

InGaAs/GaAs 和 InGaAs/AlGaAs 应变层量子阱中的子带弛豫过程

金世荣 罗晋生* 褚君浩

(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)

徐仲英 袁之良 罗昌平 许继宗 郑宝真

(中国科学院半导体研究所, 超晶格和微结构国家实验室, 北京, 100083)

摘要 利用时间分辨光谱技术, 在 11~90K 温度范围研究了不同阱宽的 InGaAs/GaAs 和 InGaAs/AlGaAs 应变层量子阱子带弛豫过程, 讨论了这两种量子阱材料中不同散射机制的作用。

关键词 子带间弛豫, 应变层量子阱, 时间分辨荧光光谱。

引言

随着超短脉冲技术的发展, 利用时间分辨荧光光谱(TRPL)技术可以直接测量半导体量子阱中激子的超快速复合过程. 理论和实验表明, 复合过程的快慢(即寿命大小)不仅与理想化量子阱结构中自由激子的本征复合行为(辐射复合)有关^[1,2], 而且还与样品生长过程中引入的缺陷、杂质和表面态等及由此导致的非辐射复合过程有关^[3,4]. 在高能量非共振激发条件下, 还受到声子散射的影响. 通过观测这些超快速过程, 可以研究量子阱中各种复合机制和散射机制的影响, 以及不同能级之间的耦合作用(包括隧穿、渡越等现象). 另一方面, 当温度发生变化时, 不同复合机制、散射机制之间的竞争导致激子光学特性发生显著变化, 由于这方面的研究对器件应用有着特殊的重要性, 成为近几年的热点之一. 本文利用 TRPL 技术, 在 11~90K 温度范围内, 研究了不同阱宽的 InGaAs/GaAs 和 InGaAs/AlGaAs 应变层量子阱的子带间弛豫过程, 据此, 讨论了这两种量子阱材料中不同散射机制的影响.

1 实验

我们研究了2组样品, 样品A包含5个阱宽分别为2、3、5、7和11nm的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 单量子阱, 样品B包含5个阱宽分别为2、3、4、6和9nm的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 单量子阱. 相邻阱之间的势垒层厚度为20nm, 因此各阱之间的耦合可以忽略. 2组样品均采用 MBE 技术在衬底GaAs(001)表面外延生长, 不故意掺杂, 外延层均保证在临界厚度之内. 在TRPL实验中, 采用Ar⁺激光器(锁模)同步泵浦的染料激光器630nm谱线作为激发光

*西安交通大学微电子研究室, 陕西, 西安, 710049

本文 1994 年 5 月 20 日收到, 修改稿 1994 年 11 月 10 日收到

源, 激发光脉宽 $< 20\text{ps}$, 重复频率为 82MHz . 来自样品的荧光信号经 0.3m 的单色仪色散后, 用 2D 同步扫描条纹相机接收. 整个系统的时间分辨率 $< 40\text{ps}$. 在所有实验中, 激发光密度保持在 10Wcm^{-2} , 相应的光生载流子密度小于 10^{11}cm^{-2} , 以避免密度效应和带填充效应.

2 理论模型

如图 1 所示, 在受到光子能量大于基态电子-重空穴能量的超短脉冲光照射后, 激发到高能态上的光生载流子由于受到阱内各种散射作用, 将很快向基态弛豫. 在量子阱中, 影响子带间弛豫时间的散射机制主要是声学声子散射和光学声子散射(主要为 LO 声子散射). 其中发射声学声子的时间在几百 ps 数量级^[5], 并且只有在光生载流子密度小于 10^{12}cm^{-2} 的系统里才会发生. 而发射 LO 声子的理论预期值小于 1ps ^[6]. LO 声子散射也与载流子密度有关, 在较高密度下, LO 声子的散射作用将完全被屏蔽. 此外, 只有当电子剩余能量至少大于 1 个 LO 声子的能量(在 GaAs 中为 36meV)时, LO 声子散射才参与热载流子的弛豫过程. 反之, 如果剩余能量小于 1 个 LO 声子的能量, 则只有发射声学声子这个慢过程存在.

在时间分辨光谱实验中, 假定激发光脉冲足够短, 那么光生载流子从高能态向 $k \approx 0$ 的激子基态弛豫并辐射复合的过程可以简单地用三能带模型来表示(如图 1 中插图所示). 按照这个模型, 我们可以分别写出高能态和 $k_{\parallel} < k_0$ 的自由激子基态上的速率方程为

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{N_1}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{\tau_d} + \frac{N_1}{\tau}. \quad (2)$$

式中 N_1 为高能态上的载流子密度, N_2 为 $k < k_0$ 的激子基态上的激子密度. 联立方程(1)和(2), 得到荧光强度的时间谱为

$$I(t) = \frac{N_0}{\tau_d - \tau} (e^{-t/\tau_d} - e^{-t/\tau}), \quad (3)$$

其中 N_0 为积分时间内的总光生载流子密度. 如果考虑到实际样品中非辐射复合的贡献, 那么式(1)到(3)中的 τ_d^{-1} 应该改写为激子总的复合几率, 它等于辐射复合几率和非辐射复合几率之和. 式(3)表明, 当热载流子的弛豫过程不可忽略时, 测量到的荧光衰退时间是个双指数衰退过程.

3 结果与讨论

利用上述三能带模型, 我们对不同阱宽的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱的时间分辨光谱测量值作了数据拟合, 图 2 给出了阱宽为 5 和 11nm 的量子阱在 $11 \sim 90\text{K}$ 温度范围内拟合

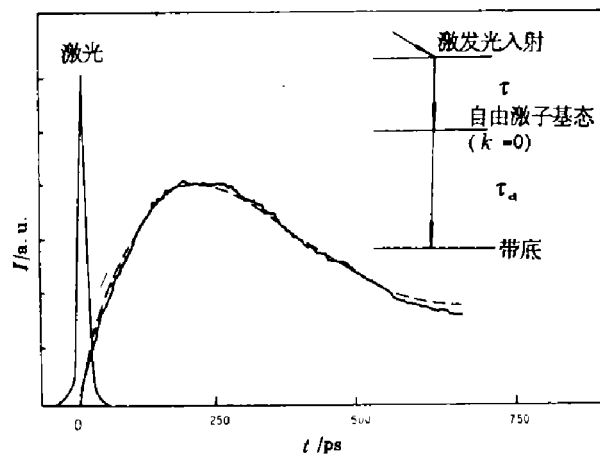


图 1 用三能带模型对量子阱荧光时间谱数据拟合示意图(实线为 PL 的时间谱, 虚线为最佳拟合, 右上角插图为三能带模型)

Fig. 1 Schematic diagram of the temporal profile (solid line) of the photoluminescence and its best fit (dashed line) based on simple three-level model (inset)

的典型结果. 从图中可以看到, 在低温 11K 时, 2 个阱的热载流子弛豫时间均在 200ps 附近, 这个数值与理论预期和其它报道基本一致^[5,7,8], 表明在低温下, 子带间弛豫过程主要受声子散射的影响. 当温度升高时, τ 很快地减小, 直到大约 80K 附近, 小于整个测量系统的时间分辨率 (<40ps). 弛豫时间随着温度的增加而减少, 反映了量子阱中不同散射机制所起的作用. 如前所述, 在量子阱中, 散射过程主要由声学声子和光学声子散射为主, 前者为几百 ps 的量级, 后者由于声子之间的屏蔽及非平衡效应, 一般测量值在几个到十几个 ps 的量级. 图 1 中 τ 随着晶格温度增加而很快减小的事实表明: 在低温范围内, 热载流子的弛豫过程主要由声学声子决定, 而光学声子的影响可以忽略. 随着温度的增加, 光学声子的散射作用变得越来越重要, 声学声子的作用逐渐减弱. 从图 1 可以看到, 至少大约在 100K 以上, 光学声子才开始起主要作用, 导致热载流子的弛豫时间趋近 LO 声子的散射时间. 上述结果与从不同散射机制导致激子谱线展宽的温度关系得出的结论一致^[9]. 此外, 从图 2 中还可以看到, 对于阱宽为 5 和 11nm 这 2 个量子阱, 在温度 11~90K 范围内, 热载流子弛豫时间的变化接近相同, 表明量子化能级分裂值的差别对阱中载流子的弛豫没有很大影响, 由此说明, 热载流子的弛豫并不是逐次从高能级向低能级进行的, 而是一系列发射声子的过程.

我们对 InGaAs/AlGaAs 样品 B 的时间分辨光谱测量值按三能带模型作了数据拟合, 发现在 11~90K 温度范围内, 对所有的 5 个阱宽, 子带弛豫时间均在 40ps (系统的时间分辨极限) 以下, 这表明, 即使在低温范围内, 声学声子的散射也很弱. 另一方面, 由于光学声子只能在较高的温度 (如 100K 以上) 才起主要作用, 因此在 InGaAs/AlGaAs 量子阱材料内必然存在着其它的散射机制, 例如由外延生长过程中引入的缺陷产生的散射作用, 导致热载流子的快速弛豫. 为了证明这一点, 我们在低温 11K 下测量了样品 B 的 5 个阱宽的激子寿命, 结果如图 3 所示, 可看出激子寿命随着阱宽的增加有明显的减小, 而与自由激子辐射复合模型所预期的激子寿命随阱宽增加而增大的趋势截然不同^[1], 这表明即使在低温下, 非辐射复合仍起重要作用. 其原因可能归结为在含 In 结构中因低温外延生长而在 AlGaAs 材料内引入的点缺陷^[10], 这些点缺陷对热载流子的散射, 使得弛豫时间大大缩短, 并决定了热载流子的

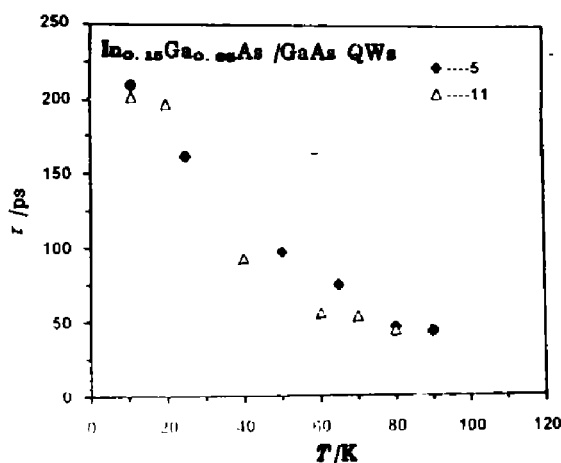


图 2 阱宽分别为 5 和 11nm 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱中子带弛豫时间随温度的变化.
Fig. 2 Temperature dependence of the intersubband relaxation time in $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells with width of 5 and 11nm, respectively

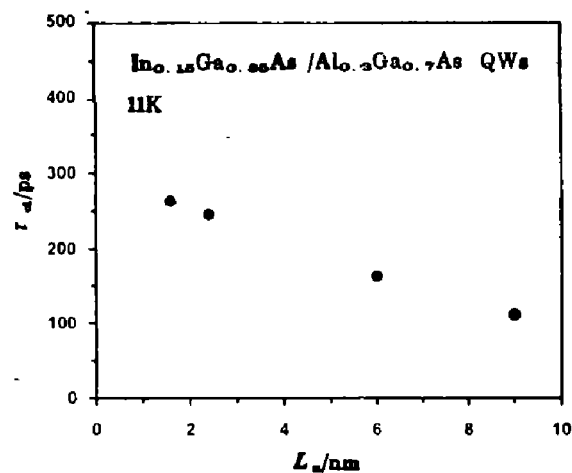


图 3 在 11K 下测得的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱样品 B 的激子寿命随阱宽的变化
Fig. 3 Well-width dependence of the excitonic lifetime of sample B in $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ quantum wells measured at 11K

弛豫过程. 有关这方面的理论和实验的研究还有待深入.

4 结论

我们研究了 11~90K 的温度范围内 InGaAs/GaAs 和 InGaAs/AlGaAs 应变层量子阱的子带弛豫过程, 讨论了不同散射机制的影响. 对于 InGaAs/GaAs 系统, 给出了声学声子和光学声子在不同温度范围内起重要作用的直接证据. 而在 InGaAs/AlGaAs 系统中, 我们发现子带弛豫时间在所测量的温度范围内均小于系统的时间分辨率, 表明阱内点缺陷散射机制对热载流子的弛豫过程有辅助增强作用.

参考文献

- 1 Feldmann J, Peter G, Göbel E O, *et al. Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**:2337
- 2 Andreani L C, Tassone F, Bassani F. *Solid State Commun.*, 1991, **77**:641
- 3 Gurioli M, Vinattieri A, Colocci M. *et al. Phys. Rev.*, 1991, **B44**:3115
- 4 Bacher G, Hartmann C, Schweizer H, *et al. Phys. Rev.*, 1993, **B47**:9545
- 5 Oberli D Y, Wake O R, Klein M V, *et al. Phys. Rev. Lett.*, 1997, **59**:696
- 6 Tatham M C, Ryan J F, Foxon C T. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63**:1637
- 7 Höpfel R A, Rodrigues R, Iimura Y, *et al. Phys. Rev.*, 1993, **B47**:10943
- 8 Takahashi Y, Owa S, Kano S S, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**:213
- 9 Lee J, Koteles E S, Vassell M O. *Phys. Rev.*, 1986, **B33**:5512
- 10 Kirby P B, Simpson M B, Wilcox J D, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**:2158

INTERSUBBAND RELAXATION IN InGaAs/GaAs AND InGaAs/AlGaAs STRAINED-LAYER QUANTUM WELLS

Jin Shirong Luo Jinsheng* Chu Junhao

(National laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Xu Zhongying Yuan Zhiliang Luo Changping Xu Jizong Zheng Baozhen

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

Abstract The dynamics of the intersubband relaxation of carriers in the strained-layer InGaAs/GaAs and InGaAs/AlGaAs quantum wells with different well-widths was investigated with the use of time-resolved spectroscopy in the temperature range from 11 to 90K. The different scattering mechanisms, which are dominant in the carriers relaxation processes in the quantum wells of the two systems were discussed.

Key words intersubband relaxation, strained-layer quantum wells, TRPL.

* Institute of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China