

室温脉冲激射的纵向控制 InAs 量子点激光器*

汪 辉 朱海军 王晓东 王海龙 封松林

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

摘要 利用一种我们新近提出的 MBE 自组织 InAs/GaAs 量子点生长方式, 制成条型激光器, 在室温脉冲工作条件下实现了激射. 与测得的光致发光 (PL) 谱对照, 发现激射峰位与量子点的 PL 谱峰位基本吻合. 不同激光器结构的样品激射峰有相当大的移动, 说明了激射来自量子点. 在其它条件完全相同而仅有源区不同的条件下, 纵向控制量子点激光器的阈值电流只是垂直耦合量子点激光器的 $1/3$ (60mA ~ 200mA), 我们给出了一个简单的解释, 并据此提出了一种实现调节量子点激光器激射能量的方法.

PACC: 7320, 4255P, 6855

1 引言

由于量子点材料具有优越的光电特性, 以量子点材料为有源区的激光器结构即所谓的量子点激光器, 受到了许多科研小组的关注. 早在八十年代, A. Rakawa^[1]和 A. Sada^[2]就预言了量子点激光器的超低阈值等诸多特性. 1994 年, Kirstaedter 成功地实现了条形 InAs/GaAs 自组织量子点激光器的原型器件^[3], 从此量子点激光器的研究取得了很大的进展^[4-9]. 但目前研制的量子点激光器的性能尚远未如理论预言的那么优越, 主要原因在于自组织生长的量子点尺寸大小分布不一^[10], 各量子点的受限能级弥散在一定范围之内; 实现激射时, 光学振荡器的线宽只能放大那些能量在极窄窗口的光子, 只有当一个量子点的受限能级落在这个极窄范围之中时, 它才对增益有贡献; 这样, 实际参与激射的量子点数目非常有限, 虽然单个量子点的电光效率极高^[11, 12], 但全部量子点整体构成的有源区效率却非常低. 因此有源区量子点能量的弥散成为当前制约量子点激光器发展的一个瓶颈, 如何提高有源区量子点的尺寸均匀性, 减小能量分布弥散度, 增加对激射有效的量子点数目成为重要的研究方向. 当前采用的多层量子点^[6] (10 层或更多)、垂直耦合量子点^[4, 7, 13, 14]等结构都使激光器性能有所改善, 其中尤以后者更优, Heinrichsdorff 等采用这种结构实现了目前最低的阈值电流密

* 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, 现从事低维半导体物理性质的研究
朱海军 男, 1969 年出生, 博士后, 现从事低维半导体物理性质的研究
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
1998-10-27 收到, 1998-12-17 定稿

度^[7]。这些方法均着眼于量子点的横向(垂直于生长方向)大小分布,通过改善横向尺寸均匀性来减小能量的弥散度,但进一步提高材料的性能受到很大限制。如果在此基础上通过控制量子点的纵向尺寸来控制其受限能级,使其能级主要由纵向尺寸决定,就有可能获得受限能级更加一致的量子点,该推断已被我们的实验证实^[15],因此采取措施来控制量子点的纵向尺寸是进一步优化有源区的一个方法。

2 实验

基于以上的认识,我们采用一种新的方法来生长量子点结构,在耦合量子点基础上进行进一步的改善,具体的讨论见参考文献^[15],这里只给一简单的介绍。与通常耦合量子点结构不同,当 InAs 自组织量子点形成之后,并不一步完成整个 GaAs 盖层,而是首先生长一薄层厚度远不足以完全盖住量子点的 GaAs,我们称之为控制层,然后引入一段时间的停顿,最后才覆盖其余的 GaAs。我们称这样生长的结构为纵向控制量子点(LCQD)。根据 Cusack 等的计算表明^[16],电子波函数主要集中在量子点的底部,因此只有当量子点的纵向尺寸足够小时,才可能影响波函数,这就是控制层必须足够薄的原因。而在这种情况下,纵向尺度远小于横向,电子在纵向受限最强烈,所以受限能级的大小主要由纵向尺寸决定。生长停顿是为了让量子点中高于控制层的顶端部分有足够时间迁移并形成第二个浸润层^[17](图 1),这样金字塔型的量子点变为棱台型,它们的纵向尺寸基本一致,从而实现量子点的纵向尺寸控制,也就使量子点的基态能级变得更为集中。

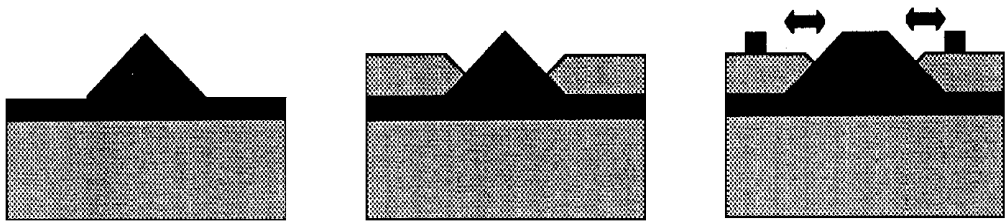


图 1 纵向控制量子点结构生长示意图

量子点形成后,生长控制层,引入停顿,InAs 迁移形成第二个浸润层,量子点的纵向受到控制

光致发光谱(PL 谱)的结果证实了这点,图 2(a)中 20K 时 LC 量子点结构 A 的光致发光峰半高全宽为 27meV,与普通耦合量子点结构 B 的 60meV 相比,显著变窄,表明其基态能量分布更为集中。

我们用 LC 量子点来优化有源区。激光器样品是用 V80HMK-II 分子束外延(MBE)系统制备的,基本结构如下:在 n^+ GaAs(100) 衬底上,淀积 500nm n^+ GaAs buffer 层之后,依次生长 200nm n^+ Al_{0.3}Ga_{0.7}As 下渐变层和 1500nm n^+ Al_{0.4}Ga_{0.6}As 下夹层,掺杂浓度分别为 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 和 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$,渐变层中的 Al 组分 x 从 0.1 按抛物线型渐变到 0.4;下波导层是抛物线型渐变的 134nm Al_{0.3}Ga_{0.7}As (x 从 0.4 减小至 0.3);接着是 20 周期的 2nm Al_{0.3}Ga_{0.7}As/1nm GaAs 超晶格和 40nm GaAs,然后生长温度由 600 降为 500,生长有源区。有源区后顺序生长的是与有源区以下对称的 40nm GaAs、20 周期超晶格、上波

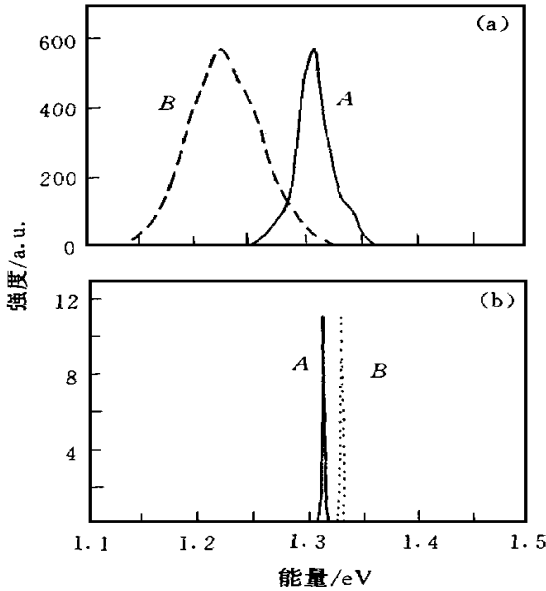


图 2 (a) 20K 样品的 PL 谱, A 是纵向控制量子点, 半高全宽(FWHM) 27meV, B 是普通耦合量子点, FWHM 60meV. (b) 室温激光谱, A 激光峰位 1.31eV, B 激光峰位 1.33eV

导层和 P⁺ 上夹层 ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 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 在我们的系统中, Si, Be 分别用作 n 型和 p 型掺杂元素

作为对比, 我们生长了两种激光器样品, 它们的差别仅在于有源区不同 样品 A 的有源区采用 LC 量子点结构, 由 3 层 LC 量子点构成, 每层中 InAs 的淀积量为 2ML (Mono-layer 原子单层), 控制层厚度为 1.5nm, 停顿时间为 2 分钟, 再用 7.5nm GaAs 作隔离层 样品 B 用于对比, 其有源区采用垂直耦合量子点结构, 由三层 2ML InAs 量子点和其间的 10nm GaAs 隔离层构成 在两个样品中, In 的淀积速率均为 0.1ML/S

3 结果和讨论

经过与普通量子阱激光器生产相同的后续工艺, 将样品制成条形激光器 条形的台宽为 12 μm , 间距 300 μm , 在室温 (28 $^{\circ}\text{C}$)

实现了脉冲工作方式激光(如图 3), 脉冲频率 1kHz, 占空比 100%

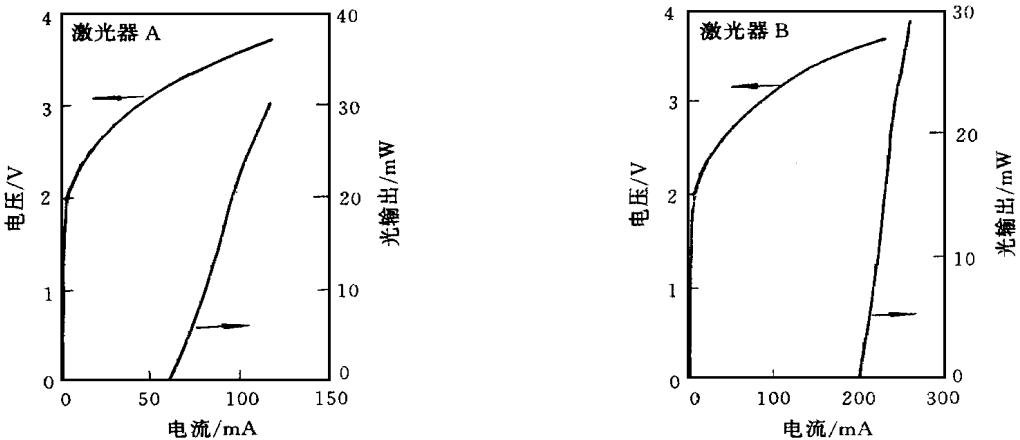


图 3 激光器 A 和 B 的电压-电流曲线和光输出功率-电流曲线 阈值电流分别为 60mA 和 200mA.

样品 A 的室温激光峰位在 944nm (1.31eV), 与 A 中量子点的 PL 峰位吻合得很好, 如图 2 一般认为在量子点激光器结构中, 除量子点外, InAs 浸润层也可能激光 对于样品 A 和 B, 由于它们的差别仅在于生长 GaAs 盖层时是否引入停顿, 这时已完成 InAs 量子点

的生长, 浸润层已形成, 所以两种结构中的 InAs 浸润层应是相同的 因而如果是浸润层激射, A 和 B 的激射峰位应该是相同的 但样品 B 的室温激射峰位在 934nm (1.33eV), 与 A 并不一致, 这就排除了是 InAs 浸润层激射的可能 因此激射峰位与量子点光致发光峰位的吻合, 以及激射峰位随样品结构不同而变化, 说明激射的是量子点

样品 A 的 PL 峰位相对于 B 的 PL 峰位发生蓝移 这是因为 LC 量子点的顶端被削去, 纵向尺寸减小, 量子限制增强, 量子点的基态能量升高 但与 B 相比, A 的激射峰位却发生了红移 一般认为, PL 峰位表明在这个能量附近的量子点数目最多, 而激射峰位则不仅受量子点数目影响, 还与量子点的电光效率有关 对于普通的耦合量子点, Xie 等认为能量较高的量子点具有更大的电光效率^[5~8], 所以 B 的激射峰位在其光致发光峰位的高能端 而对于 A, LC 量子点的能量主要由纵向尺寸决定, 因此我们认为不同能量的 LC 量子点的电光效率并无显著差别 PL 峰位能量附近的量子点由于数目最多而最先激射, 激射峰位与 PL 峰位基本一致 这样, 虽然 A 的 PL 峰位比 B 的 PL 峰位能量高, 但由于不同能量量子点电光效率差别的影响, 导致 B 的激射峰位相对于其 PL 峰位有更大的蓝移, 所以总的效果是样品 A 的激射峰位相对于 B 红移 还需进一步的实验来验证我们的推断

值得指出的是, 这实际上提供了一种调节量子点激光器激射能量的方法 在 LC 量子点结构中, 只需改变 InAs 和控制层的淀积厚度以及生长停顿时间, 就可以改变量子点的基态能量, 比如增大 InAs 和控制层的淀积厚度或减少停顿时间, 都会导致量子点能量的红移 而根据上面的分析, 在 LC 量子点激光器中电光效率的影响可忽略, 其激射能量也将几乎与量子点的能量同步改变 我们正在进行这方面的研究

如图 3 所示, 激光器 A 的阈值电流为 60mA, B 为 200mA, 这说明采用 LC 量子点后, 激光器的阈值电流密度减小为耦合量子点的 1/3, 性能显著提高 我们认为经过生长停顿后, LC 量子点的纵向尺寸基本相当, 使得量子点能量中与纵向尺寸有关的部分基本相同, 而该部分构成了能量的主要部分, 因此使能量的弥散度减小, 也就是说在谐振腔中出现的光子能量更为集中, 这样在模式竞争时, 更容易将某种光子放大, 也就更容易达到阈值从而实现激射, 因此阈值电流密度大为减小 实际上 LC 量子点有源区的采用, 使“有效”的, 即对增益有贡献的量子点数目大大增加, 激光器的效率有所改善

根据 A rakawa 的预言, 量子点激光器有更窄的线宽, 我们注意到在未进行任何器件结构优化的情况下, A、B 的线宽均已达到 0.8nm, 只是普通量子阱激光器(约 1.5nm)的一半, 表现了量子点激光器的巨大潜力

4 结论

从以上讨论, 我们认为采用这种新的量子点结构, 即纵向控制量子点作为有源区制成激光器, 将在垂直耦合量子点激光器的基础上进一步提高性能 同时我们提供了一种方法来调节量子点激光器的激射能量, 这对量子点激光器将来可能的实用化提供了更多的应用前景

参 考 文 献

- [1] Y. Arakawa and H. Sakaki, Appl Phys Lett, 1982, 40: 939
- [2] M. A sada, Y. Miyamoto and Y. Suematsu, IEEE J. Quantum Electron, 1986, QE-32: 1915

- [3] N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, M. Grundmann *et al* , Electron Lett , 1994, **30**: 1416
 [4] Zh I A lferov, N. Yu Gordeev, S V. Zaitsev *et al* , Semiconductor, 1996, **30**: 197.
 [5] Q. Xie, A. Kalburge, P. Chen *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1996, **8**: 965.
 [6] H. Shoji, Y. Nakata, K. Mukai *et al* , Appl Phys Lett , 1997, **71**: 193
 [7] F. Heinrichsdorff, M. H. Mao, N. Kirstaedter *et al* , Appl Phys Lett , 1997, **71**: 22~ 24
 [8] D. L. Huffaker, O. Baklenov, L. A. Graham *et al* , Appl Phys Lett , 1997, **70**: 2356
 [9] J. -Y. Marzin, J. M. Gerard, A. Izrael *et al* , Phys Rev. Lett , 1994, **73**: 716
 [10] 杨小平, 张鹏华, 张伟, 等, 半导体学报, 1996, **17**: 869.
 [11] K. H. Schmidt, G. Medeiros-Ribeiro, J. Garcia *et al* , Appl Phys Lett , 1997, **70**: 1727.
 [12] Barbara Goss Levi, Physics Today, 1996, **22**: 3
 [13] 王志明, 邓元明, 封松林, 等, 半导体学报, 1997, **18**: 550
 [14] 王志明, 邓元明, 封松林, 等, 物理学报, 1998, **47**: 89
 [15] Zhu H. J. , Wang Z M. , Wang H. *et al* , to be published in J. Crystal Growth
 [16] M. A. Cusack, P. R. Briddon, Phys Rev. B, 1996, **54**: 2300
 [17] N. N. Ledentsov, V. A. Shchukin, M. Grundmann *et al* , Phys Rev. B, 1996, **54**: 8743

Room-Temperature Pulsed Laser of Longitude Control InAs Quantum Dots

Wang Hui, Zhu Haijun, Wang Xiaodong, Wang Hailong, Feng Songlin

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

Received 27 October 1998, revised manuscript received 17 December 1998

Abstract Using a new InAs/GaAs self-organized quantum dot (QD) structure as active region, a striped laser is realized pulse operation at room temperature. Growth interruption have been introduced after capping InAs islands with a thin enough GaAs layer (control layer), and the whole GaAs cap layer is finished after the interruption. We call this structure as Longitude Control Quantum Dot (LCQD). The position of laser peak agrees with the position of photoluminescence (PL) peak properly, and has a great shift on different lasers. These results illustrate that it is lasing from the QD. The threshold current of LCQD laser is reduced to only 1/3 of the vertical coupled QD laser. A simple model can explain this phenomena, and in the result a new way to tune the energy of QDS laser is provided.

PACC: 7320, 4255P, 6855