

MBE InGaAs/GaAs 量子点及其红外吸收波长调制

孔梅影 曾一平 李晋闽

(中国科学院半导体研究所 新材料部, 北京 100083)

摘要: 利用分子束外延技术, 自组织生长了具有正入射红外吸收特性的 InGaAs/GaAs 量子点超晶格结构. 通过改变结构参数和生长参数, 可改变量子点的形状、尺寸和调制其红外吸收波长, 用于研制 $8\sim 12\mu\text{m}$ 大气窗口的红外探测器. 观测发现随着量子点超晶格结构的 InGaAs 层厚度增加, 其红外吸收峰蓝移, 用量子点间的耦合作用随 InGaAs 层的厚度的增加而增强的观点对其机理给予解释.

关键词: 分子束外延; 量子点; InGaAs/GaAs; 红外吸收

PACC: 8110

中图分类号: TN304.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0078-03

1 引言

由于在量子点中载流子的运动在三个方向上都受到限制, 具有一系列独特的性质, 理论上预言它具有很好的器件应用前景. 在上世纪 90 年代, 利用 Stranski-Krastanow (S-K) 生长模式原位生长量子点结构^[1]取得了很大的进展, 各种材料体系的量子点的制备和器件应用形成了“低维半导体”这个前沿科学领域中的研究热点.

在量子点器件的实际应用中, 一般都要求量子点具有均匀的形状和尺寸, 因此, 均匀一致的量子点的生长是量子点器件应用的关键. 目前, 利用量子点结构研究的器件主要有量子点激光器 (QDLD)、量子点红外探测器 (QDIP) 和单电子晶体管 (SET) 等, 其中 QDLD 的研究最多, 并已取得很大的进展.

我们在 1996 首次观察到了量子点超晶格的正入射红外吸收^[2], 响应峰位在 $13\sim 14\mu\text{m}$, 并预计它在红外探测领域具有重要的应用前景. 它不仅可以省去量子阱红外探测器所必须的光栅、反射面等, 而且由于量子点的瓶颈效应, 光激发载流子的驰豫受到阻碍, 在驰豫回基态之前参与运输从而形成光电流, 因此, 可有效地提高量子效率, 并有可能提高工作温度. 量子点超晶格的正入射红外吸收效应的观

测发现, 促进了量子点红外探测器研究工作的开展, 上世纪 90 年代后期以来的短短几年内, 国际上已作出多种不同结构的正入射量子点红外探测器^[3~5]. 由于量子点的形状、尺寸和应力等均会影响量子点的能级, 因此, 通过改变材料生长条件、结构参数、InGaAs 层的厚度和组分等, 均可调制量子点超晶格的红外吸收波长.

本文主要介绍我们在观察到了 InGaAs/GaAs 量子点超晶格的正入射红外吸收, 又进一步研究提高了 InGaAs/GaAs 量子点超晶格的均匀性^[6]的基础上, 为研制 $8\sim 12\mu\text{m}$ 大气窗口的红外探测器而开展的调整量子点超晶格红外吸收波长的研究. 由于量子点的形状、尺寸和应力等均会影响量子点的能级, 我们通过改变 InGaAs/GaAs 超晶格量子点的尺寸和 InGaAs 层的厚度, 将其红外吸收波长调整到了 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的范围.

2 实验

利用分子束外延技术在半绝缘 GaAs (100) 衬底上自组织生长低组分的 InGaAs/GaAs 量子点超晶格结构. 样品结构如下: 在衬底上首先生长 $1\mu\text{m}$ 左右的 GaAs 缓冲层, 然后是 $20\sim 40$ 周期的 InGaAs/GaAs 双层结构, InGaAs 层厚 $4\sim 8\text{nm}$, In

含量 $x=0.30$ 左右; GaAs 隔离层厚 $24\sim 34\text{nm}$. 最后是 $1.0\mu\text{m}$ 的 GaAs 帽层. 可用 TEM 和 AFM 观察量子点的分布和形貌, X 射线双晶衍射模拟确定样品 InGaAs 的 In 含量和各层的厚度. 用光致发光 (PL) 谱、光电流谱及傅里叶红外吸收光谱等测量和研究样品的光学特性.

3 结果和讨论

3.1 改变量子点的形状和尺寸

设计和生长了 40 周期的 InGaAs/GaAs 量子点超晶格, GaAs 缓冲层厚 $1.2\mu\text{m}$, InGaAs 层厚 4.0nm , In 含量为 0.32 , GaAs 层厚 22.0nm . 从 TEM 像测得量子点的平均尺寸: 直径为 60nm , 高度为 12nm , 与文献[1]的直径为 30nm , 高度为 $6\sim 7\text{nm}$ 相比, 量子点的尺寸变大. 图 1 是样品在 10K 下的 PL 光谱, 进一步证明了量子点的形成. PL 光谱的峰值能量为 1.23meV , 半高宽为 50meV . 与文

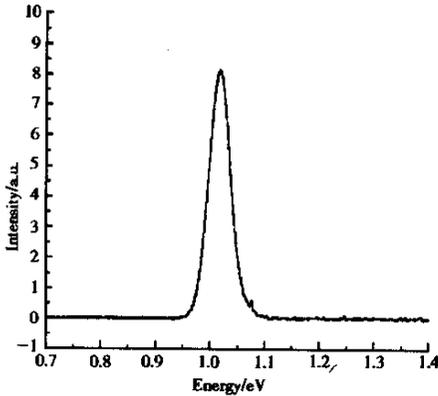


图 1 10K 下样品的 PL 光谱

Fig. 1 Low temperature photoluminescence spectrum

献[1]相比, 峰值能量向低能方向移动, 说明基态的能量降低. 利用傅里叶光谱仪, 测量了样品室温 (300K) 下的红外吸收. 图 2 是样品在 45° 波导模式和垂直入射下的红外吸收图谱. 可以看出, 在 45° 波导模式下, 样品有着很强的红外吸收, 峰值波长为 $9.8\mu\text{m}$, 半高宽为 8.3meV . 在垂直入射下, 样品仍然有明显的红外吸收, 峰值波长为 $9.7\mu\text{m}$, 半高宽为 14.2meV . 量子点的红外吸收调整到对应 $8\sim 12\mu\text{m}$ 大气窗口的波段, 峰值波长为 $9.5\mu\text{m}$. 较为对称的红外吸收谱线和较窄的半高宽显示, 样品的红

外吸收有可能是对应着量子点中束缚态与束缚态能级之间的跃迁.

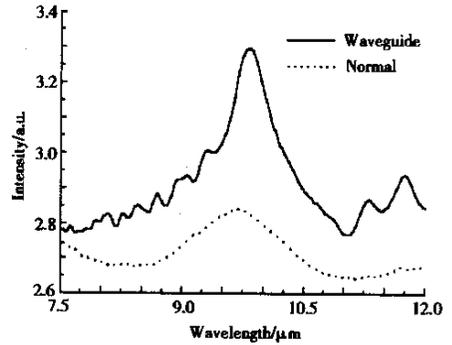


图 2 样品室温 (300K) 红外吸收光谱 实线: 45° 波导模式红外吸收; 点线: 垂直入射红外吸收

Fig. 2 Infrared absorption measured under 45° mode (solid line) and normal incidence (dotted line)

3.2 改变 InGaAs 层的厚度

在保持其他结构参数和生长参数相同的条件下, 改变量子点超晶格样品的 InGaAs 层的厚度. A~D 四个样品的 InGaAs 层厚度分别为 $46, 62, 70, 80\text{nm}$. 用 AFM 和 TEM 观测发现量子点的密度随 InGaAs 层厚度增加而增大, A~D 四个样品的量子点的密度按估算大致分别为 $1\times 10^{10}, 3\times 10^{10}, 4\times 10^{10}$ 和 $7\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$.

图 3 和图 4 分别是 A~D 四个样品的低温光电流谱 (40K) 和低温光致发光谱 (77K). 从中可看出, 随 InGaAs 层厚度增加, 量子点带间的吸收峰从

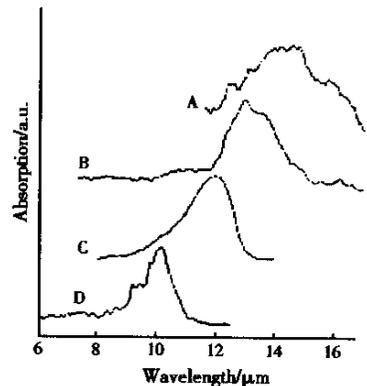


图 3 A~D 四个样品的低温光电流谱 (40K)

Fig. 3 Photocurrent photoluminescence spectra of samples A~D at 40K

15 μm 蓝移到 10 μm , 而 PL 峰则红移, 并且其半峰宽变窄. 我们认为这是由于量子点间的耦合效应所致. 当 InGaAs 层厚度增加, 量子点的密度增大, 使量子点间的耦合增强, 量子点的分立子能级耦合成微带. 在光致发光谱测量时, 处于微带上部能级的光生载流子会向微带下部转移, 再完成子带间复合发光, 因此随着 InGaAs 层厚度增加, 量子点间的耦合增强, PL 峰红移和半峰宽变窄. 而另一方面, 耦合使子带间的能量空间增大, 导致吸收蓝移.

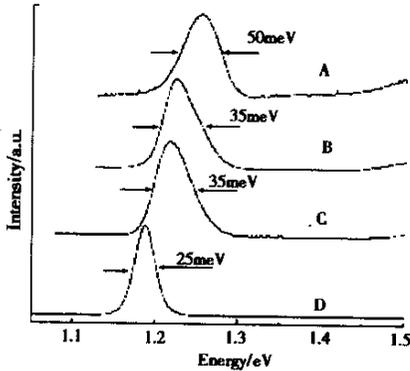


图 4 A~D 四个样品的低温光致发光谱(77K)

Fig. 4 PL spectra of samples A~D at 77K

4 结论

通过控制生长条件和结构参数, 制备的 InGaAs/GaAs 量子点超晶格具有明显的正入射红外

吸收特性, 吸收峰位在 8.0~15 μm 之间可调, 适于研制工作于 8.0~12 μm 大气窗口波段的量子点红外探测器.

致谢 感谢潘栋博士和庄乾东博士的实验支持和讨论.

参考文献

- [1] Leonard D, Krishnamurthy M, Reaves C M, et al. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surface. *Appl Phys Lett*, 1993, 63:3203
- [2] Pan D, Zeng Y P, Kong M Y, et al. Normal incident infrared absorption from InGaAs/GaAs quantum dot superlattice. *Electron Lett*, 1996, 32:1726
- [3] Pan D, Owe E T. Conduction intersubband InGaAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors. *Electron Lett*, 1998, 34:1883
- [4] Phillips J, Kamath K, Bhattacharya P. Far-infrared photoconductivity in self-organized InAs/GaAs quantum dots. *Appl Phys Lett*, 1998, 72:2020
- [5] Kim S, Mohseni H, Erdtmann M, et al. Growth and characterization of InGaAs/InGaP quantum dots, for midinfrared photoconductive detector. *Appl Phys Lett*, 1998, 73:963
- [6] Zhuang Q D, Li J M, Li H X, et al. Intraband absorption in the 8~12 μm band from Si-doped vertically aligned InGaAs/GaAs quantum-dot superlattice. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(25):3706

Tuning of Infrared Absorption Wavelength of MBE InGaAs/GaAs Quantum Dots

Kong Meiyang, Zeng Yiping and Li Jinmin

(Novel Material Center, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The self-assembled InGaAs/GaAs quantum dots superlattices for 8~12 μm infrared photodetector working at atmospheric window are grown by MBE. It is demonstrated that the intersublevel absorption wavelength of InGaAs/GaAs quantum dot superlattices can be adjusted by varying the shape and size of quantum dots and the thickness of InGaAs layer. It is observed that as the thickness of InGaAs layer increased, the infrared absorption peak blue-shifts from 15 to 10 μm . The changes can be attributed to the enhanced effect of coupling between quantum dots.

Key words: molecular beam epitaxy; quantum dots; InGaAs/GaAs; infrared absorption

PACC: 8110

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0078-03

Received 16 September 2002, revised manuscript received 18 November 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics