

不同尺寸分布的自组织 $In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 量子点的静压光谱*

陈晔 张旺 李国华 韩和相 汪兆平

(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)

周伟 王占国

(中国科学院半导体研究所材料科学实验室, 北京 100083)

摘要: 在 15K 测量了不同尺寸分布的 $In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 量子点的静压光致发光, 静压范围为 0–1.3GPa。常压下观察到三个发光峰, 分别来源于不同尺寸的量子点(横向直径分别为 26、52 和 62nm)的发光。它们的压力系数分别为 82、94 和 98meV/GPa, 都小于 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 体材料带边的压力系数, 特别是尺寸为 26nm 的小量子点比 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 体材料带边小 17%, 并且压力系数随量子点尺寸的变小而减小。理论计算表明有效质量的增大和 $\Gamma-X$ 混合是量子点压力系数变小的主要原因, 并得到横向直径为 26 和 52nm 的小量子点的 $\Gamma-X$ 混合势为 15 和 10meV。根据实验还确定 $In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 量子点系统 X 能带具有 II 类结构, 并且估算出价带不连续量为 0.15 ± 0.02 。

关键词: $In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$; 量子点; 光致发光; 静压

PACC: 6865; 7855; 6250

中图分类号: O472^{*}.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)11-1092-07

Photoluminescence of $In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ Quantum Dots with Multi-Modal Size Distribution Under Hydrostatic Pressure*

CHEN Ye, ZHANG Wang, LI Guo-hua,
HAN He-xiang and WANG Zhao-ping

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

* 国家自然科学基金资助项目[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69776012].

陈晔 男, 1970 年出生, 博士研究生, 现从事低维半导体光学性质研究。

张旺 男, 1972 年出生, 硕士研究生, 现从事半导体光学性质研究。

李国华 男, 1945 年出生, 研究员, 现从事半导体光谱研究。

1999-08-24 收到, 1999-10-14 定稿

ZHOU Wei and WANG Zhan-guo

(*Laboratory of Semiconductor for Materials Science, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Received 24 August 1999, revised manuscript received 14 October 1999

Abstract: The photoluminescence spectra of In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As self-assembled Quantum Dots (QD) with multi-modal distribution were performed under hydrostatic pressure (0—1.3GPa). Three peaks are observed in the spectra, which comes from different dot families. The measured pressure coefficients are 82, 94 and 98meV/GPa for the peaks of dots with average lateral size of 26, 52 and 62nm, respectively. They are all smaller than that of the Γ -point band gap in bulk In_{0.55}Al_{0.45}As, especially for peak D1, which is about 17% smaller. And the pressure coefficients decrease with the decrease of the dot size. Theoretic calculation indicates that the increase of the effective mass and Γ -X mixing are the main reasons for the decrease of the pressure coefficients, and the Γ -X mixing is more important in the small dots. The obtained Γ -X interaction potential are 15 and 10meV for 26 and 52nm QDs. A type-II alignment for X conductor band in In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As QD system is obtained from the analyses of the experiment data. The valence offsets Q_v are estimated as 0.15 ± 0.02 .

Key words: In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As; quantum dot; photoluminescence; hydrostatic pressure

PACC: 6865; 7855; 6250

Article ID: 0253-4177(2000)11-1092-06

1 引言

由于分子束外延(MBE)等生长技术的发展,对大的晶格失配系统,人们已经利用混合生长模式(SK)生长出高质量的自组织量子点结构。目前研究得最多的是发光在红外波段的InAs(In_xGa_{1-x}As)/GaAs系统^[1,2],最近In_xAl_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As量子点系统由于它发光波段位于可见的红光波段而引起了人们的关注,并已经制出了红光激光器^[3-5]。由于量子限制效应,量子点电子能级高于导带底,在压力下可能接近X能谷而引起态混合。压力光谱是研究这种态混合效应的有力工具,最近Iteskevich^[6,7]在InAs量子点中发现量子点发光峰的压力系数低于GaAs势垒压力系数20%,并且发现了 Γ -X混合的证据。Philips^[8]在研究In_xAl_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As量子点也观察到了类似现象,并发现量子点发光峰半高宽随压力变窄。但是至今还没有关于多模分布量子点的压力行为的报道。

本文报道了多模分布的In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As自组织量子点的压力光谱研究,量子点的多模分布用AFM照片给予了证实。我们发现多种不同尺寸分布的量子点的压力系数随着量子点尺寸的减小而减小,特别是尺寸为26nm的小量子点比In_{0.55}Al_{0.45}As体材料带边小17%。

2 样品和实验

样品用分子束外延(MBE)方法生长在半绝缘的(001)晶向GaAs衬底上的。除了在生长Al_{0.5}Ga_{0.5}As时衬底温度升至700℃外,衬底温度保持在600℃。首先生长200nm的非掺杂GaAs缓冲层,然后生长80nm的Al_{0.5}Ga_{0.5}As隔离层和10ML的In_{0.55}Al_{0.45}As层,再生长75nm的Al_{0.5}Ga_{0.5}As,最后是5nm的GaAs盖层。全部生长过程都由高能电子衍射(RHEED)进行监控。我们在同样的条件下生长了不长盖层的样品以供AFM测量。

低温光致发光谱采用 Ar⁺ 离子激光器的 488.0nm 线激发, 样品发光由 JY-HRD2 单色仪分光并用光电倍增管探测。静压由金钢石对顶压压室获得, 被测样品从背面减薄至约 30μm, 切成约 100μm 大小的小块装入压室, 压室里放一小块红宝石, 样品置于 APD 公司 CSW-202A 型 He 气闭循环低温系统的制冷头里。采用液氮作传压媒质, 压力用红宝石 R_1 线定标。

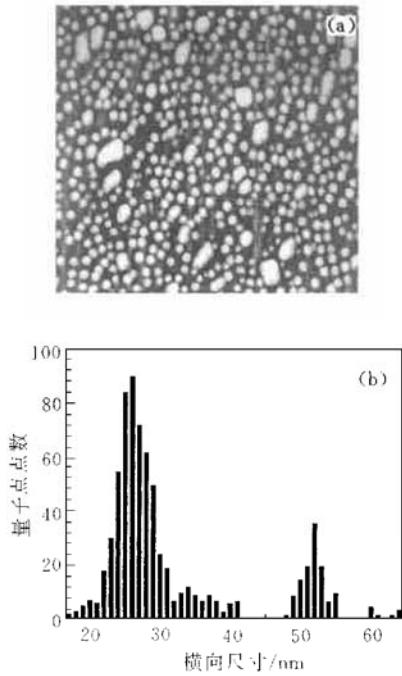


图 1 (a) 无盖层 $\text{In}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 量子点样品的 AFM 照片和(b)用 Scion 程序在 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 范围内统计的横向量子点尺寸分布图

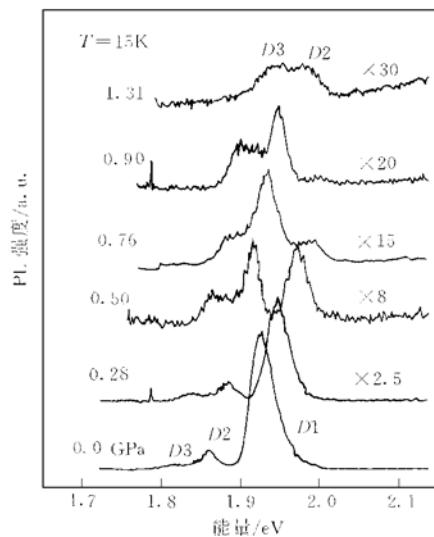
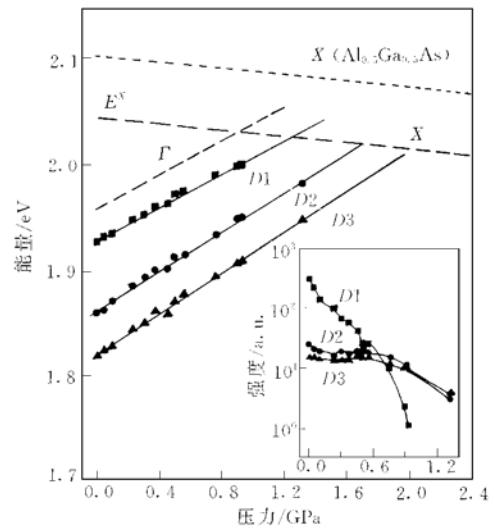
FIG. 1 (a) AFM Photo for $\text{In}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ Quantum Dot Sample Without Cap Layer,
(b) Lateral Distribution for Size of Quantum Dots in Area of $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ by Using Scion Program

图 3 中我们分别给出了所有三个发光峰的峰值能量随压力的变化, 图中的实线是用线性压力关系对实验数据进行最小二乘法拟合的结果。拟合得到三个发光峰的压力系数分别为 $D1(82\text{meV/GPa})$, $D2(94\text{meV/GPa})$ 和 $D3(98\text{meV/GPa})$ 。它们都小于相应的 $\text{In}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 体材料的压力系数(99.3meV/GPa , 这一数值是从文献[10]中 GaAs, AlAs 的压力系数内插得到), 特别是 $D1$ 峰的压力系数比 $\text{In}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 体材料的压力系数小 17% 左右。而且可以看出不同大小的量子点的压力系数随量子点的尺寸减小而变小。类似的现象在不同阱宽的多量子阱 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 结构中已观察到。图 3 中的插图给出了所有发光峰的积分强度随压力的变化关系。

3 实验结果

我们对没有生长盖层的样品拍摄了 AFM 形貌照片, 如图 1(a) 所示, 图 1(b) 是采用通用的 Scion Image 程序在 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 范围内统计得到的量子点横向尺寸分布图, 从中可清楚地看到, 样品中存在两种不同尺寸大小的量子点生成。它们的直径分别为 $26 \pm 5\text{nm}$ 和 $52 \pm 3\text{nm}$, 量子点的密度大约为 5.9×10^{10} 和 $1.4 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ 。我们认为大量子点可能是小量子点聚合连接形成的。图 2 示出的是低温下(15K)在各种不同压力下测得的光致发光谱, 压力值已在图中标出。在常压下我们观察到两个主要的发光峰 $D1$ 和 $D2$ 。峰值能量分别为 1.927eV 和 1.86eV 。我们认为它们来源于不同尺寸大小量子点的激子发光。为了进一步了解其性质, 我们还作了低温变激发强度的光致发光谱, 结果发现两个峰随着激发强度的增加而等比例增强, 表明它们不是来源于同一组量子点的基态和激发态发光, 而来源于量子点的多组不同尺寸分布结构, 详细的实验和讨论已经发表^[8]。

在静压条件下, 所有的发光峰都随压力的增大而向高能方向移动。随着压力增大, 发光峰 $D1$ 强度逐渐下降, 当压力增大到 0.9GPa 左右, 峰 $D1$ 强度迅速减弱而消失。与此同时在低能侧一很弱的峰 $D3(1.82\text{eV})$ 由于 $D1$ 峰的强度变弱而逐渐显露出来。 $D1$ 峰减弱消失后发光峰 $D2, D3$ 变成了两个主要峰。事实上在常压下也能观察到 $D3$ 峰, 只是由于 $D1$ 峰太强而掩盖掉了。在图 1 中我们可以看到在样品中实际还存在一组直径约为 62nm 的大量子点, $D3$ 峰很可能来源于这一组大量子点。

图 2 15K 温度时不同压力下多组不同尺寸分布的 In_{0.55}Al_{0.45}As 量子点的光致发光谱FIG. 2 PL Spectrum of In_{0.55}Al_{0.45}As Quantum Dots at 15K图 3 In_{0.55}Al_{0.45}As 量子点发光峰 D1, D2 和 D3 的压力系数

插图为发光峰积分强度随压力的变化。

FIG. 3 Pressure Coefficients for PL Peaks D1, D2 and D3 of In_{0.55}Al_{0.45}As Quantum Dots

4 讨论

4.1 价带不连续量

我们可以从 D1 峰的消失推得的压力来估算 In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As 系统的价带不连续量。在图 3 中我们用虚线画出了 Al_{0.5}Ga_{0.5}As 势垒层带宽的压力关系，其常压值和压力关系分别取自文献[11, 12]。由于观察到的量子点发光峰实际上是激子发光峰，根据文献[13]中的激子束缚能，我们也在图中画出了 D1 峰相应的子能级的压力依赖关系。D1 峰在 0.9GPa 时迅速减弱并消失，表明此时导带子能级和 X 能级发生了交叉，交叉时的能量就是 X 能级与 In_{0.55}Al_{0.45}As 重空穴能级之间的跃迁能。我们将交叉时 X 能级的能量外推到常压时得到的能量 E^X ，即常压时 X 能级与 In_{0.55}Al_{0.45}As 重空穴之间的跃迁能，可以看出它低于 Al_{0.5}Ga_{0.5}As X 能谷底的能量大约 60 meV。而且也小于 In_{0.55}Al_{0.45}As 层中 X 导带底与重空穴之间的跃迁能量，类比于 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱中的情况^[14]，我们认为 E^X 为 Al_{0.5}Ga_{0.5}As 中带 X 谷到 In_{0.55}Al_{0.45}As 量子点重空穴子带之间的 II 类跃迁能量。计算也表明对于 InAlAs/AlGaAs 量子点系统，如果价带不连续量大于 10%，则导带 X 能谷为 II 类结构。我们的实验结果说明在 In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As 量子点中 X 带具有 II 类结构。这样我们可以用下式来估算出价带不连续量：

$$\Delta E_v = E_g^X(\text{Al}_0.5\text{Ga}_0.5\text{As}) - E^X + E_{lh} \quad (1)$$

这里 $E_g^X(\text{Al}_0.5\text{Ga}_0.5\text{As})$ 是势垒层 Al_{0.5}Ga_{0.5}As 的 X 导带底； E_{lh} 是根据包络函数近似计算得到的重空穴束缚能，约为 40meV。据此我们可估算出 $\Delta E_v = 95 \pm 10$ meV，并由此得到价带不连续量为 0.15 ± 0.02 。

4.2 压力系数与量子点尺寸的关系

如前所述，量子点发光峰的压力系数小于体材料的压力系数，并且随量子点的尺寸减小而减小，类似的现象在不同阱宽的多量子阱 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 结构中已观察到^[14]。Lefbvre^[15]等考虑了压力引起阱宽、势垒高度、介电常数、有效质量、激子束缚能变化，来计算了压力系数随量子阱阱宽的变化关系。结果表明

有效质量的提高和势垒高度的下降是压力系数随阱宽减小而减小的主要原因. 我们也作了类似的计算来揭示量子点压力系数与点的尺寸的关系.

量子点发光峰可以表达为:

$$E_{PL} = E_g + E_{le} + E_{lh} - E_{ex} \quad (2)$$

式中 E_g 是 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 的带宽; E_{le} 和 E_{lh} 分别为电子和重空穴的限制能; E_{ex} 为激子束缚能. 它的压力系数可以从式(1)得到:

$$\frac{dE_{PL}}{dP} = \frac{dE_g}{dP} + \frac{dE_{le}}{dP} + \frac{dE_{lh}}{dP} - \frac{dE_{ex}}{dP} \quad (3)$$

由于空穴的有效质量比较大, E_{lh} 和它由压力引起的修正都比较小, 而且束缚能随压力的变化也可以忽略^[16], 因此量子点发光峰的压力系数与 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 体材料压力系数的差别主要是由电子限制能量 E_{le} 随压力变化引起的.

我们采用了包络函数近似和量子盒模型来计算量子点中的限制能. 量子点被看作一个扁平的量子盒, 横向尺寸由 AFM 照片测得, 高度由计算的能级与实验值符合来估计. 计算中根据我们从实验得到的价带不连续量估计值 0.15 来得到电子和空穴的限制势. E_{le} 随压力的变化通过考虑压力对有效质量、量子点尺寸大小、势垒高度的影响来计算.

在静压下量子点的尺寸变小, 将导致量子限制能的增加, 它对压力系数产生正的影响. 量子点尺寸 $L_{x,y,z}$ 随压力的变化可表为:

$$L_{x,y,z}(p) = L_{x,y,z}(0)[1 - (S_{11} + 2S_{12})p] \quad (4)$$

这里 S_{11} 和 S_{12} 是 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 材料弹性常数.

由于量子限制效应, 量子点中的电子能级都高于导带底, 由于导带的非抛物线性, 将导致电子有效质量的增大, 量子点电子能级随压力的增加向高能方向移动, 将使电子有效质量增加从而导致电子限制能的减小. 量子点有效质量随压力的变化可由 Kane 方程^[17]来描述:

$$\frac{m(p)}{m(0)} = \frac{E_g + ap + E_{le} + E_{ll}}{E_g} \times \frac{E_g + ap + E_{le} + E_{ll} + \Delta}{E_g + \Delta} \times \frac{2\Delta + 3E_g}{2\Delta + 3(E_g + ap + E_{le} + E_{ll})} \quad (5)$$

这里 E_g 是 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 的带宽; Δ 是价带分裂值; E_{ll} 是轻空穴的限制能.

由于 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 和势垒 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 层的压力系数不同, 势垒高度将随压力的增加而变化, 可表示为:

$$V(p) = V(0) + (\alpha_B - \alpha_D)p \quad (6)$$

这里 $V(p)$ 不同压力下的势垒高度; α_B 和 α_D 是势垒和 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 的压力系数. 根据文献, $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 和 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 的压力系数分别为 99.3 和 102 meV/GPa^[18], 由于两者的压力系数相差不大, 因此对量子点的压力系数影响并不大.

我们计算了 0 和 1 GPa 时的电子限制能, 并由下式得到发光峰的压力系数:

$$\alpha_{PL} = \alpha_D + \frac{E_{le}(p) - E_{le}(0)}{p} \quad (7)$$

计算结果在表 1 中列出, 可以看出量子点发光峰的压力系数小于 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 体材料的压力系数, 并且随量子点尺寸的减小而减小, 但是计算所得到的结果难以解释实验测得的较大的压力系数减小, 特别是对 D1, 计算所得压力系数减小仅 4%, 而实验值减小达 17%. 因此还应该有其他的因素导致压力系数的减小. 正如 Itskevich 指出的, 应该考虑 Γ 和 X 的态混合, 这种混合将使压力系数减小.

4.3 Γ - X 混合

由于界面处势的不连续, 当 Γ 和 X 态接近时将发生混合. 前面已经提到, 量子点中电子能级都高于导带底, 当压力增加时电子能级将靠近 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 的 X 能级, 从而发生 Γ - X 态混合. 事实上, 我们已经观察到了这种 Γ - X 态混合发生的证据. 图 3 中我们画出了三个发光峰 D1, D2 和 D3 的发光强度的压力依赖关系, 可以看出 D1 峰的强度随压力的增大而减小, 在 0.9 GPa 附近发光强度迅速减弱以至消失. 而 D2, D3

峰的强度随压力变化并不大, 到大约 1.3GPa 时, D2 峰的强度也开始减弱。这些都是明显的 Γ -X 混合证据。利用二级微扰论可以写出 Γ -X 交叉时两个混合态的能级位置:

表 1 利用 $E(P) = E(0) + \alpha_1 P$ 线性关系拟合得到的 In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As 量子点发光峰的能量和压力系数, 用包络函数理论计算的压力系数 α_{PL} 和微扰论得到的 Γ -X 混合势 V

Table 1 Energies and Pressure Coefficients of PL Peaks in In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As Quantum Dot Sample Obtained from Fitting a Line Relation $E(P) = E(0) + \alpha_1 P$ to Experimental Data. The calculated pressure coefficients α_{PL} by enveloping function approximation and the interaction potential V of Γ -X mixing are also gained here.

Peaks	$E(0)/\text{eV}$	$\alpha_1/(\text{meV} \cdot \text{GPa}^{-1})$	$\alpha_{PL}/(\text{meV} \cdot \text{GPa}^{-1})$	V/meV
D1	1.928	82 ± 2	95.4	15 ± 1
D2	1.862	94 ± 2	95.7	10 ± 2
D3	1.819	98 ± 2	96.0	

$$E_{\pm} = \frac{1}{2} [(E_{\Gamma} + E_X) \pm \sqrt{(E_{\Gamma} - E_X)^2 + 4V^2}]^{1/2} \quad (8)$$

这里 E_{Γ} 和 E_X 是不考虑混合时 Γ 和 X 态的能级位置; V 是混合势, E_{Γ} 和 E_X 的压力关系:

$$E_{\Gamma} = E(P_c) + \alpha_{\Gamma}(P - P_c) \quad (9)$$

$$E_X = E(P_c) + \alpha_X(P - P_c) \quad (10)$$

这样 E_{\pm} 可以表示为:

$$E_{\pm}(P) = E(P_c) + \frac{1}{2} (\alpha_{\Gamma} + \alpha_X)(P - P_c) \pm \left[\left(\frac{1}{2} (\alpha_{\Gamma} - \alpha_X)(P - P_c) \right)^2 + V^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

这里 P_c 和 $E(P_c)$ 是交叉时的压力和能级位置; α_{Γ} 和 α_X 是 E_{Γ} 和 E_X 的压力系数。由于发光峰实际上是激子发光, 因此发光峰能量为:

$$E_{PL}(P) = E_{\pm}(P) - R(P) \quad (12)$$

$R(P)$ 是激子束缚能。通过公式(11)、(12)我们计算了发光峰压力系数与量子点尺寸的关系。 α_{Γ} 采用前面计算所得的 α_{PL} , α_X 用 Al_{0.5}Ga_{0.5}As 势垒 X 能谷的压力系数。对于 D1 峰, P_c 取实验值 0.9GPa, D2 峰的 P_c 根据 E_{Γ} 和 E_X 的交叉求得。混合势 V 作为拟合参数。激子束缚能随压力的变化忽略不计, 仍取 30meV。D1、D2 峰的 E_{\pm} 和 E_{PL} 分别用虚线和实线在图 4 中画出。为了比较我们还画出了不考虑混合时 E_{Γ} 和 E_X 的压力关系。所得的混合势在表 1 中列出。D3 峰由于发光强度弱而混合较小我们没有进行计算。从图 4 可以看出, 考虑 Γ -X 混合后 D1 峰的压力关系与实验数据符合得很好。计算所得的压力关系很好地描述了 0.9GPa 附近的非线性行为。这表明导致 D1 峰压力系数显著减小的主要原因是 Γ -X 混合。对于 D2 峰, Γ -X 混合和有效质量增加的影响差不多。计算得到的 D1、D2 的混合势分别为 15 和 10meV, 与 Li^[19]的实验结果接近。而且混合势随量子点尺寸的减小而增大, 这说明较强的局域将导致较强的状态混合。

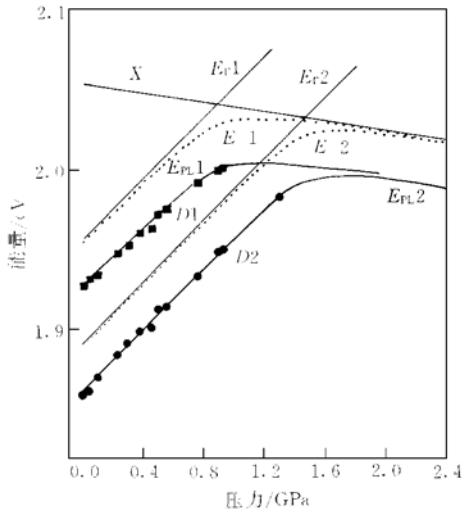


图 4 Γ -X 混合的计算结果
计算 D1 和 D2 峰的 E_{\pm} 和 E_{PL} 分别用虚线和
实线在图中画出。

FIG. 4 Calculated Results for Γ -X Mixing

5 结论

常压下在 $In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 量子点样品中, 观察到三个量子点发光峰 $D1$ 、 $D1$ 和 $D3$ (其中 $D3$ 峰在加压后可以更清楚地分辨出来), 分别对应着不同尺寸的量子点(横向直径分别为 26、52 和 62nm). AFM 照片证实了量子点具有多种不同尺寸分布. 加压后, 三个发光峰均向高能方向移动, 它们的压力系数分别为 82、94 和 98meV/GPa, 都小于 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 体材料带边的压力系数, 特别是尺寸为 26nm 的小量子点比 $In_{0.55}Al_{0.45}As$ 体材料带边小 17%, 并且压力系数随量子点尺寸的变小而减小. $D1$ 发光峰的强度随压力的增加而变弱, 在 0.9GPa 时消失, 表明此时 Γ 能级与 X 能级发生交叉. 根据交叉时 X 能级位置推断在 $In_{0.55}Al_{0.45}As/Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 量子点中 X 能级为 II 类结构并估算出价带不连续量为 0.15 ± 0.02 . 利用包络函数近似和量子盒模型计算了压力系数与量子点尺寸的关系, 利用二阶微扰论计算了混合效应, 理论计算表明有效质量和 $\Gamma-X$ 混合是量子点发光压力系数减小的主要原因, 并且得到 $D1$ 和 $D2$ 的 $\Gamma-X$ 混合势为 15 和 10meV. 表明 $\Gamma-X$ 混合随量子点的尺寸变小而增强.

参 考 文 献

- [1] 王志明, 邓元明, 封松林, 吕振东, 陈宗圭, 王凤莲, 徐仲英, 郑厚植, 韩培德, 段晓峰, 半导体学报, 1997, **18**: 550
[WANG Zhiming, DENG Yuanming, FENG Songlin, LU Zhendong, CHEN Zonggui, WANG Fenglian, XU Zhongying, ZHENG Houzhi, HAN Peide and DUAN Xiaofeng, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**: 550 (in Chinese)].
- [2] 赵谦, 封松林, 王志明, 半导体学报, 1998, **19**(2): 158[ZHAO Qian, FENG Songlin and WANG Zhiming, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(2): 158(in Chinese)].
- [3] R. Leon, P. M. Petroff, D. Leonard and S. Fafard, Science, 1995, **267**: 1996.
- [4] S. Fafard, R. Leon, D. Leonard, J. L. Merz and P. M. Petroff, Phys. Rev. B, 1994, **50**: 8086.
- [5] K. Kamath, P. Bhattacharya, T. Sosnowski, T. Norris and J. Phillips, Electron Lett., 1996, **32**: 1374.
- [6] I. E. Itskevich, S. G. Lyapin, I. A. Troyan, P. C. Klipstein, L. Eaves, P. C. Main and M. Henini, Phys. Rev. B, 1998, **58**: R4250.
- [7] I. E. Itskevich, M. Henini, H. A. Carmona, L. Eaves, P. C. Main, D. K. Maude and J. C. Portal, Appl. Phys. Lett., 1997, **70**: 505.
- [8] J. Phillips, P. Bhattacharya and U. Venkateswaran, Appl. Phys. Lett., 1999, **74**: 1549.
- [9] W. Zhou, B. Xu, H. Z. Xu, F. Q. Liu, J. B. Liang, Z. G. Wang, Z. Z. Zhu and G. H. Li, Journal of Electron Materials, 1999, **28**: 528.
- [10] Numerical Data Functional Relationships in Science and Technology, Edited by O. Madelung, H. Weis and M. Schulz, Landolt-Bornstein, New Series, Vol. 17, Pt. A(Springer, Heidelberg, 1982).
- [11] W. P. Roach, M. Chandrasekhar, H. R. Chandrasekhar and F. A. Chambers, Phys. Rev. B, 1991, **44**: 13404.
- [12] K. Reimann, M. Holtz, K. Syassen, Y. C. Lu and E. Bauser, Phys. Rev. B, 1991, **44**: 2985.
- [13] P. D. Wang, J. L. Merz, K. Uchida, N. Miura, H. Akiyama and H. Sakaki, Phys. Rev. B, 1996, **53**: 16458.
- [14] U. Venkateswaran, M. Chandrasekhar, H. R. Chandrasekhar, B. A. Vojak, F. A. Chambers and J. M. Meese, Phys. Rev. B, 1986, **33**: 8416.
- [15] P. Lefevre, B. Gill and H. Mathieu, Phys. Rev. B, 1987, **35**: 5630.
- [16] Guo-hua Li, Bao-Zhen Zheng, He-Xiang Han, Zhao-Ping Wang, T. G. Andersson and Z. G. Chen, Phys. Rev. B, 1992, **45**: 3489.
- [17] E. O. Kane, Semiconductors and Semimetals, Edited by R. K. Willardson, Academic, New York, 1996, Vol. 1.
- [18] Lorenzo Pavesi and Mario Guzzi, J. Appl. Phys., 1994, **75**: 4779.
- [19] G. H. Li, A. R. Goni, K. Syassen, O. Brandt and K. Ploog, Phys. Rev. B, 1994, **50**: 18420.