

# 高光增益 GaAs/Ga<sub>0.55</sub>Al<sub>0.45</sub>As 异质结光晶体管

黄小康 孙宝寅 孙成城 薛保兴 张培荣

(清华大学无线电电子学系)

1985年6月29日收到

本文报道了具有高光增益的 GaAs/Ga<sub>0.55</sub>Al<sub>0.45</sub>As 异质结光晶体管的研制, 并对影响器件光增益的一些因素作了讨论. 实验中得到的最大光增益为 3350. 理论分析和实验结果均表明: 减小基区宽度, 降低基区掺杂浓度, 提高基区内少数扩散长度, 以及适当调整基区与发射区掺杂浓度之比将有益于提高异质结光晶体管的光增益.

## 一、引言

为了适应光纤通讯, 特别是长波长光纤通讯对光探测器的要求, 异质结光晶体管在近几年得到了很大发展<sup>[1-4]</sup>. 与 p-i-n 光电二极管相比, 它具有高光增益的优点; 与 APD 相比, 它的工作电压低且量子噪声小. 因此, 异质结光晶体管 (HPT) 不仅可以满足光纤通讯的要求, 而且在光纤传感、光学信息处理等领域都有着广阔的应用前景. HPT 还可以与 LED 实现单片集成, 制成光放大器、光双稳态器件和光逻辑器件<sup>[5]</sup>、红外到可见光的反斯托克斯移频器<sup>[6]</sup>以及全固体图像转换器<sup>[7]</sup>. 所以 HPT 的发展受到了人们的重视.

## 二、器件结构与特性

采用液相外延工艺, 在 n<sup>+</sup>-GaAs:Si 低阻衬底上, 沿 <100> 晶向顺次生长: (1) 缓冲

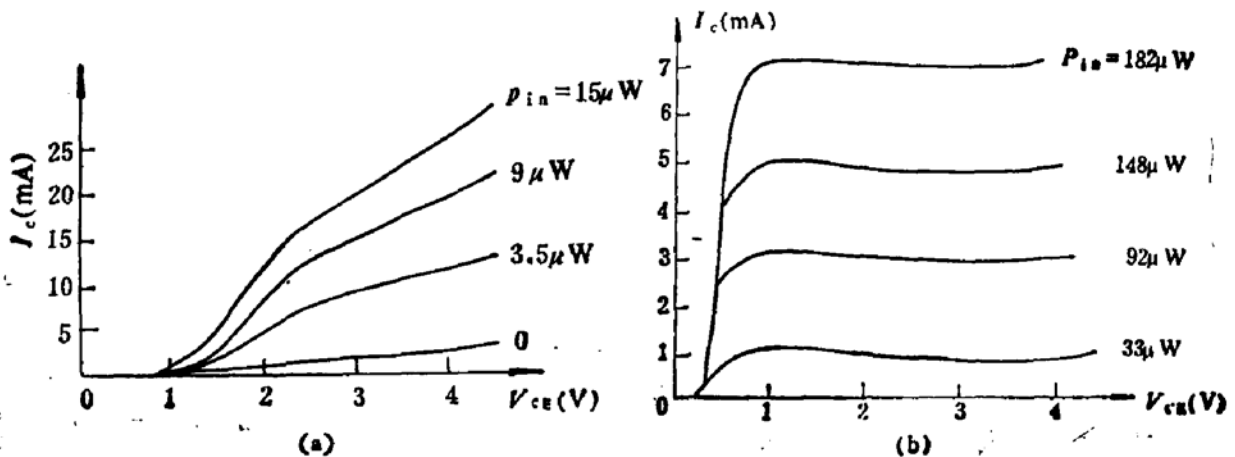


图1 GaAs/Ga<sub>0.55</sub>Al<sub>0.45</sub>As HPT 的直流工作特性

层, GaAs:Te,  $n^+ \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ; (2) 集电区, GaAs:Sn,  $n \approx 2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ; (3) 基区, GaAs:Ge,  $p \approx 1.5 \times 10^{17} \sim 1.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ; (4) 发射区,  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As:Sn}$ ,  $n \approx 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $x \approx 0.45$ ; (5) 顶层, GaAs:Te,  $n^+ \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . 顶层和衬底两端蒸镀 Au-Ge-Ni/Au 电极. 基极悬浮. 利用常规光刻工艺和选择性腐蚀液, 在 GaAs:Te 顶层上腐蚀出通光孔. 光敏面直径为  $\phi 200 \mu\text{m}$ . 器件为平面结构, 结面积为  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ .

用  $\lambda = 8500 \text{\AA}$  的 LD 作为光源, 测量了器件的直流工作特性, 结果如图 1 所示. 由此得到的最大光增益为 3350. 器件的光谱响应范围为  $6200 \sim 8800 \text{\AA}$ . 响应速度在负载电阻为  $50 \Omega$  的情况下, 约为  $100 \text{ ns}$ . 如果采用台面结构, 减小结面积, 可使响应速度提高.

### 三、基区参数与器件光增益

由光增益定义和晶体管一般原理, 可以得到 HPT 的光增益  $G$  为:

$$G = \beta_{\text{DC}} \cdot \frac{I_B \cdot h\nu}{q \cdot P_{\text{in}}}$$

其中  $\beta_{\text{DC}}$  为共发射极直流放大系数;  $I_B$  为光激发产生的基极信号电流;  $P_{\text{in}}$  为人射光功率. 因为发射结为异质结, 所以  $\beta_{\text{DC}}$  (或  $G$ ) 的提高主要取决于  $\eta_B$ , 取决于基区参数的选取.

表 1 器件参数与光增益

编号	掺杂浓度 ( $\times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )			各区宽度 ( $\mu\text{m}$ )			光增益
	E	B	C	E	B	C	
#8	3	18	2	4.5	0.5	7.5	56
#42	3	18	2	2.6	1	6.3	28
#55	3	18	2	2.8	1.7	5.6	10
#59	3	7	2	2.4	0.5	4.6	68
#62	3	1.5	2	2.4	0.5	4.7	3350
#67	3	7	2	3.5	0.4	4.2	101

表 1 列出了实验中不同基区参数与光增益特性的关系, 从中可以看到下面两个规律:

第一、 $G$  随基区宽度  $W_2$  的减小而增大, 如图 2 所示. 图中可以看出基区少数扩散长度  $L_2$  的改变亦要影响到光增益  $G$ . 这是因为不论  $W_2$  减小还是  $L_2$  增大, 都使得从发射区注入的电子在基区内与空穴复合的几率减小, 从而使  $\eta_B$  和  $G$  增大.

第二、 $G$  随基区掺杂浓度  $N_{A2}$  的减小而增大. 这是因为  $N_{A2}$  不仅影响基区的有效宽度, 而且影响基区的少数扩散长度. 这一点与同质结晶体管中  $N_{A2}$  对  $\beta_{\text{DC}}$  的影响是一致的. 图 3 给出了  $G$  随  $N_{A2}$  变化的实验结果. 可以看出当  $N_{A2}$  从  $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  减小到  $1.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  时,  $G$  迅速增大达一个量级以上. 这一现象是不能仅从  $N_{A2}$  的改变使基区有效

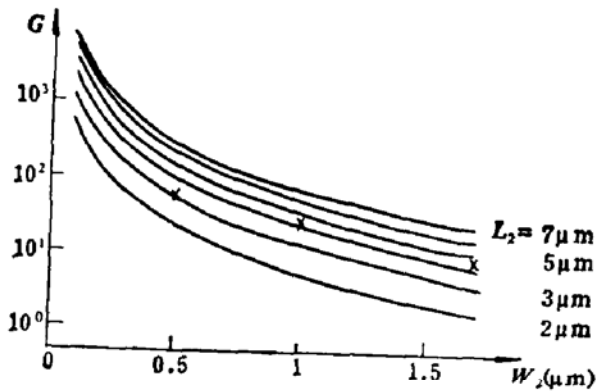


图2 基区宽度  $W_2$  与光增益  $G$  的关系  
 $N_{A2}$ ——基区掺杂浓度 ( $1.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )  $L_2$ ——基区少子扩散长度  $\times$ ——实验值 实线——理论计算曲线

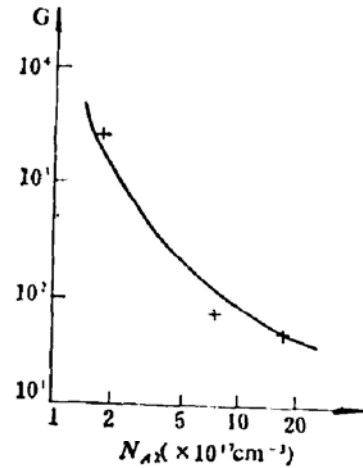


图3 基区掺杂浓度  $N_{A2}$  与光增益  $G$  的关系  
 $W_2$ ——基区宽度 ( $\sim 0.5 \mu\text{m}$ )  $N_{D1}$ ——发射区掺杂浓度 ( $\sim 3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )  $+$ ——实验值

宽度减小和  $L_2$  增大来解释的。参考文献 [2]—[4] 曾注意到提高发射区的掺杂浓度  $N_{D1}$  可以使光增益有很大增加。这与本文中的实验结果有共同之处。它们可能和异质结能带结构的变化有关。突变异质发射结能带上的“尖峰”与“凹口”不仅影响发射区向基区的注入电子流,而且阻碍基区内的光生电子向发射区运动,因而影响到光增益。 $N_{A2}$  的降低与  $N_{D1}$  的提高可以改变“尖峰”与“凹口”的位置,从而大大减弱它们对载流子运动的限制,使光增益增大。当然,用 LPE 很难作出像 MBE 那样近于理想的突变异质结,因此“尖峰”与“凹口”对光增益影响的研究有待进一步深化。

#### 四、结 论

我们做出了光增益达 3350 的 GaAs/Ga<sub>0.95</sub>Al<sub>0.05</sub>As 异质结光晶体管,讨论了基区参数对器件增益特性的影响。为了提高 HPT 的光增益,需要减小基区宽度、降低基区掺杂浓度、增大基区少子扩散长度。此外,发射区掺杂浓度应适当高于基区掺杂浓度。

但是基区宽度的减小要受到基区内光吸收的减小和两个耗尽层连通的限制。由于集电区内光吸收可以弥补基区内光吸收的减小,因此耗尽层的连通对基区宽度减小的限制是主要的。

降低基区掺杂浓度会由于 Early 效应使模拟信号的光电转换失真,但对数字信号影响不大<sup>[2]</sup>。另外,基区掺杂浓度的降低,还会使得基区电阻率增大,而影响器件的响应速度。所以降低基区掺杂浓度要综合器件的光增益和频率特性来考虑。

周炳琨、江剑平同志对本文的工作给予了热情帮助和指导。掺杂浓度的电化学 C-V 测量是中国科学院半导体所理化分析室和北京有色金属研究院 402 室帮助完成的。在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Zh. I. Alfelov, F. A. Akhmedov, V. I. Korolkov, V. G. Nikitin, *Sov. Phys. Semicond.*, 7, 780 (1973).
- [2] M. N. Svilans, N. Grote, H. Beneking, *IEEE Electron. Dev. Lett.*, EDL-1, 247(1980).
- [3] A. Scavennec, D. Ankri, C. Besombes, C. Courbet, Riou. F. Heliot, *Electron. Lett.*, 19, 394(1983).
- [4] T. Mitsugu, S. Fujita, A. Sasaki, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, ED-31, 812(1984).
- [5] A. Sasaki, K. Matsuda, Y. Kimura, S. Fujita, *Proc. 14th (Int'l) Conf. Solid state Devices. Tokyo, Aug. (1982).*
- [6] H. Beneking, N. Grote, M. N. Svilans, *IEDM Dig. tech.*, 842(1980).
- [7] H. Beneking, N. Grote, and M. N. Svilans, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, ED-28, 404(1981).

**High-Gain GaAlAs/GaAs Heterojunction Phototransistors**

Huang Xiaokang, Sun Baoyin, Sun Chengcheng,  
Xue Baoxing and Zhang Peirong  
(Department of Radio Electronics, Tsinghua University)

**Abstract**

GaAlAs/GaAs HPT's with optical gain 3350 are fabricated. Some factors which have effects on the gain of such devices are discussed. They are consistent with the static optical gain analysis. Experimental data have shown that it is helpful for the gain to reduce the width and doping concentration of the base layer, as well as to increase the minority carrier diffusion length. On the other hand, higher gain of HPT's could be obtained by adjusting the ratio of the doping concentrations between the emitter and the base.