

## 低维铟基阱-点复合量子结构及光学性能和应用前景

吴坚\*, 王玉红, 郇含旭, 郑明, 段若楠

北京航空航天大学物理学院, 北京 100191

**摘要** 现代光电信息产业的快速发展对半导体光电器件提出了越来越高的要求,从而推动了半导体低维复合量子结构材料的研究和发展。其中,富铟团簇自组装复合量子结构材料因展现出灵活的结构调控性和优异的光学性能,获得了广泛的关注,成为实现新一代高性能半导体发光器件的重要结构材料。介绍了当前三种典型的低维铟基阱-点复合量子结构材料及其光学性能,重点分析了基于 InGaAs 材料的富铟团簇自组装阱-点复合量子结构材料的特殊生长机制以及新发现的优异光学性能,详细阐述了这种新的结构在实现新一代光谱功率均匀一致的超宽调谐半导体激光器、偏振双波长激光器以及偏振独立半导体光放大器等方面的应用成果和发展前景。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; InGaAs 材料; 低维复合量子结构; 富铟团簇效应; 光学增益

**中图分类号** O472+.3

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1901002

## 1 引言

低维半导体量子限制结构的维度约束极大地改善了半导体材料的一些固有特性,并产生了很多独特的物理性质,在控制和优化发光器件性能方面展现了巨大的应用潜力。这种低维量子结构目前已被广泛应用于半导体发光器件,例如发光二极管(LED)和激光二极管(LD)等各种高性能光电子器件<sup>[1-9]</sup>。

在低维量子结构材料中,量子点由于其独特的结构特征和新颖的物理特性而具有重要的地位<sup>[10-14]</sup>。由于量子点的电子态密度分布集中、激子束缚能大以及激子共振强烈,因此光与物质的相互作用更有效,低维量子点结构发光材料具有高增益、低阈值、高温稳定性及高调制带宽等特点,低维量子点结构被认为是最理想的下一代光电器件结构<sup>[15-19]</sup>,然而,受限于目前的制备工艺,量子点器件的实际性能与理论预期还有一定的差距,并且由于量子点的体积非常小,当热载流子的数量增加时会严重影响其调制速度,从而导致其有源区的载流子收集效率降低,难以实现高功率发光器件<sup>[20-21]</sup>。另一种常见的低维结构是量子阱,由于载流子只在阱宽方向上受到约束,态密度呈阶梯状分布,比量子点的 $\delta$ 函数态密度大得多,因此量子阱非常适合作为载流子的收集层和储存层。这激发了基于量子点和量子阱的复合量子结构的研究,阱-点复合结构成为新一代半导体光电材料和器件的研究热点之一<sup>[15,22]</sup>。

基于量子点和量子阱的复合量子结构为低维半导

体量子发光结构的研究和发展提供了新的视角,为结构的设计和器件性能的调控增加了更多的自由度,在提高量子点原有性能的同时还增加了许多独特的物理性能,对于提高发光器件的性能以及拓展其应用领域范围具有重要的意义<sup>[23-27]</sup>。基于量子阱和量子点的复合量子结构可分为阱-点隧穿耦合、阱-点嵌入和应变驱动的阱-点自组装复合结构。在量子阱-点隧穿耦合结构中,通常使用薄势垒层将量子点层与量子阱分开,量子阱通过隧穿方式向量子点注入载流子,以解决量子点有源区的载流子收集效率低的问题<sup>[28]</sup>。量子点、量子阱和中间的势垒层可分别作为调控的独立单元,为提升发光器件综合性能提供了可能性<sup>[29]</sup>。信息产业的发展对光电器件的性能提出了越来越高的要求,基于量子阱和量子点的复合量子发光结构得到了广泛的研究<sup>[30]</sup>。本课题组研究了一种基于 InGaAs 材料的富铟团簇自组装阱-点复合量子结构,该结构在实现新一代光谱功率均匀一致的超宽调谐半导体激光器、双波长半导体激光器以及偏振独立半导体光放大器(SOA)等方面取得了初步的应用成果<sup>[31-36]</sup>。相关研究成果突破了单纯量子阱或量子点介质在发光性能上的一些瓶颈,对发展新一代高性能半导体激光器有重要的意义。

本文介绍了三种较为复杂的铟基材料阱-点复合量子结构,重点围绕基于 InGaAs 材料的富铟团簇自组装阱-点复合量子结构,阐述了其发展现状、材料结构、发光机理和光学性能等。

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-06-30; 录用日期: 2022-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61874117)

通信作者: \*jwu2@buaa.edu.cn

## 2 三种典型的阱-点复合量子结构

在低维半导体纳米结构中,二维量子阱具有较大的吸收和发射截面,将其与量子点系统结合,可以提高量子点的原有性能,同时还会赋予量子点新的物理特性,是改善量子点结构固有缺陷的一条有效途径。目前,阱-点复合量子结构材料的结构设计主要有三种:第一种是用薄势垒层将量子点与量子阱分隔开,称这种结构为阱-点隧穿耦合结构,如图 1(a)所示;第二种是将量子点直接嵌入到阱中,称这种结构为阱-点嵌

入量子结构,如图 1(b)所示。在这两种阱-点复合结构中,量子点的生长均是基于 Stranski-Krastanov 生长模式。同时,量子点和量子阱的生长可被独立地调控,并且在这两种复合量子结构中,阱的作用主要是辅助量子点的发光<sup>[29]</sup>。而第三种阱-点复合量子结构是一种基于应变驱动富铜团簇效应的阱-点自组装结构,团簇量子点通过自组装方式生长在阱表面上。在该复合结构中,量子点直接覆盖在量子阱的表面上,阱-点的耦合能力得到极大的提高,其中具有强载流子储存能力的量子阱是主要的发光结构。

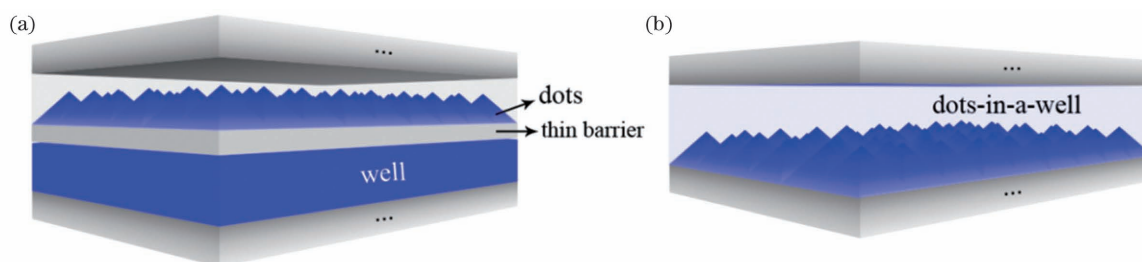


图 1 结构示意图。(a)量子阱-点隧穿耦合复合结构<sup>[29]</sup>;(b)量子阱-点嵌入复合结构<sup>[23]</sup>

Fig. 1 Structural diagrams. (a) Tunnel-coupled quantum well-dot composite structure<sup>[29]</sup>; (b) quantum dots-in-a-well composite structure<sup>[23]</sup>

## 3 阱-点隧穿耦合复合量子结构

### 3.1 结构特征

现代通信技术的应用越来越倾向于低功耗的实施方案,旨在实现非常快的数据传输速率。为了满足上述应用需求,理论上具有优异性能的高速量子点激光器获得了大量的研究。然而,由于量子点的体积太小,当热载流子的数量增加时会严重影响其调制速度,从而导致激光有源区的载流子收集效率明显降低,同时也难以获得高功率的激光输出。为了克服这些困难,研究者提出了一种量子阱-点隧穿耦合复合结构,利用量子阱通过隧穿方式向量子点层注入载流子。在该结构中,量子阱具有比量子点更有效的载流子俘获和能量弛豫机制,从而量子点基态载流子收集效率低的问题得到解决,同时二维量子阱和零维量子点的耦合使

得载流子的衰减时间变短<sup>[29]</sup>。

阱-点隧穿耦合复合量子结构除了可增加载流子的收集数量之外,对于改善量子点的结构和分布也有一定的积极作用。2001年,Chung等<sup>[28]</sup>通过在单层 InAs 量子点附近引入 InGaAs 应变量子阱,不仅增加了隧穿收集的载流子数量,而且有效地改善了量子点的密度、尺寸以及分布的均匀性。当阱-点隧穿耦合复合结构中的 GaAs 势垒层厚度从图 2(a)的 5 nm 降到图 2(b)的 0.5 nm 时, InAs 量子点从随机排列演变为对角排列;当势垒层厚度为 5 nm 时,一半的量子点高度都超过了 20 nm,而在势垒层厚度为 0.5 nm 时,所有的量子点高度均小于 15 nm。不仅如此,量子点的面密度也从  $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  增加到了  $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。因此,我们可以通过改变中间势垒层的厚度来实现对量子点结构和分布以及载流子输运的调控。

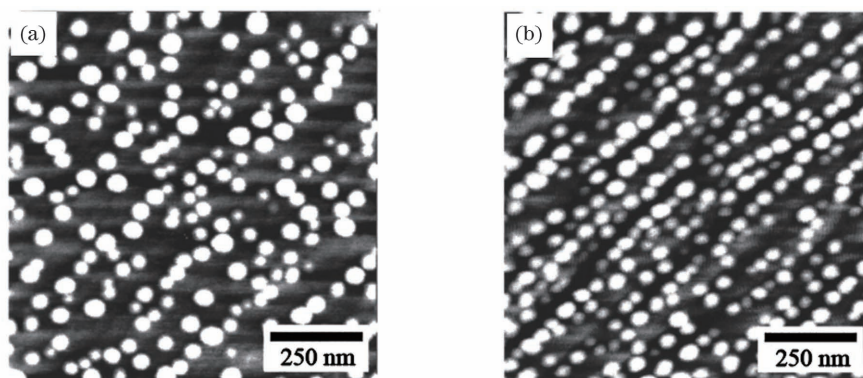


图 2 不同 GaAs 势垒层厚度下阱-点隧穿耦合复合结构中 InAs 量子点的原子力显微镜图像<sup>[28]</sup>。(a) 5 nm;(b) 0.5 nm  
Fig. 2 Atomic force microscope photographs of InAs quantum dots in tunnel-coupled well-dot composite structures with different GaAs barrier layer thicknesses<sup>[28]</sup>. (a) 5 nm; (b) 0.5 nm

### 3.2 光学性能

在阱-点隧穿耦合复合量子结构中,量子点、量子阱及中间的势垒层可进行独立的调控,且可以通过改变势垒的厚度来调整量子点与量子阱间的耦合性。2014 年, Yang 等<sup>[37]</sup> 研究了  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  阱与  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  点耦合的纳米结构的光学性能。在能量略高于量子阱基态能量的  $\sigma^+$  偏振准共振光的激发下, GaAs 势垒层厚度为 6 nm 和 20 nm 的阱-点耦合样品的圆偏振光致发光 (PL) 光谱和相应的圆偏振度 (CPD) 如图 3 所示。可以明显地看到,无论是在  $\sigma^+$  偏

振还是在  $\sigma^-$  偏振下,在势垒层厚度为 6 nm 的样品 PL 谱中,量子点 (QD) 和量子阱 (QW) 均呈现出明显的发光峰,而在势垒层厚度为 20 nm 的样品 PL 谱中,却只有量子阱的发光峰。PL 谱随势垒层厚度的变化意味着量子阱中收集的一部分电子在薄势垒样品中会迅速转移到量子点中,而在厚势垒样品中,这种转移被强烈抑制。与此同时,在图 3(a) 中, CPD 的最大峰值出现在能量比量子阱基态 (GS) 低一个纵向光学 (LO) 声子能量的位置附近,表明量子阱中的自旋极化激子被注入到了量子点,而在厚势垒样品中却不存在该隧穿注入过程。

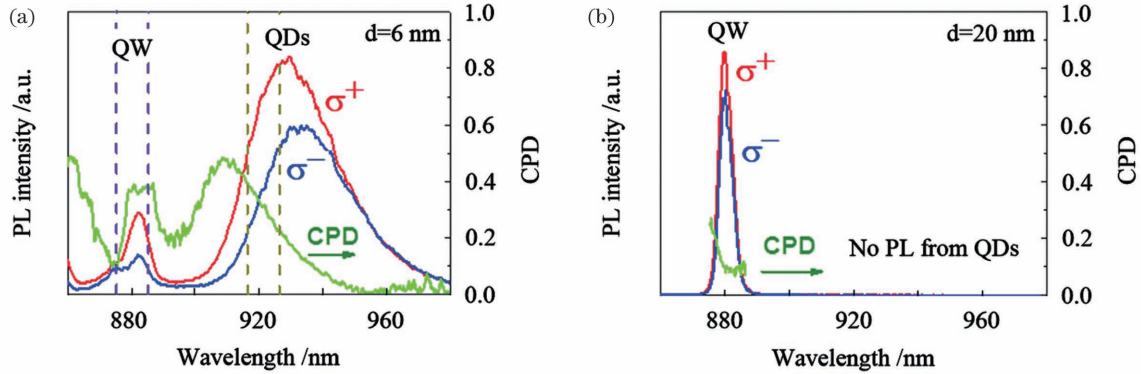


图 3 不同 GaAs 势垒层厚度下阱-点隧穿耦合纳米结构在 20 K 时的  $\sigma^+$  和  $\sigma^-$  偏振 PL 谱以及相应的圆偏振度<sup>[37]</sup>。

(a) 6 nm; (b) 20 nm

Fig. 3  $\sigma^+$  and  $\sigma^-$  polarized PL spectra at 20 K and corresponding CPDs for well-dot tunnel-coupled nanostructure with different GaAs barrier layer thicknesses<sup>[37]</sup>. (a) 6 nm; (b) 20 nm

电子的自旋转移和守恒对中间势垒的厚度也有极强的依赖性。其中,量子阱和量子点中的自旋注入时间 ( $\tau_{inj}$ ) 和光致发光谱的 CPD 与势垒层厚度的依赖关系如图 4(a) 所示。随着势垒层厚度从 8 nm 减小到 2 nm,注入时间从 20 ps 减少到 5 ps。同时,量子阱中光致发光谱的 CPD 从 0.30 增加到 0.47,量子点中光致发光谱的 CPD 从 0.23 增加到 0.45。自旋注入时间较短是由于自旋极化电子经过较薄的 GaAs 势垒后具有更强的耦合性。该研究表明,阱-点之间的势垒越

薄,由于量子隧穿效应,二者之间的耦合越强,越能够增强自旋注入性能<sup>[37]</sup>。2010 年, Mazur 等<sup>[38]</sup> 使用不同势垒层厚度的 InGaAs 阱和 InAs 点的耦合制备了纳米结构样品,研究了量子点共振光致发光激发 (PLE) 信号与阱-点间势垒层厚度的函数关系,如图 4(b) 所示,发现量子点中光生载流子密度随耦合强度的增加呈指数上升。因此,若要在阱-点隧穿耦合复合结构中充分发挥隧穿耦合作用,就需要对中间势垒层的厚度进行严格调控。

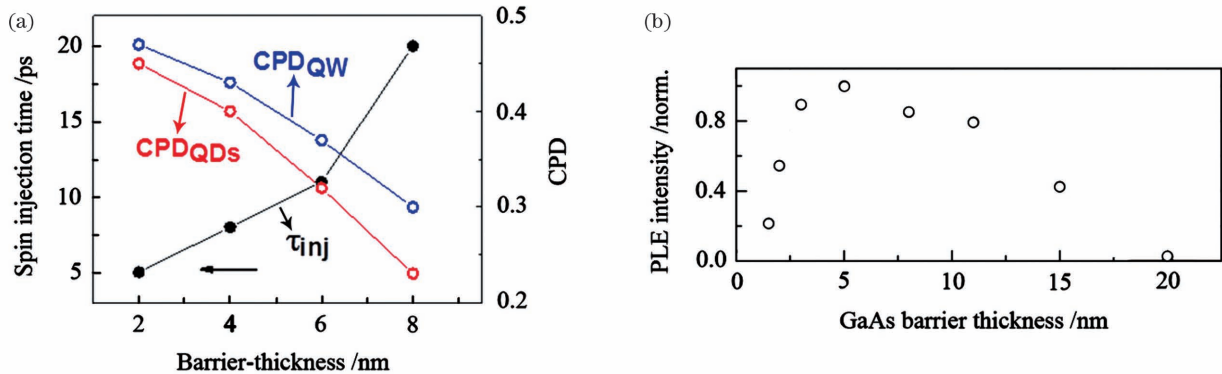


图 4 势垒层厚度对阱-点隧穿耦合纳米结构光学性能的影响。(a) 自旋注入时间以及 PL 谱的圆偏振极化度对势垒层厚度的依赖性<sup>[37]</sup>; (b) 量子阱共振激励下的归一化量子点 PLE 强度随 GaAs 势垒层厚度的变化<sup>[38]</sup>

Fig. 4 Effects of barrier layer thickness on optical properties of well-dot tunnel-coupled nanostructure. (a) Spin-injection time and CPD of PL spectrum versus barrier layer thickness<sup>[37]</sup>; (b) normalized quantum dot PLE intensity under resonant excitation of quantum well versus GaAs barrier layer thickness<sup>[38]</sup>

除此之外,增益是表征半导体有源介质发光性能的重要指标。2009 年, Huang 等<sup>[39]</sup>设计了一种量子点耦合张应变量子阱结构, 获得了偏振不敏感的光增益。图 5(a)是其优化设计的偏振无关量子点耦合张应变量子阱半导体光放大器(SOA)的理论增益谱, 其中  $G_{TE}$  和  $G_{TM}$  分别是横电(TE)模式和横磁(TM)模式下的 SOA 增益。从图 5(a)中可以看出, 利用量子点耦合张应变量子阱可以在相对较宽的波长范围内实现偏振不敏感的增益, 在约 32 nm 的范围内  $|G_{TE}-G_{TM}| < 1$  dB。为了进行比较, 在图 5(b)中给出

了标准张应变量子阱 SOA 的增益谱。很明显, 对于张应变多量子阱 SOA, 其增益对偏振非常敏感, TM 增益远大于 TE 增益。TE 偏振光的增益不仅来自于量子点激发态跃迁, 还来自于量子阱电子-重空穴跃迁和电子-轻空穴跃迁, 因此, 在图 5(c)中给出了量子点对 TE 模式增益的贡献百分比。结果表明, 50% 以上的 TE 增益是由量子点贡献的, 甚至在某些波长位置处 100% 的 TE 增益是由量子点贡献的。基于该研究, 借助于优化的量子阱-点隧穿耦合结构, 完全可以在非常宽的波长范围内获得偏振不敏感的增益。

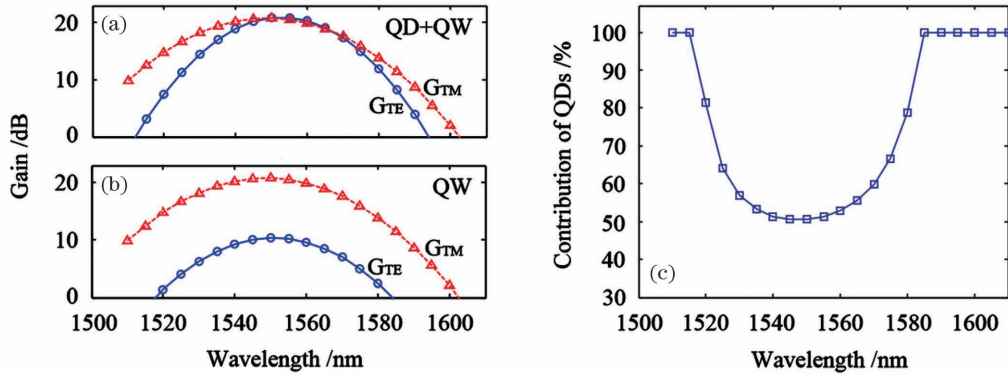


图 5 阱-点隧穿耦合光放大器的偏振模式增益特性<sup>[39]</sup>。(a)阱-点隧穿耦合光放大器以及(b)张应变量子阱光放大器的偏振模式增益谱;(c)量子点对 TE 偏振模式增益的贡献占比

Fig. 5 Polarized-gain characteristics of well-dot tunnel-coupled optical amplifier<sup>[39]</sup>. Polarized gain spectra for (a) well-dot tunnel-coupled optical amplifier and (b) tensile-strained quantum well optical amplifier; (c) percentage of TE polarized gain contributed by quantum dots

### 3.3 应用前景

由于二维量子阱的载流子储存、弛豫能力远大于零维量子点, 量子阱-点隧穿耦合结构中的阱可以协助量子点进行载流子的收集, 并通过隧穿将载流子从阱区转移到量子点区, 因此, 量子阱-点隧穿耦合激光器比单一量子点激光器具有更高的增益、更低的阈值、更好的温度稳定性、更高的速度调制性能和更低的线宽增强因子等<sup>[39]</sup>。2003 年, Kondratko 等<sup>[40]</sup>报道了一种高性能 InAs/InGaAs 阱-点隧穿耦合激光器, 在 1 mA 恒定间隔的偏置电流下, 该器件的线宽增强因子如图 6 所示, 很明显, 在有效波长范围内, 线宽增强因子的光谱非常平坦, 并且在激光波长处获得了较小值(0.15)。该阱-点隧穿耦合激光器在高速降低啁啾方面表现出相当大的潜力。此外, 隧道注入工艺可有效避免热载流子的注入, 而热载流子的注入是限制所有半导体激光器性能的一个关键因素, 因此, 量子阱-点隧穿耦合激光器具有极高的温度性能。2022 年, Khanonkin 等<sup>[41]</sup>揭示了隧道注入的基本过程, 为高性能半导体激光器的设计提供了理论依据。

除此之外, 2009 年, Huang 等<sup>[39]</sup>设计了量子点耦合张应变量子阱结构的光放大器, 获得偏振不敏感的光增益, 并基于偏振相关耦合载流子速率方程模型, 研究了阱和点之间的载流子竞争, 揭示了阱-点耦合复合量子结构在改善光学器件性能方面具有重要作用。

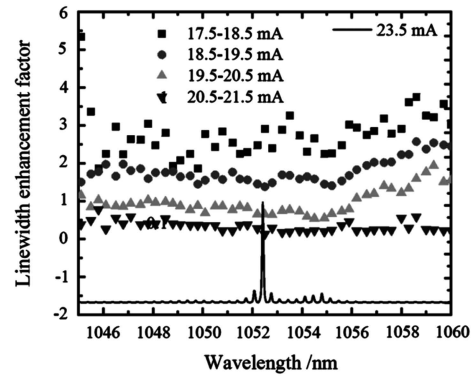


图 6 阱-点隧穿耦合激光器的线宽增强因子<sup>[40]</sup>

Fig. 6 Linewidth enhancement factor of tunnel-coupled well-dot laser<sup>[40]</sup>

2018 年, Khanonkin 等<sup>[42]</sup>通过模拟宽带泵浦探测实验, 数值研究了 InAs 阱-点隧穿耦合结构光放大器增益介质中的载流子动力学, 证明了在隧道注入过程中量子点内存在快速载流子补充。

在量子阱-点隧穿耦合结构中, 量子点、量子阱以及中间势垒层的生长可被独立地调控。作为最主要的发光结构, 量子点的生长是基于 Stranski-Krastanov 生长模式实现的, 并可通过改变中间势垒层的厚度来调控其结构和分布以及载流子输运。在该复合量子结构中, 阱主要是作为载流子的收集层和储存层, 并通过隧穿方式向量子点注入载流子, 以解决量子点有源区的

载流子收集效率低的问题,进而辅助量子点发光。与此同时,该耦合结构也因隧道注入工艺的引入,光学器件性能极大提升,获得了更高的增益、更低的阈值、更好的温度稳定性、更高的速度调制性能和更低的线宽增强因子等,在发展高性能半导体激光器、半导体光放大器等方面展现出了很好的应用前景。

## 4 阱-点嵌入复合量子结构

### 4.1 结构特征

窄禁带半导体 InAs 量子点材料在  $1.30\sim 1.55\ \mu\text{m}$  波段光纤通信领域展现出了潜在的应用价值,吸引了研究者的广泛关注。然而,传统外延生长的量子点往往存在密度低、有效增益低等缺点<sup>[43]</sup>。随着技术方法的不断改进,将量子点嵌入到量子阱中生长,即形成所谓的量子阱-点嵌入复合结构,被认为是克服量子点固有局限性、提高量子点密度、增强载流子俘获能力的一种较好的方法<sup>[44]</sup>。除此之外,在量子阱-点嵌入复合结构中,通过调整量子阱的厚度可以控制点到阱的跃迁能量,因此,在不改变量子点生长参数的情况下可实现发射光谱的调谐<sup>[45]</sup>。

随着人们对高性能光电器件需求的增加,量子阱-

点嵌入复合结构得到了更多的研究。2003 年, Liu 等<sup>[44]</sup>利用分子束外延 (MBE) 系统在 GaAs (100) 衬底上生长了在  $1.3\ \mu\text{m}$  处激射的 InGaAs 阱和 InAs 点嵌入复合结构,通过优化沉积的 InAs 数量、InGaAs 量子阱的组成以及 InGaAs 和 GaAs 的生长速率,实现了光学转换效率的提高。如图 7 所示,随着 InGaAs 阱层中镉组分的增加,获得了大小相似、面密度不同的 InAs 量子点。此外,由于阱-点嵌入复合量子结构中的量子点主要是利用 Stranski-Krastanov 生长模式外延生长的,研究者借助于外延层和衬底之间的压应变制备了三维相干的应变纳米结构。2020 年, Addamane 等<sup>[46]</sup>利用 InAs/InGaAs 阱-点嵌入量子结构系统,将 InAs 材料放在以 GaAs 材料为衬底的结构中生长,由于较大的晶格失配率,制得了相对对称的 InAs 量子点,如图 8 (a) 所示。但若在以 InP 材料为衬底的结构上生长 InAs,较低的失配率会导致高度不对称的 InAs 量子短线的形成,如图 8 (b) 所示。对比量子点,这种嵌入复合结构中的量子短线的 PL 性能更能满足低载流子的局域化要求。因此,我们完全可以通过控制实验参数来调控阱-点嵌入复合材料结构,进而优化结构的光学性能。

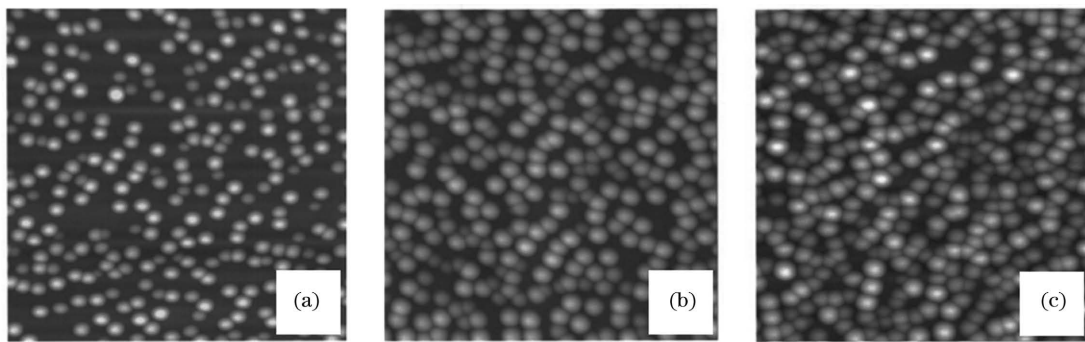


图 7 不同阱层中 InAs 量子点的原子力显微镜图像<sup>[44]</sup>。(a)  $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$ ; (b)  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ ; (c)  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$   
Fig. 7 Atomic force microscopy photographs of InAs quantum dots in different well layers<sup>[44]</sup>. (a)  $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}$ ; (b)  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ ; (c)  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$

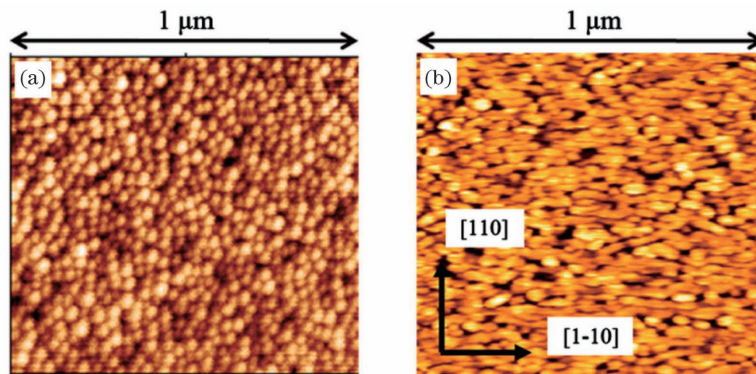


图 8 阱-点嵌入结构中量子点或短线的原子力显微镜图像<sup>[46]</sup>。(a)在 GaAs 上生长;(b)在 InP 上生长  
Fig. 8 Atomic force microscopy photographs of quantum dots or dashes in dots-in-a-well structure<sup>[46]</sup>. (a) Grown on GaAs; (b) grown on InP

### 4.2 光学性能

为了了解阱-点嵌入结构的光学性能,图 9(a)展

示了 InAs/InGaAs 阱-点嵌入结构中 InAs 量子点在不同温度下的 PL 光谱。随着温度从 10 K 升高至

100 K,量子点的 PL 强度也不断增加,当温度超过 100 K 之后,PL 强度随着温度的增高而减弱。当扩展波长范围进行测量时,在一个较高的能量范围(1.3~1.4 eV)内探测到一个微弱的由 InGaAs 包围层所贡献的 PL 信号,如图 9(b)所示。该 PL 信号不同于量子点的发光峰,它随着温度的升高迅速减弱,在高于 80 K 的温度下完全消失。图 9(b)中的插图为 InAs

量子点和 InGaAs 量子阱包围层的能带图。在三维 InAs 量子点形成之前,会形成一个薄的 InAs 浸润层,该 InAs 浸润层与周围的 InGaAs 量子阱一起构成了复杂量子阱层(将其命名为 bi-QW),而在量子点上覆盖着标准的 InGaAs 量子阱层<sup>[43]</sup>。结合 PL 谱以及能带图,可以推断出,量子点在阱-点嵌入复合结构发光中占据着最主要的地位,而量子阱层仅是辅助发光的。

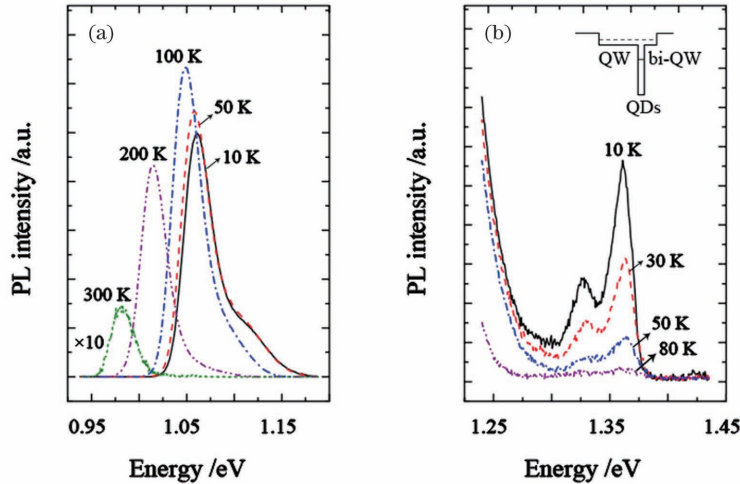


图 9 阱-点嵌入结构在不同温度下的 PL 光谱<sup>[43]</sup>。(a)InAs 量子点;(b)InGaAs 量子阱包围层,插图是 InAs 量子点和 InGaAs 量子阱包围层的能带图

Fig. 9 PL spectra of dots-in-a-well structure under different temperatures<sup>[43]</sup>. (a) InAs quantum dots; (b) surrounding InGaAs quantum well with energy band diagram of InAs quantum dots and surrounding InGaAs quantum well shown in inset

为了进一步研究结构组成对阱-点嵌入结构光学性能的影响,图 10(a)展示了 InAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 阱-点嵌入结构的室温 PL 光谱,其中阱层中铟含量(原子数分数,全文同)的变化范围为 0≤x≤0.2。其基态跃迁的半峰全宽、峰值波长和相对积分 PL 强度随 x 的变化分别如图 10(b)、(c)、(d)所示。当 InAs 量子点直

接生长在 GaAs (x=0) 上时,发光波长为 1.17 μm,半峰全宽(FWHM)为 32.7 meV,并且随着 x 的增加,PL 谱发生红移,线宽变窄。当 InAs 点嵌入到 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 阱层中时,获得了最小的半峰全宽(25 meV)和最大波长(1.35 μm)。当 x 从 0 增加到 0.15 时,积分 PL 强度略有降低,当 x 进一步增加到

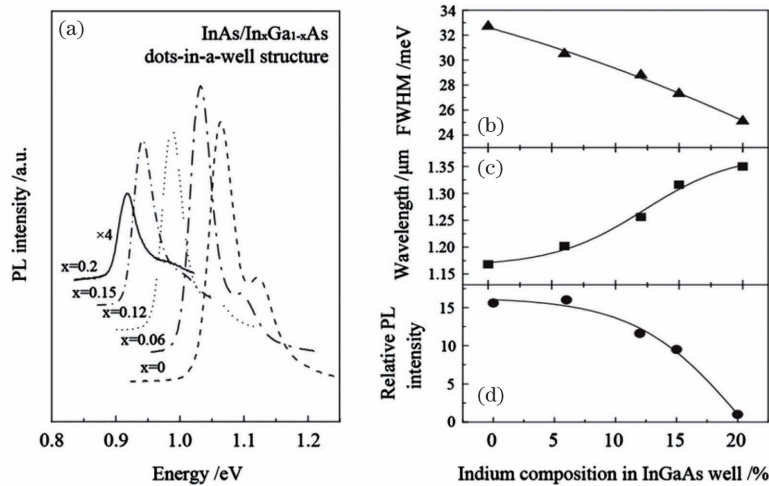


图 10 InGaAs 阱层中的铟含量对 InAs/InGaAs 阱-点嵌入结构光学性能的影响<sup>[44]</sup>。(a) InAs/InGaAs 阱-点嵌入结构的室温 PL 谱;室温下 InAs/InGaAs 阱-点嵌入结构基态的 (b) 半峰全宽、(c) 峰值波长和 (d) PL 相对强度

Fig. 10 Effect of indium content in InGaAs well on optical properties of InAs/InGaAs dots-in-a-well structure<sup>[44]</sup>. (a) PL spectra of InAs/InGaAs dots-in-a-well structures under room temperature; (b) full width at half-maximum, (c) peak wavelength, and (d) relative PL intensity of InAs/InGaAs dots-in-a-well structure at ground state under room temperature

0.2 时,积分 PL 强度显著降低,光学效率的下降表明在这个应变系统中形成了位错<sup>[44]</sup>。2005 年, Ariyawansa 等<sup>[47]</sup>通过改变 InGaAs 阱和 InAs 点嵌入复合结构的量子阱宽,实现了对探测器检测峰值波长的调谐。2008 年, Jolley 等<sup>[48]</sup>报道了量子阱厚度对基于 GaAs 阱和 In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As 点嵌入复合结构的中红外探测器的光谱响应及对其他性能的影响,证明了主要器件的性能对量子阱参数有强依赖性。2010 年,该团队研究了掺杂对基于 GaAs 阱和 In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As 点嵌入复合结构的红外探测器的主要器件参数的影响<sup>[49]</sup>。基于此研究,我们可以获得优化的阱-点嵌入材料的光学性能。

### 4.3 应用前景

InAs/GaAs 量子点已被证明是一种将 GaAs 基系统的发射波长扩展到 1.3 μm 通信波段的重要结构。然而,在大多数的 1.3 μm GaAs 基 InAs 量子点

激光器中,较低点密度引起的增益饱和和限制了器件的性能。2003 年, Liu 等<sup>[44]</sup>报道了一种优化的 InAs/InGaAs 阱-点结构,借助于量子阱的捕获率和提高的量子点密度,显著提高了 1.3 μm 量子点激光器的性能。图 11(a)展示了无涂层面的 5 层 InAs/GaAs 量子点激光器在连续波运转下的阈值电流密度的温度依赖性。室温下的阈值电流密度低至 39 A/cm<sup>2</sup>,明显低于一般的多层量子点激光器的阈值电流密度值,与单层量子点激光器的阈值电流密度相当。图 11(a)的插图展示了室温和 100 °C 下的激光光谱,激光波长分别为 1.306 μm 和 1.346 μm。2015 年, Cheng 等<sup>[50]</sup>首次利用有源多模干涉仪结构设计并演示了在横向基模下工作的短腔 InAs/GaAs 量子阱-点嵌入激光二极管,实现了 1.28 μm 的室温连续波基态激射,每面输出功率为 116 mW,是常规脊型激光二极管的 2.4 倍。

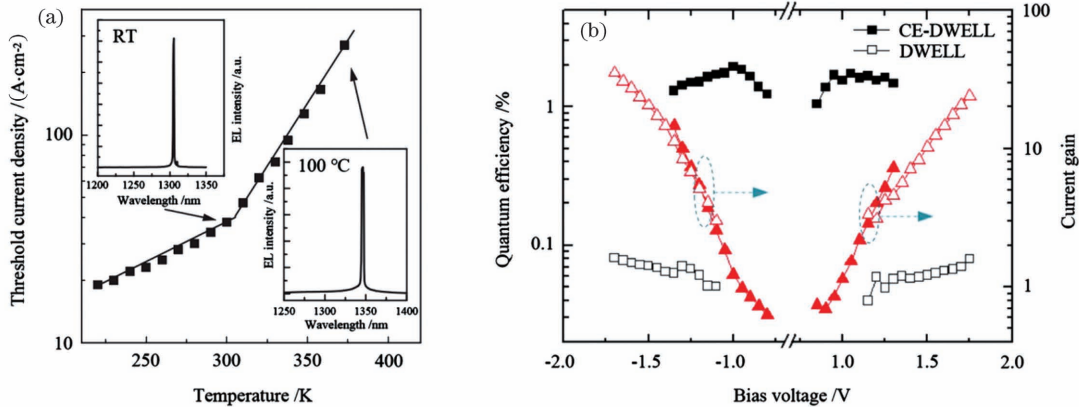


图 11 阱-点嵌入结构对光电器件性能的积极作用。(a) 无涂层面的 5 层 1.3 μm InAs/GaAs 量子点激光器在连续波运转下的阈值电流密度的温度依赖性,插图为室温 (RT) 和 100 °C 下的激光光谱<sup>[44]</sup>; (b) 77 K 时不同电压下的 InAs/In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 阱-点嵌入 (DWELL) 样品和限制加强的阱-点嵌入 (CE-DWELL) 样品的电流增益(三角形)和量子效率(正方形)<sup>[53]</sup>

Fig. 11 Positive effects of dots-in-a-well structure on performances of optoelectronic devices. (a) Temperature dependence of threshold current density of 5-layer 1.3-μm InAs/GaAs quantum dot laser with uncoated facets under continuous wave operation and laser spectra at room temperature (RT) and 100 °C are shown in insets<sup>[44]</sup>; (b) current gains (triangles) and quantum efficiencies (squares) of InAs/In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As dots-in-a-well (DWELL) sample and confinement enhanced dots-in-a-well (CE-DWELL) sample at different voltages at 77 K<sup>[53]</sup>

不仅如此,阱-点嵌入复合量子结构也为提高红外探测器的性能提供了一个有效的解决方案。2002 年, Raghavan 等<sup>[51]</sup>报道了一种使用 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 阱和 InAs 量子点嵌入异质结构的宽带长波红外(波长约为 7.2 μm)探测器,它在 78 K 下具有 3.58 A/W 的峰值响应度和 2.5 × 10<sup>9</sup> cm · Hz<sup>1/2</sup>/W 的峰值探测率。2005 年, Krishna<sup>[52]</sup>报道了一种新型红外探测器,其有源区由嵌入到 InGaAs 量子阱中的 InAs 量子点组成,该探测器可在无光栅或光耦的常规入射条件下工作,且波长可控。利用飞秒光谱,在该阱-点嵌入异构材料中还观察到了长的载流子寿命,材料表现出高温运行的潜力。2008 年, Ling 等<sup>[53]</sup>报道了一种高量子效率的 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 阱和 InAs 点嵌入结构红外光电探测器。通过在 InAs 量子点的顶部插入一层薄的

Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 阱层,增强了嵌入结构对量子点的限制,获得了一种限制加强的阱-点嵌入 (CE-DWELL) 复合结构,从而增加了红外吸收的振荡强度。如图 11(b)所示,限制加强的阱-点嵌入复合结构与传统的阱-点嵌入复合结构相比,在测量的偏压范围内量子效率要高得多,并且随着外加电压的增加,量子效率的增加也更快。而在 -1.30 ~ 1.25 V 偏置区,两个样品获得了相似的电流增益,说明即使添加了宽禁带 AlGaAs 层,加强的阱-点嵌入复合结构中的载流子输运特性仍然不变。除此之外,加强的阱-点嵌入复合结构探测器在 77 K 时的探测率比传统的阱-点嵌入复合结构大约高出了一个数量级。2015 年, Unil Perera 等<sup>[54]</sup>报道了基于 p 型价带子能级跃迁的 InAs/GaAs 量子点和阱-点嵌入红外探测器,在 100 ~ 130 K 的高温下,阱-点嵌

入探测器表现出高达  $70\ \mu\text{m}$  的强远红外响应。

此外,阱-点嵌入复合量子结构还有助于提高太阳能电池的性能。2019 年, Lay 等<sup>[55]</sup>设计了一种  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  阱和  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$  点的嵌入复合结构,提高了自组装  $\text{InGaAs}$  量子点太阳能电池的性能。利用  $\text{GaAs}$  间隔层,将 9 组阱-点嵌入结构隔开,通过调整  $\text{GaAs}$  隔层厚度,获得了比耦合  $\text{InGaAs}$  量子点更优异的光伏性能。

在量子阱-点嵌入复合结构中,基于 Stranski-Krastanov 生长模式外延生长的量子点是最主要的发光结构,而具有较大载流子吸收截面的量子阱是辅助层。量子阱会辅助量子点捕获和限制载流子。与此同时,量子阱对量子点中的载流子有限制作用,降低了载流子的逃逸几率,因此阱-点嵌入复合结构有效地克服了量子点的固有局限性,提高了量子点密度,增强了载流子的捕获能力,极大地提高了光学性能。该复合结构在优化量子点激光器、红外探测器、太阳能电池等器件性能方面表现出了巨大的应用价值。

## 5 $\text{InGaAs}$ 富钢团簇自组装阱-点复合量子结构

### 5.1 结构特征

钢基富钢团簇自组装阱-点复合量子结构是钢基

应变量子阱的一种异形复合量子结构。这种结构常被误认为是一种非理想的缺陷结构,因此,研究者们通常会通过优化外延生长条件来规避富钢团簇的形成,其潜在的特异光学性能一直被忽略,实用价值也被埋没。1998 年, Bugge 等<sup>[56]</sup>在利用金属有机气相外延 (MOVPE) 技术制备高应变  $\text{InGaAs}$  量子阱的过程中,观察到了富钢团簇现象。在该外延生长过程中,在达到钢的最大吸收量之后,继续供应较高浓度的三甲基钢 (TMIn),便会生成富钢团簇,从而导致  $\text{InGaAs}$  量子阱中的钢原子浓度降低。并且在随后的生长以及生长中断期间,富钢团簇中的过量钢原子还会从  $\text{InGaAs}$  表面解吸,并进入到相邻的  $\text{GaAs}$  盖层中。2000 年, Schlenker 等<sup>[57]</sup>通过优化生长温度和 V、III 族元素材料通入量之比,控制钢原子的迁移长度,阻止钢原子进入到富钢团簇中,减少富钢团簇的生成,进而优化  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱的晶体质量。在 MOVPE 系统中,生长速率为  $1.5\ \mu\text{m}/\text{h}$ ,在  $550\ ^\circ\text{C}$  的生长温度下,阱中达到了最大的钢原子含量 (39%)。但当生长温度提高到  $600\ ^\circ\text{C}$  时,钢含量降到了 30%,如图 12(a) 所示。因此,为了避免富钢团簇的生成,高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱需要在较低的温度下生长。在  $530\sim 570\ ^\circ\text{C}$  的温度范围内,这些样品的光致发光强度如图 12(b) 所示,在  $550\ ^\circ\text{C}$  的生长温度下获得了最高的 PL 强度<sup>[57]</sup>。

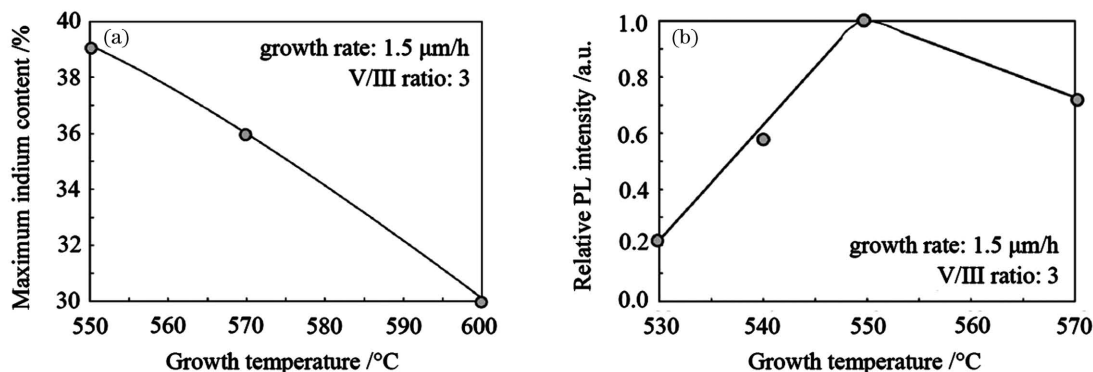


图 12 温度对高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱外延生长的影响<sup>[57]</sup>。(a) 不同生长温度下阱中可获得的最大钢含量;(b) 在  $530\sim 570\ ^\circ\text{C}$  温度范围内生长的高应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子阱的 PL 谱强度

Fig. 12 Influence of temperature on epitaxial growth of highly-strained  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  quantum well<sup>[57]</sup>. (a) Maximum indium content available in well at different growth temperatures; (b) PL intensities of highly-strained  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  well grown in  $530\sim 570\ ^\circ\text{C}$

可以看出,这些研究更多关注钢基量子阱中富钢团簇产生的调控和形成规律的分析,鲜有关于其发光性质的报道。近年来,在对  $\text{InGaAs}$  激光器的深入研究中,我们首次发现了基于  $\text{InGaAs}$  富钢团簇效应形成的自组装阱-点复合量子结构的一些特异光学性能<sup>[31-32]</sup>。研究表明,在生长高应变的  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  量子限制结构的过程中,由于两种材料间存在明显的晶格失配, $\text{InGaAs}$  层受到了压应力的作用,并且  $\text{InGaAs}$  材料中的应变会随生长厚度的增加而增加,当应变累积到一定的程度, $\text{InGaAs}$  材料中的钢原子便会通过向表层迁移的方式来弛豫应变。由于钢原子的迁

移长度比镓原子的迁移长度大得多,因此钢原子会沿材料生长方向向上迁移到表面并逸出,在  $\text{InGaAs}$  表面形成了许多随机分布的小团簇以释放  $\text{InGaAs}$  层内的高应变,这种现象被称为应变驱动的富钢团簇效应<sup>[56]</sup>,如图 13(a) 所示。

富钢团簇的生成、尺寸和分布依赖于材料的生长技术、条件以及材料组分和厚度等。在反应室压力为  $10000\ \text{Pa}$ 、总通气流量为  $14\ \text{L}/\text{min}$ 、沉积温度为  $660\ ^\circ\text{C}$  的条件下,我们借助于金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 方法,在  $\text{GaAs}$  (001) 衬底上以  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  为初始材料,通过应变弛豫在  $\text{InGaAs}$



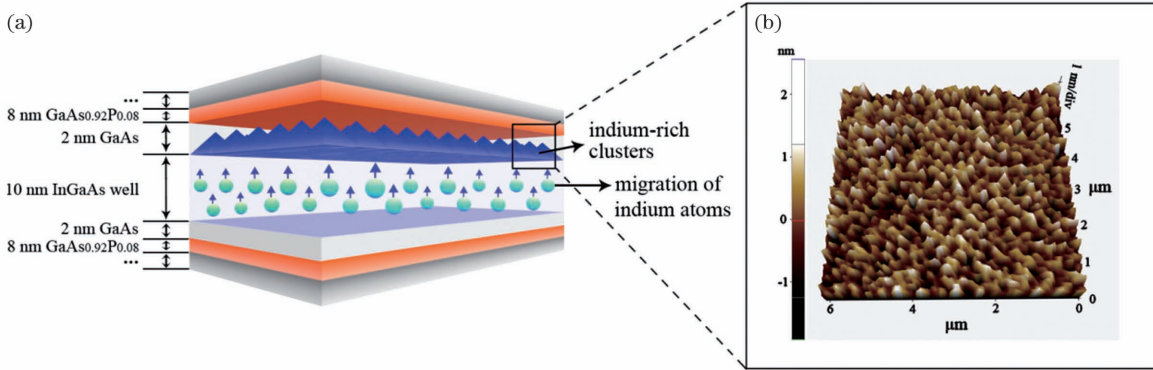


图 13 InGaAs 自组装阱-点复合量子结构的结构特征<sup>[31]</sup>。(a) 富镉团簇效应及 InGaAs 自组装阱-点复合量子结构示意图；(b) 富镉团簇的原子力显微镜图像

Fig. 13 Structural characteristics of InGaAs self-assembled well-dot composite quantum structure<sup>[31]</sup>. (a) Schematic of indium-rich cluster effect and InGaAs self-assembled well-dot composite quantum structure; (b) atomic force microscopy photograph of indium-rich clusters

表面制备了高密度的富镉团簇,进而制备出一种基于 InGaAs 材料的富镉团簇自组装阱-点复合量子结构。此外,8 nm 厚的 GaAs<sub>0.92</sub>P<sub>0.08</sub> 宽禁带势垒层分布于复合量子结构的上、下两侧,对载流子具有有效的量子限制。这种结构的阱-垒材料间存在较大的晶格失配,易于产生严重的、不可逆的位错缺陷,因此,在 InGaAs 有源层和 GaAsP 势垒层之间嵌入了 2 nm 厚的 GaAs 应变缓冲层。InGaAs/GaAs/GaAsP 核心层两侧是 Al<sub>0.08-0.15</sub>Ga<sub>0.92-0.85</sub>As 渐变波导层。该样品的结构示意图以及富镉团簇的形成机制如图 13(a)所示。利用原子力显微镜,我们观察和测量了富镉团簇的尺寸及分布,如图 13(b)所示,其高度范围为 2~8 nm,宽度为 20~200 nm。

### 5.2 光学性能

2018 年以来,我们对 InGaAs 富镉团簇自组装阱-

点复合量子结构、发光机理、光学特性以及应用性进行了深入的理论和实验研究<sup>[31-35]</sup>。在室温 300 K 条件下,我们测量了不同注入功率 (60.47~112.4 mJ) 下的偏振 PL 谱,结果如图 14(a)所示。很明显 PL 谱的峰值强度在达到饱和之前会随注入能量的增加而不断增强,但无论是横向电场偏振模式还是横向磁场偏振模式,PL 谱均会出现两个明显的发光峰。通过高斯模拟,我们发现分布于 980、970、930 nm 处的三个 TE 偏振高斯谱的叠加与实验 PL 光谱非常吻合,如图 14(b)所示。基于固体模式的理论分析,我们发现 980、970、930 nm 处的发光峰分别描述了 In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As、In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As 和 In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As 的发光情况,由此基本可以认定,InGaAs 量子限制层包含了镉含量为 0.17、0.15 和 0.12 的不同 InGaAs 缺镉区,而这些缺镉区的形成归因于富镉团簇效应。

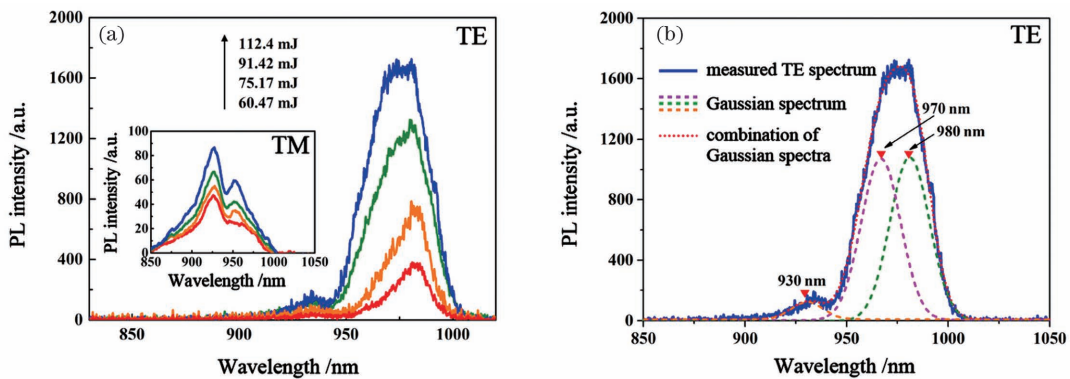


图 14 InGaAs 自组装阱-点复合量子结构的 PL 谱特征<sup>[32]</sup>。(a) 不同注入能量下的 TE 和 TM 偏振 PL 谱;(b) TE 偏振 PL 谱的高斯拟合

Fig. 14 PL spectrum characteristics of InGaAs self-assembled well-dot composite quantum structure<sup>[32]</sup>. (a) TE- and TM-polarized PL spectra under different injection energies; (b) Gaussian fitting of TE-polarized PL spectrum

这种现象形成的机理在于,镉原子在应变作用下从 InGaAs 层迁移到表面并形成富镉团簇,从而降低了 InGaAs 层中的镉原子含量<sup>[56]</sup>,形成了许多镉原子减少的 InGaAs 缺镉区,而这些分散的 InGaAs 缺镉有源区具有不同的镉含量和尺度,能带隙不同,因而产生

了不同峰值的光辐射。

基于高斯拟合结果,我们构建了一个用于描述 InGaAs 层镉分布及其复合能带结构的模型,如图 15(a)所示。沿生长方向依次是 In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As、In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As 和 In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As, In<sub>0.17</sub>Ga<sub>0.83</sub>As 是最初

的生长材料。当  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  生长了几个单分子层厚度之后,应变开始出现积累,达到一定程度后便出现富镉团簇效应。由于镉原子沿生长方向迁移弛豫,  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  层中的高应变被释放,在  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  层之后形成  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  层。随着材料的持续生长和镉原子不断向上迁移聚集,在靠近结构表面的位置处形成了较高镉含量的  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  层。由于 GaAs 的晶格常数为 5.653,  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$ 、 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  和  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  的晶格常数依次为 5.722、5.702 和

5.714,因此  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  和  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  层均受到了压应力的作用,这两种材料中的重空穴(HH)的第一能级( $\text{HH}_1$ )要高于轻空穴(LH)的第一能级( $\text{LH}_1$ )<sup>[58-59]</sup>,如图 15(a)的能带图所示。与此同时,由于  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  层受到了双轴张应变的作用,其  $\text{HH}_1$  略低于  $\text{LH}_1$ <sup>[58-59]</sup>。在不对称应变和富镉团簇效应的共同作用下,由  $\text{HH}_1$  和  $\text{LH}_1$  构成的价带第一能级以及导带第一能级( $\text{C}_1$ )形成了不同宽度的台阶,而与各能级相对应的波函数描述了载流子的分布状态。

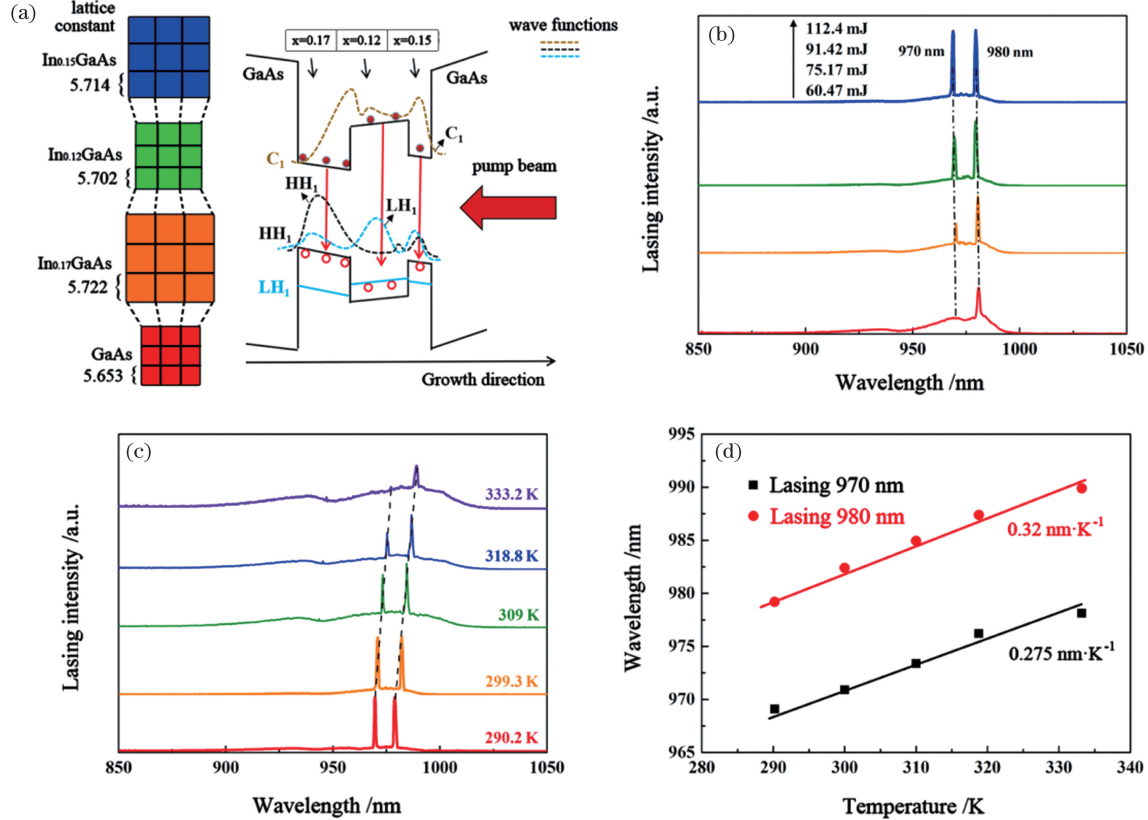


图 15 InGaAs 自组装阱-点复合量子结构的双波长激光特性<sup>[32]</sup>。(a)InGaAs 富镉团簇自组装阱-点复合量子结构的晶格匹配、能带结构和波函数;(b)不同注入能量下的 970 nm 和 980 nm 双波长 TE 偏振激光;(c)不同温度下的双波长激光;(d)激光双波长的热红移

Fig. 15 Dual-wavelength lasing characteristics of InGaAs self-assembled well-dot composite quantum structure<sup>[32]</sup>. (a) Lattice matching, band structure, and wave function of InGaAs indium-rich cluster self-assembled well-dot composite quantum structure; (b) TE-polarized dual-wavelength lasing at 970 nm and 980 nm under different injection energies; (c) dual-wavelength lasing under different temperatures; (d) thermal red-drift of lasing dual-wavelengths

由于富镉团簇效应,有源区形成了阶梯状的子带和势垒,这种特殊的能带结构可近似等效为由镉含量为 0.17 和 0.15 的两个 InGaAs 压应变阱组成的复合结构,但两个阱的内部势垒高度比外部势垒高度低,是一种非对称势垒阱。因此,当注入能量高于内部势垒高度时,两个阱都可以俘获复合载流子,这就是 InGaAs 富镉团簇自组装复合量子结构可获得图 15(b)所示的基于单芯片的稳定双波长激光输出的关键<sup>[32]</sup>。而对于经典的多阱结构,由于各阱都有相同的势垒高度,载流子复合竞争的结果使其很难获得如此稳定的双波长激光。在该结构中,当注入能量较低

时,  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  因具有更低的导带势能和更小的带隙,会最先被载流子填充,依据载流子复合竞争效应,激光首先在 980 nm 处产生。随着注入能量的不断增加,  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  的第一能级和  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  的高能级会逐渐被载流子填充,从而出现 970 nm 处的激光。由于 980 nm 处的激光仅与  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  有关,而 970 nm 处的激光得益于  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  和  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  的共同作用,因此随着注入功率的增加,970 nm 处的激光强度比 980 nm 处的激光强度增加得更快。另外,970 nm 处的激光比 980 nm 处的激光对温度更敏感,热衰减也更快,如图 15(c)所示。这

是因为 970 nm 处的激射对应于较“浅”的阱,热作用下载流子更容易从该量子限制结构中逃逸。与此同时,热作用还会使材料的带隙变小<sup>[60]</sup>,导致激光波长红移。热作用引起的带隙变化与  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  材料中的铟含量密切相关,因此,980 nm 和 970 nm 处的激射峰具有不同的热移速率,其值分别为  $\sim 0.32 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $\sim 0.275 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$ ,如图 15 (d) 所示。

除了对 InGaAs 富铟团簇自组装阱-点复合量子结构本身及其发光机理进行研究,我们还首次获得了这种特殊结构的稳定的偏振双波长激光输出,同时对

这种结构的自发辐射、吸收、增益等基础发光特性开展了研究,发现并揭示了这种结构存在的一些与传统量子结构不同的优异光学性能。

与传统标准量子阱光学性能相比,InGaAs 富铟团簇自组装阱-点复合量子结构展现出了比标准 InGaAs/GaAs 量子阱更宽的自发辐射 (SE) 带宽,如图 16(a)、(b) 所示。无论是在 TE 偏振还是在 TM 偏振模式下,其自发辐射光谱范围都为 870~1000 nm,并且均出现了双峰现象<sup>[33-34]</sup>。从物理机制上分析,由于离散的 InGaAs 活性区具有不同的铟含量和尺度,材料内部

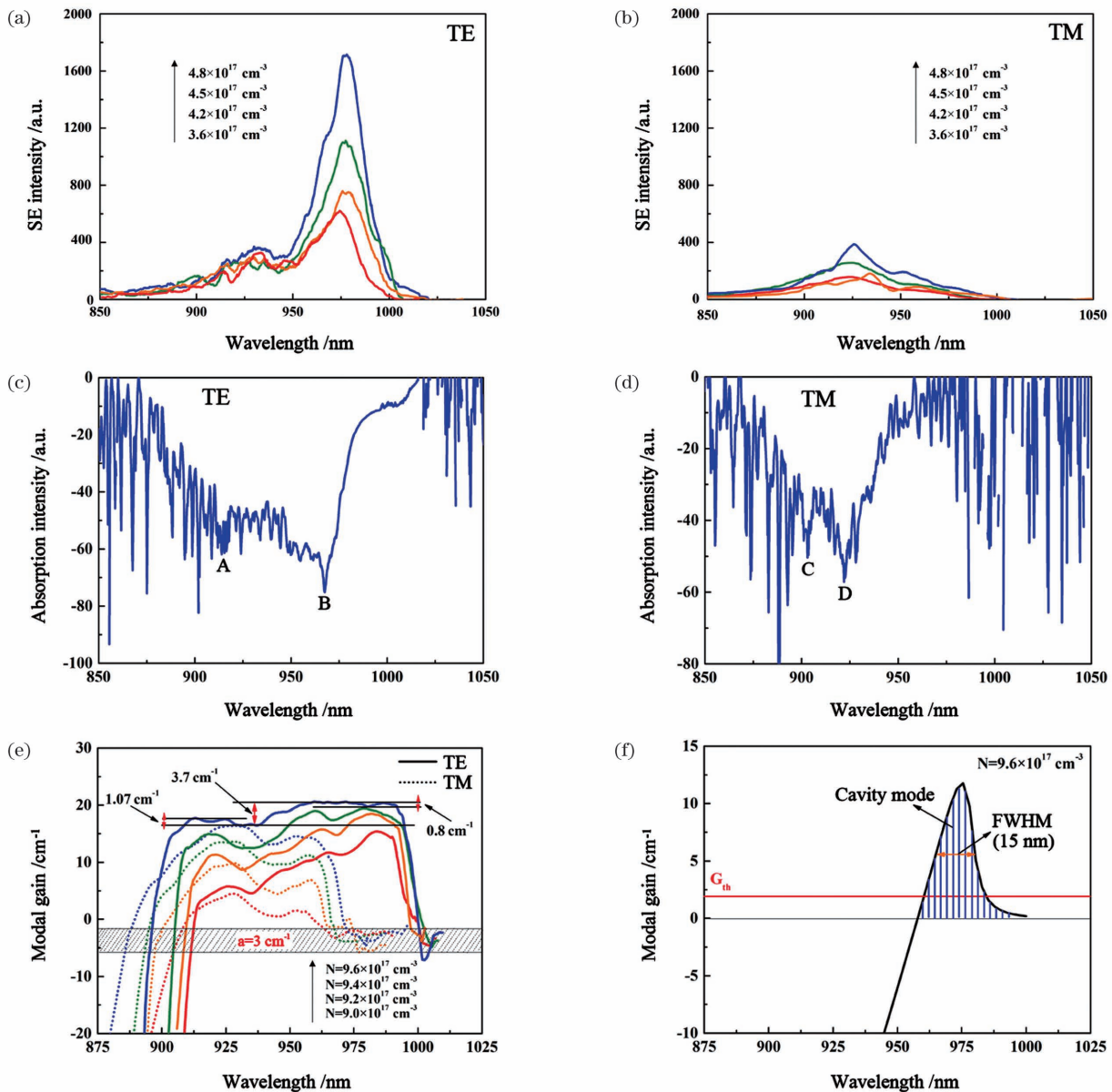


图 16 InGaAs 自组装阱-点复合量子结构的光学特性。不同注入载流子密度下的 (a) TE 和 (b) TM 实验自发辐射谱<sup>[34]</sup>; (c) TE 和 (d) TM 实验吸收谱<sup>[36]</sup>; (e) 不同注入载流子密度下的实验偏振增益谱<sup>[31]</sup>; (f) 阱厚为 10 nm 的  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}/\text{GaAsP}$  标准单量子阱在注入载流子密度为  $9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时获得的理论增益谱<sup>[31]</sup>

Fig. 16 Optical characteristics of InGaAs self-assembled well-dot composite quantum structure. Experimental (a) TE and (b) TM spontaneous emission spectra under different injection carrier densities<sup>[34]</sup>; experimental (c) TE and (d) TM absorption spectra<sup>[36]</sup>; (e) polarized gain spectra under different injection carrier densities from experiment<sup>[31]</sup>; (f) theoretical gain spectrum of  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}/\text{GaAsP}$  standard single quantum well with thickness of 10 nm under injection carrier density of  $9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[31]</sup>

形成的带隙存在差异,因而产生了不同峰值的辐射,多个自发辐射谱的叠加效果致使实际自发辐射谱出现双峰以及带宽增加的现象。在该复合量子结构的偏振吸收谱中,同样出现了明显的双吸收峰,如图 16(c)、(d)所示。由于 TE 偏振主要对应于电子从导带到 HH 的跃迁<sup>[52]</sup>,因此在 TE 偏振下,较强的吸收峰 B 产生于受到压应变作用的  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  和  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  活性区,而较弱的吸收峰 A 对应于受到张应变作用的  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  材料。而电子从导带到 LH 的跃迁则主要对应于 TM 偏振<sup>[58]</sup>,因此,在 TM 偏振模式下,较强的吸收峰 D 是由  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$  活性区产生的,而  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  和  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  材料则贡献于吸收峰 C 的形成。并且,与传统结构相比,这种复合量子限制结构具有更优良的增益光谱特性。图 16(e)展示了该结构在不同注入载流子密度( $9 \times 10^{17} \sim 9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )下实验测量获得的模式增益谱。显然,在  $9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的注入载流子密度下,光学增益谱呈现出异常宽的增益带宽和极为均匀的增益分布,在 906~996 nm 的波长范围内其增益最大波动范围不到  $3.7 \text{ cm}^{-1}$ 。并且,在 906~940 nm 以及 958~992 nm 的范围内,增益光谱的最大波动只有  $1.07 \text{ cm}^{-1}$  和  $0.8 \text{ cm}^{-1}$ ,而这主要归因于失钢的 InGaAs 局域产生的增益。在相同尺度(10 nm 厚)和相同注入条件下,与传统  $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  单量子阱获得的标准增益谱比较,如图 16(f)所示,InGaAs 富钢团簇自组装阱-点复合量子结构可产生的增益谱宽和均匀性显得非常突出。

### 5.3 应用前景

一方面,相对于固定波长激光器,由于可调谐激光二极管的波长在一定范围内可实现连续调谐,应用的灵活性使得该类激光器具有较广阔的应用前景和较大的实用价值<sup>[61]</sup>。然而,目前可调谐半导体激光产品的有源区均采用传统的低维量子限制结构。如前所述,其固有的较窄增益带宽和不均匀的增益谱特性造成了当前可调谐激光二极管非常有限的连续光谱调谐范围,特别是在固定注入功率的条件下,不同激光波长下的功率输出或效率呈现出两头低和中心高的非均匀性,如图 17(a)、(b)所示。除了以上商品化的激光器产品外,在现阶段的文献报道中,Fan 等<sup>[62]</sup>于 2007 年利用有源区为 InGaAs/GaAs 的材料体系,改变了两个垂直腔面发射半导体激光器外延片中钢的含量,利用两个芯片的增益叠加展宽激光器的调谐范围,在 980 nm 波段实现了 33 nm 的可调谐范围,其调谐光谱如图 17(c)所示。可以清晰地发现,该激光器的可调谐曲线浮动依然很大,中间功率较高,而两边功率明显较低,这是可调谐激光器性能的一大缺陷。此外,2013 年,Wei 等<sup>[63]</sup>在 GaAs/AlGaAs 材料系统中,提出了一种基于 V 耦合腔的 870 nm 波段可调谐边发射半导体激光器。它不涉及任何光栅或外延再生,仅采用单电极控制,实现了 31 通道波长调谐,调谐范围为

11.4 nm,当将温度从 8 °C 变化到 50 °C 时,实现了 60 个通道在 22.4 nm 以上的波长调谐。杨展鹏<sup>[64]</sup>于 2015 年利用 Littman 外腔可调谐半导体激光器获得了图 17(d)所示的不同输入电流下的输出功率,其值同样存在较大的波动性。目前,激光技术尚缺少有效的解决办法,实现新一代超宽调谐和光谱功率均匀的激光器依然面临巨大的挑战。

从激光器的机理和根源上分析,解决此问题的出路在于获得一种具有增益波长范围超宽且均匀一致的激活介质,而新发现的富钢团簇自组装的复合量子结构所展现出的特殊增益特性使解决该难题成为可能。依据图 16(e)的增益结果,我们研究了这种复合结构的激射功率与波长的关系,结果如图 17(e)所示<sup>[31]</sup>。当注入载流子密度为  $9.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时,其激光波长调谐范围可达到 90 nm(906~996 nm),且输出功率基本均匀一致,功率的波动均小于 0.9 dB。这与激光的工作原理是相符的。此外,在 958~992 nm 以及 906~940 nm 的波长范围内,功率的起伏只有 0.1 dB 和 0.35 dB。图 17(f)描述了不同注入载流子密度下的微分功率随波长的变化。如果微分功率与零的偏差较小,则表明在整个光谱范围内,输出功率均匀一致。该结果表明,InGaAs 富钢团簇自组装复合量子结构作为一种新型的激活介质结构,在实现超宽调谐和光谱功率均匀的可调谐激光器方面具有重要意义。

另一方面,我们研究了 InGaAs 富钢团簇复合量子结构材料在不同注入载流子密度下的 TE 和 TM 偏振光放大,如图 18(a)所示。图 18(b)展示了 TE 和 TM 偏振光放大的强度差( $\delta_{\text{TE-TM}}$ )<sup>[35]</sup>。结果显示,在 65 nm 的光谱范围内,两种偏振光放大的强度差小于 0.5 dB。这表明使用 InGaAs 富钢团簇复合量子结构材料制备的光放大器可在 65 nm 的宽光谱范围内,同时实现 TE 和 TM 偏振独立且接近同等的光放大,使未来发展偏振独立的超宽带光放大器成为可能。

在目前报道的实现可调谐同步双波长操作的各种方法和结构中,常见的结构是使用 V 形外腔,通过调整 V 形狭缝的间距来选择波长<sup>[65-66]</sup>。另一种结构是使用两个光栅构建两个外腔,每个外腔对应一个激光波长<sup>[67-68]</sup>。或者,使用两个单独的增益芯片,并使用双折射滤波片同时调谐两个波长<sup>[69]</sup>。调谐方法主要包括使用法布里-珀罗腔和布鲁斯特窗<sup>[70]</sup>。而上述方法在实际应用和集成方面往往因为需要涂层和结构过于复杂而受到限制。因此,简化双波长激光器的结构,并在调谐过程中保持两个不同波长的输出功率大致相等,是一个亟待解决的重要问题。事实上,利用内外腔耦合可以简化激光器的结构。然而,在传统的量子结构中,由于子带中的载流子复合竞争,很难实现同步双波长激光。因此,我们研究了一种利用单增益芯片和单光栅结构获得可调谐双波长的方法。该双波长激光系统采用富钢团簇自组装的复合量子结构材料作为增

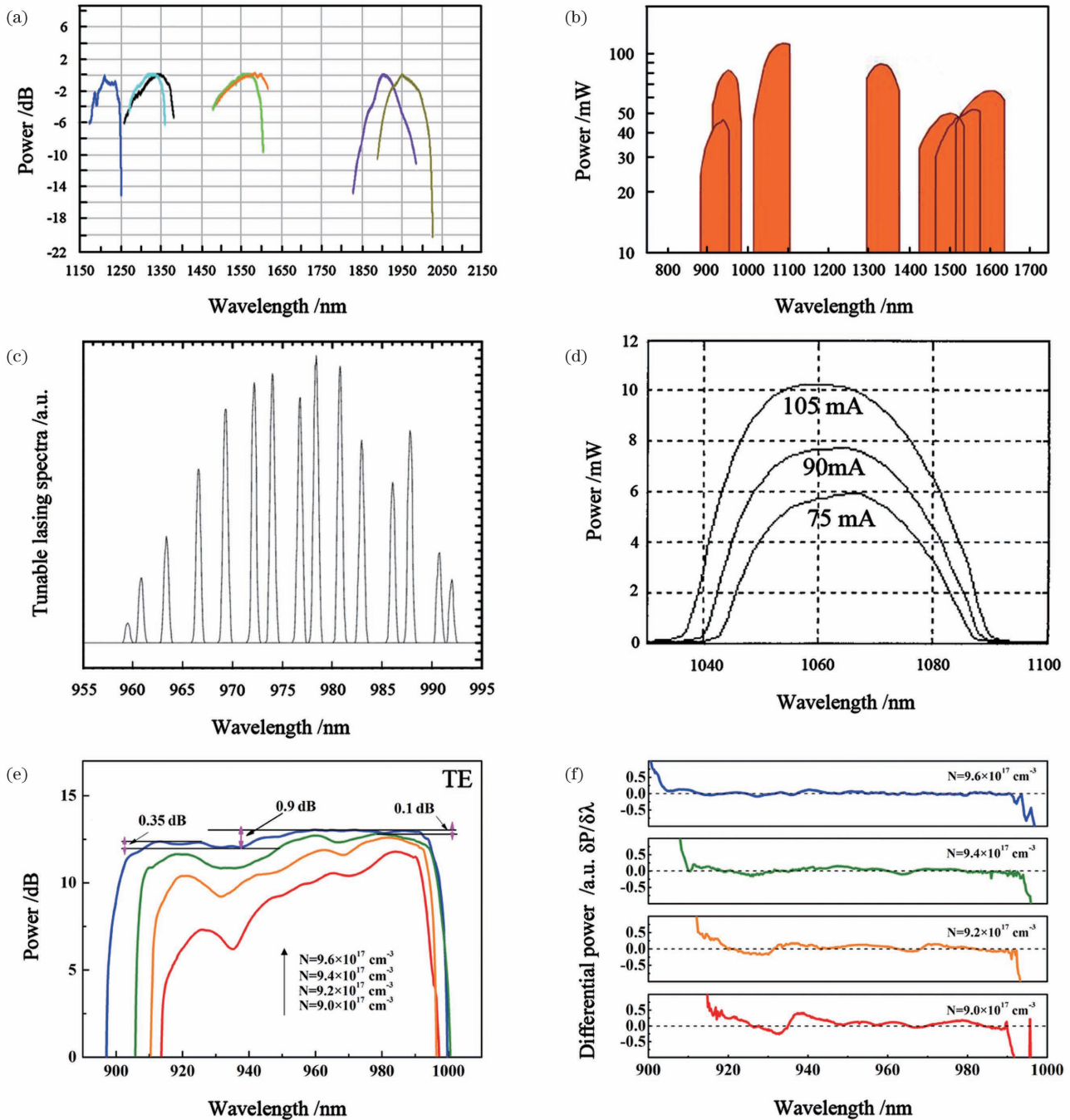


图 17 各种可调谐半导体激光器的输出功率特性。(a)(b)不同可调谐半导体激光器的光谱功率输出<sup>[31]</sup>；(c) 33 nm 调谐范围内的一些调谐光谱<sup>[62]</sup>；(d)不同输入电流下的输出功率<sup>[64]</sup>；(e)InGaAs 自组装阱-点复合结构的 TE 偏振光谱功率输出<sup>[31]</sup>；(f)TE 偏振的微分光谱功率<sup>[31]</sup>

Fig. 17 Output power characteristics of various tunable semiconductor lasers. (a)(b) Output spectral powers of different tunable semiconductor lasers<sup>[31]</sup> ; (c) some tuning spectra within 33 nm tuning range<sup>[62]</sup> ; (d) output powers under different input currents<sup>[64]</sup> ; (e) TE-polarized spectral power output from InGaAs self-assembled well-dot composite structure<sup>[31]</sup> ; (f) TE-polarized differential spectral power<sup>[31]</sup>

益介质,两个波长的同时激射是由芯片内腔和一个外腔共同产生的。这是因为 InGaAs 富钢团簇自组装复合量子结构材料的 PL 谱的主峰显著加宽 (969 ~ 978 nm),如图 18(c)所示,依据载流子的复合和模式竞争效应可知,存在产生双波长激射的可能性。我们在实验上制备了基于这种结构的激活材料,并在波长 969 ~ 978 nm 范围内,实现了单芯片固定双波长激光

输出和同步可调谐的双波长激光输出<sup>[32]</sup>。在同步可调谐双波长激光系统中,闪耀光栅和增益芯片的后端形成了一个可调谐的边发射外腔,实现了围绕固定激射波长 ~ 974 nm 的激光调谐,如图 18(d)所示。

InGaAs 富钢团簇自组装阱-点复合量子结构是在高应变 InGaAs/GaAs 材料体系中,借助于应变驱动的富钢团簇效应,外延生长的一种异形复合量子结构。

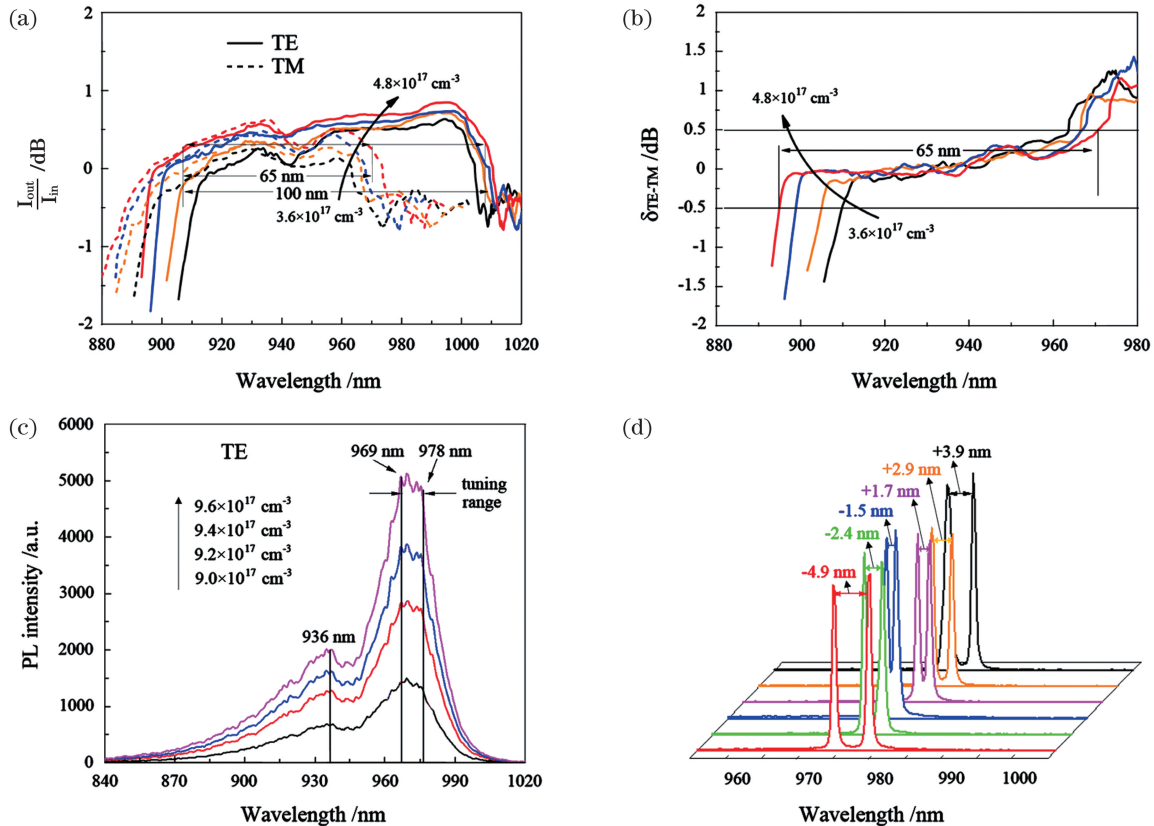


图 18 InGaAs 自组装复合量子结构在偏振独立半导体光放大器以及可调谐双波长激光器中的性能优势<sup>[35]</sup>。(a) InGaAs 富镉团簇自组装复合量子结构在不同注入载流子密度下的偏振光放大输出光强；(b) TE 和 TM 偏振光放大的强度差；(c) TE 偏振的 PL 谱；(d) 可调谐双波长激光输出

Fig. 18 Performance advantages of InGaAs self-assembled composite quantum structure in polarization-independent semiconductor optical amplifier devices and tunable dual-wavelength lasers<sup>[35]</sup>. (a) Polarized light amplification output intensities of InGaAs indium-rich cluster self-assembled composite quantum structure under different injection carrier densities; (b) amplification intensity difference between TE- and TM-polarized light; (c) TE-polarized PL spectra; (d) tunable dual-wavelength laser output

在该复合结构中,量子点直接覆盖于量子阱的表面,通过界面极大地提高了阱-点间的耦合能力,另外,由于具有强载流子储存能力的量子阱是该复合材料中的主要发光结构,因此,自组装阱-点复合量子结构的发光范围集中于 900 ~ 1000 nm 波段。因特殊的结构组成,该量子复合结构展现出超宽波长范围且分布均匀的增益,以及双峰的自发辐射、吸收等不同于传统量子结构的优异光学性能,在实现新一代光谱功率均匀的超宽调谐半导体激光器、偏振双波长激光器以及偏振独立半导体光放大器等方面展现出了广阔的发展前景。与此同时,该复合结构的激光波长调谐范围刚好在太赫兹波段,该结构激光器未来可发展成为一种新型的可调谐太赫兹光源。我们相信,未来以 InGaAs 富镉团簇复合量子材料作为新型激活介质,并结合二次谐波技术,可实现宽禁带材料难以达到的高功率连续宽调谐短波激光输出。

## 6 结束语

低维镉基阱-点复合量子结构作为一种比较新颖的半导体激活材料结构,不仅兼具了传统单一量子结

构的优点,还克服了传统结构存在的一些固有缺陷和制约,呈现出了许多新颖的量子特性,是有效实行能带工程、改善半导体低维材料物理性能、拓宽半导体器件应用范围的有效途径,在发展新一代高性能的半导体光电器件方面展现出了很好的前景。首次对低维镉基阱-点复合量子结构的发展现状进行了系统的分析论述,包括镉基量子阱-点隧穿耦合结构、阱-点嵌入结构和富镉团簇复合量子结构。结合本课题组的研究工作,对基于 InGaAs 材料的富镉团簇自组装复合量子结构及其光学特性和应用前景进行了深度的分析论述。低维镉基阱-点复合量子结构展现出优异的物理特性,这种结构的材料对未来光电器件性能的大幅提升和发展具有重要的应用价值,希望本工作能为该领域的研究提供有意义的参考。

## 参 考 文 献

- [1] Kim J O, Sengupta S, Barve A V, et al. Multi-stack InAs/InGaAs sub-monolayer quantum dots infrared photodetectors [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(1): 011131.
- [2] Miao S J, Cho Y. Toward green optoelectronics: environmental-friendly colloidal quantum dots photodetectors [J]. Frontiers in

- Energy Research, 2021, 9: 666534.
- [3] Bayrakli I. Optically and electrically pumped grating-coupled external cavity quantum cascade laser[J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(3): 169.
- [4] Okuno K, Mizutani K, Iida K, et al. Room temperature pulsed operation of nitride nanowire-based multi-quantum shell laser diodes by MOVPE[J]. Applied Physics Express, 2021, 14(7): 074004.
- [5] Liu W D, Xu N, He Y W, et al. Mid-infrared spectral responsivity scale based on an absolute cryogenic radiometer and a tunable quantum cascade laser[J]. Metrologia, 2021, 58(2): 025003.
- [6] 李金友, 王海龙, 杨锦, 等. InGaAs/GaAs/InGaP 量子阱激光器的温度电压特性[J]. 发光学报, 2020, 41(8): 971-976.  
Li J Y, Wang H L, Yang J, et al. Voltage-temperature characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(8): 971-976.
- [7] 袁野, 柴小力, 杨成奥, 等. 2.75  $\mu\text{m}$  中红外 GaSb 基五元化合物势垒量子阱激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701026.  
Yuan Y, Chai X L, Yang C G, et al. 2.75- $\mu\text{m}$  mid-infrared GaSb-based quantum well lasers with quinary alloy barrier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701026.
- [8] 姚中辉, 陈红梅, 王拓, 等. P 型调制掺杂 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601001.  
Yao Z H, Chen H M, Wang T, et al. P-modulation doped 1.3- $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601001.
- [9] 吕尊仁, 张中恺, 王虹, 等. 1.3  $\mu\text{m}$  半导体量子点激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701016.  
Lü Z R, Zhang Z K, Wang H, et al. Research progress on 1.3  $\mu\text{m}$  semiconductor quantum-dot lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701016.
- [10] Gao X H, Cui Y Y, Levenson R M, et al. In vivo cancer targeting and imaging with semiconductor quantum dots [J]. Nature Biotechnology, 2004, 22(8): 969-976.
- [11] Jamieson T, Bakhshi R, Petrova D, et al. Biological applications of quantum dots[J]. Biomaterials, 2007, 28(31): 4717-4732.
- [12] Hoshino A, Fujioka K, Oku T, et al. Quantum dots targeted to the assigned organelle in living cells [J]. Microbiology and Immunology, 2004, 48(12): 985-994.
- [13] Bailey R E, Smith A M, Nie S M. Quantum dots in biology and medicine [J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2004, 25(1): 1-12.
- [14] Walling M A, Novak J A, Shepard J R E. Quantum dots for live cell and *in vivo* imaging[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2009, 10(2): 441-491.
- [15] Asada M, Miyamoto Y, Suematsu Y. Gain and the threshold of three-dimensional quantum-box lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(9): 1915-1921.
- [16] Grundmann M, Bimberg D. Gain and threshold of quantum dot lasers: theory and comparison to experiments [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(6B): 4181-4187.
- [17] Kirstaedter N, Grundmann M, Richter U, et al. Low threshold, large injection laser emission from (InGa)As quantum dots [J]. Electronics Letters, 1994, 30(17): 1416-1417.
- [18] Kirstaedter N, Schmidt O G, Ledentsov N N, et al. Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection lasers[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(9): 1226-1228.
- [19] Ledentsov N N, Shchukin V A, Grundmann M, et al. Direct formation of vertically coupled quantum dots in Stranski-Krastanow growth[J]. Physical Review B, 1996, 54(12): 8743-8750.
- [20] Walter G, Chung T, Holonyak N, Jr. Coupled-stripe quantum-well-assisted AlGaAs-GaAs-InGaAs-InAs quantum-dot laser [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(17): 3045-3047.
- [21] Syperek M, Leszczyński P, Misiewicz J, et al. Time-resolved photoluminescence spectroscopy of an InGaAs/GaAs quantum well-quantum dots tunnel injection structure [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(1): 011901.
- [22] Maximov M V, Nadochiy A M, Mintairov S A, et al. Light emitting devices based on quantum well-dots [J]. Applied Sciences, 2020, 10(3): 1038.
- [23] Sengupta S, Kim J O, Barve A V, et al. Sub-monolayer quantum dots in confinement enhanced dots-in-a-well heterostructure[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(19): 191111.
- [24] Maximov M, Gordeev N, Payusov A, et al. Modification of InGaAs/GaAs heterostructure density of states and optical gain using hybrid quantum well-dots [J]. Laser Physics Letters, 2020, 17(9): 095801.
- [25] Moiseev E, Kryzhanovskaya N, Maximov M, et al. Highly efficient injection microdisk lasers based on quantum well-dots [J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4554-4557.
- [26] Gordeev N Y, Maximov M V, Payusov A S, et al. Material gain of InGaAs/GaAs quantum well-dots[J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 36(1): 015008.
- [27] Pieczarka M, Syperek M, Biegańska D, et al. Lateral carrier diffusion in InGaAs/GaAs coupled quantum dot-quantum well system[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(22): 221104.
- [28] Chung T, Walter G, Holonyak N, Jr. Coupled strained-layer InGaAs quantum-well improvement of an InAs quantum dot AlGaAs-GaAs-InGaAs-InAs heterostructure laser [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(27): 4500-4502.
- [29] Mazur Y I, Liang B L, Wang Z M, et al. Lengthening of the photoluminescence decay time of InAs quantum dots coupled to InGaAs/GaAs quantum well [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(5): 054313.
- [30] Walter G, Holonyak N, Jr, Ryou J H, et al. Room-temperature continuous photopumped laser operation of coupled InP quantum dot and InGaP quantum well InP-InGaP-In(AlGa)P-InAlP heterostructures[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(13): 1956-1958.
- [31] Yu Q N, Li X, Jia Y, et al. InGaAs-based well-island composite quantum-confined structure with superwide and uniform gain distribution for great enhancement of semiconductor laser performance[J]. ACS Photonics, 2018, 5(12): 4896-4902.
- [32] Yu Q N, Zheng M, Tai H X, et al. Quantum confined indium-rich cluster lasers with polarized dual-wavelength output [J]. ACS Photonics, 2019, 6(8): 1990-1995.
- [33] Yu Q N, Jia Y, Lu W, et al. Experimental characterization of true spontaneous emission rate of optically-pumped InGaAs/GaAs quantum-well laser structure[J]. AIP Advances, 2017, 7(8): 085319.
- [34] Zheng M, Yu Q N, Tai H X, et al. Experimental investigation of spontaneous emission characteristics of InGaAs-based indium-rich cluster-induced special quantum structure [J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(5): 051403.
- [35] Zheng M, Yu Q N, Li X, et al. Ultrabroadband and independent polarization of optical amplification with InGaAs-based indium-rich cluster quantum-confined structure [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(25): 252106.
- [36] Jia Y, Yu Q N, Li F, et al. Experimental investigation of loss and gain characteristics of an abnormal  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum well structure[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(1): 011402.
- [37] Yang X J, Kiba T, Yamamura T, et al. Ultrafast spin tunneling and injection in coupled nanostructures of InGaAs quantum dots and quantum well[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(1): 012406.
- [38] Mazur Y I, Dorogan V G, Guzun D, et al. Measurement of coherent tunneling between InGaAs quantum wells and InAs quantum dots using photoluminescence spectroscopy [J]. Physical Review B, 2010, 82(15): 155413.
- [39] Huang L R, Yu Y, Tian P, et al. Polarization-insensitive quantum-dot coupled quantum-well semiconductor optical

- amplifier[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2009, 24(1): 015009.
- [40] Kondratko P K, Chuang S L, Walter G, et al. Observations of near-zero linewidth enhancement factor in a quantum-well coupled quantum-dot laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(23): 4818-4820.
- [41] Khanonkin I, Bauer S, Mikhelashvili V, et al. On the principle operation of tunneling injection quantum dot lasers[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2022, 81: 100362.
- [42] Khanonkin I, Eisenstein G, Lorke M, et al. Carrier dynamics in a tunneling injection quantum dot semiconductor optical amplifier[J]. *Physical Review B*, 2018, 98(12): 125307.
- [43] Chen R, Liu H Y, Sun H D. Electronic energy levels and carrier dynamics in InAs/InGaAs dots-in-a-well structure investigated by optical spectroscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(1): 013513.
- [44] Liu H Y, Hopkinson M, Harrison C N, et al. Optimizing the growth of 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/InGaAs dots-in-a-well structure [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(5): 2931-2936.
- [45] Prasankumar R P, Attaluri R S, Averitt R D, et al. Ultrafast carrier dynamics in an InAs/InGaAs quantum-dots-in-a-well heterostructure[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1165-1173.
- [46] Addamane S J, Rashidi A, Mansoori A, et al. Comparison of carrier localization effects between InAs quantum dashes and quantum dots in a DWELL (dashes- or dots-in-a-well) configuration[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, 124: 114376.
- [47] Ariyawansa G, Perera A G U, Raghavan G S, et al. Effect of well width on three-color quantum dots-in-a-well infrared detectors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(5): 1064-1066.
- [48] Jolley G, Fu L, Tan H H, et al. Effects of well thickness on the spectral properties of  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  quantum dots-in-a-well infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(19): 193507.
- [49] Jolley G, Fu L, Tan H H, et al. The influence of doping on the device characteristics of  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  quantum dots-in-a-well infrared photodetectors[J]. *Nanoscale*, 2010, 2(7): 1128-1133.
- [50] Cheng Y B, Wu J, Zhao L J, et al. Ground-state lasing in high-power InAs/GaAs quantum dots-in-a-well laser using active multimode interference structure[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 69-72.
- [51] Raghavan S, Rotella P, Stintz A, et al. High-responsivity, normal-incidence long-wave infrared ( $\lambda \sim 7.2 \mu\text{m}$ ) InAs/ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  dots-in-a-well detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(8): 1369-1371.
- [52] Krishna S. Quantum dots-in-a-well infrared photodetectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 47(1/2): 153-163.
- [53] Ling H H, Wang S Y, Lee C P, et al. High quantum efficiency dots-in-a-well quantum dot infrared photodetectors with AlGaAs confinement enhancing layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(19): 193506.
- [54] Unil Perera A G, Lao Y F, Wolde S, et al. InAs/GaAs quantum dot and dots-in-well infrared photodetectors based on p-type valence-band intersublevel transitions[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 70: 15-19.
- [55] Lay T S, Lin Z H, Chuang K Y, et al. InGaAs quantum dots-in-a-well solar cells with anti-reflection coating[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2019, 513: 6-9.
- [56] Bugge F, Zeimer U, Sato M, et al. MOVPE growth of highly strained InGaAs/GaAs quantum wells [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 183(4): 511-518.
- [57] Schlenker D, Miyamoto T, Chen Z, et al. Growth of highly strained GaInAs/GaAs quantum wells for 1.2  $\mu\text{m}$  wavelength lasers[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 209(1): 27-36.
- [58] Wan H W, Chong T C, Chua S J. Polarization-insensitive electroabsorption in strained GaInAs/AlInAs quantum well structures[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(1): 92-94.
- [59] Ahn D, Yoo T K. Theoretical analysis of strained-layer InGaAs/GaAs quantum-well lasers with gain suppression and valence-band mixing[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(5): 548-550.
- [60] Varshni Y P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors[J]. *Physica*, 1967, 34(1): 149-154.
- [61] Coldren L A, Fish G A, Akulova Y, et al. Tunable semiconductor lasers: a tutorial [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 193-202.
- [62] Fan L, Fallahi M, Zakharian A R, et al. Extended tunability in a two-chip VECSEL[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(8): 544-546.
- [63] Wei W X, Deng H Y, He J J. GaAs/AlGaAs-based 870-nm-band widely tunable edge-emitting V-cavity laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 1501607.
- [64] 杨展鹏. 1.06  $\mu\text{m}$  外腔可调谐半导体激光器研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- Yang Z P. Research on 1.06  $\mu\text{m}$  tunable external cavity semiconductor laser [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [65] Gu P, Chang F, Tani M, et al. Generation of coherent cw-terahertz radiation using a tunable dual-wavelength external cavity laser diode [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, 38(11A): L1246-L1248.
- [66] Hoffmann S, Hofmann M, Kira M, et al. Two-colour diode lasers for generation of THz radiation [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): S205-S210.
- [67] Chi M J, Jensen O B, Petersen P M. High-power dual-wavelength external-cavity diode laser based on tapered amplifier with tunable terahertz frequency difference[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2626-2628.
- [68] Zheng Y J, Kurita T, Sekine T, et al. Tunable continuous-wave dual-wavelength laser by external-cavity superluminescent diode with a volume Bragg grating and a diffraction grating [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(14): 141107.
- [69] Zhu R J, Wang S S, Qiu X L, et al. InGaAs quantum well based dual-wavelength external cavity surface emitting laser for wideband tunable mid-infrared difference frequency generation [J]. *Journal of Luminescence*, 2018, 204: 663-667.
- [70] Fan L, Fallahi M, Hader J, et al. Linearly polarized dual-wavelength vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(18): 181124.



# Low-Dimensional Indium-Based Well-Dot Composite Quantum Structures and Their Optical Properties and Application Prospects

Wu Jian<sup>\*</sup>, Wang Yuhong, Tai Hanxu, Zheng Ming, Duan Ruonan  
*School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*

## Abstract

**Significance** The rapid development of the modern optoelectronic information industry has increased the requirements for semiconductors in optoelectronic devices. Low-dimensional semiconductor materials with smaller sizes, adjustable performance, and greater integration flexibility are the basis for developing a new generation of nano-optoelectronic devices and systems. Quantum dots occupy an important position in low-dimensional quantum structure materials owing to their unique structural and physical properties, which make them a promising, low-dimensional structural material for the next generation of optoelectronic devices. However, the performance of quantum dot-based devices has not matched the theoretical expectations of the material because quantum dots are difficult to fabricate at a high standard. As quantum dots are very small, the number of hot carriers is increased, which significantly affects the modulation speed and results in a decrease of the carrier collection efficiency of the device.

In a quantum well, another well-known low-dimensional structure, the carriers are constrained only in the direction of the well width, and the density of the state presents a ladder-like distribution, which is significantly larger than that of quantum dots. Thus, a quantum well is more suitable for the collection and storage of carriers than quantum dots. This makes it possible to study and develop a composite quantum structure that combines quantum dots and wells. As a new type of semiconductor low-dimensional quantum structure, the indium-based well-dot composite quantum structure inherits the advantages of both traditional quantum dots and wells while overcoming their inherent constraints due to its composite nature as well as the available control over the structure. Furthermore, well-dot composite quantum structures can be used to implement energy-band engineering more effectively, improve the physical and optical properties of traditional low-dimensional semiconductor materials, and expand optoelectronic device applications.

**Progress** This paper describes in detail the structural properties, optical characteristics, and application prospects of low-dimensional indium-based well-dot composite quantum structures. The content covers three types of structures: an indium-based well-dot tunnel-coupled quantum structure, a dots-in-a-well quantum structure, and a self-assembled indium-rich cluster composite quantum structure. For an indium-based well-dot tunnel-coupled composite quantum structure, the well and dots are generally separated by a spacer. The coupling degree between the well and dots is dependent on the material, component, and thickness of the spacer. The flexibility of this approach makes it possible to achieve better device performance.

For a dots-in-a-well composite quantum structure, the larger absorption cross section of the quantum well increases the well's ability to capture carriers, which limits their presence around the quantum dots. Thus, this type of composite quantum structure exhibits the significant fluorescence enhancement phenomenon. Because a quantum well can form a potential barrier, the probability of carriers escaping from the dots is reduced in this composite quantum structure.

A self-assembled indium-rich cluster composite quantum structure is constructed based on the unique indium-rich cluster effect which occurs during the epitaxial growth of the InGaAs/GaAs materials. The material has an irregularly strained quantum structure with different bandgaps and researches on this structure reveal that it possesses outstanding optical characteristics that have not been achieved by other quantum structures. The ultra-broad and uniform gain spectra in bipolarization, from this structure, indicate an opportunity for the development of high-performance semiconductor lasers, such as polarized dual-wavelength laser diodes, polarization-independent semiconductor optical amplifier devices, and ultra-broadband tunable semiconductor lasers with uniform spectral output power for all tunable wavelengths.

**Conclusion and Prospect** In conclusion, owing to the introduction of tunnel injection technology, well-dot tunnel-coupled composite quantum structures significantly improve the performance of optical devices, resulting in higher gains, lower currents, better temperature stability, higher speed modulation performance, and a lower linewidth enhancement factor. The structures show good application prospects in the development of high-performance semiconductor lasers and semiconductor optical amplifiers. In addition, the dots-in-a-well composite quantum structure effectively overcomes the inherent limitations of quantum dots, improves the density of quantum dots, enhances the carrier capture ability of the structure, and significantly improves optical performance. This composite structure shows great application value for optimizing the performances of quantum dot lasers, infrared detectors, solar cells, and other devices. Furthermore, the self-assembled indium-rich cluster composite quantum structure exhibits excellent optical properties, such as ultra-wide

and uniform gain, as well as bimodal spontaneous emission and absorption. The structure has shown broad development prospects for the realization of a new generation of ultra-wide tunable semiconductor lasers with uniform spectral power, polarized dual-wavelength lasers, and polarized independent semiconductor optical amplifiers. Simultaneously, as the lasing wavelength tuning range of the composite structure is in the terahertz band, it can be developed into a new tunable terahertz source in the future. In addition, we believe that in the future, by using an InGaAs indium-rich cluster composite quantum material as a new activation medium, combined with second-harmonic technology, we can achieve continuous high-power and wide-tuning short-wave laser output that is difficult for wide band gap materials. Because each well-dot composite structure has its own unique advantages and disadvantages, the structure can be selected according to the desired device's performance requirements, to maximize the advantages of the individual structure.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; InGaAs materials; low-dimensional composite quantum structure; indium-rich cluster effect; optical gain