

文章编号: 1000-7032(2009)02-0209-05

带有 InGaAs 覆盖层的 InAs 量子点红外探测器材料的发光与光电响应

吴殿仲¹, 王文新^{2*}, 杨成良², 蒋中伟²,
高汉超², 田海涛², 陈 弘², 姜宏伟¹

(1. 首都师范大学 物理系, 北京 100048;

2. 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

摘要: 利用分子束外延技术(MBE), 在 GaAs(001) 衬底上自组织生长了不同结构的 InAs 量子点样品, 并制备了量子点红外探测器。利用原子力显微镜(AFM)和光致发光(PL)光谱研究了量子点的表面结构、形貌和光学性质。渐变 InGaAs 层的插入有效地释放了 InAs 量子点所受的应力, 抑制了量子点中 In 组分的偏析, 提高了外延层的生长质量, 降低了势垒高度, 使 InAs 量子点荧光波长红移。伏安特性曲线和光电流(PC)谱结果表明, 生长条件的优化提高了器件的红外响应, 具有组分渐变的 InGaAs 层的探测器响应波长发生明显红移。

关键词: InAs 量子点; InGaAs 渐变层; 光致发光; 分子束外延; 红外探测器

中图分类号: O482.31; O484.41 **PACS:** 78.55. Cr **PACC:** 3250F; 7855D; 6855 **文献标识码:** A

1 引 言

红外探测技术作为光电子技术研究中的重要领域, 广泛应用于工业、医疗、军事以及民用等方面。HgCdTe 是最早研究的红外探测器材料, 但是存在许多不容易克服的缺点, 如: 均匀性差、界面不稳定、重复性低、成本高等。近二十年来发展起来的量子阱红外探测器, 克服了 HgCdTe 材料的缺点, 得到了广泛的关注。量子阱红外探测器的探测原理是基于导带内电子的子带跃迁, 量子阱将电子限制在可以与电子的德布罗意波长和平均自由程大小相比拟的势阱中, 改变量子阱的参数可以方便的调节探测器的探测波长。但是, 量子阱探测器也有其局限性, 由于跃迁选择定则的限制, 使其不能直接探测垂直入射光, 必须使用介质或耦合光栅才能吸收垂直入射光, 这样就加大了制作成本, 而且其在红外波段只有较窄的光谱响应。结构形式和工作原理与量子阱红外探测器相似的量子点红外探测器由于具有垂直入射光响应, 更低的暗电流, 更高的光电增益、响应率和探

测率高的特点, 引起了研究者的极大兴趣^[1]。20世纪90年代中期以来, 由于采用应变自组织生长模式得到的高密度, 尺寸均匀, 大小可调节的量子点结构, 促进了量子点红外探测器的快速发展^[2-7]。GaAs 衬底上生长的 InAs 量子点, 可以通过覆盖不同组分的 InGaAs 层调节量子点的能带结构, 得到中红外波长的探测器^[8-10]。在量子点红外探测器结构中插入的 In 组分渐变的 InGaAs 层, 能更好的释放量子点所受的应力, 提高外延层的材料质量, 调节探测器的红外响应波长, 优化器件的性能。本文通过优化量子点生长条件, 在有源层顶部插入生长 In 组分渐变的应变 InGaAs 层, 制备了量子点红外探测器, 研究了渐变 InGaAs 层对外延材料和器件的影响。

2 实 验

采用 VG 公司的 V100 MBE 系统, 在半绝缘 GaAs(001) 衬底上外延生长 InAs 量子点探测器材料, 整个生长过程由反射高能电子衍射仪(RHEED)原位监测。生长过程如下: 半绝缘

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2008-11-24

作者简介: 吴殿仲(1978-), 男, 山东泰安人, 主要从事量子点红外探测器材料的分子束外延生长的研究。

*: 通讯联系人; E-mail: wxwang@aphy.iphy.ac.cn, Tel: (010)82649208

GaAs(001)衬底,在As气氛的保护下加热到580℃脱掉衬底表面的氧化膜,然后生长500 nm的GaAs缓冲层以获得平整表面。探测器结构如图1所示。生长1 μm的Si-GaAs作为器件的下电极,中间为10个周期的量子点区,最后是300 nm的Si-GaAs用来制作上电极,掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。10个周期的量子点区的生长条件如下:衬底降温到490℃生长InAs量子点和InGaAs插入层,当InAs生长到1.7个原子层(ML)时,观察到RHEED衍射图样由线状变化为点状,对应于生长模式由二维转化为三维,表明此时量子点开始形成。控制生长时间得到InAs量子点的厚度为2.5ML,适当的中断时间,以便In原子在表面能充分迁移,得到尺寸合适且大小均匀的量子点。如此生长十个周期,然后生长InGaAs盖帽层,最后将衬底温度升到580℃生长40 nm的GaAs。

共生长两组样品,第一组的两个样品是为了研究优化量子点的生长条件,在不同的条件下生长的量子点的尺寸和密度对PL光谱的影响,分别标号为A和B,第二组样品是利用了前面的优化条件生长了不同QDs探测器的样品分别标记为1[#]和2[#],其基本结构如图1所示。两组样品的区别在于量子点区的不同,1[#]号样品的InAs量子点上方无InGaAs盖帽层,主要目的是和有InGaAs渐变结构的样品进行对比。2[#]号样品插入In组分渐变结构的InGaAs盖帽层,In组分从0.18变化到0.08,厚度为2 nm。为了表征量子点的密度和表面形貌,同样的条件下在样品的表面生长了没有盖层的InAs量子点。

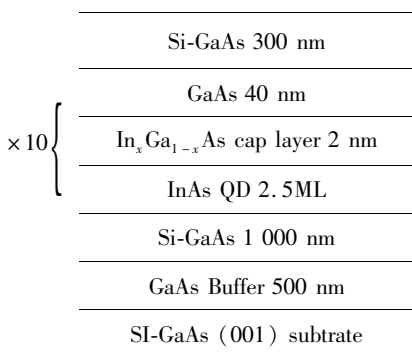


图1 外延层的基本结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the epilayers structure

3 结果与讨论

量子点的尺寸、密度和均匀性对量子点红外探测器有着至关重要的影响。自组织生长的量子点的横向尺寸一般20 nm左右,在生长方向尺寸较小(一般几个nm),水平方向上限制作用较弱导致了量子点多个能级的存在。如果跃迁基于束缚态之间,载流子必须隧穿势垒才能形成光电流,只有部分载流子对光电流有贡献,影响了器件的响应。因此我们要控制量子点的大小和密度,使量子点中的基态能级和第一激发态能级的差值满足对应的红外光谱的能量要求。量子点的均匀性

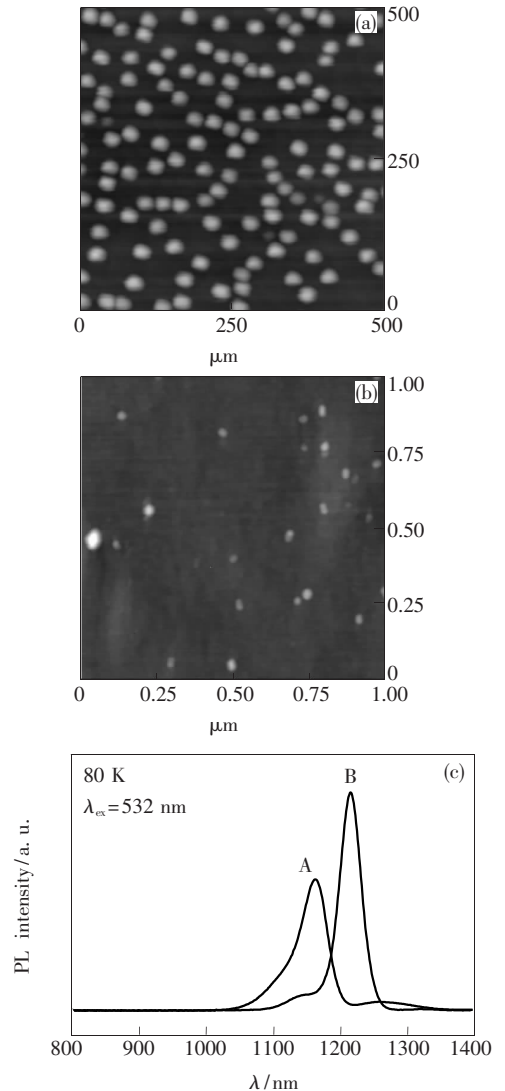


图2 不同生长条件下的InAs量子点的原子力显微镜(AFM)照片(a),(b)和PL光谱(c)

Fig. 2 The AFM pictures (a),(b) and PL spectra (c) of the InAs QD samples in different growth conditions

也严重影响器件,因此要调控生长条件使量子点的大小尽量保持一致。

我们生长了不同 QDs 密度的样品 A 和 B, 图 2 给出了生长在器件完整结构的表面的 InAs 量子点的原子力图像。如图 2(a) 所示, 样品 A 中量子点的密度为 $2.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 平均高度为 5.34 nm, 平均直径为 27 nm, 高宽比为 1:5, 低温 80 K 下 PL 谱的半峰宽为 45 meV。采用了优化的生长条件, 选择了合适的生长温度, As 压以及较慢的沉积速率和生长中断, 得到图 2(b) 所示的样品 B, B 的量子点的大小和分布更为均匀、密度更大。密度为 $4.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, 平均高度为 7.38 nm, 平均直径为 21.3 nm, 高宽比为 1:2.9, 80 K 下 PL 谱的半峰宽为 32 meV。图 3(c) 所示, 优化后的量子点的密度和高宽比明显变好, 使得 PL 谱半峰宽变窄, 强度增强。

图 3 给出了样品 1[#] 和 2[#] 在低温 80 K 下的 PL 谱, 荧光测量采用相同条件。由图可以看到样品 1[#] 的发光峰值为 1 123 nm, 半峰宽为 36 meV。样品 2[#] 的发光峰值为 1 213 nm, 半峰宽 32 meV, 两个样品的发光峰该峰均来源于量子点中基态激子复合发光。

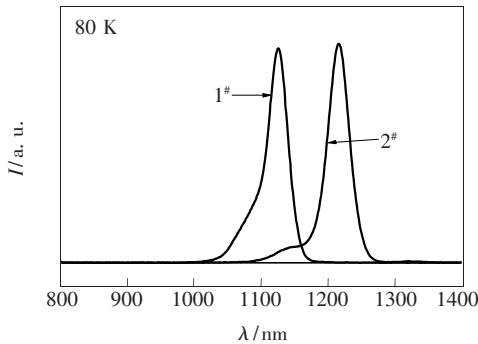


图 3 两个样品在低温 80 K 下的 PL 谱

Fig. 3 The PL spectra of the QDs samples 1[#] and 2[#] at 80 K

样品 2[#] 的发光主峰较样品 1[#] 发生了明显的红移。这是因为在样品 2[#] 中 InAs 量子点上方插入生长了 InGaAs 渐变缓冲层: 一方面 InGaAs 的插入减少了 In/Ga 原子的相互作用, 有效的抑制 In 偏析, 保持了量子点中 In 的组分及其形状, 使量子点形成较大的尺寸, 量子点发光较 GaAs 盖层发生红移。另一方面 InGaAs 的插入有效的释放了 InAs 量子点所受的应力, 其厚度和组分能够改变势垒的高度, 从而影响 InAs 量子点基态能级

的位置, 调谐量子点的发光波长^[11-13]。插入生长的 InGaAs 层的 In 组分较小, 避免了高 In 组分非复合中心的大量产生, 减小了对量子点发光的影响。由于 InGaAs 的晶格常数大于 GaAs, 随着 In 组分的减小晶格常数逐渐趋近于 GaAs, In 组分渐变的 InGaAs 层, 由晶格失配引起的缺陷比较少, 材料质量就更好, 使得带有 InGaAs 覆盖层的 InAs 量子点的发光半峰宽和发光强度更好一些。通过插入的 InGaAs 的盖帽层, 降低了量子点的基态能级的位置, 使得 PL 光谱向长波移动, 满足了设计要求。

用上述两个样品制成量子点红外探测器器件。测得的常温及冷背景下的 *I-V* 特性曲线如图 4 所示。

从图中可以看出, 在 80 K 偏压为 -1 V 时, 器件 1 的暗电流为 $2.1 \times 10^{-5} \text{ A}$, 器件 2 暗电流为 $2.3 \times 10^{-9} \text{ A}$, 远远小于器件 1[#], 而且器件 2[#] 的阻抗也明显小于器件 1[#]。在温度较高时器件 1[#] 响应较差, 而器件 2[#] 在高工作温度特性明显要好。渐变 InGaAs 层的插入, 释放了 InAs 量子点所受的应力, 减小了由应变产生的缺陷, 提高了外

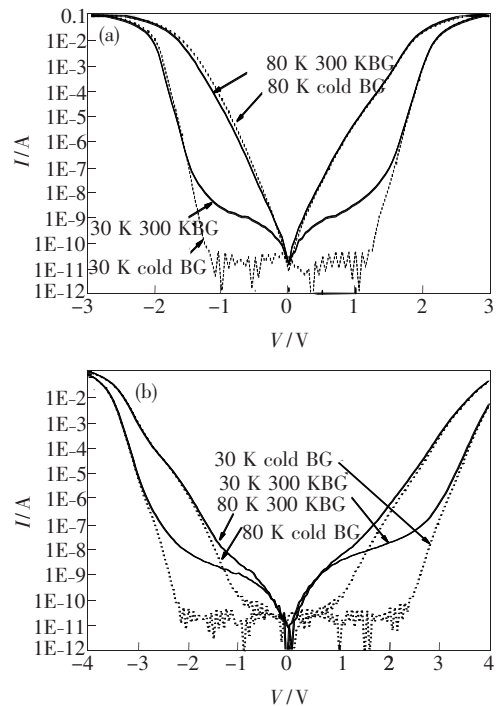


图 4 两个器件在 300 K 背景和冷背景下的 *I-V* 测试曲线

Fig. 4 The current-voltage characteristics of (a) Sample 1[#] and (b) Sample 2[#]. The solid lines are the dark-current *I-V* curves at room temperature background and dash lines are determined at cold background.

延层的质量,使得器件的暗电流不论在低温还是室温下明显小于 GaAs 盖层的器件。图 5 和图 6 给出各个器件的导带结构简易图及 30 K 下的光电流(PC)谱。

图 6 给出了器件 1[#]和 2[#]的导带结构,图中的 a 和 b 代表不同大小量子点的基态能级。器件 1[#]的红外吸收源于量子点基态到激发态之间的跃迁如图 6(a),且激发态能级靠近 GaAs 势垒边缘,同时由于量子点尺寸的不均匀性,使得 PC 谱展宽,这种结构的量子点材料的响应波长基本在 5 ~ 7 μm 之间。InGaAs 渐变层的插入,改变了 InAs 量子点的势垒高度如图 6(b)所示,势垒由突变变为

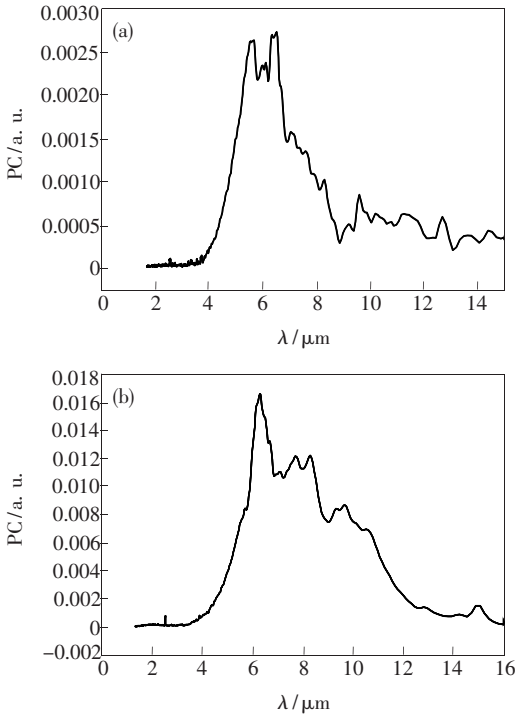


图 5 两个器件在 30 K 下的光电流谱

Fig. 5 The responsivity of (a) sample 1[#] and (b) sample 2[#] at 30 K

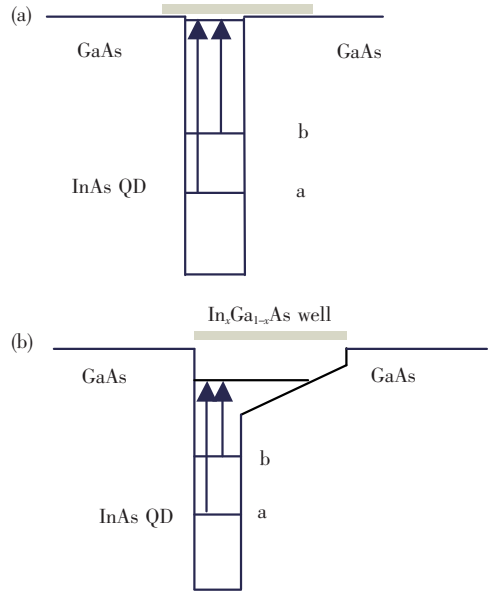


图 6 两个器件的导带结构简易图

Fig. 6 The schematic diagram of subband structures of (a) sample 1[#] and (b) sample 2[#]

连续增加,使得势阱宽度变大,势垒降低直接影响了量子点导带的子能级位置的分布,使激发态能量减小,低于 GaAs 势垒,响应波长向长波区展宽。相同的测试条件下,器件 2[#]的光电流强度明显好于器件 1[#],6 μm 处大约是器件 A 的 6 倍。

4 结 论

利用分子束外延技术生长了 In 组分渐变 InGaAs 盖层的量子点结构,并制备了量子点红外探测器器件。实验结果表明,渐变 InGaAs 层的插入有效的提高了外延层的材料质量,调节了探测器的红外响应波长,优化了器件的光电性能。

致谢:感谢上海技术物理研究所甄红楼老师在器件制作和光电特性测量方面的帮助!

参 考 文 献:

- [1] Ryzhii V. The theory of quantum-dot infrared phototransistors [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1996, **11**(5):759-765.
- [2] Wemer Seifert, Niclas Carlsson, Mark Miller, *et al.* In-situ growth of quantum dot structures by the Stranski-Krastanow growth mode [J]. *Prog. Crystal Growth and Charact. Mater.*, 1996, **33**(44):423-471.
- [3] Yoffe A D. Semiconductor quantum dots and related systems: electronic, optical, luminescence and related properties of low dimensional systems [J]. *Advances in Phys.*, 2001, **50**(1):1-208.
- [4] Richard Notzel. Self-organized growth of quantum-dot structures [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1996, **11**(10):1365-1379.
- [5] Patella F, Sgarlata A, Arciprete F, *et al.* Self-assembly of InAs and Si/Ge quantum dots on structured surfaces [J]. *J.*

Phys. : Condensed Matter, 2004, **16**(49):1503-1534.

- [6] Passow T, Li S, Feinäggle P, *et al.* Systematic investigation into the influence of growth conditions on InAs/GaAs quantum dot properties [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(7):073511-1-9.
- [7] Jia Guozhi, Yao Jianghong, Shu Yongchun, *et al.* Optical properties and structure of InAs quantum dots in near-infrared band [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(1):104-108 (in Chinese).
- [8] Seravalli L, Minelli M, Frigeri P, *et al.* The effect of strain on tuning of light emission energy of InAs InGaAs quantum-dot nanostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(14):2341-2343.
- [9] Maree P M J, Barbour J C, Van der Veen J F, *et al.* Generation of misfit dislocations in semiconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**(11):4413-4420.
- [10] Seravalli L, Frigeri P, Minelli M, *et al.* Quantum dot strain engineering for light emission at 1.3, 1.4 and 1.5 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(6):063101-1-3.
- [11] Tung Pohsieh, Chiu Pei-Chin, Chyia Jen-Inn, *et al.* 1.55 μm emission from InAs quantum dots grown on GaAs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(15):151903-1-3.
- [12] Jun Tatebayashi, Masao Nishioka, Yasuhiko Arakawa, *et al.* Luminescence in excess of 1.5 μm at room-temperature of InAs quantum dots capped by a thin InGaAs strain-reducing layer [J]. *J. Crystal Growth*, 2002, **237-239**:1296-1300.
- [13] Kong Meiyang, Zeng Yiping, Li Jinmin, *et al.* Tuning of Infrared absorption wavelength of MBE InGaAs/GaAs quantum dots [J]. *Chin. J. Semicond.* (半导体学报), 2003, **24**(3):78-80 (in Chinese).

InAs Quantum Dots with InGaAs Caplayer Infrared Detector Grown by MBE

WU Dian-zhong¹, WANG Wen-xin², YANG Cheng-liang²,

JIANG Zhong-wei², GAO Han-chao², TIAN Hai-tao², CHEN Hong², JIANG Hong-wei¹

(1. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing National Laboratory Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Self-assembled InAs quantum dots (QDs) capping with the InGaAs layer of the graded component are grown by molecular beam epitaxy (MBE) on GaAs (001). Surface structure, morphology and optical properties of QDs were studied by atomic force microscopy (AFM) and photoluminescence spectroscopy (PL). The insertion of InGaAs layer enhances the quality of epitaxial layer, relaxes the stress of InAs quantum dots, changes the energy level of QDs and suppress the component segregation of indium from the quantum dots. Characteristic of devices were studied by photocurrent spectra (PC) and volt-ampere characteristic curves. Wavelength red-shift of QDs device with InGaAs graded composition layer was determined by PL and PC curves.

Key words: InAs quantum dots; InGaAs graded component layer; photoluminescence; molecular beam epitaxy; infrared detector device

CLC number: O482.31; O484.41

PACS: 78.55.Cr

PACC: 3250F; 7855D; 6855

Document Code: A