

GaAs衬底上生长的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 外延层中的近红外光致发光对激发强度的依赖关系*

赵家龙 高瑛 刘学彦 苏锡安

(中国科学院长春物理研究所,长春,130021)

梁家昌

(中国民用航空学院,天津,300300)

关兴国 章其麟

(河北半导体研究所,石家庄,050051)

1991年3月23日收到,同年6月5日修改定稿

本文首次报道了利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法在GaAs衬底上生长的有序的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 外延层的近红外光致发光的研究,并观测到深能级产生的三个发光峰,其峰值能量分别为1.17, 0.99和0.85eV。根据它们的近红外发光光谱随着激发强度的变化关系,我们证实这些发光都是由于施主-受主对复合产生的发光。

PACC: 71.55, 78.55, 78.65, 81.15H

一、引言

III-V合金GaInP作为一种宽带隙的半导体材料,其晶格可与GaAs完全匹配,因此它可能成为继AlGaAs后的又一种具有应用前景的在可见区发光的光电子材料。最近,人们发现,在利用有机金属气相外延(OMVPE)^[1,2],金属有机化学气相沉积(MOCVD)^[3]和原子层外延(ALE)^[4]等方法在GaAs衬底上生长的GaInP的带隙 E_g 不仅取决于材料的组分值,而且还随着材料的生长条件不同而改变,这是由于近邻原子的原子排列变化,在材料中形成了有序结构,导致其能带结构变化所致。这种有序结构的存在已经引起GaInP材料的带隙变窄和反常的光致发光,并使它们的发光光谱明显地依赖于测量温度与激发强度^[5-7]。

GaAs衬底上生长的GaInP材料中的杂质与缺陷所形成的深能级,不仅影响了材料中的载流子复合时间^[8],还导致其荧光峰值能量与材料的实际带隙之间存在着一定的差异^[9]。目前对GaInP中的深能级研究还很少^[8,9],并且还未见到有关其近红外光致发光

* 本工作得到国家自然科学基金和中国科学院长春物理研究所激发电态物理开放实验室基金资助

的研究报道。

在本文中我们在 77K 温度下测量 GaAs 衬底上生长的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 外延层中与深能级有关的近红外光致发光, 研究其近红外发光光谱随着激发强度的变化关系, 并初步地讨论了它们的辐射机理和来源。

二、实 验

实验中所用的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 外延材料是利用 MOCVD 方法在半绝缘的 GaAs 上生长的, 其晶向是(100)向(110)偏 3—5°, 生长温度 T_g 可在 600—750°C 范围内改变, V/III 比, 即反应气体中的 V 族源 (PH_3) 与 II 族源 (TEGa, TMIn) 的摩尔数比约为 30, 外延层厚约为 2 μm。 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 外延层几乎完全与 GaAs 衬底晶格匹配, 晶格失配小于 $\pm 0.1\%$ 。根据 X 光衍射及透射电镜分析, 证实 GaInP 材料为单晶外延层, 而且不同程度地存在着有序结构。

近红外光致发光测量是在 77K 温度下, 利用 He-Ne 激发器产生的 6328 Å 激光做激发光源完成的, 用中性减光板改变激发光强, 发光用 MDP-2 型光栅单色仪进行分光, 再利用液氮冷却的 EO-817L 型 Ge 探测器和 EG&G 锁相放大器接收, 调制频率为 800 Hz, 最后用记录仪记录。

三、结 果 与 讨 论

图 1 是 GaAs 衬底上生长的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 样品在 77K 温度下的近红外光致发光光谱, 样品 1 和样品 2 是在不同温度下生长的, 它们的生长温度 T_g 分别为 700°C 和 650°C, 作用到样品上的激光强度为 0.4 W/cm²。从图中可以看到, 两个样品的发光光谱都是由三个明显的发光峰组成的, 分别称为 A、B 和 C。发光峰 A 的强度最强, B 次之, C 最弱。另外, 我们还发现两个样品中的发光峰 A 的峰值存在着相对移动。利用计算机按高斯线型对光谱进行拟合分峰, 以便准确地确定峰值位置, 半宽度和相对发光强度, 得到的拟合曲线见图 1。样品 1 中的三个发光峰的峰值能量分别为 $1.17 \pm 0.02\text{ eV}$ (1060 nm), $0.99 \pm 0.02\text{ eV}$ (1250 nm) 和 $0.85 \pm 0.02\text{ eV}$ (1450 nm), 其半宽度分别为 0.18 ± 0.02 , 0.17 ± 0.02 和 $0.12 \pm 0.02\text{ eV}$ 。同样, 样品 2 中的三个发光峰的峰值能量分别为 $1.14 \pm 0.02\text{ eV}$ (1090 nm), $0.99 \pm 0.02\text{ eV}$ (1250 nm) 和 $0.85 \pm 0.02\text{ eV}$ (1450 nm)。从上面的结果中可以发现, 两个样品的发光峰 A 的峰值位置发生了明显的相对移动, 样品 1 中的发光峰 A 相对于样品 2 的发光峰 A 蓝移了 0.03 eV (30 nm), 这是由于材料的生长温度不同所致。研究表明^[1-3], GaInP 材料的带隙 E_g 不仅依赖于材料的组分值, 而且还与材料的生长条件有关, 如温度, V/III 比等。GaInP 材料中形成的有序结构程度越高, 其带隙越窄; 反之, 对于完全无序的 GaInP 材料则拥有相对大的带隙。我们已经确定样品 1 和样品 2 的带隙分别为 1.89 和 1.83 eV, 由于它们的带隙不同, 从而引起两个样品中的发光峰 A 的峰值位置差异, 而其它两个发光 B 和 C 的峰值却未见显著的移动, 表明它们与样品的有序程度无关。

图 2 为样品 1 在不同的激发强度下的近红外光致发光光谱, 测量温度为 77K。我们

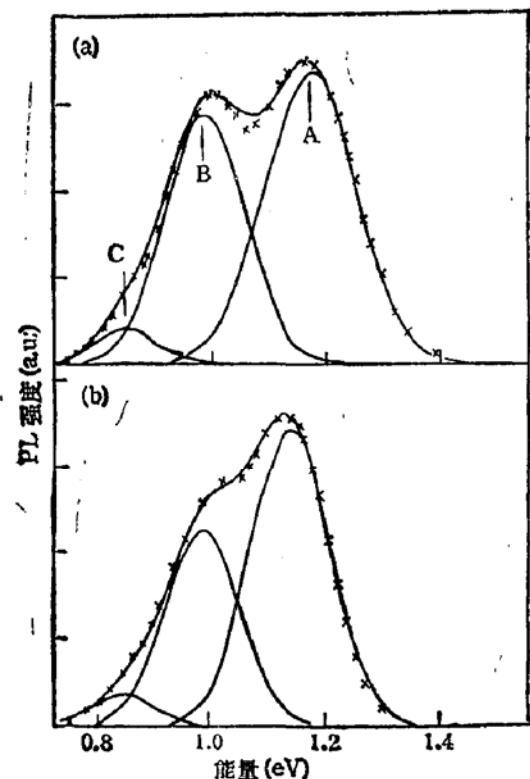


图 1 77K 温度下 GaAs 衬底上生长的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 样品的近红外光致发光光谱。
X 代表实验点. (a) 样品 1, (b) 样品 2

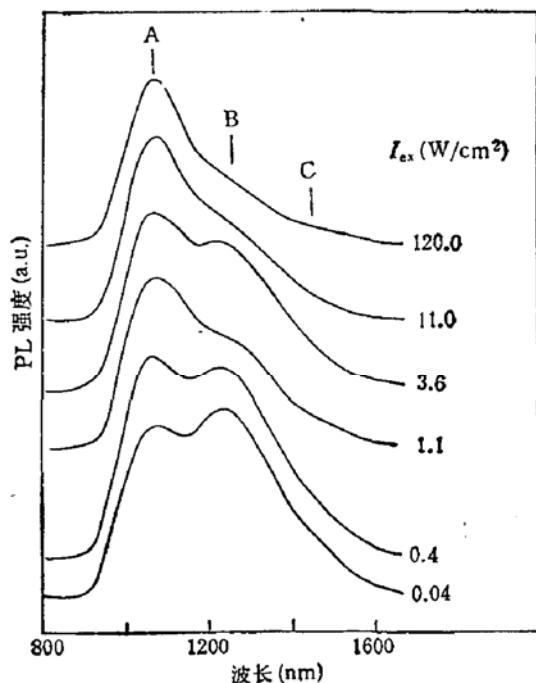


图 2 不同激发强度下 GaAs 衬底上生长的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 样品的近红外光致发光光谱

注意到,当激发强度改变时,样品的近红外光致发光光谱线形发生了显著的变化。在低激

发强度下,样品 1 拥有两个很强的发光峰 A 和 B,以及一个较弱的发光峰 C。当激发强度增加时,发光 A 的强度相对地增强,相反,发光 B 和 C 的强度相对地减弱,而在高激发强度下,发光 A 成为 GaInP 样品主要的近红外发光。这些发光峰的强度随激发强度的变化关系曲线如图 3 所示,从图中可以看出,发光峰 A 的强度随着激发强度的增加而线性增加。对于发光 B 和 C,在低激发强度下,它们的发光强度与激发强度呈线性关系,但随着激发强度的增加,其发光强度的增长率减慢,表现出饱和趋势。

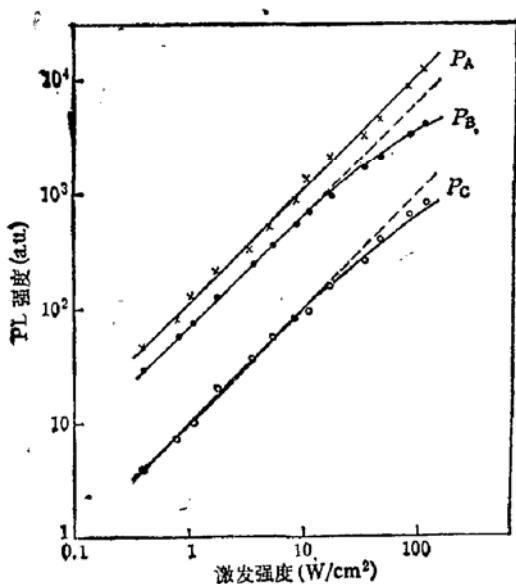


图 3 GaAs 衬底上生长的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 样品的近红外光致发光强度随激发强度的变化关系曲线

值能量均向高能(短波)方向移动,激发强度每增加一个量级,发光 A 的峰值向高能移动 4meV,而发光 B 却移动了 9meV,发光 C 也移动了 10meV。另一方面,它们的半宽度都随着

图 4 为发光 A 和 B 的峰值能量和半宽度随着激发强度的变化关系曲线,从图中可以看出,随着激发强度的增加,发光 A 和 B 的峰

激发强度而变窄。

在许多半导体材料中,已经观察到由施主-受主对复合产生的发光随激发强度的变化而引起的峰值移动^[10,11]。对于施主-受主对复合(DAP),由于施主和受主之间存在着相互作用,其辐射复合的能量可以用下式表示

$$h\nu = E_g - (E_D + E_A) + \frac{e^2}{\epsilon r}$$

式中 E_D , E_A 分别为施主和受主离化能, r 为施主与受主之间的距离, ϵ 为介电常数。由于施主-受主之间的库仑作用为它们之间距离的函数,因此,随着激发强度的增加,其发光峰值能量向高能方向移动,易出现饱和现象,同时伴随着它们的半宽度的变窄。

前面我们已经研究了 GaAs 衬底上生长的 GaInP 中的深能级产生的发光随激发强度的变化。随着激发强度的增加,样品 1 的三个发光的峰值能量都不同程度地向高能移动,同时引起它们的半宽度变窄,这表明这些发光都是典型的施主-受主对复合所产生的发光。

但是,对于实验中测到的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 中的深能级发光的来源,目前还不清楚。S. B. Amor 等^[8]研究了 $\text{Ga}_{0.49}\text{In}_{0.51}\text{P}/\text{GaAs}$ 异质结的光电导,获得其光能阈值为 1.15 eV; T. Takanohashi 和 K. Nakajima^[9] 测量了 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P:Fe}$ 的光电容,发现其光能阈值为 0.78 和 1.15 eV,分别对应于晶体场分裂的 Fe 受主能级的⁵E 和⁵T₂。本文中我们所测得的三个发光峰 A(1.17 eV), B(0.99 eV) 和 C(0.85 eV),其中发光 A 的峰值能量与前面文献中的光能阈值 1.15 eV 非常接近,但实验中的样品未故意掺杂 Fe,这表明发光 A 不可能是由于样品中含有铁杂质引起的发光。另外,样品也未掺氧,基本上排除了与氧相关的深能级产生发光的可能性。在 GaP^[12,13], InP^[14] 和 GaAs^[15] 等 III-V 族材料中,已经观察到许多由于空位或其反位缺陷引起的深能级发光,并且其中一些发光与上面测得的三个发光的峰值能量相近。因此,本文中测得的三个发光峰 A、B 和 C,可能也是来源于 GaAs 衬底上生长的 GaInP 样品中的空位 (V_{Ga} , V_P), 反位缺陷 ($P_{\text{Ga}}\text{Ga}_P$), 间隙原子和它们的复合体。

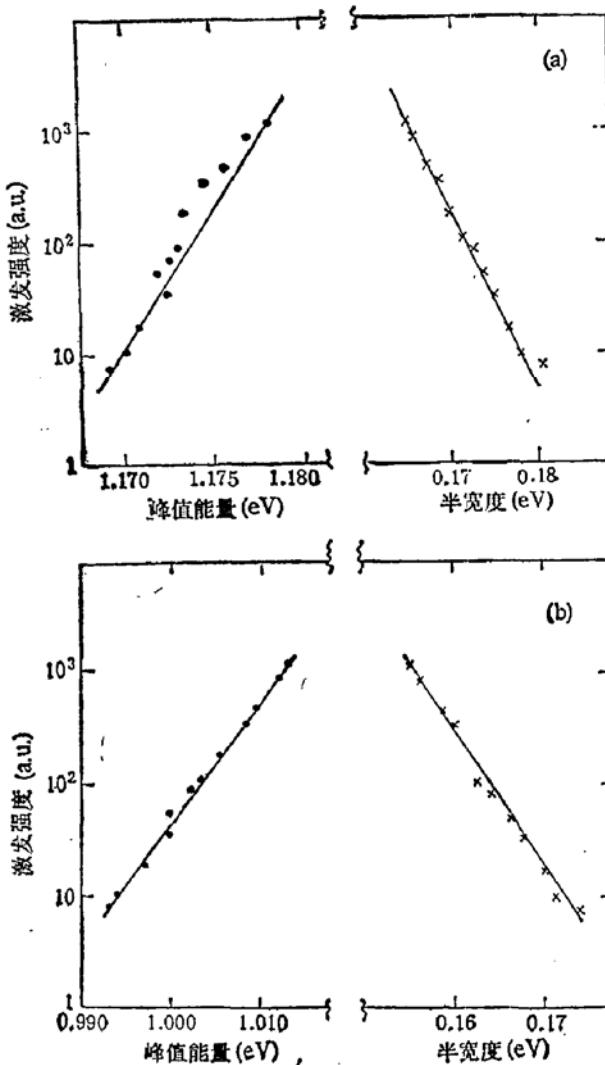


图 4 77K 温度下 GaAs 衬底上生长的 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 的近红外光致发光的峰值能量和半宽度随着激发强度的变化关系。(a) 发光峰 A, (b) 发光峰 B

四、结 论

我们在 GaAs 衬底上生长的 GaInP 样品中已经测到了三个近红外光致发光峰 A (1.17eV), B(0.99eV) 和 C(0.85eV), 并研究了其近红外发光光谱随着激发强度的变化关系。根据它们的发光强度, 峰值能量和半宽度对激发强度的依赖关系, 我们确定这些发光是由于施主-受主对复合产生的发光, 它们可能是来源于材料中的空位或间隙原子以及它们的反位缺陷和复合体引起的深能级复合, 有关它们的辐射机理和来源有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] M. Kondow, H. Kakibayashi, S. Minagawa, Y. Inoue, T. Nishino, and Y. Hamakawa, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 2053(1988).
- [2] M. Kondow and S. Minagawa, *J. Appl. Phys.*, **64**, 793(1988).
- [3] S. R. Kurtz, J. M. Olson and A. Kibbler, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1922(1990).
- [4] B. T. McDermott, K. G. Reid, N. A. El-Masry, S. M. Bedair, W. M. Duncan, X. Yin and F. H. Pollak, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1172(1990).
- [5] M. Kondow, S. Minagawa, Y. Inoue, T. Nishino and Y. Hamakama, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1760(1989).
- [6] M. C. Delong, P. C. Taylor and J. M. Olson, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 620(1990).
- [7] J. E. Fouquet, V. M. Robbins, S. J. Rosner and O. Blum, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 1566(1990).
- [8] S. B. Amor, L. Dmowski, J. C. Portal, N. J. Pulford, R. J. Nicholas, J. Singleton and M. Razeghi, *J. Appl. Phys.*, **65**, 2756(1989).
- [9] T. Takanohashi and K. Nakajima, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 529(1989).
- [10] E. W. Williams, A. Ashford, P. Porteous and A. M. White, *Solid State Commun.*, **8**, 501(1970).
- [11] E. Zacks and A. Halperin, *Phys. Rev. B*, **6**, 3072(1972).
- [12] K. D. O'Donnell, K. M. Lee, and G. D. Watkins, *Solid State Commun.*, **44**, 1015(1982).
- [13] B. K. Meyer, T. Hangleiter, J. M. Spaeth, G. Strauch, T. Zell, A. Winnacker and R. H. Bartram, *J. Phys. C*, **18**, 1503(1985).
- [14] A. A. Iliadis, S. C. Laih and E. A. Martin, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1436(1989).
- [15] B. J. Feldma and D. H. Lowndes, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 59(1982).

Excitation Intensity Dependence of Near-Infrared Photoluminescence in $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ Grown on GaAs Substrate

Zhao Jialong, Gao Ying, Liu Xueyan and Su Xi'an

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica, Changchun, 130021)

Liang Jiachang

(College of Civil Aviation of China, Tianjin, 300300)

Guan Xingguo and Zhang Qilin

(Hebei Institute of Semiconductors, Shijiazhuang, 050051)

Abstract

The investigation of near-infrared photoluminescence (PL) in the ordered $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ grown on GaAs substrate by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) is reported for the first time. Three PL peaks from the deep levels are observed, and their peak energies are 1.17, 0.99 and 0.85eV, respectively. We further study the relationship between the near-infrared PL spectra and the excitation intensity. The results demonstrate that three PL peaks are originated from donor-acceptor pair recombination (DAP).

PACC: 71.55, 78.55, 78.65, 81.15H.