

文章编号: 1007-5461(2003)02-0129-06

# 量子点激光器研究进展综述

王建, 邢达

(华南师范大学激光生命科学研究所, 广州 510631)

**摘要** 本文综述了量子点激光器的研究进展。介绍了量子点激光器的结构原理、生长及其优化; 对量子点激光器光电特性从实验和建立模型进行描述; 给出以速率方程描述的量子点激光器的动态特性如光增益均匀展宽、激射光谱控制、激发态迁移等; 最后展望了量子点激光器的研究方向。

**关键词** 量子点; 半导体激光; 光增益; 激射; 速率方程

**中图分类号**: TN248.4      **文献标识码**: A

## 1 引言

低维且处于纳米范围内的系统正给半导体物理带来深刻变革, 现代科技已成功实现纳米级 0 维结构制造。半导体量子点结构及其构成的光电器件成为近年来物理界和工程界研究的热点。

### 1.1 量子点

量子点 (quantum dot, QD) 是将电子运动空间限制在纳米数量级的三维结构中, 从三个方向限制电子(空穴)运动的 0- 维结构量子势阱。量子点在三个维度上都与电子德布罗意波相当, 使其载流子态密度呈  $\delta$  函数, 能级结构类似与原子或分子为分立能级<sup>[1,2]</sup>。最早实现量子点自组织生长的是 III-V 半导体量子点, 而 III 族元素与氮化物组成的量子点结构可用于蓝光和紫外光半导体激光器, 采用 MBE 或 MOVCD 方法, 可得到的长度为 10~40 nm, 高度为 5~8 nm 形如金字塔岛状阵列。层接触面边缘的弹性舒张力、接触表面能量的重整化以及通过基底的相邻岛间的相互作用是自组织生长的驱动力<sup>[3]</sup>。

### 1.2 量子点激光器

理论上预言以量子点为有源区的半导体量子点激光器比量子阱、量子线激光器具有更好的激射特性, 有可能实现更低的阈值电流密度、更高的特征温度、高的发光效率和微分增益、窄的光谱线宽<sup>[1~4]</sup>, 还可能产生许多特殊的物理性质如量子限制斯塔克 (Stark) 效应<sup>[5]</sup>、非线性光增益<sup>[6]</sup>、空间光谱烧孔<sup>[7,8]</sup>、库仑势垒<sup>[9]</sup>等。随着量子点的自组织生长过程和相关的晶体生长技术的发展, 目前兴起开发基于 InAs、InGaAs、InP、InGaN 等量子点为有源区, 满足光通讯光源要求、波长为 1.3~1.5  $\mu\text{m}$  的量子点激光器。自 1994 年首次报道采用 MOVCD 自组织 1.3  $\mu\text{m}$  波长的 InGaAs-GaAs 量子点激光器开始, 已有多个研究小组展示了这样的器件<sup>[10~13]</sup>。文献 [12] 给出了量子点激光器的设计框图和结构生长说明, 在 GaAs(100) 基底上先生长 0.3  $\mu\text{m}$  厚的 n 型 GaAs 缓冲层、p 型 AlGaAs 覆盖层, 接着是 GaAs OCL 层、pAlGaAs 覆盖层和 0.6  $\mu\text{m}$  GaAs 接触层。3 层 QD 均匀生长在 OCL 中央, 每层 QD 之间由 30 nm GaAs 隔离层隔开。Hideaki<sup>[13]</sup> 得到的量子点激光器采用分子外延法在 GaAs(100) 基底上分别生长出 1.5  $\mu\text{m}$  n 型 AlGaAs 覆盖层、50 nm GaAs 层和 3 层 QD, 每层 QD 之间由 55 nm GaAs 隔离层隔开, 然后是 50 nm GaAs 层、1.4  $\mu\text{m}$  p 型 AlGaAs 覆盖层和 0.2  $\mu\text{m}$  GaAs 接触层。

收稿日期: 2002-06-18; 修改日期: 2002-07-19

用 MBE 和 MOCVD 等得到的量子点激光器特性也在不断改进, 如文献 [14] 以 GaAs 为基底的多层 InAs 量子点以防止增益饱和, 能够获得在低的电流密度 ( $90\sim 105\text{A}/\text{cm}^2$ ) 下约  $1.3\ \mu\text{m}$  波长的量子点激光器, 在  $17^\circ\text{C}$  获得最大功率为  $2.7\ \text{W}$ 。文献 [15] 介绍了嵌于 GaInAs 量子阱中以自组织生长的多 InAs 量子点层为有源区的  $1.3\ \mu\text{m}$  波长量子点激光器的高性能, 脉冲方式下未加涂层的  $2.5\ \text{mm}$  脊型波导激光器最高运行温度为  $160^\circ\text{C}$ , 带有高反射涂层, 腔长为  $400\ \mu\text{m}$  脊型波导激光器的阈值电流为  $6\ \text{mA}$ , 输出功率大于  $5\ \text{mW}$ 。

## 2 量子点的光电特性研究

量子点的光电特性, 包括光增益 (optical gain) 特性、阈值、电子 - 空穴光谱、激子态、载流子的传输特性、能级间能量传输及散射, 以及动态特性如光增益均匀展宽、激射光谱控制、激发态迁移影响等, 都对采用量子点结构的器件如激光器、探测器、晶体管有极大的影响。

### 2.1 量子点的实验光谱研究

光特性的检测可提供量子点中电子和空穴特征的直接证据。研究量子点的各种光电特性, 实验方法可通过光谱来进行, 主要有光致发光 (PL)、荧光激发谱 (PLE)、电致激发 (EL) 和泵 - 探束实验 (PP)。考虑到量子点由一定的尺寸分布, 通常采用窄带频率可调的激光器作为激发。光致发光或荧光谱使用率最高, 广泛地用于半导体量子点光特性的检测, 对导带和价带之间的跃迁适用, 既可用于 QD 阵列也可用于单个 QD, 除了可提供弛豫机制的动态信息外, 还能反映导带与价带结构, 对激子和多体效应依赖强烈<sup>[16]</sup>。Kohki<sup>[1]</sup> 利用光致发光和电致发光谱研究了自组织 InGaAs-GaAs 量子点  $1.3\ \mu\text{m}$  连续激射特性, 得到了阈值电流处特征温度  $T_0$  与激光器腔长和量子点有源区的层数有关的结论, 并指出提高量子点表面密度和辐射效率有助于改善量子点激光器的性能。文献 [17] 介绍了调制自组织 InAs/GaAs 量子点电子态的几种方法, 即改变 GaAs 盖顶层的厚度、生长中止的时间以及 InAs 层的厚度。通过荧光谱 (PL) 峰值的移动来反映量子点电子态的调整, 同时最大的 PL 半宽间距的减少显示量子点一致性的增强。文献 [18] 讨论了带有随机参数的量子点阵列的光特性, 把最低辐射和吸收能之间明显的类似斯托克斯 (Stokes) 移动解释为量子点基态和第一激发态之间的平均距离。量子点内部能级的随机扩展, 导致 PL 谱和荧光激发 (PLE) 谱峰值的偏移, 计算由于材料组分变化引起量子点能级波动时的光谱形状, 并讨论了量子点形状对荧光谱的影响。Fiore<sup>[11]</sup> 利用电致激发和光伏 (PV) 光谱确定量子点激发态间跃迁能量和相邻的 InGaAs 量子阱双向状态。

Sanjay<sup>[19]</sup> 观察到量子点带间自发辐射和带间阈值。Tomoyukic<sup>[6]</sup> 采用泵 - 探束法 (Pump-Probe) 和四波混合法 (FWM) 了解量子点中载流子捕获和弛豫速率变化过程, 发现至少存在三种超快增益动态过程, 即载流子弛豫到基态、声子散射和从阱层到量子点的载流子俘获。文献 [19] 也利用 Pump-Probe 光谱研究自组织 In(Ga)As-GaAs 量子点的带间弛豫时间, 证实量子点的受激态和基态存在着长的电子弛豫时间, 分析了注入载流子的弛豫和声子瓶颈, 并将此弛豫时间代入双光子速率方程, 得到带间增益。

### 2.2 量子点光电特性研究模型

目前研究较多的量子点光电模型主要有: 有效质量方法扰动法、自旋密度泛函法、连续弹性理论、8 边带  $k \cdot p$  方法<sup>[20]</sup>, 价带力场模型<sup>[6,20]</sup> (VEF) 等。 $k \cdot p$  方法是将  $k = 0$  处的能量和波函数作为零级近视, 将哈密顿量中与  $k$  有关的项作为微扰项, 用一级和二级微扰方法求解  $k \neq 0$  时的能带结构, 进而得到能带与波矢  $k$  之间的定量关系。文献 [20] 根据 8 边带  $k \cdot p$  方法给出了在 GaAs (001) 生长的 InAs 量子点的电子和空穴能级、电子 - 空穴、电子 - 电子跃迁的极化、激子在基态的束缚能等, 并将结果与 VEF 等方

法进行比较。8 边带模型可给出量子点导带中多个束缚状态, 而有效质量方法仅能给出一两个束缚状态。Hongtao<sup>[21]</sup> 采用 VEF 方法研究了典型的自组织 InAs-GaAs 量子点中应变分布, 指出采用有效质量方法计算量子点导带会有明显错误, 并对量子点中载流子注入产生的辐射和非辐射散射过程进行了评述。

激子效应在量子点结构中会很突出, 掌握量子点中激子的作用方式对建立量子点结构模型很重要。文献 [22] 提出一个电子和空穴波函数在生长方向上考虑了有限宽度参量修正的库仑作用, 并用如下的 Hamiltonian 式表示量子点中的空穴激子:

$$H = \frac{p_e^2}{2m_e} + \frac{p_h^2}{2m_b} + V_{\text{conf}}(\mathbf{v}_e) + V_{\text{conf}}(\mathbf{r}_h) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_h)^2 + a^2}} \quad (1)$$

研究了抛物线型和阱型两种不同侧面限制势阱下轻空穴激子束缚能, 并利用线性插值研究了改变作为量子点尺寸函数的空穴有效质量对轻空穴激子束缚能的影响。Sugawara<sup>[23]</sup> 考虑了库仑作用的三层模型, 推导了线性双激子增益公式。利用包括激子、双激子和腔内光子的速率方程, 研究了量子阱和量子点中蓝光双激子的可能与特性。Park<sup>[24]</sup> 基于量子点中多层离散能级建立了多层模型分析光增益的温度特性, 发现最大光增益对温度有极强的关系, 导致能级间的切换, 从而影响量子点激光器的性能。文献 [25] 研究了阈值下的 InAs 量子点自发辐射, 基态增益由法布里 - 珀罗 (Fabry-Perot) 腔模式调节, 随着注入电流增加增益呈超线性增长, 增益尚未饱和时, 线宽增益为 0.1, 比报道的量子阱的要小很多。宁永强<sup>[26]</sup> 研究了 InGaAs 量子点材料在不同注入电流密度下的自发发射、放大自发发射特性, 随着电流密度的增加, 增益谱峰半宽明显展宽, 将此归结为量子点尺寸、形状等并不单一, 使量子点的基态及激发态形成非均匀展宽。文献 [27] 指出了与量子点激光器激射光谱有关的波导特性 (基底泄漏和基底反射) 导致的模式分组效应, 讨论量子点混合 (quantum dot intermixing) 对有源区性能影响及其与无源波导的集成。

### 3 量子点有源区的优化

由于在自组织生长中大小、形状存在着不同分布而使能量谱增宽, 影响了整个量子点簇的效率, 已有许多对策来优化量子点的有源区, 如采用多层堆积结构的量子点<sup>[14]</sup>、量子阱中的量子点结构<sup>[28]</sup>、高纵横比 (腔高度 / 腔直径) 结构<sup>[13]</sup>、量子点混合方法<sup>[27]</sup>、控制生长过程垂直量子点定向<sup>[2]</sup>、优化晶体生长 (消除缺陷、杂乱) 及合理选择光限制层 (OCL) 的厚度<sup>[12]</sup>。有趣的是文献 [29] 还对量子点中有源区的掺杂情况进行了研究, 虽然某些掺杂可导致最低的阈值电流, 但未掺杂的量子点激光器的特征温度最高, 显示出温度稳定性与载流子的限制密切相关。低的阈值电流也可通过表面发射量子点激光器获得<sup>[30]</sup>。

### 4 量子点激光器的动态特性与速率方程

量子点激光器的动态效应是由载流子复合的动力学过程所决定的, 它直接影响着工作性能。对动态特性的描述, 可借助激光器的速率方程组, 它是反映表征激光器腔内光子数和工作物质各有关能级上的原子数随时间变化的一组微分方程。

当量子点激光器由注入泵浦调制时, 应具有较宽的调制带宽响应, 以保持激射波长不变, 激射产生于每个孤立量子点增益峰值处时, 可使折射率的变化在激射波长为零, 导致很小的动态波长移动即啁啾。对比室温下由 1G 正弦电流调制下量子点和量子阱任一纵模二分之一线宽可知, 量子阱的啁啾达到 0.1 nm, 而量子点的啁啾不到 0.01 nm, 表明所采用的高纵横比量子点结构中离散的增益具有对称性<sup>[13]</sup>。对量子点是否由于不存在满足能量守恒的声子而导致载流子弛豫回离散基态慢, 即声子瓶颈, 一直有很多争论。

文献 [31] 采用载流子 - 声子速率方程, 研究了载流子动态对量子点激光器性能的影响, 结果显示弛豫时间对量子点激光器性能如量子效率、输出功率、调制带宽有显著影响。文献 [32] 试图建立明晰的量子点激光器激射光增益均匀加宽模型, 通过一组考虑量子点大小分布和腔纵模的速率方程, 解释了温度变化对单个量子点激射光增益均匀加宽的影响, 并指出低温 (80 K) 时量子点簇的激射与空间位置和  $\delta$  函数增益有关, 而室温下量子点簇则是激射光增益均匀加宽。Sugawara 在文献 [33] 利用一组考虑量子点大小分布和腔纵模的速率方程, 给出量子点激光器激射光增益谱均匀加宽的理论计算。文献 [34] 讨论了简并因子和跃迁重叠系数对增益的影响, 将量子点激光器阈值对应的小的跃迁重叠系数和大的自发辐射寿命作为短腔由受激发态而非基态产生激射的原因。同样是激发态, Berg<sup>[35]</sup> 由描述载流子浓度的三阶速率方程得到了自组织量子点放大器中超快增益恢复, 发现激发态作为光作用基态载流子的库源才导致了超快增益恢复。文献 [36] 假定量子点 0 维能级通过热池速率方程和阱层 (wetting layer) 中热电子分布相关联, 建立了量子点激光器非平衡的速率方程模型, 考虑阱层热池对温度的依赖关系, 用该模型解释随温度增加而导致光谱变窄和空间烧孔的减少。

## 5 结 语

量子点是空间三维受到约束的 0 维半导体纳米结构, 具有离散的能级。利用 MBE 和 MOCVD 技术通过 S-K 模式自组装量子点有了突破性进展, 由于量子点尺寸、形状仍存在一定的分布, 使量子点的基态及激发态出现非均匀展宽<sup>[26]</sup>。以量子点为有源区的量子点激光器仍需优化结构设计和生长工艺, 才有可能实现更低的阈值电流密度、更高的特征温度、高的发光效率和微分增益、窄的光谱线宽等特性, 在实用方面有更多发展。根据量子点的生长结构建立合适的数学模型, 研究量子点特性及其优化是关键。对量子点中激子特性的建模及其所起的作用、载流子动态特性对量子点激光器影响的研究仍有待进一步深入, 对可能导致的激射波长啁啾或失稳, 如多模振荡也值得关注。

## 参 考 文 献

- 1 Mukai K *et al.* 1.3  $\mu\text{m}$  lasing characteristics of self-assembled InGaAs-GaAs quantum dots [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(4): 472-478
- 2 Wang Zhanguo *et al.* Self-assembled quantum dots, wires and quantum-dot lasers [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, 227-228: 1132-1139
- 3 Bhattacharya P *et al.* In(Ga)As/GaAs self-organized quantum dot lasers: DC and small-signal modulation properties [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1999, 46(5): 871-883
- 4 Wang R H *et al.* Room-temperature operation of InAs quantum-dot laser on InP (001) [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(8): 767-769
- 5 Huang Xiaodong *et al.* Bistable operation of a two-section 1.3  $\mu\text{m}$  InAs quantum dot laser-absorption saturation and the quantum confined Stark effect [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(3): 414-417
- 6 Akiyama T *et al.* Nonlinear gain dynamics in quantum-dot optical amplifiers and its application to optical communication devices [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(8): 1059-1064
- 7 Eliseev P, Li H *et al.* Tunable grating-coupled laser oscillation and spectral hole burning in an InAs quantum-dot laser diode [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(4): 479-484

- 8 Asryan L V, Suris R A. Longitudinal spatial hole burning in a quantum-dot laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(10): 1151-1161
- 9 Maurer S M *et al.* Coulomb blockade fluctuations in strongly coupled quantum dots [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(7): 1403-1406
- 10 Shchekin O B. Low-threshold continuous-wave two-stack quantum-dot laser with reduced temperature sensitivity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(9): 1120-1123
- 11 Fiore A *et al.* High-efficiency light-emitting diodes at using InAs-InGaAs quantum dots [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(12): 1601-1603
- 12 Maximov M V *et al.* Gain and threshold characteristics of long wavelength lasers based on InAs/GaAs quantum dots formed by activated alloy phase separation [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(5): 676-683
- 13 Hideaki Satio *et al.* Low chirp observed in directly modulated quantum dot lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(10): 1298-1300
- 14 Zhukov A E. Continuous-wave operation of long-wavelength quantum-dot diode laser on a GaAs substrate [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(11): 1345-1347
- 15 Klopff F *et al.* High-temperature operating 1.3  $\mu\text{m}$  quantum-dot lasers for telecommunication applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(8): 764-766
- 16 Bockelmann B, Heller W. Microphotoluminescence studies of single quantum dots, I. Time-resolved experiments [J]. *Physical Review B*, 1997, 55(7): 4456-4468
- 17 Wang Hui *et al.* Methods to tune the electronic states of self-organized InAs/GaAs quantum dots [J]. *Physica B*, 2000, 279: 217-219
- 18 Tsiper E V. Optical properties of arrays of quantum dots with internal disorder [J]. *Physical Review B*, 1996, 54(3): 1959-1966
- 19 Krishna S *et al.* Intersubband gain and stimulated emission in long-wavelength ( $\lambda = 13 \mu\text{m}$ ) Intersubband In(Ga)As-GaAs quantum-dot electroluminescent devices [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(8): 1066-1073
- 20 Stier O, Grundmann M, Bimberg D. Electronic and optical properties of strained quantum dots modeled by 8-band  $k \cdot p$  theory [J]. *Physical Review B*, 1999, 59(8): 5688-5701
- 21 Jiang Hongtao, Singh J. Self-assembled semiconductor structures: electronic and optoelectronic properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(7): 1188-1196
- 22 Boero M *et al.* A detailed theory of excitons in quantum dots [J]. *Surface Science*, 1997, 377-379: 371-375
- 23 Sugawara M. Optical gain process in wide-gap semiconductors: possibilities of blue-light bi-exciton lasing in quantum-well and quantum-dot lasers [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1998, 1899/190: 585-592
- 24 Park Gyoungwon, Shchekin O B, Deppe D G. Temperature dependence of gain saturation in multilevel quantum dot lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(9): 1065-1071
- 25 Newell T C *et al.* Gain and linewidth enhancement factor in InAs quantum-dot laser diodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(12): 1527-1529
- 26 Ning Yongqiang *et al.* Spontaneous emission and optical gain in InGaAs quantum dots [J]. *Chinese Journal of Semiconductors* (半导体学报), 2002, 23(4): 373-375 (in Chinese)
- 27 Marsh J H *et al.* Engineering quantum-dot lasers [J]. *Physica E*, 2000, 8: 154-163
- 28 Liu G T *et al.* The influence of quantum-well composition on the performance of quantum dot lasers using InAs/InGaAs dots-in-a-well (DWELL) structures [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(11): 1272-1279

- 29 Yeh Nien-Tze . Self-assembled  $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  quantum-dot lasers with doped active region [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(9): 1123-1125
- 30 Huffaker D L *et al.* Quantum dot vertical-cavity surface emitting laser with a dielectric aperture [J]. *Applied Physics Letter*, 1997, 70: 2356
- 31 Sugawara M. Effect of carrier dynamics on quantum-dot laser performance [C] // 10th Intern. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials Tsukuba, Japan, 1998.
- 32 Sakamoto A, Sugawara M. Theoretical calculation of lasing spectra of quantum-dot lasers: effect of homogeneous broadening of optical gain [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(2): 107-109
- 33 Sugawara M *et al.* Effect of homogeneous broadening of optical gain on lasing spectra in self-assembled  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum dot lasers [J]. *Physical Review B*, 2000, 61(11): 7595-7603
- 34 Asryan L V *et al.* Effect of excited-state transitions on the threshold characteristic of a quantum dot laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(3): 418-425
- 35 Berg T W *et al.* Ultrafast gain recovery and modulation limitations in self-assembled quantum-dot devices [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(6): 541-543
- 36 Huang H, Deppe D G. Rate equation model for nonequilibrium operating conditions in a self-organized quantum-dot laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, 37(5): 691-698

## Overview of the Research on Quantum-dot Lasers

Wang Jian, Xing Da

( Institute of Laser Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631 China )

**Abstract** This paper presents an overview of the research progress on the quantum-dot lasers. The structure growth and optimization of quantum-dot lasers are introduced firstly, then the optoelectronic properties are discussed in the term of spectrum and modeling, and the dynamic characters of quantum-dot lasers such as homogeneous broadening of optical gain, lasing spectrum control, transition property of excited state etc., are presented based on rate equation. The outlook of the future works on quantum-dot lasers is given finally.

**Key words** quantum dot; semiconductor laser; optical gain; lasing; rate equation

王 建 ( 1968 - ), 男, 华南师范大学博士后, 主要从事量子点激光器光电特性及其优化控制研究.