

477-480

(14)

InGaAs/GaAs 垂直对准量子点 超晶格的正入射红外吸收*

庄乾东 李晋闽 曾一平 潘量 孔梅影 林兰英

TN213

(中国科学院半导体研究所, 北京, 100083)

摘要 利用分子束外延技术, 生长了30周期的InGaAs/GaAs量子点超晶格, 透射电镜表明各层量子点沿生长方向呈现很好的垂直对准, 红外吸收测试观察到明显的垂直入射红外吸收, 吸收范围在8.5~10.4 μm 之间, 峰值波长为9.9 μm , 第一次实现了响应8~12 μm 大气窗口的量子点的垂直入射红外吸收, 这一结果预示了量子点超晶格结构在红外探测领域的潜在应用。

关键词 量子点, 超晶格, 红外吸收.

砷化镓 砷化铟

引言

量子阱红外探测器的研究已经取得很大的成功^[1], 但是需要在低温下工作, 并且不能吸收垂直入射的红外光, 这些不利因素制约了它的进一步发展. 量子点(Quantum Dots)在理论上优于量子阱, 首先, 量子点的带内跃迁可以吸收垂直入射的红外光. 另外, 由于量子点的瓶颈效应^[2,3], 光激发载流子的驰豫时间延长, 因此, 可有效地提高量子效率, 并有可能提高工作温度.

利用S-K生长模式可以制备高质量的量子点^[4,5], 虽然这一模式生长的量子点具有确定的形状, 但是, 量子点在单层上成核的随机性, 使得这一模式生长的量子点有着很大的尺寸分布. 因此, 均匀一致的量子点的生长是量子点器件得以应用的关键. 近来, 对GeSi/si^[6], In(Ga)As/GaAs^[7]及GaInP/InP^[8]等应变体系量子点多层结构, 即量子点超晶格(QDs superlattice)的大量研究表明, 在一定条件下, 各层量子点沿生长方向呈现垂直对准, 并且能够有效改善量子点的尺寸分布, 开辟了可能制备均匀量子点的新途径. 有关量子点的红外吸收已有报道^[9~12], 但是, 响应8~12 μm 大气窗口的量子点红外吸收还没有观察到. 在以往的研究中^[12], 我们曾报道了掺杂InGaAs/GaAs量子点超晶格在13~14 μm 处的垂直入射红外吸收. 本文报道了通过改变材料生长条件及结构参数, 生长了垂直对准的量子点超晶格, 并成功的将量子点的红外吸收调整到对应8~12 μm 大气窗口波段, 观察到明显的响应8.5~10.4 μm 的红外吸收.

1 实验

样品是在(001)GaAs半绝缘衬底上利用Riber-32P MBE系统生长的, 样品结构如图1

* 中国科学院半导体研究所所长基金资助项目
稿件收到日期 1998-08-14, 修改稿收到日期 1998-09-22

所示.首先生长 $1.2\mu\text{m}$ 掺 Si 的 GaAs 缓冲层,掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,生长温度为 580°C ,生长速率为 $1.0\mu\text{m}/\text{h}$,然后生长 30 周期的掺杂 InGaAs/GaAs 超晶格结构,InGaAs 层的厚度为 4.0nm ,In 含量为 0.30,掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,GaAs 层的厚度为 22.0nm ,整个超晶格结构在 500°C 温度下生长,生长速率控制在 $0.8\mu\text{m}/\text{h}$,最后生长 $1.0\mu\text{m}$ 掺 Si 的 GaAs 帽层,掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,生长条件与缓冲层相同.在生长过程中,利用高能电子衍射(RHEED)原位监测量子点的形成.

利用断面透射电镜(XTEM)进一步观察与分析了 InGaAs 量子点的形成和形貌.通过测量低温下(15K)的光荧光(PL)观察样品的光学特性,在 IF120HR 傅立叶光谱仪上测量了样品室温下(300K)的红外吸收特性.

2 实验结果与分析

图 2 是样品侧面 XTEM 形貌图.应变引起的黑白对比清楚的表明了各层量子点的形成和分布,可以看到,各层量子点沿生长方向呈现较好的垂直对准,并且量子点的尺寸也随层数的增加而趋于均匀,这一现象已被 Tersoff^[6]等人解释.

Tersoff 等人研究认为:各层量子点的垂直对准与初始层量子点的侧向分布及隔离层的厚度密切相关,并基于连续弹性理论提出,存在一临界隔离层厚度(一般表示为 $3.5 \times d$, d 为隔离层厚度),如果隔离层足够薄,即 $3.5 < d \leq L$ (L 为量子点的侧向间距),则应变最小位置处于被掩埋的量子点的正上方,量子点趋向严格的垂直对准.由图 2 的 XTEM 截面像可以看到,初始层量子点的侧向间距大约为 $L = 83\text{nm}$,隔离层厚度 $d = 25\text{nm}$,因此, L 与临界隔离层厚度 $3.5 < d = 86\text{nm}$ 接近,即符合严格垂直对准时的状态.从 XTEM 像我们还可测得量子点的平均尺寸,直径为 60nm ,高度为 12nm ,与文献[12](直径为 30nm ,高度为 $6 \sim 7\text{nm}$)相比,量子点的尺寸变大.

图 3 是样品在 15K 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 1.23eV ,半高宽为 50meV ,仍然较大.样品的 XTEM 像显示出,各层量子点的尺寸分布比较均匀,PL 光谱半高宽应该较小,我们认为 PL 光谱半高宽的宽化可能主要是由于量子点在侧向及垂直方向上的耦合所致^[13].

图 4 是样品室温下(300K)在 45° 波导模式和垂直入射下的红外吸收光谱.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 $9.9\mu\text{m}$,半高宽为 14.2meV .与 45° 波导模

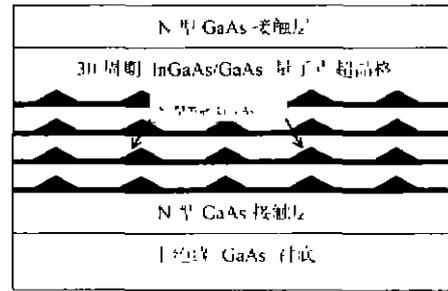


图 1 样品结构示意图
Fig. 1 Schematic of MBE-grown structure of the sample

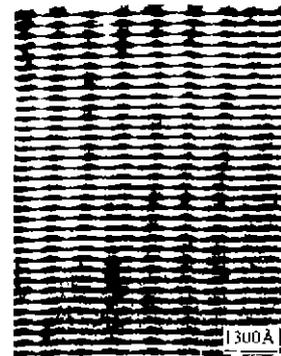


图 2 样品的侧面 XTEM 形貌像
Fig. 2 Cross-sectional XTEM morphological image of the sample

式的红外吸收相比,垂直入射下的红外吸收向低能方向轻微移动,并且,半高宽变宽,这一特点与退极化效应对量子阱中束缚态与连续态能级之间电子跃迁的作用相同^[4].图4还显示出,样品的红外吸收谱线呈现不对称性,在低能侧谱线较陡峭,而在高能侧有较长的拖尾,这一特征与量子阱中束缚态到连续态能级电子跃迁吸收的特性相同,这是连续态能级展宽所至. Grundmann^[15]等人曾计算了 InAs/GaAs 量子点的能级结构,发现在导带中只有一个束缚态,可能在带内跃迁来自于束缚态到浸润层和势垒层的连续态间的跃迁,由此,我们推断样品所表现的红外吸收可能是来自于量子点中束缚态与浸润层及势垒层中的连续态能级间的电子跃迁.这一推断与红外吸收波长随量子点尺寸的变化趋势相一致.与文献[12]相比(45°波导模式及垂直入射下的吸收峰值波长分别为 13 μm 和 14 μm),样品的红外吸收波长随量子点尺寸的增大向高能方向移动,这是由于随量子点尺寸的增大,量子点中基态的能级降低,而浸润层和势垒层的连续态能级对量子点的尺寸并不敏感,因此,使电子跃迁的能量增大,红外吸收波长向高能方向移动.所以,通过控制量子点的尺寸,可以有效的调整红外吸收的响应范围.

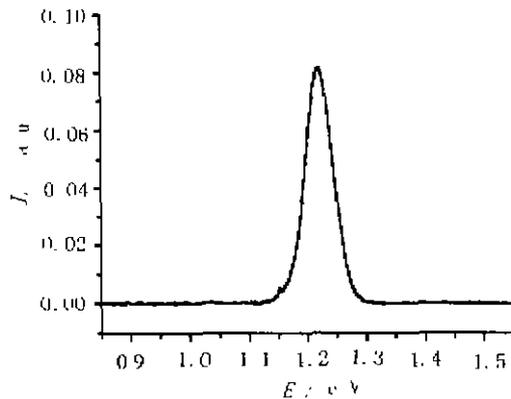


图3 样品低温下(15K)的PL光谱

Fig. 3 Low temperature photoluminescence spectrum of the sample at 15K

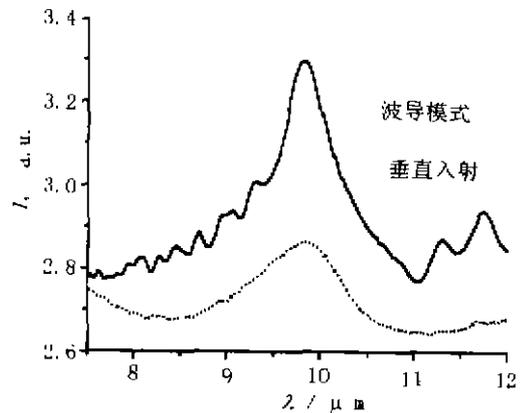


图4 样品室温(300K)红外吸收光谱

Fig. 4 Measured infrared absorption spectra of the sample in multipass 45° waveguide configuration (solid line) and under the normally incident radiation (dot line) at room temperature (300K)

值得指出的是,这一体系的红外吸收有可能来自于浸润层的吸收,因为对于 InGaAs/GaAs 量子阱同样可以吸收垂直入射的红外光^[14].通过对双晶摇摆曲线的模拟,我们可以确定 InGaAs 浸润层的厚度为 26 Å, In 含量为 0.28,基于 K·P 模型的计算表明,来自浸润层的红外吸收不会发生在 9.9 μm 处,因此,我们完全可以确定红外吸收是来源于量子点超晶格的吸收.

3 结语

通过控制生长条件和结构参数,我们制备了垂直对准的 InGaAs/GaAs 量子点超晶格.各层量子点的均匀一致性较好,红外吸收测试表明,样品有明显的正入射红外吸收,峰值波

长为 $9.9\mu\text{m}$, 吸收范围在 $8.5\sim 10.4\mu\text{m}$ 之间, 正好对应于大气窗口波段, 这一结果使性能优良的量子点超晶格红外探测器的制作成为可能.

REFERENCES

- 1 Levine B F. *J. Appl. Phys.* 1993, **74**: (R1)
- 2 Benisty H, Sotomayor C M, Weisbuch C. *Phys. Rev.* 1991, **B44**: 10945
- 3 Vurgaftmani, Lam Y, Singh J. *Phys. Rev.* 1994, **B50**: 14 309
- 4 Leonard D, Krishnamurthy M, Reaves C M, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**: 3203
- 5 Fafard S, Wasilewskiz, Mccaffrey J, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**: 991
- 6 Tersoff J, Teichert C, Lagally M G, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**: 1675
- 7 Xie Q, Madhukar A, Chen P, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**: 2542
- 8 Zundel M K, Specht P, Eberl K, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 2972
- 9 Drexler H, Leonard D, Hansen E, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**: 2252
- 10 Sauvage S, Boucaud P, Julien F H, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 2785
- 11 Phillips J, Kamath K, Zhou X, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 2079
- 12 Pan D, Zeng Y P, Kong M Y, *et al.* *Electron. Lett.*, 1996, **32**: 1726
- 13 Solomon G S, Trezza J A, Marshall A F. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**: 952
- 14 Karunasiti G, Park J S, Chen J, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**: 2600
- 15 Grundmann M, Stier O, Bimberg D. *Phys. Rev.*, 1995, **B52**: 11969

NORMALLY INCIDENT INFRARED ABSORPTION IN VERTICALLY ALIGNED InGaAs/GaAs QUANTUM DOT SUPERLATTICE*

ZHUANG Qian-Dong LI Jin-Min ZENG Yi-Ping

PAN Liang KONG Mei-Ying LIN Lan-Ying

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract 30-period InGaAs/GaAs quantum dot superlattice was fabricated by MBE. Using cross sectional transmission electron microscopy, the InGaAs quantum dots were found to be perfectly vertically aligned in the growth direction (100). Under normally incident radiation, a distinct absorption in the $8.5\sim 10.4\mu\text{m}$ range peaked at $9.9\mu\text{m}$ was observed. The normally incident infrared absorption in vertically aligned quantum dot superlattice in the $8\sim 12\mu\text{m}$ range was realized for the first time. This result indicates the potential application of the quantum dot superlattice structure without grating as normally incident infrared detector focal plane arrays.

Key words quantum dot, superlattice, infrared absorption.

* The project supported by the Director Foundation of Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. Received 1998-08-14, revised 1998-09-22