

文章编号:1001-9014(2005)05-0324-04

# In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As-GaAs 复合应力缓冲层上的 1.3 μm InAs/GaAs 自组织量子点

方志丹<sup>1,2</sup>, 龚政<sup>2</sup>, 苗振华<sup>2</sup>, 牛智川<sup>2</sup>, 沈光地<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 光电子技术实验室, 北京 100022;

2. 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:**用光荧光谱和原子力显微镜测试技术系统研究了在 2 nm In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 和  $x$  ML GaAs 的复合应力缓冲层上生长的 InAs/GaAs 自组织量子点的发光特性和表面形貌. 采用 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 与薄层 GaAs 复合的应力缓冲层, 由于减少了晶格失配度致使量子点密度从约  $1.7 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  显著增加到约  $3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ . 同时, 复合层也有利于提高量子点中 In 的组份, 使量子点的高宽比增加, 促进量子点发光峰红移. 对于  $x = 10$  ML 的样品室温下基态发光峰达到 1350 nm.

**关键词:**InAs/GaAs 量子点; 复合应力缓冲层; 光荧光; 原子力显微镜

**中图分类号:** O482.3 **文献标识码:** A

## 1.3 μm InAs/GaAs SELF-ASSEMBLED QUANTUM DOTS GROWN ON In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As-GaAs COMBINED STRAIN-BUFFER LAYER

FANG Zhi-Dan<sup>1,2</sup>, GONG Zheng<sup>2</sup>, MIAO Zhen-Hua<sup>2</sup>, NIU Zhi-Chuan<sup>2</sup>, SHEN Guang-Di<sup>1</sup>

(1. Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China;

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

**Abstract:** Optical properties and surface structures of InAs/GaAs self-assembled quantum dots (QDs) grown on 2 nm In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As and  $x$  ML GaAs combined strain-buffer layer were investigated systematically by photoluminescence (PL) and atomic force microscopy (AFM). The QD density increased from  $\sim 1.7 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  to  $\sim 3.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  due to the decreasing of the lattice mismatch. The combined layer was of benefit to increasing In incorporated into dots and the average height-to-width ratios, which resulted in the red-shift of the emission peaks. For the sample of  $x = 10$  ML, the ground state transition is shifted to 1350 nm at room temperature.

**Key words:** InAs/GaAs quantum dots; combined strain-buffer layer; photoluminescence; atomic force microscopy

### 引言

InAs/GaAs 自组织量子点体系因其独特、优越的光电性质, 成为替代目前 InP 基材料<sup>[1]</sup>, 制备激光器、探测器等的热门材料之一. 目前, 许多致力于 InAs/GaAs 量子点研究的学者都集中在将量子点的发光波长调整到 1.3 μm<sup>[2]</sup>. 然而, 许多工作在 1.3 μm 的量子点激光器有两个难以解决的问题: 低的量子点密度和对有源区较弱的载流子限制. 这些问

题会导致激光器有低的光增益, 易于增益饱和. 因此, 增加量子点的密度来抑制增益饱和就成为迫切需要解决的问题. 有几种方法可以使自组织的 InAs 量子点有高的点密度, 且发光波长达到 1.3 μm: (I) 多层淀积量子点<sup>[3]</sup>, (II) 降低生长温度, 如从 530°C 降到 480°C<sup>[4]</sup>, (III) 使用不同的基底, 尤其是使用 InGaAs 基代替 GaAs 基<sup>[5]</sup>. 实际上, 使用方法 (III) 还有利于获得较强的载流子限制, 并且缓冲层中有 In 存在, 不仅可以减小应力, 而且有助于

收稿日期: 2004-12-23, 修回日期: 2005-06-25

Received date: 2004-12-23, revised date: 2005-06-25

基金项目: 国家高新技术研究发展技术资助的课题(2002AA302107).

作者简介: 方志丹(1977-), 女, 黑龙江五常人, 现在北京工业大学光电子技术实验室工作, 博士, 主要从事量子点的研究.

将载流子限制在量子点层的周围,提高量子点对载流子的俘获.

由于较高的量子点密度和较好的光学特性,在 InGaAs 应力缓冲层上淀积 InAs 量子点的方法已被用于提高  $1.3\ \mu\text{m}$  量子点激光器的性能. Chung 等人还将量子点淀积在复合的 InGaAs-GaAs 应力缓冲层上<sup>[5]</sup>,实现量子点密度增加,但他们的激光器发射波长只达到  $1.06\ \mu\text{m}$ . 本文利用原子力显微镜 (AFM) 和光致发光 (PL) 谱方法,系统的对比研究了  $2\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  和  $x$  单层 (ML) GaAs 复合应力缓冲层对自组织 InAs 量子点的表面形貌和发光特性的影响.

## 1 实验

生长实验设备为 VG V80 MK II 型分子束外延 (MBE) 系统. 外延样品所用基片为半绝缘 GaAs (100) 衬底. 衬底在  $580^\circ\text{C}$  脱氧后,在  $600^\circ\text{C}$  下先生长  $500\ \text{nm}$  的 GaAs 缓冲层,再将生长温度降至  $510^\circ\text{C}$ ,生长  $20\ \text{nm}$  GaAs 后,先淀积  $2\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  和  $x$  ML 的 GaAs,接着以  $0.1\ \text{ML}$  InAs 然后停顿 5 秒的顺序淀积  $3.5\ \text{ML}$  的 InAs 量子点. 其中 GaAs 层的厚度分别为  $x=0, 5, 10$  和  $15\ \text{ML}$ . 为了提高发光峰波长, InAs 量子点上再覆盖  $3\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  应力减小层,接着生长  $20\ \text{nm}$  GaAs 后,衬底温度升高到  $600^\circ\text{C}$ ,淀积最后的  $20\ \text{nm}$  GaAs 盖层. 为了获得量子点的形貌和密度,同样条件下生长了一系列样品,在量子点形成后即停止生长. GaAs 和 InAs 的生长速率分别是  $0.4$  和  $0.1\ \mu\text{m h}^{-1}$ . 使用 Digital Instruments 公司的 Nanoscope III 进行了原子力显微镜的测量. 波长为  $632.8\ \text{nm}$  的 He-Ne 激光器作为激发光源,液氮致冷的 Ge 探测器用于 PL 谱测量.

## 2 结果与讨论

图 1 为样品的  $2.0 \times 2.0\ \mu\text{m}^2$  二维的 AFM 图. 量子点直接在  $2\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  上生长时(图 1a),量子点密度约为  $1.7 \times 10^9\ \text{cm}^{-2}$ , 当在  $2\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  和  $x=5\ \text{ML}$  GaAs 的复合应力缓冲层上生长时,密度增加了 1.2 倍,约为  $3.8 \times 10^9\ \text{cm}^{-2}$  (图 1b). 然而,当 GaAs 厚度  $x$  从 5 增加到 10 ML 时,量子点密度并没有继续增加. 当 GaAs 厚度为 10 ML 时,量子点密度减小到约  $3.4 \times 10^9\ \text{cm}^{-2}$  (图 1c). 当 GaAs 厚度继续增加到 15 ML 时,量子点密度进一步减小到约  $2.1 \times 10^9\ \text{cm}^{-2}$  (图 1d). 图 2 给出 GaAs 厚度  $x$  和量子点密度的关系. 这些结果和 Chung 等人采用低压金属有机化学汽相淀积方法,在  $7\ \text{nm}\ \text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}$  和  $5\ \text{\AA}$  或  $50\ \text{\AA}$  GaAs 应力缓冲层上淀积的量子点变化趋势一致<sup>[5]</sup>. 这些结果可以用不同厚度 GaAs 晶格常数的变化来解释. 因为二元合金的晶格常数( $a$ )存在差异, InAs ( $a=6.05\ \text{\AA}$ ) 在 GaAs ( $a=5.64\ \text{\AA}$ ) 上淀积时产生压应变;相反,当 GaAs 在 InAs 或 InGaAs 合金上生长时产生张应变. 较薄的 GaAs 全层受张应变影响大,膨胀较多,而较厚的 GaAs 全层膨胀较少,更多的补偿了由  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  应力缓冲层引入的应变<sup>[6]</sup>. 结果,薄的 GaAs 层有较大的晶格尺寸,和 InAs 更加匹配. 众所周知,量子点和缓冲层之间应力引起的相互作用和晶格失配度的平方成正比. 这种相互作用会随着失配的减小而迅速减小,从而导致量子点密度明显增加<sup>[6]</sup>. 然而,我们会发现当 GaAs 层相对薄时 ( $\leq 10\ \text{ML}$ ),有类似火山形状的孔[如图 1 中 (b) 和 (c) 所示]出现在样品表面. 这是因为在生长量子点前引入  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  应力缓冲层,也在系统中引入了应变. 薄的 GaAs 层不

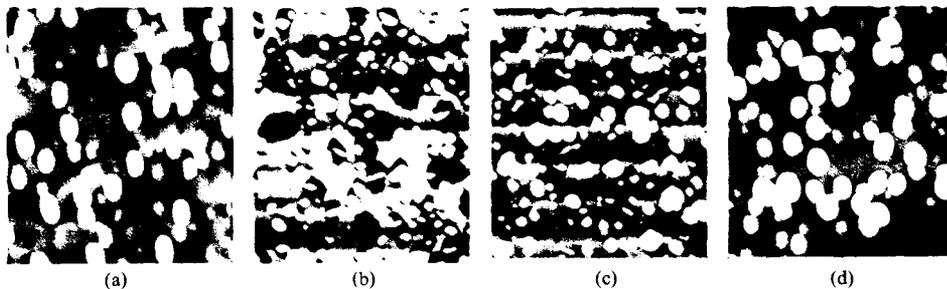


图 1  $2\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  和  $x\ \text{ML}$  GaAs 复合应力缓冲层上的量子点  $2.0 \times 2.0\ \mu\text{m}^2$  的 AFM 图. 其中 GaAs 厚度  $x$  分别为 (a) 0, (b) 5, (c) 10 和 (d) 15 ML

Fig. 1  $2.0 \times 2.0\ \mu\text{m}^2$  AFM images of InAs QDs grown on  $2\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  and  $x\ \text{ML}$  GaAs combined strain-buffer layers. The thickness of GaAs is  $x =$  (a) 0, (b) 5, (c) 10 and (d) 15 ML, respectively.

能足以补偿这种应变,从而导致缺陷的形成. 另一方面,薄的 GaAs 层和量子点在同一温度生长. 这个温度要比 GaAs 材料的最佳生长温度低至少 60 到 100°C,因此这些层的光学性质变差. 缺陷如果存在会在电子-空穴复合过程中形成损耗通道. 因此,要得到有较少非辐射复合中心且维持长波长发光的量子点,还需要进一步优化生长条件.

图 2 还给出了 2 nm  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  和  $x$  ML GaAs 复合应力缓冲层上 InAs 岛的高宽比  $r$  随 GaAs 厚度  $x$  的变化. 由于薄层 GaAs 的引入,高宽比有所增加. 当  $x$  为 10 ML 时,这个高宽比达到最大值. 这一结果清楚的说明因为失配的减少,量子点中 In 组分增加. 这一结果也导致量子点发光峰位的不同,后文的 PL 谱测量证明了这一点.

复合应力缓冲层中不同厚度 GaAs 的样品在室温下的 PL 谱如图 3 所示. 所有样品对应基态跃迁的发光峰都超过 1300nm. 其中 1250nm 附近的肩峰

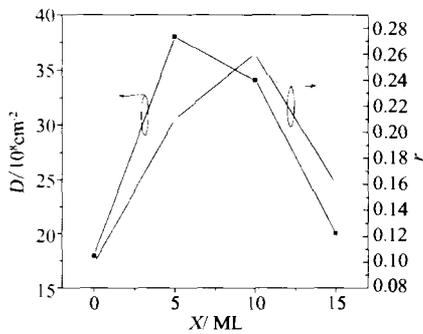


图 2 量子点密度  $D$  和高宽比  $r$  随 GaAs 厚度  $x$  的变化  
Fig. 2 Density  $D$  and height-to-width ratio  $r$  of InAs QDs as a function of the thickness of GaAs

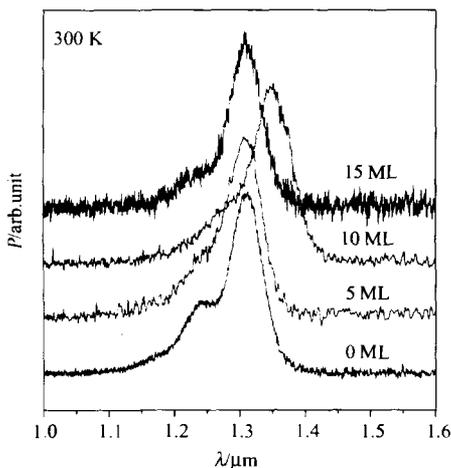


图 3 室温下不同 GaAs 厚度的样品的 PL 谱  
Fig. 3 Room temperature PL spectra of InAs QDs with different GaAs thickness

通过变功率测试证实是来自量子点的激发态. 对于样品  $x = 0$  ML, PL 主发光峰是 1310nm, 且半高宽为 24 meV. 随着 GaAs 厚度的增加, 发光峰均发生红移. 当  $x = 10$  ML 时, 发光峰红移最大, 达到 1350 nm, 半高宽为 36meV. 这是因为失配度的减少, 使量子点中 In 组分增加, 提高了量子点的高宽比, 致使发光峰发生红移. 但随着 GaAs 层的引入, 半高宽增加. 这说明薄的 GaAs 层造成量子点尺寸变化更加明显, 引起了非均匀展宽. 但当 GaAs 达到一定厚度时, 如 15 ML, 量子点尺寸变得较均匀, 半高宽仅为 26meV. 从 PL 谱中我们可以看到, 采用 GaAs 薄层后量子点的发光强度有所降低, 这可能是因为样品中存在缺陷, 我们可以通过进一步优化生长条件和采用多层淀积、变温退火等办法来解决.

图 4 是我们用  $I_{\text{PL}}(T) = C \exp(-E_A/KT)$  公式进行拟合后的  $x = 0$  和 10 ML 时 InAs 量子点样品的基态积分强度随温度的变化关系图. 其中  $C$  为常数,  $E_A$  为热激活能. 由图我们可以看到, 对于  $x = 0$  ML 的样品, 其量子点基态的发光强度从 15 K 到室温衰减了约 9 倍, 而对于  $x = 10$  ML 的样品, 其强度只衰减了约 5 倍. 这说明有  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ -GaAs 复合

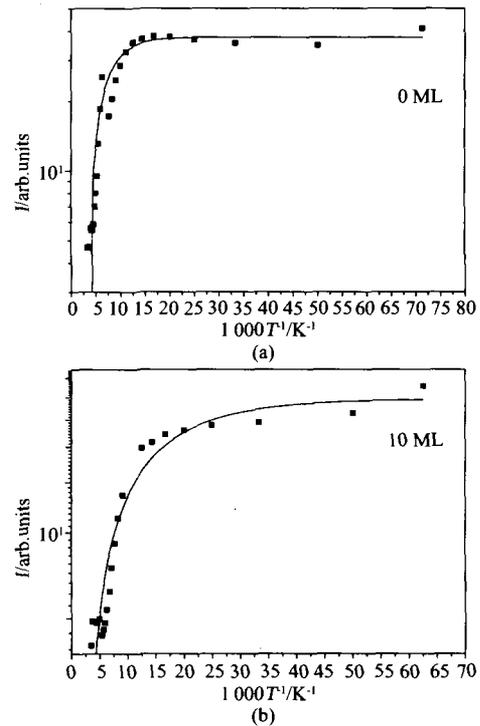


图 4 (a)和(b)分别是  $x = 0$  ML 和  $x = 10$  ML 样品的基态积分强度随温度的变化关系  
Fig. 4 The integrated intensity of PL emission for the ground state of InAs QD samples ( $x = 0$  and 10 ML) as a function of the temperature

应力缓冲层的  $\text{InAs}$  量子点样品中, 由于  $\text{GaAs}$  层的加入增加了势垒的限制, 因此有效地抑制了载流子的热激活和热转移所造成的非辐射复合跃迁. 这对提高量子点激光器的热稳定性具有非常重要的意义.

### 3 结论

我们利用 PL 谱和 AFM 测试方法研究了在  $2\ \text{nm}$   $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  和  $x\ \text{ML GaAs}$  的复合应力缓冲层上淀积  $\text{InAs}$  量子点结构的发光特性和表面形貌的变化. 由于薄层  $\text{GaAs}$  的引入改变了晶格失配度, 导致量子点密度显著增加. 同时, 这也有助于提高量子点中  $\text{In}$  的组份, 使量子点的高宽比增加, 促进发光峰红移. 从 PL 积分强度随温度变化的对比可以得到, 采用  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As-GaAs}$  复合应力缓冲层的结构对于提高量子点激光器的热稳定性具有非常重要的意义.

### REFERENCES

- [1] QIU Zhi-Jun, GUI Yong-Sheng, CUI Li-Jie, *et al.* Magneto-transport of electron symmetric and antisymmetric states in highly doped  $\text{InGaAs/InAlAs}$  single quantum well [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (仇志军, 桂永胜, 崔利杰, 等. 掺杂  $\text{InGaAs/InAlAs}$  单量子阱中电子对称态和反对称态磁输运研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(5): 329—332.
- [2] WANG Zhi-Ming, LU Zheng-Dong, FENG Song-Lin, *et al.* The study of growth interruption of self-assembled  $\text{InAs/GaAs}$  islands [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王志明, 吕震东, 封松林, 等. 自组织  $\text{InAs/GaAs}$  岛状结构生长停顿研究. *红外与毫米波学报*), 1997, **16**(5): 335—338.
- [3] MENG Xian-Quan, XU Bo, JIN Peng, *et al.* Dependence of optical properties on the structure of multi-layer self-organized  $\text{InAs}$  quantum dots emitting near  $1.3\ \mu\text{m}$  [J]. *J. Crystal Growth*, 2002, **243**: 432—438.
- [4] Chu L, Arzberger M, Bohom G, *et al.* Influence of growth conditions on the photoluminescence of self-assembled  $\text{InAs/GaAs}$  quantum dots [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **85**(4): 2355—2362.
- [5] Chung T, Walter W, Holonyak Jr N. Coupled strained-layer  $\text{InGaAs}$  quantum-well improvement of an  $\text{InAs}$  quantum dot  $\text{AlGaAs-GaAs-InGaAs-InAs}$  heterostructure laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(27): 4500—4502.
- [6] LIU Hui-Yun, Hopkinson M, Tuning the structural and optical properties of  $1.3\ \mu\text{m}$   $\text{InAs/GaAs}$  quantum dots by a combined  $\text{InAlAs}$  and  $\text{GaAs}$  strained buffer layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(21): 3644—3646.
- [1] QIU Zhi-Jun, GUI Yong-Sheng, CUI Li-Jie, *et al.* Magneto-transport of electron symmetric and antisymmetric states in

(上接第 323 页)

### REFERENCES

- [1] Sumner P Davis, Mark C Abrams. *Fourier Transform Spectrometry* [M]. San Diego: Academic Press, 2001. 10—11.
- [2] Bell, Robert John. *Introductory Fourier Transform Spectroscopy* [M]. New York: Academic Press, 1972. 33—44.
- [3] Kenichi Kikuchi, Yasunori Fujii, Junji Inatani. Simple FTS Measurement System for Submillimeter SIS mixer [J]. *Int. J. IR MM Waves*, 2002, **23**: 1019—1027.
- [4] ZHANG Wen, SHAN Wen-Lei, SHI Sheng-Cai. Investigation of Embedding Impedance Characteristic for a 660-GHz Waveguide SIS Mixer [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张文, 单文磊, 史生才. 660-GHz 频段波导型 SIS 混频器嵌入阻抗的特性研究. *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(6): 465—468.