

InAs/GaAs 表面量子点的压电调制反射光谱研究*

余晨辉¹⁾ 王 莞¹⁾ 龚 谦²⁾ 张 波^{1)†} 陆 卫¹⁾

1) 中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

2) 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2005 年 9 月 1 日收到, 2006 年 3 月 20 日收到修改稿)

运用压电调制反射光谱(PzR)方法测量了在以 GaAs(311)B 为衬底的 In_{0.35}Ga_{0.65}As 模板上生长的 InAs 表面量子点结构的反射谱. 在 77K 温度下, 观察到了来自样品各个组成结构(包括表面量子点本身、被覆盖层覆盖的量子点、In_{0.35}Ga_{0.65}As 模板以及 GaAs 衬底等)的调制信号. 来自表面量子点本身的调制信号是多个清晰的调制峰. 用一阶和三阶微分洛伦兹线形对 PzR 谱中对应结构的实验数据进行了拟合, 精确确定了与样品的各个组成结构相对应的调制峰的能量位置. 对不同样品 PzR 谱的差异进行了定性的说明.

关键词: 压电调制光谱, InAs/GaAs 表面量子点, 洛伦兹线形拟合

PACC: 7840, 7320D, 3270J

1. 引 言

由于在光学通讯激光器件方面有着潜在的重要应用, 自组织生长 InAs/GaAs 量子点(quantum dots, QDs)一直都是近些年来研究的热点之一. 一般情况下, QDs 波函数由于受到环境势场的作用, 被限制在几百纳米甚至更小的范围之内, 成为零维的量子点结构. 而且, QDs 限制态的特性相对于其他低维量子结构而言, 对环境势场的变化更加敏感^[1]. 当 InAs/GaAs QDs 被宽带隙材料覆盖时, 由于覆盖层的隔离作用, 表面态对 QDs 限制态性质的影响基本可以忽略不计. 然而, 对于覆盖层很薄的靠近表面的 QDs 而言, 表面态对 QDs 限制态性质的影响逐渐显现出来. 对于完全没有任何覆盖层而直接暴露于空气中的所谓表面量子点(surface quantum dots, SQDs)而言, 表面态同 SQDs 限制态之间的耦合、表面态对表面势场的扰动以及 SQDs 在无覆盖层作用时的应力弛豫等都将对 SQDs 的光学性质产生决定性的影响^[2-7].

本文在液氮温度下利用压电调制光谱手段对在以 GaAs(311)B 为衬底的 In_{0.35}Ga_{0.65}As 模板上生长的 InAs SQDs 结构的光学性质进行研究. 调制光谱

测量的实质是介电函数的微分谱, 它的灵敏度和分辨率比非调制的静态光谱要高很多. 它同相敏探测、数字化数据处理等技术结合, 可以探测到被测光谱的小达 10⁻⁶量级的相对变化^[8,9]. 早期对 QDs 光学性质进行研究的谱学手段主要是光致发光谱(photoluminescence, PL), 调制光谱方法则是近些年被引入到对量子点光学性质的研究. Aigouy^[10]等先利用电调整反射谱(electromodulation reflection, ER)在 300K 和 20K 的温度条件下研究了量子点内的带间跃迁, 观察到了在 PL 谱研究中报道的在强激发光功率下才能观察到的量子点的激发态. Rowland^[11]和 Sun^[12]等接着利用光调制光谱(photomodulation reflection, PR)的方法观察到了自组织生长 InAs/GaAs 量子点中的多个激发态的跃迁. 一般情况下, 对于 PL 谱等其他实验方法而言, 要想达到与调制光谱在室温或者液氮温度条件下的同等灵敏度并观察到同样丰富的光谱结构, 需要低得多的甚至液氮温度的温度条件. 这种特点使得调制光谱在量子点光学性质的研究中逐渐成为一种高效实用的研究手段. 然而, 压电调制反射光谱(piezomodulation reflectance spectroscopy, PzR)作为一种同样有效地调制光谱手段, 应用于 InAs/GaAs 表面量子点光学性质的研究工作却没有见到报道. 相对于 ER 谱而言, PzR 谱的

* 国家自然科学基金(批准号:10474107)资助的课题.

† E-mail: bozhang@mail.sitp.ac.cn

测试不需要在样品表面制作电极,实验过程对样品是无损的^[8]。相对于 PR 谱而言,PzR 谱测试过程中没有调制激光直接照射在样品表面,也就没有由于样品表面的荧光效应而带来强背景噪声。

本文得到了来自于外延生长表面量子点样品中各个组成结构(包括 SQDs 本身、被覆盖层掩埋的 InAs QDs, $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板以及 GaAs 衬底等)的调制信号。根据拟合,准确的确定了实验上观察到的各个调制结构对应跃迁的能量位置,并分析讨论了各个调制结构的物理起源。通过对两个不同结构的 SQDs 样品的 PzR 谱的对比分析,指出了可能导致表面量子点的能级结构发生改变的物理原因。

2. 实 验

实验所使用的测量系统是自搭建的压电调制反射测量系统,具体情况可以参考文献[9]。提供调制信号的压电陶瓷由钛锆酸铅多晶(PZT-4 型)制成,用瞬干胶将量子点样品整个背面沾在压电陶瓷的一个电极面上,形成所谓共面应力模式的压力调制。样品的衬底经过了适当的减薄处理,增强了对压电调制信号的响应。压电陶瓷的极化方向沿陶瓷的厚度方向,交流高压电源向压电陶瓷两个电极面上施加的电场有效值大小为 300V/mm。压电陶瓷在与电极面平行的方向产生周期性的伸缩形变,因此导致样品产生的形变幅度 $\Delta l/l$ 约为 10^{-5} 左右。

反射谱测量使用的光源为溴钨灯,经单色仪(英国 ORIEL 公司的 Cornestone130 1/8m 型)分光后靠近样品法线方向入射;光栅行走波长范围为 200nm—1600nm;硅光二极管探测器用来测量被调制反射光光强度,探测得到的信号被锁相放大器放大后经 A/D 转换由计算机记录。实验中的波长范围为 600nm—1600nm,扫描步长为 1nm。锁相放大器使用的参考频率由驱动压电陶瓷的交变电源提供。测量过程中驱动压电陶瓷的交流频率设定为 280Hz。

实验使用的 SQDs 样品^[13],由新的固态源 MBE 方法生长,它的结构如图 1 所示。在 GaAs (311)B 晶面衬底上先生长一层厚度为 300nm 的 GaAs 缓冲层,随后在其上生长一层 1.35nm $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板。紧接着,在这个模板上淀积 0.8ML InAs 层形成 InAs QDs。这层 InAs QDs 则被另外生长的一层厚度为 110nm 的 GaAs 层所覆盖。最后,重复 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板和 InAs 层的生长,InAs 层中形成的 InAs QDs 由

0.8 ML	InAs QDs
1.35 nm	$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板
110 nm	GaAs 覆盖层
0.8 ML	InAs QDs
1.35 nm	$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板
300 nm	GaAs 缓冲层
GaAs (311)B 衬底(SI)	
样品 1	
0.33 ML	InAs QDs
1.6 nm	$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板
110 nm	GaAs 覆盖层
0.33 ML	InAs QDs
1.6 nm	$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板
200 nm	GaAs 缓冲层
GaAs (311)B 衬底(SI)	
样品 2	



图 1 样品 1 与样品 2 的结构示意图。在 GaAs (311)B 衬底上,先生长一层 GaAs 缓冲层(SI),InAs 量子点则生长在 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板上。上层 InAs 量子点由于没有覆盖层直接暴露在空气中,形成了所谓的表面量子点(SQDs)。

于无 GaAs 覆盖层直接暴露在空气中,形成了所谓的表面量子点(SQDs)。在 GaAs (311)B 晶面上, $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板的生长往往会先表现出非稳定性生长的特征,然后再有量子点形成。在应力驱动的非稳定性生长机理作用下,在 GaAs (311)B 晶面衬底上生长出表面形貌为纳米量级的岛状的二维格子单元模板,量子点成核在岛状结构的顶部中心。样品 2 的生长方法、组成结构等同样品 1 完全一样,不同之处在于其组成结构的厚度有一定差异。图 2 为样品 1 与 2 的 AFM 形貌图片。从图片上可以看出这种方法生长出的量子点的密度要比用传统 Stranski-Krastanov (SK) 模式生长出的量子点的密度高 1 个量级,而且量子点的排列更加整齐有序,量子点尺寸大小的起伏也要小很多^[13]。本文中的 InAs/GaAs 量子点压电调制反射光谱的测量都是在液氮温度下进行的。

3. 实验结果与讨论

自组织生长 InAs/GaAs SQDs 样品 1 与样品 2 在液氮温度下测量得到的 PzR 谱线分别如图 3、图 4 中点线所示。实验点线的范围包括了来自样品的所有组成结构的 PzR 谱信号。我们对来自 SQDs 本身、QDs 以及 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板的调制信号,应用一阶微

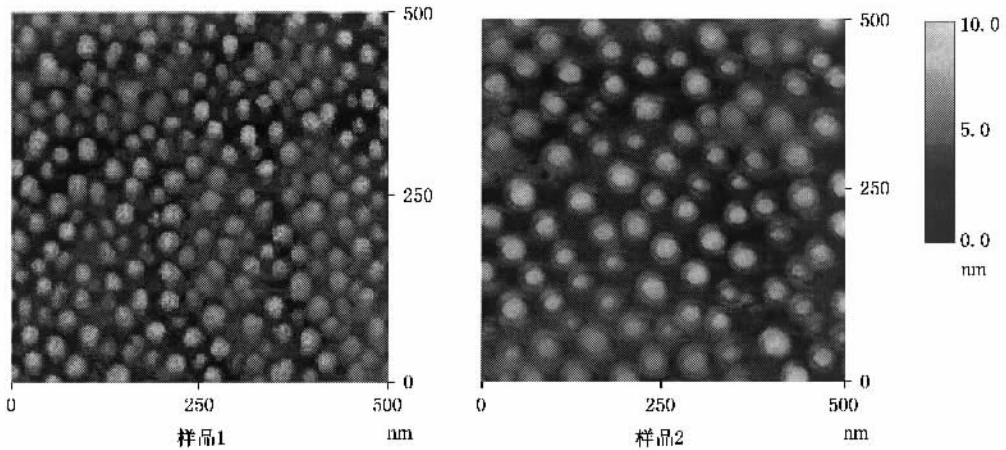


图2 样品1与样品2的AFM形貌图. InAs SQRs形成在In_{0.35}Ga_{0.65}As模板上. 由于应力的调制作用, 模板的表面形貌是二维的格子单元, 如图中小亮点所示. InAs SQRs如图中更大更亮的点所示, 成核在部分二维格子单元的顶部中心

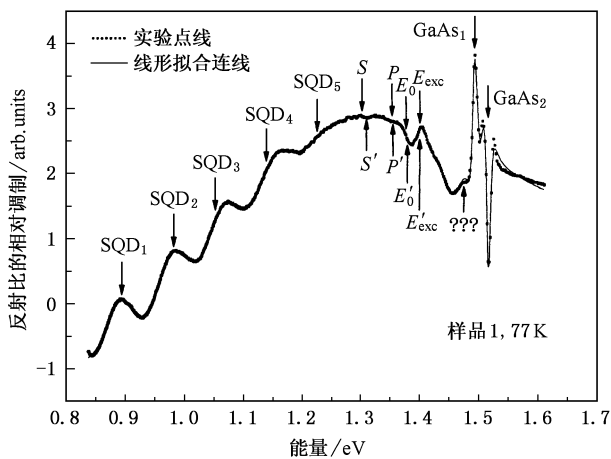


图3 液氮温度下, 样品1的压电调制反射光谱(点线代表实验测量得到的曲线, 实线是经过洛伦兹线形拟合后得到的曲线, 拟合确定的各PzR谱结构的能量位置用下箭头标示在图中, 用问号标记的上箭头代表新观测到的指认有保留的结构, 其他上箭头代表65K温度下PL谱测量得到的各结构的能量位置)

分洛伦兹线形进行了拟合, 对来自GaAs衬底等部分的光谱结构, 应用三阶微分洛伦兹线形进行了拟合. 具体采用的洛伦兹线形公式如下:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sum_n \text{Re} [f_n e^{i\theta_n} (E - E_n - i\Gamma_n)^{-m_n}],$$

其中 R 是反射率, n 代表第 n 个振子, f_n 是振子强度, θ_n 是位相, E 是能量, E_n 是跃迁能量, Γ_n 是展宽因子, m_n 则是微分阶数, 与态密度临界点的类型有关. 对于量子阱、量子点中的受限电子态间的跃迁 $m_n = 1$, 而对于体材料中的禁带跃迁取 $m_n = 3$. 具体计算中通过求理论光谱与实验谱值之间的均方差

最小值而获得拟合参量.

图3中实线是对样品1实验点线应用洛伦兹线形拟合后得到的结果, 拟合得到的PzR谱各个特征结构的能量位置在图中用下箭头标记. 在1.30—1.42eV能量区间, 经拟合得到的跃迁能量位置用下箭头标记为 S, P, E_0 与 E_{exc} . 通过与同一样品65K温度下PL谱^[14]的对比分析, 可以明确的指认 S, P 分别对应着被覆盖层掩埋的InAs QDs的基态 S 与激发态 P ; E_0, E_{exc} 分别对应着In_{0.35}Ga_{0.65}As模板的基态 E_0 与激发态 E_{exc} . 作为比较, 这四个PL谱峰的能量位置也分别用上箭头 S', P', E'_0 与 E'_{exc} 标示于图中. 通过与PL谱峰的能量位置的比较, 我们发现尽管 S, P 对应的PzR谱调制结构不是非常明显, 由线形拟合仍然可以得到跃迁能量的准确位置. PL谱中各荧光峰以及PzR谱经拟合后得到的各结构的能量位置都列在表1中.

在0.775eV—1.24eV的低能量区域, 我们观测到了用SQD1, SQD2, SQD3, SQD4与SQD5标记的多峰调制结构. 尽管Rowland^[11]与Aigouy^[10]等分别在PR, ER谱的研究工作中也观察到过量子点样品的类似的多峰调制结构, 但我们观察到的这些调制峰信号的来源与他们完全不同. Rowland使用的样品是双层QDs样品, 中间用GaAs隔离层隔离, 上下层QDs都被GaAs覆盖. 他们观测到的5个PR谱多峰调制结构来源于这些被GaAs所覆盖的QDs基态和4个最低激发态的跃迁, 对应的能量在1.053—1.277eV之间. Aigouy使用的样品是镶嵌在p-n结中的多层QDs, 也被其他材料所覆盖, 观察到的3个

ER 谱多峰调制结构都起源于被覆盖的 QDs, 对应的能量在 1.140—1.260eV 之间. 总之, 他们观测到的多峰调制信号均来自于被覆盖层掩埋的 QDs. 由于覆盖层的隔离作用, 这些 QDs 的电子态、光学性质等几乎不受表面态的影响. 由于样品 1 不同的结构和生长方法, 我们测量得到的 5 个多峰调制结构都出现在被覆盖层掩埋的 InAs QDs 的 PzR 调制结构 (图中所示的 S, P 峰) 的低能端, 能量在 0.893—1.225eV 之间, 我们认为它们起源于表面量子点 (SQDs) 基态和激发态之间的跃迁. 迄今为止我们没有看到 SQDs 高激发态实验观测的文献报道. Miao 等人^[15]最近利用室温 PL 谱对一表面量子点样品进行了研究, 仅观测到 SQDs 的基态, 能量位置在 0.762eV 附近. 这同 PzR 谱实验中 SQD1 的能量位置基本接近. 由于样品表面大量的非辐射复合中心的存在, 使得 SQDs 的 PL 谱基态峰与覆盖层以下的 QDs 的 PL 峰的强度相比极为弱小, SQDs 更高激发态的 PL 峰的强度就更低, 以致于实验上无法观测到. 由于这个原因, 在 PL 的测量中, 还从来没有观察到过类似我们得到的 PzR 谱的 SQDs 的多峰 PL 谱结构. 从 SQDs 跃迁能量间隔大小看, 这些 SQDs 能级之间的间距 (约 90meV) 明显比被 GaAs 层覆盖的 InAs QDs 的 S, P 能级间隔 (约 50meV) 要大, 而且也明显比 Rowland 与 Aigouy 等通过其他调制光谱得到的 InAs QDs 能级间隔 (约 50—60meV) 大. 这说明该样品中表面态的存在使得 SQDs 的能级间距有增大的趋势. 这五个 SQDs 跃迁的能量间隔分别为 87, 70, 87 和 88meV. 从 SQDs 跃迁能量间隔的均匀性看, 量子点的势场已经偏离了抛物线形势场^[16]. 这同 Rowland 等人关于对有覆盖层覆盖的 QDs 的结论明显不一样, 他们的 PR 谱中 QDs 之间能级间距基本相等, 符合抛物线形势场的特点. 由于样品 1 是表面量子点 SQDs, 没有覆盖层覆盖而直接暴露于空气中. 表面态同 SQDs 限制态之间的耦合、表面态对表面势场的扰动以及 SQDs 在无覆盖层作用时的应力弛豫等都将对 SQDs 所处的势场产生大的变化, 对其光学性质产生决定性的影响, 这在我们 PzR 谱的测试中得到了明确的反应. 压电调制对表层量子点的影响要比对埋在表面层以下的 QDs 的影响更大, 这反应在图 3 中 SQDs 的 PzR 谱峰的强度与 QDs 的 PzR 谱峰强度的对比上. 几个 SQDs 的 PzR 谱峰的强度比 QDs S 态峰的能量略大, 比 QDs P 态峰的能量则要大一到两个量级, 比同样在表面层以

下的 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板的基态 E_0 与激发态 E_{exc} PzR 谱峰的强度也要大一到两个量级.

在能量大于 1.48eV 的高能区域, 是与 GaAs 相关的 PzR 谱结构. 在大多数的光谱测量中, 观测到的与 GaAs 相关的调制峰都只有一个. 我们却在本次 PzR 谱的测试中观测到两个峰, 分别在图 3 中标记为 GaAs1, GaAs2. 这两个调制峰的能量间隔约为 0.01eV. 我们认为这个原因是因为 GaAs 衬底、缓冲层或者覆盖层中的应力不一样造成的. Aigouy 在他们的 ER 测试中, 也观测到两个间隔在 0.065eV 左右的 GaAs 相关的调制峰, 它们是由于 GaAs 层中重掺杂引起的带隙的 Burstein-Moss 蓝移效应引起的, 因此他们观测到的两个 GaAs 相关的峰的间隔也要大得多. 根据拟合, 还在 1.467eV 处发现一微小结构, 用问号标记, 这在 Rowland 和 Aigouy 等人的调制光谱中没有报道过. 从拟合的过程来看, 用洛伦兹线形一阶微分进行拟合的结果比较理想, 说明它的出现与 GaAs 不相关. 另外, 此结构距离 GaAs1, GaAs2 间隔太小, 而且强度要弱很多, 对它的指认有一定的困难. 由于在传统的没有模板结构的量子点样品中没有观测到类似的光谱结构, 我们认为它的出现可能与 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板有关.

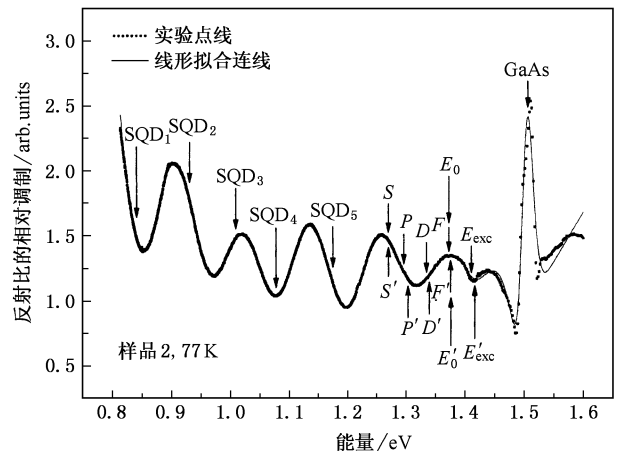


图 4 液氮温度下, 样品 2 的压电调制反射光谱 (点线代表实验测量得到的曲线, 实线是经过洛伦兹线形拟合后得到的曲线, 拟合确定的各 PzR 谱结构的能量位置用下箭头标示在图中, 上箭头代表 65K 温度下 PL 谱测量得到的各结构的能量位置)

图 4 中实线是对样品 2 实验数据应用洛伦兹线形进行拟合后得到的结果. 在 65K 温度下, 样品 2 中被覆盖层掩埋的 InAs QDs 的各 PL 谱峰出现在 1.25—1.38eV 能量区间^[14]. PL 谱测量得到 InAs QDs 的基态与激发态的能量位置分别用 $S', P', D', E'_0, E'_{\text{exc}}$

F' 等上箭头标示于图中. 此外, 还用 E'_0 与 E'_{exc} 标示出了 PL 测量得到的 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板的基态与激发态的能量位置. $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板基态 E'_0 与 InAs QDs 的激发态 F' 的能量位置基本重合. 在 PzR 谱中, 除了 InAs QDs 的基态外, 其余激发态的位置不是很明显. 原因同样归结于压电调制对表面层以下部分的结构的影响相对较小. 在拟合中, 将 PL 谱测量得到的各激发态作为初始值进行拟合, 拟合得到的结果用下箭头 S, P, D, F, E_0 与 E_{exc} 等标示, 同 PL 谱测量的结果基本一致, 而且线形符合程度非常高.

标记为 SQD1, SQD2, SQD3, SQD4, SQD5 的结构, 同样品 1 一样, 对应 SQDs 的基态和激发态跃迁.

表 1 样品 1 与样品 2 在液氮温度下 PzR 中各结构对应的能量位置(单位为 eV). 由拟合算法的协方差矩阵确定的拟合误差最大为 3meV. 作为比较, 同时列出了样品在 65K 温度下的 PL 谱测试结果. 空白格子意味着该处所代表的态在 PzR 或者 PL 实验上没有被观测到

样品	光谱	SQD1	SQD2	SQD3	SQD4	SQD5	S	P	D	F	E_0	E_{exc}	?	GaAs1	GaAs2
样品 1	PzR	0.893	0.980	1.050	1.137	1.225	1.300	1.350			1.376	1.401	1.467	1.493	1.516
	PL						1.310	1.348			1.378	1.397			1.507
样品 2	PzR	0.840	0.930	1.008	1.077	1.173	1.266	1.296	1.334	1.372	1.372	1.411			1.502
	PL						1.270	1.305	1.339	1.375	1.378	1.397			1.507

样品 1 与样品 2 PzR 谱中对应结构的能量位置不同的原因是多方面的. 首先, 量子点本身的形状、尺寸、高度、密度等对量子点的能级位置有决定性的影响. 另外, 对于多层量子点而言, 在 GaAs 覆盖层不太厚的情况下, 它的隔离作用也相对有限. 由于纵向自组织效应, 各层量子点之间是纵向对准和电学耦合的. 尽管样品 1 与样品 2 GaAs 覆盖层有相同的厚度 110nm, 但它们 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 层厚度不同, 量子点的密度相差比较大, 这就造成了纵向耦合大小差异, 同时也对同层量子点间的横向耦合有较大影响. 表面量子点层的情况更要复杂. Miao 等最近在这方面的研究结果表明^[15], 表面量子点内部的应力分布及弛豫会导致能带隙大小的改变, 表面势的存在以及表面态同量子点内部限制态间的耦合等对量子点的光学性质有重要的影响. 这些因素综合作用的结果导致了不同样品 PzR 谱中标记为 SQDs 等结构的能量位置不相等、间隔大小不均匀.

SQD1 结构在实验点线长波方向, 由于仪器测试范围的限制, 不能完整地测量出来. 线形拟合结果则明确了它的存在及能量位置. 五个 SQDs 跃迁的能量间隔, 分别为 90, 78, 69 和 96meV. SQDs 跃迁能量间隔不均匀, 差异比样品 1 更大. 这种能量间隔的不均匀性也是表面态对 SQDs 作用的结果. 由于样品 2 的 SQDs 层的厚度 0.33ML 比样品 1 的厚度 0.8ML 薄很多, 因而表面态对其 SQDs 能级的扰动也更大. 此样品 PzR 谱中只观察到一个与 GaAs 相关的特征峰结构, 对应的能量为 1.502eV. SQDs, QDs, $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板以及 GaAs 相关结构等经拟合后确定的能量位置列于表 1 中.

4. 结 论

在 77K 温度下, 运用压电调制光谱方法观测到了来自以 $\text{GaAs}(311)B$ 为衬底的 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板上生长的 InAs SQDs 样品中 SQDs、被覆盖层掩埋的 InAs QDs, $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板、 GaAs 衬底等各个组成结构的调制光谱信号, 观测到 SQDs 多个激发态. 用洛伦兹线形一阶微分方法对 SQDs, QDs, $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 模板等结构对应的 PzR 谱实验曲线进行了拟合, 用洛伦兹线形三阶微分方法对与 GaAs 衬底等相对应的 PzR 谱结构进行了拟合, 精确确定了它们的能量位置. 量子点本身的结构、形状、尺寸、高度、密度和表面量子点态的存在, 以及纵向、横向量子点之间的耦合等, 造成了量子点能级的位置和间隔大小的差异. 表面态的存在使得 SQDs 的能级间距不均匀, 量子点的束缚势场偏离了抛物线形势场.

- [1] Ustinov V M , Zhukov A E , Maleev N A , Kovsh A R , Mikhlin S S , Volovik B V , Musikhin Yu G , Shernyakov Yu M , Maximov M V , Tsatsul'nikov A F , Ledentsov N N , Alferov Zh I , Lott J A , Bimberg D 2001 *J. Cryst. Growth* **227-228** 1155
- [2] Miao Z L , Chen P P , Lu W , Xu W L , Li Z F , Cai W Y , Shi G L , Shen S C 2000 *Phys. Lett. A* **273** 271
- [3] Dreybrodt J , Forchel A , Reithmaier J P 1993 *Phys. Rev. B* **48** 14741
- [4] Liu X Q , Lu W , Xu W L , Mu Y M , Chen X S , Ma Z H , Shen S C , Fu Y , Willander M 1997 *Phys. Lett. A* **225** 175
- [5] Shen H , Dutta M , Fotiadis L , Newman P G , Moerkirk R P , Chang W H 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 2118
- [6] Chen P P , Miao Z L , Lu W 2001 *J. Cryst. Growth* **227-228** 108
- [7] Moison J M , Eleess K , Houzay F , Marzin J Y , Gerard J M , Barthe F , Bensoussan M 1990 *Phys. Rev. B* **41** 12945
- [8] Shen X C 2002 *Semiconductor spectra and optical properties* (Beijing : Science Press) 158 (in Chinese) 沈学础 2002 半导体光谱和光学性质 (北京 : 科学出版社) 第 158 页]
- [9] Wang C , Chen P P , Zhou X C , Xia C S , Wang S W , Chen X S , Lu W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3337 (in Chinese) 王 堯、陈平平、周旭昌、夏长生、王少伟、陈效双、陆 卫 2005 物理学报 **54** 3337]
- [10] Aigouy L , Holden T , Pollak F H , Ledentsov N N , Ustinov W M , Kop'ev P S , Bimberg D 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 3329
- [11] Rowland G L , Hosea T J C , Malik S , Childs D , Murray R 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3268
- [12] Sun B Q , Lu Z D , Jiang D S , Wu J Q , Xu Z Y , Wang Y Q , Wang J N , Ge W K 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2657
- [13] Gong Q , Nötzel R , Hamhuis G J , Eijkemans T J , Wolter J H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3254
- [14] Wang F Z , Chen Z H , Bai L H , Huang S H , Shen S C , Gong Q , Nötzel R 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1310
- [15] Miao Z L , Zhang Y W , Chua S J , Chye Y H , Chen P , Tripathy S 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 31914
- [16] Drexler H , Leonard D , Hansen W , Kotthaus J P , Petroff P M 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2252

A piezomodulated reflectance study of InAs/GaAs surface quantum dots *

Yu Chen-Hui¹⁾ Wang Chong¹⁾ Gong Qian²⁾ Zhang Bo^{1)†} Lu Wei¹⁾

1) *National Laboratory for Infrared Physics , Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China*

2) *State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics , Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200050 , China*

(Received 1 September 2005 ; revised manuscript received 20 March 2006)

Abstract

Piezomodulated reflectance (PzR) spectra have been measured for two samples of InAs surface quantum dots (SQDs) deposited on GaAs (311)B substrates with In_{0.35}Ga_{0.65}As template. At 77K multiple confined-state SQDs transitions can be clearly resolved from the PzR spectra . The detailed optical transition features of SQDs , QDs buried by capping layer , In_{0.35}Ga_{0.65}As template and GaAs substrate layers were obtained from well-fitted PzR spectra using the first or third derivative of a Lorentz line shape. Differences between PzR results of two samples were discussed qualitatively.

Keywords : piezomodulated reflectance spectra , InAs/GaAs surface QDs , Lorentz line shape fitting

PACC : 7840 , 7320D , 3270J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10474107).

† E-mail : bozhang@mail.sitp.ac.cn