

非对称耦合双量子阱的荧光光谱研究

茅惠兵

(复旦大学材料科学系, 上海, 200433)

张家明¹ 陆卫 沈学础

(中国科学院技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

A **摘要** 讨论了耦合双量子阱的光荧光性质, 并着重对不同垒宽样品的荧光性质与激发功率的关系进行了详细讨论, 分析了导带子带间弛豫过程的竞争.

关键词 光荧光, 非对称耦合双量子阱, 子带间弛豫

半导体

0471.1

引言

5 无论在基础研究还是在应用研究领域, 半导体量子阱和超晶格中的隧穿过程是一个十分活跃的研究方向. 非对称耦合双量子阱(以下简称为 ACDQW)已经被认为是研究隧穿过程的理想对象^[1-3], 同时这种结构又以其特殊的性质在光电和电子器件中显示了广阔的应用前景^[4]. 但以前的研究多集中在共振和近共振条件下电场中的隧穿过程, 而且所有的样品几乎都是不掺杂的. 本文详细研究窄量子阱中重掺杂的非对称耦合双量子阱中非共振电子隧穿及其与激发激光功率的关系, 在这些样品中, 光荧光测量显示了不同子带间弛豫过程之间的竞争, 不同垒宽样品显示了对激发光功率的不同依赖关系.

1 样品结构和实验过程

本实验所用的样品是用分子束外延技术在 GaAs(001)衬底上在 645℃生长的. 为减小应变和缺陷, 衬底脱氧后先生长 500nm 的过渡层, 外延生长量子阱和垒的界面处时都中断了若干秒, 以便使界面恢复得更平整, 外延生长的速率和 Al 的组分由 RHEED 振荡测定. 在耦合双量子阱中, GaAs 势阱的宽度是 5.5nm, 中间的 2.7nm 被重掺杂 Si 至 $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ 量子阱的宽度为 20nm, 两个阱之间用 $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ 势垒隔离, 垒的宽度 d_w 分别是 6、9、12 和 20nm, 分别称为样品 A、B、C 和 D. 为增强荧光强度, 每个样品都生长 20 个周期的 ACDQW 结构单元, 结构单元之间用宽度为 60nm 的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 势垒隔开.

我们的光荧光谱是在 77K 下用 SPEX1403 双光栅光谱仪测量的, 样品是用氩离子激光器的 514.5nm 光谱线激发的, 并且把激光输出功率作为样品激发功率的标志.

2 实验结果和讨论

2.1 实验结果

本文 1995 年 9 月 31 日收到, 最后修改稿 1995 年 11 月 3 日收到

图1给出具有不同垒宽样品的77K时的光荧光谱,由图1可看出每个样品都包括3个峰,并且峰强与垒宽有明显的依赖关系.由峰位及其与激发强度的关系可以看出:位于1.51eV处的低能峰和杂质态有关,本文不对此进行讨论.位于1.58eV的荧光峰可以确定为GaAs量子阱中的11H复合(即导带第一子能级和价带第一子能级之间的跃迁),位于1.77eV处的荧光峰可以确定为 $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ 量子阱中的11H复合.这个峰的峰位对不同样品是不一致的,这可能是由于不同样品中Al组分的涨落所引起的.

由图1还可以看出上述荧光谱最显著的特点是 I_2 和 I_1 (I_2 是 $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ 量子阱的11H复合的积分荧光强度, I_1 是GaAs量子阱11H复合的积分荧光强度)的相对变化与势垒宽度的关系.图2给出荧光峰积分强度之比 I_2/I_1 与激发功率的关系,可以看出:比值 I_2/I_1 首先随激发功率增大而增大,但最后达到某一饱和值,不同垒宽样品的饱和值大小有显著差别.对样品A,这个比值很小(0.25),并且只有当激发功率大于50mW时,才能测量到11H复合的荧光峰.而对样品D,这个比值很大(最大值为14.7).

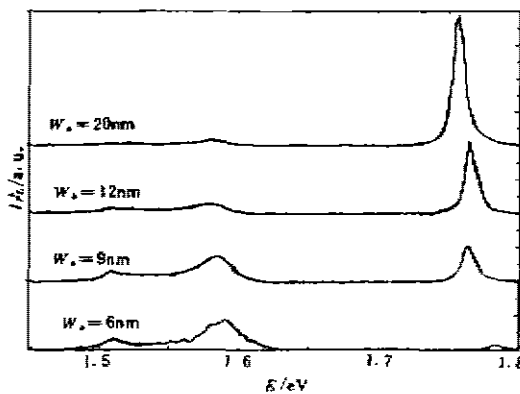


图1 样品A、B、C和D在77K时的光荧光谱
Fig. 1 The PL spectra of samples A, B, C and D at 77K

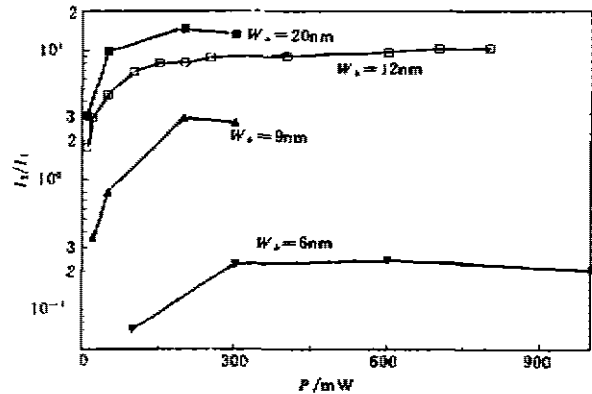


图2 样品A、B、C和D的 I_2/I_1 与激发功率的关系
Fig. 2 The excitation power dependence of ratios I_2/I_1 for samples A, B, C and D

2.2 讨论

图3给出ACDQW能级示意图,并标出光荧光中的主要过程.由转移矩阵法的计算结果可知,ACDQW的两个阱中电子态的基态能量差约为90meV,所以AlGaAs量子阱中的基态在整个ACDQW系统中是亚稳态,同时,两个量子阱之间的隧穿是远离共振条件的.在样品D中,值得注意的是比值 I_2/I_1 远大于1,这一结果是通常的ACDQW结构所没有的,它与我们样品的特殊结构有关,被激发的电子和空穴在两个阱中的特殊分布是其根本原因.

当样品受激光激发后,电子将首先被激发至远离导带边的连续态上,然后这些电子将通过子带间弛豫分别弛豫到GaAs阱和AlGaAs阱的基态上,因此就出现了两个弛豫过程的竞争,在AlGaAs量子阱中,存在着3个子带,并且AlGaAs的有效质量也比GaAs大,而GaAs量子阱中只有1个子带,因此AlGaAs阱中的态密度将远大于GaAs阱中的态密度,

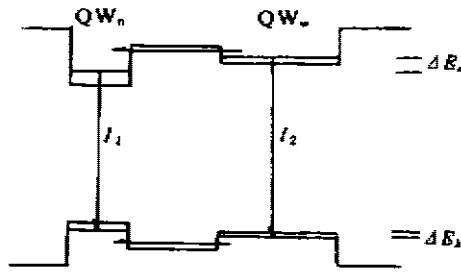


图3 ACDQW结构的能级示意图和主要的荧光过程

Fig. 3 The energy levels of ACDQW and the main luminescence processes

同时又由于 GaAs 量子阱是重掺杂的, 这样 GaAs 量子阱中只有较少的空态能被填充, 所以电子弛豫到 AlGaAs 量子阱的速率将远大于弛豫到 GaAs 量子阱中的速率。

由于同样的原因, AlGaAs 量子阱中空穴的态密度也将远大于 GaAs 量子阱中的空穴态密度. 所以当样品被激发时, AlGaAs 量子阱中将产生比 AlGaAs 量子阱中更多的空穴. 同时, 样品被激发时, 势垒中也将产生大量的空穴, 而这些空穴向 AlGaAs 量子阱弛豫的速率也将远大于向 GaAs 量子阱弛豫的速率, 所以 AlGaAs 量子阱中受激发产生的

非平衡空穴也将远大于 GaAs 量子阱中.

在 GaAs 量子阱中产生的非平衡载流子只有通过辐射或非辐射途径复合, 而在 AlGaAs 量子阱中的非平衡载流子除了在阱中复合以外, 还能通过隧穿进入 GaAs 量子阱中. 在 GaAs 或 AlGaAs 中的非辐射复合和辐射复合相比通常可以忽略, 在这些假设下, 我们得到以下速率方程:

$$d\Delta n_1/dt = G_1 + \Delta n_2/\tau - \Delta n_1/\tau_1, \quad (1)$$

$$d\Delta n_2/dt = G_2 - \Delta n_2/\tau - \Delta n_2/\tau_2. \quad (2)$$

其中 Δn_1 和 Δn_2 分别是 GaAs 量子阱和 AlGaAs 量子阱的非平衡电子浓度, G_1 和 G_2 分别是 GaAs 量子阱和 AlGaAs 量子阱中的电子产生速率, τ 是电子隧穿寿命, τ_1 和 τ_2 分别是 GaAs 和 AlGaAs 量子阱中的电子辐射复合寿命.

在稳态时, $d\Delta n_1/dt = d\Delta n_2/dt = 0$, 由式(1)和(2), 我们有下面的表达开式:

$$I_1 = \Delta n_1/\tau_1 = G_1 + G_2/(1 + \tau/\tau_2), \quad (3)$$

$$I_2 = \Delta n_2/\tau_2 = G_2/(1 + \tau_2/\tau). \quad (4)$$

其中 I_2 和 I_1 分别是相应的积分荧光强度.

如果 ACDQW 垒很窄, 电子隧穿寿命 τ 和 τ_2 相比很小, AlGaAs 量子阱中的非平衡电子将很快弛豫到 GaAs 量子阱中, 所以积分荧光强度 I_2 将远小于 I_1 , 这正是样品 A 的结果. 如果 ACDQW 的垒很宽, τ 将远大于 τ_2 , 于是隧穿几率将很小, 这正是样品 D 的结果.

隧穿时间可按以下的方法估算: 由强激发功率时的实验结果可以得到 $I_{2A}/I_{2D} = 0.067$, $I_{2B}/I_{2D} = 0.35$, $I_{2C}/I_{2D} = 0.59$, 其中 I_{2A} , I_{2B} , I_{2C} 和 I_{2D} 分别是样品 A、B、C 和 D 在同一激发功率时的高能峰的积分荧光强度. 在强激发功率时我们可以假设垒宽度为 20nm 的样品 D 的隧穿寿命 $\tau \gg \tau_2$, 于是由式(4), 我们可以得到 $\tau_A = 0.072\tau_2$, $\tau_B = 0.53\tau_2$, $\tau_C = 1.44\tau_2$.

正如前文所述, 样品 D 的积分荧光强度之比 I_2/I_1 最小时, $\tau \gg \tau_2$. 于是由式(3)和(4)我们得到

$$G_2/G_1 = I_2/I_1 = 14.7. \quad (5)$$

显然这个值远大于 AlGaAs 量子阱与 GaAs 量子阱的宽度之比,所以这是由于子带间弛豫过程之间竞争使亚稳态具有更多非平衡载流子的直接证据.

由实验可知(见图 2),随着激发功率的变化, I_2 和 I_1 的比值也相应变化,这与 R. Sauer 等的实验结果一致^[5]. 这就是本文必须考虑的另一因素,即所谓的有效质量过滤效应(effective mass filtering)^[6]. 这是因为电子的有效重量比空穴的有效质量小很多,使空穴的隧穿几率远小于电子的隧穿几率,即存在空穴的局域化效应,这将导致两个量子阱之间产生电荷的积累,这种由积累电荷产生的电场将减小隧穿几率. 这种现象使 I_2/I_1 随激发功率的增大而增加,当电场最后饱和时,相应的 I_2/I_1 也趋于饱和.

3 结论

本文深入讨论了具有不同垒宽的 ACDQW 结构的荧光性质. 两个量子阱之间的隧穿是决定荧光性质的主要因素,而垒宽又是决定隧穿几率的主要参量. 在这些结构中,我们发现了在亚稳态存在更多非平衡载流子的直接证据,这是由于子带间弛豫过程的竞争引起的. 通过改变激发功率,我们发现了由电子和空穴的不同隧穿几率引起的空穴局域化效应,这也将影响阱间的隧穿几率.

参考文献

- 1 Matsusue T, Tsuchiya M, Schulman J N, *et al.* *Phys. Rev.*, 1989, **B40**:5719
- 2 Ferreira R, Bastard G. *Phys. Rev.*, 1989, **B40**:1074
- 3 Lee D H, Kim D W, Leem Y A, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**:3475
- 4 Khurgin J. *Phys. Rev.*, 1988, **B38**:4056
- 5 Sauer R, Thonke K, Tsang W T. *Phys. Rev Lett.*, 1988, **61**:609
- 6 Levi D H, Wake D R, Klein M V, *et al.* *Phys. Rev.*, 1992, **B45**:4274

STUDY OF THE PL SPECTRA OF ASYMMETRIC COUPLED DOUBLE QUANTUM WELLS

Mao Huibing

(Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Zhang Jiaming Lu Wei Shen Xuechu

(National Laboratory for Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The PL properties of asymmetric coupled-double quantum wells (ACDQW) structures were studied. The dependence of nonresonant tunneling rate on excitation power for different interbarrier thickness was discussed in detail. The competition between the intersubband relaxations was analyzed.

Key words photoluminescence, asymmetric coupled-double quantum wells, intersubband relaxation.