

# 杂质 Si 对 InAs 自组织量子点均匀性的影响\*

王海龙 朱海军 李靖 宁东 汪辉 王晓东 邓元明 封松林

(中国科学院半导体所半导体超晶格国家重点实验室, 北京, 100083)

TN30423

**摘要** 研究了较低掺杂浓度时 InAs 量子点中直接掺杂 Si 对其发光特性的影响. 光致发光谱 (PL) 的测量表明, 与未掺杂样品相比, 掺杂样品发光峰稍微蓝移, 同时伴随着发光峰谱线明显变窄. 该结果表明, 在生长 InAs 层时直接掺杂, 有利于形成大小分布更均匀的小量子点. 该研究对 InAs 自组织量子点在器件应用方面有一定的意义.

**关键词** 自组织量子点, PL, 硅掺杂, InAs/GaAs.

李俊 砷化镓  
均匀性

## 引言

由于 InAs 自组织生长量子点在新器件上的应用前景以及在低维物理和材料生长等研究中的重要地位, 近年来成为半导体学科的一个研究热点<sup>[1-4]</sup>. 由于载流子在三个维度方向都受到量子尺寸限域效应, 量子点内电子态是用一系列完全分离的孤立能级来表征的, 其态密度具有  $\delta$ -函数形式. 维度受限引起的电子体系能带结构、态密度的变化具有重要的意义. 以量子点激光器为例, 理论预计<sup>[1]</sup>以量子点为有源区的激光器具有很高的特征温度和非常低的阈值电流等优点. 现在人们已经用 InAs 自组织量子点做成激光器原型器件<sup>[2]</sup>. 在制备半导体器件时, 掺杂是极为重要的过程, 几乎所有的器件中都要进行掺杂, 在 III-V 族体系半导体中主要的施主掺杂元素为 Si, 但是现在对量子点掺杂特性研究的还比较少<sup>[3]</sup>. 在本文中, 我们通过对直接掺 Si 的 InAs 自组织量子点的光致发光谱的测量, 讨论了 Si 掺杂对 InAs 自组织量子点的均匀性的影响.

## 1 实验

实验所用样品由 VG 公司的 V80HMK-I 分子束外延 (MBE) 系统生长. 衬底在 MBE 系统中 580 C 脱氧后温度升至 610 C, 除气 10min, 然后在 600 C 下生长 GaAs 缓冲层, 再将生长温度降至 450 C, 然后生长随后的结构层. 其中 GaAs 的生长速率为 1 $\mu$ m/h, InAs 的生长速率为 0.11 $\mu$ m/h. 实验所用样品分为两组, 一组为单层量子点结构. 在半绝缘的 GaAs(100) 衬底上生长 1 $\mu$ m GaAs 缓冲层后淀积 2.5ML 的 InAs, 接着覆盖 50nm 的 GaAs 层, 为了尽可能地减少由于生长条件波动带来的影响, 保持不同结构之间的可比性, 4 种样品是连续生长的. 4 种样品在 2.5ML 的 InAs 层掺杂浓度为不掺杂与掺 Si 浓度分别为 1  $\cdot$  10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup>, 5  $\cdot$  10<sup>16</sup>cm<sup>-3</sup> 和 2  $\cdot$  10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>. 为方便讨论, 我们将 4 种样品按其掺杂浓度标记为 U1, 1E16, 5E16 和 2E17. 另一组是生长的量子点超晶格样品. 先在 n<sup>+</sup>-GaAs(100) 衬底上生长 1 $\mu$ m 的 n<sup>+</sup>-GaAs 缓冲

\* 国家攀登计划和国家自然科学基金(编号:19823001)资助项目  
稿件收到日期 1998-12-30, 修改稿收到日期 1999-04-20

层,缓冲层掺 Si,浓度为  $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。然后生长结构层,生长顺序是:周期生长 10nm 的 GaAs 和 2.5ML 的 InAs,共生长 10 个周期,然后再覆盖 50nm 的 GaAs 间隔层;这样的 10 周期 InAs/GaAs 量子点及 50nm GaAs 间隔层作为一个结构单元,并重复 5 次;最后再覆盖 150nm 的 GaAs 盖层,样品分为两种,一种结构层未进行掺杂,记为 U2;另一种整个样品结构层均匀掺 Si,浓度约为  $3 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,记为 M3E16,样品结构示意图见图 1。由 RHEED 监控知道当 InAs 层厚为 1.7ML 时 EHEED 图案由线状变为点状,说明此时已经开始形成量子点。

光致发光(PL)测量所用的激励光源为 He-Ne 激光器,激发功率约为 2mW,激发光波长为 632.8nm,样品放在液氮闭循环制冷装置中,输出信号用液氮制冷的 Ge 探测器测量。

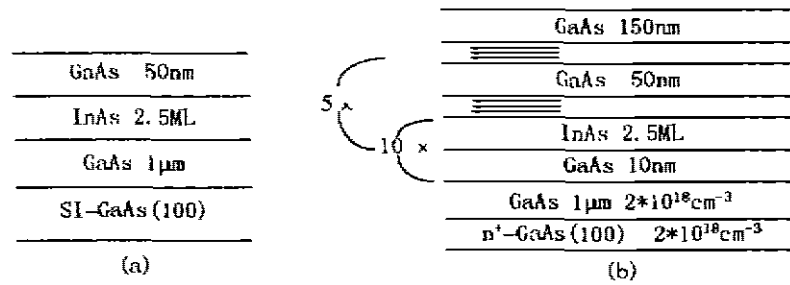


图 1 样品结构示意图

(a) 单层量子点 (b) 多层量子点

Fig. 1 Schematic diagram of the sample structure (a) single layer QDs (b) multi-layer QDs

## 2 实验结果与讨论

在文献[7]中,我们曾系统地研究了未掺杂单层 InAs 量子点的物理特性,当 InAs 层为 2.5ML 时,从 TEM 照片可见 InAs 量子点的大小分布很集中,平均直径为 10nm,高度约为 5nm,InAs 量子点的面密度为  $5 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 。本文对 InAs 量子点中直接掺杂 Si 的特性作了研究。

在图 2 中我们给出了在 10K 下测量的 4 种不同 Si 掺杂浓度的单层量子点的 PL 谱,由图 2 可见,当量子点中掺杂时,量子点的发光峰相对未掺杂时稍微向高能方向移动(蓝移),发光峰谱线的半高宽(FWHM)明显变窄,并且发光峰谱线的高能端基本没有变化,谱线变窄主要是由于谱线低能端的收缩引起的,各个样品的量子点发光峰的能量和谱线半高宽的具体值见表 1。我们知道小量子点发光峰能量高,而大量子点发光峰能量低,量子点生长得越均匀,谱线半高宽也就越窄,我们的实验结果可以作如下解释:掺杂的 Si 原子在量子点的形成过程中可能会起到成核中心的作用,当掺杂时,有了更多的成核中心,有利于形成更多的量子点,从而量子点的密度变高,形成大量子点的几率减小,因而形成的量子点大小分布更均匀,发光峰的谱线半高宽变窄,因此我们认为对量子点适当掺杂会有一些的好处,可以形成更均匀的量子点,但实验中随掺杂浓度提高,半高宽未进一步变窄,原因是随掺杂浓度的提高,由杂质引起的非辐射复合中心增加,可以影响量子点的发光效率,并使发光峰变窄,当然我们的掺杂浓度还比较低,对于在量子点中直接掺杂较高浓度的 Si 原子的影响及 Si 在成核过程中的具体作用还有待进一步研究。

由于在制造半导体器件时经常要用多层量子点结构,我们生长了两种量子点超晶格样品,掺杂样品的设计是为了能同时进行电学测量<sup>[1]</sup>,本文给出了光学测量的结果,进一步验证了我们前面得到的结论.在图3中我们给出了在10K下测量的这两种样品的PL谱,量子点发光峰的能量和谱线半高宽的具体值见表1.由光谱特性可见,掺杂样品相对未掺杂样品发光峰能量明显蓝移,并且伴随着谱线半高宽变窄(见表1).相对单层量子点样品,多层量子点样品的PL谱有明显的展宽,这是由于多层量子点样品结构中,由于各层量子点的应力不同,从而各层量子点的大小分布更不均匀造成的;但我们仍可以看出,掺杂样品的谱线半高宽明显小于未掺杂样品,并且谱线的低能端明显收缩,而未掺杂样品在低能端明显的有带尾.这进一步证实了我们前面提出的在量子点中适当掺Si可以形成更多的小量子点,从而使量子点的大小分布更均匀的结论.另外,在图3中多量子点掺杂样品高能端存在伴峰,可以解释为存在不同大小的量子点族引起的.在形成量子点的过程中,量子点的尺寸分布表现为不连续性,几种尺寸的量子点占有优势,我们通过深能级瞬态谱(DLTS)测量,证明了在多层掺杂量子点样品中存在不同尺寸大小的量子点族<sup>[9]</sup>.所以实验中观测到的PL谱的主峰是由占量子点数最多的一个量子点族引起的,伴峰在主峰的高能端,是由另一个尺寸较小的量子点族引起的.

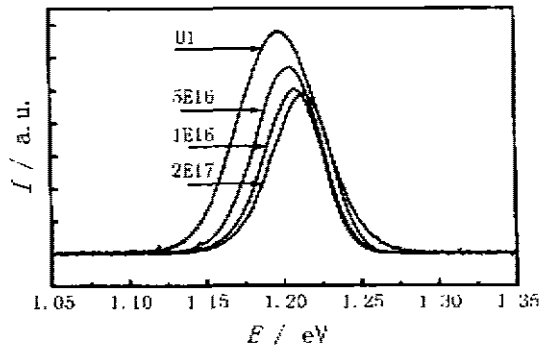


图2 1种单层量子点样品结构在10K下的PL谱  
Fig. 2 PL spectra of four samples of single layer QDs at 10K

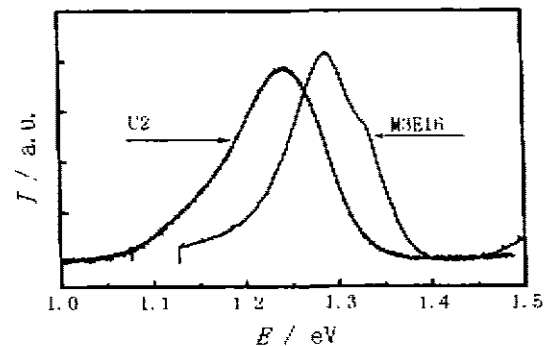


图3 2种多层量子点样品结构在10K下的PL谱  
Fig. 3 PL spectra of two samples of multi-layer QDs at 10K

表1 各样品的峰值能量与谱线半高宽的比较

Table 1 Peak energies and FWHM of samples

样 品	U1	1E16	5E16	2E17	U2	M3E16
峰值能量/eV	1.198	1.207	1.203	1.212	1.245	1.288
谱线半高宽/nmV	52.3	37.8	41.8	39.1	107.0	84.5

### 3 结语

本文研究了较低掺杂浓度时InAs量子点中直接掺杂Si对其发光特性的影响.光致发光谱(PL)的测量表明,与未掺杂样品相比,掺杂样品发光峰稍微蓝移,同时伴随着发光峰谱线明显变窄,谱线变窄表现为低能端收缩.该结果表明,在生长InAs层时直接掺杂,有利于形成大小分布更均匀的小量子点.相信该研究对InAs自组织量子点在器件应用方面有一定的意义.

## REFERENCES

- 1 Cusack M A, Briddon P R, Jaros M. Electronic structure of InAs/GaAs self-assembled quantum dots, *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(4):R2309
- 2 Grundman M, Nledentsov N, Stier O, *et al.* Excited states in self-organized InAs/GaAs quantum dots: theory and experiment, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**:979
- 3 Brunkov P N, Konnikov S G, Ustinov V M, *et al.* Capacitance spectroscopy of electron energy levels in a GaAs matrix, *Semiconductors*, 1996, **30**:492
- 4 Arakawa Y, Sakaki H. Multidimensional quantum well lasers and temperature dependence of its threshold current, *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**:939
- 5 Bimberg D, Ledentsov N N, Grundmann M, *et al.* InAs-GaAs quantum pyramid lasers: in situ growth, radiative lifetimes and polarization properties, *Jpn. J. Apply. Phys.*, 1996, **35**:1311
- 6 Phyllips J, Komath K, Zhou X, *et al.* Photoluminescence and far-infrared absorption in Si-doped self-organized InAs quantum dots, *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**:2079
- 7 YANG Xiao-Ping, ZHANG Wei, CHEN Zong-Gui, *et al.* Self-organized growth of InAs quantum dots on GaAs(100), *Chinese J. Semiconductors*, (杨小平, 张伟, 陈宗圭, 等. GaAs(100)衬底上自组织生长 InAs 量子点的研究, *半导体学报*), 1996, **17**(11):869
- 8 CHEN Feng, FENG Song-Lin, YANG Xi-Zhen, *et al.* Electron capture barrier of self-organized InAs quantum dots, *Infrared Millim. Waves*, (陈枫, 封松林, 杨锡震, 等. InAs 自组织生长量子点的电子俘获势垒, *红外与毫米波学报*), 1997, **16**(1):211
- 9 CHEN Feng, FENG Song-Lin, ZHAO Qi-An, *et al.* Evidence of multimodal patterns of self-organized quantum dots, *Superlattices and Microstructures*, 1998, **24**(1):355

## THE EFFECT OF DOPANT SI ON THE UNIFORMITY OF SELF-ORGANIZED InAs QUANTUM DOTS\*

WANG Hai-Long ZHU Hai-Jun LI Qing NING Dong WANG Hui  
WANG Xiao-Dong DENG Yuan-Ming FENG Song-Lin

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China)

**Abstract** The photoluminescence in directly Si-doped self-organized InAs quantum dots was systematically studied. With doping, a decrease in linewidth and a little blue shift in peak were observed by PL measurement. The results show that direct doping when growing InAs layer may be helpful to the formation of uniform small quantum dots. The work will be meaningful for the fabrication of self-organized InAs quantum dots semiconductor device.

**Key words** self-organized quantum dots, PL, Si-doping, InAs/GaAs.

\* The project supported by the Climbing Project and National Natural Science Foundation of China  
Received 1998-12-30, revised 1999-04-20