

# 大功率 In(Ga)As/GaAs 量子点激光器\*

王占国 刘峰奇 梁基本 徐波 丁鼎 龚谦 韩勤

(中国科学院半导体研究所 半导体材料科学实验室, 北京 100083)

**摘要:** 利用分子束外延技术和 S-K 生长模式, 系统研究了 InAs/GaAs 材料体系应变自组装量子点的形成和演化. 研制出激射波长  $\lambda \approx 960\text{nm}$ , 条宽  $100\mu\text{m}$ , 腔长  $800\mu\text{m}$  的 In(Ga)As/GaAs 量子点激光器: 室温连续输出功率大于 3.5W, 室温阈值电流密度  $218\text{A}/\text{cm}^2$ , 0.61W 室温连续工作寿命超过 3760 小时.

**关键词:** 量子点; 空间有序; 量子点激光器

**PACC:** 4255; 7866; 8115      **EEACC:** 4320J; 2520D; 2560

**中图分类号:** TN248.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2000)08-0827-03

## High Power In(Ga)As/GaAs Quantum Dot Laser\*

WANG Zhan-guo, LIU Feng-qi, LIANG Ji-ben, XU Bo, DING Ding,  
GONG Qian and HAN Qin

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

Received 16 May 2000

**Abstract:** Systematic study of molecular beam epitaxy-grown self-assembled In(Ga)As/GaAs quantum dots (QDs) is demonstrated. Room-temperature (RT) continuous-wave (CW) lasing at the wavelength of 960nm with output power more than 3.5W is achieved from vertical coupled In(Ga)As/GaAs QDs ensemble. The RT threshold current density is  $218\text{A}/\text{cm}^2$ . A RT CW output power of 0.61W ensures at least 3760 hours lasing (only drops 1.02db).

**Key words:** quantum dot; spacial ordering; quantum dot laser

**PACC:** 4255; 7866; 8115      **EEACC:** 4320J; 2520D; 2560

**Article ID:** 0253-4177(2000)08-0827-03

\* 国家自然科学基金和国家高技术新材料领域资助项目 [Project Supported by National Natural Science Foundation of China and by National High Technology Research & Development (863) Program of China].

王占国 男, 1938 年出生, 中国科学院院士, 主要从事半导体材料及物理研究.

2000-05-16 收到

理论上预言,量子点激光器比量子阱和量子线激光器有更好的激光特性.由于量子点在三个维度上的尺寸与电子的德布罗意波长相当,甚至更小,电子的态密度分布呈 $\delta$ 函数形状,所以量子点激光器有可能实现更低的阈值电流密度,更高的特征温度,更高的微分增益和更宽的调制带宽.自从1994年第一个利用S-K模式生长的量子点激光器问世以来,这方面的研究已取得长足进展,但是还远没有达到人们预言的水平,特别是大功率、长寿命量子点激光器方面的研究与实用化的要求还有相当一段距离.

利用S-K应变自组装生长模式原位生长量子点的原理是在外延高应变材料过程中,外延生长最初是二维层状生长,随着外延层厚度的增加产生应变积累,导致在临界厚度时外延层由层状生长转变为岛状生长以便降低系统能量(岛状结构通过弹性形变释放应力),自发形成了纳米量级尺寸均匀而无位错小岛,称之为应变自组装量子点.以这种单层或多层量子点作为激光器的有源区就构成了量子点激光器.对于器件应用,最基本的条件是提高无位错量子点的密度、提高空间有序性、减小尺寸涨落.基于这方面的考虑,我们的出发点是在对应变自组装量子点材料的生长条件及规律进行系统研究的基础上,寻求最佳生长条件,设计量子点激光器结构、制备所需材料并研制出器件.

实验样品均是在Riber 32p MBE设备上采用S-K生长模式制备的.在材料的生长过程中,利用反射高能电子衍射图形从线到点的转变来确定从二维生长到三维成岛生长的转变,对于InAs/GaAs,这种转变发生在InAs覆盖度略小于1.6ML且转变非常迅速.利用原子力显微镜、透射电镜和光致发光等手段对材料的结构和光学性能进行表征.当InAs的覆盖度为1.8ML时,量子点的均匀性和密度最高.采用多层量子点结构并选择适当的间隔层厚度,可以实现量子点在垂直生长方向上的有序排列,增大量子点的体密度.调节量子点的大小可以改变其发光波长.量子点激光器结构生长在掺Si的GaAs(001)衬底上.具体生长次序为:N<sup>+</sup>型GaAs缓冲层,1 $\mu$ m厚的N型Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As限制层,0.2 $\mu$ m的Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As渐变折射率波导层(其中Al组分x由0.5线性变到0),多层耦合量子点有源区,0.2 $\mu$ m的Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As渐变折射率波导层(其中Al组分x由0线性变到0.5),1 $\mu$ m厚的P型Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As限制层,最后是P<sup>+</sup>型GaAs帽层.有源区采用三层InAs量子点,InAs覆盖度1.8ML,GaAs间隔层厚5nm.根据AFM测试结果统计得出量子点的平均高度、平均基底半径和密度分别为2.95nm、19.2nm和 $6.47 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ .InAs、GaAs和AlGaAs的生长温度分别为500、600和700 $^{\circ}$ C.图1(a)为InAs/GaAs量子点激光器有源区TEM剖面图,垂直耦合量子点清晰可见;图1(b)为单层量子点的AFM图,将样品做成条宽为100 $\mu$ m,腔长为800 $\mu$ m的宽接触激光器.图2为室温激光器的激光谱和激光功率-电流曲线,激光器的激光波长大致为960nm,室温下连续输出功率大

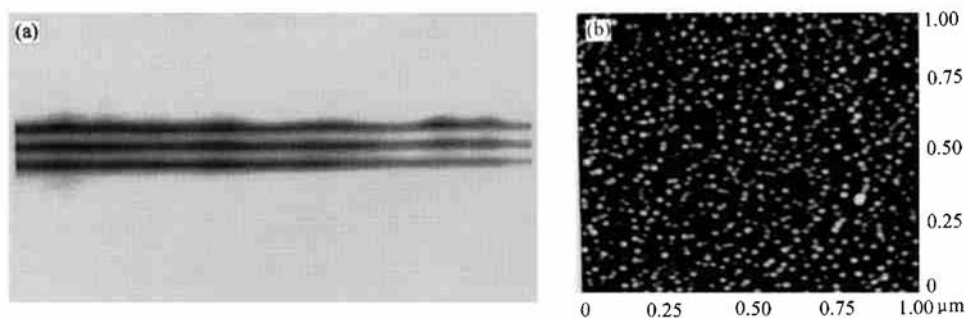


图1 InAs/GaAs量子点激光器有源区TEM剖面图(a)及单层InAs量子点的AFM图(b)

FIG. 1 Cross-Sectional TEM Image of Active Region of InAs/GaAs Quantum Dot Laser (a) and AFM Image of Single Layer of InAs Quantum Dots.

于3.5W(双面光功率之和),阈值电流为174mA(阈值电流密度为 $218 \text{A/cm}^2$ ).图3为量子点激光器的温度特性,在温度范围为40—180K时特征温度 $T_0$ 为333K,远远高于量子阱激光器特征温度,在温度范围为180—300K时,特征温度有所降低,约为157K.为了对激光器的可靠性进行评估,需要对激光器进行老化

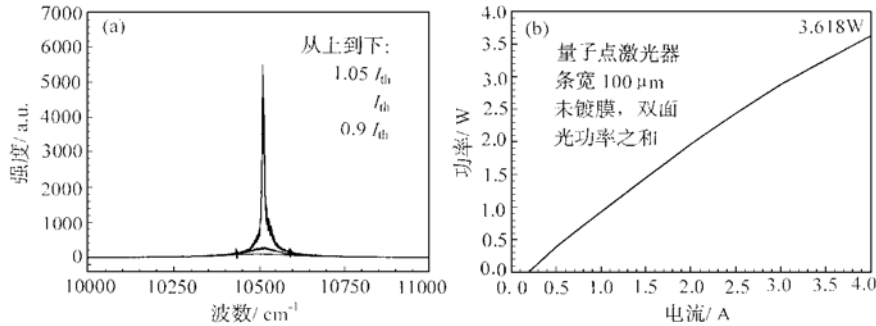


图 2 室温激光器的激光谱(a)和激光功率-电流曲线(b)

FIG. 2 RT Lasing Spectra (a) and Output Power-Current Curve of Quantum Dot Laser (b)

实验,其结果示于图 4,由图可以看出,0.61W 室温连续工作寿命超过 3760 小时(仅下降 1.02dB);0.54W 室温连续工作寿命超过 3000 小时(仅下降 0.49dB),按下降 2.0dB 推算其寿命超过一万小时,为目前国际最好结果(目前还没有量子点激光器寿命的有关报道).我们采用 3 层耦合量子点结构作为有源区是出于两方面的考虑,一方面耦合层太多不利于提高功率,另一方面多层耦合结构有助于增加有源区体积从而更易于实现量子点基态激光.

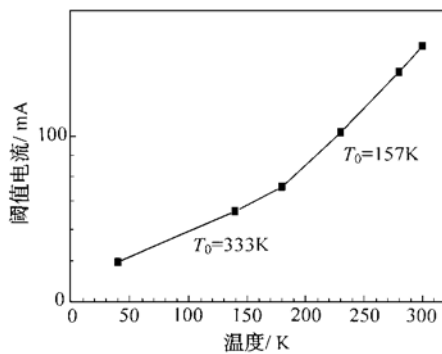


图 3 量子点激光器的阈值电流随温度变化曲线

FIG. 3 Dependence of Threshold Current Density with Temperature

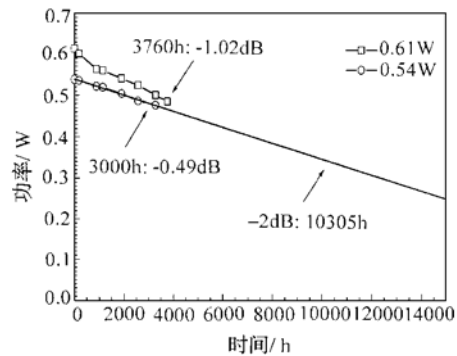


图 4 量子点激光器老化实验曲线

FIG. 4 Life-Testing Results of Quantum Dot Lasers

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Wang Z. G., Gong Q., Zhou W. *et al.*, Self-Organized Quantum Dots: Material Growth and Device Application. In: Imam M. A., De Nale R., Hanada S. eds, The Third Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM 3), 1998, Australia: 2097—2104.
- [ 2 ] Ustinov V. M., Egorov A. Yu., Kovsh A. R. *et al.*, Low-Threshold Injection Lasers Based on Coupled Quantum Dots, *J. Crystal Growth*, 1997, **175/176**(PART 2): 689—695.
- [ 3 ] H. Ishikawa and H. Shoji, Self-Organized Quantum Dots and Quantum Dot Lasers (invited). *J. Vac. Sci. Technol.*, 1997, **A16**(2): 794—800.
- [ 4 ] Ledentsov N. N., Kirstaedter N., Grundmann M. *et al.*, Three-Dimensional Arrays of Self-Ordered Quantum Dots for Laser Applications, *Microelectronics Journal*, 1996, **28**(8—10): 915—931.