

In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 多量子阱 子能带跃迁压力效应

单伟 方晓明 李丹 姜山 沈学础

(中国科学院红外物理国家实验室, 上海, 200089)

用光调制吸收光谱方法在不同压力条件下研究了 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 应变多量子阱的子能带跃迁, 发现子能带跃迁能量随压力的变化行为与构成量子阱的组成体材料带间跃迁能量的变化相似, 并且子能带跃迁能量压力系数与量子阱的宽度有关. 还讨论了压力可能引起的导带不连续率的变化和 In_{0.15}Ga_{0.85}As 应变层的临界厚度.

关键词: 光调制光谱, 流体静压力, 量子阱, 砷化镓(GaAs).

1 引言

近年来, 非晶格匹配的 In_xGa_{1-x}As/GaAs 多量子阱系统的光学性质和电学性质得到广泛研究^[1~16], 已有多种光学方法被用于研究 In_xGa_{1-x}As/GaAs 量子阱系统的能带结构及其子能带间的跃迁, 其中包括光散射测量^[2]、荧光光谱^[8]、透射光谱^[9,10]、光电流谱^[11]、光调制反射谱^[12,13] 以及光伏谱^[14] 等等. 最近还有关于 In_xGa_{1-x}As/GaAs 多量子阱荧光光谱的压力效应报道^[15,16]. 与其它光学测量方法相比, 光调制光谱方法具有对样品无特殊要求、简单有效、灵敏度高等优点, 即使在室温条件下, 调制光谱测量也可以提供能带结构的详细信息.

本文报道利用光调制光谱方法, 结合金刚石对顶压机技术, 在流体静压力条件下对 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 应变多量子阱子能带间跃迁的压力效应的研究. 实验发现量子阱的子能带间的跃迁能量随压力的变化与体材料基本带间跃迁能量的压力效应相似; 子能带跃迁能量的压力系数在数值上略小于体材料基本禁带的压力系数, 并与量子阱的宽度有关. 实验结果表明: 压力效应对导带不连续率(band offset ratio)及确定其子能带跃迁能量的影响可以忽略, 量子阱中 $x=0.15$ 的 InGaAs 应变层弹性形变的临界厚度应小于 15 nm, 其厚度大于 15 nm 时样品质量明显下降.

2 实 验

实验样品是用分子束外延方法生长在(0 0 1) GaAs 衬底上的具有 15 个周期的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 和 GaAs, 生长时衬底温度为 $520\sim 580^\circ\text{C}$, 在量子阱结构与衬底之间是厚度为 $0.7\ \mu\text{m}$ 的 GaAs 缓冲层. 在量子阱结构上有一厚度为 $\sim 200\ \text{nm}$ 的 GaAs 覆盖层. 本工作分别研究了阱宽为 $8\ \text{nm}$ 和 $15\ \text{nm}$ 的两种多量子阱样品, 其 GaAs 势垒层的厚度均为 $15\ \text{nm}$. 样品的 In 组分和阱宽均通过 X 射线双晶衍射实验确证. 实验中将尺寸为 $200\times 200\ \mu\text{m}^2$, 厚度为 $\sim 20\ \mu\text{m}$ 的样品装入金刚石对顶压机进行不同压力下光调制吸收光谱测量. 测量中用 He-Ne 激光作为调制光, 调制频率为 $200\sim 300\ \text{Hz}$. 探测光源为 $250\ \text{W}$ 溴钨灯, 经一个 $0.5\ \text{m}$ 焦距的光栅单色仪分光后的准单色光与调制光同时照射在样品的同一点上, 光谱信号由 Si 光敏二极管检测, 经锁相放大器放大输出. 施加在样品上的流体静压力由标准红宝石荧光谱线法测定. 图 1 给出阱宽为 $8\ \text{nm}$ 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变多量子阱样品在几种不同压力下的光调制透射谱. 图中字母 C、D 所指示的弱光谱结构只在压力大于 $10^9\ \text{Pa}$ 时才能观察到, 而对于阱宽为 $15\ \text{nm}$ 的样品, 在常压下就可以与 A、B、E 同时观察到对应于这两个光谱的结构.

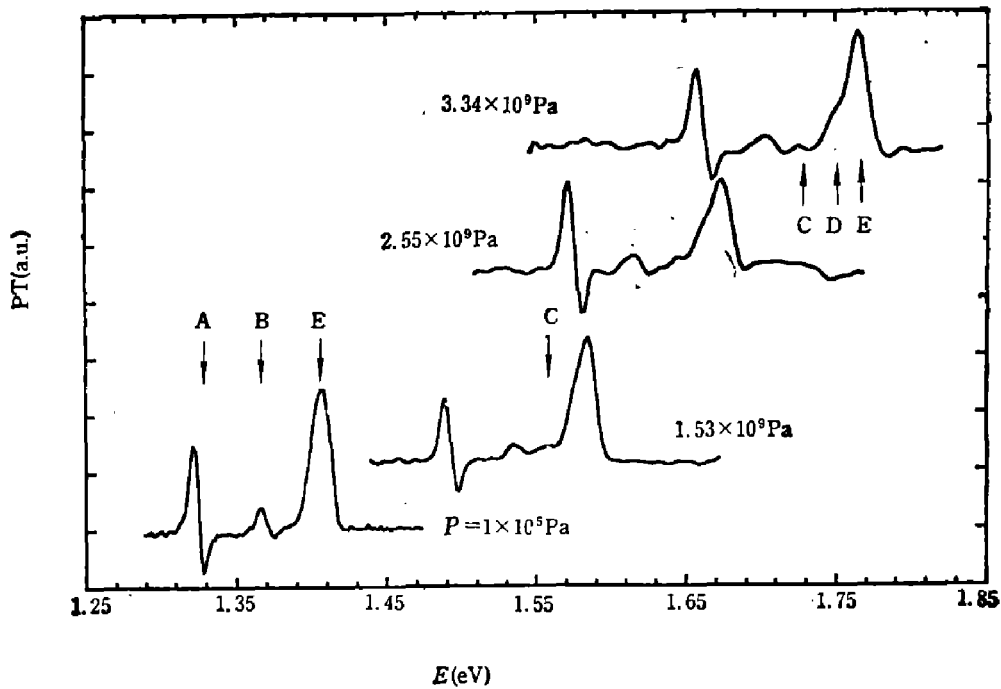


图 1 不同压力下 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}(8\text{nm})/\text{GaAs}(15\text{nm})$ 应变多量子阱样品的光调制透射谱

Fig. 1 Photo-modulated transmission spectra of the $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}(8\text{nm})/\text{GaAs}(15\text{nm})$ MQWs sample at different pressures

3 讨 论

为了指认实验观察到的各光谱结构可能对应的子能带间跃迁, 用 Bastard 包络函数近似^[17] 估算量子阱中的子能带能级, 有关的详细计算已另文报道^[11]. 这里, 我们用符号 mnH 表示第 m 个重空穴(H)价带子能带与第 n 个导带子能带间的跃迁, mnL 则表示第 m 个轻空穴(L)价带子能带与第 n 个导带子能带间的跃迁. 计算得到的导带不连续比率 $Q_c (= \Delta E_c / \Delta E_g)$ 为 0.7, 这里 ΔE_c 为 In_{0.15}Ga_{0.85}As 和 GaAs 材料在界面上导带不连续能量值, ΔE_g 为这两种材料基本禁带宽度之能量差. 表 1 列出常压下实验观察到的光谱结构与子能带跃迁能量的对应关系. 图 2 给出阱宽为 15 nm 的 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 样品的子能带跃迁能量与压力的关系, 图中实线代表用最小二乘法对实验数据的最佳拟合. 利用公式

$$E_{mnH(L)}(P) = E_{mnH(L)}(0) + \alpha P + \beta P^2 \quad (1)$$

拟合得到各个子能带跃迁的压力系数也列于表 1, 表中 $\alpha = dE_{mnH(L)}/dP$, $\beta = d^2E_{mnH(L)}/dP^2$. 由于光谱结构 O 和 D 的信号比较弱, 信噪比较低, 因而确定的这两个光谱结构所对应的子能带跃迁压力系数误差较大. 表 1 还列出了 GaAs 衬底材料基本禁带的一级和二级压力系数, 以便与有关报道进行比较^[18, 19].

我们考虑了由于 GaAs 和 In_{0.15}Ga_{0.85}As 两种材料的基本带间跃迁能量压力系数的不同可能对导带不连续率 Q_c 的影响, 以及 Q_c 的压力效应对确定子能带跃迁能量的影响. 尽管 GaAs 和 InAs 材料的基本带间跃迁的压力系数 ($dE_g^{GaAs}/dP = 1.2 \times 10^{-7} \text{ meV/Pa}$ ^[18, 20] 和

表 1 光谱结构所对应的子能带跃迁及其压力效应(跃迁能量单位为 eV, 压力一级系数为 10^{-8} meV/Pa , 二级系数为 $10^{-16} \text{ meV/Pa}^2$)

Table 1 The assignments of the intersubband transitions corresponding to the spectral features and their pressure dependence(The transition energy is in eV, the linear pressure coefficient in 10^{-8} meV/Pa , and the quadratic pressure coefficient in $10^{-16} \text{ meV/Pa}^2$)

谱线结构	样品 8nm/15nm	样品 15nm/15nm
11H(A)	1.333	1.313
11L(B)	1.374	1.359
22H(C)	—	1.324
33H(D)	—	1.391
GaAs(E)	1.415	1.416
dE_{11H}/dP	11.2	10.3
dE_{11L}/dP	11.1	10.5
dE_{22H}/dP	—	11.7
dE_{H-e}/dP	—	10.8
dE_{GaAs}/dP	12.0	11.8
d^2E_{11H}/dP^2	-0.0374	-0.0136
d^2E_{11L}/dP^2	-0.0308	-0.0227
d^2E_{GaAs}/dP^2	-0.0431	-0.0401

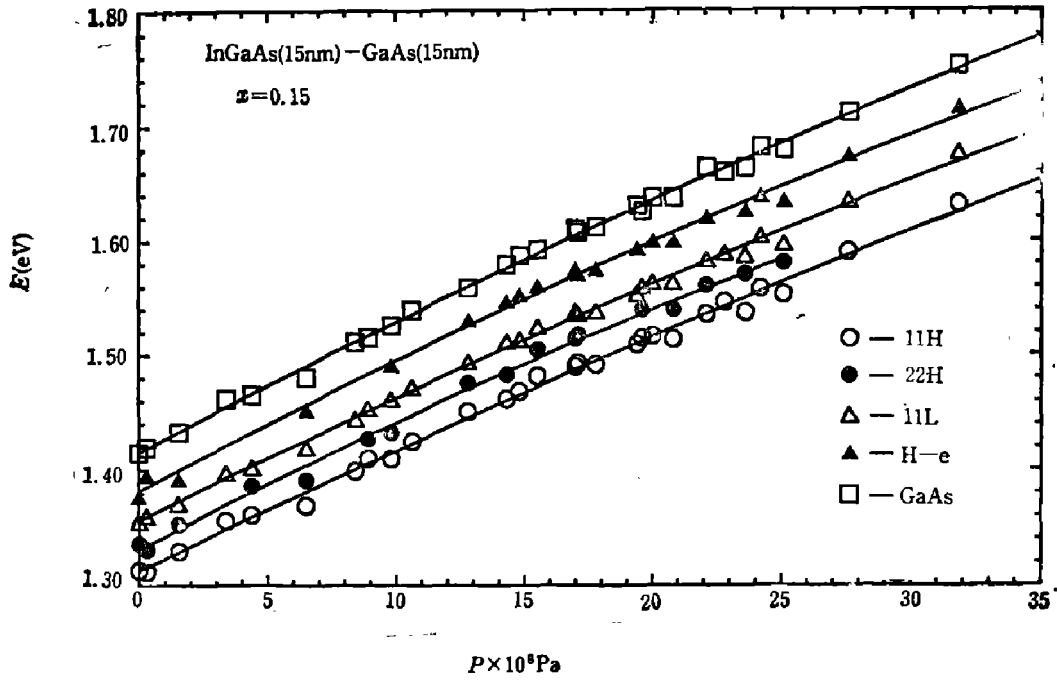


图2 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}(15\text{nm})/\text{GaAs}(15\text{nm})$ 应变多量子阱子能带间跃迁能量随压力的变化
Fig. 2 Pressure dependence of the intersubband transition energies in strained $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}(15\text{nm})/\text{GaAs}(15\text{nm})$ MQW.

$dE_g^{mAs}/dP = 1.02 \times 10^{-7} \text{ meV/Pa}^{[20]}$ 已有定论, 但有关 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的压力系数尚无报道. 对于本文研究的 $x=0.15$ InGaAs , 由于组分较小, 可以在考虑合金效应时忽略所谓的弯曲效应 (Bowing effect). 根据线性内插估计 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 体材料的基本带间跃迁压力系数为 $dE_g/dP \approx 1.17 \times 10^{-7} \text{ meV/Pa}$, 据此可以进一步估算 Q_c 的压力效应为 $\sim 10^{-12}/\text{Pa}$ 量级. 将这一效应引入子能带跃迁能量位置的计算过程, 发现能量的变化范围在 2meV 之内. 另一方面, 根据实验光谱结构对应的能量值计算限制在量子阱中的子能带能量位置, 其计算结果的不确定性为 $3\sim 5\text{meV}$, 这相当于 Q_c 的计算值具有 ± 0.05 的误差. 因为压力对 Q_c 的影响引起的子能带能量位置的变化小于实验误差, 因此, 在子能带能量位置计算中可将压力对 Q_c 的影响忽略不计. 表 1 所列子能带跃迁能量的压力系数均小于量子阱体材料基本禁带的压力系数. Kangarlou 等人报道过在测量 $\text{GaAlAs}/\text{GaAs}$ 系统的光调制反射光谱时, 也观察到类似的量子阱子能带跃迁的压力效应^[21, 22]. 这些与子能带跃迁相关的较小的压力系数可部分归结为与量子阱中子能带波函数相互耦合的结果. 同时, 在流体静压力的作用下, 样品中 InGaAs 层的应变可能会发生轻度弛豫, 这种应变弛豫也会引起压力系数减小.

我们还注意到与 11H 和 11L 子能带跃迁相关的压力系数. 阱宽 8nm 样品 ($dE_{11H}/dP = 1.12 \times 10^{-7} \text{ meV/Pa}$, $dE_{11L}/dP = 1.11 \times 10^{-7} \text{ meV/Pa}$) 与阱宽 15nm 样品 ($dE_{11H}/dP = 1.03 \times 10^{-7} \text{ meV/Pa}$, $dE_{11L}/dP = 1.05 \times 10^{-7} \text{ meV/Pa}$) 之间的差别明显大于实验误差. 目前, 有关 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱系统中合金效应与 InGaAs 应变层临界厚度的关系已有不少理论和实验报道^[3, 9, 23~25], 这些工作发现非晶格匹配引起的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结构中 InGaAs 应变层的临界厚度与 In 组分有关, 例如, 文献[3, 9]指出 $x=0.15$ InGaAs

应变层的临界厚度应小于 12 nm, 这样才能获得无位错高质量的量子阱样品. 否则, InGaAs 层厚增加会使 GaAs 与 InGaAs 之间的晶格失配, 无法被弹性极限之内的应变所调节, 而造成 InGaAs 晶面倾斜, 使 GaAs-InGaAs 界面上以及附近的位错密度大幅度增加, 但也有报道认为^[2, 25] InGaAs 应变层的临界厚度应该是 12 nm 的两倍. 目前对 InGaAs/GaAs 量子阱系统中应变层的临界厚度尚无统一的认识. 显然, 当 InGaAs 层厚超过弹性应变的临界值时, 在 InGaAs 层内或在 InGaAs、GaAs 层中均出现晶格错位, 导致在 GaAs-InGaAs 界面出现大量界面态, 占据量子阱中子能带能级的电子、空穴或者激子都会受到这些具有短程作用的中性缺陷势的微扰影响^[26], 在电子-晶格相互作用(尽管在量子阱中这种作用相对较弱)下被束缚在这些缺陷的附近. 此外, 界面态波函数原则上是由来自许多带的波函数的贡献构成, 并局域在界面上及其附近. 由于势阱深度有限, 量子阱中子能带波函数将以指数衰减的形式伸展到势垒 (GaAs) 层中, 在界面上及其附近与界面态波函数发生交迭混合. 这种波函数的交迭混合必然会引起量子阱内子能带电子态的某些变化, 由此影响占据这些子能带电子态的电子或空穴的行为. 从阱宽为 8 nm 与阱宽为 15 nm 的 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 多量子阱样品子能带间跃迁能量压力系数的明显差别可以推断, 位错的出现和应力弛豫是导致阱宽 15 nm 样品的子能带跃迁压力系数减小的原因. 这是因为被限制在量子阱内的子能带电子态对于价带顶的压力效应取决于它的波函数的构成成份, 所以压力实验可作为验证应变层临界厚度的一种手段.

4 结 论

In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 多量子阱子能带跃迁能量的压力效应与 GaAs 和 InGaAs 合金的基本带间跃迁的压力效应相似, 但其压力系数值小于根据合金效应得出的压力系数, 这是因为被限制在量子阱内的导带子能带与价带间存在微弱的耦合, 而在外加压力的作用下自建应力可能的微小弛豫也是原因之一. 更值得注意的是 In_{0.15}Ga_{0.85}As 层厚为 15 nm 的应变多量子阱中子能带跃迁能量的压力系数小于层厚为 8 nm 的样品. 根据以上子能带跃迁能量的压力系数与阱宽的关系, 我们建议 $x=0.15$ InGaAs 应变层的临界厚度应小于 15 nm.

致谢: 作者十分感谢北京中国科学院物理研究所周均铭研究员为本工作提供了样品.

参 考 文 献

- 1 Kowalczyk S P, Schaffer W J, Kraut E A et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982; **20**:705
- 2 Menendez J, Pinczuk A, Werder D J et al. *Phys. Rev.*, 1987; **B36**:8165
- 3 Orders P J, Usher B F. *Appl. Phys. Lett.*, 1987; **50**:9
- 4 Van de Walle O G, Martin R M. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1986; **B5**:1055
- 5 Tersoff J. *Phys. Rev. Lett.*, 1986; **56**:2755
- 6 Roth A P, Masut R A, Sacilotti M et al. *Superlatt. Microstruct.*, 1986; **2**:507
- 7 Anderson N G, Laidig W D, Kolbas R M et al. *J. Appl. Phys.*, 1986; **60**:2361
- 8 Joyce M J, Johnson M J, Gal M et al. *Phys. Rev.*, 1988; **B38**:10978
- 9 Marzin J Y, Chatasse M N, Sermage B. *Phys. Rev.*, 1985; **B31**:8289
- 10 Ji G, Huang D, Reddy UK et al. *J. Appl. Phys.*, 1987; **62**:3366

- 11 Fang X M, Shen S O, Hou H Q et al. *Surface Science*, 1990; **228**:351
- 12 方晓明, 沈学础, 侯宏启 et al. *半导体学报*, 1990; **11**(4): 270
- 13 Ji G, Dobbelaer W, Huang D et al. *Phys. Rev.*, 1989; **B39**:3216
- 14 Fortin E, Hua B Y, Roth A P. *Phys. Rev.*, 1989; **B39**:10887
- 15 Jones E D, Ackermann H, Schinber J E et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1985; **47**:492
- 16 Wang L J, Hou H Q, Zhou J M et al. *Acta Phys. Sinica*, 1989; **38**:1086(in Chinese)
- 17 Bastard G. *Phys. Rev.*, 1982; **B25**:7584
- 18 Welber B, Cardora M, Kim C K et al. *Phys. Rev.*, 1975; **B12**:5729
- 19 Hanfland M, Syassen K, Christensen N E. *J. Phys. (Paris) Colloq.*, 1984; **8**(11):57
- 20 Landolt-Bornstein, *New Series*, Group III, edited in chief by K. H. Hellwege, Berlin: Springer, Vol. **17a**, edited by O. Madelung
- 21 Kangarlu A, Chandrasekhar H R, Chandrasekhar M et al. *Superlattices and Microstructures*, 1986; **2**:569
- 22 Chandrasekhar M, Chandrasekhar H R, Kangarlu A et al. *Superlattices and Microstructures*, 1988; **4**:107
- 23 Matthews J W, Blakelee A E. *J. Cryst. Growth*, 1974; **27**:118
- 24 People R, Bean J C. *Appl. Phys. Lett.* 1985; **47**:322; 1986; **49**:229
- 25 Gourley P L, Fritz I J, Dawson L R. *Appl. Phys. Lett.*, 1987; **52**:377
- 26 Toyozama Y. in *Relaxation of Elementary Excitations*, edited by R. Kubo, E. Hanamura, Berlin, Springer-Verlag, 1980:3~18

EFFECT OF PRESSURE ON THE INTERSUBBAND TRANSITIONS IN STRAINED $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ MULTIPLE QUANTUM WELLS

SHAN WEI, FANG XIAOMING, LI DAN, JIANG SAN
SHEN XUECHU (S. O. SHEN)

(National Laboratory for Infrared Physics, Academia Sinica, Shanghai 20083, China)

The dependence of the intersubband transitions on pressure in strained $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ multiple quantum wells has been studied in two samples with well widths of 8nm and 15nm, respectively, with photo-modulated transmission spectroscopy by using a diamond anvil cell. The pressure coefficients of the energies for the intersubband transitions have been found to depend significantly on the well widths and be smaller than that of the band gap of constituents in bulk form. These results suggest that the critical thickness for strained $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ layer should be smaller than 15nm.

Key words: photo-modulation spectroscopy, hydrostatic pressure, quantum wells, gallium arsenide (GaAs).