

# GaAs/AlGaAs 非对称耦合双阱 光荧光的温度依赖关系

徐士杰 刘剑 李国华 郑厚植 江德生

(中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家实验室, 北京 912 信箱, 100083)

**摘要** 报道了 GaAs/AlGaAs 非对称耦合双量子阱 pin 结构在不同温度下的光荧光谱, 观察到宽阱与窄阱重空穴激子峰荧光强度随温度上升而较快下降的不同变化关系, 结果表明窄阱电子的热发射是导致窄阱光荧光强度随温度上升而较快下降的主要原因. 同时观测到宽阱轻空穴激子峰强度特殊的温度依赖关系, 并分析了其物理机制.

**关键词** 光荧光, GaAs/AlGaAs, 量子阱, 温度相关性.

## 引言

非对称耦合双量子阱的研究日益受到重视<sup>[1~5]</sup>, 不仅由于这一研究导致载流子隧穿物理的重要进展, 而且, 其物理性质决定了它有着重要的器件应用价值. 本文报道 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As/GaAs (50 Å/40 Å/100 Å) 非对称耦合双阱 pin 结构在不同温度下的光荧光谱, 从测得的光荧光谱中清楚地观察到宽阱与窄阱的重空穴荧光峰随温度的不同变化关系, 窄阱电子的热发射导致温度上升时窄阱荧光强度有较快速的下降. 并研究了宽阱轻空穴激子峰的温度依赖关系, 分析了它的物理机制.

## 1 实验

采用分子束外延技术在 n<sup>+</sup>-GaAs (100) 衬底上生长非对称耦合双阱结构, 两个不对称的 GaAs 阱分别为 100 Å 和 50 Å, 中间 Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 垒宽 40 Å, 共生长 19 个周期不掺杂的非对称耦合双阱, 每个周期间生长 200 Å Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 隔离层. 顶层为掺 Be p<sup>+</sup>-GaAs 接触层, 构成 p<sup>+</sup>in<sup>+</sup> 结构.

光荧光谱的测量采用了 Ar<sup>+</sup> 离子激光的 4880 Å 线, 激发功率控制在 0.2 mW. 用 10~300 K 闭循环致冷器改变温度, 以测量不同温度下的光荧光谱.

## 2 结果与讨论

图 1 给出非对称耦合双阱 pin 结构在不同温度下的光荧光谱. 从图中可清楚地看到, 随着温度的升高, 宽阱和窄阱的重空穴激子峰移向低能端. 当温度上升到 30 K 以后, 在宽阱重空穴激子峰高能侧出现一个新的峰, 这个峰被指认为宽阱电子基态和轻空穴基态的激子复合发光峰. 图 2 给出窄阱重空穴激子峰能量 ( $E_{nh}$ )、宽阱重空穴激子峰能量 ( $E_{wh}$ ) 和宽阱轻空穴激子峰能量 ( $E_{wl}$ ) 随温度的变化关系. 由图 2 可看出, 温度由 10 K 增加到 300 K 时, 各激子峰之间能量差值基本保持不变, 这说明即使在室温条件下, 产生荧光的主要机制仍然是激子复合<sup>[6]</sup>.

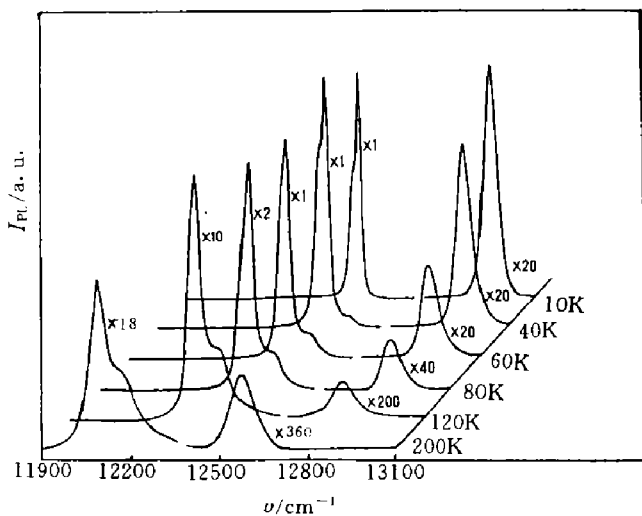


图 1 非对称耦合双阱 pin 结构在不同温度下的光荧光谱

Fig. 1 PL spectra from the asymmetric coupled double quantum wells pin structure at various temperatures

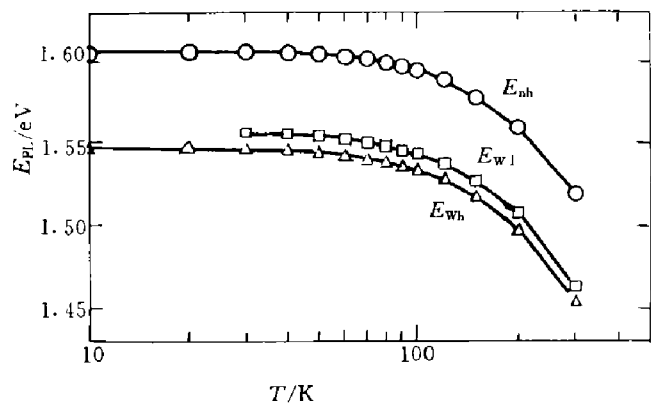


图 2 各激子峰能量随温度的变化关系  
Fig. 2 The excitonic peak energies vs. temperature

我们感兴趣的是窄阱和宽阱的荧光强度随温度的不同变化关系. 我们用传递矩阵法计算了样品的能带结构<sup>[5]</sup>, 通过分析在有内建电场作用下的能带关系可知: 由于存在窄阱电子“跑”到宽阱去的因素, 在低温条件下, 窄阱电子主要通过隧穿方式到达宽阱<sup>[1,4,5]</sup>; 而在较高温度下, 窄阱电子除以隧穿方式到达宽阱之外, 还会以热发射方式到达宽阱. 另外一种可能是窄阱电子通过吸收一个光学声子跳到宽阱第一激发态能级后, 快速弛豫到宽阱电子基态能级. 由于以上因素, 可以预料窄阱荧光强度会比宽阱荧光强度以更快的速率随温度上升而降低. 为了更清楚地表明荧光峰强度随温度的变化, 我们将图 1 测得的窄阱和宽阱重空穴激子峰强度随温度的变化关系示于图 3. 由图 3 可见, 当温度低于 30 K 时, 随着温度升高, 宽阱和窄阱的荧光强度几乎以相同的速率缓慢下降, 其主要原因在于辐射复合时间随温度升高而增加. 而当温度在 30~120 K 范围内时, 随着温度升高, 窄阱荧光强度的下降明显要比宽阱荧光强度高. 当温度进一步升高时, 窄阱荧光峰强度的下降速度

又趋于缓和.

现在我们简单分析一下窄阱荧光峰温度相关性的物理机制. 假定窄阱内电子的非辐射复合的主要机制是热发射<sup>[7]</sup>, 那么窄阱内电子的寿命  $\tau$  可由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$\tau^{-1} \approx \tau_r^{-1} + A_i \exp \left[ -\frac{\Delta E(F)}{k_B T} \right] + B_i \exp \left[ -\frac{2l_b \sqrt{2m^* \Delta E(F)}}{h} \right], \quad (1)$$

式 (1) 等号右边各项依次为辐射复合、热发射和隧穿;  $\Delta E(F)$  为内建电场作用下的电子有效势垒高度, 它等于  $[\Delta E_c - E_{n1} - |e|Fd]$ , 这里  $d$  是两个阱中心间距,  $F$  为电场强度,  $\Delta E_c$  为导带不连续值,  $E_{n1}$  为窄阱第一个子带能级;  $l_b$  是垒的厚度;  $A_i$  和  $B_i$  是与场强  $F$  无关的参数,  $k_B$  为波尔兹曼常数,  $T$  是温度,  $h$  为普朗克常数. 从式 (1) 可以看出窄阱内电子寿命随着温度的升高而减小. 同时, 由于隧穿几率仅弱依赖于温度, 而辐射复合寿命和热发射效率都随温度的增加而迅速增加, 因此, 窄阱的荧光强度随温度的增加而较快地下降. 另一方面, 宽阱荧光强度随温度的增加而相对慢地下降, 这是由于宽阱基态能级上的电子能量要比窄阱基态电子能量低约 60 meV, 所以, 宽阱基态电子的热发射效率远低于窄阱基态电子的热发射效率. 图 4 给出了窄阱和宽阱重空穴激子发光强度之比随温度的变化关系. 较高温

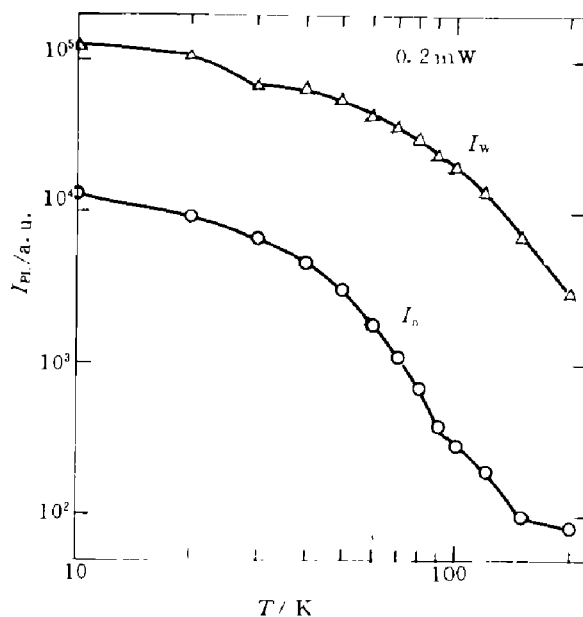


图 3 宽阱 ( $I_w$ ) 和窄阱 ( $I_n$ ) 重空穴激子峰强度随温度的变化关系  
Fig. 3 Temperature dependence of heavy-hole excitonic peak intensity from the wide well and the narrow well

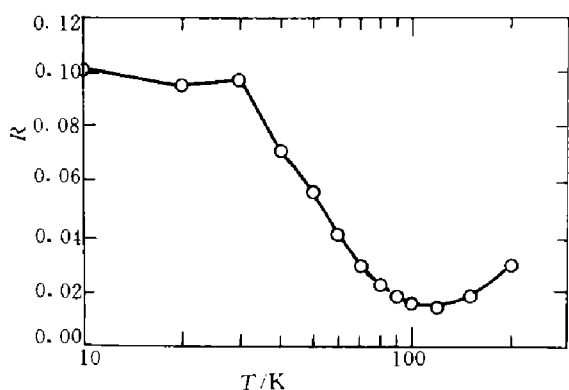


图 4 窄阱和宽阱重空穴激子发光强度之比随温度的变化关系  
Fig. 4 Ratio of heavy-hole excitonic peak intensities from the narrow well and the wide well

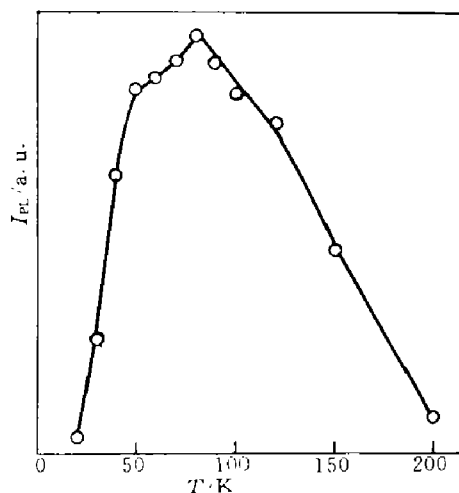


图 5 宽阱轻空穴激子峰强度对温度的依赖关系  
Fig. 5 Light-hole excitonic peak intensity from the wide well vs. temperature

度时和较低温度时窄阱和宽阱的发光强度之比差别可达 4 倍. 我们还注意到, 当温度上升到 120 K 以后, 窄阱和宽阱荧光强度之比又有所增大, 其物理机制有待进一步深入研究.

现在, 我们分析一下宽阱轻空穴激子峰强度与温度的依赖关系. 从图 5 可看出, 宽阱轻空穴激子峰强度先是随温度的升高而逐渐增强, 约 80K 后随温度进一步增加而逐渐下降. 根据玻尔兹曼分布规律, 温度较低时, 随着温度升高, 在具有较高能量的轻空穴子带上的粒子数呈指数增加, 这时轻空穴子带上的粒子数密度增加对于轻空穴激子的辐射跃迁起主要作用. 因此, 随着温度升高, 轻空穴激子荧光强度增加. 当温度增加到使轻空穴子带上的粒子数目饱和时, 辐射复合时间随温度的增加将起主要作用, 这时, 温度进一步增加将导致荧光强度降低. 计算表明, 宽阱轻空穴激子发光达到极大值时的温度所对应的能量基本上等于宽阱轻、重空穴能级的能量差.

### 参考文献

- 1 Sauer R, Thonke K, Tsang W T. *Phys. Rev. Lett.*, 1988,**61**:609
- 2 Livescu G, Fox A M, Miller D A B. *Phys. Rev. Lett.*, 1988,**63**:438
- 3 Nido M, Alexander M G W, Ruhle W W *et al.* *SPIE*, 1990,**1268**:177
- 4 Roskos H G, Nuss M C, Shah J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1992,**68**:2216
- 5 Xu Shijie, Jiang Desheng, Li Guohua *et al.* *Superlattices and Microstructures*, 1992,**12**(2):231
- 6 Jiang Desheng, Hung H, Ploog K. *J. Appl. Phys. Rev.*, 1988,**64**:1371
- 7 Gurioli M, Martinez-Pastor J, Colocci M *et al.* *Phys. Rev.*, 1992,**B36**:6922
- 8 Fox A M, Miller D A B, Livescu G *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1990,**57**:2315

## TEMPERATURE DEPENDENCE OF PHOTOLUMINESCENCE IN GaAs/AlGaAs ASYMMETRIC COUPLED DOUBLE QUANTUM WELLS STRUCTURE

Xu Shijie Liu Jian Li Guohua Zheng Houzhi Jiang Desheng

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

**Abstract** Photoluminescence spectra at various temperatures of GaAs/AlGaAs asymmetric coupled double quantum wells pin structure are reported. Different temperature dependence of heavy-hole excitonic peaks intensity in narrow- and wide-well was observed. The results show that the thermionic emission of the electrons in the narrow-well results in more rapid decreasing of the luminescence intensity. The special temperature dependence of light-hole excitonic peaks intensity in the wide-well and its mechanism were studied, too.

**Key words** photoluminescence, GaAs/AlGaAs, quantum well, temperature dependence.