

InAs/GaAs 多层堆垛量子点激光器的激射特性*

钱家骏¹ 叶小玲¹ 陈涌海¹ 徐波¹ 韩勤² 王占国¹

(1 中国科学院半导体研究所 半导体材料重点实验室, 北京 100083)

(2 中国科学院半导体研究所 光电子工艺中心, 北京 100083)

摘要: 利用固态源分子束外延技术,按 S-K 模式生长出五层堆垛 InAs/GaAs 量子点(QD)微结构材料.用这种 QD 材料制成的激光器,内光学损耗为 2.1cm^{-1} ,透明电流密度为 $15\pm 10\text{A/cm}^2$.对于条宽 $100\mu\text{m}$,腔长 2.4mm 的激光器(腔面未经镀膜处理),室温下基态激射的波长为 $1.08\mu\text{m}$,阈值电流密度为 144A/cm^2 ,连续波光功率输出达 2.67W (双面),外量子效率为 63% ,特征温度为 320K .研究了 QD 激光器激射特性,并对结果作了讨论.

关键词: 应变自组装量子点; InAs/GaAs 多层堆垛量子点; 量子点激光器; MBE 生长

PACC: 4255P; 7320D; 7855E

中图分类号: TN304.2+3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0184-05

1 引言

以自组装量子点(QD)为有源区的电注入激光器,由于纳米尺寸 QD 材料对载流子具有三维量子限制效应,理论上预期 QD 激光器会具有低的阈值电流密度、高的特征温度(T_0)以及宽的频带响应等优点,受到人们的关注.然而,由于 QD 面密度相对较低,其总体积只占整个波导层体积的一个较小分数.即使 QD 材料本身的最大材料增益很大($\sim 10^5\text{cm}^{-1}$)^[1],其基态激射的模增益相对量子阱(QW)材料而言,还是较小的.因此,在 QD 激光器中,基态激射的增益饱和现象是一个严重的问题.为了克服此缺点,通常采用多层堆垛 QD 层的结构,以增加有效的 QD 体积,提高模增益.此外,改善 QD 层生长界面的质量,减少掺杂层自由载流子的吸收,降低腔内光学损耗,也有利于提高净模增益.本研究采用固态源分子束外延(MBE)技术,生长出五层堆垛 QD 源区微结构,适当增加波导层宽度,减少光场与掺杂层中自由载流子分布的重叠,降低了腔内光学损耗,得到透明电流密度为 $15\pm 10\text{A/cm}^2$ 的较好结果.对于条宽 $100\mu\text{m}$,腔长 $2400\mu\text{m}$ 腔面未经镀膜处理的 QD 激光器,室温下 QD 基态激射阈值电流

密度为 144A/cm^2 ,连续波(CW)光功率输出为 2.67W (双面),特征温度达 320K .本文研究了 QD 激光器的激射特性,并与文献中结果作了比较和讨论.

2 实验

本研究利用固态源 MBE(Riber-32p)系统,在 n^+ -GaAs 衬底上按 S-K 模式自组装生长出 InAs/GaAs 量子点多层(五层)异质结微结构. QD 有源层位于 $0.4\mu\text{m}$ 宽的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x:0\sim 0.5$)折射率渐变分别限制(GRIN SCH)波导层中心,上下盖层分别为 $1\mu\text{m}$ 宽的 $p\text{-Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 和 $n\text{-Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 层.接触层为 p^+ -GaAs. QD 层生长温度为 480°C , $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 盖层生长温度为 700°C .原子力显微镜(AFM)对类似结构材料(未生长上盖层和接触层)观察表明, QD 平均高度这 4.5nm ,平均横向尺寸为 30nm ,面密度为 $1.4\times 10^{11}/\text{cm}^2$.

为了研究 QD 材料的激射特性,对 QD 材料和以 QD 材料作有源区的激光二极管(LD)器件,分别作了光致发光(PL)和电致发光(EL)测量. LD 的制备方法是:在外延微结构的 p^+ -GaAs 层上溅射 SiO_2 绝缘介质膜(厚约 150nm),利用光刻工艺刻出

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000068303),国家自然科学基金(批准号:60076024 和 90101002)和中国科学院“纳米科学与技术”(批准号:KJCX1-06-06)资助项目

100 μm 条形发光区, 溅射 Ti/Pt/Au 形成 p 面欧姆接触层. 从片子的衬底面(n 型面) 减薄到约 100 μm 厚度, 蒸发 Au/Ge/Ni 层, 在 400 $^{\circ}\text{C}$ 下合金化形成 n 面欧姆接触. 将片子解理成条宽 100 μm , 腔长从 500~2400 μm 的 LD 器件, 端面未作镀膜处理.

PL 和 EL 测量是将 QD 材料(去除 p⁺-GaAs 接触层与 p-Al_{0.5}Ga_{0.5}As 盖层) 或 LD 器件, 置于氦闭循环低温致冷机的冷端上, 用 IFS-120HR 傅里叶变换红外光谱仪, 在 FTPL 模式下测量不同温度的 PL 和 EL 发光光谱, 并利用 Gauss 线型对光谱作拟合, 得到 QD 基态和激发态跃迁峰的能量、强度, 半高宽(FWHM)等参数.

3 结果与讨论

15K 和 77K 下 QD 材料的 PL 谱测量表明, QD 基态跃迁峰 (E_0) 半高宽 (FWHM) 约为 31.5meV^[2]. 当光激发功率从 6mW 增加到 300mW 时, 基态 E_0 的 FWHM 基本保持不变 ($\Delta E_0 \leq 0.5\text{meV}$). 通常文献中报道的 InAs/GaAs QD 材料的基态 FWHM 在 30~70meV, 而本实验得到的基态跃迁(E_0) 的 FWHM 在 31~32meV, 表明在本研究中, 尽管采用了多层堆垛 QD 的结构, QD 的尺寸、形状及成分的均匀性是较好的. 除了材料生长过程参数控制得当外, 或许多层 QD 堆垛, 也影响了各个 QD 层生长的动力学, 改善了其有序性和均匀性.

为了检验所生长 QD 微结构材料的激射特性, 将片子制成条宽 100 μm , 具有不同腔长度的激光器(LD), 测定器件在不同温度下的电流注入发光和激射性质, 从中得到 LD 器件的各项激射参数.

在有关 QD 激光器激射特性的参数中, 内量子效率(η_i) 是一个重要的参数. 它与外量子效率(η_d) 和腔面损耗 α_m 之间的关系为^[3]:

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left[\frac{\alpha_i}{\alpha_m} + 1 \right] \quad (1)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad (2)$$

其中 α_i 为激光器的内耗损; L 是腔长; R 是腔面/空气界面的反射率, 对于 GaAs 和 InP 半导体材料, $R=0.32$ ^[3]. 从不同腔长激光器的光功率输出与阈值以上的注入电流曲线斜率, 可以推导出不同腔长激光器的外量子效率 η_d . 图 1 示出外量子效率倒数 ($1/\eta_d$) 与腔长 (L) 的直线关系(公式(1)). 从直线的截距和斜率得到内量子效率 $\eta_i = 86.5\%$, 内光学损

耗 $\alpha_i = 2.1\text{cm}^{-1}$. 图 2 示出 LD 器件的阈值电流密度 (J_{th}) 与腔长 ($1/L$) 关系, 将直线延长至 $L = \infty$, 得到透明电流密度 $J_{th}^{\infty} = 15 \pm 10 \text{ A/cm}^2$. 通常 InAs/GaAs QD LD 的内光学损耗在 2~10 cm^{-1} , 本研究中所得到的内耗损值是较低的. 除了前面从 PL 测量分析, 已得出 QD 尺寸形状及成分较均匀外, 采用适当的宽波导层结构, 也有利于减少光场与掺杂层之间的重叠, 从而降低了自由载流子的吸收, 使腔内光学损耗值较低. 关于 InAs/GaAs QD 激光器的内量子效率 η_i , 文献报道 In_{0.5}-Ga_{0.5}As/GaAs QD 激光器的 η_i 约为 70%^[4], In_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs QD 激光器的 η_i 约为 81%^[5]. 本工作采用多层堆垛 InAs/GaAs QD 微结构, 使内量子效率 η_i 达到 86.5%, 接近于 InGaAs/AlGaAs 单量子阱激光器的内量子效率 ($\eta_i \approx 90\%$)^[6]. 此外, 本工作得到的透明电流密度为 $15 \pm 10 \text{ A/cm}^2$, 如此低的透明电流密度, 不仅表明本工作所采用的器件结构是适宜的, 而且与得到内光学损耗值较低的结果是一致的.

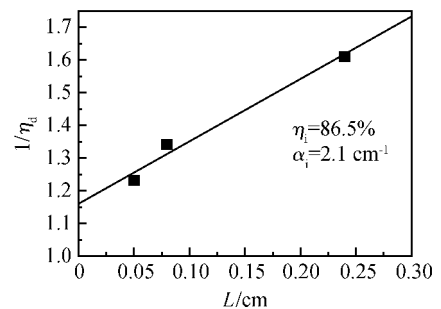


图 1 室温下外量子效率与腔长的关系

Fig. 1 External differential efficiency η_d^{-1} of the QD lasers as a function of cavity length during continuous-wave lasing at room temperature

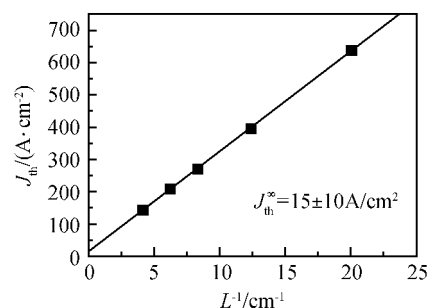


图 2 300K 下阈值电流密度与腔长倒数的关系

Fig. 2 Threshold current density (J_{th}) as a function of reciprocal cavity length (L^{-1}) at 300K

为了研究 QD LD 基态激射特性, 本实验研究了不同温度下, LD 器件基态跃迁谱峰能量 (E_0) 与注入电流密度的关系, 如图 3 所示. 由图可知, 基态跃迁峰位置, 随注入电流密度的增加, 峰位向低能方向“红移”, 而且低温下“红移”更明显. 例如, 对于条宽 $100\mu\text{m}$, 腔长 $800\mu\text{m}$ 的器件, 在 17K 和 67K 下, E_0 峰“红移”约 $4\sim 4.5\text{meV}$; 而在 $200\sim 300\text{K}$, “红移”约 $0\sim 2\text{meV}$. 基态跃迁能量的“红移”, 可能是由于随注入电流密度的增加, 源区温度会升高. 特别是在低温下, 相对温升会更大, 因此导致“红移”明显.

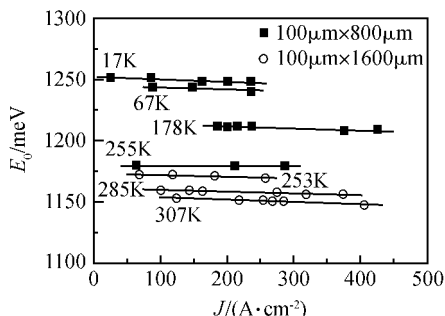


图 3 不同温度下基态跃迁谱峰 (E_0) 与注入电流密度 (J) 的关系 (腔面未镀膜)

Fig. 3 Spectral peak position of ground-state emission band in function of current density at several temperatures. The laser diodes are of $100\mu\text{m}$ width stripes and of 800 (■) and $1600\mu\text{m}$ (○) cavity length with uncoated facets.

图 4 示出条宽 $100\mu\text{m}$ 腔长 $1600\mu\text{m}$ QD 器件在不同温度下, 基态跃迁谱峰强度和半高宽 (FWHM) 与注入电流密度关系曲线. 对于该器件, 在温度低于室温时, 其基态跃迁峰强度随注入电流密度增加而增加 (图 4(a)), 而且温度越低, 增加的越快. 当温度高于室温时 (例如 $T \geq 324\text{K}$), 基态峰强度增加变缓, 而且在强度达到一定值后, 不再继续增加 (饱和). 从谱峰半高宽与注入电流密度曲线 (图 4(b)) 也可以看出, 温度低于室温时, FWHM 随注入电流密度增加而迅速减小, 且温度越低, 下降越快. 当温度高于室温时 (例如 $T \geq 324\text{K}$), 基态跃迁谱峰的半高宽基本保持不变, 其 FWHM 在 32meV 左右, 不随注入电流密度增加而减小 (图 4(b)). 与此同时, 第一激发态谱峰 (E_1) 强度随注入电流密度增加而迅速上升, FWHM 迅速减小 (图 4(a), (b)). 这表明, 对于本工作中的 $1600\mu\text{m}$ 腔长器件而言, 在 305K 与 324K 之间的某个温度下, 基态跃迁增益达到饱和, 导致第一激发态跃迁的激射.

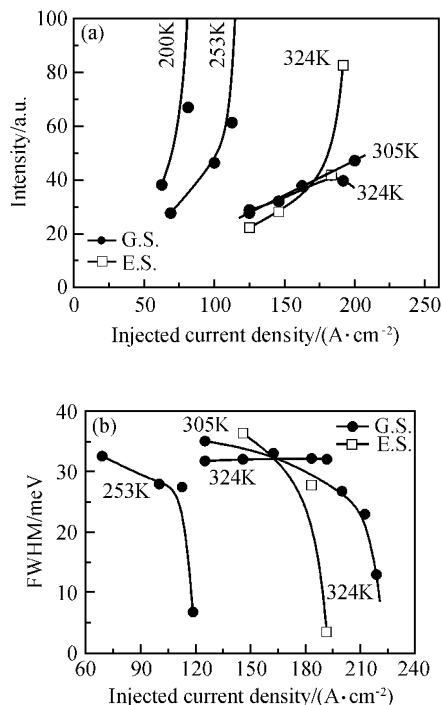


图 4 (a) 不同温度下发射谱峰强度与注入电流密度的关系; (b) 不同温度下谱峰半高宽 (FWHM) 与注入电流密度的关系 (●) 基态跃迁, (□) 第一激发态跃迁, 器件条宽 $100\mu\text{m}$, 腔长 $1600\mu\text{m}$

Fig. 4 (a) Spectral peak intensity as function of injected current density at several temperatures; (b) Relationship between spectral peak FWHM and injected current density at different temperatures (●) Ground state, (□) First excited state. The device is $100\mu\text{m} \times 1600\mu\text{m}$ with uncoated facets.

在阈值条件下, 模增益 (g_{mod}) 是与激光器的总损耗 (α_{tot}) 相平衡^[3]:

$$g_{\text{mod}} = \alpha_m + \alpha_i = \alpha_{\text{tot}} \quad (3)$$

按公式 (2), 对于 $1600\mu\text{m}$ 腔长的激光器, 其 $\alpha_{\text{tot}} = 9.2\text{cm}^{-1}$. 因此, 为了获得基态激射, 激光器的总损耗 (α_{tot}) 应小于 9.2cm^{-1} . 采用腔长较大的激光器, 例如 2.4mm 腔长 ($\alpha_{\text{tot}} = 6.9\text{cm}^{-1}$) 激光器, 在室温下获得基态跃迁的激射.

图 5 示出条宽 $100\mu\text{m}$ 腔长 2.4mm QD LD 器件室温连续波 (CW) 光功率输出 (单面) 与注入电流关系曲线. 最大光功率输出为 2.67W (双面), 斜率效率 $\eta_e = 0.76\text{W/A}$, 阈值电流密度 $J_{\text{th}} = 144\text{A/cm}^2$, 外量子效率为 63% , 激射波长为 $1.08\mu\text{m}$. 该器件阈值电流密度 (J_{th}) 随温度变化如图 6 所示. 从直线斜率可以得到: 在 $100\sim 300\text{K}$ 温度范围内, 特征温度 $T_0 = 320\text{K}$. 对于腔长 1.6mm 的器件, 其特征

温度 $T_0 = 84\text{K}$ (200~300K 温度范围), 导致该器件特征温度相对较低的主要原因, 是由于随着注入电流密度增加其基态激射的增益饱和, 从而引发第一激发态的激射, 增加了阈值电流密度. 由此可见, QD 激光器基态激射的增益饱和现象, 是一个十分重要的问题, 也是 QD 激光器在实际中能够获得广泛应用所必须解决的课题, 有待于今后进一步深入研究.

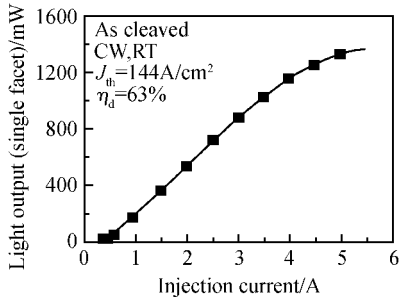


图5 室温下五层堆垛 QD 激光器连续波(CW)光功率输出(单面)与注入电流关系曲线 条宽 $100\mu\text{m}$, 腔长 2.4mm , 腔面未经镀膜处理.

Fig. 5 Light current characteristic of a five-fold stacked layer QD laser with $100\mu\text{m}$ width and 2.4mm length during continuous-wave lasing at room temperature. The laser facets are uncoated.

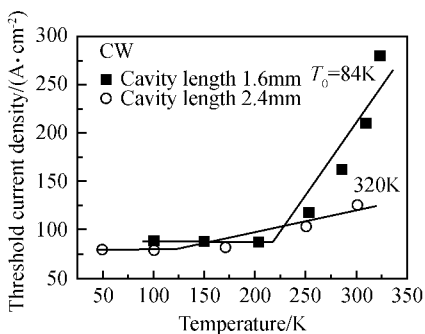


图6 1.6mm 和 2.4mm 腔长器件阈值电流密度与温度关系

Fig. 6 Temperature dependences of threshold current densities of 1.6mm and 2.4mm cavity length devices

4 小结

利用固态源分子束外延技术, 按 S-K 模式生长出五层堆垛 InAs/GaAs QD 微结构材料. 用这种 QD 材料制备的激光器, 内光学损耗 (α_i) 为 2.1cm^{-1} , 透明电流密度为 $15 \pm 10 \text{ A/cm}^2$. 对于条宽 $100\mu\text{m}$, 腔长 2.4mm 的 QD 激光器, 室温下基态激射的波长为 $1.08\mu\text{m}$, 阈值电流密度 $J_{\text{th}} = 144\text{A/cm}^2$, 连续波(CW)光功率输出为 2.67W (双面), 外量子效率 $\eta_d = 63\%$, 特征温度 $T_0 = 320\text{K}$.

参考文献

- [1] Bimberg D, Kirstaedter N, Ledentsov N N, et al. InCaAs-GaAs quantum-dot lasers. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1997, 3(2): 196
- [2] Qian Jiajun, Xu Bo, Chen Yonghai, et al. Optical characteristics of strained self-organised InAs/GaAs quantum dot materials and laser diodes. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(Supplement): 51 [钱家骏, 徐波, 陈涌海, 等. 应变自组装 InAs/GaAs 量子点材料与器件光学性质研究. 半导体学报, 2003, 24(增刊): 51]
- [3] Coldren L A, Corzine S W. Diode lasers and photonic integrated circuits. New York: Wiley, 1995: 52
- [4] Ustinov W M, Egorov A Y, Kovsh A R, et al. Low-threshold injection lasers based on vertically coupled quantum dots. J Cryst Growth, 1997, 175/176: 689
- [5] Mirin R, Gossard A, Bowers J. Room temperature lasing from InGaAs quantum dots. Electron Lett, 1996, 32: 1732
- [6] Hu S Y, Young D B, Corzine S W, et al. High-efficiency and low-threshold InGaAs/AlGaAs quantum-well lasers. J Appl Phys, 1994, 76: 3932

Lasing Characteristics of InAs/GaAs Quantum-Dot Lasers with Multistacked Dot Layer*

Qian Jiajun¹, Ye Xiaoling¹, Chen Yonghai¹, Xu Bo¹, Han Qin², and Wang Zhanguo¹

(1 *Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The five-fold layer quantum-dot(QD) microstructure material is grown by S-K mode with solid source molecular epitaxy technique. The internal loss coefficient (α_i) of 2.1cm^{-1} and a transparency current density of $15\pm 10\text{ A/cm}^2$ are gained. The threshold current density of 144A/cm^2 , light output power (both facets) of 2.67W , external differential quantum efficiency $\eta_d = 63\%$ and a characteristic temperature $T_0 = 320\text{K}$ are obtained for $100\mu\text{m}$ strip and 2.4mm cavity length laser diode with uncoated facets during room temperature continuous-wave lasing.

Key words: strained self-organized quantum dots; InAs/GaAs multistacked layer quantum dots; quantum dot lasers; molecular beam epitaxy

PACC: 4255P; 7320D; 7855E

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0184-05

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. G2000068303), the National Natural Science Foundation of China(Nos. 60076024, 90101002) and the Project of Nano-Science and Technology of Chinese Academy Sciences(No. KJCX1-06-06)