

11-17

# 应变 $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$ 单量子阱结构的光谱研究

沈文忠 唐文国 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

T. G. Andersson

Ande, TG

(Department of Physics, Chalmers University of Technology, S-41296 Goteborg, Sweden)

**A 摘要** 报道了同光致发光光谱、吸收光谱和光电流谱研究具有相同组分和阱宽、不同覆盖层厚度的应变  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱结构的实验结果。结合理论计算, 观察到 GaAs 覆盖层厚度对单量子阱结构的材料质量、应力弛豫和发光淬灭机制的影响, 确定了各样品的应变值和导带不连续因子  $Q_c$  (为 0.70-0.05), 并讨论了这种结构的发光机制。

**关键词** 光谱研究,  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  单量子阱结构。

光致发光

0471.4

TN304.22

③

引言

砷镓磷 砷化镓

应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  超晶格量子阱结构正引起人们越来越浓厚的兴趣, 随着晶体生长技术的提高, 现已能生长出被弹性形变包容的较大晶格失配材料, 而不产生失配位错<sup>[1]</sup>。光谱测量是一种研究应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  结构的有效方法, 光致发光光谱用来探测失配位错的存在和材料的临界厚度<sup>[2]</sup>, 而其能带构形、能带不连续因子及应变则通过吸收光谱/透射光谱<sup>[3-4]</sup>、光电流谱<sup>[5]</sup>、光致发光激发光谱<sup>[6]</sup>、喇曼散射<sup>[4-7]</sup>和光调制光谱<sup>[8]</sup>决定。人们已对  $\text{InGaAs}$  阱宽、 $\text{In}$  组分以及衬底取向<sup>[9]</sup>对应变  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  的能带结构和基本光学性质的影响进行了广泛的研究, 但尚未涉及 GaAs 覆盖层对  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  单量子阱结构的应变、失配位错和能带结构的影响。

本文利用傅里叶变换光致发光技术(PL)、吸收光谱(AB)和平面光电流谱(PC)系统地研究了应变  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱结构中 GaAs 覆盖层厚度对材料质量、应力弛豫和发光淬灭机制的影响。

## 1 实验

实验采用的应变  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱(SQW)样品是在 Varian GEN I MBE 系统上生长的, 以半绝缘的 GaAs(100)为衬底, 衬底温度为 550°C, 首先生长 25nm 的  $\text{In}_{0.20}$

Ga<sub>0.99</sub>As 势阱层,然后生长厚度  $d$  分别为 500(样品 1)、50(样品 2)、5nm(样品 3)的 GaAs 覆盖层.这些结构都没有故意掺杂,生长温度为 520℃.

在傅里叶变换光致发光测量中,以 Ar<sup>+</sup>激光器的 514.5nm 谱线作为激发源,用 Nicolet 800 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测量样品的发光.探测器为液氮冷却的 InSb 探测器.吸收光谱也是用 Nicolet 800 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测得的,光源是白炽灯,用 Si 光电探测器探测.光电流测量时,来自傅里叶变换光谱仪的光束从样品正上方入射,电极间加 0~+3.0V 的恒偏压.光电流信号经傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测量并变换成光电流谱.直接用导电胶将银丝引出,作为测量电极线.低温测量是将样品装在液氮杜瓦瓶中,温度范围为 4.0~295K.

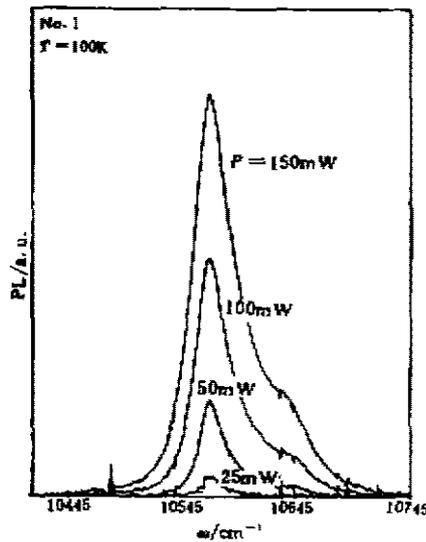


图 1 样品 1 在不同激发功率  $P$  下的傅里叶变换光致发光谱

Fig. 1 Fourier transform PL spectra of sample No. 1 under different laser power

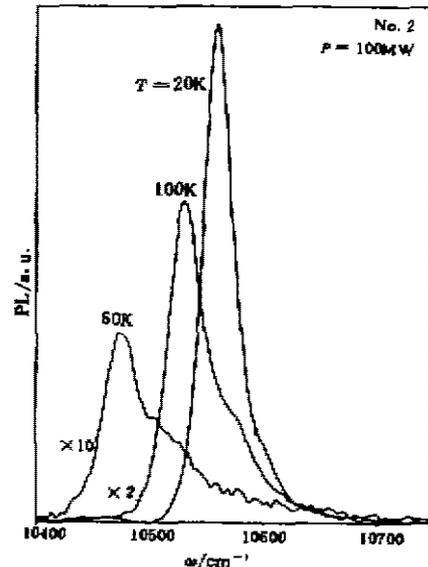


图 2 样品 2 在相同的激发功率和不同温度下的光致发光光谱

Fig. 2 Fourier transform PL spectra of sample No. 2 under different temperature

## 2 理论计算

在量子阱中,由于晶格失配而产生应变,InGaAs 层在  $xy$  平面受到双轴应力的作用,使带隙发生变化,引起轻重空穴分离,应变导致的能隙移动为

$$\delta E = [2a(1 - C_{12}/C_{11}) - b(1 + 2C_{12}/C_{11})] \epsilon \quad (1)$$

应变导致轻重空穴态的分裂值为

$$\delta E_{\alpha} = (\Delta - 3E_{\sigma})/2 - (\Delta^2 + 2E_{\sigma}\Delta + 9E_{\sigma}^2)^{1/2}/2 \quad (2)$$

其中  $\epsilon$  为应变程度,即阱中应力值, $\Delta$  为自旋-轨道分裂值, $E_{\sigma}$  为单轴应力引起的能带移动,

有

$$E_c = -b[(C_{11} + 2C_{12})/C_{11}]e. \quad (3)$$

$a$  和  $b$  为形变势,  $C_{11}$  和  $C_{12}$  为张力系数.  $\text{InGaAs}$  的带隙  $E_g$ 、电子和重空穴的有效质量都从文献[3]查得, 单量子阱中的子能级位置通过有限方势阱模型计算获得. 虽然样品 3 的覆盖层较薄, 使用此模型会有误差, 但由于我们材料的势阱较宽, 这种误差是很小的, 已由计算所证实. 激子束缚能由于  $\text{InGaAs}$  势阱较宽(25nm)而取为 4meV. 导带不连续因子  $Q_c$  作为可调参数拟合实验结果.

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 光致发光光谱

##### 3.1.1 光致发光机制

图 1 是样品 1( $d=500\text{nm}$ ) 在 100K 温度和不同激发功率的傅里叶变换光致发光谱. 在较低的激发功率下, 发光谱上只有一个对应于第一电子带到第一重空穴子带跃迁(1e-1hh)的发光峰. 随着激发功率增加, 在其高能侧的发光结构明显增强, 发光峰形(FWHM)展宽. 图 2 是样品 2( $d=50\text{nm}$ ) 在相同的激发功率和不同温度下的光致发光光谱. 可以看到, 随着温度的升高, 发光峰高能侧的结构也明显增强. 在 3 个样品中都存在这两种现象, 这是由于光生载流子的填充效应所致. 强烈的能带填充效应表明, 主要的电子空穴对的产生机理不是直接的光吸收, 而是势阱的陷阱作用<sup>[10]</sup>. 说明我们的  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  单量子阱中的电子空穴对的形成机制是:  $\text{GaAs}$  势垒中的光生载流子流入  $\text{InGaAs}$  势阱后, 随后在阱中复合发光. 随着激发功率的增加, 阱中的载流子数目应该增加, 载流子的填充效应使发光峰形展宽, 能被观察到更高子带间的跃迁. 温度升高, 热激发增强, 使得更高子带也能被填充. 这种光生载流子的填充效应在单量子阱中更加明显, 因为在多量子阱中  $\text{GaAs}$  的光生载流子可以分配到多个阱中. 从能量位置上看, 高能侧的发光结构应为第一电子子带到第二重空穴子带间的跃迁(1e-2hh), 发光谱出现禁戒跃迁的原因是: 有限的阱宽及组分涨落导致电子空穴波函数的局域化, 使得波矢具有不确定性, 选择定则被打破.

##### 3.1.2 GaAs 覆盖层厚度对材料光致发光特性的影响

图 3 是 3 个  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱样品在 20K 和较低的激发功率(100mW)下的傅里叶变换光致发光光谱. 可以清楚地看到, 随着  $\text{GaAs}$  覆盖层厚度  $d$  减小, 发光峰位明显地移向低能处.  $d$  为 500nm(样品 1)时发光峰位位于 1.321eV,  $d$  为 50nm(样品 2)时发光峰位位于 1.310eV, 而  $d$  为 5nm(样品 3)时发光峰红移到 1.300eV 处. 在峰位移动的同时, 发光峰形和发光强度也发生变化. 从 500nm 变为 50nm 时, 发光峰形和发光强度并没有太大的变化(FWHM 从 3.0meV 为 3.8meV, 强度降低了 15%左右), 这表明  $d$  在此范围内, 单量子阱材料的质量相当好, 晶格失配被弹性形变所包容, 而不产生失配位错. 但在样品 3 的发光光谱上, 我们发现发光峰形明显展宽(FWHM 为 14.0meV), 发光强度也明显减弱, 这表明材料质量明显降低并伴随着出现失配位错. 失配位错一方面降低量子阱的应变使得发光峰位移向低能处, 另一方面作为非辐射中心明显降低量子阱的发光效率. 由此我们也可认

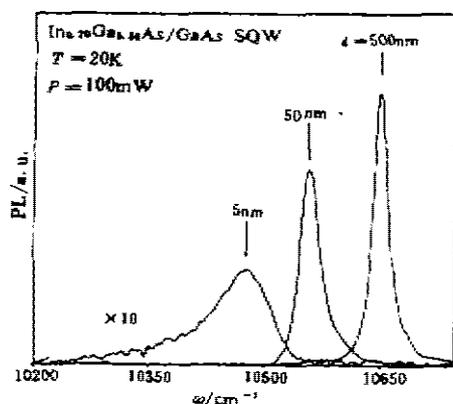


图3 3个样品在较低激发功率下的傅里叶变换光致发光光谱

Fig. 3 Fourier transform PL spectra of samples No. 1~3 with laser power of 100mW

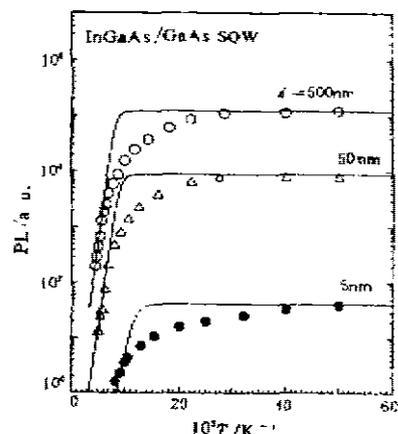


图4 3个样品在100mW的激发功率下的发光强度的对数与温度倒数间的关系

Fig. 4 Arrhenius plot of  $\log(I_{PL})$  as a function of reciprocal temperature for the  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$  SQW samples

为在生长25nm宽 $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ 阱的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 单量子阱结构时, $\text{GaAs}$ 覆盖层的最小厚度应为5nm左右。

由于我们的3个样品具有相同的组分和阱宽,发光峰位的移动只能是 $\text{InGaAs}$ 阱中不同的应变所致。可以认为在 $d$ 最厚的样品1中应变完全被弹性形变所包容,应力是全部释放的,而在其它两个样品中则存在着应力弛。让及应变有效方势阱模型的理论计算表明,导带不连续因子 $Q$ 取 $0.70 \pm 0.05$ 时与实验结果符合得到相当好,这样得到的应变值分别为-1.412%(样品1),-1.255%(样品2)和-1.128%(样品3)。当然,发光谱上所对应的 $1e-1hh$ 的峰位对所选取的 $Q$ 是不灵敏的,所以上面得到的应变数和导带不连续因子 $Q$ 需要进一步的实验和理论验证,参见后文。

### 3.1.3 光致发光淬灭机制

较高温度下( $T > 100\text{K}$ )载流子的复合对量子阱光电器件是一个相当重要的过程。近来,一般认为载流子的陷阱作用<sup>[1]</sup>及热载流子热激发势阱,伴随在势垒中的非辐射复合<sup>[2]</sup>是量子阱中辐射复合效率降低的两种主要机制。图4给出这3个样品的发光强度对数与温度倒数关系。这个模型假设发光淬灭的主要机制是电子空穴对热激发势阱,伴随着在势垒中的非辐射复合。根据此模型,发光强度随温度的变化关系可表示为<sup>[12,13]</sup>

$$I_{PL} = I_0 [1 + C \exp(-E_A/K_B T)]^{-1}, \quad (4)$$

其中 $I_{PL}$ 是发光强度, $I_0$ 是标度, $C$ 为常数, $E_A$ 为激活能, $K_B$ 为波尔兹曼常数, $T$ 为样品的温度。表1给出此模型拟合所得到的参数 $E_A$ 、 $I_0$ 和 $C$ 。从表1可见,样品1和样品2的激活能随 $d$ 的减少而略有增加,而且 $E_{PL}(20\text{K})$ 与 $E_A$ 值的和是一个常数,非常靠近20K时 $\text{GaAs}$ 的能隙(1.510eV)。这表明在具有25nm宽的 $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ 阱的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 单量子阱结构中,从50~500nm的范围内,发光淬灭的主要机制是自由激子热激发产生的势阱。

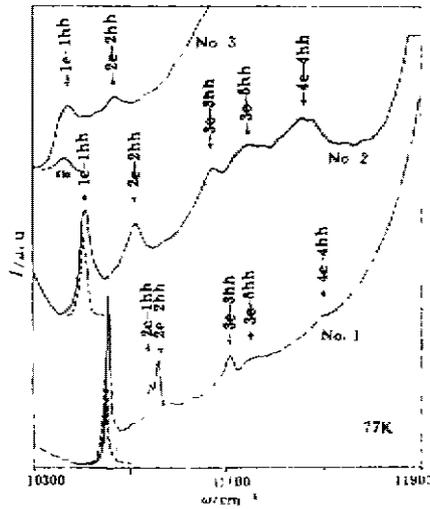


图5 3个样品的吸收光谱  
(虚线为相应样品的光致发光光谱)

Fig. 5 Absorption spectra  
of samples No. 1~3

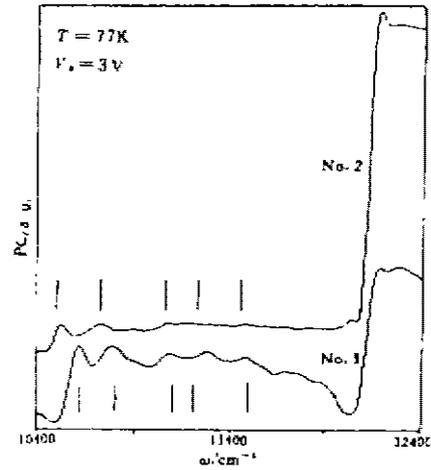


图6 样品1和2的平面光电流谱  
(竖线是相应的吸收峰峰位)

Fig. 6 In-plane photocurrent spectra of  
 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  samples No. 1 and 2

表1 样品1~3的发光峰位(20K)、拟合得到的样品的热激活能和拟合参数  
Table 1 Fitting parameters and results for samples No. 1~3. at 20K

样品	$d(\text{nm})$	$E_{PL}(\text{meV})$	$E_A(\text{meV})$	$E_{PL} + E_A(\text{meV})$	$I_0$	$\tau$
No. 1	510	1321	178	1499	$2.4 \times 10^6$	$2 \times 10^8$
No. 2	50	1310	185	1495	$1.8 \times 10^4$	$4 \times 10^6$
No. 3	1	1300	101	1401	$5.2 \times 10^4$	$2 \times 10^7$

样品3发光信号降低的主要原因不太可能是载流子热激发势阱所致,因为由此得到的热激活能只有100meV,远小于样品1和2的数值.同时我们注意到样品3的发光强度即使在低温下(10~40K)也有很大的降低,不能得到唯一的热激活能<sup>[13]</sup>.这是由于该样品中出现失配位错,使得激子局域在不均匀的弛豫区<sup>[14]</sup>,说明陷落在失配位错上的激子是主要的发光淬灭机制.

### 3.2 吸收光谱

为了验证光致发光光谱的假设,我们进行了吸收光谱实验,图5是77K时3个样品吸收光谱.对样品1和2可以观察到6个激子吸收峰(既有允许的又有禁戒的吸收峰),而对样品3只观察到2个允许跃迁的激子吸收峰.吸收谱上最高能量处明显的吸收增强是由于GaAs衬底的影响,它仅仅被抛光而没有除去.相应的光致发光峰在图中用虚线显示,可以看到光致发光峰位与吸收峰位间只有很少的Stokes位移(小于2meV).一般认为在组分为0.20的 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 单量子阱中, $\text{InGaAs}$ 势阱对轻空穴形成一个势垒(即第二类量子阱结构)<sup>[15]</sup>.所以,在我们的单量子阱结构吸收光谱上,没有与轻空穴有关的吸收峰,所有的吸收峰都与重空穴有关.

理论计算用于验证光致发光光谱的假设,也用来确定吸收光谱上各个吸收峰的归属.用上文的应变数值,取导带不连续因子  $Q_c$  为  $0.70 \pm 0.05$  时,计算得到的所有吸收峰位与实验结果符合得很好,都在  $2\text{meV}$  以内,除了最高能的  $4e-4hh$  (约  $5\text{meV}$ ). 图中  $ne-mhh$  表示第  $n$  个电子子带与第  $m$  个重空穴间的跃迁. 理论计算与实验结果一致(这种一致性还体现在变温情况下)充分说明 GaAs 覆盖层导致的 InGaAs/GaAs 单量子阱中的应力弛豫. 这种应力弛豫伴随着晶格失配位错逐渐增多,这从样品的光致发光强度明显减弱及半峰宽的明显增大可以清楚地看出.

### 3.3 光电流谱

为了观察到量子阱的光电流信号,激子必须分解,自由载流子迁移到电极处,所以,在较小的偏压 ( $0 \sim 3\text{V}$ ) 下观察不到 Stark 效应<sup>[14]</sup>. 图 6 给出样品 1 和 2 在  $77\text{K}$ 、 $3.0\text{V}$  偏压下的平面光电流谱,图中竖线是相应的吸收峰峰位,图中呈现明显的激子跃迁结构,谱形体现台阶状上升的二维系统态密度,可看到光电流谱具有相当高的灵敏度,同时光电流得到的激子跃迁峰位与吸收光谱相当一致. 约  $1.5\text{eV}$  的尖锐吸收对应于 GaAs 的基本带间跃迁. 光致发光光谱、吸收光谱、平面光电流谱的实验结果的一致性,及其与理论计算相符合,充分说明我们的结果是相当可靠的. 另外值得一提的是光电流谱不受样品衬底厚度的影响,而且制作电极相当方便,不失为一种研究量子阱子能带结构的有效手段.

## 4 结论

用傅里叶变换光致发光光谱(PL)、吸收光谱(AB)和平面光电流谱(PC)研究了应变  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$  单量子阱样品. 这些样品具有相同的 In 组分和 InGaAs 阱宽,不同厚度的 GaAs 覆盖层. 强烈的能带填充效应表明,阱中主要的电子空穴对的产生机理是 InGaAs 势阱的陷阱作用. 观察到 GaAs 覆盖层厚度变化引起的阱中应力弛豫,确定了各个样品的应变值和导带不连续因子  $Q_c$  (为  $0.70 \pm 0.05$ ). 最后讨论了不同的 GaAs 覆盖层厚度对单量子阱材料质量和发光猝灭机制的影响.

### 参考文献

- 1 Rosenberg J J, Benlamri M, Kircher P W, et al. *IEEE Electron Device Lett.*, 1985, **EDL-6**: 491
- 2 Andersson T G, Chen Z G, Kulakovskii V W, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 752
- 3 Ji G, Huang D, Reddy U K, et al. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**: 3366
- 4 Itikawa F, Cerdeira F, Vazquez-Lopez C, et al. *Phys. Rev. B*, 1988, **38**: 8473
- 5 Yu P W, Sanders G D, Evans K R, et al. *Appl. Lett.*, 1989, **54**: 2230
- 6 Joyce M J, Xu Z Y, Gal M. *Phys. Rev. B*, 1991, **44**: 3144
- 7 Wagner J, Larkins E C, Herrs N, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**: 1842
- 8 Chen J H, Chi W S, Huang Y S, et al. *Sem. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 1420
- 9 Moise T S, Guido L J, Barker R C. *Phys. Rev. Rev. B*, 1993, **47**: 6758
- 10 Martelli F, Proietti M G, Simeone M G, et al. *J. Appl. Phys.*, 1993, **71**: 539
- 11 Ding Y J, Guo C L, Li S, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 154: 2051
- 12 Lambkin J D, Dunstan D J, Homewood K P, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**: 1986
- 13 Devine R L S. *Semicond. Sci. Technol.*, 1988, **3**: 1171
- 14 Rajan K, Devine R L S, Moore W T, et al. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**: 1713

- 15 Marzin J Y, Gerard J M, Voiston p, *et al.* in *Semiconductors and Semimetals*, 1990, **32**: 55  
16 Chemla D S, Damen T C, Miller D A B, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**: 864

## SPECTROSCOPIC STUDIES OF STRAINED $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ SINGLE QUANTUM WELL

Shen Wenzhong Tang Wenguo Shen Xuechu

(*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

T. G. Andersson

(*Department of Physics, Chalmers University of Technology, S-41296 Goteborg, Sweden*)

**Abstract** The photoluminescence (PL), absorption (AB) and in-plane photocurrent (PC) spectroscopies for strained  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  single quantum well (SQW) structures were investigated. Combined with the theoretical calculation, the influence of the GaAs cap layer thickness on the material quality, strain relaxation and luminescence quenching mechanism was observed. The strain values for each sample and the conduction-band offset ratio  $Q_c$  ( $\sim 0.70 \pm 0.05$ ) were deduced. The PL generation mechanism was also discussed.

**Key words** spectroscopic studies,  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  single quantum well.