

文章编号: 1000-7032(2010)05-0619-05

In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 单量子阱 PL 谱温度特性及其机制

魏国华¹, 王 斌^{1,2*}, 李俊梅¹, 曹学伟¹, 张存洲^{1,2}, 徐晓轩^{1,2}

(1. 南开大学 物理科学学院, 天津 300071;

2. 南开大学 弱光非线性光子学材料先进技术及制备教育部重点实验室, 天津 300457)

摘要: 测量了不同阱宽 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 单量子阱的 PL 谱的峰值波长和荧光谱线半峰全宽随温度的变化。利用 Varshni 公式对实验峰值波长进行拟合, 得到了新的参数。结果表明, 无位错应变量子阱带隙仍具有其体材料的特性: 荧光谱线半峰全宽随温度升高迅速展宽, 这主要归因于声子关联作用增强和激子热离化为自由载流子所致; 阱宽越窄荧光峰值能量越高, 将其与量子尺寸效应的理论计算结果进行了比较。文中还考察了谱线半峰全宽和阱宽的关系, 利用合金无序对这一现象进行了解释。

关键词: In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 单量子阱; PL 谱; 温度; 荧光峰半峰全宽

中图分类号: O472.3; O482.31 **PACS** 73.20.Hb; 78.55.Cr **PACC:** 7320D; 7855E **文献标识码:** A

1 引 言

光致发光 (PL) 光谱是研究半导体量子阱导带与价带之间跃迁及激子效应的一种极其重要的方法, 同时测试样品的 PL 谱无需制作像电伏谱一样的电极, 乃至影响样品, 故 PL 谱测试方法以其高灵敏度得到了广泛的应用。PL 谱可用于 MBE 生长的监测, 研究材料的发光特性、杂质、缺陷等等, 随着 PL 谱探测灵敏度不断提高, 它已经成为研究量子阱光学性质的一种常用方法。目前虽有不少文献报道了一些有关 InGaAs/GaAs 量子阱的荧光性质, 包括温度性质和激子发光特性^[1-7], 但对量子阱阱层带隙和体材料带隙在温度性质上的相似性和差异鲜有报道, 而大多又不恰当地引用体材料的拟合参数对阱层作一些理论计算和参数拟合, 以致在阱层带隙与 In 含量定量关系上众说纷纭^[1,4,8], 难以协调。本文系统地研究了儿种不同阱宽 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 单量子阱的 PL 谱的峰值波长和荧光谱线半峰全宽随温度的变化规律及其机制, 利用 Varshni 公式对实验峰值能量进行了拟合, 得到了新的参数, 结果表明无位错应变量子阱带隙仍具有其体材料的这一特性,

并作了理论分析; 还对其他相关性质进行了精确的计算和理论分析, 对相关材料的生长和相关器件的制作具有更好的理论指导价值。

2 实 验

2.1 样品

实验所用样品是采用 MBE 生长的 InGaAs/GaAs 单量子阱。其结构如图 1 所示, 在 GaAs (100) 衬底上生长了 300 nm 的缓冲层, 接着生长阱层, 再生长一层 GaAs 盖层, 厚度为 200 nm。根据文献 [9] 报道, In 组分为 0.2 的该类量子阱在应变层不发生位错时的临界厚度为 12 nm。实验所用样品参数列于表 1。

GaAs barrier layer 200 nm
In _{0.2} Ga _{0.8} As SQW 6~8 nm
GaAs buffer layer 300 nm
GaAs substrate

图 1 实验中单量子阱的结构

Fig. 1 The structure of the experimental SQW

收稿日期: 2009-12-29 修订日期: 2010-01-28

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目基金 (07ZCKCGX03600); 南开大学新教师科研启动基金 (J02034); 南开大学物理学基地教学基金 (J0730315); 南开大学本科生创新科研百项工程基金 BXG-168); 中央高校基本科研业务费专项基金 (65010981/65010821) 资助项目

作者简介: 魏国华 (1989-), 男, 四川广安人, 主要从事纳半导体器件的研究。

*: 通讯联系人; E-mail: wlb@nankai.edu.cn

表 1 实验用样品 A、B、C、D 的参数

Table 1 Parameters of samples A, B, C, D

样品	A	B	C	D
h 组分	0.2	0.2	0.2	0.2
阱宽 (nm)	6	7	8	8
阱层生长温度 (°C)	535	535	535	535
阱层生长 As 压 (%)	90	90	90	85

2.2 PL 谱测试

图 2 是自组装 PL 谱测试平台示意图。532 单模半导体激光器所发激光经半透半反镜并用显微物镜 (NA 0.15, 5×) 汇聚到样品上, 信号经显微物镜、半透半反镜、滤光片汇聚到单色仪。为增强信噪比, 使用了斩波器 (SR-540 型) 和锁相放大器 (EG&G 5208 型)。

实验对样品 A、B、C、D 在不同温度下的 PL 谱进行了测试, 测试温度分别为 125、170、215、260 K。

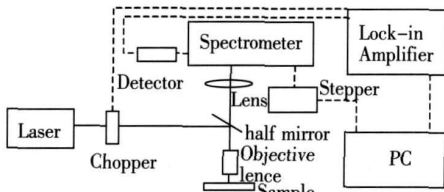


图 2 PL 谱测试系统框图

Fig. 2 Experimental arrangement used for PL spectrum measurement

3 结果与讨论

3.1 单量子阱 PL 谱的温度变化特性

图 3 显示了不同温度下样品 D 的 PL 谱。温度分别为 125、170、215、260 K, 对应峰位分别为 972、984、996、1 014 nm。可见两个非常明显的现象: 首先是随着温度升高, PL 谱峰值红移; 其次是荧光峰半峰全宽明显增大 (谱线展宽)。PL 峰值红移说明随着温度升高, 量子阱带隙变窄。实验所得跃迁能量随温度的变化如图 4 所示。

根据 Varshni 推荐的公式^[10], 半导体带隙宽度和温度存在如下关系:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T}{\beta + T} \quad (1)$$

$E_g(0)$ 是温度 T 为 0 K 时的带隙宽度, α 、 β 为参数, 与材料有关。我们用实验所测得的数据对

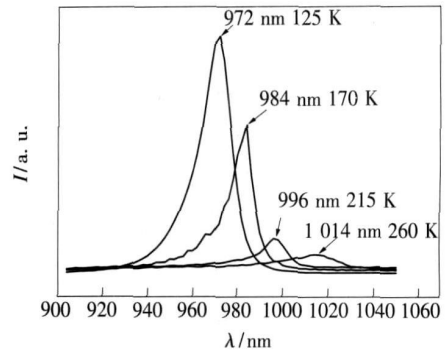


图 3 样品 D 在不同温度下的 PL 谱

Fig. 3 Temperature dependence of the PL spectra of sample D

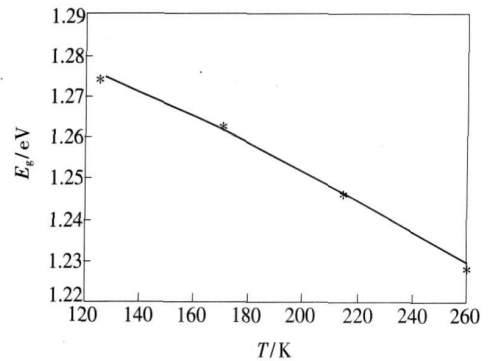


图 4 样品 D 峰值能量随温度的变化, 星号为实验峰值, 实线为拟合曲线。

Fig. 4 Temperature dependence of the peak energy of sample D; The asterisks represent experimental peak energy and the solid line is the fitting line.

Varshni 公式进行了拟合, 得到参数:

$$\alpha = 6.3 \times 10^{-4}, \beta = 400 \text{ K}, E_g(0) = 1.294 \text{ eV}.$$

上述结果说明: Varshni 公式虽是从体材料得来, 但在一定的温度范围内 (本文 125~260 K) 它仍然可以对量子阱材料作出很好的拟合, 这种应变的量子阱阱层材料的带隙有其体材料的基本特征。这可以从 Varshni 公式来理解。Varshni 当初考虑到了 (1) 由于温度升高晶格热膨胀导致的能隙变化; (2) 主要因为电子-声子相互作用导致的导带价带相对位置的改变^[10-12]。而只要量子阱层材料在温度变化范围内仍然处于弹性应变而没有发生晶格失配位错, 那么它也应该仍表现出以上两个性质。在较早的有关工作^[13]中, 曾经阐述了如下的观点: 价键的配位数和晶格的近程有序性是决定能带结构基本特征 (如禁带宽度) 的主要因素, 而晶格的远程有序性则影响其细节 (如带尾和子能级以及载流子的输运性质等), 这与我们的上述分析是一致的。

3 2 应变单量子阱发光峰位与阱宽的关系

图 5 显示了不同阱宽单量子阱在 170 K 的光谱峰位。从图中可以看到, 随着阱宽变窄发光峰位出现蓝移。为解释这一现象, 我们可以将量子阱近似为一维有限深势阱, 对其进行简单的理论计算。导带电子或价带空穴满足定态薛定谔方程:

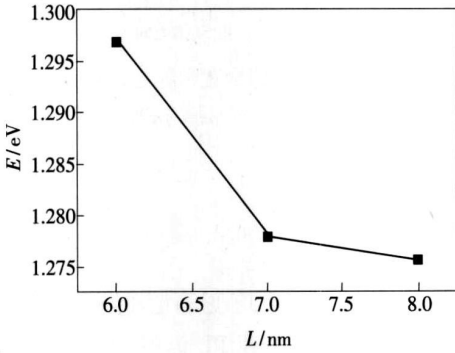


图 5 样品 A, B, C 在 170 K 的 PL 谱峰位。

Fig 5 Peak energy of PL spectra of sample A, B, C at 170 K.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + V(x) \cdot \psi(x) = E \psi(x), \quad (2)$$

其中:

$$V(x) = \begin{cases} 0 & |x| < L/2 \\ V_0 & |x| > L/2 \end{cases} \quad (3)$$

L 代表阱宽; 满足边界条件的偶宇称解 (奇宇称解有相似性质, 只不过基态的解为偶宇称) 满足方程:

$$\tan\left[\frac{\sqrt{2m^* E}}{2\hbar} \cdot L\right] = \frac{\sqrt{V_0 - E}}{\sqrt{E}} \quad (4)$$

根据文献 [1], GaAs 带隙在 125 K 为 1.493 5 eV, $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 为 1.281 5 eV, 根据文献 [4] 所给公式和参数, 计算其应变能为 0.067 64 eV, 导带带阶因子考虑为 $0.7^{[1,3]}$, m^* 为 0.67 电子质量^[14], 则导带电子能级和阱宽的关系如图 6 所示。价带空穴解是相似的。由图 6 可见, 阱内能级是分离的且阱越窄, 对同一个能级, E 值越高, 这就解释了以上实验现象。

另外, 从图 4 可以看到, 125 K 的跃迁峰值能量为 1.275 eV, 考虑激子束缚能 $6 \sim 8 \text{ meV}^{[1,15]}$, 则从以上分析可知, 跃迁发生在导带第一子带和价带第一重空穴带之间。这和一些文献的报道^[2-4,12]是一致的, 如图 7 所示。

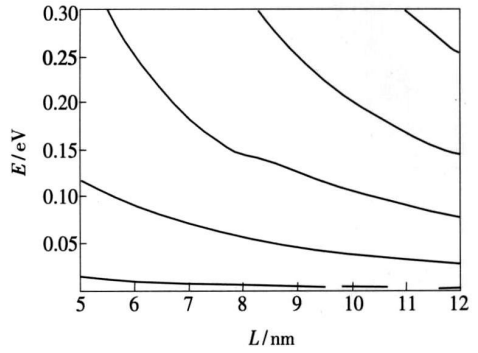


图 6 导带能级和阱宽的关系

Fig. 6 SQW width dependence of the energy levels in conduction band

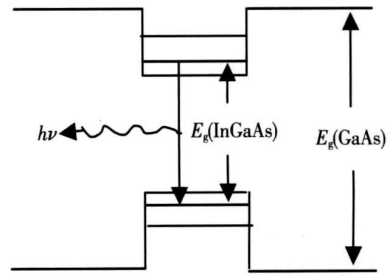


图 7 量子阱带隙和带间复合发光

Fig. 7 The band gap and recombination in SQW

3 3 应变单量子阱发光峰半峰全宽与温度和阱宽的关系

量子阱 PL 谱其发光峰半峰全宽主要由激子-声子相互作用 (与温度有关)、结构不平整和化学组分起伏 (合金无序) 以及量子尺寸效应等引起。

3 3 1 应变单量子阱发光峰半峰全宽与温度的关系

图 8 显示了样品 D 的发光峰半峰全宽随温度的变化曲线。另外, 从图 3 还可以看出, 温度越高, 高能带尾展宽越多。

量子阱 PL 谱显示了量子阱激子发光特性, 其线宽主要由两部分造成, 一是与温度有关的热展宽, 二是与其他因素有关的非均匀展宽, 包括混晶组分起伏、表面不平整度、阱宽不均匀、杂质等等^[1]。由于我们研究的是其温度特性, 激子峰随温度急剧展宽说明随着温度升高, 激子-声子耦合增强^[5,14]。仔细观察谱线展宽, 我们还发现温度越高, 增宽速率越大, 这说明温度越低, 自由载流子越难形成, 束缚着的激子越多, 发光以束缚激子复合发光为主, 展宽不明显; 温度越高, 自由载流

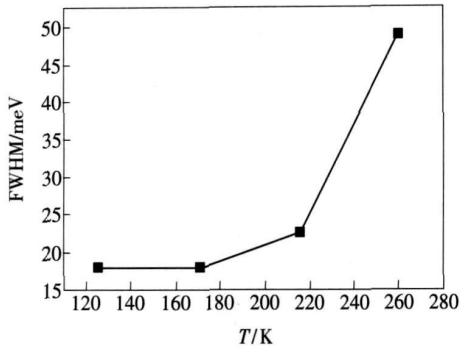


图 8 样品 D 发光峰半峰全宽的温度特性

Fig 8 Temperature dependence of PL peak's FWHM of sample D

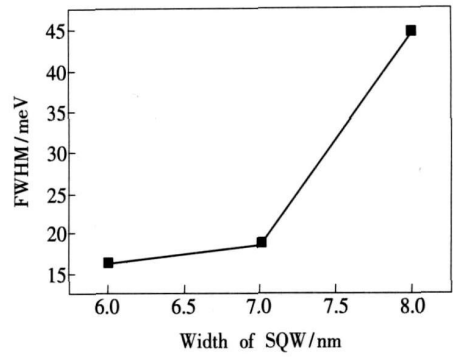


图 9 发光峰半峰全宽和阱宽的关系

Fig 9 Relationship between PL peak's FWHM and the width of SQW

子增多,根据玻尔兹曼分布,更多的离子能够跃迁到更高的子能级上,使得发光高能带尾明显增加。

3.3.2 应变单量子阱发光峰半峰全宽与阱宽的关系

图 9 显示了 3 个不同阱宽样品的发光峰半峰全宽与阱宽的关系,可以看出,PL 谱峰半峰全宽随阱宽增大而增大。这是由于合金无序所造成的谱线展宽随着阱宽增大而越来越重要^[16]。

4 结 论

探讨了不同温度下应变单量子阱 PL 谱的峰位和谱线展宽特性,发现 PL 谱峰随温度升高红移;比较了不同阱宽量子阱峰位温度性质,发现峰位随阱宽增大红移;我们还发现,谱线展宽同样随温度升高明显增大,且在温度越高,增加速率越大;另外,阱越窄,线宽越窄。本文还对以上现象作了简要的理论分析。

参 考 文 献:

- [1] Wu Zhengyun, Wang Xiaojun, Huang Qisheng. Study of line broadening of photovoltaic spectra in strained InGaAs/GaAs quantum well [J]. *Chin. J. Semiconductors* (半导体学报), 1998, **19**(12): 881-885 (in Chinese).
- [2] Xu Qiang, Xu Zhongying, Zhuang Weihua. Investigation of optical properties of strained layer coupled quantum wells in InGaAs/GaAs [J]. *Chin. J. Infrared Res* (红外研究), 1989, **8**(2): 103-110 (in Chinese).
- [3] Huang Y S, Qiang H, Pollak Fried H. Temperature dependence of the photoreflectance of the strained layer (001) $\text{In}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}/\text{GaAs}$ single quantum well [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(12): 7537-7542.
- [4] Xu Zhongying, Xu Jizong, Ge Weikun, et al. Optical investigation of InGaAs/GaAs strained layer quantum well structures [J]. *Chin. J. Semiconductors* (半导体学报), 1988, **9**(6): 563-569 (in Chinese).
- [5] Fan Wei, Xu Xiaoxuan, Sun Xinfeng. Temperature dependence of PL spectra of InGaAs/GaAs single quantum well properties [J]. *The J. Light Scattering* (光散射学报), 2008, **20**(2): 182-184 (in Chinese).
- [6] Jia Guozhi, Yao Jianghong, Shu Yongchun, et al. Influence of growth temperature and structure parameters on optical characteristic of InGaAs/GaAs quantum wells [J]. *Chin. J. Luminescence* (发光学报), 2008, **29**(2): 235-239 (in Chinese).
- [7] Zhang Tianjin, Miao Guoqing, Song Hang, et al. Effect of buffer layer growth temperature on structural and electrical properties of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$ with two step growth technique [J]. *Chin. J. Luminescence* (发光学报), 2009, **30**(6): 787-791 (in English).
- [8] Yu Yongqin, Huang Bobiao, Wei Jiyong, et al. Quantum confinement effect on PL spectrum of InGaAs/AlGaAs Multi quantum wells [J]. *Chin. J. Quantum Electronics* (量子电子学报), 2003, **20**(3): 345-349 (in Chinese).
- [9] Yan Changling, Qin Li, Ning Yongqiang, et al. Calculation of energy band structure of InGaAs/GaAs quantum well [J]. *Laser Journal* (激光杂志), 2004, **25**(5): 29-31 (in Chinese).
- [10] Varshni Y P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors [J]. *Physica*, 1967, **34**(1): 149-154.
- [11] El-Ahali M, Sorensen C B, Veje E, et al. Experimental determination of the GaAs and $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ band gap energy

- dependence on temperature and aluminum mole fraction in the direct band-gap region [J]. *Phys. Rev. B*, 1993, **48**(7): 4398-4404
- [12] Botha J R, Leitch A W R. Temperature dependence of photoluminescence properties and band gap energy of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells [J]. *J. Electronic Materials*, 2000, **29**(12): 1362-1371
- [13] Zhang Guangyin, Zhang Cunzhou, Zhang Baozheng. Fundamental reflection spectra of Cu_2O and Ge crystals [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1965, **21**(2): 324-328 (in Chinese).
- [14] Shen Xuechu. *Spectra and Optical Properties of Semiconductors* (半导体光谱与光学性质) [M]. The Second Edition, Beijing: Science Press, 2002
- [15] Shen W Z, Tang W G, Shen S C, et al. Absorption spectroscopy studies of strained $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ single quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(21): 2728-2730
- [16] Singh J, Bajaj K K. Role of interface roughness and alloy disorder in photoluminescence in quantum-well structure [J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, **57**(12): 5433-5437.

Temperature Dependence of the Photoluminescence Properties and the Research on the Mechanism of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ Single Quantum Well

WEI Guo-hua¹, WANG Bin^{1,2}, LI Jun-mei¹, CAO Xue-wei¹, ZHANG Cun-zhou^{1,2}, XU Xiao-xuan^{1,2}

(1. School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. The Key Laboratory of Advanced Technique and Fabrication for Weak-light Nonlinear Photonics Materials, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China)

Abstract The technique of photoluminescence (PL) spectra is an important method for studying the properties of semiconductors and quantum wells since its high sensitivity, convenience and non-destructive. This technique was used to study the single quantum well (SQW) of $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ in this paper. Different PL spectra were reported under different temperature, which ranged from 125 K to 260 K for a certain sample, and the PL spectra of the samples with different quantum well width were also reported. The paper reported that for a certain sample, the peak of its PL spectra moved towards long wavelength ranges with the temperature increasing, which means that the band gap of the SQW becomes narrower. Detail consideration suggested that this property was able to be described by the equation of Varshni for the bulk materials. So the SQW is similar to its bulk material at this point. This was mainly because with certain thickness of SQW, there was no lattice mismatch dislocation, and the fundamental structure of the energy gap will not change. It was also reported that at certain temperature, the narrower was the SQW, the wider was its band gap. We performed a brief calculation by solve Schrödinger equation, and found that the experimental result fitted to the theoretical calculation. The relationship between full width at half maximum (FWHM) of PL peak and temperature of a certain sample and the relationship between (FWHM) and SQW width of different samples were also reported. At the same time, theoretical explanation was presented for these phenomenon.

Key words $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ SQW; PL spectra; temperature; FWHM

CLC number O472.3; O482.31 **PACS** 73.20.Hg; 78.55.Cr **PACC** 7320D; 7855E **Document code** A