

# GalnAs/AlGaAs 应变量子阱结构的荧光特性

王 杏 华

(中国科学院半导体研究所, 北京)

Reino Laiho

(芬兰图尔库大学 Wihuri 物理研究所)

1988年11月28日收到

本文报道了 4—300K 温度范围内量子阱宽度分别为 20、40、90 和 130 Å 的 GalnAs/AlGaAs 应变量子阱结构的光荧光特性。我们考虑量子尺寸对载流子能带的影响和弹性应变引起带隙的移动, 计算了量子阱中本征激子发光的能量位置, 计算值与实验结果基本吻合。还研究了荧光峰强度随阱宽的变化以及不同温度下发光峰的半高宽度。

主题词 光荧光, GalnAs/AlGaAs 应变量子阱

## 一、引言

随着 MBE 和 MOCVD 技术的发展, 成功地研制出 GalnAs/AlGaAs、GalnAs/GaAs 等许多应变超晶格、量子阱结构。众所周知, 这是一种崭新的结构, 由于构成异质结二种材料的晶格常数差异大, 会在 GalnAs 量子阱中产生弹性应变, 这种应变抵消了晶格失配而不会在阱内产生位错缺陷, 因而仍然能获得高质量的材料。GalnAs 是一种很有前途的材料, 无论在光纤通讯, 还是在超高速器件的应用上都具有十分重要的意义。与 GaAs 量子阱比较, GalnAs 的禁带宽度小、发射波长长, 改变 Ga 的含量和控制量子阱的宽度, 能获得适合于光纤通讯的激光器、探测器等等。近年来, 对 GalnAs 量子阱的基本物理特性和器件应用研究做了不少工作<sup>[1-4]</sup>。

本文详细研究了具有不同阱宽的 GalnAs/AlGaAs 应变量子阱结构的光荧光特性, 荧光峰的能量、强度与量子阱阱宽的关系和不同温度下发射峰的半高宽度。

## 二、实验

实验所用的样品是分子束外延 (MBE) 方法生长的, 在半绝缘的(100) GaAs 衬底上先生长 10 周期的 GaAs/AlGaAs 超晶格 ( $L_z = L_B = 100 \text{ \AA}$ ) 和一层厚度为 1000 Å 的 AlGaAs 作为缓冲层, 以便得到平整度好的界面; 接着生长四个 GalnAs 量子阱, 阵宽依次为 130、90、40 和 20 Å, 中间由 200 Å 的 AlGaAs 层分隔开。样品的最上面为 500 Å

的 AlGaAs 顶盖层。外延的各层均未掺杂, GaInAs 中 Ga 的含量为 0.85, AlGaAs 层中 Al 的含量为 0.2。样品的结构如图 1 所示。

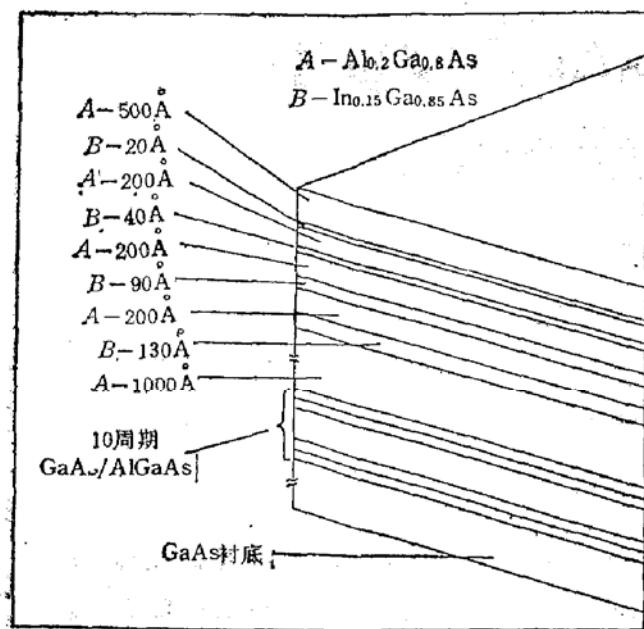


图 1 GaInAs/AlGaAs 量子阱样品结构图

如图 2, 除 A 峰 ( $E = 1.671\text{eV}$ ) 对应于 AlGaAs 体材料的荧光发射外, 光谱图中标有 B、C、D、E 四个峰的光子能量分别为 1.632、1.598、1.481 和  $1.422\text{eV}$ , 由简单的量子力学计算表明, 它们分别对应阱宽为 20、40、90 和  $130\text{\AA}$  的 GaInAs 量子阱中导带中  $n = 1$  电子能态和价带重空穴能态之间的激子发光。室温下仍然清楚地观测到两个最强的峰 (B, C 峰)。

低温下, 在  $0.9-1\mu\text{m}$  的波长范围内还观测到几个很弱的峰 (图中未显示), 显然是载流子能态与杂质或缺陷能级之间的发光。

量子阱荧光峰能量与阱宽的依赖关系如图 3 所示。量子阱中本征激子发光的能量为  $1.422-1.632\text{eV}$ , 比其相应体材料的禁带宽度  $E_g = 1.307\text{eV}$  (计算值)高, 这是由于在 GaInAs/AlGaAs 应变量子阱中, 子能带带隙受量子尺寸效应和应变影响而增大的缘故。从图 3 可见, 荧光峰能量随着量子阱宽度的减小而增大, 阵愈窄量子尺寸效应愈明显<sup>[5]</sup>。

为使样品有良好的热接触, 我们用 In 将样品焊在铜块上, 再放入低温样品室, 样品温度可在  $4-300\text{K}$  范围内连续可调。激发光源为波长  $5145\text{\AA}$  的氩离子激光器, 功率密度为  $100\text{W/cm}^2$ 。样品发射的荧光经  $0.5\text{m}$  单色仪分光, 致冷的 S-1 光电倍增管接收, 探测信号经锁相放大器放大后输出到  $x-y$  记录仪。

### 三、结果与讨论

#### 1. 荧光光谱和理论计算

在不同温度下观测到的荧光光谱示

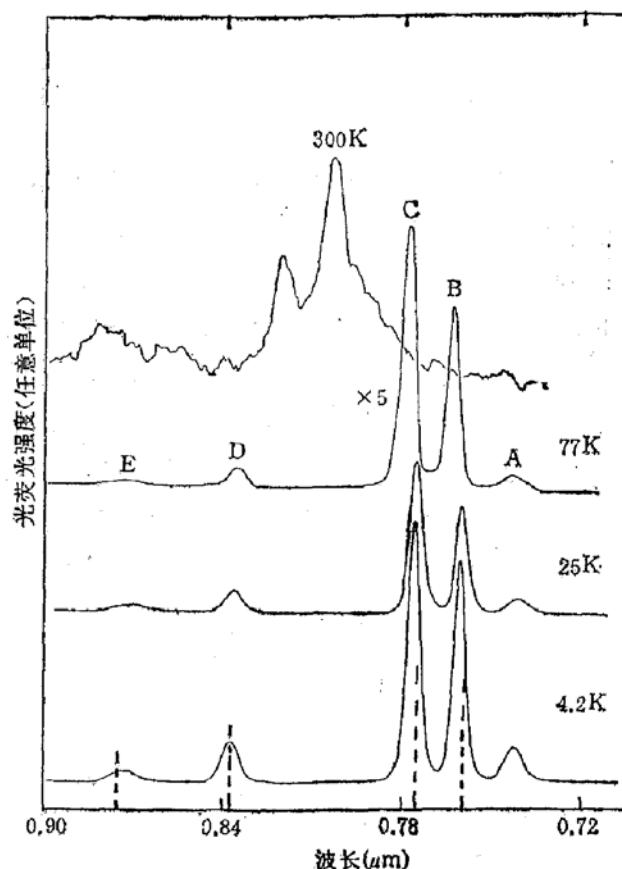


图 2 GaInAs/AlGaAs 应变量子阱的荧光光谱  
(虚线表示计算结果)

下面我们将从量子力学的基本理论出发, 计算量子尺寸对载流子能态的影响和应变引起的能带结构的变化。和 GaAs/AlGaAs 量子阱结构相类似, 当阱的厚度可与电子(或空穴)的德布罗意波长相比拟时, 载流子在垂直于界面方向上的运动是量子化的, 可近似用一维方势阱的薛丁格方程描述。对于无限方势阱( $V = \infty$ ),  $Z$  方向上(垂直界面)电子态的能量为:

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{n\pi}{L_z} \right)^2 \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

考虑实际量子阱结构, 势阱为有限高度, 薛定谔方程有下面形式解:

偶宇称解

$$\alpha \lg \alpha = \beta \quad (2)$$

奇宇称解

$$\alpha \operatorname{ctg} \alpha = -\beta \quad (3)$$

其中

$$\alpha = \left( \frac{L_z m_1^* E_n}{2\hbar^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$\beta = \left[ \frac{L_z m_2^* (V_0 - E_n)}{2\hbar^2} \right]^{1/2} \quad (5)$$

这里  $L_z$  为阱宽,  $m_1^*$ 、 $m_2^*$  分别为 GaInAs 和 AlGaAs 中载流子有效质量。 $(2)-(5)$  式联立可以求出量子阱中不同子能带的能量值  $E_n$ ,  $V_0$  为势阱高度, 在异质结界面总势垒高度  $\Delta E_s$  为:

$$\Delta E_s = E_s(\text{AlGaAs}) - E_s(\text{GaInAs}) \quad (6)$$

其中

$$E_s(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) = E_s(\text{GaAs}) + 1.247x^{[6]} \quad (7)$$

$$E_s(\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}) = E_s(\text{GaAs}) - 1.47y + 0.375y^{[7]} \quad (8)$$

计算中, 我们取 GaInAs/GaAs 的数据: 导带势垒高度  $\Delta E_s = 0.83\Delta E_s$ , 价带势垒高度  $\Delta E_v = 0.17\Delta E_s$ <sup>[8]</sup>。

众所周知, GaAs/AlGaAs 结构中, 这两种材料的晶格常数十分接近, 晶格匹配完好, 无论是液相外延, 还是 MBE、MOCVD 薄膜技术都能生长出高质量的异质结构。在这种结构中, 载流子能带由量子尺寸效应决定。例如, 我们用 $(2)-(5)$ 式计算本样品缓冲层中 GaAs/AlGaAs 多量子阱的基态荧光峰能量, 就与实验观测到的荧光峰一致(见下节)。但是, 在 GaInAs/AlGaAs 应变量子阱结构中, 情况更为复杂些, 由于构成异质结的两种材料晶格常数相差大, 晶格失配会引起弹性应变, 使能带结构发生变化, 因此, 应变量子阱结构中, 子能带的位置不仅由量子尺寸效应决定, 而且与材料的应变有关, GaInAs 受到双轴应力的作用, 价带轻、重空穴带分裂, 增大了带隙。在  $K=0$  处应变引起 GaInAs 带隙

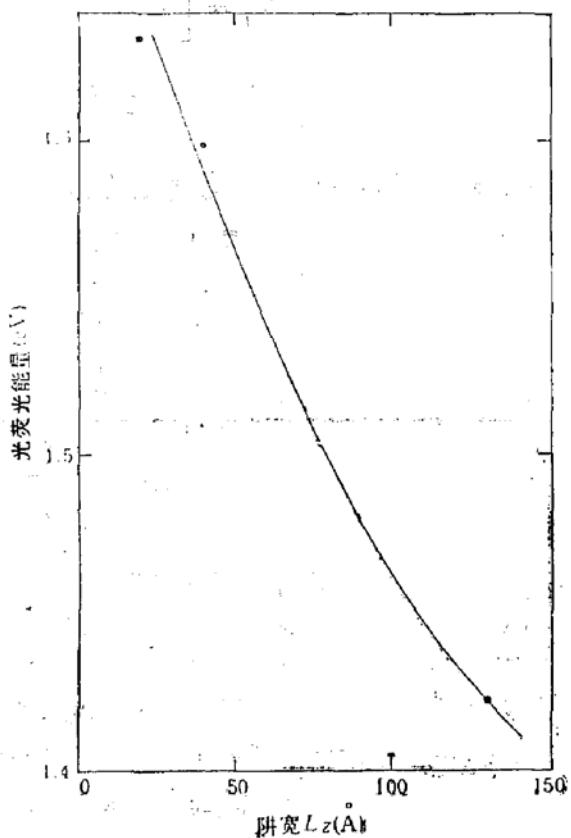


图 3 量子阱光荧光能量与阱宽的依赖关系

的增加由下式给出<sup>[9]</sup>:

$$\Delta E \left( \frac{3}{2} \right) = \left[ -2a \left( \frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11}} \right) + b \left( \frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right) \right] \varepsilon \quad (9)$$

$$\Delta E \left( \frac{1}{2} \right) = \left[ -2a \left( \frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11}} \right) - b \left( \frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right) \right] \varepsilon \quad (10)$$

其中  $a$ 、 $b$  分别为流体静压力畸变势和剪切畸变势,  $C_{11}$ 、 $C_{12}$  为弹性模量,  $\varepsilon$  为(100)平面内 GaInAs 层的应变  $\varepsilon = (a_1 - a_0)/a_0$ ,  $a_1$  和  $a_0$  为 AlGaAs 和 GaInAs 体材料的晶格常数。所用材料参数列于表 1 中, GaInAs 材料参数可由 GaAs、InAs 材料参数的线性插值方法获得。

表 1 材料参数<sup>[6,10]</sup>

	晶格常数(Å)	流体静压力畸变势 $a$ (eV)	剪切畸变势 $b$ (eV)	弹性模量( $\times 10^{11}$ 达因/cm <sup>2</sup> )	
				$C_{11}$	$C_{12}$
GaAs	5.6419	-8.4	-2.0	11.88	5.38
InAs	6.0584	-6.0	-1.8	8.329	4.526

此外, 计算中还应考虑激子的束缚能, 它们是  $x$  值和量子阱阱宽的函数, 本文采用了 GaAs/AlGaAs 量子阱中激子束缚能的数据<sup>[11]</sup>。

综合上面量子尺寸效应、晶体内部应变以及考虑了激子束缚能进行的计算, 其结果在图 2 中用虚线标出。量子阱中激子发光能量的计算值与实验中观测的 B、C、D、E 荧光峰能量基本相符。说明上面的考虑是合理的。另一方面, 计算值与实验值仍有偏差, 产生偏差的原因很多, 除了所用模型的严格性外, 还有许多参数(例如, 势阱宽度、势垒高度、 $x$  值、有效质量等等)不够精确; 另外, 对 GaInAs/AlGaAs 结构, 目前实验数值尚少, 有待于进一步研究与完善。

## 2. 光荧光强度与阱宽的关系

图 4 示出了 4K 和 100K GaInAs 量子阱激子发光的强度与阱宽的关系。从图 4 可以看出, 量子阱发光强度随阱宽的增加而减小, 薄阱中变化更为显著。前面提到, 在应变量子阱中, 阵层较薄时, 晶格失配会由 GaInAs 的弹性应变来补偿, 材料仍具有良好的电学和光学性质。阵层变厚时, 晶格畸变逐渐变得严重, 产生的应变不足以抵消晶格畸变, 而在阱中出现失配位错, 这些缺陷的存在增加了非辐射复合, 使光荧光强度降低, 当超过“临界厚度”时, 光谱特性将变得很坏<sup>[3]</sup>。

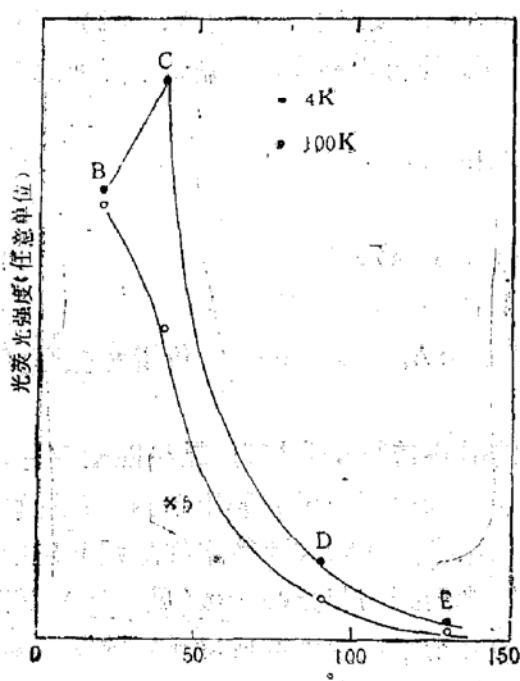


图 4 量子阱光荧光强度与阱宽的关系

低温( $T < 100\text{K}$ )下,C峰反而比B峰强,这是样品缓冲层内GaAs/AlGaAs多量子阱激子发光造成的。我们取 $\Delta E_c = 0.85\Delta E_s$ , $\Delta E_s = 0.15\Delta E_c$ <sup>[12]</sup>,用(2)–(5)式进行简单计算表明,GaAs多量子阱的本征激子发光与40 Å GaInAs 荧光峰几乎重迭起来了。图4中,100K附近B、C峰的相对强度发生了变化,其原因不清楚。

### 3. 荧光峰的半高宽度(FWHM)

光谱图中两个最强的荧光峰(B、C峰)的半高宽度随温度的变化如图5所示。一般来说,对薄阱而言影响荧光谱线宽度的因素主要是阱宽不匀,而对厚阱是合金组分、异质结界面缺陷和载流子浓度等<sup>[13]</sup>。图5显示出,4K时两峰的半高宽度约为2meV,77K时小于6meV,表明样品的异质结界面平整,晶格完整性好。低温下,随着温度的增加,荧光谱线的半高宽度慢慢增加,是由于有更多的载流子从杂质或缺陷中心上释放出来的缘故。 $T > 140\text{K}$ ,B峰的半高宽度变化明显加快,说明此时由本征激子发光转变为自由载流子发光。

前面的计算指出,C峰包含了40 Å 的GaInAs 和缓冲层内GaAs多量子阱的光荧光,这两种材料带隙随温度的变化率不同,所以C峰的半高宽度比B峰大,变化快。图5(b)中,100K处C峰的半高宽度陡然增加,在同一温度下C峰的发射峰强度明显下降,导致B、C的相对强度发生了变化(见图4)。

### 4. 缓冲层的影响

D. F. Welch 等人<sup>[14]</sup>指出,GaInAs/AlInAs 量子阱荧光峰的强度、线宽都与衬底和主量子阱之间的缓冲层有密切的关系。在本实验中,室温下我们观测到两个窄阱的荧光峰,77K 两峰的半高宽度小于6meV,说明缓冲层内采用了GaAs/AlGaAs 多量子阱结构,的确提高了样品质量、改善了量子阱的光谱特性。

虽然缓冲层内的多量子阱结构改善了荧光谱特性,但它发射的荧光峰容易和主量子阱的光荧光混杂,给荧光光谱的分析带来一定的困难。

## 四、结 论

我们研究了具有不同阱宽的GaInAs/AlGaAs 应变多量子阱结构的荧光光谱,在应

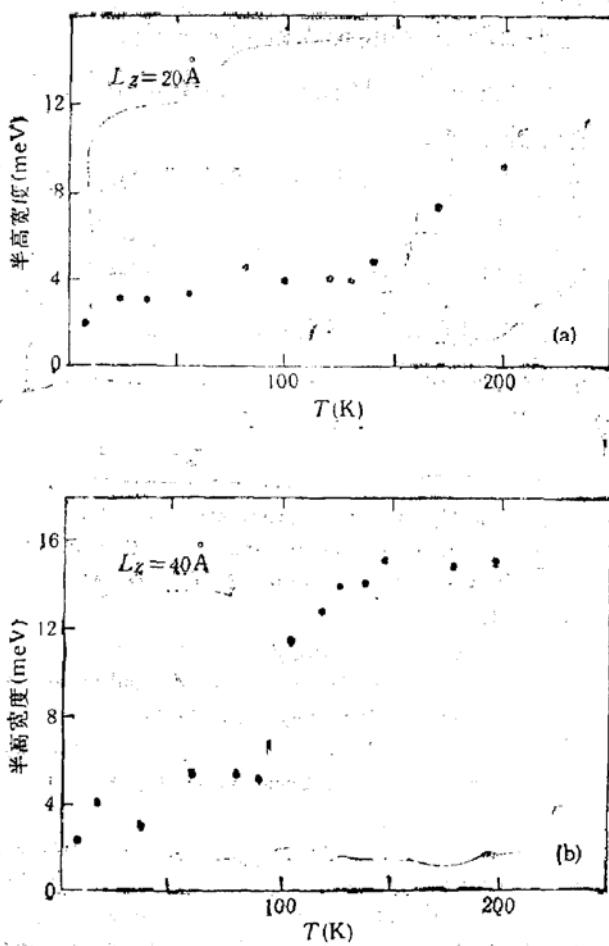


图5 量子阱光荧光峰半高宽度随温度的变化

变量子阱中, 子能带的位置与量子尺寸效应和材料的应变有关。用简单的模型计算了量子尺寸对载流子能态的变化以及弹性应变引起带隙的移动, 得到不同阱中激子发光的能量, 与实验中观测到的荧光峰基本一致。

量子阱光强度随阱宽的增加而减小。用 GaInAs、AlGaAs 两种材料的晶格失配能很好地解释。

为提高样品质量, 本样品缓冲层中增加了 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构, 在实验中, 300K 能清楚地观测到两个窄阱的荧光峰, 77K 它们的半高宽度小于 6meV, 表明样品具有良好的光学性质。

半导体所陈宗圭同志提供了实验样品; Wihuri 物理所的 M. Aarnio 先生协助进行了计算, 在此特表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Syoji Yamada, Akihito Taguchi, and Akira Sugimura, *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 675(1985).
- [2] J. H. Marsh, J. S. Roberts, and P. A. Claxton, *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 1161 (1985).
- [3] M. S. Skolnick, P. R. Tapster, S. J. Bass, A. D. Pitt, N. Apsley, and S. P. Aldred, *Semicond. Sci. Technol.*, **1**, 29(1986).
- [4] S. T. Davey, E. G. Scott, B. Wakefield, and G. J. Davies, *Semicond. Sci. Technol.*, **3**, 365(1988).
- [5] N. G. Anderson, W. D. Laidig, R. M. Kolbas, and Y. C. Lo, *J. Appl. Phys.*, **60**, 2361 (1986).
- [6] Sadao Adachi, *J. Appl. Phys.*, **58**, R1 (1985).
- [7] J. Y. Marzin, M. N. Charasse, and B. Sermage, *Phys. Rev.*, **B31**, 8298 (1985).
- [8] T. G. Andersson, Z. G. Chen, V. D. Kulakovskii, A. Uddin, and J. T. Vallin, *Phys. Rev.*, **B37**, 4032 (1988).
- [9] Hitomitsu Asai and Kunishige Oe, *J. Appl. Phys.*, **54**, 2052 (1983).
- [10] M. Nenberger, *Handbook of Electronic Materials*, Vol. 2, III-V Semiconducting Compounds (1971). 半导体情报编辑部: III-V 族化合物半导体材料手册(1973)
- [11] Ronald L. Greene and K. K. Bajaj, *Solid State Commun.*, **45**, 831 (1983).
- [12] R. Dingle, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, *Phys. Rev. Lett.*, **34**, 1327 (1975).
- [13] D. F. Welch, G. W. Wicks, and L. F. Eastman, *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 991 (1985).
- [14] D. F. Welch, G. W. Wicks, and L. F. Eastman, *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 762 (1983).

## Photoluminescence of Strained GaInAs/AlGaAs Quantum Well Structure

WANG Xinghua

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

and Reino Laiho

(Wihuri Physical Laboratory, University of Turku, Finland)

### Abstract

Photoluminescence in the temperature range of 4-300 K from a strained GaInAs/AlGaAs quantum well structure sample with well width of 20, 40, 90 and 130 Å, respectively, is reported. Taking both the effect of the quantum size on subband energies of the carriers and the energy band-gap shifts with elastic strain into account, excitonic transition energies between  $n=1$  electron state and heavy hole state in quantum wells are calculated. The calculated data are basically in agreement with the experimental results. The dependence of the photoluminescence intensity on the width of the quantum wells and the full width at half maximum (FWHM) of the emission peaks at different temperatures have also been studied.

**KEY WORDS** Photoluminescence, Strained GaInAs/AlGaAs quantum well