

深能级对 AlGaInP/GaAs 异质结 双极晶体管性能的影响^{*}

张兴宏[†] 胡雨生 吴 杰 程知群 夏冠群 徐元森

(中国科学院上海冶金研究所, 上海 200050)

陈张海 桂永胜 褚君浩

(中国科学院红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(1998 年 9 月 2 日收到)

用深能级瞬态光谱和光致发光(PL)方法研究了 AlGaInP/GaAs 异质结双极晶体管(HBT)发射区 AlGaInP 中的深能级, 得到了两个深能级, 分别为 $E_c - E_{d1} = 0.42 \text{ eV}$ 和 $E_c - E_{d2} = 0.59 \text{ eV}$, 其复合截面为 $\sigma_{d1} = 6.27 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 和 $\sigma_{d2} = 6.49 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$. 这两个深能级分别与硅杂质和氧杂质相联系. 从不同激发功率与 PL 峰强度的关系, 说明在 AlGaInP 中存在深能级非复合中心. AlGaInP/GaAs HBT 发射区 AlGaInP 中深能级的存在使器件的电流增益减小.

PACC: 8530P; 7340L; 7220J

1 引 言

四元系的 AlGaInP 合金化合物不仅在可见光范围的发光二极管(LED)中有广泛的应用前景^[1-4], 而且用它制造高电子迁移率晶体管(HEMT)可以大大提高沟道中二维电子气(2DEG)的密度^[5-7]. 用于异型结双极晶体管(HBT)可以提供较大的 AlGaInP/GaAs 异质结价带不连续(ΔE_v), 从而进一步抑制空穴电流从基区向发射区注入^[8]. 另外, AlGaInP/GaAs HBT 还具有较好的高温特性^[9]. 然而, AlGaInP 中深能级的存在对这一体系的电子器件性能有不良影响. 虽然关于 AlGaInP 中的深能级已有一些研究^[10-15], 但是 AlGaInP 中深能级对器件性能的影响却很少报道. 本文利用 AlGaInP/GaAs HBT 材料结构的特点, 即发射区为 n-AlGaInP, 基区为高掺杂的 p⁺-GaAs, 用深能级瞬态光谱(DLTS)测量发射区中的深能级. 另外, 用光致发光(PL)方法证实了 AlGaInP 中深能级是作为非复合中心而存在的. 详细研究了 AlGaInP 中深能级对 HBT 电流增益的影响.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:69576035)及中国科学院红外物理国家重点实验室资助的课题.

[†]E-mail: xhzhangb@online.sh.cn

2 实 验

实验所用 AlGaInP/GaAs HBT 材料由 MOVPE 生长,详细的生长条件参见文献[8].材料结构如图 1 所示.图 1 基区为重碳掺杂,其他 n-型层为硅掺杂,发射区 AlGaInP 中 Al 的组分为 0.3. HBT 器件的制造利用标准的双台面工艺,发射极和集电极欧姆接触用 AuGeNi/Au,基极欧姆接触用 Cr/Au,发射极的面积为 $100\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$. 深能级的测试利用日本生产的 MI-401 DLTS TEST SYSTEM 完成,测量是在 HBT 的 E-B 结之间,DLTS 测试的温度为 80—450 K.对于 HBT 材料的 PL 测量,样品用 He-Cd 激光器 441.6 nm 线激发,信号用 ARC 型光电倍增管接收.

顶层	n ⁺ -GaAs	100nm	$5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$
	n-Ga _{0.52} In _{0.48} P	50nm	$2\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$
渐变层	n-Al _x Ga _{0.52-x} In _{0.48} P	20nm	$8\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$
发射区	n-Al _x Ga _{0.52-x} In _{0.48} P	250nm	$7\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$
渐变层	n-Al _x Ga _{0.52-x} In _{0.48} P	20nm	$5\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$
基区	p ⁺ -GaAs	80nm	$5\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$
集电区	n-GaAs	400nm	$1\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$
	n ⁺ -GaAs	500nm	$5\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$
衬底		n ⁺ -GaAs	

图 1 AlGaInP/GaAs HBT 的材料结构

3 结果与讨论

图 2 给出 AlGaInP/GaAs HBT 器件 E-B 结之间发射区 AlGaInP 层的 DLTS 谱线.从图 2 可观察到两个深能级 E_{d1} 和 E_{d2} , E_{d1} 出现在 205 K, E_{d2} 出现在 371 K.深能级的电子热发射激活能和俘获截面从 Arrhenius 图可以获得,如图 3 所示.这两个深能级电子陷阱的激活能分别为 $E_c - E_{d1} = 0.42\text{ eV}$ 和 $E_c - E_{d2} = 0.59\text{ eV}$. 0.42 eV 能级与 Sugiura 等人^[12]和 Lee 等人^[15]报道的结果一致, $E_c - E_{d1}$ 能级被认为是与 Si 有关的深能级. 0.59 eV 能级与 Suzuki 等人获得结果(0.64 eV)基本一致,是与氧相联系的深能级^[14].这两个深能级(电子陷阱)的俘获截面分别为 $\sigma_{n1} = 6.27 \times 10^{-17}\text{ cm}^2$ 和 $\sigma_{n2} = 6.49 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$. 当获得

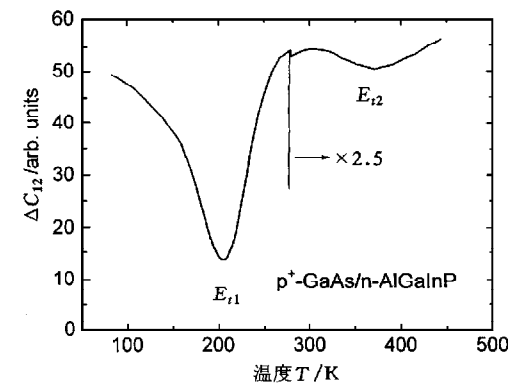


图 2 HBT 材料发射极 AlGaInP 的 DLTS 图

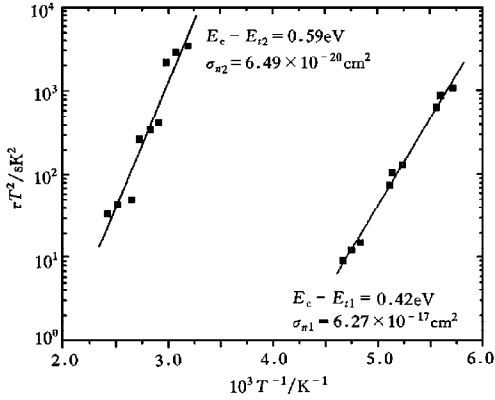


图 3 HBT 材料 AlGaInP 中深能级的 Arrhenius 图

了深能级的位置 E_t 和俘获截面 σ_n 后,利用下列公式可得深能级的浓度 N_t :

$$N_t = 2 N_D \frac{\Delta C_{12}}{\bar{C}} \frac{1}{\exp(-e_n(T_p) t_1) - \exp(-e_n(T_p) t_2)}, \quad (1)$$

$$e_n(T_p) = \sigma_n \langle v_n \rangle N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k_B T_p}\right). \quad (2)$$

方程(1)和(2)中 N_D 为发射区 AlGaInP 中的掺杂浓度, ΔC_{12} 为 DLTS 峰在温度 T_p 时的值, $\bar{C}$ 为信号平均器(boxcar)在温度 T_p 时的测是值, $\langle v_n \rangle$ 为电子平均热运动速度, N_c 为导带有效态密度, k_B 为 Boltzmann 常数. 在本实验中 $t_2/t_1 = 10$, $t_1 = 50 \mu\text{s}$. 从方程(1)和(2)计算得到两个深能级的浓度分别为 $N_{d1} = 0.1$, $N_D = 7.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_{d2} = 0.004$, $N_D = 2.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 计算结果表明深能级 E_{d1} 的浓度比 E_{d2} 的浓度大 25 倍.

通常情况下深能级的复合是作为非辐射复合中心存在的. 由于在辐射复合占主要的情况时, PL 强度直接正比于激发功率密度. 另一方面在非辐射复合占主要的情况时, PL 强度正比于激发功率的平方^[15-17]. 所以可用 PL 强度与激发功率的关系来判断半导体材料中是否存在非辐射复合中心. 可用下列方程描述 PL 强度 I_{PL} 与激发功率 P 的关系^[15]:

$$I_P = P^\alpha \quad (1 < \alpha < 2). \quad (3)$$

(3)式表明 $\alpha > 1$ 有非辐射复合中心存在. 我们测量了 AlGaInP/GaAs HBT 材料室温下不同激发功率密度 PL, 测量结果如图 4 所示. PL 峰强度与激发功率密度的关系示于图 5. $\alpha = 1.074$ 是从图 5 斜率得到, 这与 Lee 等人的数值 ($\alpha_{x=0.3} = 1.068$)^[15] 基本相同. $\alpha > 1$ 说明在 AlGaInP/GaAs HBT 中 AlGaInP 层有非辐射复合中心存在. 由于发射极中存在非辐射复合中心, 所以它将对 HBT 的性能产生影响. 下面通过计算 E-B 结空间电荷区的复合电流讨论深能级对 AlGaInP/GaAs HBT 电流增益的影响.

AlGaInP/GaAs HBT 中, 由于发射区 AlGaInP 层深能级的存在, 所以空间电荷区的复合主要是发射区深能级的复合, 这属于空间电荷区单能级的复合. 空间电荷区复合用

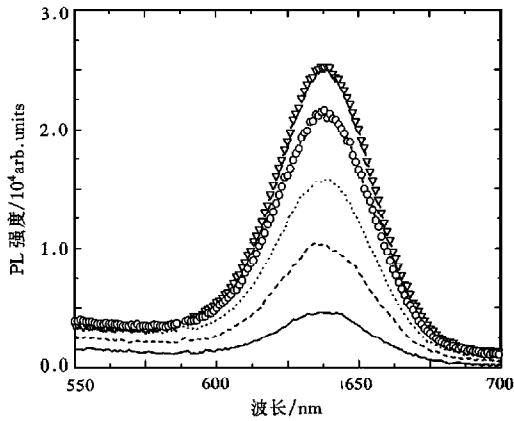


图 4 AlGaInP/GaAs HBT 材料室温下不同激发功率可见光范围的 PL 光谱 ∇ 为 50 mW, $\circ$ 为 40 mW, $\cdots$ 为 30 mW, $---$ 为 20 mW, $—$ 为 10 mW

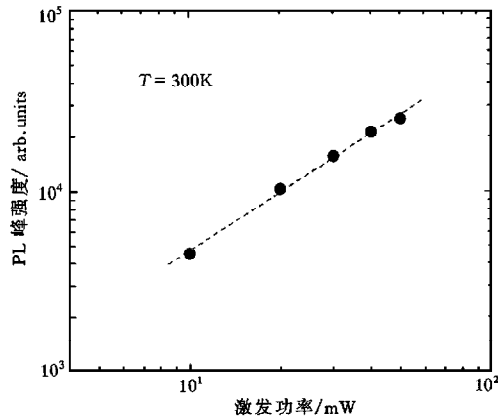


图 5 AlGaInP/GaAs HBT 材料的 PL 峰强度随激发功率的变化

Shockley-Read-Hall 统计来描述,对深能级 E_t 的复合率可表示为^[18-21]

$$R_{SRH} = \frac{n_i \sinh(a)}{\sqrt{\tau_{p0} \tau_{n0} \cosh(b) + \exp(-a) \cosh(c)}}, \quad (4)$$

其中 $a = \frac{E_{fn} - E_{fp}}{2kT}$, $b = \frac{E_{fn} + E_{fp}}{2kT} - \frac{E_t}{kT} + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}}\right)$, $c = \frac{E_t - E_i}{kT} + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\tau_{p0}}{\tau_{n0}}\right)$, τ_{n0} 和 τ_{p0} 分别为电子和空穴少子寿命, n_i 为本征载流子浓度, E_i 为本征 Fermi 能级, E_{fn} 和 E_{fp} 分别为电子和空穴准 Fermi 能级. 空间电荷区复合电流可表示为^[18]

$$J_{SCR} = q \int_{-X_E}^{-w} R_{SRH} dx + q \int_{-w}^0 R_{SRH} dx + q \int_0^{X_B} R_{SRH} dx = J_{SCR1} + J_{SCR2} + J_{SCR3}, \quad (5)$$

其中 X_E 和 X_B 是 E-B 结空间电荷区的边界, w 为 AlGaInP 渐变层的宽度, J_{SCR1} 和 J_{SCR2} 为空间电荷区发射区一边的复合电流, J_{SCR3} 为空间电荷区基区一边的复合电流. 详细的计算方法参见文献[18]. 下面仅讨论深能级 E_t 复合电流对 AlGaInP/GaAs HBT 电流增益 ($\beta = J_C/J_B$) 的影响. 图 6 给出有、无空间电荷区复合时的电流增益比较. 从图 6 可看出, 当有空间电荷区复合时, HBT 的电流增益减小. 特别是在集电极电流较小时, β 值下降较多, 在高电流密度时, β 值也有所降低. 当无空间电荷区复合时, 电流增益 β 值基本不随电流密度变化. 在低电流密度时, 发射区一边的空间电荷

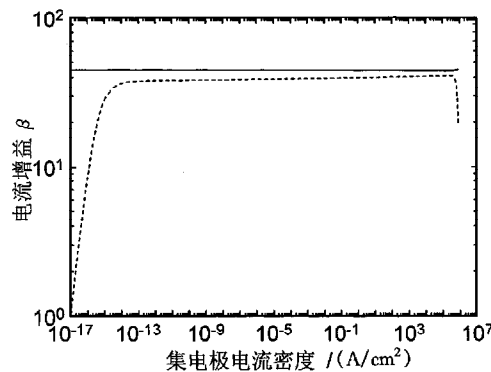


图 6 AlGaInP/GaAs HBT 有、无空间电荷区复合时的电流增益的比较 —— 为无空间电荷复合, ... 为有空间电荷复合

区复合起主要作用, 在高电流密度时, 基区一边的空间电荷起主要作用^[19,22]. 但是在高电流密度时, 电流增益下降并不多. 所以发射区深能级复合是引起电流增益 β 值下降的主要空间电荷区复合机制. 发射区中深能级的存在使 AlGaInP/GaAs HBT 的电流增益 β 值下降.

4 结 论

利用 AlGaInP/GaAs HBT 结构的特点, 在 E-B 结之间测量了发射区 AlGaInP 中的深能级, 得到的两个深能级 0.42 和 0.59 eV 分别与硅和氧施主相联系. 并获得了这两个深能级的俘获截面和浓度. 测量 AlGaInP/GaAs HBT 材料的 PL, 从 PL 强度与激发功率密度的关系, 证明了在 AlGaInP 中存在深能级非辐射复合中心. 深能级复合电流密度计算表明深能级复合是 HBT E-B 结空间电荷区的主要复合机制, 发射区 AlGaInP 中深能级的存在使 HBT 的电流增益 β 值受到明显的影响.

实验所用样品是由英国 Sheffield 大学电子电气工程系提供, 光致发光测量得到复旦大学应用物理

国家重点实验室袁帅硕士的帮助,在此一并致谢.

- [1] M. Ishikawa, Y. Ohba, H. Sugawara *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **48**(1986), 207.
- [2] H. Asahi, Y. Mawamura, H. Nagai, *J. Appl. Phys.*, **54**(1983), 6958.
- [3] H. Sugawara, M. Ishikawa, G. Hatakoshi, *Appl. Phys. Lett.*, **58**(1991), 1010.
- [4] H. Sugawara, K. Itaya, H. Nozaki *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **61**(1992), 1775.
- [5] J. Dickmann, M. Berg, A. Geyer *et al.*, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **42**(1995), 2.
- [6] Y. C. Wang, J. M. Kuo, F. Ren *et al.*, *IEEE Electron Dev. Lett.*, **18**(1997), 550.
- [7] Y. Wang *et al.*, *Electron. Lett.*, **34**(1998), 594.
- [8] H. K. Yow, P. A. Houston, C. C. Button *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76**(1994), 8135.
- [9] H. K. Yow, P. A. Houston, C. M. S. Ng *et al.*, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **43**(1996), 2.
- [10] S. Nojima, H. Tanaka, H. Asahi, *J. Appl. Phys.*, **59**(1986), 3489.
- [11] M. O. Watanabe, Y. Ohba, *J. Appl. Phys.*, **60**(1986), 1032.
- [12] K. Sugiura, K. Domen, M. Sugawara *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **70**(1991), 4946.
- [13] M. Suzuki, M. Ishikawa, K. Itaya *et al.*, *J. Cryst. Growth*, **115**(1991), 498.
- [14] M. Suzuki, K. Itaya, Y. Nishikawa *et al.*, *J. Crystal Growth*, **133**(1993), 303.
- [15] K. J. Lee, H. K. Chen, J. C. Chen, *J. Appl. Phys.*, **82**(1997), 1350.
- [16] S. Naritsuka, Y. Nishikawa, H. Sugawa *et al.*, *J. Electronic Materials*, **20**(1991), 687.
- [17] H. Sugawara, K. Itaya, M. Ishikawa *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31**(1992), 2446.
- [18] C. D. Parikh, F. A. Lindholm, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **39**(1992), 2197.
- [19] S. Searles, D. L. Pufrey, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **41**(1994), 476.
- [20] J. Pallares, L. F. Marsal, X. Correig *et al.*, *Solid-State Electron.*, **41**(1997), 17.
- [21] L. Pallares, F. Marsal, X. Correig *et al.*, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **45**(1998), 54.
- [22] C. M. S. Ng, P. A. Houston, H. K. Yow, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **44**(1997), 17.

INFLUENCE OF DEEP LEVELS ON THE PERFORMANCE OF AlGaInP/GaAs HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR *

ZHANG XING-HONG[†] HU YU-SHENG WU JIE CHENG ZHI-QUN

XIA GUAN-QUN XU YUAN-SEN

(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

CHEN ZHANG-HAI GUI YONG-SHENG CHU JUN-HAO

(State Key Laboratory for Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

(Received 2 September 1998)

ABSTRACT

We have studied deep levels in AlGaInP emitter of AlGaInP/GaAs heterojunction bipolar transistor by deep-level transient spectroscopy and photoluminescence (PL) methods. Two deep levels were obtained with thermal activation energies of $E_c - E_{d1} = 0.42$ eV and $E_c - E_{d2} = 0.59$ eV, whose capture cross sections are 6.27×10^{-17} cm² and 6.49×10^{-20} cm², where E_{d1} and E_{d2} are Si-related and O-related deep levels, respectively. The relationship between excitation power and PL peak intensity have revealed that nonradiative recombination centers of deep levels exist in AlGaInP. The current gain of AlGaInP/GaAs HBT decreases due to the existence of deep levels in AlGaInP.

PACC: 8530P; 7340L; 7220J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69576035) and by the State Key Laboratory for Infrared Physics, Chinese Academy of Sciences.

[†]E-mail: xhzhangb@online.sh.cn