

生长停顿对量子点激光器的影响*

TN 24804

汪辉 王海龙 王晓东 牛智川 封松林

TN 304.23

(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 在 InAs 自组织量子点的 GaAs 覆盖层中引入生长停顿, 将这种量子点结构作激光器的有源区, 与不引入生长停顿的量子点激光器进行对比后发现: 生长停顿可以降低激光器的阈值电流, 提高其特征温度, 改善激光波长的温度稳定性. 简单的分析表明, 量子点中的能带填充效应影响了激光波长的温度特性.

关键词 InAs 自组织量子点, 量子点激光器, 生长停顿, 能带填充效应.

石中化图

THE INFLUENCE OF GROWTH INTERRUPTION ON QUANTUM DOT LASER*

WANG Hui WANG Hai-Long WANG Xiao-Dong NIU Zhi-Chuan FENG Song-Lin

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

Abstract Growth interruption was introduced during the growth of GaAs capping layer of self-organized quantum dots. The comparison of two QD lasers with and without growth interruption in their active regions shows that growth interruption leads to lower threshold current, higher characteristic temperature, and weaker temperature dependence of lasing energy.

Key words self-organized InAs quantum dots, quantum dots laser, growth interruption, band-filling.

引言

量子点激光器表现出比量子阱激光器更优越的性能^[1,2,3,4], 因此量子点^[5]在半导体激光器件上的应用引起广泛关注. 我们在 InAs 自组织量子点的 GaAs 覆盖层中引入了生长停顿^[6,7]; 在 GaAs 衬底上形成 InAs 量子点, 一层厚度小于 InAs 岛平均高度的 GaAs 淀积在其上, 然后生长停顿一定时间, 再生长 GaAs 完成整个覆盖层. 根据光致荧光(PL)谱峰半高全宽的减小, 可以判断这种生长方法能提高量子点的均匀性^[8]. 本文主要讨论这种量子点结构为有源区的激光器, 分析生长停顿对激光器性质的影响.

1 实验

MBE 生长的两个量子点激光器除了有源区以外的基本结构相同: 在 n^+ GaAs(100) 衬底上生长

1500nm n^- Al_{0.4}Ga_{0.4}As ($2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 包裹层, 组分缓变的 Al_xGa_{1-x}As ($x = 40\% \sim 30\%$) 层厚度为 200nm, 2nm Al_{0.3}Ga_{0.7}As/1nm GaAs 超晶格共 20 周期用来改进表现平整度, 量子点有源层夹在 80nm GaAs 层之间, 其上对称地生长 $20 \times (2\text{nm Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/1\text{nm GaAs})$ 短周期超晶格, 200nm Al_xGa_{1-x}As ($x = 30\% \sim 40\%$) 缓变层和 1500nm p^- Al_{0.4}Ga_{0.4}As ($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 包裹层, 最后是 450nm p^+ GaAs ($1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) 用于欧姆接触. 有源区的生长温度是 500°C, 其余部分的生长温度都是 600°C.

两个激光器的区别在于有源层, 激光器 A 采用了生长停顿的量子点结构作为有源区. 它由 3 层量子点叠合而成, 每层的生长方式如下: 在 GaAs 层上淀积 2.0ML InAs 后, RHEED 图案已经由条状亮线变为点状亮斑, 表明形成了 InAs 三维岛, 其平均亮度为 5nm. 然后生长 1.5nm 厚 GaAs 层, 在 As 气氛下生长停顿 120s, 最后用 7.5nm GaAs 来完成量

* 国家攀登计划(编号 19823001)和国家自然科学基金(编号 69776016)资助项目

稿件收到日期 1999-10-28, 修改稿收到日期 2000-06-20

* The project supported by the Climbing Project and National Natural Science Foundation of China (No. 69776016).

Received 1999-10-28, revised 2000-06-20

子点的覆盖层. 激光器 B 作为参考, 其有源区由 9nm GaAs 间隔开的 3 个 2.0ML InAs 量子点层构成.

经过腐蚀光刻等后续工艺制成条型激光二极管, 条宽 $8\mu\text{m}$, 腔长 $300\mu\text{m}$. 为方便研究量子点的 PL 谱, 样品中有源层以上的结构被化学腐蚀掉. 不同温度和不同激发条件下的 PL 谱和电致荧光 (EL) 谱分别用 He-Ne 激光器的 632.8nm 激光线和直线激光电源激发, 并由液氮冷却的 Ge 探测器收集信号.

2 实验结果和讨论

两种激光器都实现了从 20K 到室温 (290K) 的连续波工作模式. 图 1 给出了室温激光器的输出光强与电流 ($O-I$) 的关系曲线, 激光器 B 的阈值电流是 196mA, 而激光器 A 只有 68mA. 图 2 是阈值电流的温度依赖关系, 在所有测量的温度下, 激光器 A 的阈值电流均比激光器 B 小. 众所周知, 自组织量子点尺寸分布不均匀, 导致量子点中电子空穴辐射跃迁能量展宽, 降低了量子点整体的光谱增益效率. 我们发现^[6]引入生长停顿后, PL 谱峰的半高全宽显著减小, 说明量子点的均匀性得到加强, 电子空穴辐射跃迁能量处在光放大窗口范围内的量子点数目增多. 于是在相同的条件下, 对增益有贡献的量子点占全部量子点的比例, 在激光器 A 中比激光器 B 要高, 也就是说激光器 A 具有更高的光增益效率, 所以更容易达到阈值条件. 这样, 生长停顿就降低了量子点激光器的阈值电流, 而且激光器的特征温度也提高了. 当测量温度从 20K 变化到室温时, 激光器 A 的阈值电流增大了 8 倍, 而激光器 B 则增大了 20 倍. 在这个温度范围内激光器 A 的特征温度达 113

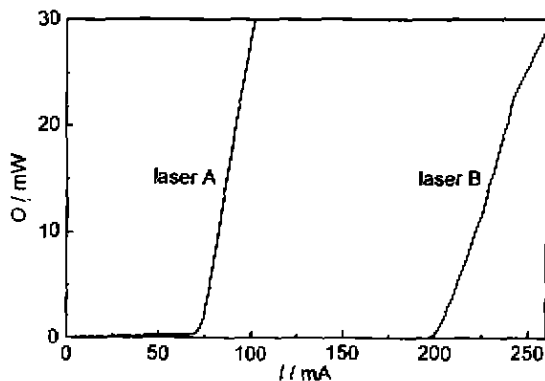


图 1 室温 (290K) 量子点激光器输出光强与电流 ($O-I$) 关系曲线

Fig. 1 Light output-injection current curves for two QD lasers at 290K

K, 而激光器 B 就只有 88K, 可见生长停顿提供了一个提高激光器特征温度的思路.

图 3(a) 显示的是 PL 谱峰值能量随温度的变化关系. 引入生长停顿后, 量子点的顶端被削平, 平均高度降低, 量子限制效应增强, 因此在所有温度下, 激光器 A 的 PL 谱峰位能量比激光器 B 高. 20K 到室温, 激光器 B 的 PL 谱峰能量从 1.262eV 降至 1.179eV, 同时激光器 A 从 1.320eV 降为 1.243eV, 它们的变化方式与 GaAs 带边随温度的红移行为基本一致.

图 3(b) 给出了激光波长对应能量的温度特性. 两个激光器在量子点的不同激发态上实现了受激辐射, 激光器 B 的波长比 A 短 (能量高). 与阈值电流一样, A 激光波长的温度依赖性也远比 B 小, 从 20K 至 290K, A 激光波长对应的能量减小了约 30meV, 而 B 则减小了 95meV, 这与相同温度范围 GaAs 带边随温度升高引起的能量红移量相当, 可认为 GaAs 带边红移是导致 B 激光波长变化的主要因素. 但对于激光器 A, 显然, 除了带边红移之外还应考虑别的影响因素.

参考 R. Mirin 小组^[9]的分析, 我们认为能带填充效应在激光器 A 中起了重要的作用, 如图 4(a) 是室温不同强度激发光下 A 的 PL 谱, 在能量值 1.238 eV 和 1.326 eV 处出现了两个与量子点有关的谱峰, 为方便讨论按能量高低分别记为 L 峰和 H 峰, 它们对应着量子点中两种不同的电子空穴辐射复合跃迁组态, 记为 L 组态和 H 组态. L 峰和 H 峰的强度都随着激发功率增大而上升, 但增加的方式不相同. L 峰强度随激发光功率亚线性增加, 在较强的激发光下逐渐饱和. 而弱激发 (2.3mW) 时 H 峰很

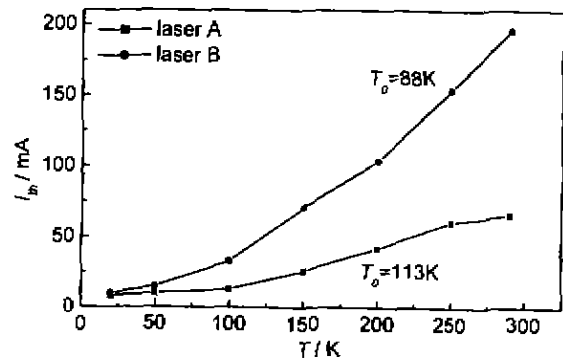


图 2 量子点激光器阈值电流的温度依赖关系

Fig. 2 Temperature dependence of threshold current of QD lasers

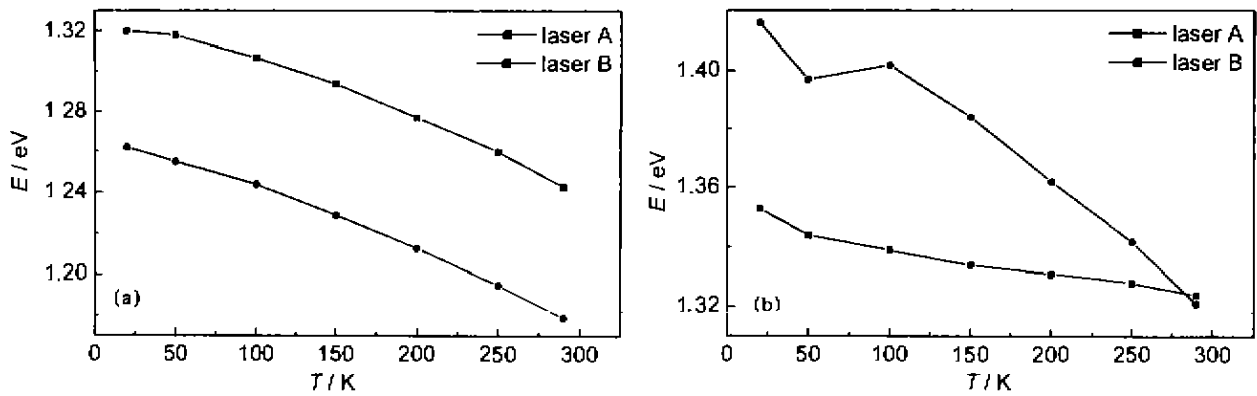


图 3 (a) 量子点激光器 PL 谱峰值能量和
(b) 激光波长对应的能量随温度的变化
Fig. 3 PL spectrum peak energy (a) and lasing energy
(b) of QD lasers under different temperatures

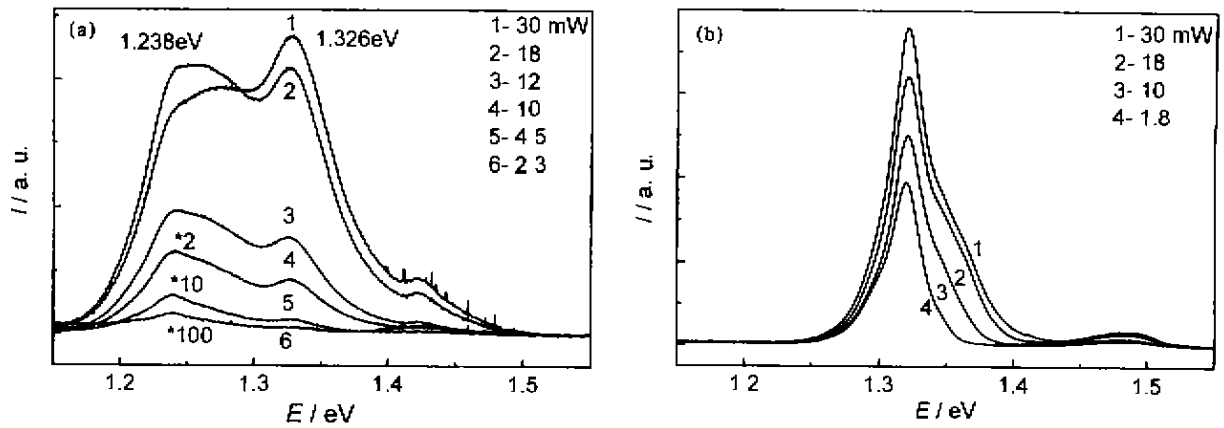


图 4 (a) 290K 和 (b) 8K 下激光器 A 的变激发光功率 PL 谱
Fig. 4 PL spectra of laser A with varying excitation
intensity at 290K (a) and 8K (b)

弱,强度增长比 L 峰快得多,与 L 峰的相对强度比迅速增大.当激发光强度增至 18mW 时两者基本相等,进一步增加功率(30mW),H 峰强度比 L 峰还高,这是非常显著的能带填充效应.由于 H 组态的能量比 L 组态高,光生载流子将优先填充到 L 组态.弱激发下光生载流子数量少,载流子大部分填充到 L 组态复合发光,只有很少一部分载流子才能填充到 H 组态上,所以 H 峰很弱.随着激发增强,载流子数量增多,大量填充到 L 组态的电子和空穴来不及复合,就堆积起来,L 组态逐渐被载流子占据,出现一定程度的饱和,多余的载流子填充到 H 组态,H 峰迅速增强,逐渐赶上并超过了 L 峰.室温下给激光器外加电激励时,会产生比光激发多得多的载流子,由于该室温下激光器 A 中强的能带填充效应,使得接近阈值电流时,绝大部分的载流子都填充到

H 组态,因此受激发射的来源是 H 组态上的电子空穴辐射复合,激光波长对应的能量(1.324eV)与 H 峰能量(1.326eV)基本一致.

激光器 A 在我们测量的所有温度下都可以看到类似的现象,但没有在激光器 B 中观察到明显的能带填充效应,因此我们认为是生长停顿放大了能带填充效应.而且这种放大作用随着温度的降低逐渐减弱,室温能带填充效应十分强烈,温度越低越不明显,8K 时就已经很弱了.图 4(b)是 8K 激光器 A 的 PL 谱,仍然有两个与量子点有关的荧光峰位 L 峰和 H 峰,但相对于 L 峰,H 峰始终很弱.即使是在我们所能采用的最高强度激发(30mW)下,H 峰的强度还是比 L 峰要弱得多,只是一个 Shoulder 而已.如前所述,能带填充效应将使载流子更多地填充到能量较高的组态上,而使激射波长蓝移.温度越

高,激光器 A 中的能带填充效应越强,使得激光波长蓝移的趋势越大.与此同时,温度升高,GaAs 带边发生红移,使激光波长有红移的趋势.两者的综合作用导致激光器 A 激光波长随温度变化的红移不如 B 大.

3 结论

总之,生长停顿的引入增强了量子点的均匀性,于是有源区引入生长停顿的量子点激光器表现出比没有生长停顿的激光器更低的阈值电流和更高的特征温度.同时,生长停顿还放大了能带填充效应,而且这种放大作用在不同温度下是均匀的,高温比低温显著得多,使激光波长有蓝移趋势.这部分抵销了激光波长随 GaAs 带边的温度红移,从而提高了激光器波长的温度稳定性.生长停顿提供了一个优化量子点激光器的方向.

REFERENCES

- [1] Kirstaedter N, Ledentsov N N, Grundmann M, *et al.* Low threshold large T_0 injection laser emission from (InGa) As quantum dots, *Electron. Lett.*, 1994, **30**: 1416
- [2] Xie Q, Kalburge A, Chen P, *et al.* Observation of lasing from vertically self-organized InAs three-dimensional island quantum boxes on GaAs (100), *Photonic Tech. Lett.*, 1996, **8**: 965
- [3] Shoji H, Nakata Y, Mukai K, *et al.* Temperature-dependent lasing characteristics of multistacked quantum dot lasers, *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 193
- [4] Barbara G L. Researchers vie to achieve a quantum-dot laser, *Physics Today*, 1996, **5**: 22
- [5] WANG Hai-Long, ZHU Hai-Jun, FENG Song-Lin, *et al.* The effect of dopant Si on the uniformity of self-organized InAs quantum dots, *J. Infrared Millim. Waves* (王海龙,朱海军,封松林,等.杂质 Si 对 InAs 自组织量子点均匀性的影响,红外与毫米波学报), 1999, **18**(6): 423
- [6] Zhu H J, Wang Z M, Wang H, *et al.* Uniformity enhancement of the self-organized InAs quantum dots, *J. Crys. Growth.*, 1999, **197**: 372
- [7] WANG Hui, ZHU Hai-Jun, FENG Song-Lin, *et al.* Room-temperature pulsed laser of longitude control InAs quantum dots, *Chinese J. Semiconductors* (汪洋,朱海军,封松林,等.室温脉冲激射的纵向控制 InAs 量子点激光器,半导体学报), 1999, **20**(4): 328
- [8] Mirin R, Gossard A, Bowers J. Room temperature lasing from InGaAs quantum dots, *Electron. Lett.*, 1996, **32**: 1732