

光电双基区晶体管(PDUBAT)的器件模型

张生才,郑云光,郭 辉,李树荣,张世林,郭维廉,胡泽军,夏克军

(天津大学电子信息工程学院,天津 300072)

摘 要: 本文在考虑了晶体管的小注入效应和大注入效应以及基区宽变效应等因素后,首次用近似和简化的数学表示式和相应的等效电路,描述了光电双基区晶体管(PDUBAT)负阻形成的机理并使负阻区和谷值区的理论计算和实验结果一致性很好.

关键词: 光电双基区晶体管; 反馈电流; 瞬态电流

中图分类号: TN405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 05-0790-03

A Device Model of Photoelectric Dual Base Transistor

ZHANG Sheng-cai, ZHENG Yun-guang, GUO Hui, LI Shu-rong, ZHANG Shi-lin, GUO Wei-lian, HU Ze-jun, XIA Ke-jun

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

Abstract: By adopting the approximate and simplified mathematical expressions and the relative equivalent circuit for the first time in consideration of the low injection effect, the high injection effect and the early effect etc. of the transistor, the mechanism for the origin of the negative resistance in photoelectric dual base transistor (PDUBAT) has been described. The theoretical calculation is well consistent with experimental results in the negative resistance region and the valley region.

Key words: photoelectric dual base transistor; feedback current; transient current

1 引言

由于电注入的双基区晶体管(DUBAT)^[1]具有一定的开发应用价值^[2],光电双基区晶体管(PDUBAT)又具有光信号检测、光控电流开关、光控脉冲振荡、光控调频和光学双稳态等多种功能^[3],亦有较好的开发应用前景,所以有必要对该器件的工作原理进行深入的研究.本文是在文献[4]提出PDUBAT的一种物理模型的基础上,用近似和简化的数学表示式以及相应的等效电路来描述PDUBAT负阻形成的机理.

2 PDUBAT工作原理和等效电路

PDUBAT是一个横向 $p_1n_1p_2$ 和一个纵向 $n_2p_2n_1$ 管组成的复合晶体管, p_1 区为复合管的基极B(悬浮电极), n_2 和 n_1 区

分别为复合管的发射极E和集电极C.大面积的 p_1n_1 结为主要受光结, $n_2p_2n_1$ 管是小面积的输出管.PDUBAT的器件结构和等效电路如图1.

其中 I_{L1} 和 I_{L2} 分别为 p_1n_1 和 p_2n_1 结在一定光强照射下可能提供的最大的光电流, $I_{L1} \gg I_{L2}$, W_{b1} 为 $p_1n_1p_2$ 管基区(也叫耦合区)宽度, W_{b2} 和 W_{b2} 为 $n_2p_2n_1$ 管纵向和横向基区宽度, $W_{b2} \gg W_{b2}$, I_{CBO} 为 p_2n_1 结反向饱和电流, I_{C1} 和 I_{C2} 分别为 $n_2p_2n_1$ 管纵向和横向瞬态输出电流, h_{FE} 和 I_{phc} 分别为输出管直流电流增益和有效的输出电流. $(I_{E1} + I_{E1})$ 为注入耦合区(减去了其发射结势垒复合和基区表面复合电流后)的空穴电流,它是 V_{CE} 的函数. $I_{E1} = I_{C2}$ 为耦合区的复合电流,忽略集电势垒区复合,则 $I_{b2} = I_{C1} = (I_{E1} + I_{E1}) - I_{C2}$.文献[4]认为反馈电流 I_{C2} 在耦合区的复合作用是导致PDUBAT负阻形成的原因.因此PDUBAT的有效输出电流 I_{phc} 应为

$$I_{phc} = (h_{FE} + 1) [I_{C1} + I_{L2} + I_{CBO}] \\ h_{FE} [I_{E1} + I_{E1} - I_{C2}], \\ (I_{E1} + I_{E1}) \gg I_{L2}, I_{CBO}, h_{FE} \gg 1 \quad (1)$$

由于 V_{CE} 变化首先引起 $(I_{E1} + I_{E1})$ 变化,然后 $(I_{E1} + I_{E1})$ 经过耦合区和集电势垒区传输,到达输出管基区后才会引起 I_{C1} 和 I_{C2} 的变化.相对于器件外部的有效输出电流 I_{phc} 而言,这里把器件内部随 V_{CE} 变化的电流 I_{C1} 和 $(I_{E1} + I_{E1})$ 叫瞬态电流.假设 I_c 是由瞬态光注入电流 $(I_{E1} + I_{E1})$ 产生的

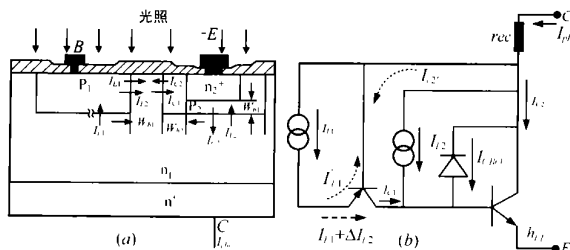


图1 (a) PDUBAT结构; (b) 等效电路

收稿日期:2002-06-07;修回日期:2002-12-20

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(No. 983601411)

PDUBAT 的瞬态输出电流, $I_c = I_{C2} + I_{C2}$, 因此

$$(I_{E1} + I_{E1}) = \frac{I_c}{h_{FE}} \quad (2)$$

h_{FE} 随 I_c 的变化受输出管的小注入效应和大注入效应影响, 这种变化可用某种抛物拱形曲线来近似, 如

$$h_{FE} = \frac{h}{a} \left(2I_c - \frac{I_c^2}{a} \right) + b \quad (3)$$

根据实际情况, 取常数 $h = 500$, $a = 200$, $b = 100$, 这样可算出如表 1 的数据 ($h_{FE \max} = 600$)

表 1 h_{FE} 随 I_c 变化

I_c (mA)	h_{FE}	$h_{FE}/h_{FE \max}$	I_c (mA)	h_{FE}	$h_{FE}/h_{FE \max}$
1	149	0.248	14	555	0.925
2	195	0.325	16	580	0.967
4	280	0.467	18	595	0.992
6	355	0.592	20	600	1
8	420	0.7	21	599	0.998
10	475	0.792	22	595	0.992
12	520	0.867

由于 $(I_{E1} + I_{E1}) = f(V_{CE})$, 它和照射光强度、 p_1n_1 结面积、 V_{CE} 值等有关, 它传输到纵向管的基区后, 引起纵向管基区电位和 V_{be} 变化, 从而引起 I_c 变化, 这一过程比较复杂。由于 W_{b2} 值过大的 PDUBAT⁽⁴⁾ 的输出特性和单个 npn 管的输出特性类似, 从简化问题考虑, 这里做了两个假设: (1) 认为光注入的作用可以用纵向管发射结的固定偏压 V_{be} 来近似; (2) 用均匀基区 npn 管集电极电流 I_c 的表示式来近似缓变基区管的 I_c 。这样并不会影响对 PDUBAT 负阻形成机理的描述。于是有 PDUBAT 瞬态输出电流 I_c 的表示式^[5]

$$I_c = A \left\{ \frac{qD_{nb}n_{nb}}{L_{nb}} \operatorname{csch} \left(\frac{W_b}{L_{nb}} \right) \left(e^{qV_{be}/KT} - 1 \right) - \left[\frac{qD_{nb}n_{nb}}{L_{nb}} \operatorname{csch} \left(\frac{W_b}{L_{nb}} \right) + \frac{qD_{pc}p_{pc}}{L_{pc}} \right] \left(e^{qV_{be}/KT} - 1 \right) \right\} \quad (4)$$

其中 A 为 n_2p_2 结面积, q 为电子电荷, D_{nb} 、 n_{pb} 、 L_{nb} 分别为基区少子扩散系数、少子浓度和少子扩散长度, W_b 为基区宽度, D_{pc} 、 L_{pc} 、 p_{pc} 分别为集电区少子扩散系数、少子扩散长度和少子浓度, $(KT)/q$ 为热电压 (300K), $W_b \ll L_{nb}$, $W_c \ll L_{pc}$, 考虑电流传输的实际影响作用, 一般在表示式中可近似用 W_b 代替

L_{nb} , 用 W_c (高阻集电区厚度) 代替 L_{pc} ; $n_{pb} = \frac{n_i^2}{N_b}$, $p_{pc} = \frac{n_i^2}{N_c}$; 取一级或二级近似 $\operatorname{csch} \left(\frac{W_b}{L_{nb}} \right) \approx \frac{L_{nb}}{W_b}$, $\operatorname{cth} \left(\frac{W_b}{L_{nb}} \right) \approx \frac{L_{nb}}{W_b}$; $e^{qV_{be}/KT} \gg 1$; $V_{be} > 0$ 时, $e^{qV_{be}/KT} \gg 1$; $V_{be} < 0$ 时, 包含 $e^{qV_{be}/KT}$ 的项可忽略, 因此式 (4) 可简化为

$$I_c = A \left\{ \frac{qD_{nb}}{N_b} \frac{n_i^2}{W_b} e^{qV_{be}/KT} - \left[\frac{qD_{nb}}{N_b} \frac{n_i^2}{W_b} + \frac{qD_{pc}}{N_c} \frac{n_i^2}{W_c} \right] e^{qV_{be}/KT} \right\} \quad (5)$$

将实际器件结构参数代入可算出: $D_{nb} = 29 \text{ cm}^2/\text{s}$, 硅的本征载流子浓度 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $N_b = 5.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $W_b =$

$0.6 \times 10^{-4} \text{ cm}$, $W_c = 15 \times 10^{-4} \text{ cm}$, $N_c = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $D_{pc} = 12.2 \text{ cm}^2/\text{s}$, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑}$, $L_{nb} = 100 \mu\text{m}$, $KT/q = 0.0259 \text{ V}$, $A = 2.4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 。代入后,

$$\frac{qD_{nb}n_i^2}{N_bW_b} \gg \frac{qD_{pc}n_i^2}{N_cW_c},$$

式 (5) 可简化为

$$I_c = A \frac{qD_{nb}n_i^2}{N_bW_b} \left(e^{qV_{be}/KT} - e^{qV_{bc}/KT} \right) = 7.88 \times 10^{-14} \left(e^{qV_{be}/KT} - e^{qV_{bc}/KT} \right) \quad (6)$$

考虑基区宽变效应和 $h_{FE}(I_c)$ 的非线性后

$$I_c = 7.88 \times 10^{-14} \frac{h_{FE}}{h_{FE \max}} \left(1 - \frac{V_{bc}}{V_A} \right) \left(e^{qV_{be}/KT} - e^{qV_{bc}/KT} \right) \quad (7)$$

V_A 为厄利电压, 进一步简化后得

$$I_c = 7.88 \times 10^{-14} \frac{h_{FE}}{h_{FE \max}} \left(e^{qV_{be}/KT} - e^{qV_{bc}/KT} \right), V_{bc} = 0 \text{ V} \quad (8)$$

$$I_c = 7.88 \times 10^{-14} \frac{h_{FE}}{h_{FE \max}} \left(1 - \frac{V_{bc}}{V_A} \right) e^{qV_{be}/KT}, V_{bc} < 0 \text{ V} \quad (9)$$

$$V_{CE} = V_{be} - V_{bc} + I_c(r_e + r_c) = V_{be} - V_{bc} + I_c r_{ec} \quad (10)$$

实验结果如图 2。

从图 2(a) 可知峰值电流 $I_p = 16.4 \text{ mA}$, 峰值电压 $V_p = 2.4 \text{ V}$, 谷值电流 $I_v = 3.3 \text{ mA}$, 谷值电压 $V_v = 3.2 \text{ V}$ 。假设与 I_p 对应的 $I_c = 20 \text{ mA}$, 与 I_v 对应的 $I_c = 22 \text{ mA}$ (这种假设不会影响理论计算结果), 根据上述假设, PDUBAT 的谷值点应与式 (8) 中的 $V_{bc} = 0 \text{ V}$ 相对应, 即 $V_{bc} = 0 \text{ V}$,

$$I_c = 7.88 \times 10^{-14} \cdot$$

$$\frac{h_{FE}}{h_{FE \max}} \cdot e^{qV_{be}/KT} = 22 \text{ mA}$$

于是可得 $V_{be} = 0.6828 \text{ V}$ 。

假设 $I_c > 22 \text{ mA}$ 后, I_c 的变化仅由基区宽变效应引起, 因此

$$(I_{E1} + I_{E1}) = [I_{E1} + I_{E1}]_{I_c = 22 \text{ mA}}, I_c > 22 \text{ mA} \quad (11)$$

同时, 为简化问题, 便于计算, 假设

$$h_{FE} = h_{FE}(I_c = 22 \text{ mA}), I_c > 22 \text{ mA} \quad (12)$$

反馈电流 I_{C2} 的大小和输出管的 $W_{b2}/W_{b2}/[A_{e2}(\text{侧面})]/$

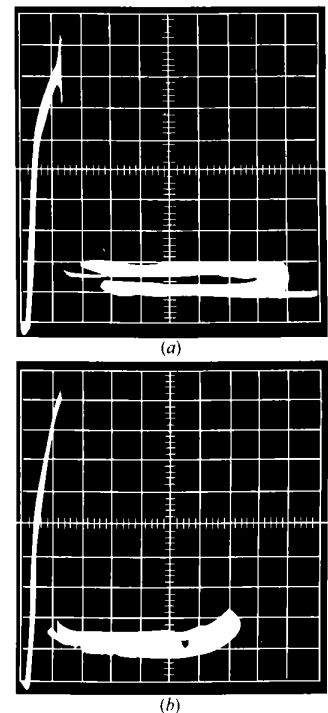


图 2 PDUBAT 实验结果 (a) 纵坐标 2mA/格, 横坐标 2V/格; (b) 纵坐标 2mA/格, 横坐标 5V/格

$[A_{e2}(\text{底面})]$ 、 h_{FE} 的小注入效应、大注入效应以及输出管的基区宽变效应等有关,它反映了 I_{C2} 和 I_{C1} 两者之间的分配关系。 h_{FE} 的小注入效应使 $I_{C2}(I_C)$ 减小, h_{FE} 的大注入效应(先在纵向基区发生)使 $I_{C2}(I_C)$ 较快上升,输出管的基区宽变效应(也先在纵向基区发生)又使 $I_{C2}(I_C)$ 上升变缓。考虑上述效应的影响后, $I_{C2}(I_C)$ 可表示为

$$I_{C2}(I_C) = 3 \times 10^{-4} \cdot I_C \cdot \frac{A}{h_{FE\max}}, I_C \leq 22\text{mA} \quad (13)$$

$$A = h_{FE} I_C, I_C \leq 22\text{mA} \quad (14)$$

$$\frac{A}{h_{FE\max}} = \frac{1}{B} [B + (I_C - 20\text{mA})], 22\text{mA} < I_C \leq 22\text{mA} \quad (15)$$

$$I_{C2} = I_{C2}(I_C = 22\text{mA}) \cdot e^{(I_C - 22\text{mA})/C}, I_C > 22\text{mA} \quad (16)$$

其中 $B = 0.532$, $C = 950$, $r_{ec} = 115$, $V_A = 20\text{V}$ 。

利用式(1)、(2)、(3)和式(8)~(16)即可计算出 PDUBAT 在上升区、负阻区和谷值区的 $I_{phc} \sim V_{CE}$ 曲线。

对应不同的光注入条件, PDUBAT 有不同的 $I_{phc} \sim V_{CE}$ 曲线。如需计算不同的 $I_{phc} \sim V_{CE}$ 曲线,可根据本文中的机理对模型公式作适当修改。

3 理论计算结果及分析

利用上述表示式,计算结果如图 3。

对比图 2(a)和图 3 可知,理论计算的上升区曲线和实验结果偏离大些,主要是因为采用了输出管发射结固定偏压 V_{be} 来近似光注入作用,实际 PDUBAT 的 V_{be} 值是不固定的,而大致是在 $0.6 \sim 0.78\text{V}$ 之间变化。但采用上述近似假设来描述 PDUBAT 负阻产生机理还是可行的。由于考虑了晶

体管的小注入效应、大注入效应和基区宽变效应的影响,所以在负阻区和谷值区,理论计算和实验结果符合得很好。

如果在谷值区出现 I_{phc} 随 V_{CE} 增加而上升的情况,则可能是因为集电结势垒区离 p_1n_1 结较近,其电场可直接抽取 p_1n_1 结势垒区及其附近少子扩散区中的空穴。当这种空穴漂移电流(它在耦合区的复合可忽略)在光注入电流中占比例较大时,就会使在谷值区的 $(I_{E1} + I_{E2})$ 和 I_{phc} 随 V_{CE} 增加而上升,如图 2(b)中谷值区的后面一段。当 $V_{CE} = V_{pt}(p_1n_1p_2 \text{ 管基区穿通电压})$ 时 I_{phc} 迅速增加。

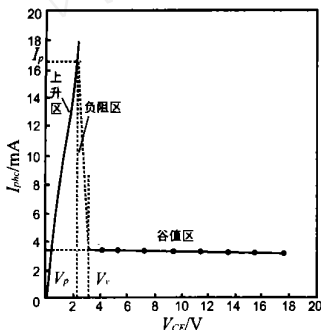


图 3 PDUBAT 理论计算结果

4 结论

本文为了便于描述 PDUBAT 负阻形成的机理,采用输出管发射结固定偏压 V_{be} 来近似光注入的作用,并用均匀基区晶体管集电结电流 I_c 的表示式来近似缓变基区管的 I_c ,同时考虑了晶体管的小注入效应、大注入效应和基区宽变效应的影响,首次写出了 PDUBAT 瞬态输出电流 I_c 、瞬态光注入电流 $(I_{E1} + I_{E2})$ 、瞬态反馈电流 I_{C2} 和有效的输出电流 I_{phc} 的数学表示式以及相应的等效电路,这些近似和简化处理方法虽然使理论计算的上升区曲线和实验结果有一定偏离,但用它来描述 PDUBAT 负阻形成的机理是成功的,而且在负阻区和谷值区中理论计算和实验结果符合很好。本文结果仅为初步研究的 PDUBAT 的一种模型,更为完善的模型有待进一步研究。

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] 郭维廉, 郑云光, 侯增一, 等. 功率型双基区晶体管(DUBAT)的研制及其初步应用[J]. 半导体技术, 1994, (1): 9 - 12.
- [3] 张世林, 郭维廉, 沙亚男, 等. 硅光电电阻器件的光电功能[J]. 半导体技术, 2000, 25(5): 17 - 21.
- [4] 郑云光, 张世林, 郭维廉, 等. 光电双基区晶体管(PDUBAT)物理模型探讨[J]. 电子学报, 2001, 29(8): 1123 - 1125.
- [5] 浙江大学半导体器件教研室. 晶体管原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980: 87 - 93.

作者简介:



张生才 男, 1945 年出生于河北省深州市, 1970 年毕业于天津大学电子工程系, 1993 年任天津大学电子信息学院副教授, 长期从事微电子技术方面教学和科研工作, 主要科研方向为: VLSI 设计, 光电器件及半导体传感器等。



郑云光 男, 1935 年出生于广东兴宁, 1961 年毕业于天津大学电子工程系, 现任天津大学电子信息学院教授, 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。