

利用 InAs/GaAs 数字合金超晶格改进 InAs 量子点有源区的结构设计*

杜安天¹⁾²⁾ 刘若涛²⁾³⁾ 曹春芳²⁾ 韩实现²⁾³⁾ 王海龙^{1)†} 龚谦^{2)3)‡}

1) (曲阜师范大学物理工程学院, 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165)

2) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 中科院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

3) (中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049)

(2023 年 2 月 23 日收到; 2023 年 3 月 27 日收到修改稿)

利用分子束外延技术, 通过 InAs/GaAs 数字合金超晶格代替传统的直接生长 InGaAs 层的方式, 在 GaAs(100) 衬底上生长了 InAs 量子点结构并成功制备了 1.3 μm InAs 量子点激光器. 通过原子力显微镜和光致荧光谱测试手段, 对传统生长模式和数字合金超晶格生长模式的两种样品进行了表征, 研究发现采用 32 周期 InAs/GaAs 数字合金超晶格样品的量子点密度非常高, 发光性能良好. 通过与常规生长方式所制备激光器的性能对比, 发现采用 InAs/GaAs 数字合金超晶格生长 InAs 量子点的有源区也可以得到高质量的激光器. 利用该方式生长的 InAs 量子点激光器的阈值电流为 24 mA, 相应的阈值电流密度仅为 75 A/cm², 最高工作温度达到 120 °C. InAs/GaAs 数字合金超晶格既可以保证生长过程中源炉的温度保持不变, 还可以对 InGaAs 层的组分实现灵活调控. 不需要改变生长速度, 通过改变 InAs/GaAs 数字合金超晶格的周期数以及 InAs 层和 GaAs 层的厚度, 便可以获得任意组分的 InGaAs, 从而得到不同发光波长的激光器. 这种生长方式对量子点有源区的结构设计和外延生长提供了新思路.

关键词: 量子点, 半导体激光器, 分子束外延, 数字合金超晶格

PACS: 81.07.Ta, 42.55.Px, 81.15.Hi, 74.78.Fk

DOI: 10.7498/aps.72.20230270

1 引言

量子点结构材料具有独特光电特性, 在过去 40 年里吸引了研究者们广泛的关注^[1-5]. 与传统的量子阱和量子线激光器相比, 量子点激光器具有更多优越性, 其中包括较低的阈值电流密度、更高的输出功率、更高的工作温度、窄线宽增强因子以及抑制侧壁复合率等优势^[6-11]. 由于量子点能级是分立的, 在低载流子浓度条件下就可以实现粒子数反转, 并且量子点中基态载流子的寿命短, 可以

高效地实现电光转化^[12]. 在体材料中, 随着温度升高, 载流子会随之连续分布到更高的能量态上. 在量子点中的能级存在较大的能量差, 这种分立能级能有效地抑制温度造成的载流子在不同能量态上的再分布. 因此量子点激光器对温度不敏感^[13]. 此外, 量子点激光器中注入的载流子被限制在量子点中抑制了载流子向侧壁扩散从而减少了漏电损失. 异质外延有三种生长模式, 第一种是二维层状生长, 称为 Frank-van der Merwe (F-vdM) 方式, 第二种是三维岛状生长, 称为 Volmer-Weber (V-W) 方式. 第三种是层状生长加三维成岛生长模式, 称

* 国家自然科学基金 (批准号: 61674096) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hlwang@qfnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: qgong@mail.sim.ac.cn

为 Stranski-Krastanow (S-K) 模式^[14]. 1993 年, Leonard 等^[15] 首次提出利用分子束外延的生长方法制备应变驱动自组装量子点结构, 随后量子点激光器在器件性能方面取得了长足的进步, 在通信、医学及军事等领域都有极其重要的应用^[16–18].

利用分子束外延技术在 GaAs 上直接制备 InAs 量子点, 很难将量子点的发光波长拓展至 1.31 μm 光通信波段. 目前 GaAs 基 InAs 量子点激光器的有源区基本采用 InAs DWELL (dot-in-well) 结构^[3,19,20], 以该结构作为有源区制备的量子点激光器在 1.31 μm 通信波段有广阔的应用前景^[21]. 2021 年, 牛智川课题组通过短周期超晶格 (short period superlattice, SPS) 生长了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ 四元数字合金势垒层, 制备了高性能的 GaSb 基量子级联激光器^[22]. 2023 年, Kumar 等^[23] 通过 InAs/InGaAs 短周期超晶格生长的渐变数字合金盖层来释放 InAs 量子点的应变.

超晶格材料是两种不同的材料以几纳米到几十纳米的薄层交替生长并保持严格周期性的多层薄膜, 换一种说法就是以特定形式组合而成的层状精细复合材料. 数字合金超晶格是通过短周期超晶格的生长方式得到的复合材料, 可以把数字合金超晶格看作是一个整体, 替代传统生长的化合物, 通过构建短周期超晶格, 表现出与化合物类似的物理性质, 如带隙和折射率等. 本文利用分子束外延技术, 通过 InAs/GaAs 数字合金超晶格代替常规直接生长 InGaAs 的方式, 在 GaAs 衬底上成功制备了 InAs 量子点激光器结构, 在此基础上制备的激光器实现了 1.31 μm 的室温连续激射. InAs/GaAs 数字合金超晶格可以对 InGaAs 层的组分实现灵活调控, 该方式对 InAs 量子点有源区的结构设计和外延生长提供了新思路. 通过对两种不同生长方式激光器的性能对比, 发现采用 InAs/GaAs 数字合金超晶格生长 InAs 量子点的有源区也可以得到性能良好的激光器.

2 实 验

使用 DCA P600 固态源分子束外延系统在 4 in (1 in = 2.54 cm) n 型 GaAs(100) 衬底上生长了 InAs 量子点激光器结构, 量子点激光器结构示意图如图 1 所示. 先在 GaAs 衬底生长 1 μm 厚度的 n 型 GaAs 缓冲层, 接着生长 1 μm 厚度的

AlGaAs 势垒层. 然后生长 6 个周期的 AlGaAs/GaAs 超晶格层作为过渡, 其中 AlGaAs 和 GaAs 的厚度均为 2 nm. 随后生长 70 nm 厚度的 GaAs 波导层, GaAs 和 AlGaAs 的生长温度均为 730 $^{\circ}\text{C}$. GaAs 基 InAs 量子点激光器结构为分离限制层异质结构, 有源区采用 5 层 InAs DWELL 结构. 其从下至上包括 InGaAs 应变缓冲层 (strained buffer layer, SBL), 沉积厚度 2.7 ML (ML 表示覆盖的原子层数量) 的 InAs 量子点, InGaAs 应变释放层 (strained reducing layer, SRL), 其中 In 的生长速率为 0.102 ML/s, Ga 的生长速率为 0.532 ML/s, 含 In 层的生长温度均为 620 $^{\circ}\text{C}$. 在多层 InAs DWELL 结构中, 用 GaAs 作为隔离层分开, 空间隔离层的厚度为 50 nm, 生长温度为 730 $^{\circ}\text{C}$.

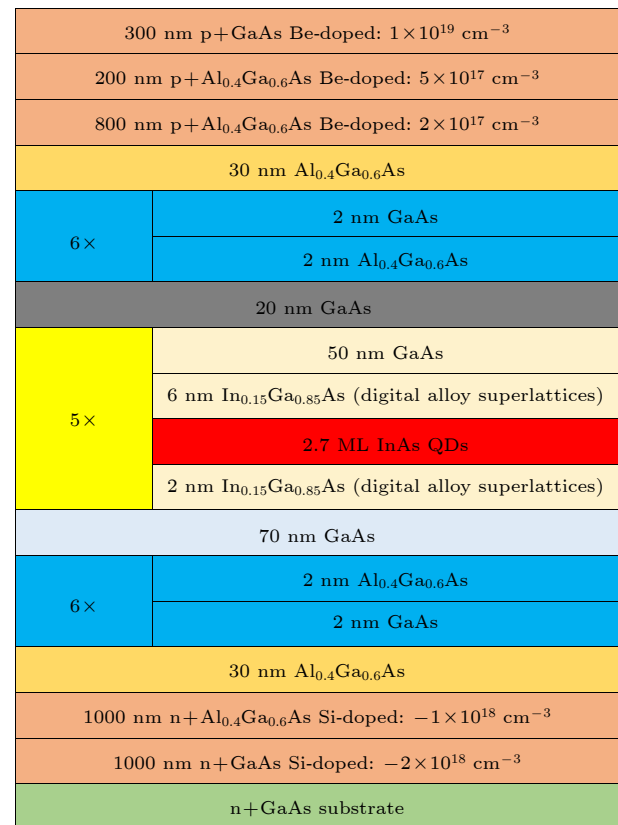


图 1 GaAs 基 InAs 量子点激光器结构示意图
Fig. 1. Schematic diagram of GaAs based InAs quantum dot laser structure.

SRL 与 SBL 采用两种不同的生长方式. 一种是用常规的方式, 分别生长了 2 nm 厚的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 和 6 nm 厚的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$, 该方式生长的样品用 DAL-0 表示; 另一种是采用数字合金超晶格的生长方式分别生长了 8, 16 和 32 个周期的 InAs/GaAs, 生长的样品用 DAL-8, DAL-16 和 DAL-32 来表示.

其中, DAL-8 样品的 SBL 和 SRL 分别生长 2 个周期和 6 个周期的 InAs/GaAs 数字合金超晶格, 每个周期 InAs 的厚度为 0.16 nm (0.528 MLs), GaAs 的厚度为 0.84 nm (2.97 MLs). DAL-16 样品的 SBL 和 SRL 分别生长 4 个周期和 12 个周期的 InAs/GaAs 数字合金超晶格, 每个周期 InAs 的厚度为 0.08 nm (0.264 MLs), GaAs 的厚度为 0.42 nm (1.49 MLs). DAL-32 样品的 SBL 和 SRL 分别生长 8 个周期和 24 个周期的 InAs/GaAs 数字合金超晶格, 每个周期 InAs 的厚度为 0.04 nm (0.132 MLs), GaAs 的厚度为 0.21 nm (0.743 MLs). 通过原子层数量可以得到 DAL-8, DAL-16 和 DAL-32 这 3 组样品的组分均为 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$.

与常规 InGaAs 的生长方式相比, 采用 InAs/GaAs 数字合金超晶格的生长方式具有传统生长方式不具备的优点. 1) 在分子束外延生长的过程中, 由于整个 InAs DWELL 结构很薄, 生长时间非常短, 为了避免源炉频繁升降温导致系统不稳定, 需要尽可能地把源炉的温度保持在生长所需要的固定值, 而 InAs/GaAs 数字合金超晶格的生长方式可以很方便实现这一点. 2) InAs 量子点两侧的 InGaAs 垒层的 In 组分会对发光波长产生影响, 短波长发光要求 In 组分比较低, Ga 的组分较高. 为了得到高质量的量子点, 需要保证 In 的生长速度在 0.1 ML/s 附近, 因此要降低 InGaAs 中 In 的组分, 必须提高 Ga 的生长速度. 例如要得到 In 组分为 0.1 的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$, 需要把 Ga 的生长速度提高到 0.9 ML/s 甚至更快. 3) 通常要得到不同组分的 InGaAs, 需要生长多个测试片进行组分的校准. 而 InAs/GaAs 数字合金超晶格的生长方式, 不需要生长新的测试片校准 InGaAs 组分, 可以通过改变 InAs/GaAs 的周期数、InAs 层和 GaAs 层的厚度, 实现对 InGaAs 组分调控, 可以节省生长时间和源炉原料, 提高 MBE 生长的便捷性. 这种生长方式利用分子束外延技术在制备超晶格方面的独特优势: 使用机械结构挡板能够对生长的材料进行快速切换, 同时可以获得平整的异质结界面.

虽然 InAs/GaAs 数字合金超晶格的生长方式具有优势, 但其是否会对量子点的发光和器件性能造成不良影响, 目前还未见相关的研究报道. 本文利用生长 InAs/GaAs 数字合金超晶格的方式, 生长了多个不同周期的量子点样品, 并与常规方式生长的样品进行了测试比较, 在此基础上制备了量子

点激光器, 并对两种激光器性能进行了测试分析与比较.

GaAs 基 InAs 量子点激光器的工艺采用标准的光刻和刻蚀工艺. 刻蚀至有源区上层的 GaAs 波导层制作脊条, 然后沉积 200 nm 的 SiN_x . 继续在脊条上的上电极 GaAs 接触层用反应离子刻蚀 (reactive ion etching, RIE) 去掉 SiN_x 开好窗口, 沉积 Ti/Pt/Au 形成 p 型欧姆接触, 然后将 GaAs 衬底减薄至 150 μm , 沉积 GeAu/Ni/Au 后退火形成 n 型欧姆接触. 图 2 给出了典型的脊条宽度为 4 μm 的量子点激光器的截面扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图. 实验所用的傅里叶光谱仪型号为 Thermo Scientific Nicolet iS50, 配备 GaF_2 分束镜和液氮制冷的 InSb 探测器, 用于光致荧光 (photoluminescence, PL) 谱的测试. 使用 Veeco 公司的 Multimode Nanoscope III SPM 设备对量子点样品的表面形貌进行原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 测试. 对激光器的性能进行测试时, 使用集成温控的 Thorlabs ITC4020 电流源对激光器进行温度控制和电流调节, 利用 Thorlabs S145C InGaAs 探测器进行激光器功率测试.

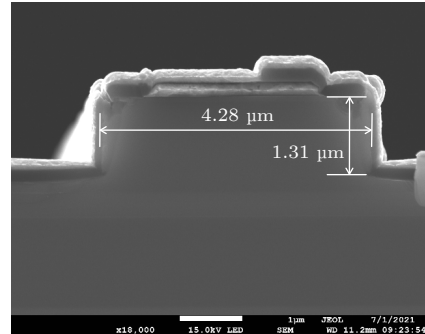


图 2 GaAs 基 InAs 量子点激光器截面 SEM 图

Fig. 2. Cross section SEM of InAs quantum dot laser on GaAs.

3 结果与讨论

对不同周期的 InAs/GaAs 数字合金超晶格的量子点样品进行了 AFM 与 PL 的测试, AFM 测试结果如图 3 所示. 可以看出, DAL-8 样品 (InAs/GaAs 的生长周期数为 8) 表面的量子点密度比较低, 尺寸分布不均匀, 而且缺陷点的个数较多, 该样品的量子点密度为 $2.09 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. 这是由于周期数少时 InAs/GaAs 数字合金超晶格中的 GaAs

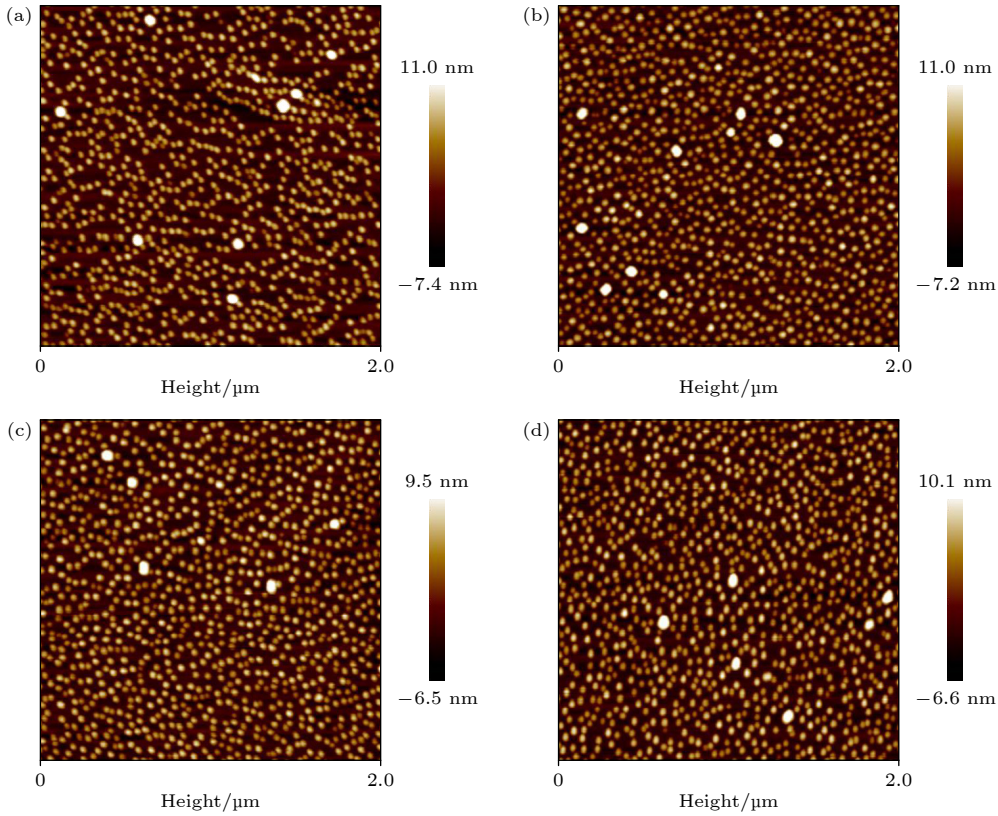


图 3 InAs 量子点 $2\ \mu\text{m}\times 2\ \mu\text{m}$ 的 AFM 图像 (a) DAL-8; (b) DAL-16; (c) DAL-32; (d) DAL-0

Fig. 3. AFM images of InAs quantum dots $2\ \mu\text{m}\times 2\ \mu\text{m}$: (a) DAL-8; (b) DAL-16; (c) DAL-32; (d) DAL-0.

层会比较厚, 在生长量子点时量子点受到的应力会增大, 当应力大到足以破坏 InAs/GaAs 界面的力平衡时, 开始形成位错岛. 在这种情况下, 由于较大的量子点表面具有较高的化学势, In 原子会从较小的量子点迁移到较大的量子点, 从而形成又大又亮的缺陷点, 这种现象也被称为奥斯特瓦尔德成熟机制^[24]. 当 InAs/GaAs 周期数增加到 16(DAL-16) 和 32(DAL-32) 时, 量子点密度有明显提升, 分别为 2.61×10^{10} 和 $2.58\times 10^{10}\ \text{cm}^{-2}$, 增加至常规生长的密度水平 ($2.57\times 10^{10}\ \text{cm}^{-2}$). 当生长周期为 32 时, 量子点的缺陷点个数为 5 个, 与常规生长的样品相当. 这是由于随着周期数的增多, InAs 层与 GaAs 层更频繁地交替生长, 使得量子点内部压应变的减少, 量子点的密度明显提升.

PL 测试结果如图 4 所示, 可以看出 DAL-8 样品量子点的发光波长短, 且强度比较弱, 说明此时的量子点质量较差, 这与 AFM 的测试结果一致. 这是由于较多的缺陷点会产生非辐射复合中心, 抑制载流子的产生和迁移, 降低了量子点的发光效果^[25]. 同时, 在 InAs DWELL 结构中, SRL 和 SBL 层都可以使 InAs 量子点内部的压应变减少, 而量子点

内部压应变的减少是其发光波长红移的主要原因. 对于 DAL-8 样品 (InAs/GaAs 的生长周期数为 8), SRL 和 SBL 层的周期数较少导致 InAs 量子点内部的应力没有被释放, 因此该样品 PL 光谱的发光波长偏短, 且发光强度很低. 当 InAs/GaAs 的生长周期为 16 或 32 时, PL 的光谱强度已经比常规方法生长略高, 发光波长分别为 1300.6 和 1314.4 nm. 通过在量子点两侧增加 InAs/GaAs 二元材料短周期超晶格势垒, 利用超晶格薄层材料形成的微带

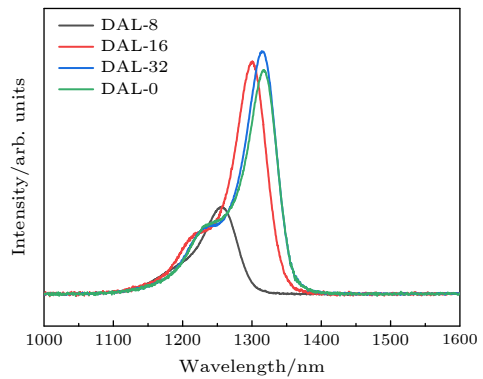


图 4 不同生长方式的 InAs 量子点的 PL 光谱

Fig. 4. PL spectra of InAs quantum dots with different growth methods.

势垒, 提高了对空穴载流子的限制作用, 为 InAs 量子点带来了更高的基态模式增益, 因此数字合金超晶格的生长方式导致 PL 的光谱强度有小幅度的增加. 生长周期为 32 的样品, 发光波长与常规生长的样品 (1316.7 nm) 相近. 随着周期数的增多, InAs 层与 GaAs 层的厚度更薄, 导致量子点内部应变逐渐减小, 因此发光波长会红移并最终趋近于常规生长的样品. 此外, 样品 DAL-8, DAL-16, DAL-32 和 DAL-0 的半峰宽分别为 64.3, 55.4, 55.5 和 56.5 nm, 后三者的半峰宽无明显差别. 样品 DAL-8 的半峰宽较大, 说明量子点的均匀性较差, 大小不均匀导致能量分布不均匀, 所以 PL 的发光峰比较宽. 综合 AFM 与 PL 的结果可看出, 把 InGaAs 层拆分成的 InAs/GaAs 数字合金超晶格的周期数越多, 生长出的样品的质量越高, 当总的生长周期达到 32 时, 样品的量子点密度非常高, 发光性能良好, 样品已经达到较高的生长质量.

为了进一步检验样品的质量, 选择常规方式生长的 DAL-0 与采用 32 个 InAs/GaAs 数字合金超晶格的生长方式的 DAL-32 两个样品制备了量子点激光器, 激光器的腔长为 4 mm, 脊条宽度为 8 μm , 激光器的 I - V - P 曲线如图 5 所示. 从图 5 可以得到, 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时 DAL-0 与 DAL-32 两种量子点激光器的阈值电流分别为 23 和 24 mA, 对应的阈值电流密度分别为 72 和 75 A/cm^2 . 两种量子点激光器在温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的输出功率分别为 31.4 和 33.1 mW, 工作温度可达到 120 $^{\circ}\text{C}$. InAs DWELL 结构在外延生长过程中, 存在原子间的互扩散, In 和 Ga 的互扩散使 InAs 量子点与周围的 InGaAs 势垒相互混合, 导致量子点受到的限制作用减弱. 采用 InAs/GaAs 数字合金超晶格可以减少 In 和 Ga 的互扩散, 改善了有源区价带空穴限制不足的问题, 提高了激光器的输出功率. 在温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 、注入电流为 250 mA 时, 两种激光器的发射光谱如图 6 所示, 激光光谱呈现多纵模, DAL-0 和 DAL-32 的发射波长分别为 1306.6 和 1302.1 nm. 这表明采用 InAs/GaAs 数字合金超晶格的方式代替常规 InGaAs 层的生长方式可以得到性能良好的激光器.

激光器的温度稳定性是衡量激光器性能的重要指标之一. 半导体量子点激光器的阈值电流密度与温度成指数关系^[26]:

$$J_{\text{th}} = J_0 \exp(T/T_0), \quad (1)$$

式中, J_0 是温度为 0 K 时的阈值电流密度; T_0 为激光器的特征温度, 其值越大表明激光器阈值电流随温度的变化就越小, 激光器的温度稳定性就越好.

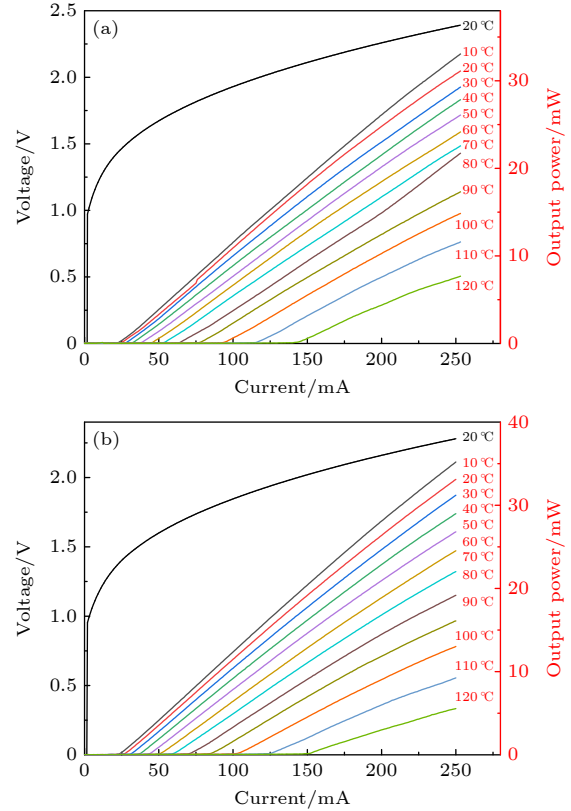


图 5 连续工作模式下两种 InAs 量子点激光器的 I - V - P 特性曲线 (a) DAL-0; (b) DAL-32

Fig. 5. I - V - P characteristic curves of two InAs quantum dots lasers in CW mode: (a) DAL-0; (b) DAL-32.

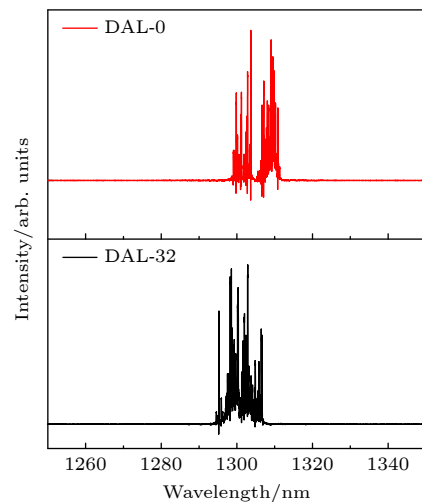


图 6 温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 、注入电流 250 mA 时, 两种 InAs 量子点激光器的发射光谱

Fig. 6. Emission spectra of two InAs quantum dots lasers at the temperature of 20 $^{\circ}\text{C}$ and injection current of 250 mA.

实验测量的量子点激光器的阈值电流密度随温度的变化如图 7 所示, 通过拟合得到 DAL-0 与 DAL-32 两种 InAs 量子点激光器的特征温度 T_0 分别为 54.9 和 55.4 K. 两种不同量子点激光器的特征温度十分接近, 这说明采用短周期数字合金超晶格的 InAs 量子点激光器具有良好的温度稳定性, 新的生长方式并没有导致其性能的下降, 同样可以实现高质量的 InAs 量子点激光器.

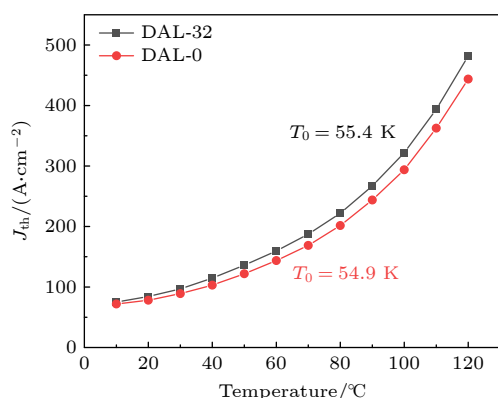


图 7 两种 InAs 量子点激光器特征温度的变化曲线
Fig. 7. Characteristic temperature curves of two InAs quantum dots lasers.

4 结 论

利用分子束外延技术, 通过 InAs/GaAs 数字合金超晶格代替常规直接生长 InGaAs 的方式, 在 GaAs(100) 衬底上成功制备了 1.3 μm 波段的 InAs/GaAs 量子点激光器. 在室温连续工作模式下, 采用 32 个数字合金超晶格生长的 InAs 量子点激光器与常规的激光器相比, 激光器的阈值电流、输出性能和温度稳定性等性能良好. 该方式生长的 InAs 量子点激光器的阈值电流为 24 mA, 相应的阈值电流密度仅为 75 A/cm², 最高工作温度达到了 120 $^{\circ}\text{C}$. 采用 InAs/GaAs 数字合金超晶格的生长方式, 可以保证生长过程中 In 和 Ga 源炉的温度不变, 通过改变 InAs 与 GaAs 的生长时间和周期, 实现对 InGaAs 组分自由地调控. 这对量子点激光器有源区的设计提供了新思路.

参考文献

[1] Wang H L, Wang T, Zhang J J 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 117301 (in Chinese) [王海玲, 王霆, 张建军 2019 物理学报 **68**

117301]
[2] Ozaki N, Ikuno D 2022 *J. Cryst. Growth* **588** 126657
[3] Yang J, Liu Z, Jurczak P, Tang M, Li K, Pan S, Sanchez A, Beanland R, Zhang Z C, Wang H 2021 *J. Phys. D Appl. Phys.* **54** 035103
[4] Wang T, Zhang J J, Liu H Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 204209 (in Chinese) [王霆, 张建军, 刘会赞 2015 物理学报 **64** 204209]
[5] Wang Z, Qi W, Feng Q, Wang T, Zhang J 2021 *Opt. Express* **29** 674
[6] Bimberg D, Pohl U W 2011 *Mater. Today* **14** 388
[7] Ruiz-Marín N, Reyes D F, Stanojević L, BenT, Braza V, Gallego-Carro A, Bárcena-González G, Ulloa J M, González D 2022 *Appl. Surf. Sci.* **573** 151572
[8] Tian P, Huang L R, Fei S P, Yu Y, Pan B, Xu W, Huang D X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5738 (in Chinese) [田 芃, 黄黎蓉, 费淑萍, 余奕, 潘彬, 徐巍, 黄德修 2010 物理学报 **59** 5738]
[9] Norman J C, Jung D, Zhang Z, Wan Y, Liu S, Shang C, Herrick R W, Chow W W, Gossard A C, Bowers J E 2019 *IEEE J. Quantum Elect.* **55** 1
[10] Arsenijević D, Bimberg D 2017 *Green Photonics and Electronics* (Cham, Switzerland: Springer International Publishing) pp75–106
[11] Alexander R R, Childs D T D, Agarwal H, Groom K M, Liu H Y, Hopkinson M, Hogg R A, Ishida M, Yamamoto T, Sugawara M, Arakawa Y, Badcock T J, Royce R J, Mowbray D J 2007 *IEEE J. Quantum Elect.* **43** 1129
[12] Coleman J J, Young J D, Garg A 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 499
[13] Sugawara M, Usami M 2009 *Nat. Photonics* **3** 30
[14] Yamaguchi K, Yujobo K, Kaizu T 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** L1245
[15] Leonard D, Krishnamurthy M, Reaves C M, Denbaars S P, Petroff P M 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 3203
[16] Yang J, Tang M, Chen S, Liu H Y 2023 *Light. Sci. Appl.* **12** 16
[17] Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, Komljenovic T, Reed G T, Vivien L, Marris-Morini D, Cassan E, Virot L, Fédéli J M, Hartmann J M, Schmid J H, Xu D X, Boeuf F, O'Brien P, Mashanovich G Z, Nedeljkovic M 2016 *J. Optics* **18** 073003
[18] Zhou Z, Ou X, Fang Y, Alkhazraji E, Xu R, Wan Y, Bowers J E 2023 *eLight* **3** 1
[19] Liang D, Srinivasan S, Descos A, Zhang C, Kurczveil G, Huang Z, Beausoleil R 2021 *Optica* **8** 591
[20] Xu B, Wang G, Du Y, Miao Y, Li B, Zhao X, Lin H, Yu J, Su J, Dong Y, Ye T, Radamson H H 2022 *Nanomaterials* **12** 2704
[21] Tatebayashi J, Nishioka M, Arakawa Y 2002 *J. Cryst. Growth* **237** 1296
[22] Zhang Y, Yang C A, Shang J M, Chen Y, Niu Z 2021 *Chin. Phys. B* **30** 094204
[23] Kumar R, Saha J, Tongbram B, Panda D, Gourishetty R, Kumar R, Gazi S A, Chakrabarti S 2023 *Curr. Appl. Phys.* **47** 72
[24] Pötschke K, Müller-Kirsch L, Heitz R, Sellin R L, Pohl U W, Bimberg D, Zakharov N, Werner P 2004 *Physica E* **21** 606
[25] Kim Y, Chu R J, Ryu G, Woo S, Lung Q N D, Ahn D H, Han J H, Choi W J, Jung D 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 45051
[26] Fathpour S, Mi Z, Bhattacharya P, Kovsh A R, Mikhlin S S, Krestnikov I L, Kozhukhov A V, Ledentsov N N 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5164

Improving structure design of active region of InAs quantum dots by using InAs/GaAs digital alloy superlattice*

Du An-Tian¹⁾²⁾ Liu Ruo-Tao²⁾³⁾ Cao Chun-Fang²⁾ Han Shi-Xian²⁾³⁾
Wang Hai-Long^{1)†} Gong Qian^{2)3)‡}

1) (*Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, School of Physics and Physical Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China*)

2) (*Key Laboratory of Terahertz Solid State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

3) (*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 23 February 2023; revised manuscript received 27 March 2023)

Abstract

A 1.3- μm InAs quantum dot laser has been successfully fabricated on a GaAs(100) substrate by molecular beam epitaxy (MBE) technique through using InAs/GaAs digital alloy superlattices instead of the conventional InGaAs layer. The samples grown by conventional growth method and the digital alloy superlattice growth method are characterized by atomic force microscope (AFM) and photoluminescence (PL) spectroscopy. It is found that 8-period sample possesses a low quantum dot density and poor luminescence performance. With the increase of the number of growth periods, the quantum dot density of the sample increases and the luminous performance improves. This indicates that the quality of the grown sample improves with the increase of InAs/GaAs period of the InGaAs layer. When the total InAs/GaAs period is 32, the quantum dot density of the sample is high and the luminescence performance is good. After the experimental measurement, the sample DAL-0 fabricated by conventional growth method and the sample DAL-32 (32-periods InAs/GaAs digital alloy superlattices) are utilized to fabricate quantum dot laser by standard process. The performances of two types of quantum dot lasers obtained with different growth methods are characterized. It is found that the InAs quantum dot lasers fabricated by the sample grown by digital alloy superlattice method have good performances. Under continuous wave operation mode, the threshold current is 24 mA corresponding to a threshold current density of 75 A/cm². The highest operation-temperature reaches 120 °C. In addition, InAs quantum dot laser using digital alloy superlattice has good temperature stability. Its characteristic temperature is 55.4 K. Compared with the traditional laser, the InAs quantum dot laser grown by InAs/GaAs digital alloy superlattice has good performance in terms of threshold current density, output power and temperature stability, which indicates that high-quality laser can be obtained by this growth method. Using the InAs/GaAs digital alloy superlattice growth method, the InGaAs composition can be changed without changing the temperature of the source oven. Thus InAs quantum dot lasers with different luminescence wavelengths can be obtained through this growth method. The InAs/GaAs digital alloy superlattice structure can be used to realize different averaging of In content in the growth structure. The method provides a new idea for designing and growing the active region of quantum dot laser.

Keywords: quantum-dot, semiconductor laser, molecular beam epitaxy, digital alloy superlattices

PACS: 81.07.Ta, 42.55.Px, 81.15.Hi, 74.78.Fk

DOI: 10.7498/aps.72.20230270

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61674096).

† Corresponding author. E-mail: hlwang@qfnu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: qgong@mail.sim.ac.cn



利用InAs/GaAs数字合金超晶格改进InAs量子点有源区的结构设计

杜安天 刘若涛 曹春芳 韩实现 王海龙 龚谦

Improving structure design of active region of InAs quantum dots by using InAs/GaAs digital alloy superlattice

Du An-Tian Liu Ruo-Tao Cao Chun-Fang Han Shi-Xian Wang Hai-Long Gong Qian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 128101 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230270

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230270>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽

Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output from semiconductor laser

物理学报. 2020, 69(9): 090501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191881>

超高真空条件下分子束外延生长的单层二维原子晶体材料的研究进展

Research progress of monolayer two-dimensional atomic crystal materials grown by molecular beam epitaxy in ultra-high vacuum conditions

物理学报. 2020, 69(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200174>

双凹型谐振腔结构的金属半导体纳米激光器的数值仿真

Numerical study of metallic semiconductor nanolasers with double-concave cavity structures

物理学报. 2019, 68(22): 224201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190972>

Parity-time对称性对电注入半导体激光器的模式控制

Mode control of electrically injected semiconductor laser with parity-time symmetry

物理学报. 2020, 69(2): 024202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191351>

二维磁性过渡金属卤化物的分子束外延制备及物性调控

Two-dimensional magnetic transition metal halides: molecular beam epitaxy growth and physical property modulation

物理学报. 2022, 71(12): 127505 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220727>

Be, Si掺杂调控GaAs纳米线结构相变及光学特性

Studies of Be, Si doping regulated GaAs nanowires for phase transition and optical properties

物理学报. 2021, 70(20): 207804 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210782>