

# Be 掺杂 InAs 自组织量子点的发光特性

王海龙<sup>1,2</sup>, 朱海军<sup>1</sup>, 封松林<sup>1</sup>, 宁 东<sup>1</sup>, 汪 辉<sup>1</sup>, 王晓东<sup>1</sup>, 江德生<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 曲阜师范大学 物理系, 山东 曲阜 273165)

**摘要:** 首次细致地研究了 InAs 量子点中直接掺杂 Be 对其发光特性的影响。光致发光(PL) 谱的研究表明, 较低掺杂浓度时, 发光峰蓝移, 同时伴随着发光谱线变窄。而较高浓度的掺杂会对量子点的光谱特性产生不良的影响, 发光强度明显变弱。相信该研究对 InAs 自组织量子点在器件应用方面有很重要的意义。

**关键词:** InAs 量子点; 光致发光; 掺杂

中图分类号: O472.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7032(2000) 01-0020-04

## 1 引 言

由于 InAs 自组织生长量子点在新型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热点<sup>[1~3]</sup>。由于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、态密度的变化具有很重要的意义。量子点激光器就是一个很好的例子, 理论预计<sup>[4]</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>[5]</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掺杂元素为 Si(n 型) 和 Be(p 型)。但是现在对量子点掺杂特性研究的还比较少<sup>[6]</sup>, 对 InAs 量子点中直接掺杂 Be 的行为还未见报道。文中系统地研究了掺杂 Be 量子点的 PL 特性。研究结果表明较低掺杂浓度时, 可以形成大小分布更加均匀的量子点, 量子点的发光谱线半高宽明显变窄。

## 2 实 验

实验所用样品由 VG 公司的 V80HMK- 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 除气十分钟, 然后

在 600 °C 先生长 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  $1\mu\text{m/h}$ , InAs 的生长速率为  $0.11\mu\text{m/h}$ 。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) 衬底生长  $1\mu\text{m}$  GaAs 缓冲层后, 淀积  $2.5\text{mL}$  的 InAs, 接着覆盖  $50\text{nm}$  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, 四种样品是一个紧接一个连续生长的。四种样品的不同在于  $2.5\text{mL}$  的 InAs 层掺杂浓度的不同, 分别为不掺杂, 掺杂 Be 浓度  $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$  和  $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。为了便于下面讨论, 将四种样品按其掺杂浓度标记为 undoped, 1E17, 5E17 和 2E18; 另一组是生长的量子点超晶格样品, 先在  $n^+$ -GaAs(100) 衬底生长  $1\mu\text{m}$  的  $n^+$ -GaAs 缓冲层, 缓冲层掺杂 Si, 浓度为  $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。然后生长结构层, 生长顺序是: 周期生长  $10\text{nm}$  的 GaAs 和  $2.5\text{mL}$  的 InAs, 共生长 10 个周期后, 再覆盖  $50\text{nm}$  的 GaAs 间隔层; 这样的 10 周期 InAs/GaAs 量子点及  $50\text{nm}$  GaAs 盖层作为一个结构单元重复 5 次; 最后再覆盖  $150\text{nm}$  的 GaAs 盖层。样品分为两种, 一种结构层未进行掺杂, 记为 Mundoped。另一种整个样品结构层均匀掺杂 Be, 浓度约为  $3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ , 记为 M3E16。样品结构示意图见图 1。由 RHEED 监控知道当 InAs 层厚为  $1.7\text{mL}$  时 RHEED 图案开始由线状变为点状, 说明已经形成了量子点。

收稿日期: 1999-04-07; 修订日期: 1999-10-20

基金项目: 国家攀登计划和国家自然科学基金资助(6977601 和 19823001)

作者简介: 王海龙(1971—), 男, 山东莘县人, 目前在中国科学院半导体研究所攻读博士学位, 主要从事低维半导体材料分子束外延生长及其光电性质的研究。

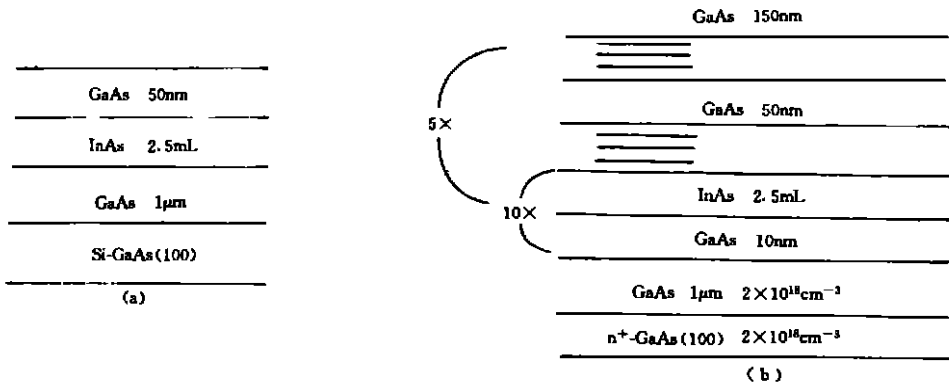


图 1 样品结构示意图 (a) 单层量子点, (b) 多层量子点

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

PL 测量所用的激励光源为 5mW He-Ne 激光器, 激发光波长为 632.8nm。变温系统为美国 APD 公司闭循环制冷系统, 温度在 7~300K 范围内连续可变。样品发光经付立叶分光后, 再用液氮制冷的 Ge 探测器测量。

### 3 实验结果及讨论

在文献[7]中, 曾经系统地研究了未掺杂单层 InAs 量子点的物理特性。当 InAs 层为 2.5nm 时, PL 发光峰能量为 1.182eV, 谱线半高宽 (FWHM) 为 62meV。从 TEM 照片可以看出 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  $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 。对 InAs 量子点中直接掺杂 Be 的特性进行细致的研究。

在图 2 中给出了在 8K 下测量的四种不同 Be 掺杂浓度的单层量子点的 PL 谱。由图可以看出,

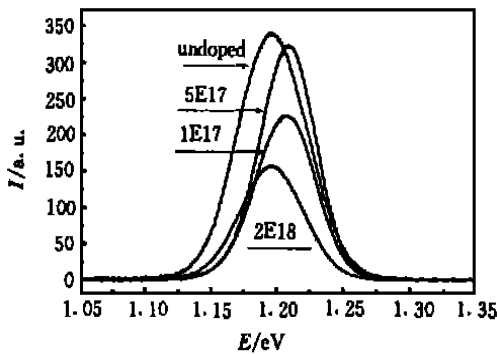


图 2 单层量子点结构样品的 PL 谱

Fig. 2 PL spectra of single layer QD samples.

当掺杂浓度由  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  增大到  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  时, 量子点的发光峰相对未掺杂样品的对应峰逐渐向高能方向移动(蓝移), 谱线的半高宽也逐渐变窄。当掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  时, 量子点的发光峰的位置相对未掺杂样品基本没有变化, 但发光峰的强度明显变弱。也就是随着掺杂浓度的提高, PL 谱的峰值能量先蓝移, 然后回移。同时半高宽则先减小, 后又见增大。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。小量子点发光峰能量高, 而大量子点发光峰的能量低。形成的量子点的大小分布越均匀, 谱线半高宽也就越窄。从实验结果可以作如下解释, 掺杂的 Be 原子可能在量子点的形成过程中会起到成核中心的作用, 当掺杂浓度较小的时候, 随着掺杂浓度的增加, 有了更多的成核中心, 有利于形成更多的量子点, 量子点的密度变大, 形成大量子点的几率减小。从而形成的量子点的大小分布更均匀, 发光峰的谱线半高宽变窄。样品 1E17 和 5E17 相对于 undoped 样品 PL 发光峰谱线变窄主要是由于低能端的收缩, 而高能端的变化不大也说明这一问题。实验中, 2E18 样品相对于 5E17 和 1E17 样品的谱线半高宽变宽可以做如下说明: 随着掺杂浓度的进一步提高, 成核中心太多时, 有些小量子点之间可能会发生聚集, 形成较大的量子点, 量子点的大小分布又将趋于不均匀, 发光峰谱线半高宽又趋于变宽。从而认为对量子点适当掺杂会有一些的好处, 而过度掺杂

表 1 各样品的峰值能量与半高宽比较

Table 1 The peak energy and FWHM of all samples.

样品	undoped	1E17	5E17	2E18	M-undoped	M 3E16
峰值能量/(eV)	1.198	1.208	1.210	1.197	1.245	1.295
半高宽/(meV)	52.8	45.4	42.7	48.7	107.0	75.5

会带来不利的影 响。对于 Be 在量子点的形成过程中起到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, 生长了两种量子点超晶格样品, 其中掺杂样品 M3E16 的设计是为了能同时进行电学测量, 电学测量的结果将另文报道。未掺杂样品的生长是为了与掺杂样品进行比较。在图 3 中给出了在 8K 下测量的这两种样品的 PL 谱, 量子点发

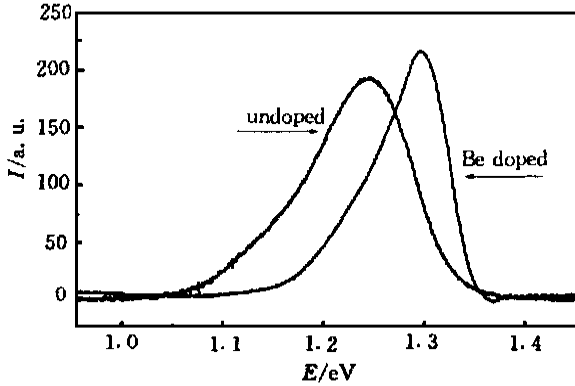


图 3 多层量子点结构样品的 PL 谱

Fig. 3 PL spectra of multi-layer QD samples.

光峰的能量和谱线半高宽的具体值见表 1。由光谱特性可以看出, 掺杂样品的发光峰出现蓝移, 谱线半高宽明显变窄, 这也进一步证实了前面提出的在量子点中适当掺 Be 对样品有利的结论。

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, 各层的应力分布不同, 从而各层形成量子点的大小分布不均匀, 而 PL 测量得到的是多层量子点发射的叠加。

对 5E16 样品进行了变温 PL 谱测量, 见图 4。从测量结果可以看出样品的发光特性相当好,

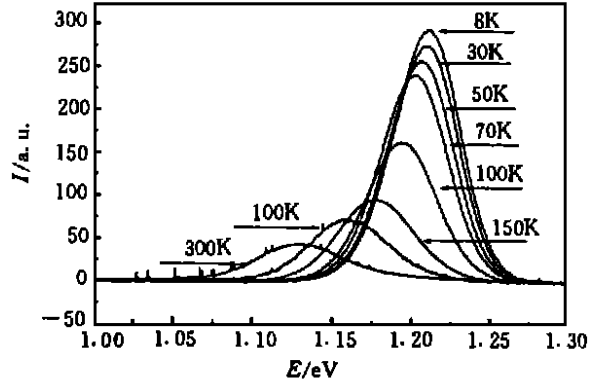


图 4 样品 5E17 在不同温度下的 PL 谱

Fig. 4 PL spectra from 5E17 sample under different temperatures.

一直到 300K 都测到明显的量子点发光。各个温度下的量子点发光峰的能量和谱线半高宽的具体值见表 2。这也从另外一个方面说明适当掺杂对量子点是有益处的。

表 2 不同温度下样品 5E17 峰值能量与半高宽比较

Table 2 The peak energy and FWHM of the sample of 5E17 at different temperatures.

样 品	8K	30K	50K	70K	100K	150K	200K	300K
峰值能量/eV	1.210	1.209	1.206	1.202	1.194	1.178	1.161	1.132
半高宽/(meV)	42.7	42.7	42.7	43.3	44.9	48.9	51.9	59.4

## 4 结 论

首次细致研究了 InAs 量子点中直接掺杂 Be 对其发光特性的影响。发现较低浓度的掺杂可以形成大小分布更均匀的量子点, 量子点的发光特

性有明显改善, 谱线半高宽会明显变窄。而太大浓度的掺杂会对量子点的光谱特性产生不良的影响, 谱线半高宽会变宽, 发光强度会明显下降。相信该研究对 InAs 自组织量子点在器件应用方面有很重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Cusack M A, Briddon P R, Jaros M. Electronic structure of InAs/GaAs self-assembled quantum dots [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**: R2300.
- [2] Grundmann M, Nledentsov N, Stier O, et al. Excited states in self-organized InAs/GaAs quantum dots: theory and experiment [J]. *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 InAs quantum dots in a GaAs matrix [J]. *Semiconductors*, 1996, **30**: 492.
- [4] Arakawa Y, Sakaki H. Multidimensional quantum well lasers and temperature dependence of its threshold current [J]. *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 [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, **35**: 1311.

- [ 6 ] Phillips J, Kamath K, Zhou X, *et al.* Photoluminescence and far-infrared absorption in sidoped self-organized InAs quantum dots [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**: 2079.
- [ 7 ] Yang Xiaoping, Zhang Wei, Chen Zonggui, *et al.* Self-organized growth of InAs quantum dots on GaAs(100) [J]. *Chin. J. Semiconductors*, 1996, **17**: 869 (in Chinese).

## Photoluminescence in Be-doped Self-organized InAs Quantum Dots

WANG Hai-long<sup>1,2</sup>, ZHU Hai-jun<sup>1</sup>, FENG Song-lin<sup>1</sup>, NING Dong<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>,  
WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, JIANG De-sheng<sup>1</sup>

(1. *National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China*; 2. *Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu 273165, China*)

### Abstract

The photoluminescence (PL) in directly Be doped self-organized InAs quantum dots (QDs) grown by molecular beam epitaxy has been firstly studied systematically. The samples of single layer QDs were undoped and directly doped with Be of  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , and  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  in 2.5ml InAs layer, respectively. The samples of multi-layer QDs were undoped and doped with Be of  $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  homogeneously. When the doping level is low, a decrease in line-width and a little blue shift in peak are observed in PL. However, when the doping level is high, the uniformity and photoluminescence peak intensity of QDs will be decreased. With doping, Be atoms act as the nucleation centers in the formation of QDs. Due to doping-induced nucleation centers, there are more nucleation centers in the doped samples. The size fluctuation of QDs becomes smaller. Hence the line-width of PL spectra will decrease. There will be more and more nucleation centers with the increasing of doping level. So more and more QDs will be formed. With increasing the number of QDs, there will be amalgamation between different small QDs. So the size fluctuation of QDs becomes larger, which will cause the increase in line-width and decrease in peak intensity in PL. Another reason for the phenomena may be due to the incorporation of nonradiative impurities with a higher level doping. Thus, appropriate doping maybe helpful to the formation of uniform QDs. However, unduly doping seems to lower the quality of QDs. The work will be very meaningful for the fabrication of self-organized InAs quantum dots devices.

**Key words:** self-organized InAs quantum dots; photoluminescence; doping