

MBE GaAs/AlAs 多量子阱结构的光致发光谱

庄蔚华 滕 达 徐仲英 许继宗 陈宗圭

(中国科学院半导体研究所)

1985 年 10 月 21 日收到

用国产 MBE 设备生长的不掺杂 GaAs/AlAs 多量子阱 (MQW) 结构, 在 4.2 K 光荧光谱中观测到一条特殊的光谱线——I 线。其半高宽为 6.5—9 meV, 发光较强, 位于体 GaAs 的带间跃迁与自由电子到 C 受主跃迁之间。其峰值能量随激发强度的增加移向高能端, 并与激发强度的对数呈线性关系。其光强随温度的升高而减小, 约在 15 K 消失。

一、引 言

为了发展超高速电子器件和高效率的光电子器件, 人们对量子阱和超晶格结构开展了日益广泛深入的研究。近期对 MBE GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱结构的研究表明: 生长温度及特殊的异质结结构对于量子阱的荧光效率有着较强的影响。这些现象常归因于 Al_xGa_{1-x}As 的晶体质量和 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 界面特性。此外, AlAs 中的深能级中心 (DX) 比 AlGaAs 少, 用 GaAs/AlAs 超晶格代替 AlGaAs 可以减少与深中心有关的持续光电导; 在二元 AlAs 上生长 GaAs 比在三元 AlGaAs 上生长 GaAs 更容易获得平整、突变的异质结。1984 年 Fujiwara 和 Ploog^[1] 用 MBE GaAs/AlAs 短周期超晶格 (SPS) 代替三元 AlGaAs 做为量子阱两边的限制层, 发现 SPS 限制的量子阱具有更好的荧光特性。鉴于以上可能的前景, 我们研究了 MBE GaAs/AlAs 多量子阱结构的低温光荧光谱。在光谱上发现了一条特殊的光谱线——I 线。经分析认为 I 线可能与 MBE GaAs/AlAs 异质结界面有关。

二、样品及实验方法

样品结构为: 在掺 Cr 的半绝缘 GaAs (100) 衬底上, 先生长一层 0.6 μm 的纯 GaAs 缓冲层, 然后交替生长 $L_a = 130 \text{ \AA}$ 的 GaAs 和 $L_b = 230 \text{ \AA}$ 的 AlAs 共 15 个周期。衬底温度 $T_s = 660^\circ\text{C}$ 。各层均不掺杂。样品呈 N 型, 残余载流子浓度 $n \sim 1 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 。

4.2 K 低温实验时样品浸泡在液 He 杜瓦瓶中。激发光源为 Ar⁺ 激光器的 5145 Å 线。激光经聚焦激发 MQW 结构, 荧光讯号经光栅单色仪分光, 由冷却的 GaAs 阴极光电倍增管接收后, 输入锁相放大器。10 K 以上变温实验是在 Air Product 公司生产的 CS-202 型低温致冷器中进行。

三、实验结果

样品在 4.2 K 下的光荧光谱见图 1。高能端的 1.544 eV 峰是量子阱中 $n=1$ 子导带电子至 $n=1$ 子价带重空穴的自由激子发光, 记作 E_{1h} 。1.536 eV 峰是 $n=1$ 电子至阱边界即 GaAs/AlAs 界面处的中性 C 受主的复合发光 $(e-A^\circ)_i$, 1.527 eV 峰是 $n=1$ 电子至阱中心附近中性 C 受主的复合发光 $(e-A^\circ)_c$ [2,3]。1.515 eV 峰是 GaAs 缓冲层 (即体 GaAs 材料) 的带-带发光 (BB)。1.491 eV 峰是 GaAs 缓冲层中残存的 Si 施主和 C 受主的施主-受主对跃迁发光线 DA [2,3]。值得注意的是: 在 BB 峰和 DA 峰之间还出现了一条较强、较宽的特殊光谱线, 记为 I 线。实验表明 I 线有以下两个特征:

1. 4.2 K 下峰值能量对激发强度有明显的依赖性。如图 2 所示。对 27 号样品当激发强度 P_{ex} 从 0.18 W/cm^2 增强至 120 W/cm^2 约变化三个数量级时, I 线峰值能量从 1.4998 eV 移至 1.5064 eV, 向高能方向移动约 7 meV。与此同时 I 线的半宽度 $\Delta E_{1/2}$ 由 6.5 meV 增大到 9.3 meV。图 3 给出了 I 线的峰值能量 $E_I(\text{eV})$ 与激发强度 $P_{ex}(\text{W/cm}^2)$ 的关系。+

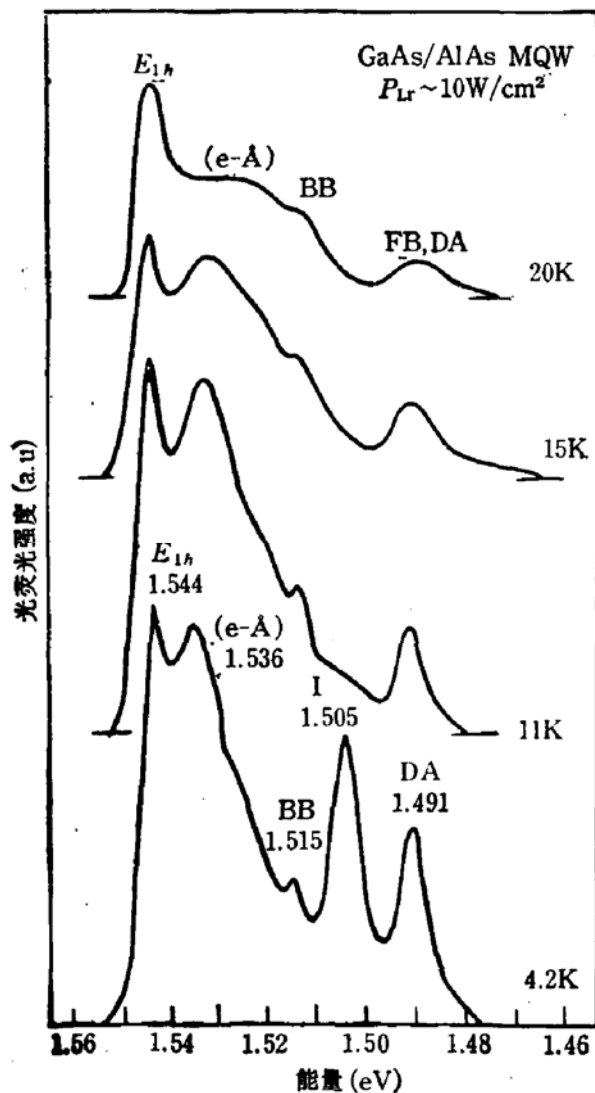


图 1 光荧光谱随温度的变化

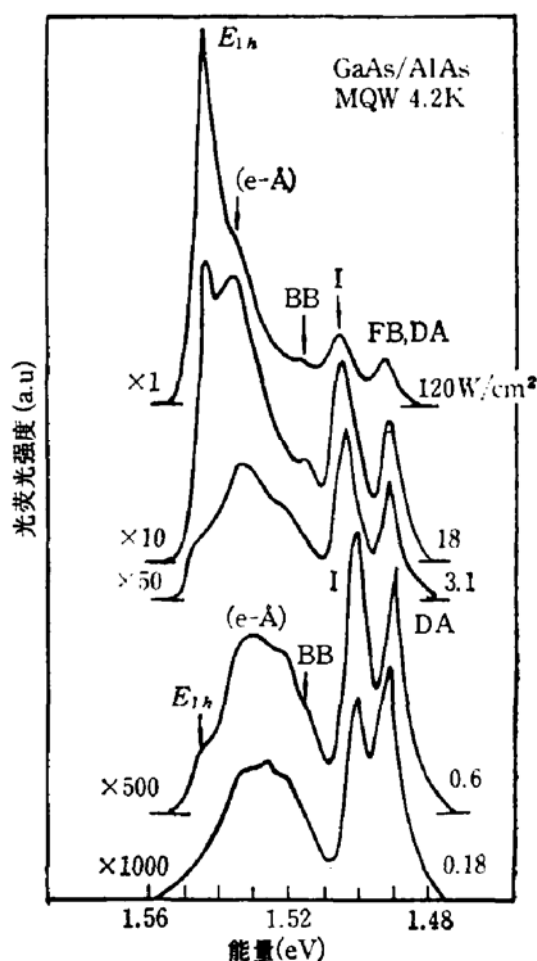


图 2 4.2 K 下不同激发强度下 GaAs/AlAs MQW 的光荧光谱

号示出了 27 号样品的结果, 可以看到 I 线的峰值能量大约与激发强度的对数呈线性关系

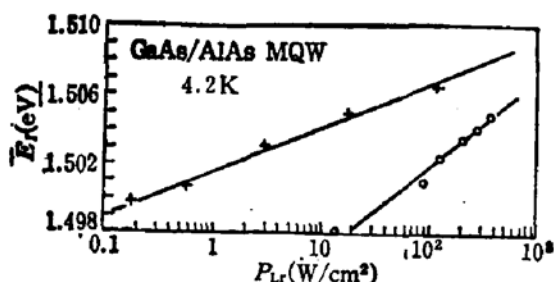


图 3 I 线的峰值能量随激发强度的变化关系

+ 27号, $L_z = 147 \text{ \AA}$, $L_B = 225 \text{ \AA}$
 O 76-1号, $L_z = 83 \text{ \AA}$, $L_B = 25 \text{ \AA}$

系. 图 3 中还给出了另一个 GaAs/AlAs MQW 样品的 I 线峰值能量随激发强度的变化 (76-1 号, O 所示).

2. I 线对温度有较强的依赖关系. 变温实验表明: 随着温度上升, I 线很快下降. 如图 1 所示, 在 11 K 时 I 线已经成为一个肩峰, 在 15 K 以上 I 线完全消失. 图中与 I 线相反, 在 4.2—20 K 范围内, BB 峰及自由电子到受主的跃迁峰 FB 在强度和能量位置上没有很大变化.

由图 2 还可以看出, 当 P_{ex} 增大时, 与量子阱有关的光谱线 E_{1s} 和 $(c-A^\circ)$ 迅速增强. 这说明了量子阱结构对光生载流子具有很强的俘获作用. 大量的载流子陷落到势阱中并通过阱中的能级辐射复合, 具有很高的效率. 在低激发功率时, 与 GaAs 缓冲层中残留杂质有关的 DA 对发光最强, 当 P_{ex} 增大时, I 线和 BB 线增强的速度比 DA 线快, 且 I 线光强超过了 DA 线光强. 这说明 I 线的产生与带间的自由载流子有较密切的关系.

四、结果讨论

我们认为本实验观测到的 I 线与 MBE GaAs 中由缺陷引起的束缚激子峰 (d. x) 是不相同的. 虽然 I 线的发光能量与 (d. x) 峰 (1.504—1.511 eV) 接近, 但由于 (d. x) 峰是由一定数目的缺陷中心引起的, 因此当激发强度增强时, (d. x) 的发光强度有饱和的趋势. 此外其峰值位置随 P_{ex} 的变化移动很少. 而我们所观察到的 I 线的发光强度没有明显的饱和现象, 同时 I 线的峰值位置随激发强度增加明显移向高能端. 可见 I 线与 (d. x) 线在特征上有明显区别. 此外从光谱能量和谱线宽度来看, I 线也不可能是 GaAs 或 AlAs 中的深能级引起的发光. 除了发光能量与 GaAs 或 AlAs 中深能级发光能量不同外, 一般深能级发射线都较宽, 半高宽可达约 150 meV, 而 I 线的半高宽仅 6.5—9 meV. 由上述事实可知, I 线既 not 来自 GaAs 的缺陷或杂质的光发射, 也不来源于 AlAs 层的缺陷或杂质的发光.

袁祐荣等曾在轻掺杂或不掺杂的 LPE GaAs/Al GaAs 异质结中观察到与异质结界面有关的 H 线^[4,7]. 阶梯蚀刻样品的光荧光实验, 证明 H 线来源于 GaAs/Al GaAs 异质结的界面区. 并用异质结界面处存在的类三角形势阱对载流子的限制作用解释了 H 线的产生及其变化的发光现象. 我们在 MBE GaAs/AlAs MQW 结构中所看到的 I 线的许多特征与 H 线相似.

对于 GaAs/AlAs 异质结界面, 由于两种材料的禁带宽度及电子亲合势的不同, 在界面区会形成一个类三角形势阱. 由激光激发出的非平衡载流子中的一部分要陷落到这个势阱中. 由于势阱的深度有限, 束缚在势阱中的载流子可以通过隧道效应深入到禁带之中, 并与价带空穴复合, 引起了辐射复合发光. 这相当于实空间能带间的斜跃迁. 其发射

能量低于带间跃迁 BB. 当激发强度增加时, 由于电荷屏蔽效应及载流子填充效应, 使该发光线明显移向高能端. 与此类似的发光峰在 nipi 结构中也可见到^[6]. 当然在 GaAs/AlAs MQW 结构中, 存在多个异质结界面, 而且还存在着由于 GaAs 阱层窄而产生的量子尺寸效应. 解释将较复杂. 分析工作还有待于进一步深入.

五、结 语

综上所述, 在不掺杂的 MBE GaAs/AlAs MQW 结构的 4.2 K 光荧光谱中, 观测到一条特殊的光谱线——I 线. 它是一条半高宽约为 6.5—9 meV 而发光有相当强度的谱线. 位于体 GaAs 的带间跃迁 BB 线与自由电子到受主跃迁 FB 线之间. 当激发强度增加时发光峰值移向高能端. 其峰值能量与激发强度的对数呈线性依赖关系. 其发光强度随温度的升高而减小, 约在 15 K 消失. 从这些特征来看, I 线很可能与 GaAs/AlAs 异质结界面有关.

作者感谢黄昆、王守武、林兰英和许振嘉、王启明教授的关心支持, 并感谢本所分子束外延组的孔梅影、孙殿照、梁基本、黄运衡等同志在样品工作中的支持和吴灵犀、张泽华同志在测量中的帮助.

参 考 文 献

- [1] K. Fujiwara and K. Ploog, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 1222(1984).
- [2] 徐仲英, 许继宗, 李玉璋, 郑宝真, 徐俊英, 庄蔚华, 陈宗圭, *半导体学报*, **7**, 319(1986).
- [3] Z. Y. Xu, Z. G. Chen, D. Teng, W. H. Zhuang, J. Y. Xu, J. Z. Xu, B. Z. Zhen, J. B. Liang, M. Y. Kong, *The 2nd International Conference on Modulated Semiconductor Structures*, P. 174.
- [4] 袁祐荣, J. L. Merz, *发光与显示*, **5**, No. 3, 33(1984).
- [5] Y. R. Yuan, K. Mohammed, M. A. A. Pudensi and J. L. Merz, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 739(1984).
- [6] K. Ploog and G. Döhler, *Adv. in Phys.*, **32**, 285(1983).

Photoluminescence Spectra of MBE GaAs/AlAs Multiple Quantum Wells Structure (MQW)

Zhuang Weihua, Teng Da, Xu Zhongying, Xu Jizhong and Chen Zhonggui
(*Institute of Semiconductors, Academia Sinica*)

Abstract

An unusual line-I has been observed in the 4.2 K photoluminescence spectra of GaAs/AlAs MQW structure grown by MBE. It is quite strong and broad (FWHM ~ 6.5—9 meV). Its peak energy locates between the band-band transition and the free electron acceptor transition of bulk GaAs, and increases roughly linearly with the logarithm of the excitation power. Its intensity decreases with the increase of temperature and disappears at about 15 K.