

# Si 衬底上生长的 GaAs 薄膜中深中心发光的温度效应\*

赵家龙 高 瑛 刘学彦 奚 恺 黄世华 虞家琪

(中国科学院长春物理研究所激发态物理开放实验室, 长春 130021)

梁家昌

高鸿楷

(中国民用航空学院, 天津 300300) (中国科学院西安光机所, 西安 710068)

**摘 要** 测量了 Si 衬底上生长的 GaAs 薄膜中与深中心有关的发光带的变温光谱, 研究了 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 发光带的峰值位置和发光强度随着温度的变化关系, 发现它们的发光强度随温度的变化服从描述非晶半导体中局域态发光的公式。最后讨论了这些发光带的来源。

**关键词** 光致发光, GaAs 薄膜, 深中心。

## 1 引 言

半导体材料中的深中心作为无辐射复合中心严重地退化其电学和光学性能, 因此研究半导体中深中心的发光特性, 弄清这些深中心的来源, 以便在材料生长过程中更好地控制半导体中杂质与缺陷的产生, 提高材料的质量与性能。GaAs 是一种具有重要应用的光电子材料, 其深中心发光一直受到广泛而深入的研究<sup>[1~7]</sup>, 在半绝缘 GaAs 中观测到的 0.68 eV、0.77 eV 和 0.8eV 发光被认为是与电子陷阱 EL2 和 EL6 有关, GaAs 中的 0.96 eV 和 1.20 eV 发光分别来源于砷空位和镓空位。最近, Yu 等<sup>[8~10]</sup>报道了低温生长的 GaAs 薄膜中 0.8 eV 发光, 并确认此发光带来源于砷间隙原子与镓空位形成的对发光中心( $A_{Si}-V_{Ga}$ )。

作者在 Si 衬底上生长 GaAs 薄膜中测量到 0.78 eV、0.84 eV、0.93 eV、1.04 eV 和 1.13 eV 等 5 个发光峰, 利用变温和变激发光强的光致发光方法研究了 1.13 eV 和 1.04 eV 发光带的发光特性, 并证实 1.13 eV 发光为硅施主-镓空位受主对( $Si_{Ga}-V_{Ga}$ )的复合发光<sup>[11, 12]</sup>。本文研究了 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 发光峰的峰值能量和发光强度随温度的变化关系, 讨论这些深中心发光的来源。

## 2 实 验

实验所用的样品是用金属有机化学气相沉积方法在 n 型 Si 衬底上生长的 GaAs 外延层。

\* 国家自然科学基金和中国科学院长春物理研究所激发态物理开放研究实验室资助课题。

收稿日期: 1994 年 11 月 26 日; 收到修改稿日期: 1995 年 2 月 13 日

Si 衬底为(100)晶向, 偏向(110) $4^\circ$ , 装炉前用  $\text{NH}_4\text{OH}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  溶液先后加热清洗, 然后用  $\text{HF}$  腐蚀 1~2 分钟, 去离子水冲洗后装入反应室。生长前, 高温 1000  $^\circ\text{C}$  通  $\text{AsH}_3$  处理 10 分钟, 降温到 400~450  $^\circ\text{C}$ , 生长 GaAs 过渡层 25 nm, 再升温到 700  $^\circ\text{C}$ , 以三甲基镓和砷烷为原料,  $V/\text{III}$  比为 20~50, 生长速率为 100 nm/min, GaAs 单晶膜厚为 1.5  $\mu\text{m}$ 。用电化学 C-V 测量确定 GaAs 外延层中的载流子浓度约为  $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

近红外光致发光测量是用 He-Ne 激光器的 632.8 nm 激光为激发光、低温杜瓦瓶为控温装置完成的, 变温范围为 77~300 K。用 MDP-2 型光栅单色仪进行分光, 用液氮冷却的 EO-817L 型 Ge 探测器和 EG&G 锁相放大器接收, 调制频率为 800 Hz, 用 X-Y 记录仪记录。

### 3 结果和讨论

图 1(a)和 1(b)为 Si 衬底上生长的 GaAs 样品 1 和 2 在 77 K 温度下的近红外光致发光

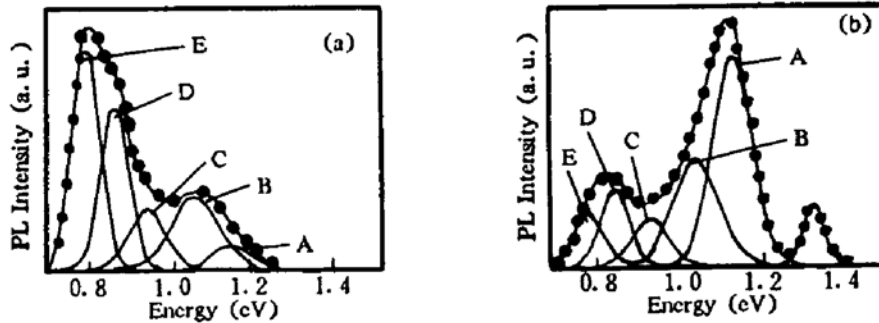


Fig. 1 Photoluminescence spectra of samples 1(a) and 2(b) for the GaAs thin films grown on Si substrates at 77 K. (•) Experimental points; (—) Fitted curves

光谱, 激发强度约为  $1.0 \text{ W/cm}^2$ , 样品 1 和 2 的  $V/\text{III}$  比分别约为 50 和 30。利用计算机按高斯线型对光谱进行拟合分峰, 得到的拟合曲线如图 1 所示, 两个 GaAs 薄膜的发光光谱都由 5 个主要的发光峰组成, 其峰值能量分别为: A: 1.13 eV、B: 1.04 eV、C: 0.93 eV、D: 0.84 eV 和 E: 0.78 eV。从图 1 中可以看出,  $V/\text{III}$  比大的样品, 即砷的含量高, 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 发光带的发光强度明显增强, 而 1.13 eV 和 1.04 eV 发光带的发光强度相对地减弱。作者已经利用变温和变激发光强的光致发光方法, 系统地研究了 1.13 eV 和 1.04 eV 发光带的发光特性, 并确定 1.13 eV 发光为硅施主-镓空位受主对的复合发光<sup>[11, 12]</sup>。当 GaAs 样品的  $V/\text{III}$  比增加, 将在 GaAs 薄膜中产生更多的反位缺陷 ( $\text{As}_{\text{Ga}}$ )、砷间隙原子 ( $\text{As}_{\text{Si}}$ ) 和砷有关的缺陷。许多研究已证实 0.68 eV 发光为 GaAs 中的电子陷阱 EL2 ( $\text{As}_{\text{Ga}}$ ) 的复合发光<sup>[1, 8~10]</sup>, 在本文中未观测到, 可能是由于样品中电子陷阱 EL2 的浓度很低, 同时与 Ge 探测器在此波段已经截止有关。Yu 等<sup>[8~10]</sup>在研究低温生长的 GaAs 薄膜中深能级发光时确认 0.8 eV 发光带来源于砷间隙原子与镓空位对 ( $\text{As}_{\text{Si}}-\text{V}_{\text{Ga}}$ ) 的复合发光。因此, 实验观测到的 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 发光带是与砷间隙原子有关的深中心的发光。虽然它们与 0.8 eV 发光在形成原理上很相似, 但由于材料的生长条件不同, 导致峰值位置发生红移与兰移, 分裂成三个峰。

图 2 为 GaAs 薄膜在不同温度下的近红外光致发光光谱, 变温范围为 77 K~300 K, 激发强度为  $1.0 \text{ W/cm}^2$ 。可以看到, 当测量温度改变时, 近红外发光光谱线形发生明显变化, 但在变温光谱中, 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 为 GaAs 样品 1 的主要发光峰。这些发光带的峰值能量随温度的变化如图 3 所示, 峰值能量在 77~300 K 范围内基本不随温度改变而变化。

GaAs 薄膜中的发光带 C、D 和 E 的发光强度随温度的变化曲线如图 4 所示, 从图中可看到, 随着温度升高, 它们的发光强度逐渐减弱, 并呈单指数变化。0.78 eV 发光带的发光强度减弱最快, 0.84 eV 发光带次之, 0.93 eV 发光带最慢。通常, 对于深中心发光, 当温度升高时, 由于施主或受主能级上的粒子数减少, 导致其发光强度减弱, 称之为热猝灭机制。这种发光强度随温度的变化关系可用 Arrhenius 公式来描述<sup>[6, 12]</sup>, 而本文报导的 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 发光带的发光强度随温度的变化却不服从 Arrhenius 公式, 但它们符合用于描述

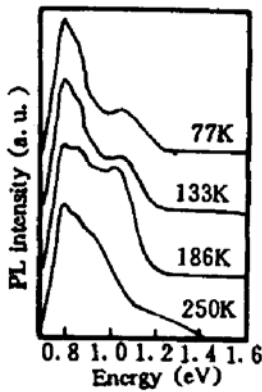


Fig. 2 Photoluminescence spectra for sample 1 of the GaAs thin films at various temperatures

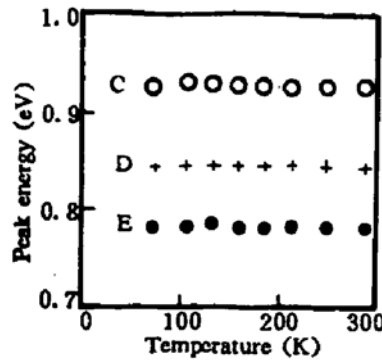


Fig. 3 Temperature dependence of the peak energies for bands C, D and E in the GaAs thin film

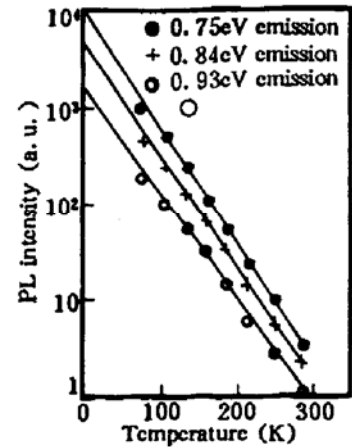


Fig. 4 Temperature dependence of the PL intensities for bands C, D and E in the GaAs thin film

非晶半导体中局域态发光的公式<sup>[13, 14]</sup>:

$$I_{PL} = I_0 / [1 + A \exp (T/T_0)] \quad (1)$$

其中,  $I_{PL}$  为发光强度,  $T$  为测量温度,  $T_0$  为隧道温度系数, 它表示局域态的能量深度,  $A$  为隧道系数,  $I_0$  对应于绝对温度为零时的发光强度。图 4 所示的曲线是利用(1)式拟合发光峰 C、D 和 E 的发光强度随温度的变化, 获得它们的隧道温度系数分别为 39.1 K、37.4 K 和 36.1 K。隧道温度系数越小, 表明它们的发光强度随温度的变化越快。

根据上面的研究结果, 可得出 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 发光带具有极其相似的发光特性, 因此表明它们来源于同一类具有相似结构的深中心。理论计算<sup>[15]</sup>给出了镓空位( $V_{Ga}$ )不同电荷态  $V_{Ga}^0$ 、 $V_{Ga}^-$  和  $V_{Ga}^{2-}$  的能量分别位于价带之上 0.168 eV、0.283 eV 和 0.436 eV, 因此, 这三个发光带可能来源于砷间隙原子与镓空位的不同电荷态所形成深中心的复合发光。

**结 论** 利用变温的光致发光方法研究了 Si 衬底上生长的 GaAs 薄膜中的 0.78 eV、0.84 eV 和 0.93 eV 发光带的发光特性, 发现它们的发光强度随温度的变化可用公式  $I_{PL} = I_0 / [1 + A \exp (T/T_0)]$  描述, 并认为这三个深中心发光可能来源于砷间隙原子与镓空位的不同电荷态所形成的深中心的复合发光。

### 参 考 文 献

- [1] P. W. Yu, Deep center photoluminescence in undoped semi-insulating GaAs:0.68 eV band due to the main deep donor. *Solid State Commun.*, 1982, 43(12): 953~956
- [2] P. W. Yu, Photoluminescence excitation of the 0.77 eV emission in undoped semi-insulating GaAs. *Phys. Rev.*, 1984, B29(4): 2283~2285
- [3] M. Mullenborn, H. Ch. Alt, A. Heberle, Annealing behavior of deep-level defects in semi-insulating gallium

- arsenide studied by photoluminescence, infrared absorption, and resistivity mapping. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(8) : 4310~4317
- [4] J. Windscheif, H. Ennen, U. Kaufmann *et al.*, Annealing behavior of the 0.8 eV luminescence in undoped semi-insulating GaAs. *Appl. Phys.*, 1983, **A30**(1) : 47~49
- [5] S. Y. Chiang, G. L. Pearson, Photoluminescence studies of vacancies and vacancy-impurity complexes in annealed GaAs. *J. Lumin.*, 1975, **10**(5) : 313~322
- [6] E. W. Williams, Evidence for self-activated luminescence in GaAs: The gallium vacancy-donor center. *Phys. Rev.*, 1968, **168**(3) : 922~928
- [7] Z. G. Wang, C. J. Li, S. K. Wan *et al.*, Spatial distributions of impurities and defects in Te- and Si-doped GaAs grown in a reduced gravity environment. *J. Cryst. Growth*, 1990, **103**(1~4) : 38~45
- [8] P. W. Yu, C. E. Stutz, Effects of heat treatment on the 0.8 eV photoluminescence emission in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures. *J. Electron. Mater.*, 1993, **22**(12) : 1441~1444
- [9] P. W. Yu, C. E. Stutz, Photoluminescence excitation of the  $A_{\text{Si}}-V_{\text{Ga}}$  emission in GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures. *Solid State Commun.*, 1994, **89**(3) : 293~296
- [10] P. W. Yu, G. D. Robinson, J. R. Sizelove *et al.*, 0.8 eV photo-luminescence of GaAs grown by molecular beam epitaxy at low temperatures. *Phys. Rev.*, 1994, **B49**(7) : 4689~4694
- [11] 高 瑛, 赵家龙, 刘学彦等, 在 Si 衬底上异质外延 GaAs 薄膜变激发强度的近红外光致发光. *光学学报*, 1995, **15**(4) : 468~472
- [12] J. L. Zhao, Y. Gao, X. Y. Liu *et al.*, Studies on deep levels in GaAs epilayers grown on Si by MOCVD ( I ): 1. 13 eV photoluminescence emission. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1994, **13**(23) : 1694~1696
- [13] R. A. Street, Luminescence in amorphous semiconductor. *Advan. Phys.*, 1976, **25**(4) : 397~454
- [14] T. Yamamoto, M. Kasu, S. Noda *et al.*, Photoluminescence properties and optical absorption of AlAs/GaAs disordered superlattices. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(10) : 5318~5323
- [15] H. Xu, U. Lindefelt, Electronic structure of neutral and charged vacancies in GaAs. *Phys. Rev.*, 1990, **B41**(9) : 5979~5990

## Temperature Effect of Deep Center-Related Photoluminescence in GaAs Thin Films Grown on Si Substrates

Zhao Jialong      Gao Ying      Liu Xueyan

Dou Kai      Huang Shihua      Yu Jiaqi

(Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Liang Jiachang

(Department of Basic Sciences, Civil Aviation Institute of China, Tianjin 300300)

Gao Hongkai

(Xian Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)

(Received 26 November 1994; revised 13 February 1995)

**Abstract** The deep center-related photoluminescence (PL) in GaAs thin films grown on Si substrates were measured with respect to the changes of temperature. The peak energies and PL intensities of the 0.78 eV, 0.84 eV and 0.93 eV PL bands as a function of temperature were studied. It is found that the temperature dependence of the PL intensities obeys the formula as that used for amorphous semiconductors because of the existence of localized states. The origins of the PL bands were discussed.

**Key words** photoluminescence, GaAs thin films, deep center.