

# 光电双基区晶体管(PDUBAT)物理模型探讨

郑云光, 张世林, 郭维廉, 李树荣, 沙亚男, 毛陆虹

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘 要: 本文通过分析器件内部电流传输探讨了光电双基区晶体管(PDUBAT)负阻特性产生机理, 首次提出了 PDUBAT 负阻形成的原因是其输出管横向输出电流的反馈作用, 这一看法得到了实验验证.

关键词: 光电双基区晶体管; 间接耦合光电探测器

中图分类号: TN364 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2001)08-1123-03

## Discussion on the Physical Model in Photoelectric Dual Base Transistor

ZHENG Yurr-guang, ZHANG Shi-lin, GUO Wei-lian, LI Shu-rong, SHA Ya-nan, MAO Lu-hong

(College of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Through analyzing the internal current transport in photoelectric dual base transistor (PDUBAT), the physical mechanism for the origin of the negative resistance characteristic in the device has been discussed. In this paper, we propose that the cause for the negative resistance in PDUBAT is coming from the feedback effect of the lateral component of output current of the vertical transistor in PDUBAT for the first time. This viewpoint has been confirmed by experiment.

Key words: photoelectric dual base transistor; indirect coupling photoelectric detector

### 1 引言

1980 年 Chung Yu Wu 和 Ching Yuan Wu 发表了电注入的双基区晶体管(DUBAT)<sup>[1]</sup>, 但并未对其负阻形成原因作深入研究. 1991 年何民才等发表了“间接耦合光电探测结构的光致负阻特性”<sup>[2]</sup>, 其器件结构和 DUBAT 大致相同, 主要差别是把小面积的电注入区变成大面积的光注入区, 我们把它叫做光电双基区晶体管(PDUBAT). 1994 年陈长清、何民才等又发表了该器件的物理模型<sup>[3]</sup>, 他们在这方面作了大量研究, 并把开关时间( $t_r$ ,  $t_f$ )提高到 2ns 左右, 但并没有讲清楚 PDUBAT 负阻形成的物理机制. 2000 年张世林等发表的文章中介绍了硅光电负阻器件具有光信号检测、光控电流开关、光控正弦波振荡、光控调频、光放大和光学双稳态等功能<sup>[4]</sup>. 由于 PDUBAT 具有多种功能和应用前景, 为进一步研究和开发应用这种器件, 本文从器件内部电流传输过程出发对 PDUBAT 负阻形成的原因进行了探讨.

### 2 PDUBAT 工作原理

PDUBAT 是由一个具有大的  $p_1$  区面积的横向  $p_1n_1p_2$  管和一个小的纵向  $n_2p_2n_1$  管组成的复合晶体管, 其中在纵向管的  $n_2, n_1$  区分别引出复合管的发射极和集电极,  $p_1$  区引出复合管的基极(悬浮电极, 只供检测用). 在 PDUBAT 中  $p_1n_1$  结为主要受光结,  $n_2p_2n_1$  管为输出管, 如图 1. 其中  $I_{L1}$  和  $I_{L2}$  为  $p_1n_1$  结和  $p_2n_1$  结的光生电流,  $W_{b1}$  为  $p_1n_1p_2$  管的基区(即耦合

区)宽度,  $W_{b2}$  和  $W'_{b2}$  为输出管的纵向和横向基区宽度,  $I_{E1}$  为工作条件下  $p_1n_1p_2$  管发射区注入电流(这里指的是减去发射结势垒区和基区复合电流之后的电流),  $I_{C2}$  和  $I'_{C2}$  为输出管纵向和横向输出电流,  $I_{C1} \approx I_{b2}$ (纵向管基极电流)为横向  $p_1n_1p_2$  管输出电流. 假定集电结势垒区载流子复合可忽略, 则  $I_{E1} \approx I_{C1}$ . 近似认为  $I'_{C2}$  都在耦合区复合掉, 则有  $I_{E1} = I'_{C2}$ . 当器件表面受一定光强照射时, 并在 G-E 间加反向偏压(接 JF1 晶体管特性图示仪), 就可在图示仪上看到图 2 所示的 PDUBAT 的输出电流电压( $I_{phc} \sim V_{CE}$ )特性. 这一特性曲线可分为上升区、负阻区、谷值区和穿通区四个区域.

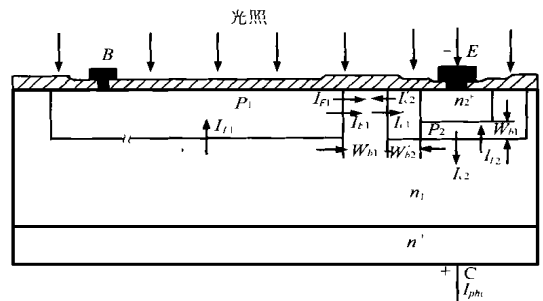


图 1 PDUBAT 结构和电流传输示意图

基极悬浮, 在有一定光强照射器件表面时, 流过  $p_1n_1$  结的电流为:

$$I = I_{L1} - I_S [\exp(qv_L / KT) - 1] \quad (1)$$

$$\text{当 } V_{CE} = 0 \text{ 时, } I = I_{L1} - I_S [\exp(qv_L / KT) - 1] = 0 \quad (2)$$

其中  $I_{L1}$ 、 $V_L$  和  $I_S$  分别是  $p_{1n1}$  结的光生电流、光生电压和反向饱和电流,  $q$ 、 $k$ 、 $T$  为常用物理常数。  $V_{CE} = V_{B2E} - V_{B2C} = 0$  ( $B_2$  即  $P_2$  区) 时,  $p_{1n1}p_2$  管无注入电流,  $I_{E1} = 0$ ,  $I_{C1} \approx I_{b2} = 0$ ,  $I_{phc} = 0$ 。有光照时,  $V_{B2E} = V_{B2C} > 0$ , 表明此时的  $p_{1n1}p_2$  和  $n_2p_2n_1$  管均处于饱和态。

当  $V_{CE}$  从  $V_{CE} = 0$  开始增大, 就会引起  $p_2n_1$  结反向场强增加, 即  $p_2n_1$  结对耦合区空穴的收集能力增加, 导致  $I_{E1}$  增加,  $I_{C1}$  和  $I_{phc}$  增加, 直至  $I_{phc} = I_p$  (峰值电流) 为止。  $I_{phc} = 0$  至  $I_{phc} = I_p$  是 PDUBAT 的上升区。分析表明, PDUBAT 的输出电流为

$$I_{phc}(V_{CE}) = (I_{C1} + I_{L2} + I_{CBO})(\beta_2 + 1) \approx I_{C1}(V_{CE})\beta_2 \quad \beta_2 \gg 1, I_{C1} \gg I_{L2}, I_{CBO} \quad (3)$$

其中  $\beta_2$  和  $I_{CBO}$  是输出管的电流增益和  $p_2n_1$  结的反向饱和电流。初步分析认为, 照射光强一定时, 注入电流  $I_{E1}$  的大小不仅与  $p_1$  区面积和  $V_{CE}$  大小有关, 而且还与输出管横向输出电流  $I_{C2}'$  大小等因素有关。一般  $I_{C2} \gg I_{C2}'$ , 因此  $I_{phc}$  较小时,  $I_{C2}'$  很小, 其影响可忽略; 当  $I_{phc}$  较大时,  $I_{C2}'$  就可能使  $I_{E1}$  增加趋缓, 即导致  $I_{phc}$  上升变慢。当  $V_{CE}$  增加到  $\Delta I_{E1} = \Delta I_{C2}'$  时, 有效的  $I_{E1}$  达到最大值, 这时  $I_{phc} = I_p$ ,  $V_{CE} = V_p$ 。

一般 PDUBAT 的  $I_p < I_{phc}$  (近似于 PDUBAT 作为常规光电晶体管(即  $W_{b1} = 0$ ) 时其临界饱和点的  $I_{phc}$  值)。在  $V_{CE} = V_p$  后,  $V_{CE}$  进一步增加, 由于此时  $\Delta I_{E1} < \Delta I_{C2}'$ , 使有效的  $I_{E1}$  减小, 导致  $I_{phc}$  下降, 直至  $I_{phc} = I_V$  (谷值电流),  $V_{CE} = V_p$  至  $V_{CE} = V_V$  (谷值电压) 为 PDUBAT 的负阻区。

可见,  $I_{C2}'$  的反馈作用(即在耦合区与空穴复合使  $I_{E1}$  或  $I_{C1}$  减小, 引起  $I_{phc}$  下降)是 PDUBAT 产生负阻的原因。

$V_{CE} = V_V$  至  $V_{CE} = V_{\mu}$  (穿通电压) 为 PDUBAT 的谷值区。在谷值区, 器件工作在输出管的放大区, 一般  $I_{phc}$  随  $V_{CE}$  变化比较缓慢。

$V_{CE} \geq V_{\mu}$  为 PDUBAT 的穿通区。  $V_{CE} = V_{\mu}$  时,  $p_2n_1$  结与  $p_{1n1}$  结势垒区穿通,  $p_2n_1$  结的电场可直接抽走  $p_{1n1}$  结附近  $p_1$  区的空穴, 结果  $I_{C1}$  迅速增加, 导致  $I_{phc}$  迅速增加并达到一个饱和值。

### 3 器件特性测量与分析

当 PDUBAT 表面用  $2.8 \times 10^4 \text{ lx}$  光强度照射时, 在 G E 间加直流反向偏置, 在输出回路中即可测出其  $I_{phc}$  和  $V_{CE}$ , 并测量出 B C 间电压  $V_{BC} = V_L$ , 典型的  $I_{phc} \sim V_{CE}$  和  $V_L \sim V_{CE}$  特性的

测量结果如图 2 所示。  $V_L$  是  $p_{1n1}$  结的光生电压或偏置电压(但不是外加电压)。由于上面已分析了  $I_{phc} \sim V_{CE}$  特性, 所以下面只解释  $V_L \sim V_{CE}$  特性。

在上升区,  $V_{CE} = 0$  时, 在光照瞬间, 相当于光电流  $I_{L1}$  给  $p_{1n1}$  结充电, 有电子和空穴流入  $p_{1n1}$  结空间电荷区, 直至  $V_L = V_{L0} = 0.48 \text{ V}$  (开路光生电压)。在上升区,  $V_L$  值下降主要是由于注入电流  $I_{E1}$  的流出, 导致有电子和空穴流出  $p_{1n1}$  结空间电荷区。在负阻区,  $V_L$  值上升主要由于  $I_{C2}$  的流入引起电子在耦合区堆积, 导致有电子和空穴流入  $p_{1n1}$  结空间电荷区, 当  $I_{phc} = I_V$  时,  $V_L$  达到一个峰值点 ( $V_L = 0.21 \text{ V}$ )。在谷值区, 由于  $I_{phc}$  变化较小, 而  $V_{CE}$  上升幅度较大, 这时 C 极电位上升对  $p_{1n1}$  结附近电子抽取作用将占支配地位, 导致有电子和空穴流出  $p_{1n1}$  结空间电荷区, 使  $V_L$  值不断下降, 如图 2。在穿通区,  $V_{CE} \geq V_{\mu}$  时, 主要由于  $I_{C1}$  和  $I_{phc}$  迅速增加, 有电子和空穴流出  $p_{1n1}$  结空间电荷区, 导致  $V_L$  值快速下降。

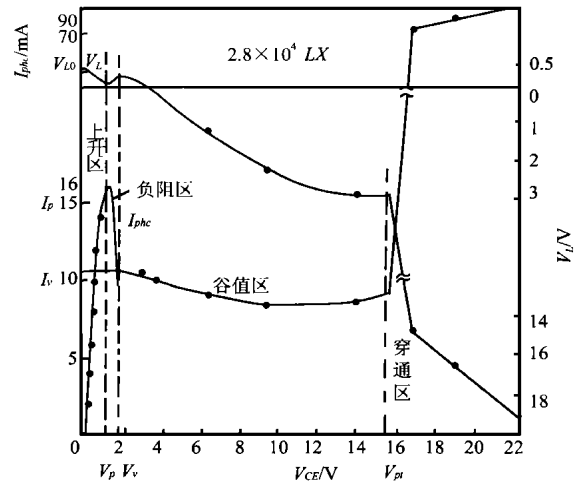


图 2 PDUBAT 的  $I_{phc} \sim V_{CE}$  和  $V_L \sim V_{CE}$  特性曲线(为突出曲线的主要部分, 纵坐标用不等距离数值)

### 4 实验验证

根据上面提出的 PDUBAT 负阻形成是  $I_{C2}$  的反馈作用造成的这种初步看法, 我们推断, 当输出管的  $W_{b2}$  一定时, 其  $W'_{b2}$  的大小将直接影响  $I_{phc}$  一定时  $I_{C2}$  (即反馈作用) 的大小。为验证这一看法, 我们把 PDUBAT 设计成  $W_{b2} = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $W_{b1} = 8 \sim 20 \mu\text{m}$  7 种,  $W'_{b2} = 6 \mu\text{m}$  和  $20 \mu\text{m}$  两种类型, 其它结构参数相同,  $\beta \geq 500$ 。结果, 测量表明,  $W'_{b2} = 6 \mu\text{m}$  的样品管全部都有负

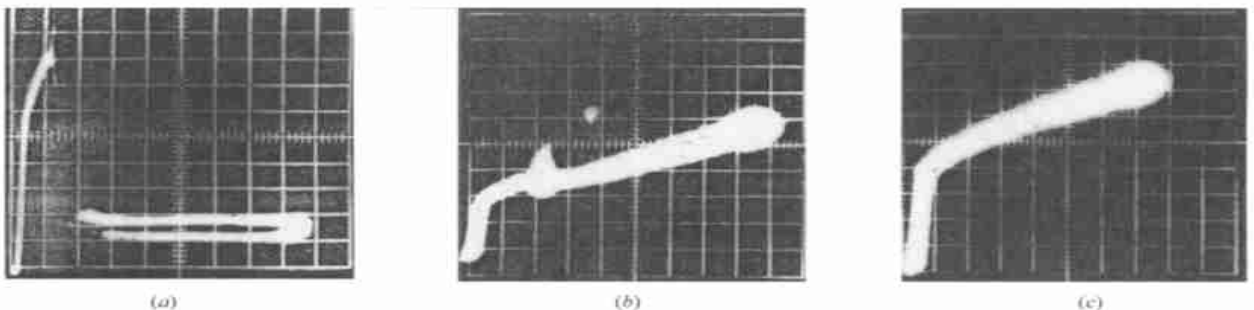


图 3 PDUBAT 不同的负阻特性情况。(纵坐标  $2 \text{ mA}$  / 格, 横坐标  $2 \text{ V}$  / 格), (b), (c) 因图示仪聚焦不好, 故曲线很粗。

阻特性, 而  $W_{b2} = 20\mu\text{m}$  的样品管全部都不出现负阻特性. 另一种结构是耦合区边界较长, 但输出管发射区由几个小方块图形组成(即发射区的横向周长较小, 只相当于耦合区边界长度的二十分之一),  $W_{b2} = 0.6\mu\text{m}$ ,  $W_{b1} = 6 \sim 10\mu\text{m}$ ,  $W'_{b2} = 2\mu\text{m}$ ,  $\rho_C = 10\Omega\text{cm}$ . 结果其样品管测试表明, 虽然也都有负阻特性, 但它一般都出现在输出管的放大区(即  $I_p \geq I_{phc}$ ), 而且  $I_V$  值都相当大(这说明器件的  $I_{C2}$  相对较小). 上面的实验结果验证了上述关于 PDUBAT 负阻形成原因的看法. 也就是说 PDUBAT 的  $I_{C2}$ (反馈电流) 相对较大时, 其负阻特性较好( $I_p < I_{phc}$ ,  $I_p/I_V$  较大), 如图 3(a);  $I_{C2}$  相对较小时, 其负阻特性较差( $I_p \geq I_{phc}$ ,  $I_p/I_V$  较小), 如图 3(b);  $I_{C2}$  相对很小时, 器件就没有负阻特性, 如图 3(c).

## 5 结论

(1) 首次提出了 PDUBAT 负阻形成的原因是其输出管横向输出电流的反馈作用, 这一看法得到了实验验证. 利用这种物理模型较好地解释了 PDUBAT 的  $I_{phc} \sim V_{CE}$  和  $V_L \sim V_{CE}$  特性曲线在四个区域中的变化.

(2) PDUBAT 主要受光结  $p_1n_1$  结的光生电压(或叫偏置电压)  $V_L$  的产生及其变化是由于光生电流  $I_{L1}$ 、注入电流  $I_{E1}$ 、反馈电流  $I_{C2}$  以及集电极电位  $V_C$  变化导致载流子流入或流出  $p_1n_1$  结造成的. 当电流变化较大而  $V_{CE}$  变化较小时, 电流的流进或流出作用占主导地位; 当电流变化较小而  $V_C$  变化较大时, 则  $V_C$  变化的作用占主导地位; 若电流和  $V_C$  变化都较大时, 则可能导致  $V_L$  值随  $V_{CE}$  变化较小.

PDUBAT 的等效电路和相关器件模拟工作有待进一步研究.

## 参考文献:

- [1] Chung Yu Wu, Ching-Yuan Wu. Theoretical and experimental characterization of The Dual Base Transistor( DUBAT) [J]. Solid State Electronics, 1980, 23: 1113- 1121.
- [2] 何民才, 钟哲, 陈丙若, 等. 间接耦合光电探测结构的光致负阻特性 [J]. 半导体学报, 1991, 12(10): 637- 640.
- [3] 陈长清, 何民才, 辛火平, 等. 间接耦合光电探测结构光致负阻效应的物理模型 [J]. 武汉大学学报, 1994, (3): 55- 59.
- [4] 张世林, 郭维廉, 沙亚男, 等. 硅光电负阻器件的光电功能 [J]. 半导体技术, 2000, 25(5): 17- 21.

## 作者简介:



郑云光 男, 1935 年 12 月 11 日生于广东兴宇. 1961 年毕业于天津大学电子工程系, 现任天津大学电子信息工程学院教授, 长期从事微电子技术方面教学和科研工作. 研究兴趣包括: 大、中功率高压器件, 半导体表面钝化, 多晶硅发射极晶体管, 低温晶体管, 三端负阻和光电负阻器件等.



张世林 男, 1953 年 11 月 13 日出生于大连, 1983 年天津大学微电子技术系硕士研究生毕业, 现为天津大学电子信息工程学院副研究员. 主要从事半导体光发射和光接收器件研究.