

InGaAs/GaAs 应变量子阱光伏谱 激子峰展宽的研究*

吴正云 王小军 黄启圣

(厦门大学物理系 厦门 361005)

摘要 实验得到不同温度下应变 InGaAs/GaAs 量子阱的光伏谱, 通过理论计算与实验结果的比较, 对各谱峰进行了指认. 本文着重考察各样品中 11H 跃迁的激子谱峰的半宽随温度及阱宽的变化, 讨论谱峰展宽机制中的声子关联、混晶组分起伏及界面不平整对线宽的影响

PACC: 7240, 7280

1 引言

随着半导体材料薄层外延技术的发展, 高质量的应变 InGaAs/GaAs 半导体量子阱、超晶格材料在光电子器件的应用得到广泛的重视. 用表面光伏谱方法研究量子阱、超晶格体系的光学性质无需制作样品电极、不破坏样品, 可以避免意外沾污, 对测量样品的尺寸及结构无特别要求, 测量灵敏度高. 与光致发光、光吸收等其他方法相比较, 光伏谱方法的设备及测量过程比较简便.

有关低维半导体低温光伏谱的研究尚不多^[1-3]. 光伏响应涉及的因素较多, 除与光吸收相关之外, 还包含有光生载流子在电场(表面电场及内建电场)作用下的输运(漂移、扩散)及通过表面态和深中心复合的信息. 本文通过不同温度下应变 InGaAs/GaAs 量子阱的实验光伏谱, 着重研究影响激子谱峰展宽的可能机制, 其结果可与已有的其他方法得到的结果相比较.

2 实验

实验样品为在半绝缘 GaAs 衬底上, 采用 MOCVD 生长方法, 在衬底温度为 580 °C 条件下生长的 InGaAs/GaAs 应变量子阱. 样品(1)含有 4 个阱宽分别为 4、7、12.2 和 16nm 的量子阱, 由于阱间由宽度为 100nm 的势垒隔开, 实际上是 4 个单量子阱. 样品(2)及样品(3)各为阱宽为 10 及 5nm 的单量子阱. 样品(1)及样品(2)中的 In 组分为 0.18, 样品(3)中的 In

* 国家自然科学基金和福建省自然科学基金资助项目
吴正云 男, 1957 年出生, 博士, 副研究员, 目前从事低维半导体物理研究
1997-11-03 收到, 1998-08-25 定稿

组分为 0.165

光伏谱测量系统由光源、斩波器、双光栅单色仪、静电计管放大器、单色仪扫描控制器、锁相放大器、低温循环致冷机、BM 486 微机组成。微机作为测量控制、数据采集和数据处理中心,可实现系统的自动测量、显示及记录。单色光入射到样品的前表面,产生在样品前后表面的光伏信号,通过电容耦合方式输出到极高输入阻抗的静电计管放大器。实现阻抗变换后,光伏信号由 EG&G5206 型锁相放大器检测,锁相放大器同时将讯号通过 A/D 卡变换后,送入微机。

3 实验结果与讨论

在不同的温度下,测量了样品的光伏谱。图 1 示出样品(1)、(2)、(3)的典型结果(只示出 3 个温度点)。谱图上各箭头表示的谱峰以 nmH 或 nmL 标记,分别代表自导带第 n 个子

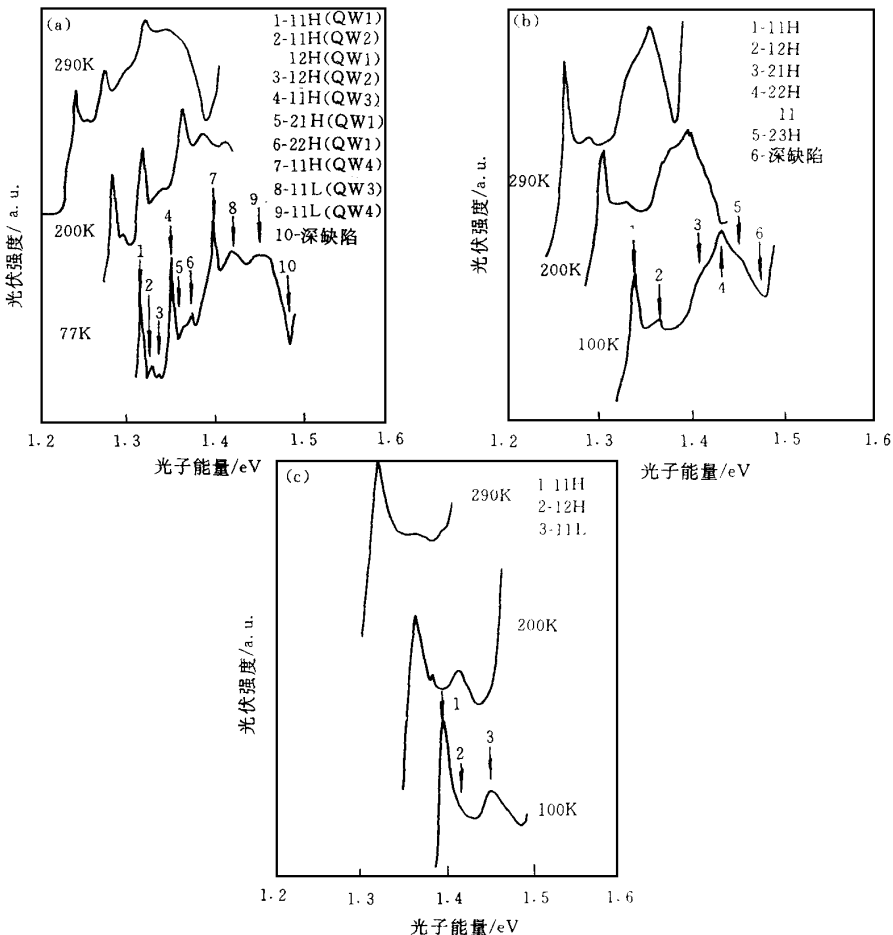


图 1 不同温度下的光伏谱

(a) 样品(1): QW 1~ QW 4 各代表阱宽 16nm、12.2nm、7.4nm、4nm 的量子阱;

(b) 样品(2): 阱宽 9.7nm; (c) 样品(3): 阱宽 5nm.

能级到价带重空穴第 m 个子能级或到价带轻空穴第 m 个子能级的跃迁 在温度 100K 左右, 光伏谱精细结构最清楚

为了对上述光伏谱图中各个激子跃迁峰进行辨认, 对 InGaAs/GaAs 应变量子阱的子能级分布进行了理论计算 计算中, 采用有效质量近似的有限方势阱模型并考虑应变对量子阱能带结构的影响, 取导带带阶因子 Q_c 为 0.70, 激子束缚能为 6~8meV^[4], 无应变时的 In_xGa_{1-x}As 带隙 E_g^0 在不同的温度下近似为^[5]:

$$E_g^0(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) = E_g(\text{GaAs}) - 1.47x + 0.375x^2 \quad (1)$$

式中 $E_g(\text{GaAs})$ 为 GaAs 在不同温度下的带隙宽度, x 为量子阱中 In 的组分

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T + \beta)} \quad (2)$$

其中 $E_g(0) = 1.519\text{eV}$, $\alpha = 5.405 \times 10^{-4}(\text{eV}/\text{K})$, $\beta = 204\text{K}$ 通过计算与实验结果的良好吻合, 认定相应的各个子能级之间的跃迁 在接近 GaAs 禁带边, 光伏信号的“凹峰”, 可能是由于 InGaAs 和 GaAs 界面的深能级导致光伏信号的淬灭^[6]所引起的

从图中可以看到, 属于 $\Delta n = 0$ 的允许跃迁的 1H 跃迁强度最大(样品(1)中 QW2 的 1H 强度较低). 以下着重对各样品的 1H 跃迁激子谱峰的展宽进行分析

3.1 应变量子阱激子峰线宽的温度关系

由于量子阱中二维激子特性, 即使在室温条件下, 也可以在光吸收谱^[7]、光伏谱上清晰地观察到激子跃迁峰, 因此, 可以在较宽温度范围内研究激子线宽随温度的变化

激子线宽是与激子弛豫动力学和非线性光学相联系的 量子阱材料激子谱峰的半宽 Γ 一般可示为^[8~10]:

$$\Gamma = \Gamma_i + \Gamma_h$$

$$\Gamma_h = \Gamma_c \{ \exp(E_{ph}/k_B T) - 1 \}^{-1} \quad (3)$$

上式中 Γ_h 表示与样品温度有关的热展宽, 主要描述与声子的关联作用, 其中 Γ_c 为比例常数; E_{ph} 为纵光学声子能量; Γ_i 表示除热展宽以外的其他因素引起的非均匀谱形展宽, 在低温下, 忽略热展宽时, $\Gamma = \Gamma_i$ Γ_i 一般还可表示为:

$$\Gamma_i = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 \quad (4)$$

其中 Γ_1 表示混晶组分起伏引起的谱形展宽; Γ_2 代表界面不平整及阱宽不均匀等引起的谱形展宽; Γ_3 为电离杂质随机分布产生的电场导致的谱形展宽 当杂质浓度为 10^{16}cm^{-3} 量级时, 电场导致的谱形展宽小于 1meV ^[11] 本文所用的样品均为非有意掺杂, 背景浓度通常只有 $2 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 量级, 因此上式中的 Γ_3 可忽略不计

图 2(a) 示出样品(1)的 QW1 量子阱的 1H 跃迁峰的半宽随温度的变化 图中实线表示根据(3)式对实验结果的拟合, 拟合计算中采用的纵光学声子能量 $E_{ph} = 35\text{meV}$. 由拟合得到样品(1)的 QW1 的 $\Gamma_i = 2.75\text{meV}$, $\Gamma_c = 20.3\text{meV}$. 对于 In_{0.20}Ga_{0.80}As, 由于混晶无序的谱形展宽部分估计约为 $\Gamma_i = 2.0\text{meV}$ ^[4], 这个结果表明, 样品(1)中由混晶组分起伏引入的非均匀展宽是主要的, 说明样品生长界面良好, 有较高的生长质量 作为比较, 我们还测量了样品(2)和样品(3)的线宽随温度的变化, 如图 2 的(b), (c)所示 根据拟合, 样品(2)、(3)的非均匀展宽 Γ_i 分别为 3.76 和 4.23 meV, 比样品(1)的 Γ_i 要大, 说明这两个样品在扣除由于混晶无序的谱形展宽部分外, 其界面不平整等引起谱形展宽比样品(1)大, 因此样品(2)、(3)的质量比样品(1)要差一些

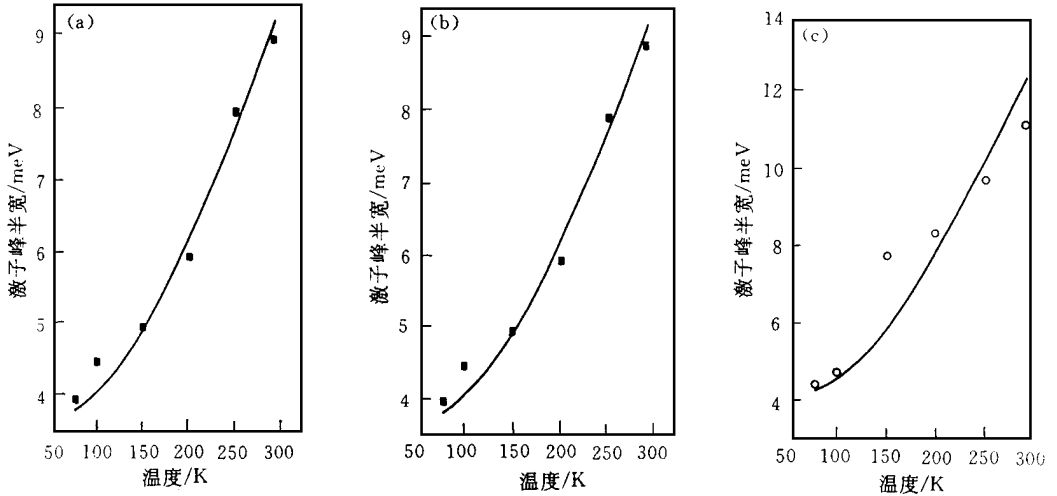


图 2 样品 11H 跃迁峰的半宽与温度的关系

(a) 样品(1)QW 1 量子阱, 阱宽 16nm; (b) 样品(2), 阱宽 9.7nm; (c) 样品(3), 阱宽 5nm.

3.2 应变量子阱激子峰线宽与阱宽的关系

我们还可由光伏谱峰的半宽与阱宽的关系, 来考虑激子峰非均匀展宽的可能起因 图 3 示出在同一样品(1)中 4 个量子阱的 11H 光伏谱峰的半宽随阱宽的变化, 可以看到, 谱峰半

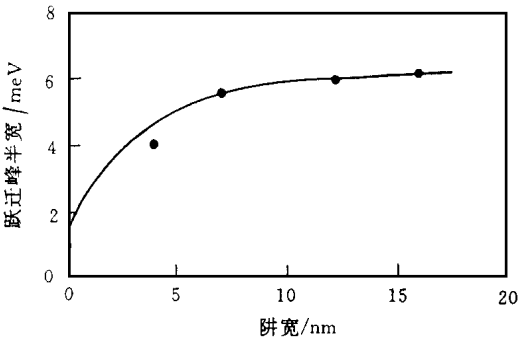


图 3 样品(1)各量子阱的 11H 跃迁峰的半宽与阱宽的关系

宽随阱宽增加而增大的趋势, 这与混晶组分起伏引入的谱形展宽的理论^[12]是一致的 而由界面不平整引入的展宽, 它随阱宽应是先增加而后减少, 与我们实验观察到的结果相反 这里再次表明对样品(1)由混晶组分起伏引入的谱形展宽是主要的

4 结论

测量了不同温度下应变 $In_{0.18}Ga_{0.80}S_2/GaAs$ 量子阱的光伏谱, 通过理论计算与实验结果的比较, 对测量的谱峰进行了指认 着重考察了样品各激子跃迁峰半宽随温度及阱宽的变化, 并进行理论拟合, 分别获得谱峰展宽机制中的声子展宽、混晶组分起伏及界面不平整展宽三部分. 由低温下激子线宽的非均匀展宽的分析, 说明与样品的生长界面状态的可能联系 结果表明, 与其他实验方法比较, 表面光伏谱方法, 也可以有效地用于研究低维半导体的有关性质

参 考 文 献

- [1] B. Y. Hua, E. Fortin, A. P. Roth *et al* , Appl Phys Lett , 1988, **53**(12): 1062~ 1064
[2] 罗昌平, 江德生, 等, 半导体学报, 1995, **16**(7): 487~ 490
[3] 崔丽秋, 江德生, 等, 半导体学报, 1996, **17**(7): 557~ 560
[4] W. Z. Shen, W. G. Tang, S. C. Shen *et al* , Appl Phys Lett , 1994, **65**: 2728~ 2730
[5] J. Y. Mazin *et al* , Phys Rev. , 1985, **B31**: 8298~ 8301; Appl Phys Lett , 1983, **43**: 560~ 562
[6] Jianbao Wang, Dawei Gong, Fang Lu *et al* , Appl Phys Lett , 1995, **66**: 1782~ 1785
[7] W. Z. Shen, W. G. Tang, S. C. Shen *et al* , Appl Phys , 1995, **A60**: 243~ 245
[8] K. F. Huang, K. Tai, S. N. G. Chu *et al* , Appl Phys Lett , 1989, **54**: 2026~ 2028
[9] K. Tai, J. Hegarty and W. Tsang, Appl Phys Lett , 1987, **51**: 152~ 156
[10] R. P. Stanley, J. Jegarty and R. D. Feldman, Appl Phys Lett , 1988, **53**: 1417~ 1421
[11] B. Deveaud *et al* , Phys Rev. , 1973, **B8**: 535~ 540
[12] J. Singh, K. K. Bajaj, J. Appl Phys , 1985, **57**(12): 5433~ 5437.

Study on Exciton Line Broadening of Photovoltaic Spectra in Strained InGaAs/GaAs Quantum Well

Wu Zhengyun, Wang Xiaojun, Huang Qisheng

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005)

Received 3 November 1997, revised manuscript received 25 August 1998

Abstract The photovoltaic effect of strained InGaAs/GaAs quantum well is studied at varied temperatures. With the comparison of the theoretical calculations and experimental results, the transition peaks between the sub-bands are identified. The full width at half maximum (FWHM) of the transition peaks as a function of temperature and well width for different samples is investigated emphatically. The influences of exciton-phonon coupling, alloy disorder and interface roughness on the broadening mechanism of the transition peaks is discussed.

PACC: 7240, 7280