and Misiewicz, J. (2007) Fermi Level Shift in GaInNAsSb/GaAs Quantum Wells upon Annealing Studied by Contactless Electroreflectance. *Applied Physics Letters*, **90**, Article ID: 131905. <https://doi.org/10.1063/1.2437729>
- [18] Xin, Y.C., Vaughn, L.G., Dawson, L.R., Stintz, A., Lin, Y., Lester, L.F. and Huffaker, D.L. (2003) InAs Quantum-Dot GaAs-Based Lasers Grown on AlGaAsSb Metamorphic Buffers. *Journal of Applied Physics* **94**, 2133. <https://doi.org/10.1063/1.1582229>
- [19] Ripalda, J.M., Granados, D., Gonzalez, Y., Sanchez, A.M., Molina, S.I. and Garcia, J.M. (2005) Room Temperature Emission at 1.6  $\mu\text{m}$  from InGaAs Quantum Dots Capped with GaAsSb. *Applied Physics Letters*, **87**, Article ID: 202108. <https://doi.org/10.1063/1.2130529>
- [20] Ng, J.S., Liu, H.Y., Steer, M.J., Hopkinson, M. and David, J.P.R. (2006) Photoluminescence beyond 1.5  $\mu\text{m}$  from InAs Quantum Dots. *Microelectronics Journal*, **37**, 1468-1470. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2006.05.007>
- [21] Liu, H.Y., Qiu, Y., Jin, C.Y., Walther, T. and Cullis, A.G. (2008) 1.55  $\mu\text{m}$  InAs Quantum Dots Grown on a GaAs Substrate Using a GaAsSb Metamorphic Buffer Layer. *Applied Physics Letters*, **92**, Article ID: 111906. <https://doi.org/10.1063/1.2898895>
- [22] Sitarek, P., Hsu, H.P., Huang, Y.S., Lin, J.M., Lin, H.H. and Tiong, K.K. (2009) Optical Studies of Type-I GaAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/GaAs Multiple Quantum Well Structures. *Journal of Applied Physics*, **105**, Article ID: 123523. <https://doi.org/10.1063/1.3153975>
- [23] Ohta, M., Kanto, T. and Yamaguchi, K. (2006) Self-Formation of High-Density and High-Uniformity InAs Quantum Dots on Sb/GaAs Layers by Molecular Beam Epitaxy. *Journal of Applied Physics*, **45**, 3427. <https://doi.org/10.1143/JJAP.45.3427>
- [24] Guimard, D., Nishioka, M., Tsukamoto, S. and Arakawa, Y. (2006) High Density InAs/GaAs Quantum Dots with Enhanced Photoluminescence Intensity Using Antimony Surfactant-Mediated Metal Organic Chemical Vapor Deposition. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 183124. <https://doi.org/10.1063/1.2385209>
- [25] Guimard, D., Arakawa, Y., Ishida, M., Tsukamoto, S., Nishioka, M., Nakata, Y., Sudo, H. and Yamamoto, T. (2007) Ground State Lasing at 1.34  $\mu\text{m}$  from InAs/GaAs Quantum Dots Grown by Antimony-Mediated Metal Organic Chemical Vapor Deposition. *Applied Physics Letters*, **90**, Article ID: 241110. <https://doi.org/10.1063/1.2748082>
- [26] Guimard, D., Ishida, M., Hatori, N., Nakata, Y., Sudo, H., Yamamoto, T., Sugawara, M. and Arakawa, Y. (2008) CW Lasing at 1.35  $\mu\text{m}$  from Ten InAs-Sb: GaAs Quantum-Dot Layers Grown by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition. *IEEE Photonics Technology Letters*, **20**, 827-829. <https://doi.org/10.1109/LPT.2008.921831>
- [27] Matsuura, T., Miyamoto, T., Ohta, M., Matsui, Y., Furuhashi, T. and Koyama, F. (2005) PL Characteristics of InAs

- 
- Quantum Dots with Sb Irradiation in Growth Interruption. *Journal of Crystal Growth*, **278**, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.12.054>
- [28] Kawaguchi, K., Ekawa, M., Akiyama, T., Kuwatsuka, H. and Sugawara, M. (2006) Surfactant-Related Growth of In-As<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> Quantum Structures on InP(0 0 1) by Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, **291**, 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.03.012>
- [29] Gong, Z., Fang, Z.D., Xu, X.H., Miao, Z.H., Niu, Z.C. and Feng, S.L. (2004) Optical Characteristics of InAs Quantum Dots Capped with Short Period GaAs/InAs Superlattices and InGaAs Combination Layers. *Solid State Communication*, **132**, 421-424. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2004.03.046>
- [30] You, M.H., Li, Z.G., Gao, X., Liu, X.D., Deng, Y., Liu, G.J., Li, L., Wei, Z.P. and Wang, X.H. (2012) Long Wavelength Strain-Engineered InAs Multi-Layer Stacks Quantum Dots Laser Diode on GaAs Substrate. *Laser Physics*, **22**, 1673-1675. <https://doi.org/10.1134/S1054660X12110187>
- [31] 李占国, 刘国军, 尤明慧, 李林, 李梅, 乔忠良, 邓昀, 王勇, 王晓华, 赵英杰, 李联合. 采用 InGaSb 柱形量子点实现高效率 1.5 μm 通讯波段激光器外延结构的外延生长设计及方法[P]. 中国, ZL200910066797.4. 2010-08.