

InAs/GaAs 自组织量子点激发态的激射^{*}

汪 辉 牛智川 王海龙 王晓东 封松林

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格和微结构国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 将覆盖层引入生长停顿的量子点结构作为激光器有源区来研究量子点激光器受激发射机制. 由于强烈的能带填充效应, 光致发光谱和电致发光谱中观察到对应于量子点激发态跃迁的谱峰, 大激发时其强度超过基态跃迁对应的谱峰. 最后激发态跃迁达到阈值条件, 激射能量比结构相似但不含量子点的激光器低, 表明量子点激光器中首先实现受激发射是量子点的激发态.

关键词: 自组织量子点; 量子点激光器; 受激发射; 能带填充效应

PACC: 7320; 4255P; 6855

中图分类号: O342.1⁺2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)03-0295-04

1 引言

虽然许多研究小组都报道了基于自组织量子点的受激发射, 但人们对这些激光器的工作机制仍存在疑问. 因为对于有源区量子点层数较少(≤ 3)的量子点激光器来说, 文献报道的激射能量大都比相应的光致发光谱(PL)峰值能量高^[1-3]. 进一步的分析表明, 这种比 PL 峰位能量更高的受激辐射可能来源于量子点的激发态跃迁或尺寸较小的量子点基态跃迁^[1, 2, 4], 甚至还有可能来自于 InAs 浸润层(Wetting Layer). 如果没有确凿的证据表明是量子点参与激射(不管是小量子点还是激发态), 这种激光器结构还不能被名正言顺地称为量子点激光器. 本文通过设计特殊的有源区结构, 使激光器的激射能量与对应于量子点激发态跃迁的 PL 谱峰值能量完全吻合, 证明受激辐射跃迁即不是来源于 Wetting Layer, 也不是来源于小量子点, 而是量子点的激发态, 希望能为理解量子点激光器的工作机制提供一点线索, 并对其进一步的改进和优化指明方向.

2 实验

为讨论量子点激光器的受激发射机制, 我们用 V80H MK-II 分子束外延(MBE)系统制备了有源区包含量子点结构的激光器 II. 具有相似结构但不含量子点的激光器 I 是对比样品, 其有源区由三层 1ML(原子单层)的 InAs 构成, 层与层被 10nm 的 GaAs 间隔开.

当 InAs 量子点形成后, GaAs 覆盖层(Cap Layer)通常是必须的. 我们以前的工作^[5-7]表明在 Cap Layer 中引入生长停顿或退火等过程后, 将加强量子点表面 In 原子与 Cap Layer 中 Ga 原子之间的互扩散, 导致量子点及其周围应力场的重新分布, 引起量子点结构形貌和光电性质的变化. 基于此我们采用一种特殊的纵向控制量子点(LCQD)结构作为激光器 II 的有源区^[6]. LCQD 结构与通常量子点结构的不同之处在于: 在刚形成的 InAs 岛状结构上只覆盖很薄的一层 GaAs(称为控制层 Control Layer), 然后生长停顿, 等待一段时间后才接着完成整个 GaAs Cap Layer 的生长^[7]. 激光器 II 具体

^{*} 国家攀登计划和国家自然科学基金资助项目(编号: 69776016).

汪 辉 男, 1975 年出生, 博士, 现从事低维半导体器件及物理性质的研究.

封松林 男, 1964 年出生, 研究员, 现从事低维半导体物理性质的研究.

2000-02-18 收到, 2000-05-29 定稿

©2001 中国电子学会

的有源区是由三层 LCQD 构成的, 每层中 InAs 的淀积量为 2ML, 控制层厚度 1.5nm, 停顿时间 2min, 再生长 7.5nm GaAs 完成整个 Cap Layer.

$p^+ 1 \times 10^{19}$ 450nm	GaAs
$p^+ 1 \times 10^{18}$ 1500nm	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$
134nm	$Al_xGa_{1-x}As \quad x = 0.3-0.4$
$20 \times (2nm \text{ } Al_{0.3}Ga_{0.7}As / 1nm \text{ } GaAs)$	
40nm	GaAs
Active Layer	
40nm	GaAs
$20 \times (2nm \text{ } Al_{0.3}Ga_{0.7}As / 1nm \text{ } GaAs)$	
134nm	$Al_xGa_{1-x}As \quad x = 0.4-0.3$
$n^+ 2 \times 10^{18}$ 1500nm	$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$
$n^+ 4 \times 10^{18}$ 200nm	$Al_xGa_{1-x}As$
$x = 0.1-0.4$	
$n^+ 4 \times 10^{18}$ 500nm	GaAs
n^+ GaAs(100) Substrate	

图 1 激光器结构示意图

FIG. 1 Structure of QD Lasers

除了有源区以外, 激光器 II 与激光器 I 的基本结构相同, 如图 1 所示. 在 n^+ GaAs(100) 衬底上淀积 500nm n^+ GaAs buffer 层之后, 生长了 200nm n^+ $Al_xGa_{1-x}As$ 缓变层, 其中的 Al 组份 x 从 0.1 按抛物线型渐变到 0.4. 它们的掺杂浓度都是 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 此后的结构相对于有源区对称: 1500nm 的 $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ 用作夹层, 上、下夹层的掺杂浓度分别为 $n^+ 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 $p^+ 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 波导层是抛物线型渐变的 134nm $Al_xGa_{1-x}As (x = 0.4-0.3)$, 有源区镶嵌在 80nm GaAs 中间, 紧邻的是用以改善生长界面的 20 周期 2nm $Al_{0.3}Ga_{0.7}As / 1nm \text{ } GaAs$ 超晶格. 最后覆盖 450nm 高掺杂 ($1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 的 p^+ GaAs 盖层用做欧姆接触. 样品生长温度为 600°C , 只在生长有源区时降至 500°C . In 的淀积速率为 0.1ML/s, Si、Be 分别用作 n 型和 p 型掺杂剂.

3 实验结果和讨论

经过腐蚀和光刻工艺, 样品被制成条型激光二极管, 条宽 $8\mu\text{m}$, 腔长 $300\mu\text{m}$. 我们测量了室温 (290K) 时激光器的变激发强度 PL 谱和 EL 谱. 为便于研究样品的光致发光 (PL) 谱, 激光器结构中

上波导层以上的部分被化学腐蚀掉. PL 谱是用 He-Ne 激光器的 632.8nm 激光线来激励的, 而电致发光 (EL) 谱则是由一个直流恒流源来激励的. 液氮冷却的锗光电探测器收集信号.

图 2 给出了 290K 时不含量子点的激光器 I 的变激发功率 PL 谱, 谱中只有一个能量位于 1.395eV 的光致发光峰, 它与通常的量子点结构中 Wetting Layer 能量位置吻合. 随着 He-Ne 激励光功率强度增加, 光致发光峰的强度线性增大, 峰形却基本不变. 图 3 中激射峰位在 1.392eV, 与 PL 峰位基本一致. 可见激光器 I 是量子阱激光器, 它的有源区其实就相当于量子点结构中的 Wetting Layer.

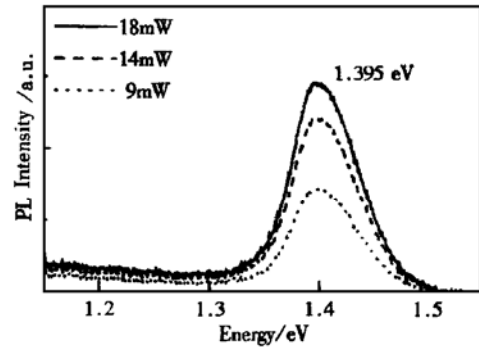


图 2 290K 时激光器 I 的 PL 谱

FIG. 2 PL Spectra of Laser I at 290K

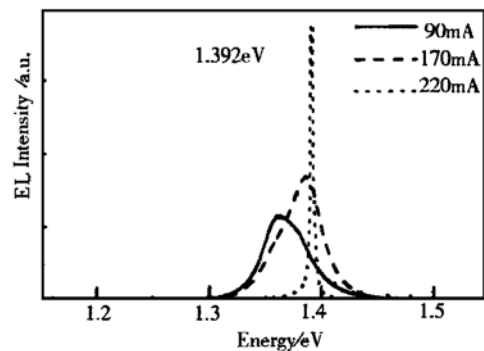


图 3 290K 激光器 I 的 EL 谱

FIG. 3 EL Spectra of Laser I at 290K

图 4 是激光器 II 在不同激励光功率下的 PL 谱, 其中 1.424eV 的光致发光峰位对应于 GaAs 带边, 此外在能量 1.238eV 和 1.326eV 处还出现了两个显著的 PL 谱峰, 分别记为 G 峰和 E 峰. 激光器 II 与 I 的结构非常相似, 因此与 Wetting Layer 相关的光致发光峰值能量应该在激光器 I 光致发光峰附近, 即 1.395eV 左右. G 峰和 E 峰的能量分别比这

个值低约 157meV 和 70meV, 所以它们与 Wetting Layer 无关, 而与量子点有关. 当激励光功率很小 (2.3mW) 时, 只能观察到能量较低的 G 峰. 随着 He-Ne 激光器激发功率由弱变强, E 峰与 G 峰的强度都显著上升, 但 E 峰增加得更快. 图 4 的插图给出了相对强度与激发功率的关系: 弱激发 (2.3mW) 时 E 峰几乎不可辨认, 相对强度比接近于零; 激发光强增加, 相对强度比也变大; G 峰强度逐渐饱和, 18mW 激发下, 相对强度比到达 1, 功率进一步增至 30mW 时, E 峰的强度甚至大于 G 峰的 1.2 倍. 这是典型的能态填充效应, G 峰对应的是量子点基态电子和空穴辐射复合跃迁能量, 而 E 峰对应的则是激发态跃迁能量. 弱激发时光生载流子数量少, 只够填充到基态, E 峰很弱; 随着激发增强, 载流子数量增多, 大量填充到基态的电子和空穴来不及复合, 就堆积起来逐渐填满基态, 出现一定程度的饱和, 多余的载流子填充到激发态, E 峰迅速增强, 逐渐赶上并超过了 G 峰.

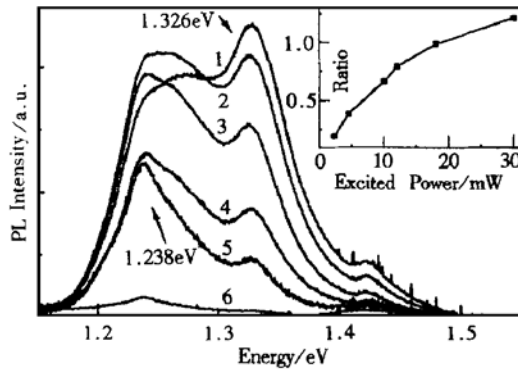


图 4 290K 时激光器 II 的 PL 谱 各谱线的激发功率为 1: 30mW, 2: 18mW, 3: 12mW, 4: 10mW, 5: 4.5mW, 6: 2.3mW. 插图为两光致发光峰位强度的相对比值.

FIG. 4 PL Spectra of Laser II at 290K Excitation power is 1: 30mW, 2: 18mW, 3: 12mW, 4: 10mW, 5: 4.5mW, 6: 2.3mW. Insert diagram is relative intensity ratio of two peaks.

激光器 II 的 EL 谱 (图 5) 中观察到了更明显的能带填充效应. 测量 EL 谱时外加的持续激励电流, 会使激光器温度上升, 所以相对于 PL 谱, 在 EL 谱中 G 峰和 E 峰能量发生了 2meV 的红移. 给激光器外加电激励时, 会产生比光激发多得多的载流子, 很强的能带填充使得在接近阈值电流时, 绝大部分的载流子都填充到激发态, 最后在量子点的激发态实现了受激发射 (图 5 的插图).

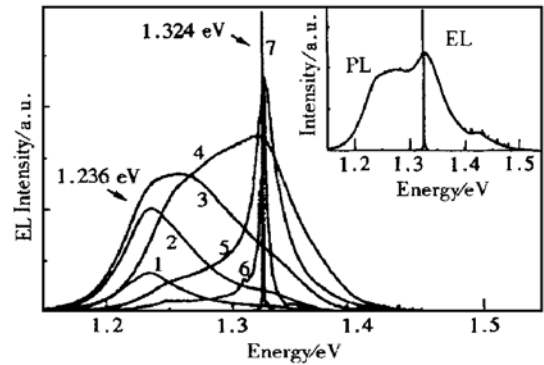


图 5 290K 时激光器 II 的 EL 谱 各谱线的注入电流为 1: 1mA, 2: 5mA, 3: 25mA, 4: 45mA, 5: 62mA, 6: 66mA, 7: 68mA. 插图为 30mW 激发的 PL 谱与 68mA 激射谱.

FIG. 5 EL Spectra of Laser II at 290K Injection current is 1: 1mA, 2: 5mA, 3: 25mA, 4: 45mA, 5: 62mA, 6: 66mA, 7: 68mA. Insert diagram is PL and EL spectrum under 30mW and 68mA excitation respectively.

4 结论

由于强烈的能带填充效应, 量子点激光器中的量子点激发态跃迁强度明显增大, 大激发时超过基态跃迁强度. 最后受激辐射跃迁是在激发态上实现的, 比只有 Wetting Layer 的激光器激射能量低. 这个结果证明, 量子点激光器的受激发射来源, 既不是 Wetting Layer, 也不是小量子点, 而是量子点激发态.

参考文献

- [1] N. Kirstaedter *et al.*, Electron. Lett., 1994, **30**: 1416.
- [2] Q. Xie, A. Kalburge, P. Chen *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 1996, **8**: 965.
- [3] H. Shoji, Y. Nakata, K. Mukai *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1997, **71**: 193.
- [4] Barbara Goss Levi, Physics Today, May, 1996, 22.
- [5] WANG ZhiMing, Lü Zhendong, FENG Songlin *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**(9): 714 (in Chinese) [王志明, 吕振东, 封松林, 等, 半导体学报, 1997, **18**(9): 714].
- [6] WANG Hui, ZHU Haijun, FENG Songlin *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(4): 328 (in Chinese) [汪辉, 朱海军, 封松林, 等, 半导体学报, 1999, **20**(4): 328].
- [7] Zhu H. J., Wang Z. M., Wang H. *et al.*, J. Crystal Growth, 1999, **197**: 372.

Excited-State Lasing of InAs/GaAs Self-Organized Quantum Dot^{*}

WANG Hui, NIU Zhi-chuan, WANG Hai-long, WANG Xiao-dong and FENG Song-lin

*(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)*

Abstract: To investigate the origin of stimulated emission of a Quantum Dot (QD) laser, lasers with or without QDs as active region have been grown by MBE. According to the PL and EL properties, the QD energy levels in QD laser are distinctively resolved due to the band filling effect, and the lasing energy is realized at the excited level, which is much lower than that of the laser with only a wetting layer. The reported QD laser has proved to be lasing from the excited state of quantum dots.

Key words: self-organized quantum dots; QD laser; stimulated emission; band-filling effect

PACC: 7320; 4255P; 6855

Article ID: 0253-4177(2001)03-0295-04

^{*} Project Supported by the Climbing Project and National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69776016.

WANG Hui male, doctor, is working in the fields of low dimensional semiconductor devices and physical properties.

FENG Song-lin male, professor, is working in the fields of low dimension physics.

Received 18 February 2000, revised manuscript received 29 May 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics