

97-101

## GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的热电子效应\*

吴惠桢 李伟 李正直

(杭州大学物理系, 浙江, 杭州, 310028)

P. Dawson

Dawson, P

(Department of Physics, UMIST, Po Box 88, U. K.)

TN304.23  
0471.1

A

摘要 采用低温荧光激发光谱(PLE)研究了GaAs/AlGaAs多量子阱结构中热电子的弛豫过程,在PLE谱中首次观察到GaAs/AlGaAs多量子阱中LO声子的发射.用四能带Kane模型计算了由轻、重空穴杂化效应引起的价带结构的畸变及其对声子发射谱的影响.实验和理论计算结果均表明,光激发热电子可以通过发射LO声子直接弛豫到激子态上,实现热电子的冷却.

关键词 多量子阱, 激发光谱, 热电子, 声子散射.

研究

## 引言

半导体量子阱超晶格结构中热电子的过程是许多半导体低维器件(如量子阱激光器、光电探测器和调制掺杂场效应晶体管等)实际存在的问题,因为在这些器件中均有大量热电子的注入或产生,其行为会直接影响这类器件的光电性质.研究表明<sup>[1,2]</sup>,当光激发热电子的能量与导带底的能量差大大高于纵向光学模(LO)声子的能量时,热电子与LO声子的作用很强,因此,对GaAs材料,极性光学声子的散射是热电子的一个重要的能量弛豫过程,而且其散射速率大,在GaAs体材料中,极性光学声子的能量是36.6meV.当热电子的多余能量小于这一值时,发射LO声子是不可能的,这时其主要的能量损失机制是声学模声子的发射,电子与声学模声子的作用相对要比电子与LO声子的作用弱得多,散射速率低几个数量级,这会增加热电子逃逸出量子阱的可能,与声学声子相联系的散射往往是弱的发光强度,这种区别为实验观察热电子的弛豫过程提供了可能.这些不同的散射速率已多次在GaAs体材料的光电导谱响应中观察到<sup>[3,4]</sup>,其特点是光电导谱呈振荡的形式,而且振荡的周期是固定的,对于具有抛物线形状的导带和价带,容易得到光电导谱响应的振荡相邻峰值之间的能量差为

$$\Delta E = \hbar\omega(1 + M_e/M_h), \quad (1)$$

这里 $\hbar\omega$ 是LO声子的能量, $M_e$ 和 $M_h$ 为电子和空穴有效质量.但是在量子阱超晶格结构中,由于导带和价带分裂成一系列子带,加上轻、重空穴价带混杂使价带发生畸变,造成实验和结果解释有一定困难.近年来虽然对GaAs/AlAs超晶格结构中的热电子向垒区的X能带弛豫过程有些报道<sup>[1,2]</sup>,但对量子阱结构中热电子的弛豫过程的研究,作者还未见报道.

\* 国家自然科学基金部分资助项目,编号69606006

本文1996年8月25日收到,修改稿1996年10月11日收到

荧光激发光谱(PLE)对于研究量子阱和超晶格结构的物理特性和载流子的复合机制是一种有力的工具<sup>[5~7]</sup>. 虽然 PLE 不能用于测量材料的绝对吸收系数,但由它可获得有关吸收谱的信息. 另一方面,PLE 也不是吸收谱的简单复制,与普通吸收谱的重要的区别在于:在 PLE 的实验过程中不仅反映了半导体吸收光子产生电子和空穴,同时也包含了后继的载流子弛豫到处于较低能量的光发射态上的过程,所以在 PLE 的光谱响应中包含了热电子能量弛豫过程的信息. Weisbuch 等<sup>[4]</sup>用 PLE 研究了 GaAs 体材料中热电子与声子的相互作用,观察到了类似于光电导谱响应的振荡形式.

本文在高质量的 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的 PLE 谱中首次观察到了热电子通过发射 LO 声子弛豫到位于导带底的激子态的现象,而且振荡的周期不是 GaAs 体材料的恒定的 43meV. 这一差异归因于阱平面内空穴能带的畸变,这种畸变是由两方面的原因引起的:(1) 由于量子阱结构使导带底与 GaAs 体材料的导带底相比升高许多,致使非抛物线能带结构的因素影响明显;(2) 是由于在波矢  $k \neq 0$  处轻、重空穴的混杂也会引起这种畸变. 这里用一个包括轻、重空穴价带杂化效应四能带 Kane 模型来计算轻、重空穴能带畸变.

## 1 实验

文中所研究的多量子阱结构由分子束外延(MBE)设备生长,外延层是沉积在(001)取向的半绝缘 GaAs 衬底上,衬底温度为 630°C. 生长的顺序依次是:(1) 1.0 $\mu\text{m}$  GaAs 缓冲层,(2) 0.13 $\mu\text{m}$  AlGaAs 包层,(3) 60 周期 GaAs/AlGaAs 多量子阱,阱区厚度为 75 Å,垒区厚度为 180 Å,足以保证能有效地隔离各阱层中的电子,(4) 0.13 $\mu\text{m}$  AlGaAs 包层. 垒区和包层的 Al 的组份是 0.35,所有外延层都不掺杂. 量子阱的厚度由光学和双晶 X-射线衍射技术测得.

荧光光谱(PL)和荧光激发光谱(PLE)是在(6K)下测量的,样品置于液氮连续流动温度可变的低温恒温器中,由氦离子激光器泵浦的氮苯染料激光器输出的激光激发,功率密度为 2W/cm<sup>2</sup>. 荧光信号从样品的前表面收集,经过 SPEX1704 单色仪色散,再由液氮冷却的 GaAs 光电倍增管探测,光谱信号由锁相放大器放大后经计算机处理,输出到打印机打印. PLE 的测量通过适当选择 PL 荧光谱中的荧光能量作为探测位置,通过扫描可调谐染料激光器的激光波长,观察由热电子与 LO 声子相互作用所产生的 PLE 谱的特征.

## 2 结果与讨论

图 1 给出了样品的低温荧光光谱(PL),图 2 给出了样品的低温荧光激发光谱(PLE)的光谱响应结果,探测荧光光子能量位于 1.563eV. 比较图 1 和 2 的响应峰值位置,可以看出图 1 中的主峰位于 1.571eV,它是  $n=1(e-hh)$  的激子发射峰,其线宽(FWHM)很窄,只有 3.4meV,对于这个 60 周期的多量子阱结构,此线宽足以说明样品的高质量. 图 1 中的 1.571eV 激子峰在图 2 的 PLE 谱中被分辨成 2 个很靠近的吸收峰,它们分别位于 1.570eV (P1)和 1.5715eV (P2),PLE 的温度扫描实验证实,前者是  $n=1(e-hh)$  的束缚激子的吸收峰,后者是  $n=1(e-hh)$  自由激子峰.

图 1 中在主峰的高能量边还有一个次峰,荧光谱插图给出了次峰放大 100 倍的结果,它位于 1.581eV (P3),由文献[6]的结果,并与 PLE 谱比较,可以推断它是属于  $n=1(e-hh)$

激子的 2S 态跃迁. 这里 2S 和 1S 峰之间的能量差异 9.5meV, 比 GaAs 的 LO 声子的能量小得多. 我们相信 2S 峰的存在是由于声学声子散射带来热电子慢的冷却速度和样品中非辐射复合中心密度非常低的结果. 同样地, 位于图 2 中 1.589eV(P4) 的峰是属于  $n=1(e-h)$  激子 1S 态的跃迁, 而位于 1.600eV(P5) 的小峰是属于  $n=1(e-h)$  激子的 2S 态的跃迁.

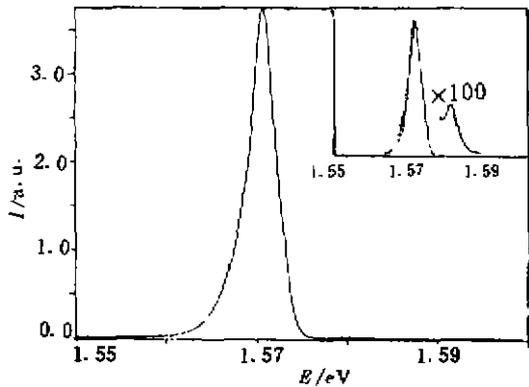


图 1 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 多量子阱的低温(6K)荧光光谱

Fig. 1 The 6K photoluminescence spectrum measured from the GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As multiple-quantum-well

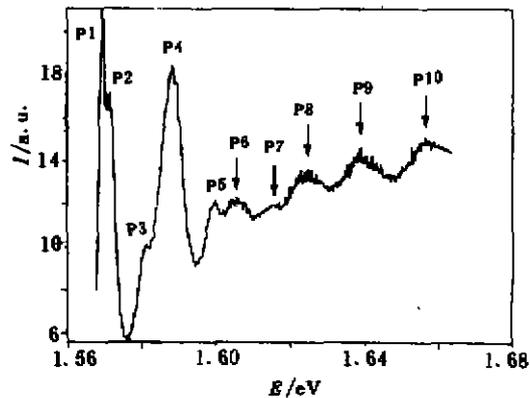


图 2 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 多量子阱的低温(6K)荧光激发光谱

Fig. 2 The 6K photoluminescence excitation spectrum measured from the GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As multiple-quantum-well

分析高能区的光跃迁, 涉及到波矢不为 0 处光的吸收和光激发载流子的复合的过程, 应考虑由量子阱结构引起的能带非抛物线特点和轻、重空穴的杂化效应引起的阱平面内空穴能带的畸变. 这里量子阱能带结构的计算采用四能带 Kane 模型<sup>[9]</sup>, 计算结果如图 3, 从图可见, 量子阱结构的能带, 尤其是轻、重空穴价带与三维 GaAs 材料的价带相比发生了很大的变化. 可以预期, 在这个量子阱结构中, 热电子的光激发过程和后续的冷却过程会不同于三维 GaAs 材料.

现在我们来讨论 PLE 谱中的高能量部分的跃迁, 注意到影响 PLE 谱响应的主要有 3 种物理量: (1) 量子态上的吸收系数, 它与其态密度有关; (2) 热电子从高能量状态弛豫到低能量状态的过程和在中间能量状态上的复合机制; (3) 所探测的荧光能量位置. 用图 3 来解释图 2 中较高能量位置的光跃迁, 它们的峰值位置分别位于 1.606eV(P6)、1.616eV(P7)、1.625eV(P8)、1.638eV(P9)和 1.658eV(P10)附近. 由各子带的能量位置计算可得到位于 1.639eV 的峰是由于  $n=1$  导带子带的电子和  $n=3hh$  重空穴子带的空穴在波矢原点的跃迁所致. 其它 4 个峰均非  $k=0$  处的子带间的跃迁. 进一步的 PLE 实验显示随着探测荧光能量位置的移动, P9 峰的位置不变, 但是其它 4 个峰的位置均发生相应的移动, 我们将这 4 个峰归因于热电子发射 LO 声子弛豫到低能态的过程中产生的. 这一结论与图 3 的能带计算结果一致. P6 峰是  $n=1$  hh 子带上激发的热电子发射一个 LO 声子后弛豫到探测的荧光能量上, 其能量差为 43meV, 与  $\hbar\omega(1+M_c/M_h)$  计算结果一致, P7 峰是从  $n=1$  lh 子带上

激发的热电子发射一个 LO 声子弛豫到 1.563eV 的结果. 这 2 个峰对应的热电子在  $n=1$  导带上的波矢位置是相同的. 因为图 2 中 P7 峰和 P6 峰的能量差刚好是计算得到的在该波矢位置( $k=0.01652\pi/a$ ) $n=1$  lh 和  $n=1$  hh 子带间的能量差. 由于与轻空穴激子相关的跃迁几率要比重空穴激子相关的跃迁几率小得多, 因此 P7 峰的强度比 P6 峰弱.

位于 1.625eV 附近的 P8 峰, 是处于该位置上的热电子通过发射一个 LO 声子弛豫到  $n=1$  (e-hh) 激子的 2S 激发态上引起, 很明显, 2S 态上的电子具有较高的发光复合几率, 因此能观测到 P8 峰的存在. 位于 1.658eV 的 P10 峰是激发到该处的热电子通过发射 2 个 LO 声子, 实现热电子的冷却, 首先它发射一个 LO 声子弛豫到 P6 峰的位置上, 然后它的行为与 P6 峰对应的热电子相同.

我们采用了低温 (6K) 荧光激发光谱 (PLE) 研究了 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构中热电子的弛豫过程, 在 PLE 谱中首次观察到 GaAs/AlGaAs 多量子阱中 LO 声子的发射. 在理论上采用四能带 Kane 模型计算了由轻重空穴混杂引起的价带结构的畸变及其对声子发射谱的影响. 实验和理论计算结果均表明: 光激发热电子可以通过发射 LO 声子直接弛豫到激子态上, 来实现热电子的冷却, 而并非先弛豫到导带底然后再与声学声子作用来形成激子. 由于 LO 声子具有比声学声子高得多的散射速率, 热电子的冷却速度快, 因此热电子逃逸出量子阱的可能性小, 在这种情况下的载流子的复合可以具有较高的发光效率.

### 参考文献

- 1 Moore K J, Duggan G, Dawson P, et al. *Phys. Rev. B*, 1989, **39**(2): 1219
- 2 Chomette A, Lambert B, Clerjaud B, et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 1988, **3**: 351
- 3 Shaw R W. *Phys. Rev. B*, 1970, **3**: 3238
- 4 Weisbuch C. *Solid State Electronics*, 1987, **21**: 179
- 5 Miller R C, Kleinman D A, Tsang W T, et al. *Phys. Rev. B*, 1981, **24**: 1134
- 6 Dawson P, Moore K J, Duggan G, et al. *Phys. Rev. B*, 1986, **34**: 6007
- 7 Duggan G, Moore K J, Samson B, et al. *Phys. Rev. B*, 1990, **42**: 5142
- 8 Eppenga R, Schuurmans F H M, Colak S. *Phys. Rev. B*, 1987, **36**: 1554

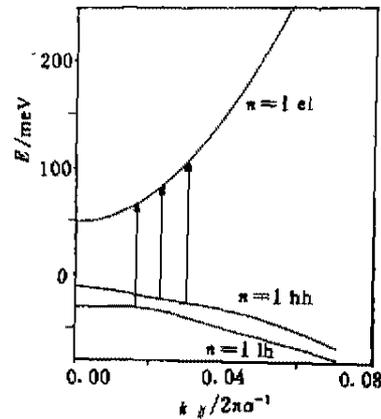


图 3 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 多量子阱的  $n=1$  el 子带和  $n=1$  hh, lh 子带沿 [100] 方向的能量色散关系

Fig. 3 The calculated energy dispersions of  $n=1$  el, hh, lh subbands in [100] direction from the GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As multiple-quantum-well

## HOT ELECTRON EFFECT IN GaAs/AlGaAs MULTIPLE QUANTUM WELLS\*

Wu Huizhen Li Wei Li Zhengzhi

(*Department of Physics, Hangzhou University, Hangzhou, Zhejiang 310028, China*)

P. Dawson

(*Department of Physics, UMIST, Po Box 88, U. K.*)

**Abstract** Hot electron relaxations in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells were studied using photoluminescence excitation (PLE) spectroscopy. LO phonon emissions in the quantum wells were observed. A four-band Kane model was built to calculate the deformation of sub-valence bands due to the mixing effect of heavy and light hole bands. The deformation affects the measured PLE responses. The measured and calculated results show that photo-excited electrons can cascade down to the exciton energy state directly by LO phonon emissions.

**Key words** multiple quantum well, excitation spectrum, hot electrons, phonon scattering.

---

\* The project partially supported by the National Natural Science Foundation of China