

在纵向电场作用下量子阱中空间 直接/间接激子的转化*

罗克俭 郑厚植 李承芳 徐士杰 张鹏华 张 伟 杨小平

(半导体超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文采用特殊设计的阶梯型量子阱结构研究了在纵向电场作用下量子阱中空间直接/间接激子的转化. 在 77K 低温下, 我们从稳态光荧光谱(PL 谱)上直接观察到了这种转化所导致的光谱激子峰的蓝移.

PACC: 7869, 7340L

1 引言

在量子阱准二维体系中, 由于电子和空穴限制在量子阱中, 使相互间库仑作用大大增强, 因而在量子阱光跃迁中激子起着重要作用. 在一般孤立量子阱中, 纵向电场(电场方向平行于量子阱生长方向)引起的激子光谱峰移动主要起源于两种机制, 一种是由量子受限 Stark 效应(QCSE 效应)引起的红移, 一种是由激子束缚能的减少而引起的蓝移. 但是, 一般是前者占主导地位, 因此以往的工作所观测到的激子光谱峰均随电场增大而红移^[1-3]. 在耦合双阱中, 人们还观测到了由于双阱中能级反交叉而引起的跃迁能量中断^[4,5]. 但是, 据我们的了解, 由激子束缚能减少导致的谱线蓝移迄今为止尚未从光谱上观察到.

本文设计了一种独特的阶梯型量子阱结构. 在某一特定的偏压范围内, 激子峰的移动主要起源于激子束缚能的减少, 我们从 PL 谱上直接观测到了由此导致的谱线蓝移.

2 实验

实验所用样品是用 MBE 技术生长的. 衬底是 $n^+-(100)\text{GaAs}$, 先在衬底上生长 $0.6\mu\text{m}$ 掺杂浓度为 $2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 的 $n\text{-GaAs}$ 缓冲层, 然后生长层次结构为 $\text{GaAs}/\text{AlAs}/\text{GaAs}/\text{AlAs}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ($1000\text{\AA}/30\text{\AA}/40\text{\AA}/20\text{\AA}/25\text{\AA}/160\text{\AA}/500\text{\AA}$) 的非掺杂区, 再生长 $500\text{\AA}$ 掺杂浓度为 $1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 的 $n\text{-GaAs}$ 层, 最后生长一层 $200\text{\AA}$ 掺杂浓度为 $4\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 的 $n^+ \text{-GaAs}$. 使用常规的光刻、腐蚀工艺, 将样品制成具有光孔的圆台(面积为 $2\times 2\text{mm}^2$), 以便进行纵向电场调制的 PL 实验. 进行 PL 测量时, 样品置于带有光学窗口的液氮杜瓦瓶中, 可进行 77K 低温及 300K 室温下的测量. 实验所用激发光为 Ar^+ 离子激光器的 $4880\text{\AA}$ 激光线以及掺钛蓝宝石激光器的 $7300\text{\AA}$ 的激光线. 激发光功率为 $0.5\text{W}/\text{cm}^2$.

* 国家攀登计划资助项目

罗克俭 男, 1970 年生, 博士生, 目前从事半导体量子阱光学性质的研究工作

郑厚植 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 从事低维半导体物理的研究工作

1995 年 1 月 19 日收到本文

3 结果与讨论

图 1 为样品的能带结构示意图。(a) 电场 $F=0\text{ kV/cm}$. 同时画出了 E_a 、 E_b 、 HH_a 、 HH_b

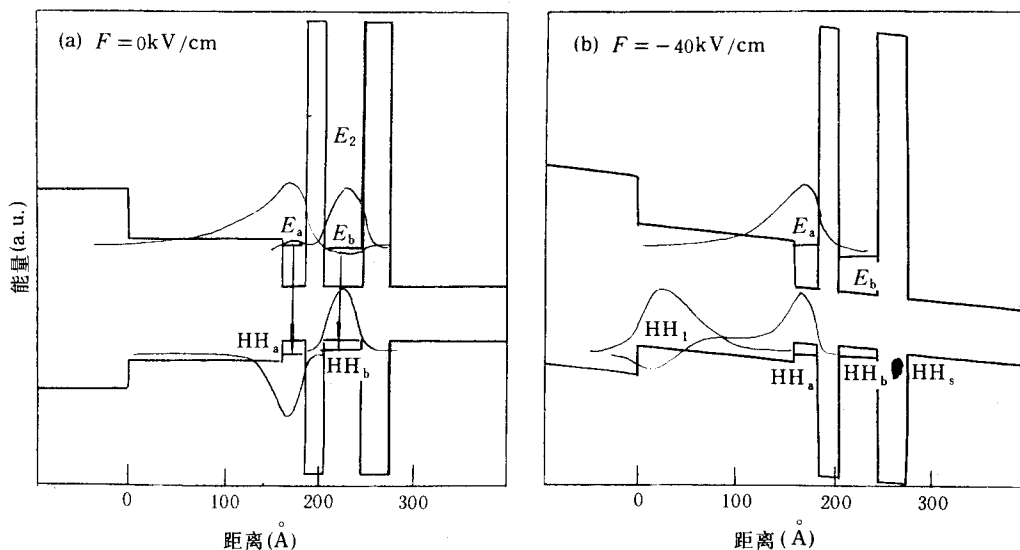


图 1 样品的能带结构示意图

能级的波函数曲线。(b) $F = -40\text{ kV/cm}$. 仅画出了 E_a 、 HH_a 、 HH_1 能级的波函数曲线. 此时 HH_1 为阶梯阱重空穴基态, 而 HH_a 为第一激发态. 但因为 HH_s 能级上有大量光激发的空穴占据, 外加负偏压时 HH_s 上的空穴将注入到 HH_a 能级上, 所以我们仍能在 PL 谱上观察到 a 峰. 如图 1(a) 所示, 样品非掺杂区主要由一个阶梯阱和一个普通阱构成. 阶梯阱总阱宽为 185 Å , 其中深阱部分的宽度为 25 Å , 普通阱阱宽为 40 Å . 图 2(a) 是 77 K 低温下 4880 Å 激光线 (光子能量为 2.546 eV) 激发的零偏压 PL 谱. 从中可以看到两个峰, 分别标记为 a、b, 其峰值能量分别用 E_{aa} 、 E_{bb} 表示. 其中 a 峰相应于阶梯阱深阱中电子基态能级 E_s 到重空穴基态能级 HH_s 的发光, b 峰相应于普通阱中电子基态能级 E_b 到重空穴基态能级 HH_b 的发光 (见图 1(a)). 在 300 K 室温时, 零偏压下, PL 实验测得 $E_{aa} = 1.634\text{ eV}$, $E_{bb} = 1.610\text{ eV}$. 而用有效质量近似包络波函数方法 (不考虑激子效应) 计算^[6] 结果是, 300 K 室温时, E_s 到 HH_s 跃迁能量为 1.639 eV , E_b 到 HH_b 跃迁能量为 1.613 eV (平带情形). 可见实验值与计算值符合得比较好. 这是因为在 300 K 室温下, 激子离化作用大大增强, 故而计算中可以忽略激子效应. 在 77 K 低温下, 7300 Å 激光 (光子能量为 1.702 eV) 照射样品时, 只能激发 E_{bb} 跃迁. 由于在零偏压下, 量子阱中仅 HH_b 上有空穴占据, 在 HH_a 上则无空穴占据 (见图 1(a)), 因此在零偏压下观察不到 a 峰. 加负偏压后, 当电场 $F = -40\text{ kV/cm}$ (相应偏压值 $\approx -0.8\text{ V}$), HH_b 能级下降到 HH_a 能级之下 (见图 1(b)), 这时 HH_b 上的空穴将转移到 HH_a 上. 另一方面, 由于样品结构为 n-i-n 型, 外加负偏压会使电子注入到量子阱中, 因此只要 HH_a 出现空穴占据就能观察到 a 峰. 图 2(b) 中所示实验事实与此分析相符. 这更进一步证实了 a 峰相应于 E_s 到 HH_s 的发光, 而 b 峰相应于 E_b 到 HH_b 的发光. 在 77 K 低温下, E_{aa} 、

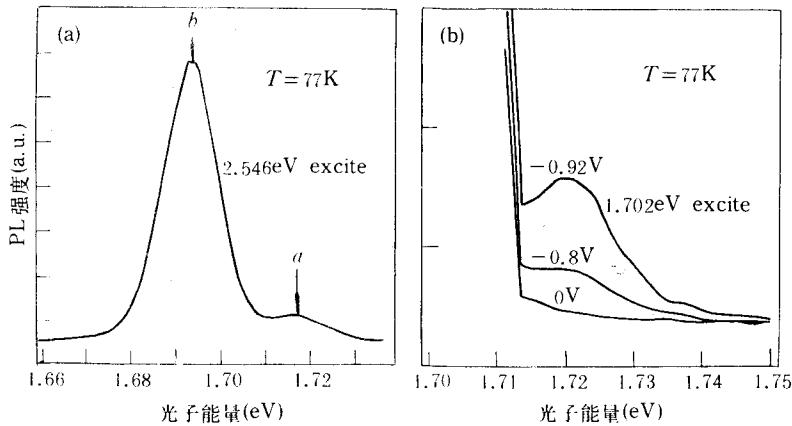


图2 (a)77K 低温零偏压下的 PL 谱(4880 Å 激光线激发)

(b)0V、-0.8V、-0.92V 偏压下,7300 Å 激光线激发的 77K 低温 PL 谱

E_{bb} 随偏压变化的实验结果如图 3 所示。值得注意的是,在 -0.5 至 -1.0V 偏压范围内, E_{aa} 蓝移约 5meV。用有效质量近似包络波函数方法计算的结果表明,在此偏压范围内,随着电场增大, E_a 能级电子波函数越来越局域于阶梯阱的深阱部分,而 HH_a 能级空穴波函数则从深阱部分扩展到整个阶梯阱中(见图 1(b)),故而电子波函数“重心”与空穴波函数“重心”逐渐错开,与 E_{aa} 跃迁相对应的激子将经历一个从空间“直接”激子向空间“间接”激子的转化过程。相应的激子束缚能将大大减少,因此可以比较准确地作出下述判断: a 峰的蓝移起源于激子束缚能的减少。但是在 -0.5V 至 -1.0V 以外的偏压范围内, QCSE 效应引起的光谱峰红移远大于激子束缚能减少引起的光谱峰蓝移, E_{aa} 将随电场增大而红移。应当注意,在负偏压作用下电子能级 E_a 与 E_b 已不可能发生共振反交叉,而普通阱的激发态 E_2 又比 E_b 高约 400meV(见图 1(a)),在本实验所加电场下也不可能与 E_a 发生共振,故而所观察到的 E_{aa} 蓝移并非是由阶梯阱与普通阱中的电子能级反交叉造成的。另一方面,空穴能级间反交叉造成的跃迁能量劈裂不超过 1meV^[7],所以 E_{aa} 的蓝移(5meV)也不会是由空穴能级反交叉引起的。事实上仔细观察正偏压下 PL 谱的峰值位置,发现在偏压为 1V 时, E_{aa} 确有一个小小的红移,同时 E_{bb} 有一个小小的蓝移(如图 3 中箭头所示),这是典型的能级反交叉行为,对照相应的理论计算,这恰好对应于电子能级 E_a 与 E_b 发生反交叉的偏压。但是反交叉处能级劈裂(0.6meV)要比计算值(4meV)小得多,这可能是由于界面缺陷、杂质散射等原因导致阶梯阱与普通阱耦合减弱的缘故^[8]。

另外,在 300K 室温时,由于激子的热离化作用大大增强,量子阱发光将由激子型转变为自由电子/空穴发光。预期发光峰的移动将主要取决于 QCSE 效应,因此如果在室温下进行测量就不应当看到如图 3 所示的蓝移现象。为进一步证实我们前面的判断,我们在 300K 下测量了 E_{aa} 、 E_{bb} 的偏压关系。我们确实没有观察到 E_{aa} 有任何蓝移(见图 3 的插图)。这一结果进一步证实了我们的判断。

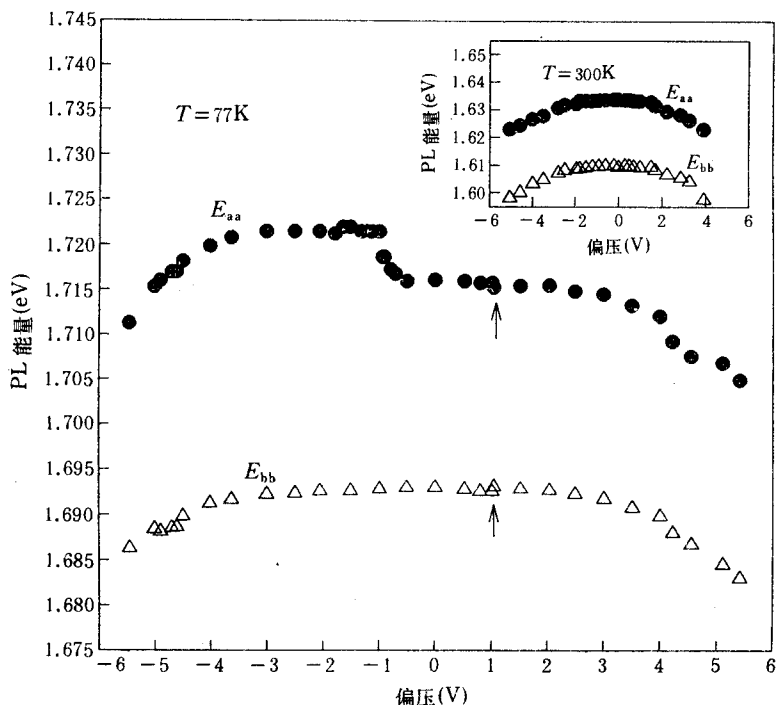


图3 77K 时 E_{aa} 、 E_{bb} 随偏压的变化
 插图为 300K 时 E_{aa} 、 E_{bb} 随偏压的变化, (●) — E_{aa} (△) — E_{bb}

4 结论

我们利用阶梯阱结构的特异性研究了在纵向电场作用下激子束缚能减少对激子光谱峰移动的影响. 在特定的偏压范围内, 我们从 77K 低温 PL 谱上观察到了由于激子束缚能减少而导致的谱线蓝移, 提供了直接测量激子束缚能的简便方法.

致谢: 作者感谢半导体所超晶格室光谱组刘伟给予的技术上的大力帮助.

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, *et al.*, Phys. Rev., 1985, **B32**: 1043.
- [2] R. T. Collins, K. V. Klitzing and K. Ploog, Phys. Rev., 1986, **B33**: 4378.
- [3] S. Tarucha and K. Ploog, Phys. Rev., 1988, **B38**: 4198.
- [4] Y. Tokuda, *et al.*, Phys. Rev., 1990, **B41**: 10280.
- [5] Y. Tokuda, *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1989, **54**: 1232.
- [6] 计算中采用的参数见 S. Adachi, J. Appl. Phys., 1985, **58**(3): R₁ — R₂₉.
- [7] L. Vina, *et al.*, Phys. Rev. Lett., 1987, **58**: 832.
- [8] F. Capasso, *et al.*, IEEE J. Of Quantum Electron, 1986, **QE-22**: 1853.

Transition of Space Direct /Indirect Exciton Induced by Perpendicular Electric Field in Quantum Well

Luo Kejian, Zheng Houzhi, Li Chengfang, Xu Shijie,

Zhang Penghua, Zhang Wei and Yang Xiaoping

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures,

Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 19 January 1994

Abstract We use a specially designed step quantum well to study the transition of space direct /indirect exciton induced by perpendicular electric field. At the low temperature of 77K, from steady — state photoluminescence (PL) spectra we have observed obvious blueshift of exciton peak stemming from this transition.

PACC: 7865, 7340L