MBE/MOCVD 专题

InAs/GaAs 自组织量子点的可控分子束外 延生长及其新型光电器件研究

陈英鑫 黄晓莹 杨灼辉 钟汉城 宋长坤 刘林 喻颖^{*} 余思远 (中山大学电子与信息工程学院光电材料与技术国家重点实验室 广州 510275)

High Quality InAs/GaAs Self-Assembled Quantum Dots Grown by Molecular Beam Epitaxy and their Application on Novel Optoelectronic Devices

CHEN Yingxin, HUANG Xiaoying, YANG Zhuohui, ZHONG Hancheng, SONG Changkun, LIU Lin, YU Ying^{*}, YU Siyuan (State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Electronics and Information Technology,

Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract Epitaxial quantum dots (QDs) are a promising candidate for opto-electronic devices (lasers, quantum light sources, etc.) due to their atom-like discrete energy levels, which can trap electrons/holes in all three dimensions. The performance of the devices strongly depends on the quality of the QD material and the effective interaction between the light field and the QD dipole. In this paper, we will start from the growth of high performance InAs/GaAs QDs using molecular beam epitaxy, and then the QD lasers applied in optical communication and on-chip optical interconnection, as well as high-quality QD based quantum light sources for photonic quantum information, will be further discussed.

Keywords Semiconductor quantum dot, Semiconductor lasers, Quantum light sources

摘要 半导体量子点因其具有类原子的分立能级结构,可在三维方向上对载流子运动进行束缚,因此被认为是光发射器件(激光器、量子光源等)极具前景的有源物质之一。其器件的性能强烈依赖于量子点材料的品质、光场与量子点偶极子场的有效相互作用等。本文将从半导体 InAs/GaAs 自组织量子点的可控分子束外延生长调控技术出发,进一步探讨应用于光通信、片上光互联领域的量子点激光器,以及应用于光量子信息领域的高品质量子光源器件。

关键词 半导体量子点 半导体激光器 量子光源
 中图分类号: TN36, TN248.4 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202210007

光与物质的相互作用是一个意义深远的话题, 其丰富的物理内涵不断被挖掘,新现象新机理不断 被发现,从而创造产生新的应用,如半导体激光器、 光通信、光传感、光学成像、光伏等,都带来了经济 的增长。深入到量子光学领域,则是对光子与单个 物质量子态之间的相互作用的进一步探索。在此 历程中也展现了一系列如激光捕获冷却原子(1999 年诺贝尔物理学奖)、单个量子态操纵与测量(2012 年诺贝尔物理学奖)等有趣的理论和实验研究成果,

人类逐步建立了对微观世界的认识。

基于分子束外延生长的半导体量子点材料,其 天然的岛状结构,会产生类似原子的分立能级,可 将电子-空穴对在三个维度进行全面束缚。因此,一 方面,高密度的量子点是半导体激光器的优秀增益 材料^[1],经过多年的实验验证,量子点激光器相比于 仅一维受限的量子阱激光器具有更好的温度稳定

收稿日期:2022-10-10

基金项目:国家重点研发计划项目 (2018YFA0306100; 2018YFB2200201); 国家自然基金重点项目 (62135012); 国家自然基金面上项目 (11704424); 广州市科技专项项目 (202103030001)

^{*}联系人: E-mail: yuying26@mail.sysu.edu.cn

性^[2]、更高的工作温度、更低的阈值电流密度^[3]、更高的微分增益、更小的线宽增强因子、更小的频率 啁啾效应^[4]、以及对表面复合与位错不敏感^[5]等众 多优越性能。另一方面,由于单个量子点的分立能 级结构可产生不同类型的激子态,同时又较易于片上集成与扩展,被认为是制备高品质量子光源(光发射)、构建可扩展性量子网络(光路由、光传输)最有 潜力的固态量子体系之一^[6]。它能够实现单光子的 确定性发射,产生线宽接近辐射极限的全同光子, 用以制备飞行光子比特^[7],也能够通过双激子级 联发射过程产生严格的或者时间重定序的纠缠光 子对^[8]。

进一步探索中,如何引入不同的谐振机制(微 腔、波导、拓扑结构等)用于增强光场和物质的相互 作用,是基础与应用科学中方兴未艾的研究方向之 一。依赖于成熟的光电集成技术,半导体量子点-谐 振腔耦合的功能器件和芯片也在蓬勃发展。在量 子点激光器的研究中,集成谐振结构的激光器凭借 其谐振腔对光场强烈的束缚作用(满足高品质因子 或者高模式体积)可以进一步降低半导体激光器器 件的阈值电流(降低功耗)与减小器件尺寸(利于扩 展集成)^[9-10]。另一方面,在量子点量子光源的研究 中,通过引入微腔中的帕塞尔(Purcell)效应/微纳波 导的导波模式以及量子点精确定位技术,可精确调 控量子点激子态发光的模式分布,有效提高单光子/ 纠缠光子的提取效率[11-12],是复杂的量子信息处理 实验(玻色取样等光量子计算、量子模拟、量子精密 测量等)实现的必要条件。

因此,本文将从量子点的分子束外延生长技术 出发,探讨生长过程中衬底温度、量子点高度的精 确控制,并探讨其在量子点 FP 腔激光器、DFB 腔激 光器及光泵薄膜激光器、量子点单光子源器件上的 优势与应用。

1 InAs/GaAs 自组织量子点的可控分子束 外延生长

在分子束外延生长过程中,由于 InAs/GaAs 的 晶格失配度约为 7%,在 GaAs 衬底上的 InAs 会先 以二维方式生长形成浸润层,当 InAs 淀积量超过应 力释放的临界值之后,累积的弹性能得到释放,开 始三维生长,并形成无位错的 InAs 量子点,此过程 遵循着 Stranski-Krastanow (S-K) 生长模式。通过对 生长过程中衬底温度、生长速率、淀积量、束流比、 生长停顿等参数的设计, 深入理解 In 原子的迁移扩 散、吸附解吸附过程, InAs 量子点的成核过程, 进而 调控 InAs 量子点的发光波长、尺寸、密度。下面以 衬底温度及量子点均匀性的精确控制为例介绍。

1.1 衬底温度的精确控制

自组织量子点的形成可看作在富 As 原子环境 下, In 原子在 GaAs 衬底表面的吸附、迁移、扩散、 解吸附及成核, 这些热力学过程都深受衬底温度的 影响, 因此需要在实验中精确控制衬底的温度。由 于分子束外延系统中所指的温度通常仅为某一点 热电偶探测的温度, 与实际衬底表面的温度及温度 分布有差异。在实验中通过反射高能电子衍射 (reflection high-energy electron diffraction, RHEED) 来监测 GaAs 层的再构转变温度(*T_e*), 并以此来标定 每一片衬底对应的实际生长温度。

进一步,为获取三寸 GaAs(001)衬底上的温度 分布,选取多个不同的温度条件(567℃到532℃,每 片间隔 5℃)来探索量子点密度分布与温度之间的 依赖关系^[13],如图1所示。从图1(c)的生长温度与 量子点统计密度可以看到,由于 InAs 的迁移速率随 温度的增加而增大,量子点密度随生长温度的增加 几乎呈线性降低趋势。因此可以根据调控生长温 度来获取想要的量子点密度。进一步对衬底上量 子点密度分布进行分析,即每隔 0.5 cm 距离取一 个测试点位进行原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)测试。图 1(b)为 [110] 晶向上对 应位置的 AFM 测试结果,量子点密度在衬底中心 较低,在一定范围内保持不变,靠近边缘密度较高, 不同晶向的变化趋势几乎相同(图1(d))。因此可 以从这个结果反推出衬底的温度分布,如图 1(e) 所 示,当测试点位距离三寸衬底中心的约2cm范围内, 其温度分布均匀,在靠近衬底边缘温度较低。

1.2 量子点高度的控制

以上结果展示了量子点在不同温度下的成核 特点,以此推断出衬底的大致温度分布,确定了同 一衬底片内的密度差异。为更准确控制 InAs 量子 点的沉积量,减小片间差异,本文在生长过程中引 入"烧点法"来确定量子点的临界成岛量(*θ*_c)。生长 的过程示意图如图 2(a),实际的量子点层的沉积量 以*θ*_c为参考。为了进一步提高量子点的均匀性,引 入 indium (In) flushing 工艺来削平量子点,获得更加 一致的高度。在表征时主要体现为光致发光荧光



- 图1 三英寸 GaAs 衬底上高密度 InAs/GaAs 量子点的密度分布。(a) 三英寸晶圆几何结构示意图,箭头直线表示晶向 [110] 和 [1-10],以及对角线 1 和对角线 2; 0 代表晶圆的几何中心,箭头方向分别代表正方向; (b) InAs 量子点样品材料在 [110] 晶 方向的原子力显微镜测试结果,(1)-(14) 表示从左到右间隔距离为 5 mm;(c) 量子点密度与衬底温度的函数关系,红色表示 误差范围;(d) 整片晶圆样品四个方向的密度分布,黑线代表 [110],红线代表 [1-10],绿线代表对角线 1,蓝线代表对角线 2。 (e) 三英寸晶圆的距离中心距离的温度分布,其中嵌入图形显示-2 至 2 厘米的温度波动很小^[13]
- Fig. 1 The density distribution of high density InAs/GaAs quantum dots (QDs) grown on 3-inch GaAs substrate. (a) 3-inch wafer geometric structure: crystallographic directions of [110] and [1-10], diagonal 1 and diagonal 2; 0 represents the geometric center of the wafer, the arrow direction represents the positive direction, respectively. (b) Representative atomic force microscope (AFM) results of InAs quantum dots in [110] crystallographic direction: (1)-(14) from left to right with 5 mm interval distance. (c) The density of QDs as a function of substrate temperature with red error bars. (d) Density distribution of the four directions of sample A of the whole wafer, black line represents [110], red line represents [1-10], green line represents diagonal 1, blue line represents diagonal 2, respectively. (e) wafer-scale temperature distribution of 3-inch wafer with inset graphics shows small fluctuation of temperature from -2 to 2 cm^[13]

(photoluminescence, PL)光谱的强度、波长以及线宽的变化。我们在生长 InAs 量子点后生长 2 nm 的 InGaAs 盖层,同温度下生长不同厚度的 GaAs 盖层,并升温使未被盖住的 In 原子解吸附。样品的 PL 谱结果如 图 2(b)-(c) 所示,当 GaAs 厚度小于 5 nm 时,随着厚度增加,量子点高度同时增加,光谱的中心波长逐渐发生红移,PL 谱强度逐渐增强。在 GaAs 盖层厚度为 4.5 nm 时,半峰宽(full width at half maximum, FWHM)最小,为 27.4 meV。表明此时量子点的高度均匀性最好。随着盖层继续增加,PL 谱的中心波长保持不变,线宽的增大幅度也很小,此时,Influshing 过程对量子点不起作用。因此,引入合适的 In-flushing 过程可以提高量子点的均匀性。

2 基于 InAs/GaAs 量子点的半导体激光器

以上优化了 InAs/GaAs 量子点分子束外延生长

的关键步骤,获得了密度大于 6×10¹⁰/cm²,半峰宽 为 27.4 meV(三层量子点)的高密度高均匀性量子 点材料,以下将讨论其作为作为增益介质应用于半 导体激光器上的研究进展及优势。

2.1 FP 激光器^[14]

法布里珀罗腔 (Fabry Perot, FP) 激光器通过自 然解理的端面形成谐振腔而获得激光输出。其量 子点激光器的外延结构如图 3(a) 所示。首先,在三 英寸 Si 掺杂 GaAs (001) 衬底上生长 500 nm 的 GaAs 缓冲层和 1.8 μm 的 N 型掺杂 Al_{0.4}Ga_{0.6}As 限制 层。然后外延生长五层由 35 nm 厚的 GaAs 层分离 的量子点有源层。每个量子点有源层包含 2.4 ML 的 InAs 以及 3.5 nm 的 In_{0.15}Ga_{0.85}As 作为盖层拓展 波长至 1310 nm,并对量子点下 10 nm 处的 GaAs 材 料进行调制 P 型掺杂,使每个量子点平均可以获得



- 图2 InAs/GaAs 量子点的高度调控。(a) 设计用于制备单层高密度 InAs 量子点的量子点生长过程示意图; (b) 不同 indium flushing 条件下 InAs 量子点材料的光致发光光谱; (c) 不同 indium flushing 厚度条件下 InAs 量子点材料的 FWHM 值
- Fig. 2 The height optimization of self-asssembled InAs quatnum dots (QDs). (a)Schematic process of the high density InAs/GaAsQDs growth; (b)Photoluminescence spectra of InAs QDs under different indium flushing conditions; (c)FWHM values of PL spectra under different indium flushing conditions

20 个受主以获得较好的微分增益。在有源层上方 生长 1.8 μm 的 Be 掺杂 Al_{0.4}Ga_{0.6}As 限制层与 100 nm 的 GaAs 作为 P 电极接触层。使用完全相同的 生长工艺,在另一片 GaAs 衬底上外延生长出量子 点有源层结构,如图 3(b)可得其量子点密度为 5.5× 10¹⁰/cm²,材料增益峰波长为 1308 nm,对应半高全 宽为 30.9 meV。此外,从 PL 谱上还可以看出材料 基态和第一激发态间的能量间隔超过 80 meV,可以 有效抑制载流子在高温下的热展宽。

进一步,作者利用微加工工艺制备了 20 µm 脊 宽的解理端面 FP 激光器。图 3(c) 展示了 2 mm 腔 长的器件连续电泵浦光功率-电流-电压(*L-I-V*)测试 结果。室温(25℃)下,阈值电流为 80 mA,对应阈值 电流密度为 200 A/cm²。变温测试显示,该样品能够 实现超过 115℃ 的高温工作性能,拟合不同温度下 的阈值电流可得: 25℃–55℃ 和 65℃–115 ℃ 两个温 度范围内的特征温度 T_0 分别为 98 K 和 53 K。由于 器件工艺采用的是正面热沉方案,在实际工作中, 结温大于温控台测试温度。如果使用倒装焊技术 和脉冲泵浦,应该可以获得更优异的变温性能。

2.2 侧壁耦合光栅的 DFB 激光器^[14]

相比于 FP 半导体激光器,在光通信、激光雷达、

光传感以及量子技术等应用领域中还需要更为高 性能的窄线宽、低噪声并对光反馈具有强的耐受能 力的半导体激光器作为重要的核心器件。而利用 布拉格光栅对半导体激光器的工作波长进行选择 的分布式反馈(distributed-feedback, DFB)或分布式 布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)结构 是获得高性能单纵模半导体激光器的重要方法。 DFB 激光器的常规制作方法通常是将光栅结构通 过掩埋的方法嵌入至有源层的上方或者下方[15],但 该方法技术难度较高,不仅需要高精度的光栅图形 曝光和转移,还需要对器件进行表面预处理后再进 行二次外延生长。另一种纵向选模的方案是侧壁 耦合光栅 (laterally coupled grating, LC grating)。通 过在脊波导侧壁构建反馈光栅结构对其模式进行 调制(倏逝波耦合)而实现单纵模。传统的 LC-DFB 一般采用一次性刻蚀波导或侧壁金属光栅实现^[16]。 但由于浅刻蚀的可 TE_m模工作 LC-DFB 中, 光栅与 光场的相互作用发生在波导的衔接处,如何通过实 现完美的刻蚀角度、无 footing 的波导形貌, 而获得 确定性的光栅耦合系数,一直是当前领域面临的重 大挑战之一。

为此,作者提出了一种新型侧壁耦合 DFB 激光



- 图3 InAs/GaAs QD 激光器的材料特性。(a) 外延层结构的截面扫描电子显微镜 (SEM) 图像。 插入的是透射电子显微镜 (TEM) 结果。(b) GaAs 上 QD 层的光致发光光谱。 插图显示了原子力显微镜测试结果 (AFM)。(c) 制备的长度为 2000 µm 激光器在 25℃~115℃ 不同温度下的连续泵浦光功率-电流-电压 (*L-I-V*) 特性。插图为阈值电流与温度的依赖关系。 虚线表示对实验数据的线性拟合^[14]
- Fig. 3 Material properties of InAs/GaAs QD lasers. (a) Cross-sectional scanning electron microscope (SEM) image of layer stack of the epi-wafer. The inset is the transmission electron microscope (TEM) image of the five QD layers. (b) Photoluminescence spectrum of the QD active layers on GaAs. The inset shows the atomic force microscope (AFM) image of an uncapped QD layer. (c) Light–current–voltage (*L–I–V*) characteristics of the fabricated laser with a length of 2000 µm and its temperature dependence under continuous-wave (CW) condition ranging from 25 °C to 115 °C. The inset shows the natural logarithm of threshold current versus stage temperature. The dashed line represents linear fitting to the experimental data^[14]

器方案^[14](图 4(a)),这种方案采用低损耗非晶硅介 质作为光栅材料。通过优化梯形波导刻蚀工艺,获 得了接近零 footing 的波导形貌。精细调试非晶硅 光栅的高精度电子束曝光和深反应离子刻蚀工艺 后,可实现高稳定性和重复性的反馈选模(光栅形貌 如图 4(b)所示)。本文在前述优化的高性能 InAs/GaAs量子点增益外延材料的基础上,通过工 艺加工在1310 nm 波段实现了输出功率达26.6 mW, 在 80 mA 注入电流下,边模抑制比可高达52.7dB 的电泵浦室温连续工作量子点 DFB 激光器。新型 光栅具有高稳定的耦合反馈系数,使得激光器能够 在连续变电流条件下进行单纵模激射,具有非常高 的单模成品率。

此外,为证明该结构具有超高精度光栅制备的 可行性,作者成功研制了符合细波分复用(LAN wavelength division multiplexing, LWDM)波长分布 的八通道激光器阵列光谱(图 4(d))。在高电流注入 下,器件测试表征得到了低于-165 dB/Hz 的超低相 对强度噪声(图 4(e)),以及大于-12.5 dB(5.9%)高抗 光反馈能力(图 4(f))。通过利用半导体自组织量子 点对载流子的三维限制作用,以及极小线宽增强因 子的特性,与新型光栅的高性能单模激射相结合, 使得该新型 LC-DFB 激光器展示出无隔离应用的潜 力。这种新型 LC-DFB 激光器具有极高的单模成品 率,超低的 RIN 和高抗光反馈性能,并具有无需二 次外延的特性,使制备成本同时也大幅降低。

2.3 基于连续域束缚态的光泵薄膜激光器[17]

更小尺寸和更低阈值的高性能激光器是光子 集成芯片(photonic integrated circuits, PICs)中的核 心器件,对光通信,芯片级固态激光雷达和量子信



图4 基于非晶硅侧壁光栅的量子点 DFB 激光器。(a) 非晶硅侧壁耦合光栅结构示意图,(b) 非晶硅光栅 SEM 俯视图,(c) 脊宽 为 2.1 μm, 腔长为 1.5 mm 激光器的 LIV 曲线,(d) 室温 100 mA 注入电流下 LWDM 激光器阵列光谱,(e) 室温不同注入电 流下激光器相对强度噪声曲线,(f) 不同注入电流下 5 GHz 频率的相对强度噪声与反馈强度关系曲线,插图为注入电流为 4 倍阈值时不同反馈强度下的光谱变化^[14]

Fig. 4 quantum dot DFB laser using amorphous silicon laterially coupled grating. (a) Schematic diagram of amorphous silicon laterially coupled grating structure, (b) SEM top view of amorphous silicon grating, (c) IPV curve of a laser with a ridge width of 2.1 μm and a cavity length of 1.5 mm, (d) Spectrum of LWDM laser array under 100 mA injection current at room temperature, (e) Relative intensity noise curves of lasers under different injection currents at room temperature; (f) relation curves between relative intensity noise at 5 GHz frequency and feedback intensity under different injection currents; insets show spectral changes under different feedback intensities when the injection current is 4 times the threshold^[14]

息等领域的发展具有重要的意义。实现这种激光器的一般方法是通过将增益材料嵌入高品质因子(quality factor, Q)和小模式体积的少波长或亚波长尺度的光学微腔中,有效捕获光并增强光-物质相互作用。通过引入光子晶体缺陷或连续域束缚态(Bound States in Continuum, BICs),在平板光子晶体上已实现了超低阈值的激射。基于连续域束缚态的光子晶体激光器则表现出较强的鲁棒性,并因其理论上奇特的高Q特性被大量关注和研究。然而,为接近理想的BICs,平板光子晶体通常需要上百个周期的结构单元发挥作用,使得器件的尺寸无法进一步减小。此外,由于BICs只能够实现纵向一个维度的光限制,其阈值也难以进一步降低。

为此,作者采用了小型化连续域束缚态 (Miniaturized BICs, mini-BICs)的思路^[18],结合连续 域束缚态的纵向限制作用和光子晶体禁带反射结 构的横向限制作用,实现对光子的三维限制,如 图 5(a)所示。A 是 Na×Na 的圆孔阵列,其周期为*a*, 作为微腔区域; B 的周期为 b, 通过设计 A 的连续域 束缚能态(M₁₁, M₁₂/M₂₁ 和 M₂₂ 等)恰好处于 B 的禁 带中,可实现对 A 微腔模式的横向限制作用, 如 图 5(b) 所示。图 5(c) 展示了 Na=13 的器件刻蚀过 后的电镜照片。同时, O 波段的 InAs/GaAs 量子点 作为增益材料,可实现对载流子的三维限制。其 M11 模式的辐射强度和线宽随泵浦能量的变化如 图 5(d) 所示。此结果表明, 作者实现了低阈值的连续 光泵浦激射的薄膜激光器, 其阈值功率为 52 μW^[17]。 图 5(e) 展示了不同泵浦能量下的辐射光谱。此方 案采用薄膜转移技术制备的 mini-BICs 激光器具有 灵活性, 可在不同的衬底上制备实现, 如在硅或铌 酸锂上。同时三维限制光子和载流子的能力也有 望为小尺寸的薄膜激光器的研究提供新途径。

InAs/GaAs 单量子点的能级调控及量子 光源实现^[19]

如前所述, S-K 模式生长的 InAs/GaAs 单量子



图5 超低阈值的连续光泵浦量子点 min-BIC 激光器。(a) mini-BICs 激光器的示意图;(b) 平板光子晶体的能带图:处于光线 (Light Line)以上辐射域中有限光子晶体 A 的能态,位于区域 B 的带隙中;(c) mini-BICs 激光器的电镜照片;(d) M11 模式 的辐射强度和线宽随泵浦功率的变化规律表明,激光阈值为 52 μW。图中的插图是在阈值以下光谱的 Lorentz 曲线拟合, 表明 M11 模式线宽为~0.48 nm,因此腔 Q 因子约为 2715;(e) 激光器在不同泵浦功率下的辐射光谱^[17]

Fig. 5 Ultra-low threshold, continue wave, optical pumped quantum dot min-BIC laser. (a) Schematic of a mini-BIC cavity (region A) encircled by a boundary of photonic bandgap (region B) to form a photonic heterostructure. (b) The calculated band diagrams of infinite photonic crystal (PhC) slabs: the continuous band (TE A, represented by the black dashed line) of an infinitely large PhC splits into a series of discrete modes above the light line and located in the bandgap of region B (TE B, represented by the blue solid line). (c) Scanning electron microscopy (SEM) images of the mini-BIC laser with a = 495 nm and N_a = 13. (d) The collected emission intensity and the linewidth of the lasing M11 peak at 1303 nm as a function of pumping power, indicating a lasing threshold of 52 μ W (227 W/cm²). The inset is a Lorentzian curve fitting of the spectra just below the threshold, which indicates a linewidth of ~0.48 nm and therefore a cavity Q factor of 2715. (e) Measured emission spectra under various pumping power ^[17]

点,具有分立的激子态,通过电泵浦或者光泵浦的 方式可发射单光子或纠缠光子对,用于制备量子光 源。其中,通过控制 InAs/GaAs 量子点的尺寸,能够 调控激子态的发射波长。然而,由于 S-K 模式过程 中二维 InGaAs 浸润层的存在,浸润层和量子点的 电荷载流子通常会存在库仑相互作用,从而导致量 子态的杂化。

为解决这个问题,一种可行的方法是在 InAs/GaAs量子点的顶部沉积单层的AlAs^[20]。较 高的AlAs势垒可以在一定程度上阻碍周围电荷环 境对量子点的影响,从而获得较为纯净的激子态谱 线。如图 6(a)所示,作者通过在InAs/GaAs量子点 的顶部沉积一层极薄的AlGaAs层,并讨论了浸润 层态、激子精细结构劈裂与AlGaAs势垒之间的关 系,最终获得无浸润层态、精细结构劈裂小的激子 态发光^[19]。具体的实验中,作者先通过八带 k·p 方 法对包括浸润层和势垒的能带结构和相应的电子/ 空穴波函数进行了模拟计算。图 6(b)的结果表明 AlGaAs 势垒能够减少电子和空穴波函数的在浸润 层内的重叠程度。因此,超薄 AlGaAs 覆盖层可以 有效地抑制浸润层态的发光,减小量子点的电子和 空穴状态与浸润层态的发光,减小量子点的电子和 空穴状态与浸润层态的制合。其次,作者测量了中 性激子和双激子态的能级精细结构分裂(FSS)值, 发现 覆盖 AlGaAs 的量子点的 FSS 几乎随着 AlGaAs 覆盖层中的 Al 组分线性增加。理论上, FSS 与量子点形状、组分的各向异性有关,通过调 控生长条件,有效地控制原子在不同晶向上迁移、 解吸附,可获得在 880 nm/ 980nm 的 FSS 较小的激 子-双激子态(图 6(c))。最后,作者还对单量子点进 行了双光子共振激发,如图 6(d)所示,在"π脉冲"



- 图6 包含 AlAs 薄盖层的无浸润层发光的 InAs/GaAs 单量子点。(a) 含有极薄的 AlGaAs 盖层的 InAs/GaAs 量子点的 STEM 图 以及 EDX 扫描结果; (b) GaAs/WL (1nm)/Al_xGa_{1x}As/GaAs 量子阱结构的能带计算结果, 包含了随 Al 组分变化的电子的第一激发态能量(E1, 红线), 空穴的第一激发态能量(HH1, 蓝线), 二者间的带隙(E1→HH1, 灰线), 以及在 Al 组分为 0, 0.4, 1 时电子空穴的波函数(右侧); (c) 优化后量子点的 FSS 值, 此结果通过拟合激子态的峰值能量的变化来获得; (d) 在双光子共振下, 激子态、双激子态的发光谱线, Rabi 振荡以及二阶相关联函数测试结果^[19]
- Fig. 6 InAs/GaAs single quantum dot with ultra-thin AlAs capping layer. (a) STEM images taken along the [110] crystallographic direction of a single InAs/GaAs QD with a thin AlAs capping layer, the lower panel is the EDX elemental mapping of the blue box in the STEM image. (b) Calculated energy-band profiles for the GaAs/WL (1nm)/Al_xGa_{1-x}As/GaAs quantum wells (QW). The left panel shows first excited state energies of electron (E1, red line) and heavy-hole (HH1, blue line), as well as the transition energy (E1→HH1, bandgap of WL, grey line) as a function of the aluminum concentration x in AlxGa1-xAs, and the right panel is the first excited energy diagram and corresponding electron/hole wavefunctions where x=0, 0.4 and 1. (c) The optimized FSS value of InAs QD, which obtained from the amplitude of a sine fitting of the relative emission energy as a function of polarization angles. (d) Photoluminescence spectra of the biexciton-exciton cascade and a suppressed two-photon resonant excitation laser, together with the damped Rabi oscillations and the second-order autocorrelation measurement^[19]

双光子共振激发下,通过激子态、双激子态的发光 谱线绘制了积分强度与激发功率平方根的函数曲 线,可以看出明显的 Rabi振荡,证明了相干性良好 的物质-光相互作用,并得出 g⁽²⁾值为 0.0385 ± 0.0013,该结果证明这些量子点发射的光子具有反 聚束性。以上这些结果为实现高品质的量子光源 夯实了很好的材料基础。

4 总结与展望

本文讨论了 InAs 量子点在 GaAs 衬底上异质 外延的 SK 自组装生长模式,在高密度量子点的制 备上,实现了高密度高均匀性量子点,制备了阈值 电流为 16 mA,边模抑制比达 52 dB,功率达 26.6 mW 的 DFB 激光器,及小尺寸的光泵浦薄膜激光器, 将为光通信以及片上光互联方向的应用提供了新 的思路。另一方面,在低密度量子点的制备上,实 现了低密度量子点的可控外延生长,结合双光子共 振激发,将为可扩展的高亮度单光子源及其在光量 子计算领域的应用奠定基础。

参考文献

ture of quantum dot photonic integrated circuits[J]. APL Photonics, 2018, 3: 030901

- [2] Kageyama T, Nishi K, Yamaguchi M, et al. Extremely high temperature (220°C) continuous-wave operation of 1300-nm-range quantum-dot lasers[J]. 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/ EQEC), 2011; 1–1
- [3] Liu H Y, Liew S L, Badcock T, et al. p-doped 1[J]. 3µm InAs/GaAs quantum-dot laser with a low threshold current density and high differential efficiency. Applied Physics Letters, 2006, 89: 073113
- [4] Dong B, Chen J D, Lin F Y, et al. Dynamic and nonlinear properties of epitaxial quantum-dot lasers on silicon operating under long- and short-cavity feedback conditions for photonic integrated circuits[J]. Physical Review A, 2021, 103: 033509
- [5] Chen S M, Li W, Wu J, et al. Electrically pumped continuous-wave III–V quantum dot lasers on silicon[J]. Nature Photonics, 2016, 10: 307–311
- [6] Aharonovich I, Englund D, Toth M, Solid-state singlephoton emitters. Nature Photonics. 2016, 10: 631.
- [7] Wang H, Duan Z C, Li Y H, et al. Near-Transform-Limited Single Photons from an Efficient Solid-State Quantum Emitter[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(21): 213601
- [8] Muller M, Bounouar S, Jons K D, et al. On-demand generation of indistinguishable polarization-entangled photon pairs[J]. Nature Photonics, 2014, 8: 224
- [9] Ma R M, Oulton R F. Applications of nanolasers[J]. Nature Nanotechnology, 2019, 14(1): 12–22
- [10] Hill M T, Gather M C. Advances in small lasers[J]. Nature Photonics, 2014, 8(12): 908–918
- [11] Wang H, He Y M, Chung T H, et al. Towards optimal single-photon sources from polarized microcavities. Nature Photonics. 2019, 13: 770-775.

- [12] Najer D, Söllner I, Sekatski P, et al. A gated quantum dot strongly coupled to an optical microcavity[J]. Nature, 2019, 575: 622–627
- [13] Huang X Y, Su R B, Yang J W, et al. Wafer-Scale Epitaxial Low Density InAs/GaAs Quantum Dot for Single Photon Emitter in Three-Inch Substrate[J]. Nanomaterials, 2021, 11(4): 930
- [14] Yang Z H, Ding Z Q, Liu J, et al. High-performance distributed feedback quantum dot lasers with laterally coupled dielectric gratings[J]. Photonics Research, 2022, 10(5): 1271
- [15] Wan Y, Norman J C, Tong Y, et al. 1[J]. 3 μ m Quantum Dot-Distributed Feedback Lasers Directly Grown on (001) Si. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14: 2000037
- [16] Li Q Z, Wang X, Zhang Z Y, et al. Development of Modulation p-Doped 1310 nm InAs/GaAs Quantum Dot Laser Materials and Ultrashort Cavity Fabry –Perot and Distributed-Feedback Laser Diodes[J]. ACS Photonics, 2018, 5: 1084–1093
- Zhong H C, Yang J W, Ding Z Q, et al. Ultra-low threshold continuous-wave quantum dot mini-BIC lasers[J].
 Light: Science & Applications, 2023: DOI: 10.1038/ s41377-023-01130-5
- [18] Chen Z H, Yin X F, Jin J C, et al. Observation of miniaturized bound states in the continuum with ultra-high quality factors[J]. Science Bulletin, 2022, 67(4): 359–366
- [19] Huang X Y, Yang J W, Song C K, et al. Self-assembled InAs/GaAs single quantum dots with suppressed InGaAs wetting layer states and low excitonic fine structure splitting for quantum memory[J]. Nanophotonics, 2022, 11(13): 3093–3100
- [20] Löbl M C, Scholz S, Söllner I, et al. Excitons in InGaAs quantum dots without electron wetting layer states. Communications Physics, 2019, 2 (1).