

研究快报

In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 和 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱的静压下光致发光的对照研究

李国华 郑宝真 韩和相 汪兆平

(中国科学院半导体研究所,北京)

(上海红外物理开放研究实验室)

1990年1月24日收到

在 77K, 0—60kbar 范围内对在同一衬底上生长的 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 和 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱的静压下的光致发光进行了对照研究。在 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱中同时观察到导带到轻重空穴子带的跃迁。而在 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 阵中只观察到导带到重空穴子带的跃迁。与 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 的情况相反, In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 量子阱的光致发光峰的压力系数随阱宽的减小而增加。在压力大于 48kbar 时观察到多个与间接跃迁有关的发光峰,对此进行了简短的讨论。

主题词 量子阱,光致发光,压力

In_xGa_{1-x}As/GaAs 应变量子阱超晶格的研究已日益受到重视。我们在 In_xGa_{1-x}As/GaAs ($x = 0.165, 0.18$) 应变量子阱结构的静压光致发光研究中曾发现对应于导带第二子带的发光峰的压力系数略大于第一子带的^[1]。此结果与 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱的情况正好相反。王莉君等也曾在阱宽为 22 Å 和 13 Å 的 In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs 应变量子阱的静压光致发光研究中发现其发光峰的压力系数随阱宽的减小而增加^[2]。但前者是在室温下测量,此时第二子带的发光峰表现为第一子带发光峰高能侧的一个肩。因此其峰值位置不易精确测定。后者虽在 77K 下测量,但实验误差与压力系数的差异接近相等。因此对上述实验结果还需要进一步的验证。

我们采用比较低的激发强度,并用 GaAs 衬底的吸收边随压力的变化来进行压力标定,提高了测量精度。对在同一衬底上生长的 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 和 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱的静压下光致发光进行了对照研究。测量结果证实 In_xGa_{1-x}As/GaAs 阵光致发光峰的压力系数的确随阱宽减小而增加。并在压力大于 48kbar 后观察到多个与 X 谷有关的间接跃迁发光峰。并对此进行了简短的讨论。

所测样品用 MBE 方法生长。在半绝缘 GaAs 衬底上依次生长 9 个阱宽为 60 Å, 垒宽为 100 Å, 一个阱宽为 120 Å。垒宽为 200 Å 的 In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 应变量子阱和一个阱宽为 120 Å, 垒宽为 200 Å 的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 阵。盖层是 1000 Å 的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 层。样品的阱宽及 In、Al 的组分均由生长条件给出。将样品背面磨至约 30 μm

厚,切成 $100\mu m$ 大小的小片装入压室中。压力装置为金刚石对顶砧压室。用4:1的甲醇乙醇混合液作为传压媒质。在压室中同时装入红宝石以进行通常的压力标定。压头浸在液氮中进行测量,光致发光和透射谱测量均在自建的显微光谱系统上进行。实验方法和光路系统详见文献[3]。测量光致发光时用氩离子激光器的 5145 \AA 线作激发光源,激发强度约 10^2 W/cm^2 。测量透射谱时用装在压头底部的普通白炽灯作光源。光致发光光谱或透射光谱均由GDM1000双光栅单色仪分光。用RCA C31034光电倍增管和光子计数系统接收。在压力实验中通常用红宝石的 R_1 线随压力的移动作压力的标定。但由于它的压力系数比较小($0.753\text{ cm}^{-1}/\text{kbar}$),因此标定的压力的误差比较大。而GaAs的吸收边的压力系数要大许多($86.3\text{ cm}^{-1}/\text{kbar}$),对压力的变化比较敏感,在所测量的范围内基本上是线性的^[4,5]。我们在测量样品的光致发光的同时测量它的GaAs衬底的吸收边。用它随压力的变化来作压力标定。(压力系数取公认值 10.7 meV/kbar ^[4])。这样不但可以提高压力的测量精度,而且由于吸收边和发光谱是在同一点测得,可以减少由于压力

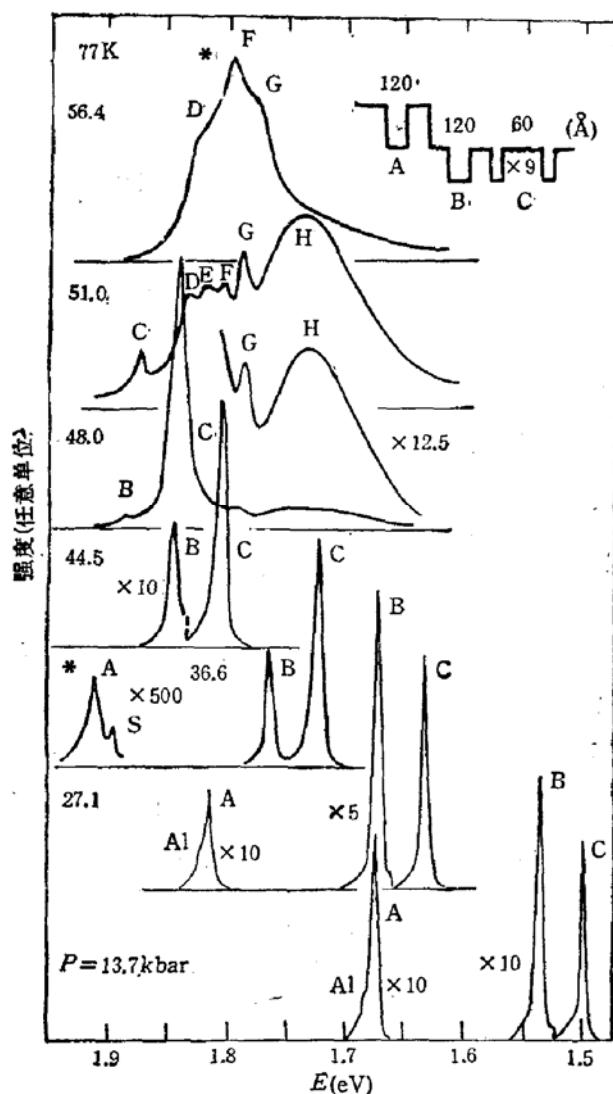


图1 几个压力下 $In_{0.1}Ga_{0.8}As/GaAs$ 和 $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 量子阱的光致发光谱。图中上部为样品导带结构示意图

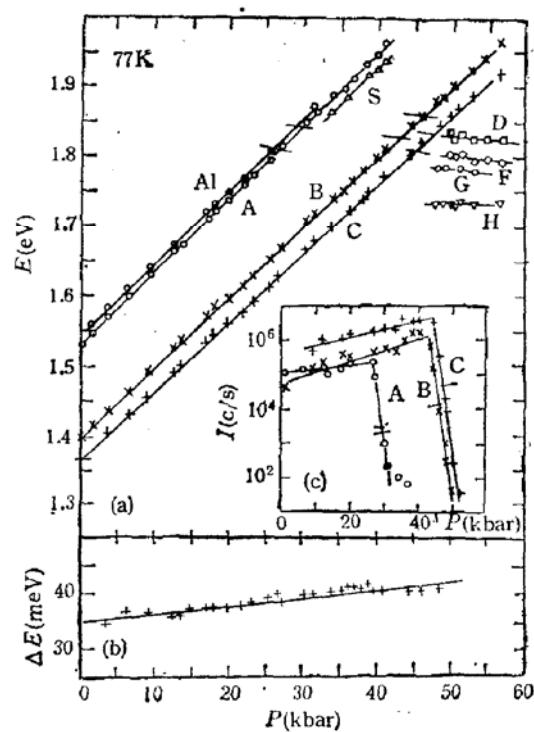


图2 $In_{0.1}Ga_{0.8}As/GaAs$ 和 $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 量子阱光致发光谱
(a) 峰值能量的压力关系 (b) B-C 的压力关系
(c) 峰值强度的压力关系

不均匀而引起的测量误差。采用这种方法后，压力系数的标准差可以从用红宝石作压力标定时的 $\pm 0.1 \text{ meV/kbar}$ 减小到 $\pm 0.04 \text{ meV/kbar}$ 。从而可以对压力系数的差异给出较可信的结果。

图 1 给出了几个压力下的光致发光谱。各谱对应的压力已在图上标出。图中标有*号的谱所用的激发强度为约 $3 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 。其它谱所用的激发强度均为 $3 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$ 。在图的上部给出了样品的导带结构示意图并标出了 A、B、C 峰的来源。在较低的压力下共观察到三个主要的发光峰 A、B 和 C。分别是 120 \AA 的 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 阵， 60 \AA 和 120 \AA 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 阵的发光。由于所用的激发功率较低，因此发光峰的半宽较小(约 7 meV)。在 A 峰的高能侧可以看到一个明显的肩 A_1 ，它与 A 峰相距约 13 meV ，与用 K-P 模型算得的轻重空穴第一子带间的能量差 13.3 meV 十分接近。因此 A_1 和 A 分别对应于导带第一子带到价带轻重空穴第一子带的激子发光。与此不同的是在 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 阵的发光峰 B 和 C 中都未见到类似的结构，尽管 C 峰对应的阱宽也是 120 \AA 。估计是由于在 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 阵中应变引起的轻重空穴带劈裂所致。随着压力的增加，A、B、C 峰均向高能方向移动并依次变弱以至消失。在 A 峰变弱时在它的低能侧可以观察到一个弱的小峰 S。由其能量位置及压力系数判定它是 GaAs 衬底的发光峰。当压力超过 48 kbar 时在 C 峰的低能侧出现一些新的峰。这些峰随着压力的增加缓慢地向低能方向移动。其压力系数在 -1 meV/kbar 左右，因此可以判定它是与导带 X 谷到价带的间接跃迁有关的峰。将在下面进一步讨论。

图 2(a) 给出了这些峰的峰值能量与压力的关系。图 2(b) 给出了 B、C 峰能量差 B-C 的压力关系。图中实线是用线性公式

$$E = E_0 + ap$$

对实验结果进行最小二乘法拟合的结果。式中 E 和 E_0 分别是压力下和常压下的峰值能

表 1 77K 下 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 和 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱的常压下峰值能量 E_0 和压力系数 a (由最小二乘法拟合得到)

峰	$E_0(\text{eV})$	$a(\text{meV/kbar})$	来 源
A	1.528 ± 0.003	10.50 ± 0.04	$\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, 120 \AA , $1E-1H$
A_1	1.541 ± 0.003	10.37 ± 0.06	$\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, 120 \AA , $1E-1L$
B	1.399 ± 0.003	10.01 ± 0.04	$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$, 60 \AA , $1E-1H$
C	1.363 ± 0.003	9.93 ± 0.04	$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$, 120 \AA , $1E-1H$
S	1.50 ± 0.06	10.9 ± 0.6	GaAs 衬底
D	1.88 ± 0.05	-1.1 ± 0.6	$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 间接跃迁
F	1.87 ± 0.04	-1.4 ± 0.5	$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 间接跃迁
G	1.87 ± 0.06	-1.6 ± 0.5	$\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 间接跃迁
H	1.73 ± 0.04	0.1 ± 0.5	非本征发光
B-C	0.0348 ± 0.0007	0.14 ± 0.01	

量。 a 是压力系数， p 是压力。拟合得到的 E_0 ， a 均在表 1 中给出。从表 1 中可以看到。 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 阵的发光峰 A 的压力系数比体 GaAs 的小，这与其它作者的结果一致^[2,6,7,8]。而 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 阵的发光峰 B、C 的压力系数随着阱宽的减小而稍有

增加。这一点可以从图 2(b) 中得到进一步的证实。从图 2(b) 中可以清楚地看到 B、C 峰的能量差从常压下的 35 meV 逐渐增加到 50 kbar 时的约 42 meV。因此, 本实验再一次证实了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱的发光峰的压力系数随阱宽的减小而增加。在 [1] 中我们曾观察到与导带第二子带有关的发光峰的压力系数大于第一子带的。这些结果都与 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱的情况相反。在 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱中, 随着导带子带能量的升高, 压力系数逐渐减小。而在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱中, 压力系数随导带子带能级的升高而增加。其原因还有待于进一步的深入研究。值得指出的是在 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱中, 势垒层的压力系数比势阱层的小, 因此电子波函数向势垒层中的渗透将引起压力系数的变小。而在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱中, 势垒层的压力系数大于势阱层的, 因此电子波函数向势垒层的渗透将使压力系数变大。这也许是在 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱中观察到压力系数随阱宽减小而增加的原因之一。图 2(c) 给出了 A、B、C 三峰的峰值强度随压力的变化, 图中实线是为了便于观看而画的。可以看到 A、B、C 三峰的强度依次在压力超过某一值后指数式地减弱, 这即通常所说的由于 Γ -X 交叉引起的发光强度的衰减。图中短横线对应发光强度衰减到约为原来的百分之一时

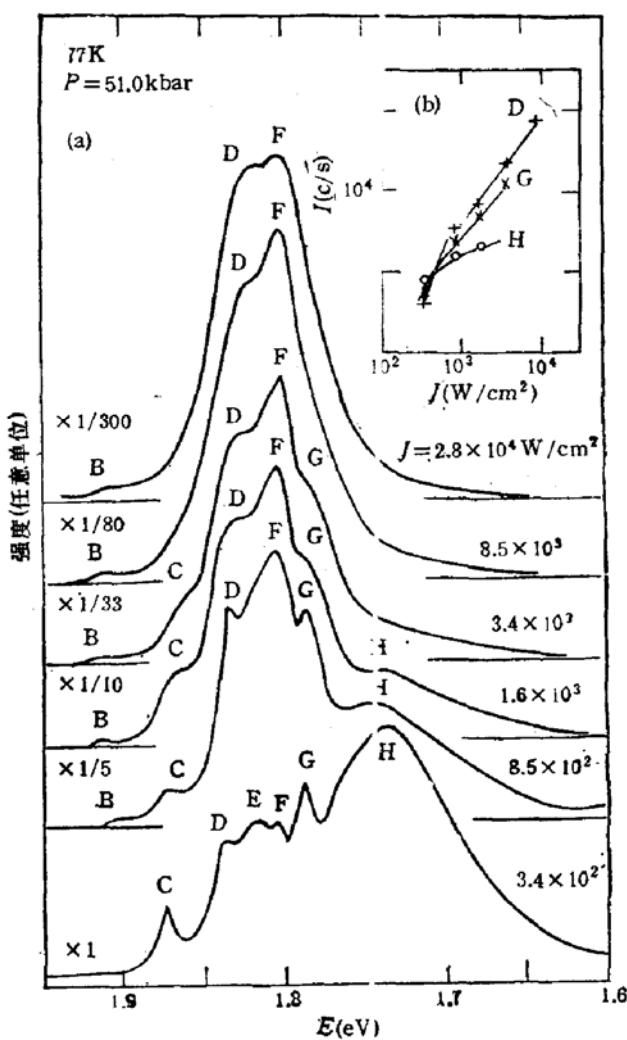


图 3 $p = 51 \text{ kbar}$ 时 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 和 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 量子阱的
(a) 不同激发强度下的光致发光谱 (b) 峰值强度随激发强度的变化

的压力值。在图 2(a) 中也用短横线标出了 A、B、C 三峰的峰值强度从开始衰减到衰减到百分之一的压力范围。

在压力大于 48kbar 后，在 C 峰的低能侧出现一些新的峰。与以前的结果^[2]不同的是我们观察到多个峰。这可能与激发强度比较低有关。图 3(a) 给出了 $p = 51.0\text{kbar}$ 时不同激发强度下的光致发光谱。所用的激发功率密度 J 已在相应的谱旁标出。图中 B、C 峰是低压下就观察到的与直接跃迁有关的峰，只是这时它们已经很弱。D-H 是新出现的峰。其中 D、G、H 峰的峰值强度随激发强度的关系在图 3(b) 中给出。F 峰的强度变化与 D 峰的基本相同故未在图中画出。它们的压力系数也在表 1 中列出。由于数据点比较少。测量的压力范围比较窄，因此拟合得到的 E_0 和 a 的误差比 A、B、C 峰的大。从图 2,3 和表 1 可以看到，H 峰在低激发强度时相对较强，激发强度增大时有明显的饱和现象。它的压力系数接近为零。估计这是一个与杂质或缺陷有关的非本征发光，但尚不能判定它是从哪一层中发出的。D、F、G 峰的压力系数均与 GaAs X 谷的压力系数相近。所以估计是与导带 X 谷到价带的间接跃迁有关的发光。其中 D、F 峰在高激发强度下成为主要的发光峰，两峰的相对强度基本不变。它们的压力关系的外推线落在 B、C 峰强度减弱到百分之一的区域内。因此估计这两个峰是与 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 阵有关的间接跃迁发光。G 峰随激发强度的增加不如 D、F 峰快，它的压力关系的外推线落在 A 峰的强度减弱到百分之一的区域内，因此估计它是与 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 阵有关的间接跃迁发光。E 峰在高激发强度下已很难与 D、F 峰区别开故暂不讨论。如果上述的指派是正确的，那末又可以看到 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱与 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱的不同。在 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱中只观察到一个与间接跃迁有关的发光峰，而在 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱中可以看到二个以上的间接跃迁发光峰。这可能与应变引起的轻重空穴劈裂有关。这方面的进一步研究正在进行中。

总之，通过对在同一衬底上生长的 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱的对照研究表明，由于应变的存在， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱的光致发光谱及其压力行为与 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱的有许多明显的不同。

作者感谢上海红外物理开放实验室的支持和中国科学院物理所侯宏启同志提供样品。

参 考 文 献

- [1] 李国华, 郑宝真, 韩和相, 汪兆平, 半导体学报, 10, 317(1989).
- [2] 王莉君, 侯宏启, 周均铭, 唐汝明, 鲁志东, 王彦云, 黄统, Chinese Phys. Lett., 6, 76(1989).
- [3] 李国华, 赵学恕, 韩和相, 汪兆平, 唐汝明, 胡敬竹, 半导体学报, 5, 558(1984).
- [4] J. Wolford and J.A. Bradley, Solid State Commun., 53, 1069(1985).
- [5] A.R. Goni, K. Strössner, K. Syassen and M. Cardona, Phys. Rev., B36, 1581(1987).
- [6] 赵学恕, 李国华, 韩和相, 汪兆平, 陈宗圭, 孙殿照, 孔梅影, 唐汝明, 王莉君, 半导体学报, 7, 454(1986).
- [7] U. Venkateswaran, M. Chandrasekhar and H.R. Chandrasekhar, Phys. Rev., B31, 4106(1985), B33, 8416(1986).
- [8] D.J. Wolford, Proc. 18th Int. Conf. on Phys. of Semicond., ed. by O. Engstrom, (1986) 1115.

Comparative Study of Photoluminescence of $In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ and $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ Quantum Wells under Hydrostatic Pressure

Li Guohua, Zheng Baozhen, Han Hexiang and Wang Zhaoping

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing and Shanghai Laboratory for Infrared Physics)

Abstract

The photoluminescence of $In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ and $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ quantum wells (QWs) grown on the same substrate have been studied comparatively at 77K under hydrostatic pressure up to 60 kbar. Both the transitions from the conduction subband to heavy and light hole subbands in the $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ QW were observed. But only the transitions to heavy hole subband were observed in the $In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ QWs. The pressure coefficients of the photoluminescence peaks of $In_{0.15}Ga_{0.7}As/GaAs$ QW increase with the decrease of well width in contrast with the results in $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ QW. Several peaks associated with the indirect transitions were observed at the pressure higher than 48 kbar. It is discussed briefly.

Keywords Quantum well, Photoluminescence, Pressure