

# GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的光荧光表征\*

蔡炜颖 李志锋 李 宁 陆 卫 沈学础

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

周均铭 黄 绮

(中国科学院物理研究所, 北京, 100080)

**摘要** 对 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器器件进行显微荧光光谱( $\mu$ -PL)测量, 光谱中表征势垒、势阱基态间光跃迁能量位置的荧光峰直接与势垒中 Al 含量相关, 通过光谱实验上对势垒和量子阱带间跃迁能量的确定并结合有效质量理论的计算, 获得了 Al 组分和阱宽值, 并由此推算出相应的红外探测响应波长, 与光电流谱的实验结果相比吻合良好, 这种材料的测量结果有利于器件制备的材料筛选。

**关键词** 量子阱红外探测器, 多量子阱, 光荧光, 峰值响应波长。

## PHOTOLUMINESCENCE CHARACTERIZATION IN GaAs/AlGaAs QUANTUM WELL INFRARED PHOTODETECTORS\*

CAI Wei-Ying LI Zhi-Feng LI Ning LU Wei SHEN Xue-Chu (S. C. Shen)

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

ZHOU Jun-Ming HUANG Qi

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** Micro-photoluminescence ( $\mu$ -PL) measurement was performed on GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors (QWIPs). The PL peaks in the multi-quantum wells (MQWs), which reveal the energy positions of band-to-band transitions in the barrier and the well, respectively, are directly related to the Al component in the barrier of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Using standard effective mass theory for quantum wells the realistic Al component  $x$  and well width  $d$  were deduced. Consequently the peak response wavelength  $\lambda_p$  of the QWIP was determined. The calculated  $\lambda_p$  is coincident with the result from photocurrent spectrum for the same sample very well. It proves that the present method is very applicable for the MQW materials control in the process of device fabrication.

**Key words** quantum well infrared photodetectors, multi-quantum well, photoluminescence, peak response wavelength.

### 引言

GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器(QWIP)<sup>[1]</sup>是红外探测器家族中的重要一员,因其材料与器件工艺的成熟性而具有可实现多色探测、大面积高均匀性的焦平面阵列、以及能与读出电路集成等诸多

优点,受到人们广泛关注.为适应不同探测要求,可以有目的地控制其多量子阱(MQW)材料生长参数以形成合适的能带结构.然而在实际 MQW 的分子束外延(MBE)生长过程中,由于响应波长等 QWIP 器件特性对于量子阱的势阱宽度与势垒高度十分敏感,以致制备的材料有时与设计初值有明显差异.所

\* 国家自然科学基金(编号 1007468)和国家基础研究重点项目基金资助项目

稿件收到日期 2000-07-27, 修改稿收到日期 2000-10-09

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 1007468) and the Major Project of National Basic Research of China

Received 2000-07-27, revised 2000-10-09

以量子阱材料 MBE 生长阶段至关重要,而目前普遍采用的光电流方法只能用于器件制备完成后的测量.由于器件制备工艺复杂,人们希望在器件制备前能从材料上直接获得探测器的一些基本特性,如响应波长等.本文通过对 QWIP 器件的侧面显微荧光( $\mu$ -PL)实验,由 MQW 势垒和势阱的 PL 峰的能量位置精确定出势垒中的 Al 组分和势阱宽度,从而得到该探测器的响应波长.实验推算结果与光电流实验值的对比表明,由  $\mu$ -PL 测量结果计算得到的响应波长与实际器件的响应波长有良好的一致性.

## 1 实验

为了确保光荧光检测的材料与 QWIP 器件所用材料的一致性,我们采用的实验样品是实际的 GaAs/AlGaAs QWIP 器件(设计参数  $d_{\text{GaAs}}=5\text{nm}$ ,  $d_{\text{AlGaAs}}=45\text{nm}$  或  $50\text{nm}$ ),它们的制备过程和具体结构已在有关文献中描述<sup>[2]</sup>.

$\mu$ -PL 实验在室温下进行,测量系统为 Jobin Yvon LabRam-INFINITY 显微拉曼光谱仪,激发光源采用  $\text{Ar}^+$  激光的  $514.5\text{nm}$  线.为排除其它结构如表面覆盖层和重掺杂电极接触层的影响,我们对 QWIP 样品进行了解理,解理面穿过 MQW 台面以确保能够探测到来自量子阱的信号.将解理后样品的解理面朝上放置在由微步进电机驱动的平台,入射光垂直于解理面,平行于衬底表面.由于采用了 100 倍物镜,激发激光被聚焦成直径约  $0.8\mu\text{m}$  的光点.对光谱仪采用共焦光路配置,使光谱仪探测到的发光严格局域在激发光点处,共焦直径约为  $0.8\mu\text{m}$ .样品中 MQW 层的厚度约为  $2\sim 2.8\mu\text{m}$ ,因

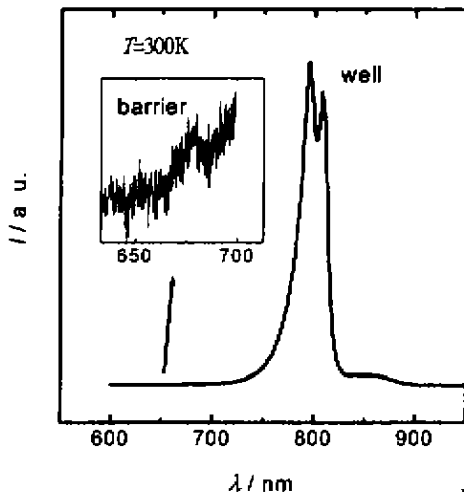


图 1 QWIP 器件量子阱区荧光光谱  
Fig. 1 Photoluminescence spectrum in quantum well region of QWIP

此能够实现激发/探测区域完全局域在 MQW 层中,从而排除器件的电极层和衬底等的发光影响.

## 2 结果与讨论

图 1 是 QWIP 器件典型的 PL 谱,图中  $800\text{nm}$  附近的峰来自多量子阱信号,内插图中示出了位于  $680\text{nm}$  附近的来自势垒的 PL 峰.势阱 PL 峰的劈裂可能来自于量子阱层厚的起伏,在此暂不作讨论,将其作为一个发光峰处理.对势阱和势垒进行高斯线型拟合,得到各自的发光能量,分别对应势阱 GaAs 中电子基态到空穴基态的能量  $E_{e1-h1}$  和势垒  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的禁带宽度  $E_{g(\text{Barrier})}$ ,如图 2 中的能级结构示意图所示.

利用公式  $E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) = 1.424 + 1.247x$  ( $0 \leq x \leq 0.45$ ),由 PL 测得的  $E_{g(\text{Barrier})}$  可算出势垒  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的 Al 含量  $x$ <sup>[3]</sup>.根据图 2 所示理想势阱模型,用量子阱能带理论进行数值计算<sup>[4-5]</sup>,可得到量子阱宽度  $d$  和量子阱子带间跃迁能量  $E_{e1-e2}$ ,后者对应于红外探测器工作时的峰值响应波长  $\lambda_p$ .

我们依照上述步骤计算了一系列的实验光谱,得到相应结构参数和峰值响应波长.表 1 列出了所测 8 个样品的 Al 组分  $x$  和势阱宽度  $d$  的标称值与 PL 测量值的比较.可以看到,荧光光谱推算的结构参数与器件生长的设计值存在差别,一些样品尽管由生长参数给出的标称  $x$ 、 $d$  值完全相同, $\mu$ -PL 的测量仍然给出了不同的结果.这说明实际生长过程中的确存在着工艺条件的起伏,因此可导致器件结构中阱宽偏离设计值  $1\sim 2$  个原子层,势垒 Al 组分偏离  $1\%\sim 2\%$ .

图 3 给出了各测量样品响应波长的设计值、光电流谱测量值以及  $\mu$ -PL 测量结果的推算值.由图可知,两个测量值对于设计值都存在一定的偏差,但两测量值相互之间符合良好.由于光电流谱反映了

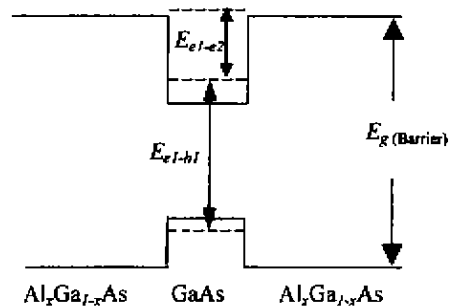


图 2 荧光估算量子阱器件响应波长的能带模型  
Fig. 2 The band model for estimating the peak response wavelength of QWIP

表 1 由荧光实验结果计算值得到的结构参数与设计值的比较

Table 1 PL results compared with nominal values of design

样 品	Al 组分 $x$		阱宽 $d(\text{nm})$	
	设计值	荧光值	设计值	荧光值
V971208	0.310	0.315	5.0	4.7
V971120	0.310	0.318	5.0	4.8
V971020	0.300	0.323	5.0	4.5
V970910	0.290	0.309	5.0	5.0
V971212	0.300	0.310	5.0	4.5
V971217	0.320	0.297	5.0	4.8
V991012	0.300	0.324	5.0	4.5
V991021	0.300	0.287	5.0	5.0

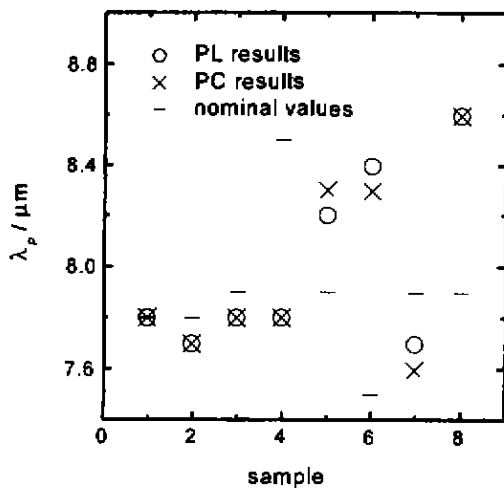


图 3 器件响应波长的荧光估算值与光电流实验值的比较

Fig. 3 Comparison of peak response wavelength between photoluminescence and photocurrent methods

器件最终实际工作的响应波长,可视其为真实  $\lambda_p$ ,因而  $\mu$ -PL 测量推算的结果与实际器件性能是一致的.这种一致性表明采用荧光方法快速判断器件峰值响应波长是完全可行的,对于 QWIP 器件制备过程中剔除偏离设计值的晶片是有意义的.实际器件的情况往往更复杂,掺杂、异质界面的混合、多量子阱的非均匀性等因素都会使器件偏离规则的周期量子阱结构,套用简单的量子阱模型显然是有偏差的,所以用荧光方法得到的响应波长是近似值,荧光和器件性能之间更精确的关系需要更深入研究.

### 3 结论

本文通过对量子阱红外探测器器件解理后的侧向剖面 MQW 进行  $\mu$ -PL 测量,由势垒和势阱的发光峰位采用理想的 GaAs/AlGaAs 方势阱模型进行数值计算得到了器件的势垒组分、量子阱宽度等各项结构参数,并由此计算得到了多量子阱中子带间跃迁能量  $E_{c1-r2}$ ,相应于 QWIP 中的峰值响应波长  $\lambda_p$ .将计算结果与实际器件的光电流谱测量得到的响应波长相比较,两者符合良好,同时它们相对于设计值都具有一定的偏离.我们的工作有利于防止偏离设计值的晶片流入器件制备工序,另一方面能够促使改进 MBE 生长工艺使其达到设计要求.

### REFERENCES

- [1] Levine B F. Quantum-well infrared photodetectors. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**: R1
- [2] Li N, Fu Y, Karlsteen M. *et al.* Fine structures of photoreponse spectra in quantum well infrared photodetector. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**: 2238
- [3] Asachi S J. In *Physics of quantum electron devices*, *Appl. Phys.*, 1985, **58**: R1
- [4] SHEN Xue-Chu. *Optical Properties of Semiconductors*. Beijing: Science Press (沈学础. 半导体光学性质. 北京: 科学出版社), 1992
- [5] Lu W, Mu Y M, Wan M F. *et al.* Solution of one-dimensional Schrodinger equation by transmission matrix method. *J. Infrared Millim. Waves* (陆卫, 穆耀明, 万明芳, 等. 一维薛定谔方程的传递矩阵法求解, 红外与毫米波学报), 1998, **17**: 231