

请订阅《中外科技资料目录—激光、红外》

(原名《激光与红外索引》)

激光与红外属前沿科学和高技术范畴, 发展日新月异. 据不完全统计, 每月发表的激光、红外领域的论文和专著、应用和专利产品、新技术发展方面的消息和文章有数千篇. 我们特选编了此索引(目录), 为科学家和工程技术人员提供查找该领域文献的指南. 《目录》保持原《激光与红外索引》快、全、准的特点, 范围扩大到光电子学. 内容包括: 用中、英、日、法、德、俄语种所发表的中国、美国、英国、法国、德国、日本、独联体、东欧各国的核心期刊、专著、专利、特种文献、会议文集中出现的激光与红外领域的文章题录.

本《目录》由中科院上海光机所和上海技术物理所合办, 上海科技文献出版社出版, 欢迎订阅. 订价 16 元/册, 1994 年全年 6 期, 共计 96 元(含邮费).

联系人: 上海市 800-211 信箱 中科院上海光机所 梁康莉.

(庭)

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 多量子阱 的高压光致发光研究*

刘振先 李国华 韩和相 汪兆平

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

摘要 用金刚石对顶砧压力装置在液氮温度下和 0~4 GPa 的压力范围内测量了不同阱宽 (1.7~11.0 nm) 的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($x, y = 0.15, 0; 0.15, 0.33; 0, 0.33$) 多量子阱的静压光致发光谱, 发现在 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱中导带第一子带到重空穴第一子带间激子跃迁产生的光致发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而减小, 在 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 和 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 多量子阱中相应发光峰的压力系数随阱宽的增加而增加. 根据 Kronig-Penney 模型计算了发光峰能量的压力系数随阱宽的变化关系, 结果表明导带不连续性随压力的增加 (减小) 及电子有效质量随压力的增加是压力系数随阱宽增加而减小 (增加) 的主要原因.

关键词 多量子阱, 光致发光, 高压.

引言

用金刚石对顶砧压力装置可得到高达数十万大气压 (GPa) 的静水压力^[1], 在这样高的压力下, 半导体的能带结构将发生很大的变化, 由此可以观察到一些常压下观察不到的现象. 近年来, 有关 GaAs/AlGaAs 和 InGaAs/GaAs 多量子阱体系的静压光致发光研究已有不少报道, Venkateswaran 等人^[2]和 Wolford 等人^[3]利用金刚石对顶砧高压技术对晶格匹配的 GaAs/AlGaAs 多量子阱体系作过系统的研究, 发现光致发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而增加, 并对这种变化给出了定性的解释. Lefebvre 等人^[4]考虑了阱宽、势垒高度、介电常数和有效质量等因素计算了压力系数随阱宽的变化, 但没有考虑价带不连续性随压力的变化. 李国华等人^[5]和单伟等人^[6]分别系统地研究了 InGaAs/GaAs 应变量子阱的静压光致发光和静压调制光吸收谱, 都发现光致发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而减小, 李国华等人还计算了压力系数随阱宽的变化关系. 目前, 有关 InGaAs/AlGaAs 多量子阱的静压光致发光研究还很少报道. 由于在量子阱中电子和空穴的束缚能级与能带不连续性、有效质量和阱宽等参量有关, 因此, 通过研究发光峰能量的压力系数随阱宽的变化规律可以加深对这些参量及量子阱能带结构在高压下变化规律的认识.

* 国家自然科学基金和国家教委博士后科学基金资助项目

本文 1993 年 11 月 11 日收到, 修改稿 1993 年 12 月 6 日收到

本文介绍了在 77 K 温度下和 0~4 GPa 压力范围内, 对不同阱宽 (1.7~11.0 nm) 的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($x, y=0.15, 0; 0.15, 0.33; 0, 0.33$) 多量子阱的静压光致发光研究工作.

1 实验方法

实验用 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 多量子阱样品分别用 VG-V80H 型分子束外延系统生长. 在 (001) 晶向的半绝缘 GaAs 衬底上先生长 GaAs 缓冲层, 然后按从宽到窄的顺序依次生长 5 个阱宽不同的量子阱, 全宽均为 30 nm. 最后生长 30 nm 的 GaAs 覆盖层. 样品参数见表 1.

表 1 样品参数及实验和计算结果

Table 1 Parameters of samples and the measured and calculated results

GaAs/AlGaAs MQWs				
L_z (nm)	E_{exp} (meV)	E_{cal} (meV)	a_{exp} (meV/GPa)	a_{cal} (meV/GPa)
1.8	1780	1780	96.2±0.1	97.7
2.6	1709	1709	99.5±0.1	99.7
4.2	1626	1626	102.9±0.1	102.1
6.0	1584	1580	104.1±0.1	103.5
9.0	1553	1554	104.6±0.1	104.7
InGaAs/AlGaAs MQWs				
L_z (nm)	E_{exp} (meV)	E_{cal} (meV)	a_{exp} (meV/GPa)	a_{cal} (meV/GPa)
1.7	1703	1693	97.3±0.9	96.7
2.4	1613	1605	97.6±0.9	96.9
4.0	1501	1493	97.5±0.9	97.8
6.0	1441	1430	98.1±0.9	98.7
9.0	1397	1389	99.3±0.9	99.5
InGaAs/GaAs MQWs				
L_z (nm)	E_{exp} (meV)	E_{cal} (meV)	a_{exp} (meV/GPa)	a_{cal} (meV/GPa)
1.8	1471	1470	106.2 ± 0.5	105.0
2.6	1450	1451	104.7 ± 0.5	103.1
4.6	1414	1415	102.3 ± 0.5	101.7
7.0	1388	1389	100.9 ± 0.5	100.8
11.0	1363	1368	100.5 ± 0.5	100.6

样品用机械抛光的方法从背面减薄至 30 μm 厚, 再切成 100 μm 见方的小块, 然后装入 Mao-Bell 型金刚石对顶砧压力装置的样品室中. 为提高压力测量的精度, 采用 GaAs 衬底的带边发光峰随压力的移动作压力定标^[7]. 用固态氩作传压介质以保证在低温条件下的准静水压条件^[8]. 将自制的原位连续加压装置 (包括金刚石对顶砧) 浸泡在液氮中, 使改变压力和光谱测量都能在 77 K 下进行.

光致发光谱用自建的显微光谱系统测量. 该系统用氩离子激光器的 488.0 nm 线作激

发光源, 显微光路系统收集光荧光, GDM1000 双光栅单色仪分光, RCA C31034A 光电倍增管和 PAR 1112 光子记数系统接收. 实验方法和光路图详见文献 [8].

2 结果和讨论

图 1(a)~(c) 分别给出了在几种不同压力下测得的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 多量子阱的 77K 光致发光谱, 各条谱线对应的压力值在图中标出, 并且将发光峰的强度按最强峰的峰值强度归一化. 低压下的光致发光谱由 5 个主要的发光峰 E_i ($i = 1, \dots, 5$) 组成, 分别来自 5 个阱中的导带第一子带和重空穴第一子带间的激子跃迁发光. 在每个谱图中有一个在低压下强度很弱的峰 E_6 , 根据其能量位置及其压力系数指认为 GaAs 衬底的发光峰. 另外, 在图 1(c) 中, E_1 和 E_2 峰之间也有一个强度很弱的峰, 根据其能量位置指认它是第 2 个阱中的导带第一子带和轻空穴第一子带间的激子跃迁发光峰. 由图 1 不难发现, 所有样品的发光峰随压力的变化主要有两个特点: 一是随着压力的增加所有发光峰都向高能方向移动, 其次是发光峰的强度随压力的增加而显著改变. 在图 1(a) 中, 相对强度随压力的增加而明显变化, 宽阱发光峰的强度迅速增加, 而窄阱发光峰的绝对强度在整个压力范围内没有明显的减小. 在图 1(b) 和 (c) 中, 当压力超过一定值后, 发

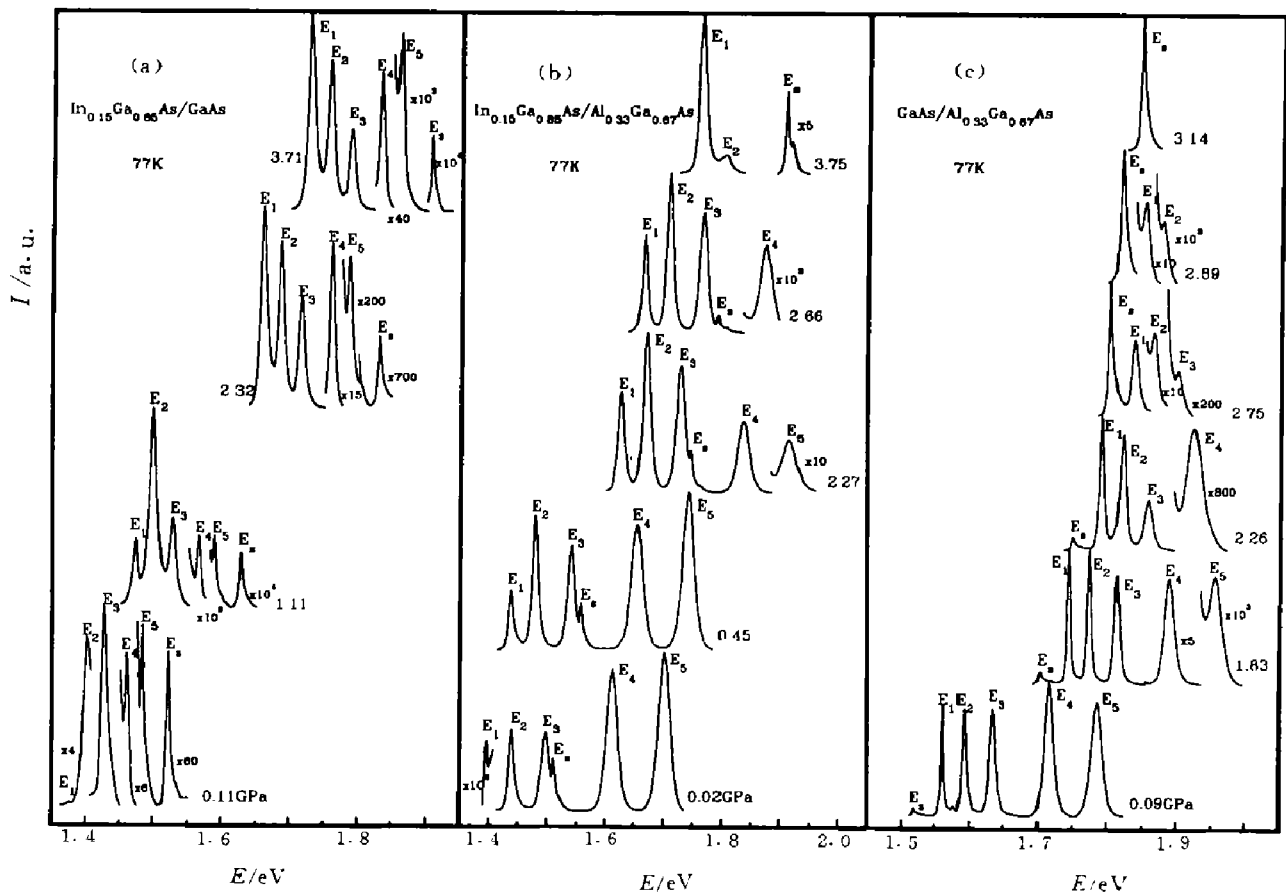


图 1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 多量子阱在不同压力下的 77K 光致发光谱

Fig. 1 PL spectra at 77K for $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ MQWs under different pressures

光峰的强度按能量从高到低的次序开始迅速减弱,这是由于电子从 Γ 谷向 X 谷的转移引起的. 能量较高的发光峰的强度随压力增加在很小的压力范围内迅速减弱,而相邻能量较低的发光峰的强度仍很强,这使得高能发光峰在一定的压力以上无法再观测到. 发光峰的峰值能量随压力的变化如图 2(a)~(c) 所示. 图中实线是用线性公式

$$E_i(P) = E_i(0) + a_i P, \quad (1)$$

对实验数据进行最小二乘法拟合的结果,其中 $E_i(P)$ 和 $E_i(0)$ 分别为压力 P 下和常压下的峰值能量, a_i 是一阶压力系数. 根据图 2,所有发光峰的能量随压力的变化基本上都是线性的. 拟合得到的 $E_i(0)$ 和 a_i 均在表 1 中列出. 由表 1 可以看出,随着阱宽的增加,这 3 类多量子阱体系中发光峰能量的压力系数表现出不同的压力行为: $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 、 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 和 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 发光峰能量的压力系数分别随阱宽依次减小、缓慢增加和增加,并且阱越窄差别越明显.

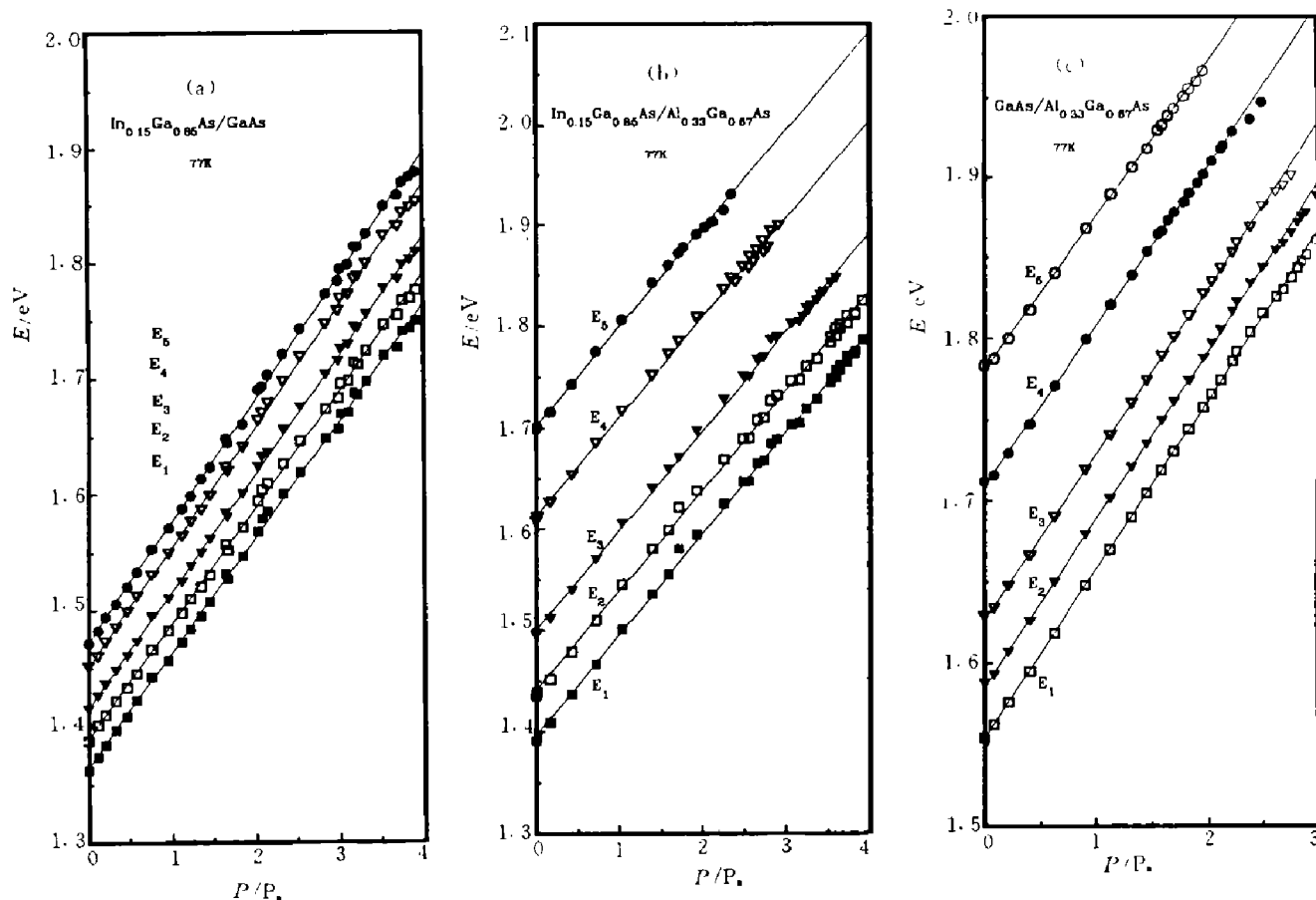


图 2 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 多量子阱发光峰的峰值能量随压力的变化

Fig. 2 Pressure dependence of the peak energies for $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ MQWs

为了解释发光峰能量的压力系数随阱宽的变化关系,需要考虑与发光峰能量有关的参量随压力的变化规律. 在多量子阱系统中,每个阱的导带第一子带到重空穴第一子带间的激子跃迁发光峰的能量可以写成

$$E_{PL} = E_g + E_{1e} + E_{1h} - E_{ex}, \quad (2)$$

其中 E_g 是势阱材料的带隙, E_{1e} 和 E_{1h} 分别是电子和重空穴的束缚能, E_{ex} 是激子束缚能. 根据 Kronig-Penney 模型^[9], E_{1e} 和 E_{1h} 与阱宽、势垒和势阱材料的带隙以及电子和重空穴的有效质量有关, 因此 E_{PL} 也是这些参量的函数. 在压力作用下, 这些参量将发生改变. 我们可以用

$$\frac{dE_{PL}}{dP} = \frac{dE_g}{dP} + \frac{dE_{1e}}{dP} + \frac{dE_{1h}}{dP} - \frac{dE_{ex}}{dP}, \quad (3)$$

来计算发光峰能量的压力系数. 其中 $dE_g(\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As})/dP = 98 \text{ meV/GPa}$ ^[2]、 $dE_g(\text{GaAs})/dP = 107.3 \text{ meV/GPa}$ ^[7]、 $dE_{ex}(\text{GaAs})/dP = 1 \text{ meV/GPa}$ ^[10] 是已知的, $dE_g(\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As})/dP$ 的测量值很离散, 这里取为 101 meV/GPa , 因此关键在于确定 dE_{1e}/dP 和 dE_{1h}/dP .

在 Kronig-Penney 模型中, E_{1e} 是导带不连续性 (即导带势垒高度)、电子有效质量和阱宽的函数, 在静压力下这 3 个参量都将发生变化. 而 E_{1h} 则是价带不连续性、重空穴有效质量和阱宽的函数, 在高压下只有价带不连续性和阱宽发生变化. 根据文献 [11], 静压力下 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 价带不连续性的压力系数为

$$d\Delta E_V(\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As})/dP = 2 \text{ meV/GPa}, \quad (4)$$

在计算中, $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 量子阱价带不连续性的压力系数取上述值. 另一方面, 有关 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 和 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 量子阱价带不连续性的压力系数还未见报道, 考虑到其数值与体材料能隙的压力系数相比较小, 这里暂取为 0. 于是导带不连续性的压力系数为

$$\frac{d\Delta E_C}{dP} = \frac{dE_{gB}^r}{dP} - \frac{dE_{gW}^r}{dP} - \frac{d\Delta E_V}{dP}. \quad (5)$$

电子有效质量随压力的变化可以用 Kane 的三带理论^[12]计算, 即

$$\frac{m_i(p)}{m_i(0)} = \frac{E_{gi} + a_i P}{E_{gi}} \cdot \frac{E_{gi} + \Delta_i + a_i P}{E_{gi} + \Delta_i} \cdot \frac{2\Delta_i + 3E_{gi}}{2\Delta_i + 3E_{gi} + 3a_i P}, \quad (6)$$

其中 Δ_i 是自旋轨道能带劈裂, $i = B, W$ 分别对应势垒和势阱.

在静压力下, 势阱宽度将变小. 由弹性理论可得

$$L_z(P) = L_z(0)[1 - (S_{11} + 2S_{12})P], \quad (7)$$

其中 L_z 是势阱宽度, S_{11} 和 S_{12} 是势阱材料的弹性常数.

根据式 (2)~(7) 及文献 [13], 并取激子束缚能为 10 meV , 首先用 Kronig-Penney 模型计算了常压下各阱发光峰的能量 E_{cal} , 计算结果列于表 1. 它们与实验结果符合得很好, 说明所选用的参数是正确的. 然后再计算 $P_i = K \cdot (i - 1)$ (其中 $i = 1, \dots$,

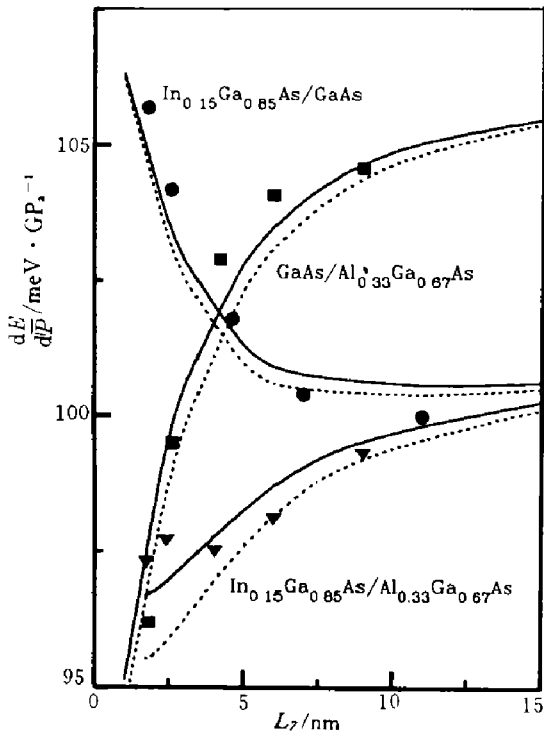


图 3 光致发光峰能量的压力系数随阱宽的变化 (实线和虚线为计算值; ●、▲、■为测量值)

Fig. 3 The measured and calculated pressure coefficients in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ MQWs as a function of well width (the solid and dashed lines represent the calculated results and the symbols are the measured values, respectively).

带不连续性随压力的增加而增加导致发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而减小, 当这一贡献比有效质量随压力的增加对压力系数的贡献大时, 多量子阱发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而减小 (如 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$); (2) 导带不连续性随压力的增加而减小和有效质量随压力的增加, 都将导致发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而增加 (如 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 和 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$).

10; 对 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 和 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$, $K=0.4$; 对 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$, $K=0.3$) 压力下发光峰的能量, 并按最小二乘法进行线性拟合, 从而得到各阱发光峰能量的压力系数. 计算结果也列于表 1. 图 3 给出了光致发光峰能量的压力系数随阱宽的变化关系, 可看出计算结果与实验结果符合得很好. 对所研究的 3 种多量子阱体系不难发现, 对 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱, 发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而减小; 对 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 和 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ 多量子阱, 其压力系数随阱宽的增加而分别缓慢增加和明显增加. 为了进一步说明导带和价带不连续性、电子有效质量和阱宽的静压压缩对发光峰能量压力系数的贡献, 图 3 给出了只考虑导带不连续性和电子有效质量影响的结果 (虚线), 然后进一步考虑静压压缩和价带不连续性的影响的结果 (实线), 不难发现二者相差很小. 因此, 可以认为 $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ 多量子阱发光峰能量的压力系数随阱宽的变化主要归因于导带不连续性和有效质量随压力的变化.

考虑到电子有效质量随压力的增加而增加, 这将导致发光峰能量的压力系数随阱宽的增加而增加. 另一方面, 导带不连续性随压力的变化取决于不同的多量子阱体系, 因此发光峰能量的压力系数随阱宽的变化可以更详细地分为两种情况: (1) 导

参考文献

- 1 Jayaraman A. *Rev. Mod. Phys.*, 1983, **55**:65
- 2 Venkateswaran U, Chandrasekar M, Chandrasekar H R et al. *Phys. Rev.*, 1986, **B33**:8416
- 3 Wolford D J, Kuech T F, Steiner T W et al. *Superlattices Microstruct.*, 1988, **4**:525
- 4 Lefebvre P, Gil B, Mathieu H. *Phys. Rev.*, 1987, **B35**:5630
- 5 Li G H, Zheng B Z, Han H X et al. *Phys. Rev.*, 1992, **B45**:3489
- 6 Shan W, Fang X M, Li D et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**:475
- 7 Wolford D J, Bradley J A. *Solid State Commun.*, 1985, **53**:1069
- 8 刘振先, 李国华, 韩和相, 等. *高压物理学报*, 1992, **16**:198

- 9 Cho H S, Prucnal P R. *Phys. Rev.*, 1987,**B36**:3237
- 10 Reimann K, Holtz M, Syassen K *et al.* *Phys. Rev.*, 1991,**B44**:2985
- 11 刘振先, 李国华, 韩和相, 等. *半导体学报*, 1994,**15**(3)
- 12 Kane E O. *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 1, New York: Academic, 1966
- 13 Adachi S. *J. Appl. Phys.*, 1985,**58**:R1

PHOTOLUMINESCENCE STUDIES OF $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ MULTIPLE QUANTUM WELLS UNDER HIGH PRESSURE*

Liu Zhenxian Li Guohua Han Hexiang Wang Zhaoping

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

Abstract Using diamond anvil cells, the photoluminescence (PL) spectra of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($x, y = 0.15, 0; 0.15, 0.33; 0, 0.33$) multiple quantum wells (MQWs) with well widths from 1.7 to 11.0 nm were measured at 77 K under high pressure up to 4 GPa. The experimental results show that the pressure coefficients of the exciton peaks corresponding to transitions from the first conduction subband to the heavy-hole subband decrease with increasing well width for $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ MQWs. However, the corresponding pressure coefficients increase for $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ and $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ MQWs, respectively. Calculations based on the Kronig-Penney model reveal that the increased or decreased conduction-band offsets and the increased effective masses of electrons with increasing pressure are the main reasons of the change in the pressure coefficients.

Key words multiple quantum wells, photoluminescence, high pressure.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China and by the Post-doctoral Science Foundation of National Education Committee of China