

# 利用多层堆垛 InAs/GaAs 量子点结构 实现 1.3 $\mu\text{m}$ 光致发光\*

刘宁<sup>†</sup> 金鹏 吴巨 王占国

(中国科学院半导体研究所 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 在 GaAs 衬底上用分子束外延分别生长了单层和五层垂直堆垛的 InAs/GaAs 量子点结构. 室温光致发光实验表明, 五层堆垛结构较单层结构的发光峰位红移 180nm, 实现了 1.3 $\mu\text{m}$  发光. 结合透射电镜分析, 多层堆垛量子点材料发光的显著红移是由于量子点层间应力耦合导致的上层量子点体积增大以及各量子点层间的能态耦合.

**关键词:** 量子点; 分子束外延; 垂直堆垛; 长波长发光

**PACC:** 7360F; 6855; 7865

**中图分类号:** TN304.054

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0215-03

## 1 前言

近年来, 自组织量子点材料及其在各种半导体光电子器件, 如激光器<sup>[1]</sup>、超辐射发光管<sup>[2,3]</sup>、探测器<sup>[4]</sup>等中的应用正被人们广泛研究. 因为对于广泛用于通信系统的石英光纤, 1.3 $\mu\text{m}$  波段具有零色散特性和很小的衰减, 光信号在光纤传输中可获得最小畸变和较长传输距离, 所以 1.3 $\mu\text{m}$  波段的激光器在光纤通信等领域有重要的应用价值. 将 GaAs 基量子点的发光波长调整到 1.3 $\mu\text{m}$  波段也成为人们追求的目标.

一般情况下, InAs/GaAs 量子点材料的发光波长可在 1.0~1.24 $\mu\text{m}$  范围内调控, 为了在 InAs/GaAs 材料体系中得到 1.3 $\mu\text{m}$  发光, 目前主要采取以下几种材料结构或生长方法: (1) 原子层外延生长方法<sup>[5]</sup>, 该方法中 In 源和 As 源交替淀积到外延表面, 这样 In 元素避免了和 As 元素立即相遇并发生反应, 可以有更长的时间在表面自由迁移, 容易找到更为稳定的位置, 从而形成尺寸较大的量子点, 但此方法得到的量子点密度较低, 限制了激光器的增益; (2) InAs 量子点上覆盖 InGaAs 应力缓解层<sup>[6]</sup> 或 In-AlAs/InGaAs 复合应力缓解层<sup>[7]</sup>; (3) InAs 量子点生长在 InGaAs 量子阱里的方法<sup>[8]</sup>; (4) 双层强耦合量子点结构<sup>[9]</sup>.

本文利用分子束外延技术生长了 InAs/GaAs 多层堆垛量子点结构, 实现了 1.3 $\mu\text{m}$  光致发光. 结

合透射电镜结果以及与单层 InAs/GaAs 量子点结构对比, 分析了多层堆垛量子点结构实现长波长发光的原因.

## 2 实验

样品是使用固源 Riber 32P 分子束外延系统在 GaAs 衬底上生长的. 五层堆垛样品自衬底以上的材料结构如下: 200nm GaAs 缓冲层, 5 个周期 2.0 单分子层 (ML) 的 InAs 量子点, 相邻量子点层以 GaAs 间隔层分隔, GaAs 间隔层厚度为 8nm, 最后是 80nm GaAs 盖层. 为对比研究, 又生长了包含单层 InAs 量子点的参考样品. 生长中, 用反射式高能电子衍射 (RHEED) 监控 InAs 外延层由二维生长模式向三维生长模式的转变.

光致发光 (PL) 实验由常规光栅光谱仪结合敏感检波技术完成, 激发光源为 He-Ne 激光器的 632.8nm 谱线, 用 InGaAs 探测器实现光电转换. 样品的截面透射电镜 (TEM) 像由 JEM-2010 透射电子显微镜观察, 工作电压为 200kV.

## 3 结果与讨论

图 1 给出了单层和五层堆垛量子点样品的室温光致发光光谱. 对于五层堆垛样品的光谱, 采用高斯线形进行了分峰拟合, 如图中虚线所示, 样品的基态发光峰位于 1.3 $\mu\text{m}$ , 对应的半高宽为 28meV. 光谱中

\* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2006CB604904, 2002CB311905) 和国家自然科学基金 (批准号: 60306010, 60390071, 60390074, 90301007, 90201033) 资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: ningliu@mail.semi.ac.cn

2006-11-22 收到, 2006-12-14 定稿

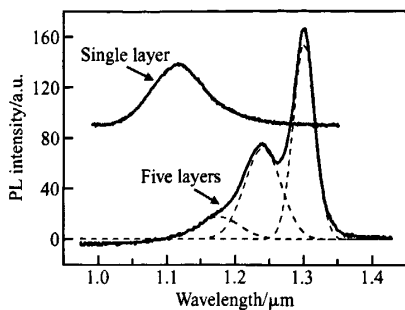


图 1 单层和五层堆垛 InAs/GaAs 量子点样品的室温光致发光谱

Fig. 1 RT PL spectra for single layer and five layer stacks of InAs/GaAs QDs

两个高能端的发光峰来自于激发态. 单层量子点参考样品基态发光峰位于  $1.12\mu\text{m}$ , 对应的半高宽为  $90\text{meV}$ , 未见激发态发光. 比较两个样品的光谱发现, 多层样品较单层样品发光光谱红移了  $180\text{nm}$ , 基态半高宽明显减小. 为了研究样品的结构特性, 我们进行了截面透射电镜形貌分析. 图 2 所示为五层堆垛样品的  $g = (002)$  方向暗场截面 TEM 像, 显示的是组分衬度. 可以看到, 五层量子点呈垂直耦合排列, 且量子点尺寸自下而上逐层增大并趋于均匀. 在第一、二层中有部分量子点在其上的点层中没有与之耦合的量子点, 这使得第三至五层中量子点密度小于第一、二层的量子点密度. 在透射电镜可视区域内未见应力积累过大导致的结构缺陷.



图 2 五层堆垛 InAs/GaAs 量子点样品  $g = (002)$  方向暗场截面 TEM 像

Fig. 2  $g = (002)$  dark field cross section TEM image for the five stacked self-organized InAs/GaAs QD sample

下面对上述结构和光学性质进行简要的分析. 生长中各层 InAs 量子点的沉积量相同, 然而量子点尺寸却逐层增大, 原因有二: 首先, 由于点层间 GaAs 间隔层较薄, 受应力驱动, 各层量子点沿生长方向垂直排列, 并且 InAs 由二维平面生长模式向三维岛状生长模式转变的临界厚度逐层减小, 这导致了在相同沉积量下, 后生长的量子点较先生长的量子点尺寸增大; 其次, 量子点密度的逐层减小也是量子点尺寸增大的原因. 另外, 随着量子点尺寸的逐层增大, 量子点尺寸均匀性亦有所提高, 这是生长过

程中自限制效应的结果<sup>[10]</sup>. 在一定限度内, 量子点越大, 沉积的 InAs 越趋于在各量子点间平均分配. 上面利用 TEM 截面像分析了五层堆垛 InAs/GaAs 量子点样品的结构特性, 也正是这种结构特性决定了它的光学性质. 即量子点尺寸的增大, 均匀性的提高以及量子点层之间的能态耦合<sup>[11,12]</sup>, 导致了堆垛样品较单层样品的光谱峰位有很大的红移, 并且光谱宽度明显减小. 样品的温度依赖光学性质研究表明, 室温下堆垛样品光致发光基态积分强度是液氮温度下的  $1/10$ , 这说明材料的结构质量很好<sup>[12]</sup>, 没有出现应力积累过大导致的位错等结构缺陷, 与透射电镜观察的结果一致.

## 4 结论

在 GaAs 衬底上使用分子束外延生长了五层垂直耦合的 InAs/GaAs 量子点材料, 对其结构和光学性质进行了研究. 结果表明, 用五层垂直耦合的 InAs/GaAs 量子点结构可以实现室温  $1.3\mu\text{m}$  发光, 并且具有很窄的半高宽和很强的发光强度. 本文的研究结果为生长长波长量子点材料提供了一种新的可供选择的方法.

## 参考文献

- [1] Wang Z G, Chen Y H, Liu F Q, et al. Self-assembled quantum dots, wires and quantum-dot lasers. *J Cryst Growth*, 2001, 227/228: 1132
- [2] Zhang Z Y, Wang Z G, Xu B, et al. High-performance quantum-dot superluminescent diodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2004, 16(1): 27
- [3] Liu N, Jin P, Wang Z G. InAs/GaAs quantum-dot superluminescent diodes with 110nm bandwidth. *Electron Lett*, 2005, 41(25): 1400
- [4] Liu H C, Gao M, McCaffrey J, et al. Quantum dot infrared photodetectors. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 79
- [5] Mirin R P, Ibbetson J P, Nishi K, et al.  $1.3\mu\text{m}$  photoluminescence from InGaAs quantum dots on GaAs. *Appl Phys Lett*, 1995, 67: 3795
- [6] Ustinov V M, Maleev N A, Zhukov A E, et al. InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at  $1.3\mu\text{m}$ . *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 2815
- [7] Zhang Z Y, Xu B, Jin P, et al. Photoluminescence study of self-assembled InAs/GaAs quantum dots covered by InAlAs and InGaAs combination layer. *J Appl Phys*, 2002, 92: 511
- [8] Lester L F, Stintz A, Li H, et al. Optical characteristics of  $1.24\text{-}\mu\text{m}$  InAs quantum dot laser diodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1999, 11(8): 931
- [9] Heidemeyer H, Kiravittaya S, Müller C, et al. Closely stacked InAs/GaAs quantum dots grown at low growth rate. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1544
- [10] Leonard D, Krishnamurthy M, Reaves C M, et al. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. *Appl Phys Lett*, 1993, 53: 3203

- [11] Solomon G S, Trezza J, Marshall A, et al. Vertically aligned and electronically coupled growth induced InAs islands in GaAs. *Phys Rev Lett*, 1996, 76:952
- [12] Mi Z, Bhattacharya P. Molecular-beam epitaxial growth and characteristics of highly uniform InAs/GaAs quantum dot layers. *J Appl Phys*, 2005, 98:023510

## 1. 3 $\mu\text{m}$ Photoluminescence from Multi-Stacked InAs/GaAs Quantum Dot Structure \*

Liu Ning<sup>†</sup>, Jin Peng, Wu Ju, and Wang Zhanguo

(*Key Laboratory of Semiconductor Material Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Single layer and five layer stacks of self-organized InAs/GaAs quantum dots (QDs) were grown by molecular beam epitaxy. Room-temperature 1.3 $\mu\text{m}$  photoluminescence (PL) was obtained for the five layer stacked sample, showing 180nm peak redshift and remarkable width narrowing, as compared with the PL spectrum for the single layer QD sample. By combining with the transmission electron microscopy measurement, the PL peak redshift and width narrowing are explained in term of the size enhancement of upper layer QDs and energy state coupling among different QD layers.

**Key words:** quantum dots; molecular beam epitaxy; vertically aligned structure; long-wavelength emission

**PACC:** 7360F; 6855; 7865

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0215-03

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos. 2006CB604904, 2002CB311905) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60306010, 60390071, 60390074, 90301007, 90201033)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: ningliu@mail.semi.ac.cn

Received 22 November 2006, revised manuscript received 14 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics