

文章编号: 1000-7032(2024)12-2011-10

2 nm GaAs插入层对905 nm波段InGaAs多量子阱发光的影响

甘露露^{1,2}, 王海珠^{1,2*}, 张 崇³, 赵书存^{1,2}, 王祯胜^{1,2}, 王登魁^{1,2}, 马晓辉^{1,2}

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 重庆研究院, 重庆 401135;

3. 陆军装备部驻长春地区第一军事代表室, 吉林 长春 130000)

摘要: 为探明 GaAs 插入层对 905 nm 波段 InGaAs 多量子阱材料发光性能的影响问题, 基于 InGaAs/InAlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 两种量子阱材料, 利用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)技术, 制备了 905 nm 波段的 InGaAs 多量子阱材料。通过 AFM 和 XRD 测试发现, GaAs 插入层可以优化两种材料的表面粗糙度和结晶质量。室温 PL 测试进一步说明, GaAs 插入层可以改善两种材料的能带结构, 增强发光效果。变温和变功率 PL 测试表明, 引入 GaAs 插入层后 InGaAs/InAlGaAs 发光波长随温度升高呈现“S”型变化, 特征值 $\alpha < 1$, 低温下的辐射复合机制从自由激子复合发光变成了“局域态”发光。而对于 InGaAs/AlGaAs 材料, GaAs 插入层并没有改变其辐射复合机制。本文在深入研究 GaAs 插入层对 InGaAs/InAlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 多量子阱材料光学性能和载流子复合机制的影响方面具有一定意义。

关键词: 多量子阱; GaAs 插入层; 局域态; 金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240243

Influence of 2 nm GaAs Insertion Layer on 905 nm InGaAs Multi Quantum Well Luminescence

GAN Lulu^{1,2}, WANG Haizhu^{1,2*}, ZHANG Chong³, ZHAO Shucun^{1,2},WANG Zhensheng^{1,2}, WANG Dengkui^{1,2}, MA Xiaohui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology,

Changchun 130022, China;

2. Research Institute of Chongqing, Changchun University of Science and Technology, Chongqing 401135, China;

3. The First Military Representative Office of the Army Equipment Department Stationed in Changchun Area,

Changchun 130000, China)

* Corresponding Author, E-mail: whz@cust.edu.cn

Abstract: To investigate the effect of GaAs insertion layer on the luminescence performance of 905 nm wavelength InGaAs multi quantum well materials, based on InGaAs/InAlGaAs and InGaAs/AlGaAs quantum well materials, four period 905 nm wavelength InGaAs multi quantum wells were grown using metal organic compound chemical vapor deposition (MOCVD) technology. Atomic force microscopy (AFM) and X-ray diffraction (XRD) analyses revealed that the GaAs insertion layer optimizes the surface roughness and crystal quality of both materials. Room temperature photoluminescence (PL) testing further demonstrated that the GaAs insertion layer improves the energy band structure of the materials, thereby improving luminescence efficiency. Variable temperature and variable power PL tests show that for InGaAs/InAlGaAs materials, after the GaAs insertion layer is introduced, the wavelength changes in an “S” shape with increasing temperature, and the characteristic value α is less than 1. The radiation recombination mechanism at low temperature changes from free exciton recombination to “localized states” luminescence. In

收稿日期: 2024-09-30; 修订日期: 2024-10-17

基金项目: 重庆自然科学基金(cstc2021jcyjmsxmX1060, CSTB2022NSCQ-MSX0401); 吉林省科技发展计划(20210101473JC)
Supported by Chongqing Natural Science Foundation Project(cstc2021jcyjmsxmX1060, CSTB2022NSCQ-MSX0401); The Developing Project of Science and Technology of Jilin Province(20210101473JC)

contrast, for InGaAs/AlGaAs materials, the GaAs insertion layer does not alter the radiation recombination mechanism. This article is significant for advancing the understanding of the effects of the GaAs insertion layer on the optical properties and carrier recombination mechanisms of InGaAs/InAlGaAs and InGaAs/AlGaAs multiple quantum well materials.

Key words: multiple quantum wells; GaAs insertion layer; localized state; metal organic compound chemical vapor deposition (MOCVD)

1 引 言

半导体激光器因其体积小、效率高、可靠性好等优点,在通信、医疗、工业加工等多个领域发挥着重要作用^[1-3]。特别是 905 nm 波段的半导体激光器,由于其波长接近眼睛安全阈值,广泛应用于非接触式传感、激光雷达和生物医学成像等领域^[4-7]。InGaAs 量子阱作为一种先进的半导体材料,因其具有高电子迁移率和优异的光电特性,被广泛用于制造高性能的光电探测器和激光器^[8-10]。所以,针对高质量 905 nm InGaAs 多量子阱外延材料的研究具有很高的实用价值和重要的研究意义。

为了深入了解 InGaAs 量子阱外延材料,本文研究了 InGaAs/InAlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 两种含有不同势垒材料的 InGaAs 多量子阱结构。对于 InGaAs/InAlGaAs 多量子阱材料,势垒 InAlGaAs 具有可调的带隙,可以通过改变 In 和 Al 的比例来调整其带隙宽度^[11],这对于设计特定波长的吸收和发射特性非常有用,并且阱层和垒层含有相同的 In 组分时,在一定程度上可以阻止 In 偏析;对于 InGaAs/AlGaAs 多量子阱,AlGaAs 的晶格常数和 GaAs 相近,但是禁带宽度要远高于 GaAs,在发光波长为 905 nm 左右的量子阱中,可以起到很好的限制载流子的作用^[12]。

在半导体材料的外延生长过程中,特别是在制造多量子阱结构时,材料的晶格匹配性是一个关键因素。在 InGaAs/InAlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 这样的多量子阱中,阱和垒的材料与底层的 GaAs 衬底在晶格常数上存在差异,这会导致晶格失配,进而在外延层中产生应变^[13-14],应变会带来晶格的扭曲和原子间的相互作用,改变能带的能级^[15]。能级的变化可能导致能带不匹配,即阱和垒之间的带隙与理想情况下的预期不符。能带不匹配会影响多量子阱的光学和电子性能,如光吸收、光发射效率以及电子和空穴的复合速率。为了缓解晶格失配带来的应变,本文引入了一种 GaAs 插入层结构^[16-17],置于阱和垒的界面处,GaAs 层的晶格常

数与 GaAs 衬底相匹配。因此,可以作为一个缓冲层,实现逐渐的晶格过渡,从而减少整个结构中的应变,调整能带结构,优化多量子阱的光学性能。

最近,Wen 等报道了将 GaAs 层插入到 InGaAs/GaAsP 应变的量子阱中,并提高了界面上的突发性^[18];Yu 等报道了将 GaAs 层插入到 InGaAs/AlGaAs 量子阱中,可以改善量子阱的光学性质,但同时也会带来一种“局域态”缺陷^[19];Zhang 等通过优化 GaAs 的厚度,研究了 GaAs 插入层对 InGaAs/AlGaAs 量子阱光学特性的影响^[20];Ma 等发现在 InGaAs/AlGaAs 量子阱中插入 GaAs 层后,可以改善界面粗糙度和晶体质量,从而提高光学性能^[21]。尽管 GaAs 插入层的研究已展现出其在优化量子阱结构与性能方面的显著潜力,但其探索与深化仍具有不可替代的重要性,特别是在针对 905 nm 波段 InGaAs/AlGaAs 与 InGaAs/InAlGaAs 材料的研究方面。GaAs 插入层作为一种有效的能带调控手段,能深刻影响量子阱的能带结构,进而影响器件的光学、电学性能。通过深入研究,我们可以掌握更为精细的能带调控技术,为制备高性能、多功能的光电器件开辟新路径。

本文利用 MOCVD 技术生长了 InGaAs/InAlGaAs、InGaAs/GaAs/InAlGaAs、InGaAs/AlGaAs、InGaAs/GaAs/AlGaAs 多量子阱材料,通过室温光致发光 (Photoluminescence, PL)、原子力显微镜 (Atomic force microscope, AFM) 和 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 测试,研究了 GaAs 插入层对量子阱发光特性、表面粗糙度和结晶质量的影响;通过变温 PL 和变功率 PL 测试,探究了 GaAs 插入层对载流子在不同温度和激发功率下复合行为的影响。本文在深入研究 GaAs 插入层对 InGaAs/InAlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 多量子阱材料的发光性能和辐射复合机制的影响方面具有重要意义。

2 实 验

采用德国 Aixtron 公司 200/4 型 MOCVD 设备进行 InGaAs/InAlGaAs、InGaAs/GaAs/InAlGaAs、

InGaAs/AlGaAs 和 InGaAs/GaAs/AlGaAs 多量子阱材料的制备。以三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)和三甲基铟(TMIIn)作为 III 族源, 砷烷(AsH_3)作为 V 族源, 高纯氢气(H_2)作为 III 族源的载气。生长时反应腔室压力维持在 10 kPa (100 mbar), 且在富 V 族气体的氛围下进行。

图 1 给出了 InGaAs/InAlGaAs、InGaAs/GaAs/InAlGaAs、InGaAs/AlGaAs、InGaAs/GaAs/AlGaAs 多量子阱结构示意图, 分别对应于样品 A、B、C、D。样品均生长在 N 型(100) 2° 偏角的 GaAs 衬底和缓冲层上。在生长前, 将衬底在 650°C 下烘烤 5 min, 以去除表面氧化物, 并维持 650°C 生长 200 nm 厚的 GaAs 缓冲层和 4 个周期的量子阱结构。其中, 样品 A 的每个单量子阱结构为 9 nm 厚的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 量子阱层和 30 nm 厚的 $\text{In}_{0.1}\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 势垒层, 样品 B 比样品 A 多了一个 2 nm 厚的 GaAs 插入层, 样品 C 的每个单量子阱结构为 9 nm 厚的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 量子阱层和 30 nm 厚的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势

垒层, 样品 D 比样品 C 多了一个 2 nm 厚的 GaAs 插入层。最后, 生长 50 nm 厚的 GaAs 盖层以保护量子阱, V/III 始终保持在 85。生长结束后在 AsH_3 气体的保护下, 将反应室的温度降至室温, 以便后续测试表征。

本文生长获得的量子阱材料的表面形貌由原子力显微镜 (AFM, Bruker ULTIMODE8) 在室温下获取, 测试时针尖模式为接触模式。量子阱的结晶质量由布鲁克 (Bruker) 高分辨率 X 射线衍射 (High resolution X-ray diffraction, HRXRD) 技术进行表征分析。变温及变功率 PL 由 HORIBA iHR550 光谱仪完成, 选用 InGaAs 探测器, 激发光源为波长 655 nm 连续输出的半导体激光器, 样品放置在液氮制冷台上, 用带有 CaF_2 窗口镜片的真空罩保护。变温 PL 测试的温度调节范围为 15~300 K, 功率密度维持在 $500\text{ mW}/\text{cm}^2$; 变功率 PL 测试的功率密度调节范围为 $100\sim 2\,000\text{ mW}/\text{cm}^2$, 温度维持在 15 K。

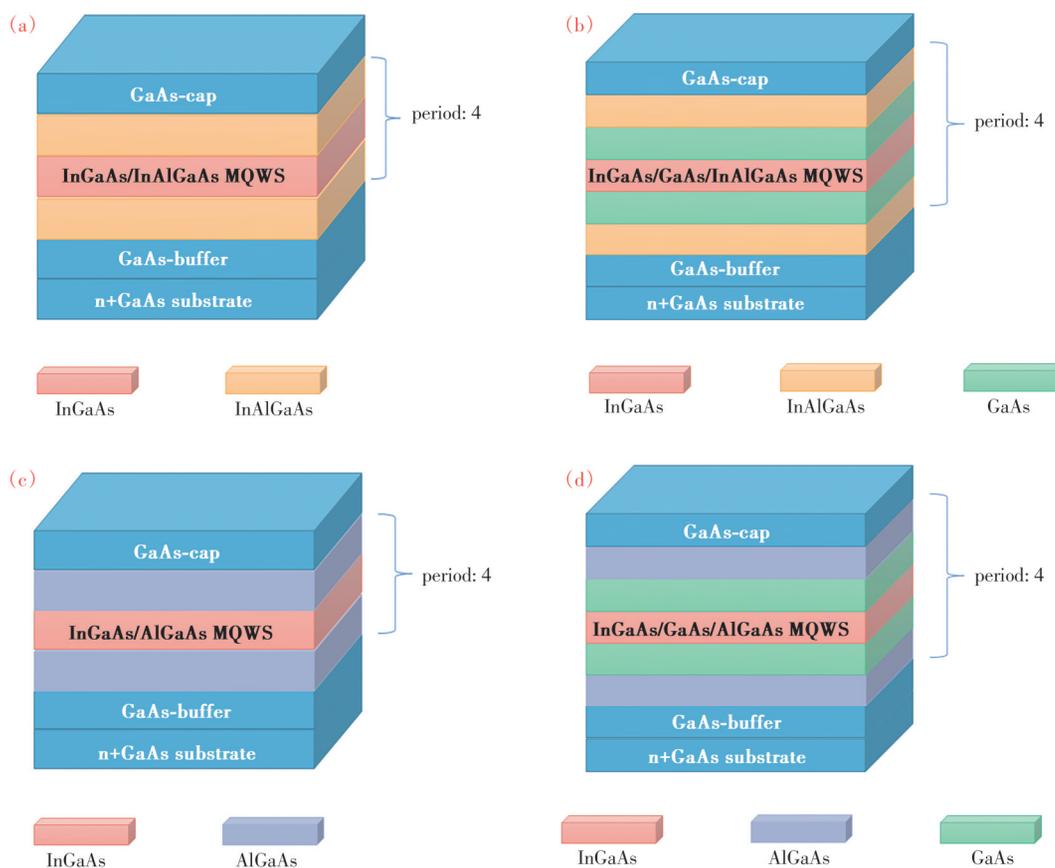


图 1 InGaAs/InAlGaAs(a)、InGaAs/GaAs/InAlGaAs(b)、InGaAs/AlGaAs(c)、InGaAs/GaAs/AlGaAs(d)的多量子阱结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of multi quantum well structure of InGaAs/InAlGaAs (a), InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b), InGaAs/AlGaAs(c), InGaAs/GaAs/AlGaAs(d)

3 结果与讨论

为了探究引入 GaAs 插入层对量子阱表面形貌的影响,对 4 个样品进行了 AFM 测试,结果如图 2 所示, A、B、C、D 4 个样品的表面台阶形貌存在明显差异,它们的表面粗糙度 R_q 分别为 0.443, 0.166, 0.386, 0.138 nm。样品 A 的表面粗糙度最大,从 AFM 图像中也能看出该样品的生长模式并没有其他 3 个样品中明显的二维阶梯流模式,并且台阶边缘极多弯曲;与样品 A 相比, B 样品完全遵循二维阶梯流生长模式,并且台阶宽度变大,表面更加平坦;样品 C 中的台阶相互平行,但是台阶边缘有轻微弯曲并且台阶过于密集;与样品 C 相比, D 样品台阶密度降低,台阶面宽近似均匀,表面平坦。A 与 B、C 与 D 的比较说明了引入 GaAs 插入层可以有效改善量子阱的表面形貌。以 InGaAs/GaAs/AlGaAs (样品 D) 为例,从应变角度进行分析,正是由于 InGaAs 和 AlGaAs 与衬底的晶

格常数不同才会在量子阱内部产生应变, InGaAs 和 AlGaAs 晶格常数的定义式为^[22]:

$$a_{\text{In}_x\text{GaAs}} = a_{\text{GaAs}} + (a_{\text{InAs}} - a_{\text{GaAs}})x, \quad (1)$$

$$a_{\text{Al}_x\text{GaAs}} = a_{\text{GaAs}} + (a_{\text{AlAs}} - a_{\text{GaAs}})x, \quad (2)$$

材料间的应力 ε 有以下计算公式^[22]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta a}{a_{\text{substrate}}}, \quad (3)$$

其中, $a_{\text{substrate}}$ 表示无应力时衬底晶格常数, Δa 表示外延层相对衬底的晶格常数。公式(3)常用于计算外延材料与衬底的晶格失配度。根据公式(1)、(2)计算可得 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 和 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 的晶格常数分别为 0.569 4 nm 和 0.565 6 nm, 根据公式(3)计算出 InGaAs 和 AlGaAs 对衬底的压缩应变分别为 7.163×10^{-3} 和 0.442×10^{-3} 。由于 GaAs 插入层和衬底材料体系相同,所以并无应力产生,因此可以将 GaAs 理解为 InGaAs/GaAs/AlGaAs 多量子阱中的应变缓冲层。在外延生长过程中,

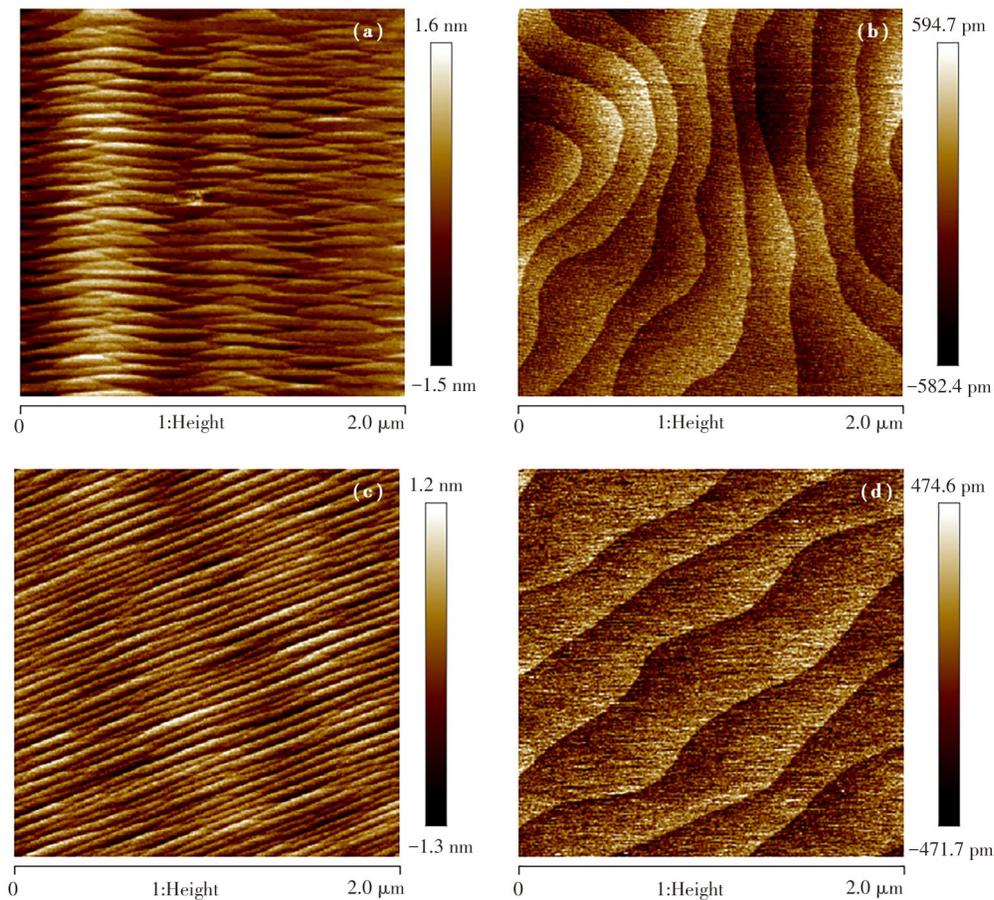


图 2 InGaAs/InAlGaAs(a)、InGaAs/GaAs/InAlGaAs(b)、InGaAs/AlGaAs(c)、InGaAs/GaAs/AlGaAs(d)在 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 扫描区域的 AFM 图像

Fig.2 AFM images of InGaAs/InAlGaAs (a), InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b), InGaAs/AlGaAs (c), and InGaAs/GaAs/AlGaAs (d) in a $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ scanning area

InGaAs/AlGaAs 多量子阱中会产生持续的压应变, 而 InGaAs/GaAs/AlGaAs 多量子阱由于 GaAs 层的存在, 在压应变产生一段时间后, 便会迎来一段无应变平衡时期, 再继续产生压应变。依此类推, 推测这种中断式压应变生长方式可以起到缓冲应变的作用, 从而改善能带结构, 提高生长质量。

为了进一步研究引入 GaAs 插入层后对量子阱结晶质量的影响, 对 4 个样品进行了 XRD 测试, 结果如图 3 所示, 最强最窄的峰对应的是 GaAs (100) 衬底。样品 A 的生长质量较差且并无明显的衍射峰, 引入 GaAs 插入层后的样品 B, InGaAs 的衍射峰个数达到了 3 个, 说明生长质量得到了改善。样品 C 和 D 的衍射图样都有明显的周期性衍射峰, 与样品 A、B 相比, C、D 具有较高的生长质量, 这说明 AlGaAs 比 InAlGaAs 作势垒更占优势。而样品 C 和 D 比较时, 可以看出样品 D 具有更多阶的衍射峰, 再次说明 GaAs 插入层能够改善量子阱的结晶质量。

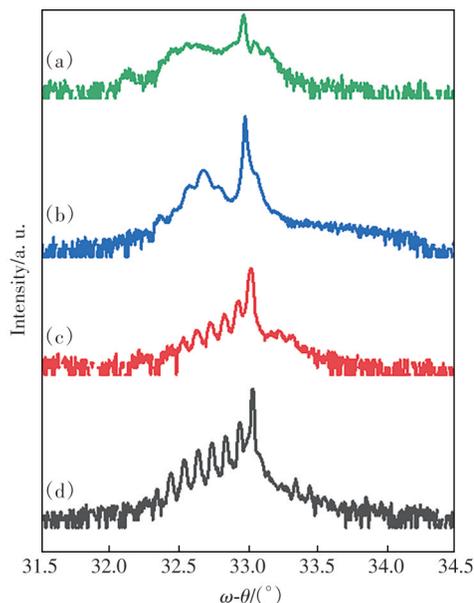


图 3 InGaAs/InAlGaAs (a)、InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b)、InGaAs/AlGaAs(c)、InGaAs/GaAs/AlGaAs(d) 的 XRD 测试图

Fig.3 XRD test patterns of InGaAs/InAlGaAs (a), InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b), InGaAs/AlGaAs (c), InGaAs/GaAs/AlGaAs (d)

为了研究量子阱的发光特性, 对 4 个样品进行了室温 PL 测试。如图 4 所示, 发现样品 A 几乎不发光; 引入 GaAs 插入层后, 样品 B 的发光强度变强, 发光质量得到了改善; 样品 C 发光强度较弱;

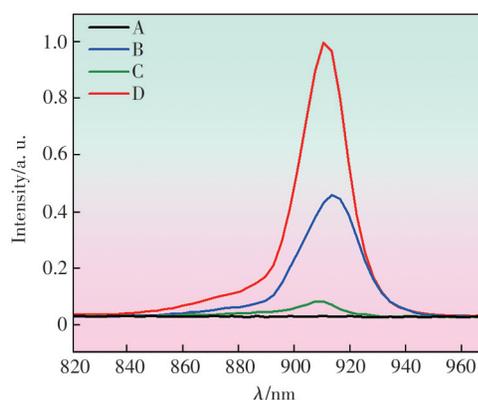


图 4 样品 A、B、C、D 的室温 PL 测试图

Fig.4 Room temperature PL test results of samples A, B, C and D

引入 GaAs 插入层后, 样品 D 的半峰宽变窄并且发光强度极强, 半峰宽变化情况可参考图 7(b)。对于不含插入层的样品 A 和 C 而言, 样品 C 的势垒为 AlGaAs, 相比于样品 A 的势垒 InAlGaAs, 具有更大的带隙宽度, 可以形成更深的量子阱深度, 更容易将载流子限制在阱层中产生更多的辐射复合而增强 PL 强度。样品 B 和 D 在引入 GaAs 插入层后发光质量都得到了改善, 从能带的角度考虑, 以样品 D 为例, 根据 $In_{1-x}Ga_xAs$ 和 $Al_xGa_{1-x}As$ 的带隙宽度公式^[23]:

$$E_g(x) = 0.36 + 1.064x, \quad (4)$$

$$E_g(x) = 1.424 + 1.247x, \quad (5)$$

得到 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 和 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 的带隙宽度分别为 1.317 eV 和 1.798 eV, 而 GaAs 的带隙宽度 1.424 eV 处于两者之间。当在 InGaAs 和 AlGaAs 之间插入 GaAs 层时, 会形成特殊的阶梯能带结构, 如图 5 所示。AlGaAs 势垒产生的光生载流子会扩散到 GaAs 和 InGaAs 区域, GaAs 相比于 InGaAs 具有更宽的带隙, 这使得 GaAs 的带边能量

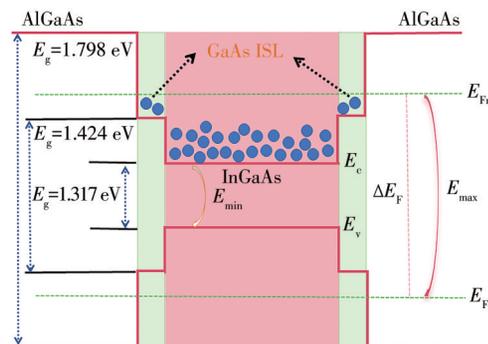


图 5 InGaAs/GaAs/AlGaAs 量子阱能带结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of InGaAs/GaAs/AlGaAs quantum well band structure

高于 InGaAs。因此, GaAs 的存在使光生载流子填充到势阱 InGaAs 时更容易占据较高能级, 从而提高了非平衡载流子的填充能力, 导致电子和空穴的准费米能级间距增大^[24], 使辐射复合的概率增加, 改变了 PL 峰的强度。样品 B 也同理。

根据 AFM、XRD 和室温 PL 测试研究了 GaAs 插入层对 InGaAs/InAlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 表面粗糙度、结晶质量和室温发光特性的影响, 下文将进行变温和变功率 PL 测试, 研究 GaAs 插入层对 InGaAs/InAlGaAs 和 InGaAs/AlGaAs 辐射复合机制的影响。变温 PL 测试结果如图 6 所示, 4 个样品

的发光强度均随着温度的升高逐渐变差, 这是因为低温下能够抑制非辐射通道的散射, 使更多的能量被转移到辐射通道中, 增强了辐射复合发生的概率, 提高了发光效率^[25]。为了更加清晰明了地观察峰位和 FWHM 随温度的变化情况, 绘制了温度相关峰值位置关系图和温度相关 FWHM 图, 如图 7 所示。从图 7(a)、(b) 中可以发现, 样品 A、C、D 的峰位和 FWHM 随温度升高都是逐渐红移, 而 B 样品在温度从 15 K 上升到 60 K 时, 波长和 FWHM 出现先红移后蓝移的现象, 推测出现这种“S”型变化可能是量子阱内部“局域态”发光导致的^[26]。

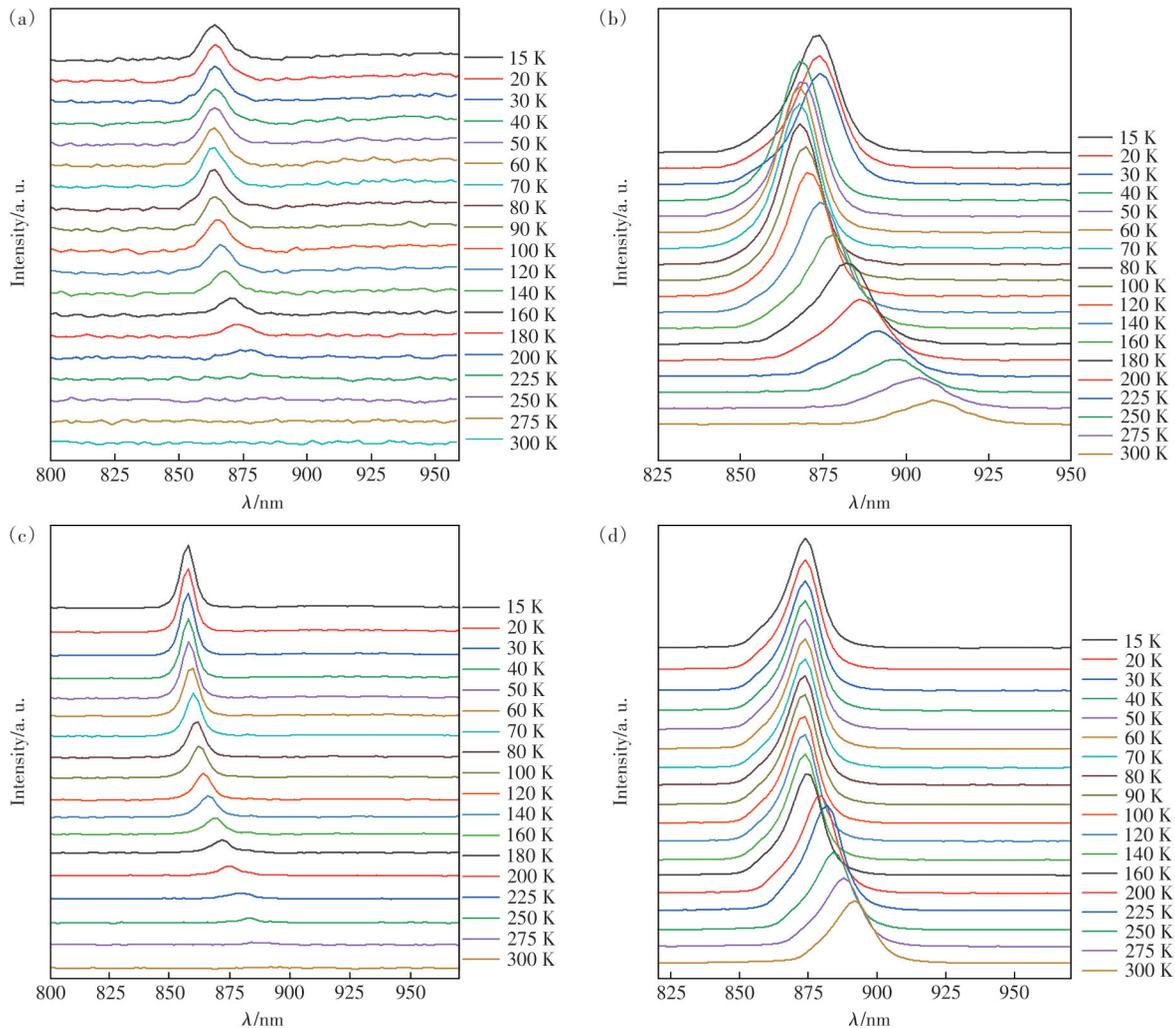


图 6 InGaAs/InAlGaAs (a)、InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b)、InGaAs/AlGaAs (c)、InGaAs/GaAs/AlGaAs (d) 的变温 PL 测试图
Fig.6 Temperature dependent PL test plots of InGaAs/InAlGaAs (a), InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b), InGaAs/AlGaAs (c), InGaAs/GaAs/AlGaAs (d)

根据图 7(a) 的实验测试数据, 将其转化为带隙能量形式再与理论公式相结合进行拟合绘制了多量子阱的发光能量与温度的函数关系图, 结果如图 8 所示, 其中符号表示实验数据点, 实线表示 O' Donnell and Chen 模型的理论曲线。根据下面的模型可以很好地

描述半导体带隙的温度依赖性, 如公式 (6) 所示^[27]:

$$E_g(T) = E_g(0) - S \langle \hbar\omega \rangle \left(\coth \frac{\langle \hbar\omega \rangle}{2KT} - 1 \right), \quad (6)$$

其中 T 是变化量温度的值, $E_g(0)$ 表示 $T=0$ K 时的带隙, S 是无量纲耦合常数, $\langle \hbar\omega \rangle$ 是平均声子能

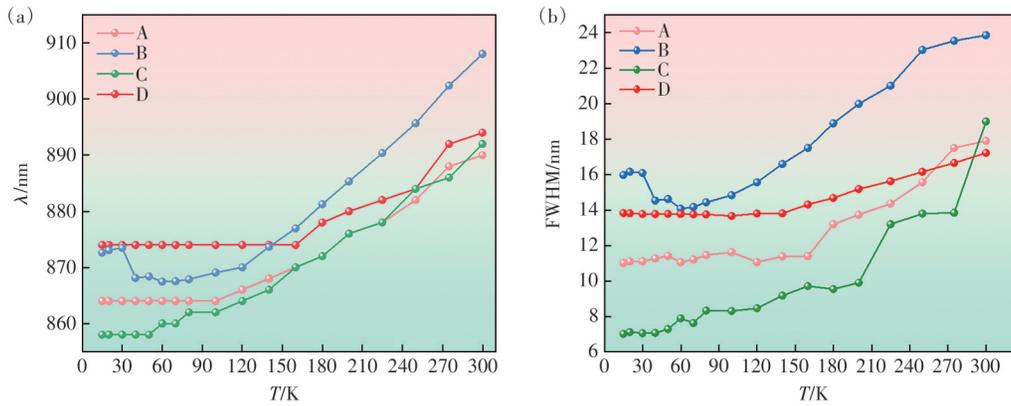


图 7 (a)-(b)样品 A、B、C、D 的温度相关峰位置和温度相关 FWHM 关系图

Fig.7 (a)-(b)Temperature related peak positions and temperature related FWHM relationship graphs of samples A, B, C and D, respectively

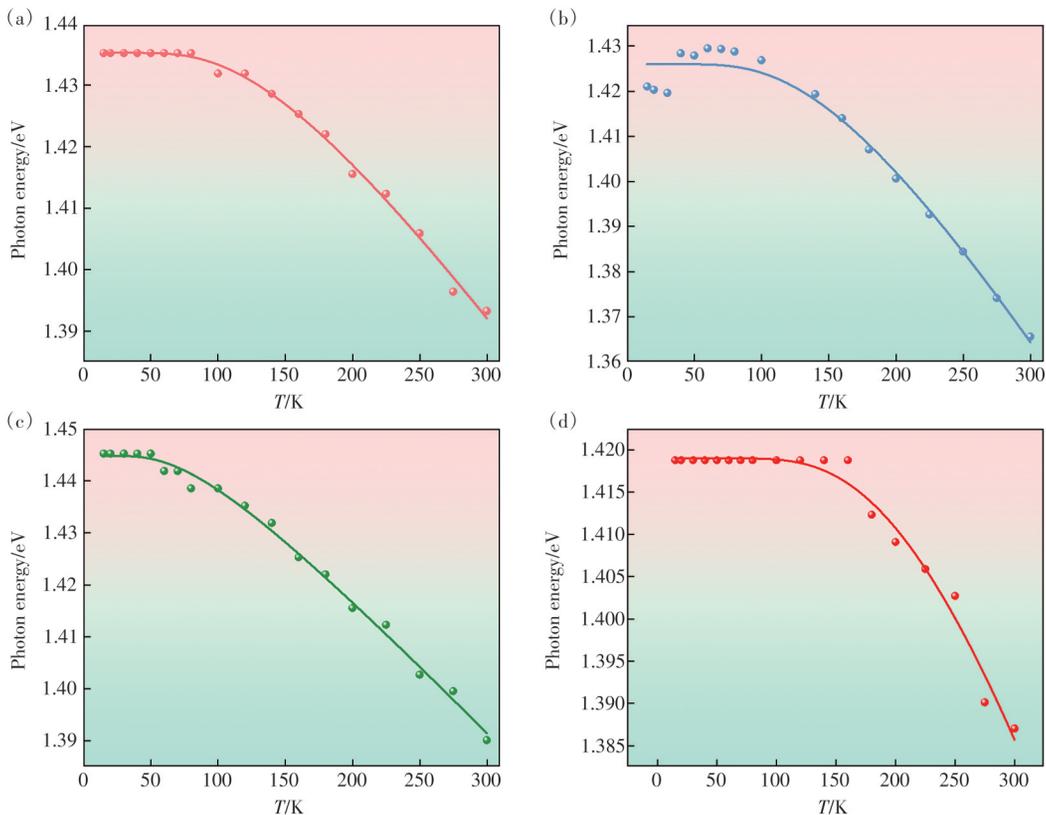


图 8 InGaAs/InAlGaAs(a)、InGaAs/GaAs/InAlGaAs(b)、InGaAs/AlGaAs(c)、InGaAs/GaAs/AlGaAs(d)转化后的带隙及理论公式拟合曲线(符号为实验数据,实线为理论拟合)

Fig.8 The bandgap and theoretical formula fitting curves of InGaAs/InAlGaAs(a), InGaAs/GaAs/InAlGaAs(b), InGaAs/AlGaAs(c), and InGaAs/GaAs/AlGaAs(d) after conversion(symbols are experimental data, solid lines are theoretical fitting)

量。在图 8 中可以清楚地看到,样品 A、C、D 在 15~300 K 下实验数据与理论拟合基本吻合,样品 B 的实验数据与理论拟合在低温下存在明显差异。例如,当温度为 15 K 时,实验测试的带隙能量值约为 1.421 eV,通过理论拟合的值约为 1.426 eV,两者之间的差值约为 5 meV,之所以出现图中的能量偏差可归结于在 15 K 的低温下载

流子的局域态能量。

为了进一步证明局域态的存在以及研究其辐射复合机制,在固定温度 15 K 下对 4 个样品进行了变功率 PL 实验。通过调节功率密度在 100~2 000 mW/cm² 变化,测试其光致发光谱,结果如图 9 插图所示,并对测试结果进行拟合分析,拟合分析结果如图 9 所示^[28-29]。其中发光峰的积分强

度与激发功率密度的关系如公式(7)所示^[30]:

$$I = \beta I_0^\alpha, \quad (7)$$

其中, I_0 为激发功率密度, β 为辐射效率, 特征值 α 被用来判断辐射复合机制。当 $\alpha > 1$ 时, 发光来源于自由激子复合; 当 $\alpha < 1$ 时, 发光来源于与缺陷或者杂质相关的发光。图 9 中显示, 样品 A 和 B 的 α 值分别为 1.24 (>1) 和 0.96 (<1), 说明样品 A 在低温下属于自由激子复合发光, 引入 GaAs 插入层的样品 B 在低温下为缺陷导致发光, 由此推测其低温状态下的“S”型波长变化为“局域态”导致的发

光。而局域态产生的原因是样品 B (InGaAs/GaAs/InAlGaAs) 阱和垒中的 In 原子更容易偏析进入 GaAs 层中, 进而导致了阱层 InGaAs 形成 In 原子密度不同的区域。样品 A (InGaAs/InAlGaAs) 中阱和垒的 In 原子组分相同, 保持了一定的平衡状态, 不易发生 In 偏析。样品 C 和 D 的 α 值分别为 1.26 (>1) 和 1.05 (>1), 说明样品 C 和 D 在低温下均属于自由激子复合发光。推测是因为样品 C (InGaAs/AlGaAs) 和 D (InGaAs/GaAs/AlGaAs) 中只有阱层含有 In 原子, In 原子的组分含量少不易发生偏析。

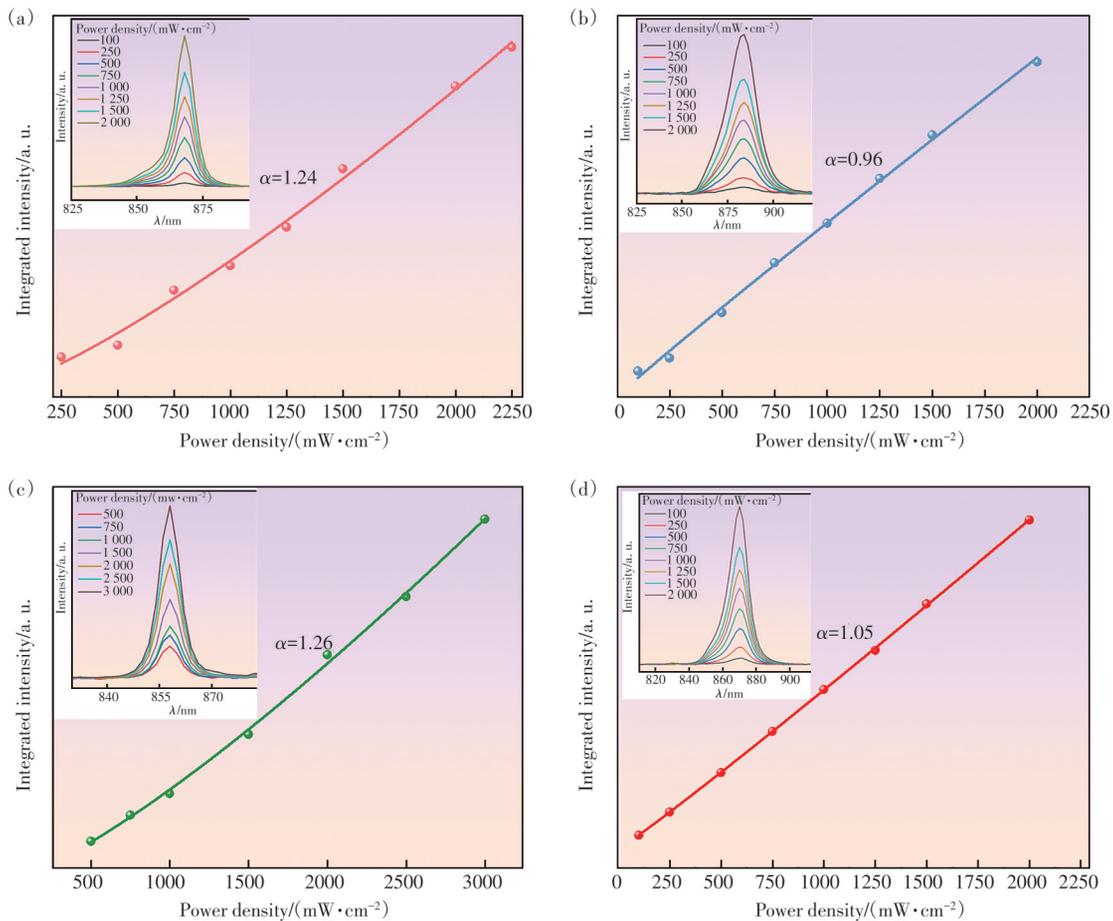


图 9 InGaAs/InAlGaAs (a)、InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b)、InGaAs/AlGaAs (c)、InGaAs/GaAs/AlGaAs (d) 在不同激发功率密度下的 PL 积分强度 (实线表示方程的拟合曲线), 插图变为功率密度 PL 测试

Fig.9 PL integrated intensity of InGaAs/InAlGaAs (a), InGaAs/GaAs/InAlGaAs (b), InGaAs/AlGaAs (c), InGaAs/GaAs/AlGaAs (d) at different excitation power densities (solid line represents the fitting curve of the equation). The illustration shows the variable power density PL test

4 总 结

本文通过 MOCVD 生长技术制备了四周期的 InGaAs/InAlGaAs、InGaAs/GaAs/InAlGaAs、InGaAs/AlGaAs、InGaAs/GaAs/AlGaAs 多量子阱材料。通过材料表征手段, 发现引入 GaAs 插入层不仅可

以降低样品的表面粗糙度, 提高样品的结晶质量, 还改善了量子阱的发光性能。借助能带关系图表明了 GaAs 插入层可以改变能带结构, 使量子阱产生更多的辐射复合从而增强发光强度。变温和变功率 PL 测试结果表明, 样品 A、C、D 的波长随温度升高都逐渐红移, 只有样品 B 的波长

随温度升高呈现“S”型变化,推测 B 样品在低温下产生了“局域态”。利用 Varshni 公式对不同温度下的峰位进行拟合,得到了 15 K 时的局域态能量。变功率 PL 测试和拟合结果表明,样品 A、C、D 的 α 值均大于 1,低温下属于自由激子发光;样品 B 的特征值 $\alpha=0.96(<1)$,推测为“局域态”导致的发光,而“局域态”是由样品 B 中阱和垒的 In 原子偏析到 GaAs 层中形成密度不均匀的区域造成的。总之,GaAs 插入层可以改善量子阱的生长质量和光学性能,但是也可能引入“局域态”,改变载流子的复合机制。综上所述,本研究通过引入 GaAs 插

入层,显著改善了 InGaAs 基多量子阱材料的生长质量和光学性能,同时揭示了“局域态”这一新物理现象及其对发光机制的影响。这些发现不仅具有重要的学术价值,也为未来高性能光电器件的开发提供了宝贵的材料基础和设计思路,特别是针对 905 nm 特定波长的应用需求,本研究成果有望推动相关领域的技术进步和产业升级。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240243>

参 考 文 献:

- [1] 张欣蕾. 高功率 808 nm 无铝有源区半导体激光器外延结构设计及其性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
 ZHANG X L. *Study on the Epitaxial Structure Design and Their Performances of High-power 808 nm Al-free Active Region Semiconductor Laser* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [2] 吴亚宁. 1 300 nm GaAsSb/GaAsP/InGaAsSb 有源区半导体激光器结构设计及性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
 WU Y N. *1 300 nm GaAsSb/GaAsP/InGaAsSb Structure Design and Performance Study of Active Region Semiconductor Lasers* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [3] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
 NING Y Q, CHEN Y Y, ZHANG J, *et al.* Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 41(1): 0114001. (in Chinese)
- [4] WANG J W, QI A Y, XU C W, *et al.* Optimized performance of 905 nm semiconductor lasers by using the high strain quantum well [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(17): 27927-27934.
- [5] YUN Z F, YAN L, TING T Z, *et al.* High-power, multi-junction, 905 nm vertical-cavity surface-emitting laser with an AlGaAsSb electron-blocking layer [J]. *Opt. Lett.*, 2023, 48(8): 2142-2145.
- [6] PODOSKIN A A, SHASHKIN I S, SLIPCHENKO S O, *et al.* All-optical modulator cells based on AlGaAs/GaAs/InGaAs 905-nm laser heterostructures [J]. *Tech. Phys. Lett.*, 2017, 43(1): 101-103.
- [7] LIU X, CHEN Y Y, ZENG Y G, *et al.* Tunable DFB laser diode based on high-order surface isolation grooves working at 905 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2021, 481: 126528.
- [8] SAMARTSEV I V, ZVONKOV B N, BAIDUS N V, *et al.* MOCVD growth of InGaAs metamorphic heterostructures for photodiodes with low dark current [J]. *Semiconductors*, 2024, 58(5): 451-456.
- [9] SHANG L, LIU S M, MA S F, *et al.* Investigation of the growth rate on optical and crystal quality of InGaAs/AlGaAs multi-quantum wells and InGaAs single layer grown by molecular beam epitaxy (MBE) [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2025, 185: 108860.
- [10] ZHAO H Y, LI X F, ZHAO Y C, *et al.* Optimized InGaAs growth on GaP/Si(100) templates with different low-temperature layers [J]. *J. Cryst. Growth*, 2024, 632: 127632.
- [11] BLOKHIN S A, BABICHEV A. V, GLADYSHEV A G, *et al.* Investigation of the characteristics of the InGaAs/InAlGaAs superlattice for 1 300 nm range vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Tech. Phys.*, 2024, 68(12): 549-557.
- [12] HAO X D, LI L, KONG Q B, *et al.* Atomic-scale insights of the effect of growth temperature on the migration behavior of Al atoms in InGaAs/AlGaAs multiple quantum wells [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2023, 154: 107197.
- [13] MU J F, WANG B, ZHOU Y L, *et al.* Epitaxial growth conditions and interface quality of InGaAs/GaAsP multiple quantum wells [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2024, 184: 108782.
- [14] HOU X B, KANG Y B, LIN F Y, *et al.* Effect of InAs insertion layer on the structural and optical property improvement of InGaAs/InAlAs multiple quantum wells [J]. *J. Alloys Compd.*, 2024, 984: 173910.

- [15] BLOKHIN S A, KOVACH Y N, BOBROV M A, *et al.* Emission linewidth and α -factor of 1.55 μm -range vertical-cavity surface-emitting lasers based on InGaAs/InGaAlAs quantum wells [J]. *Opt. Spectrosc.*, 2024, 132(2): 111-117.
- [16] YANG Z, MA S F, SHI Y, *et al.* InGaAs/AlGaAs MQWs grown by MBE: optimizing GaAs insertion layer thickness to enhance interface quality and luminescent property [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2024, 180: 108584.
- [17] PARK K, MOON P, AHN E, *et al.* Effects of thin GaAs insertion layer on InAs/(InGaAs)/InP(001) quantum dots grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(22): 223110.
- [18] WEN Y, WANG Y P, NAKANO Y. Suppressed indium diffusion and enhanced absorption in InGaAs/GaAsP stepped quantum well solar cell [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(5): 053902.
- [19] 于海鑫, 王海珠, 郎天宇, 等. GaAs插入层对InGaAs/AlGaAs量子阱发光性质的影响 [J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 1967-1973.
YU H X, WANG H Z, LANG T Y, *et al.* Effect of GaAs insertion layer on luminescence properties of InGaAs/AlGaAs quantum wells [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(11): 1967-1973. (in Chinese)
- [20] ZHANG B, WANG H Z, WANG X, *et al.* Effect of GaAs insertion layer on the properties improvement of InGaAs/AlGaAs multiple quantum wells grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 872: 159470.
- [21] MA S F, LI L, KONG Q B, *et al.* Atomic-scale insights of indium segregation and its suppression by GaAs insertion layer in InGaAs/AlGaAs multiple quantum wells [J]. *Chin. Phys. B*, 2023, 32(3): 037801.
- [22] 王骄. InGaAs量子阱材料生长及应变补偿研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
WANG J. *Study on Growth and Strain Compensation of InGaAs Quantum Well Materials* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [23] 刘伟超. InGaAsP/GaAs量子阱半导体激光器外延生长研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
LIU W C. *Epitaxial Growth Study of InGaAsP/GaAs Quantum Well Semiconductor Lasers* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [24] 王茹, 葛兴, 盛泓瑜, 等. InGaAs阱簇复合纳米结构的能带填充规律 [J]. *光学学报*, 2024, 44(13): 1316002.
WANG R, GE X, SHENG H Y, *et al.* Band filling law of InGaAs well-cluster composite nanostructures [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2024, 44(13): 1316002. (in Chinese)
- [25] 王健, 黄先, 刘丽, 等. 温度和电流对白光LED发光效率的影响 [J]. *发光学报*, 2008, 29(2): 358-362.
WANG J, HUANG X, LIU L, *et al.* Effect of temperature and current on LED luminous efficiency [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2008, 29(2): 358-362. (in Chinese)
- [26] WANG J, WANG H Z, WANG Q H, *et al.* Effect of localized states on the optical properties in InGaAs/GaAs multiple quantum wells grown by MOCVD [J]. *Photonics. Nanostruct.*, 2022, 51: 101047.
- [27] O'DONNELL K P, CHEN X. Temperature dependence of semiconductor band gaps [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(25): 2924-2926.
- [28] LI P P, LI H J, LI Z, *et al.* Strong carrier localization effect in carrier dynamics of 585 nm InGaN amber light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2015, 117(7): 073101.
- [29] LI T, FISCHER A M, WEI Q Y, *et al.* Carrier localization and nonradiative recombination in yellow emitting InGaN quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(3): 031906.
- [30] SHI R, JI N, YAN L, *et al.* Characterization of photoluminescence intensity and efficiency of free excitons in semiconductor quantum well structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, 82(8): 3870-3873.



甘露露(2000-),女,河南信阳人,硕士研究生,2022年于长春理工大学获得学士学位,主要从事半导体外延生长的研究。

E-mail: 2998048668@qq.com



王海珠(1983-),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体激光外延材料制备及应用的研究。

E-mail: whz@cust.edu.cn