

蓝紫光范围灵敏的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 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, 北京)

1987年5月5日收到

本文在对异质结光晶体管的光电流注入进行理论分析的基础上, 采用选择性腐蚀工艺, 制出了在蓝紫光波段灵敏的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 异质结光晶体管, 其光谱响应范围为小于 4000 \AA 到 8800 \AA , 峰值响应波长为 5500 \AA . 4000 \AA 处的相对响应约为 30%, 其绝对响应度优于 $70\mu\text{A}/\mu\text{W}$.

主题词: 异质结, 光晶体管, 光电探测器

一、引言

异质结光晶体管(HPT)是适应光通讯的需要而发展起来的^[1]. 近年来, 人们对异质结光晶体管的增益特性^[2,3]、响应速度^[4]、噪声特性^[5]、光谱特性^[6]、雪崩状态下的负阻特性及光电双稳特性^[7,8]进行了深入研究. 将 HPT 与 LED 单片集成, 已制出了光放大器、光双稳器件^[9]和红外到可见光的全固体图像转换器^[10]. 具有负阻特性的 HPT 与 LD 结合, 实现了各种基本的光逻辑门^[11].

但是, 异质结光晶体管的光谱响应范围要受到异质结的“窗口”效应的限制. 对于 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 器件, 这一范围通常为 6000 — 9000 \AA ; 对于 $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 器件, 为 1 — $1.7\mu\text{m}$. 这使得异质结光晶体管在光通讯以外的其它领域中的广泛应用受到很大限制.

目前在蓝紫光范围内所用的光探测器件通常是 Si 光敏二极管和 Si 光敏三极管. 前者本身无增益, 因而响应度不高, 外量子效率极限为 1. 后者由于是同质结器件, 其增益亦不会很高. 因此, 在蓝紫光范围内具有高增益, 高响应度的光探测器件是人们所期望的.

1982 年日本冲电气公司为了作出具有发光、受光、增幅三种功能的器件, 用腐蚀的方法将 HPT 的部分发射区和基区材料去掉, 并在基区引出电极. 腐蚀的结果, 使该器件在短波长较宽范围内具有一定的光响应^[12].

* 本文部分发表在 The 1987 Conference on Lasers and Electro-Optics, Maryland, USA, 1987.

** 现在国家自然基金委员会.

本文通过对异质结光晶体管的光电流注入进行理论分析,讨论了不同器件结构、不同入射光子能量情况下,发射结和集电结对注入基区的一次光生电流的影响。在此基础上,采用选择性腐蚀工艺,制出了具有宽光谱响应范围的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 异质结光晶体管。该 HPT 的光谱响应范围从小于 4000 \AA 到 8800 \AA , 峰值波长为 5500 \AA 。 4000 \AA 处的相对响应约为 30%, 其绝对响应优于 $70 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。

二、工作原理

对于 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 异质结光晶体管, 当入射光子能量 $h\nu$ 小于发射区材料 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 的禁带宽度 E_{gE} , 大于基区和集电区材料 GaAs 的禁带宽度(分别表示为 E_{gB} 和 E_{gC}) 时, 即满足:

$$E_{gE} > h\nu > E_{gB} - E_{gC}. \quad (1)$$

入射光子将无吸收地穿过 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料, 而被 GaAs 所吸收。由于光生伏特效应, 在发射结和集电结将分别产生注入基区的一次光生电流 I_{BE} 和 I_{BC} 。其注入基区的总光生电流 I_B 为

$$I_B = I_{BE} + I_{BC}. \quad (2)$$

与一般晶体管类似, I_B 将受到异质结光晶体管的增益而得到放大的光电流 I_C 。

通常人们认为, 由于集电结为反向偏置, 其耗尽区较宽, 因此光生电流 I_B 主要来源于集电结^[2,3], 即 $I_{BC} \gg I_{BE}$ 。但是实际上, 对于不同光子能量的入射光来说, 发射结和集电结对 I_B 的贡献是不一样的。当入射光的光子能量较小时, 上面的结论近似成立。这是因为, 材料的吸收系数与光子能量有关。光子能量越大, 材料的吸收系数就越大, 光子在材料中的穿透能力就越小。如果入射光的光子能量较小, 则可以有相当数量的光子在集电结附近被吸收而形成从集电结注入基区的光电流 I_{BC} 。相反, 如果入射光的光子能量较大, 那么多数光子将在发射结附近被吸收, 到达集电结附近的光子变得很少, 因此 I_{BC} 相对变得较小。

采用一维扩散模型以及与参考文献 [13] 类似的近似假设和分析方法, 同时考虑到两个结区内有光生载流子产生, 可以得到基极悬浮的异质结光晶体管的集电极电流为:

$$\begin{aligned} I_C &= I_{on1} [\exp(\theta V_c) - 1] \\ &- \left[I_{on1} \cosh \left(\frac{W_B}{L_B} \right) + I_{op1} \right] \cdot [\exp(\theta V_c) - 1] + I_{BC} \\ &- I_{CO} + I_{BE} \end{aligned} \quad (3)$$

和发射极电流为:

$$\begin{aligned} I_E &= \left[I_{op1} + I_{on1} \cosh \left(\frac{W_B}{L_B} \right) \right] \cdot [\exp(\theta V_c) - 1] \\ &- I_{on1} [\exp(\theta V_c) - 1] - I_{BE} \\ &- I_{EO} - I_{BC} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 I_C 与 I_E 为同一方向。

$$I_{CO} \equiv I_{on1} [\exp(\theta V_c) - 1]$$

$$-\left[I_{op1} \cosh\left(\frac{W_B}{L_B}\right) + I_{op3} \right] \cdot [\exp(\theta V_c) - 1] \quad (5)$$

$$I_{EO} = \left[I_{op1} + I_{op2} \cosh\left(\frac{W_B}{L_B}\right) \right] \cdot [\exp(\theta V_c) - 1] \\ - I_{op2} [\exp(\theta V_c) - 1] \quad (6)$$

式中 $\theta = q/kT$, V_c, V_e 分别为发射结和集电结偏压, 且有 $V_c > 0, V_e < 0$. I_{op1}, I_{op3} 、 I_{op2} 分别为与器件结构和材料有关的参数。 W_B 为基区宽度, L_B 为基区少子扩散长度。将(5)、(6)两式与一般双极型晶体管的集电极电流和发射极电流的表达式相比较^[14], 可以发现它们是完全一致的。因此可以把 I_{CO} 和 I_{EO} 分别看作是异质结光晶体管中一个等效双极晶体管的集电极电流和发射极电流。

(3)、(4)式中的 I_{BC} 和 I_{BE} 可表示为:

$$I_{BC} = \eta_C q P_{in} / h\nu \quad (7)$$

$$I_{BE} = \eta_E q P_{in} / h\nu \quad (8)$$

其中 η_C, η_E 分别为集电结和发射结的内量子效率, P_{in} 为人射光功率。在式(3)中 I_{BC} 前的正号表示它的方向与 I_{CO} 一致。式(4)中 I_{BE} 前的负号表示它的方向与 I_{EO} 反向。从(7)、(8)式中可以看出, I_{BC} 和 I_{BE} 都是与入射光功率直接有关的, 因此它们都是入射光产生的, 流入基区的一次光生电流。经过适当推导, 不难证明集电极电流 I_C 可以近似表示为:

$$I_C \approx I_{CO} - \beta(I_{BC} + I_{BE}) = \beta I_B \quad (9)$$

式中 β 为异质结光晶体管的共发射极电流放大系数。(9)式给出的结论与前面的定性分析是一致的。

I_{BC} 与 I_{BE} 共同构成信号电流 I_B , 但二者在 I_B 中所占的比例是随材料的吸收系数(亦即入射光波长)和基区宽度的变化而改变的。图1给出了不同基区材料的吸收系数 α_B 和不同基区宽度 W_B 情况下 I_{BE}/I_{BC} 的计算结果。计算中取发射区掺杂浓度 N_E 为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 基区掺杂浓度 N_B 为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 集电区掺杂浓度 N_C 为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。基区扩散长度 L_B 为 $5 \mu\text{m}$ 。从图1中可以看出, 注入基区的光生电流 I_B 主要由 I_{BC} 构成

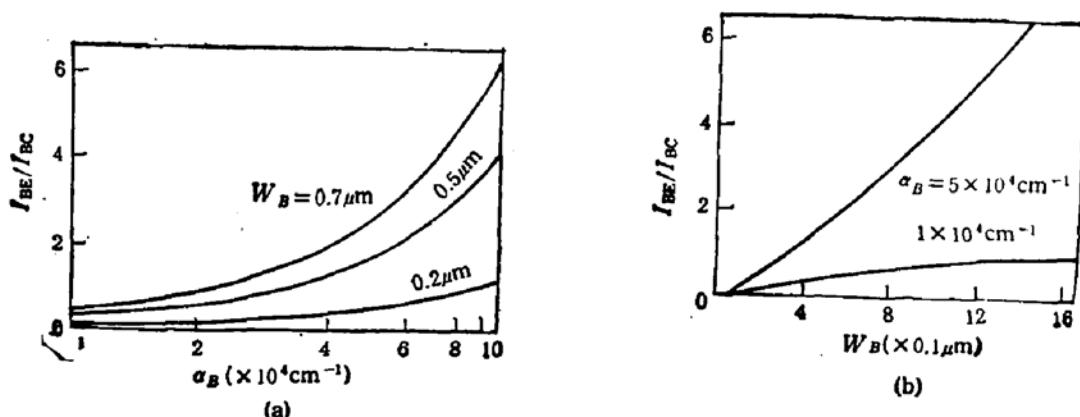


图1 (a) 基区吸收系数 α_B 一定时 I_{BE}/I_{BC} 随基区宽度 W_B 的变化关系;
(b) W_B 一定时, I_{BE}/I_{BC} 随 α_B 的变化关系。

这一结论成立的条件是有限的。对于 $W_B = 0.5 \mu\text{m}$, $\alpha_B = 3 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 的典型情况, 有 $I_{BE} \approx I_{BC}$, I_{BE} 在 I_B 中占有不容忽视的地位。此外, 在基区吸收系数 α_B 不变的情况下, 随着基区宽度 W_B 的增大, I_{BE}/I_{BC} 逐渐增大。这是因为基区宽度越大, 到达集电结附近的光子就越少, 因此在集电结形成的 I_{BC} 就越小。在基区宽度 W_B 一定的情况下, I_{BE}/I_{BC} 随 α_B 的增加而增加。这是因为基区吸收系数越大, 在发射结附近吸收的光子就越多, 因而在发射结形成的光生电流 I_{BE} 就越大。因此对于波长较短的人射光来说, 发射结对光生电流 I_B 及异质结光晶体管的性能的影响是十分重要的。

(1) 式实际上为异质结光晶体管“窗口”效应的数学表达式。对于 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 器件来说, 基区的 GaAs 材料限定了光谱响应的长波长限, 而器件的短波长限是可以随着发射区材料 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 中 Al 含量 x 的变化来改变的。 x 的增大, 将使短波长限向波长更短方向移动。这一移动在 $x = 1$ (即 GaAlAs 变为 AlAs) 时达到极限。此时的光谱响应短波长限约在 4200\AA 处。因此必须用其它方法来突破这一限制。

三、器件制作与特性

蓝紫光范围灵敏的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 异质结光晶体管是采用液相外延在 $n^+ \text{-GaAs}$ 衬底上沿 $\langle 100 \rangle$ 晶向生长得到的。其生长工艺同参考文献 [3]。外延后, 双面蒸作 AuGeNi/Au 电极。利用常规光刻工艺, 首先用 $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:3:16$ 的选择性腐蚀液将顶层光敏面处的 GaAs 腐蚀掉, 再用 $\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$ 或沸 HCl 对发射区层的 $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 进行腐蚀。由于液相外延生长在 GaAs 和 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 界面上不可避免会有一个组份渐变层, 而 $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ 选择性腐蚀液对 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 在 $x > 0.4$ 时有很强的腐蚀作用, 对 $x \leq 0.4$ 几乎无腐蚀作用。因此采用此种方法, 能对光敏面处的发射区层材料和部分组份渐变层 ($x > 0.4$) 进行腐蚀, 并在 $x \approx 0.4$ 处自动停止。器件的典型结构如图 2, 其光敏面直径为 $\phi 200 \mu\text{m}$, 结面积为 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ 。

用这种方法制作出的异质结光晶体管的特点是: 在电特性上仍然保留了异质结的高注入特性, 而在光响应上消除了异质结的“窗口”效应, 使其光谱响应范围得到很大扩展。图 3 给出了在 8500\AA 处该器件的直流工作特性。图 4 给出了发射区层光敏面处

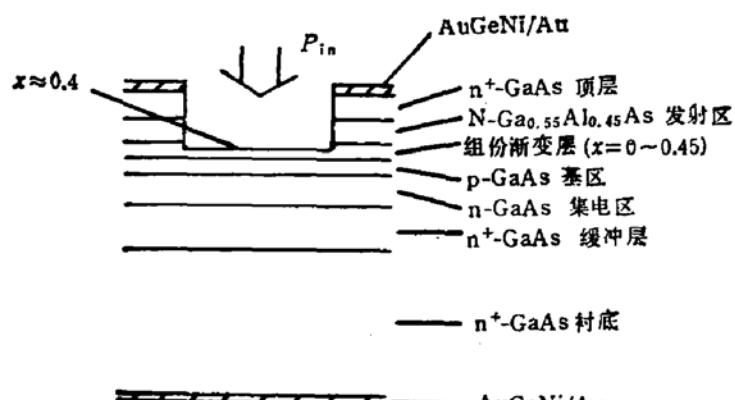


图 2 蓝紫光范围灵敏的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 异质结光晶体管的典型结构

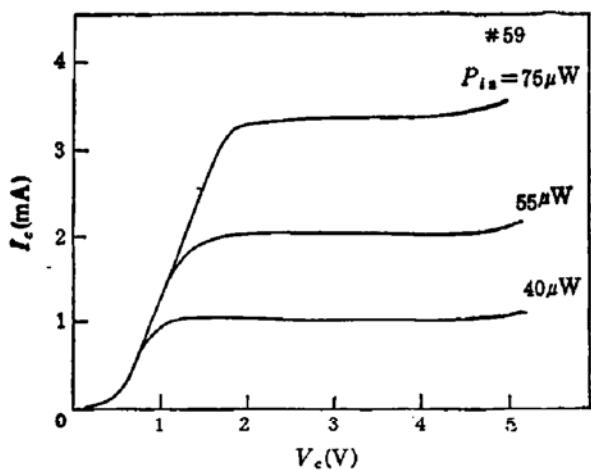


图3 蓝紫光范围灵敏的异质结光晶体管直流光响应特性
(入射光波长: 8500 Å)

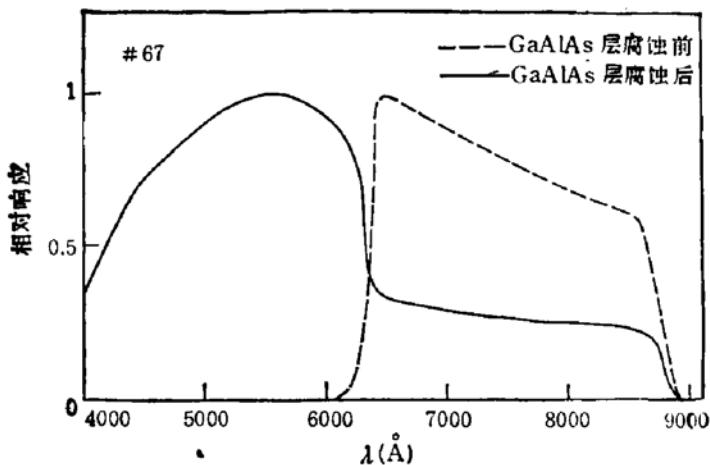


图4 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 异质结光晶体管发射区层腐蚀前后的光谱响应特性.

$\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 腐蚀前后该器件的光谱响应特性, 图中的两条响应曲线分别进行了归一。

从图4可以看出, 在用 HF:H₂O 腐蚀 $\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 材料之前, 由于异质结构的“窗口”效应, 短波长的光谱响应在大约 6300 Å 处陡然截止。而在进行腐蚀之后, 其光谱响应范围向短波长方向大大扩展。器件的整个光谱响应范围为从小于 4000 Å 到 8800 Å, 受测试仪器及条件所限, 短波长方向只测到 4000 Å。峰值响应波长为 5500 Å。从 6500 Å 到 8800 Å 范围的响应曲线形状与腐蚀前基本一致。此外, 腐蚀前后在 8500 Å 处测得的绝对响应度基本上不变, 最大为 $70\mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。这说明选择腐蚀对原响应范围的结果影响不大。从图4中的相对响应可知, 在 4000 Å 处的响应度要优于 $70\mu\text{A}/\mu\text{W}$ 这一指标。

图5同时给出了本文所作的蓝紫光范围灵敏的异质结光晶体管和参考文献[12]中器件的光谱响应。可以看出, 由于参考文献[12]中的器件其腐蚀进入了基区 GaAs 层, 而使得原响应光谱内的响应受到影响。并且, 由于表面复合效应使得能量较高的光子所产生的载流子在表面复合很多, 因而短波长范围的相对光响应较低。而本文所作器件由于

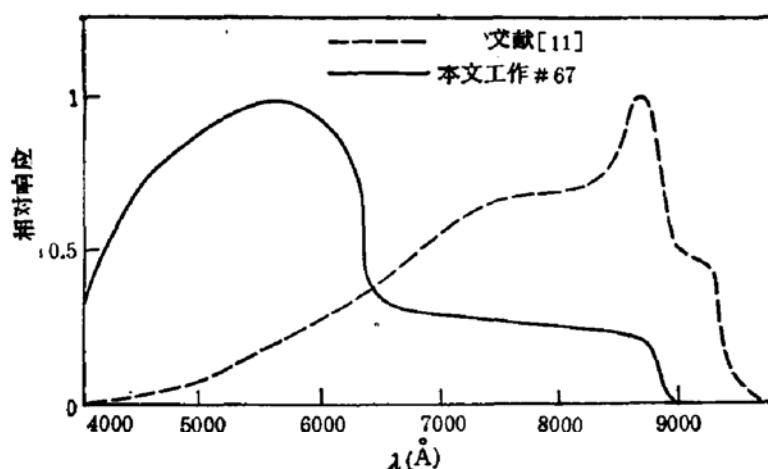


图 5 本文器件与参考文献 [11] 器件光谱响应特性的比较

保留了组份渐变层(对于液相外延,这一渐变层厚度通常为 200—600 Å),使得原响应光谱内的光响应基本不变。此外,由于该组份渐变层部分或全部落在发射结的结区内,因此既使能量较高的短波长光子所激发的电子-空穴对也能在结电场的作用下形成注入基区的光生电流,从而削弱了表面复合对短波长入射光子的影响。在 6300 Å 处光谱响应曲线上的突变反映了该组份渐变层的存在,但是对该突变形成的原因有待进一步研究。

四、结 论

本文采用选择性腐蚀的方法,制出了蓝紫光范围灵敏的 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ 异质结光晶体管,其响应光谱不仅覆盖了整个可见光范围,而且在近紫外亦有一定的响应。其器件的制作工艺简单、方便。若对器件进行优化设计,特别是采用分子束外延等方法人为准确地控制组份渐变层的生长,并采用镀膜技术,则可以大大改善器件的短波长响应及消除响应光谱曲线上的阶跃。

该器件不仅可以用在光纤通讯范围,而且在化学、天文学以及纺织、印刷的自动测色、医疗上的紫外辐射,激光功率监控和特定的光通讯等领域有着广阔的应用前景。将该器件与 $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$ 激光器或可见光激光器单片集成,还可实现紫外到红外或紫外到可见光的转换。

作者在此对周炳琨教授、江剑平副教授、虞丽生副教授给予的热情帮助和指导表示由衷感谢。

参 考 文 献

- [1] M. C. Brain, D. R. Smith, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-19**, 1139(1983).
- [2] M. N. Svilans, N. Grote, H. Beneking, *IEEE Electron Device Lett.*, **EDL-1**, 247(1980).
- [3] 黄小康, 孙宝寅, 孙成城, 薛保兴, 张培荣, *半导体学报*, **7**, 543(1986).
- [4] J. C. Campbell, C. A. Burrus, A. G. Dentai, K. Ogawa, *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 820(1981).
- [5] J. C. Campbell, K. Ogawa, *J. Appl. Phys.*, **53**, 1203(1982).
- [6] T. Mitsuyu, S. Fujita, A. Sasaki, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-31**, 812(1984).
- [7] J. C. Campbell, G. J. Qua, A. G. Dentai, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-30**, 408(1983).

- [8] Huang Xiaokang, Wang Zuning, Sun Baoyin, *Electron. Lett.*, 22, 435(1986).
- [9] A. Sasaki, K. I. Matsuda, Y. Kimura, S. Fujita, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-29, 1382(1982).
- [10] H. Beneking, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-2, 99(1981).
- [11] Dong Jie, Huang Xiaokang, Sun Baoyin, *IEEE J. Quantum Electronics*, QE-23, 1868 (1987).
- [12] 电子通信学会志, 65, 901(1982).
- [13] T. Moriizumi, K. Takahashi, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-19, 152(1972).
- [14] 宋南辛、徐义刚, 晶体管原理, p.97, 国防工业出版社, (1980).

GaAs/Ga_{0.55}Al_{0.45}As Heterojunction Phototransistors with High Sensitivity to Blue-Light

Huang Xiaokang, Sun Baoyin, Sun Chengcheng,
Xue Baoxing and Zhang Peirong

(Departments of Radio Electronics, Tsinghua University, Beijing)

Abstract

Based on a theoretical analysis on the currents in heterojunction phototransistors, $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.55}\text{Al}_{0.45}\text{As}$ HPTs with high sensitivity to blue-light are made using selective eaching technique. The response spectrum ranges from below 4000 Å to 8800 Å. The relative response at 4000 Å is about 30% and the responsibility at it is over 70 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$.

KEY WORDS: Heterojunction, Phototransistor, Photodetector