

文章编号:1001-9014(2005)03-0207-06

大尺寸 InAs/GaAs 量子点的静压光谱

马宝珊, 王晓东, 骆军委, 苏付海, 方再利, 丁琨, 牛智川, 李国华

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格与微结构国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:在低温 15K 和 0~9GPa 范围内对厚度为 7.3nm、横向尺寸为 78nm 的自组织 InAs/GaAs 量子点进行了压力光谱研究. 观测到大量子点的基态与第一激发态发光峰, 其压力系数只有 69 和 72meV/GPa, 比小量子点的压力系数更小. 基于非线性弹性理论的分析表明失配应变与弹性系数随压力的变化是大量子点压力系数小的主要原因之一. 压力实验结果还表明大量子点的第一激发态发光峰来源于电子的第一激发态到空穴的第一激发态的跃迁.

关键词:凝聚态物理学; 光致发光; 压力; 砷化铟; 量子点

中图分类号:0488 **文献标识码:**

PHOTOLUMINESCENCE OF LARGE - SIZED INAS/GAAS QUANTUM DOTS UNDER HYDROSTATIC PRESSURE

MA Bao-Shan, WANG Xiao-Dong, LUO Jun-Wei, SU Fu-Hai, FANG Zai-Li, DING Kun, NIU Zhi-Cuan, LI Guo-Hua

(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract:The photoluminescence of self-assembled InAs/GaAs quantum dots, which are 7.3nm in height and 78nm in base size, was investigated at 15K under hydrostatic pressures up to 9GPa. The emissions from both the ground and the first excited states in large InAs dots were observed. The pressure coefficients of the two emissions are 69 and 72 meV/GPa respectively, which are lower than those of small InAs/GaAs dots. The analysis based on a nonlinear elasticity theory reveals that the small pressure coefficients mainly result from the changes of the misfit strain and the elastic constants with pressure. The pressure experiments suggest that the excited state emissions originate from the optical transitions between the first excited electron states and the first excited hole states.

Key words:condensed matter physics; photoluminescence; pressure; InAs; quantum dots

引言

InAs/GaAs 应变自组织量子点材料是光通信、量子信息与低维物理等方面研究与应用的热点材料, 为了达到 1.3~155 μm 的长波长范围, 可以通过降低生长速率等手段来实现, 而这一般会使得 InAs 量子点尺寸较大^[1]. 近年来, 人们用低温静压光谱研究了厚度小于 5nm, 横向尺寸小于 20nm^[2-4] 的小尺寸 InAs/GaAs 量子点, 它们的压力系数一般为 75~90meV/GPa, 比 GaAs 体材料的压力系数小 20%~30%, 同时也比一般公认的 InAs 体材料的压力系数也小. 这是令人费解的, 因为按照通常的量子阱

模型, 压力系数应介于阱材料 InAs 的压力系数和垒材料 GaAs 的压力系数之间. Monjón 等最近测得一种厚度为 6~8nm 的大尺寸 InGaAs 量子点的压力系数只有 65meV/GPa^[5], 并依据量子阱模型进行解释, 但所采用的 InAs 体材料的压力系数是一种较少引用的早期实验结果. 因此, InAs 量子点具有较小的压力系数在实验上须进一步证实, 在理论上也须进一步解释. 本文用压力光谱的方法, 对厚度为 7.3nm 的大尺寸 InAs/GaAs 量子点进行了研究. 我们同时观测到源于量子点基态与激发态的发光峰, 其压力系数为 70meV 左右, 确实比小量子点的压力系数小. 但与 Monjón 不同的是, 我们基于 Frogley 的

收稿日期:2004-03-20, 修回日期:2005-02-23

Received date: 2004-03-20, revised date: 2005-02-23

基金项目:国家自然科学基金(60076012, 60176006)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(G2001CB3095)、中国科学院纳米科学与技术资助项目.

作者简介:马宝珊(1971-), 男, 江苏南通人, 中国科学院半导体所博士. 主要研究方向:半导体光学性质.

非线性弹性理论^[6]进行了分析,结果表明主要是由于 InAs/GaAs 体系内的应变及弹性系数随压力的变化导致了很低的压力系数.

1 样品与实验

实验所用样品是在 n^+ GaAs 的 (100) 衬底上用分子束外延的方法生长的. 首先,在衬底上生长厚度为 510nm 的 GaAs 缓冲层. 然后,用循环停顿方法生长 2.5ML 的 InAs 量子点,即每生长 0.1ML 的 InAs 后在 As 保护下停顿 20s. 2.5ML 的 InAs 淀积完后,再覆盖 3nm 厚的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 应力缓冲层和 50nm 的 GaAs 间隔层. 这样共生长 3 层 InAs 量子点,以提高发光强度. 最后,生长 20nm 的 GaAs 保护层和 30nm 的 GaAs 帽层. 具体生长过程及样品结构类似于文献^[1]中的 InAs/GaAs 量子点. AFM 测量结果表明,这样生长出来的量子点质量较好,其平均厚度为 7.3nm,平均横向尺寸为 78nm,因此是一种扁平状的大尺寸量子点;此外,AFM 测量表明在这些大量子点之间,还有少量小量子点的分布.

静压实验^[7]所用的样品先用机械方法从背面减薄至大约 $20\mu\text{m}$,然后切成 $100 \times 100\mu\text{m}^2$ 的小薄片,再放入金刚石对顶砧压室中. 金刚石压室位于可产生 15K 的低温系统中,其压力变化范围为 $0 \sim 9\text{GPa}$,传压介质为固态氩. 加在样品上的静压是用红宝石的 R_1 线进行定标的. 为确保静压条件,每次改变压力时都是在室温下进行.

系统采用两个激发源,分别是 He-Ne 激光器的 632.8nm 激光线(红色)和 Kr 离子激光器的 530.8 nm 激光线(绿色). 所得的光致发光(PL)谱经过 0.5m 单光栅单色仪分光后,由液氮冷却的 Ge 探测器检测. 此外,我们还使用 Nicolet FTIR760 红外傅立叶光谱仪在常压下测量了未减薄样品的变温与变功率 PL 谱,其激发源为 He-Ne 激发器的 632.8 nm 线.

2 结果与讨论

2.1 发光峰的指认

图 1 示出了在两种激发条件下、近零压时(0.15 GPa)的低温(15K)PL 谱. 图 1(a)中谱是由 530.8nm 线激发的,共观测到五个发光峰;而图 1(b)中的谱则由 632.8nm 线激发,可以分辨出四个峰. 图中的虚线是对这些峰的 Gauss 拟合,并按其能量由低到高的顺序将发光峰编号为 P_1 到 P_5 . 其中能量位于约 1.493eV 的峰 P_5 是与 GaAs 衬底有关的发光峰.

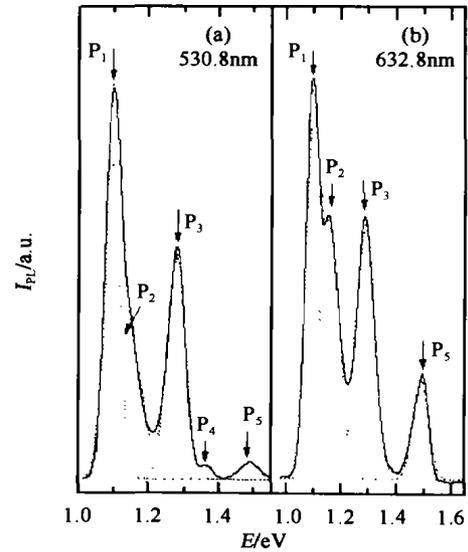


图 1 低温 15K、0.14GPa 压力时由 (a) 530.8nm (b) 632.8nm 线激发的 PL 谱

Fig. 1 PL spectra of the InAs/GaAs QDs at 0.14GPa and 15K excited by (a) the 530.8 nm and (b) the 632.8 nm lines.

由于 530.8nm 线的吸收系数大,透入深度小,它所激发出的来自 GaAs 衬底的发光峰 P_5 比 632.8nm 线所激发的要弱.

为了弄清其它各峰的来源,我们对未减薄的样品在 10K 下作了变激发功率的谱,又在 10mW 的激发条件下作了变温谱,其结果分别示于图 2(a)与图 2(b)中,图中各峰均相对强度最强的峰 P_1 作了归一. 根据^[1]的讨论,其中强度最强、宽度较小的主发光峰 P_1 ,是大尺寸量子点的基态发光峰,它的波长在室温下长达 $1.25\mu\text{m}$ (图 2(b)). 而由图 2(a)可以看到,随着激发功率的增加,能量比 P_1 高约 65meV 的峰 P_2 相对 P_1 而言变得越来越明显,即其相对 P_1 的强度越来越大. 这是一种典型的激发态发光的特征. 因此, P_2 应是大尺寸量子点的激发态发光峰. 而能量位于 1.29eV 处的 P_3 峰则与 P_2 峰不同,它随激发功率的变化并不明显. 因此 P_3 峰与 P_1 峰没有什么关联,不可能是发出 P_1 的大量子点的更高阶的激发态发光峰. 我们认为 P_3 来源于样品中那些小量子点的发光,这一指认可以从变温谱中得到证实. 由图 2(b)可以看出, P_3 峰在约 120K 时就已淬灭,而 P_1 、 P_2 峰直到室温还存在. 众所周知,小尺寸量子点的载流子具有较小的限制能,只须较小的激发能就能被热激发. 因此,小量子点的 PL 谱会在较小的温度淬灭. 事实上,在 AFM 图上确实可以看到在大量大尺寸量子点之间有少量小尺寸量子点的分布. 由于

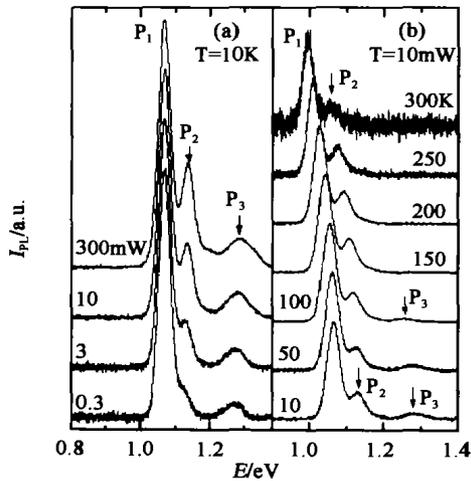


图2 常压下 InAs 量子点的 (a) 10K 时的变激发功率谱和 (b) 10mW 激发功率下的变温谱

Fig. 2 PL spectra of the InAs QDs at ambient pressure (a) under different excitation levels at 10K and (b) at different temperatures under the 10mW excitation.

它们的数量与密度较小,分布得也很不均匀,导致其发光峰 P_3 的强度远弱于 P_1 ,其宽度也较大.此外,从 530.8nm 线激发的谱中可以看到,在 P_3 峰的高能肩处还有一个很弱的峰 P_4 ,它可能是更小的 InAs 量子点的发光或 InAs 浸润层的发光.由于其强度太弱,因此下面就不再讨论它的压力行为了.

2.2 压力行为

图3是 632.8nm 线激发的 PL 谱随压力的变化,每个谱均相对各自的主发光峰 P_1 峰作了归一.总体上看,各发光峰在强度下降之前都随压力上升而蓝移.压力为 4GPa 左右时, P_5 峰突然下降,之后很难测到;而 P_3 峰在 6.8GPa 时淬灭,此时 P_1 峰仍存在.在 530.8nm 线激发下 PL 谱随压力的变化也基本相同,因此下面只对 632.8nm 线激发的谱,分别就其各峰的能量和强度的压力行为进行讨论.

2.2.1 发光峰的能量

图4(a)对各发光峰的能量随压力的变化进行了总结,图中的实线是对实验数据的 2 次拟合,拟合的结果列于表 1 中.从图中可以看到, P_5 峰在压力大于 4GPa 后虽然强度很弱,但还是观测到它随压力增大而红移,这体现了 GaAs 中 X 型跃迁的特点,图中虚线为^[8]中 X 型跃迁的结果.此外,峰 P_3 的能量在大于 4GPa 后也会明显偏离原来的趋势线.鉴于此,图4(a)中对 P_5 、 P_3 能量数据的拟合只在压力小于 4GPa 的范围内进行.表 1 中列出的分别是各

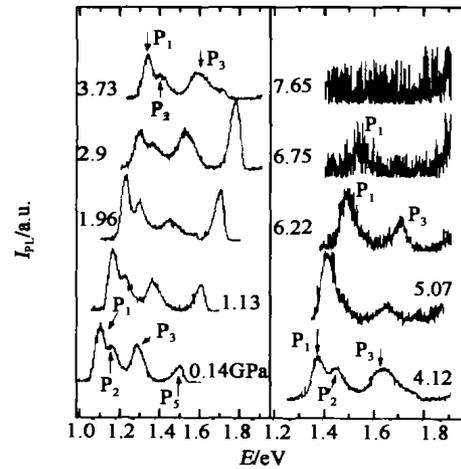


图3 不同压力下 InAs 量子点在 632.8nm 激发条件下的光谱

Fig. 3 PL spectra of the InAs QDs excited by the 632.8 nm line under different pressures.

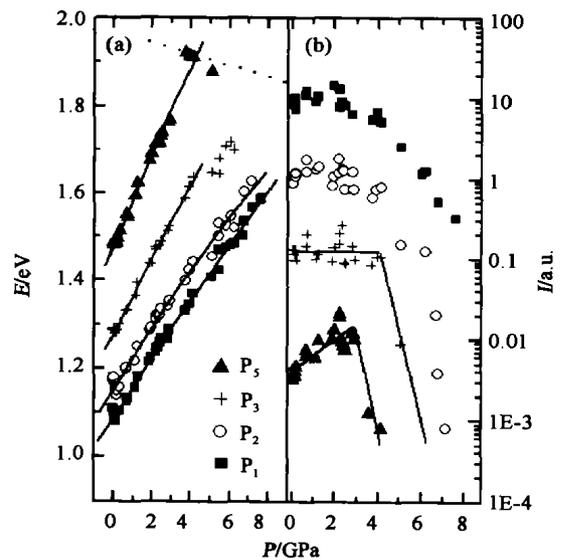


图4 InAs/GaAs 量子点各发光峰的 (a) 能量与 (b) 强度随压力的变化

Fig. 4 Pressure dependence of the PL peak energy (a) and intensity (b) of the InAs/GaAs QDs

峰常压时的能量、线性系数与 2 次项系数.其中对线性系数,即压力系数在括号内标出了误差.

从表 1 的结果来看,除 P_1 、 P_2 外其它峰的压力系数都是比较合理的. P_5 峰的压力系数几乎与 GaAs 体材料带边的压力系数 108meV/GPa 相同,而 P_3 峰的压力系数也位于以前所测 InAs 小量子点的压力系数范围 75 ~ 102meV/GPa^[2-4,8]内.只有大尺寸量子点的两个发光峰 P_1 、 P_2 的压力系数比较异常,分别只有 69 和 72meV/GPa,比 GaAs 体材料小

表 1 最小二乘法得到的 InAs/GaAs 量子点中发光峰的压力系数

Table 1 Pressure coefficients of the PL peaks of the InAs/GaAs QDs obtained from the least-square fits to the experimental data by using $E(p) = E_0 + A_1 \times P + A_2 \times P^2$.

Peak	E_0 (eV)	A_1 (meV/GPa)	A_2 (meV/GPa ²)
P ₁	1.088	69(3)	-0.5
P ₂	1.152	72(4)	-1.1
P ₃	1.278	85(3)	0.1
P ₅	1.479	106(4)	-0.7

35%. 我们在图 5 中将这个结果与前人所测结果作了比较. 其中 Li 等测得厚度为 1ML 的 InAs/GaAs 量子点的压力系数为 102(2) meV/GPa^[8], Lyapin 等对横向尺寸为 16nm、厚度为 1.6nm 的量子点的测量结果为 80(2) meV/GPa^[2], 而横向尺寸为 15nm、厚度为 3nm 的量子点的压力系数测得为 75(2) meV/GPa^[4], 这些结果都比我们的测量结果大. 另一方面, 最近对厚度为 6-8nm 的大尺寸 InGaAs/GaAs 量子点的测量结果则较小, 为 65 meV/GPa^[5]. 由图 5 可以看出量子点发光峰的压力系数随着发光峰能量的减小而减小. 一般而言, 量子点的发光峰能量随着其尺寸、特别是其高度增加而减小. 从而, 图 5 的结果表明, 量子点的尺寸或高度越大, 其发光峰的压力系数就会越小.

为了弄清大尺寸 InAs 量子点压力系数小的原因, 有必要将其与 InAs 体材料作一比较. 现在对

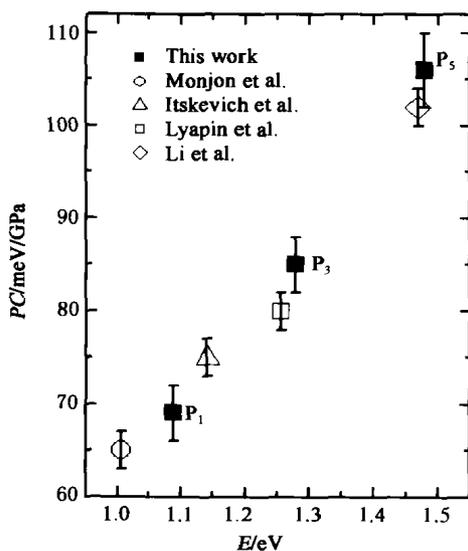


图 5 InAs/GaAs 量子点发光峰的压力系数与发光峰能量的关系

Fig. 5 Pressure coefficients of the InAs/GaAs QDs as a function of the PL peak energy.

InAs 体材料带边压力系数的数值是多少还有一定的争议. 大多数理论计算与实验结果表明, InAs 体材料的压力系数只比 GaAs 略小, 为 96 meV/GPa^[9]. 而 Edwards 等早期所测的 InAs 吸收边的压力系数 48 meV/GPa^[10], 一般很少被引用. 如果取大多数人认可的 96 meV/GPa 作为 InAs 体材料的压力系数, 则以前所测的 InAs/GaAs 量子点发光峰的压力系数将既小于 GaAs 体材料带边的压力系数也小于 InAs 体材料带边的压力系数. 这是不考虑应变时的一般量子阱模型所不能理解的. 但注意到由于 InAs 与 GaAs 的晶格常数很不匹配, 自组织 InAs/GaAs 量子点系统是一个大应变体系, 这样 InAs 层中的内在应变随压力的变化必然会对 InAs 材料的压力系数产生较大影响, 从而使得其压力系数偏离无应变体材料带边的压力系数 96 meV/GPa.

Frogley 等曾经用一种非线性弹性理论定量计算了长在 GaAs 衬底上的二维 InGaAs 应变层中的应变对其带边压力系数的影响, 他们的结果表明体系失配应变与泊松比随压力的变化使得 InGaAs 层带边的压力系数变得很小^[6]. 另一方面, 这里所研究的量子点横向尺寸为 78nm, 厚度为 7.3nm, 是一种扁平状的大尺寸量子点, 其在横向的量子尺寸效应相对应较小; 同时一些计算与实验表明, 对于高度/半径比小于 1/10 的量子点, 其内在应变与二维应变层的应变的性质基本相同^[11], 因此在考虑应变的影响时, 可将各个大量子点近似看成一个一个的 InAs/GaAs 二维层, 从而沿用 Frogley 的理论来估算其压力系数.

根据 Frogley 的模型, 长在 GaAs(001) 衬底上的 InAs 层的重空穴价带到导带的带隙 E_g^{hh} 可写成:

$$E_g^{hh} = E_g + (a_{CB} - a_{VB})\epsilon_{vol} - b_{VB}\epsilon_{ax} \quad (1)$$

其中 E_g 为无应变 InAs 体材料的带隙, a_{CB} 和 a_{VB} 分别为 InAs 导带与价带的体应变势, b_{VB} 为价带的轴应变势. ϵ_{vol} 和 ϵ_{ax} 则分别为体应变与轴应变, 它们与失配应变的关系如下:

$$\epsilon_{vol} = (2 - \nu_{2D})\epsilon \quad , \quad \epsilon_{ax} = (1 + \nu_{2D})\epsilon \quad (2)$$

这里 $\epsilon = (a_l - a_s)/a_l$ 是因衬底晶格常数 a_s 与外延层的晶格常数 a_l 不匹配造成的失配应变. $\nu_{2D} = 2C_{12}/C_{11}$ 为外延层的二维泊松比, C_{12} 、 C_{11} 为其弹性常数. 加压之后, 衬底与外延层的晶格常数都会变化, 从而失配应变也会发生变化. 根据 Murnaghan 状态方程可以推出失配应变随压力的变化关系, 将其保留到压力的一阶关系则变为:

$$\varepsilon(P) \approx \frac{a_l^0 - a_s^0}{a_l^0} + \frac{1}{3} \frac{a_l^0}{a_s^0} \left(\frac{1}{B_s} - \frac{1}{B_l} \right) P = \varepsilon_0 + \varepsilon' P, \quad (3)$$

式中 B_l 和 B_s 分别为 InAs 外延层和 GaAs 衬底的弹性模量.

同样,由于弹性系数也会随压力而变化,从而导致泊松比随压力而变化. 设 C_{ij}' 为各弹性系数 C_{ij} 随压力变化的线性项系数,则二维泊松比随压力的变化为:

$$v_{2D}(P) = 2 \frac{C_{12}^0 + C_{12}'P}{C_{11}^0 + C_{11}'P} \approx v_{2D}^0 + v_{2D}'P, \quad (4)$$

式(3),(4)中的上标 0 或下标 0 表示是该量在常压下的数值. 综合(1)~(4)就可以得到:

$$\frac{\partial E_g^{hh}}{\partial P} \approx \frac{a_{CB} - a_{VB}}{B_l} + \{ (a_{CB} - a_{VB}) [(2 - v_{2D}^0) \varepsilon' - \varepsilon_0 v_{2D}'] \} - b_{VB} [(1 + v_{2D}^0) \varepsilon' + \varepsilon_0 v_{2D}'], \quad (5)$$

上式中第一项 $(a_{CB} - a_{VB})/B_l$ 实际为无应变 InAs 体材料的压力系数. 根据(5)式及[6]中所提供的有关各参数的数值,就可以算出 InAs 应变层重空穴价带到导带带隙的压力系数,我们的计算结果为 77meV/GPa. 这一结果已经与我们所测大量子点的压力系数 69~72meV/GPa 很为接近. 另一方面,该计算值比无应变 InAs 体材料的值(96meV/GPa)下降了近 20meV/GPa,这表明失配应变与弹性系数随压力的变化引起的 InAs 应变层的压力系数的减小是使 InAs/GaAs 量子点的压力系数比 InAs 体材料还要小的主要原因之一.

至于不同尺寸的量子点的压力系数随量子点尺寸的减小而变大则与量子点中载流子的量子局域能随压力的变化有关. 上面研究了 InAs 应变层重空穴价带到导带带隙跃迁能量 E_g^{hh} 的压力系数,但实际量子点发光峰的能量不仅包括 E_g^{hh} ,还有载流子局域能的贡献. 具体而言,量子点发光峰能量 E_{PL} 可写为:

$$E_{PL}(P) = E_g^{hh}(P) + E_{1e}(P) + E_{1h}(P) - E_{ex}(P), \quad (6)$$

其中, E_{1e} 和 E_{1h} 分别为电子与空穴的第一个量子化局域能级的局域能, E_{ex} 为激子束缚能.

于是,量子点 PL 峰的压力系数为

$$\frac{dE_{PL}}{dp} = \frac{dE_g^{hh}}{dp} + \frac{dE_{1e}}{dp} + \frac{dE_{1h}}{dp} - \frac{dE_{ex}}{dp}, \quad (7)$$

上式等号左边第一项在上面已讨论,最后一项由于激子束缚能很小可忽略. 因此,下面主要定性讨论一下第 2、3 项,即载流子局域化能级变化对压力

系数的贡献.

主要有 3 个方面,即量子点中的势垒高度、量子点的尺寸和载流子的有效质量随压力的变化对电子、空穴的局域化能级的贡献有影响. 首先,由于 InAs 体材料比 GaAs 体材料的压力系数小, InAs/GaAs 势阱的高度将随着压力的增加而迅速增加,电子、空穴的局域化程度也随之增加,从而局域能也增加,导致发光峰压力系数增加. 如果是一个宽度很窄的浅势阱,则势阱越窄,势阱高度的变化对压力系数的影响会越大^[12],这可能是图 5 中量子点尺寸越小,特别是厚度越薄,其发光峰压力系数越大的主要原因之一. 其次,加压之后,量子点的几何尺寸会变小,这直接导致载流子的局域能增加,使得量子点压力系数变大,但这一贡献一般很小^[12]. 再次,由于压力造成的能带非抛物性,使得电子的有效质量随着压力的增加而增大,进而使电子的局域能减小,导致量子点发光峰压力系数减小^[2,5]. 如果在大尺寸量子点中,电子有效质量的影响超过前面两种因素的影响,则发光峰的压力系数将会比式(7)中第一项还小.

2.2.2 发光峰的强度

图 4(b) 中示出了各发光峰的积分强度随压力的变化. 为清楚起见, P_1 、 P_3 和 P_5 的强度分别乘上了因子 10, 0.1 和 0.01. 可以看到,来自 GaAs 衬底的峰 P_5 在压力达到 4GPa 后,其强度突然在很小的压力范围内下降两个数量级,这和以前的测量结果是一致的^[4],表明在 GaAs 衬底内发生了 Γ -X 交叉. 峰 P_3 的强度大约在 5GPa 时强度开始下降,上面已提到在 4GPa 时 P_3 能量变化严重偏离低压时的线性关系,这两个现象均与小尺寸 InAs 量子点中的 Γ -X 态的混合效应有关^[8]. 由于缺乏与 X 态有关的实验数据,这里对 Γ -X 相互作用势就不再估算了.

大尺寸量子点的两个发光峰 P_2 和 P_1 先后在 6.2GPa 和 7.8GPa 时淬灭. 而 Itskevich 曾经在研究 InAs/GaAs 量子点的激发态发光峰的压力行为时指出,如果各光学跃迁都是从同一个电子基态激发的,则各激发态对应的 PL 发光峰将在与基态发光峰相同的压力下淬灭^[4]. 我们观测到的 P_2 与 P_1 峰是在不同压力下淬灭,因而它们对应的是从不同电子态的光学跃迁. 也就是说,激发态跃迁峰 P_2 对应的是从电子第一激发态到空穴第一激发态的跃迁,这在只存在电子基态的小量子点中是不可能的. 但我们的赝势平面波方法^[13]的计算结果表明,在高度为 7.3nm、横向尺寸为 78nm 的大量子点中至少存在两

个电子激发态,因而存在着电子激发态的跃迁.

3 结论

在低温 15K 和 0 ~ 9GPa 的静压范围下研究了一种大尺寸、扁平状的 InAs/GaAs 应变自组织量子点的光致发光谱. PL 谱中四个明显的发光峰分别是大尺寸量子点的基态与激发态发光峰,小量子点的发光峰及 GaAs 衬底的发光峰. 在强度明显下降前,它们都随压力增加而蓝移. 其中,大量子点的两个发光峰的能量压力系数只有 69 和 72meV/GPa,比以往所测 InAs 量子点的发光峰的压力系数都要小. 我们用非线性弹性理论对此进行了分析,结果表明体系内的失配应变与弹性系数随压力的变化会导致应变的 InAs 层的重空穴带边压力系数显著减小,这是大尺寸量子点发光峰压力系数很小的主要原因之一. 大量子点的两个发光峰分别在不同的压力下发生淬灭,表明其激发态发光峰来源于电子的第一激发态到空穴的第一激发态的跃迁.

REFERENCES

- [1] Wang X D, Niu Z C, Feng S L, *et al.* Effect of In_xGa_{1-x}As (0 ≤ x ≤ 0.4) capping layers on self-assembled 1.3μm wavelength InAs/GaAs quantum islands [J]. *J. Cryst. Growth*, 2001, **223**: 363—368.
- [2] Lyapin S G, Itskevich I E, Troyan I A, *et al.* Pressure-induced Γ-X crossover in self-assembled In(Ga)As/GaAs quantum dots [J]. *Phys. Stat. Sol.*, 1999, **B211**: 79—83.
- [3] Itskevich I E, Henini M, Carmona H A, *et al.* Photoluminescence spectroscopy of self-assembled InAs quantum dots in strong magnetic field and under high pressure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(4): 505—507.
- [4] Itskevich I E, Trojan I A, Lyapin S Y, *et al.* Excited states in self-assembled InAs/GaAs quantum dots under high pressure [J]. *Phys. Stat. Sol.*, 1999, **B211**: 73—77.
- [5] Manjón F J, Goñi A R, Syassen K, *et al.* Pressure dependence of photoluminescence spectra of self-assembled InAs/GaAs quantum dots [J]. *Phys. Stat. Sol.*, 2003, **B235**(2): 496—500.
- [6] Frogley M D, Downers J R, Dunstan D J. Theory of the anomalously low band-gap pressure coefficients in strained-layer semiconductor alloys [J]. *Phys. Rev.*, 2000, **B62**(20): 13612—13616.
- [7] Fang Zai-Li, Su Fu-hai, Ma Bao-Shan, *et al.* Photoluminescence of Te Isoelectronic Centers In ZnS;Te Under Hydrostatic Pressure [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (方再利, 苏矿海, 马宝珊, 等. 静压下 ZnS;Te 中 Te 等电子陷阱的发光, *红外与毫米波学报*). 2004, **23**: 38—39.
- [8] Li G H, Goni A R, Syassen K, *et al.* State mixing in InAs/GaAs quantum dots at the pressure-induced Γ-X crossing [J]. *Phys. Rev.*, 1994, **B50**(24): 18420—18425.
- [9] Van Camp P E, Van Doren V E, Devreese J T. Pressure dependence of the electronic properties of cubic III-V compounds [J]. *Phys. Rev.*, 1990, **B41**: 1598.
- [10] Edwards A L, Drickamer H G. Effect of pressure on the absorption edges of some III-V, II-VI, and I-VII compounds [J]. *Phys. Rev.*, 1961, **122**(4): 1149—1157.
- [11] Tan P H, Brunner K, Bougeard D, *et al.* Raman characterization of strain and composition in small-sized self-assembled Si/Ge dots [J]. *Phys. Rev.*, 2003, **B68**(12): 125302—1—125302—6.
- [12] Li Guo-Hua, Zheng Bao-Zhen, Han He-Xiang, *et al.* Photoluminescence studies of In_xGa_{1-x}As/GaAs strained quantum wells under hydrostatic pressure [J]. *Phys. Rev.*, 1992, **B45**(7): 3489—3493.
- [13] Luo Jun-Wei, Li Shu-Shen, Xia Jian-Bai, *et al.* Photoluminescence Pressure coefficients of InAs/GaAs quantum dots [J]. *Phys. Rev.*, 2005, (to be published).