

光电双基区晶体管的工作机理

夏克军 李树荣 李丹 郑云光 毛陆虹 郭维廉

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 通过分析光电双基区晶体管(PDUBAT)内部载流子的二维传输过程, 获得它的物理模型, 得出 PDUBAT 是一个新型光控振荡器的结论, 并依此模型给出了它的等效电路, 利用 SPICE 程序得到的一系列计算结果与实验结果是一致的。结合这些计算结果, 完整解释了 PDUBAT 产生耦合、负阻、振荡的物理过程。给出了起振电压(输出电流峰值电压)、振荡频率随光强变化的关系式, 定性解释了相应的实验结果。

关键词: 振荡器; 负阻; 光电器件; 模拟

PACC: 7220 **EEACC:** 2560B; 2560E; 4250; 7230

中图分类号: TN32 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)08-0850-06

1 引言

光电双基区晶体管(PDUBAT)以前被认为是光电负阻器件。1991年何民才等发表了“间接耦合光电探测结构(我们称它为光电双基区晶体管)的光致负阻特性”^[1], 对其负阻特性作了大量的实验, 发现响应速度具有奇异性^[2]: 在电流峰值处开关时间最小(可达到 2ns), 从而认为 PDUBAT 是一种高速、高信噪比的光敏器件。2000年张世林等发表文章^[3]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, 预示着 PDUBAT 具有多种功能和应用前景。为了弄清形成负阻特性的机理, 人们展开了深入的研究, 但是至今关于它产生负阻的机理还不清楚。早在 1994 年陈长清、何民才等提出了它的物理模型^[4], 指出它可工作于 PNPN 模式并且提到耦合区体电阻, 大致解释了器件电流随电压从 0V 到峰值变化过程和阈值光强, 然而没有给出形成负阻的物理过程, 也未提到器件测量时有振荡现象。2000 年沙亚男等^[5,6]指出这个负阻器件无需接外加电感即可发生振荡, 进一步加深了人们对它的认识。

2001 年郑云光等对它的物理模型作了进一步的探讨^[7], 提出输出管的横向输出电流的反馈作用与负阻的形成有关。由于对二维输运的体效应运用不彻底, 以上的所有工作都未能获得 PDUBAT 完整的物理过程, 不能从给出的等效电路中得到与实际相似的结果。本文在前人诸多研究工作的基础上, 通过分析 PDUBAT 内部载流子二维传输过程, 对其有了新的认识, 即 PDUBAT 首先是新型的振荡器(尽管 PDUBAT 的物理含义改变了, 本文仍沿用这个名称)。

2 PDUBAT 的物理模型

PDUBAT 的器件剖面结构如图 1 所示。它是由一个具有用于感光的大面积 p 区和一个小面积的用于输出的 NPN 管组成的复合器件。p 区和 NPN 管之间的相邻部分称为耦合区。大面积 p 区靠近耦合区一侧的 PN 结记为 D_L, 除此以外的 pn 结记为 D_B。NPN 管靠近耦合区的横向部分记为 NPN_L, 除此以外的部分记为 NPN_B。大面积感光结和衬底之间的体电阻记为 R_{bp}, 耦合区与衬底之间的纵向体电阻记为 R_{bc}, 在输出电流主路径上的 NPN_B 的集电极电

夏克军 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 从事半导体新型材料和器件物理研究。

李树荣 男, 1946 年出生, 教授, 从事半导体新型器件和 VLSI 研究。

李丹 女, 1980 年出生, 硕士研究生, 从事半导体新型器件和 VLSI 研究。

2002-08-30 收到, 2002-10-28 定稿

©2003 中国电子学会

阻记为 R_{bo} . 整个衬底(包括 p 区下的衬底)构成 PDUBAT 的集电极, NPN 输出管的发射极是 PDUBAT 的发射极.

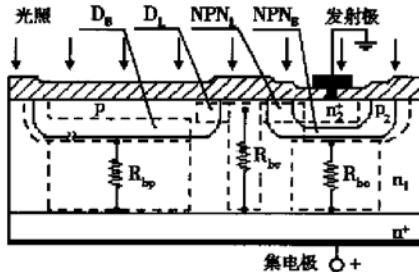


图 1 PDUBAT 结构剖面图
Fig. 1 Profile of PDUBAT structure

文献[5]的图 3 给出了典型的 PDUBAT 逐点法测得的电流-电压输出曲线. 它在两个 p 区穿通之前的工作曲线(参考本文图 3 曲线 ABCDE 和图 5(c)图形的近似平均值线)可分为上升区(AB 段)和振荡区(BE 段). 振荡区的 BD 段为以前所称的负阻区, DE 段为谷值区^[7]. 下文通过对 PDUBAT 上升区形成过程的认识, 提出了具体的物理模型.

当光照射 PDUBAT 管子后, 大面积感光结产生的光生空穴有一小部分注入到耦合区并被 NPN 输出管的集电结收集^[8], 这部分空穴流和 NPN 管自身的光生电流一起构成它的基极电流. 当 PDUBAT 的外加电压 V_{ce} 很小时, NPN 管处于初始饱和状态, 这种情况下, NPN_L 管的横向输出电子流不足以使 PNP 管提供足够基极电流而使它们构成正反馈, 这时候大面积感光结产生的光生电流 I_L 使 D_B 正偏. 这种 I_L 电流中的大部分用于 D_B 的状态本文称为未耦合状态.

随着 V_{ce} 的增加, NPN 管将不断退出饱和而使输出电流迅速增大. NPN 管流到耦合区的电子也迅速增多, 这其中的一部分在耦合区与空穴复合或注入到 PNP 管发射区形成 PNP 管的基极电流, 剩下的部分电子在衬底至耦合区电场的作用下漂移到衬底形成 PDUBAT 集电极电流的一部分, 这股电流通过耦合区体电阻 R_{bc} 形成的电压降, 使得 D_B 、 D_L 偏置不相同. 随 V_{ce} 增加 D_L 正偏逐渐增大, 因此通过 D_L 向耦合区注入的空穴越来越多, 由于大面积感光结产生的光生空穴是近似一定的, 所以通过 D_B 的空穴越来越少, D_B 正偏减少. 于是 PNP 管电流越来越大, 这将使 NPN 管输出电流进一步增大, 这是个

正反馈过程. 在一固定 V_{ce} 电压下伴随着正反馈过程, 耦合区体电阻 R_{bc} 上的电压降增加. 这说明, 大面积 p 区靠近耦合区一侧的 pn 结和它的其余部分的 pn 结应该分开, 即 D_L 、 D_B . 在 V_{ce} 不大的时候, R_{bc} 上的压降就会使 NPN_L 管饱和程度加强, 这抑制了正反馈导致的电流增长. 这种 PNP 管和 NPN 管通过耦合区纵向体电阻形成正反馈而使光生电流 I_L 的大部分提供了 NPN 管的状态本文称为耦合态. 该状态就是文献[4]所谓的类 PNPN 工作模式, 它与普通晶闸管的区别就在于耦合区通过纵向体电阻接在了输出集电极上. 能够使 PDUBAT 进入耦合态的临界光强就是阈值光强.

由于 NPN 输出管的基极电流(空穴电流)是从靠近耦合区的那一侧面注入的, 这股空穴电流要经过一个比较大的基区横向电阻才能流到它的底部发射结. 这说明 NPN 输出管靠近耦合区的部分 NPN_L 和其余部分 NPN_B 是不一样的, 它们对基极电流的获得是有区别的. 在 PDUBAT 上升区这种区别造成的两管电流的差异不是很大, 但在它振荡起来后变得格外明显: 因为这时候基极空穴电流是脉冲形式的, 它经过基区大电阻给 NPN_B 的发射结结电容(相对 NPN_L 较大)充电, 导致 NPN_L 平均基极电流比 NPN_B 要大许多, 这类似于晶体管的交流集边效应. 因此, NPN 输出管在这里被分成 NPN_L 和 NPN_B 两部分.

综上所述, PDUBAT 内部的物理要素是: (1) D_B 、 D_L 、 NPN_L 、 NPN_B 的区分; (2) D_L 、 NPN_L 、 R_{bc} 构成的正反馈; (3) 由于大面积感光 p 区是悬浮的, 它的 pn 结大电容对产生振荡很重要.

3 等效电路及其模拟结果与试验结果对照

基于上面的认识, 可以得到 PDUBAT 如图 2 所示的元件级等效电路, 用于辅助说明 PDUBAT 的工作机理. 它的参数和实际的 PDUBAT 参数没有完全的对应关系, 因而它相应的 SPICE 电路分析程序给出的计算结果与实验结果是定性对应关系. 为方便作如下假设: (1) 大面积感光 p 区的光生电流用恒流源 I_L 近似表示. 恒流源 I_{LNPN} 表示 NPN 管自身的光生电流. (2) C_{pa} 近似表示 p 区的结电容, C_{bNPN} 近似表示 NPN_B 管发射结的结电容. 这些电容元件实际上可以通过设置相应 pn 结的结电容参数而省略.

(3) D_L 就是 PNP 管的发射结. D_B 的反向饱和电流参数应远远大于其他结的此值, 因为区面积很大.

(4) PNP 管的放大倍数很小, 主要因为它的基区宽度较大以及集电极面积较之发射区面积小的缘故. NPN_B 管的面积应大于 NPN_L 管的面积, 输出的电流在未振荡情况下应当是 NPN_B 起主要作用. (5) R_{bc} R_{bp} R_{bo} 均是小电阻, R_{bNPN} 是基区电阻, 千欧姆数量级. 其他元件的意义如前所述.

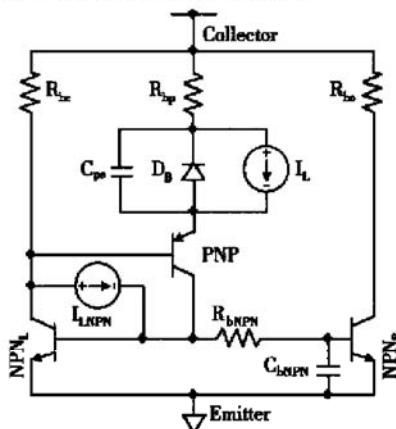


图 2 PDUBAT 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit for PDUBAT

图 3 是 PDUBAT 做 V_{ce} (0~5V) 瞬态分析的输出图形. 图中黑色区域是快速振荡而将曲线连成一片的结果. 图右下方是其中一段处理过(横向放大, 纵向缩小)的振荡脉冲图形. 白色虚线是振荡电流的

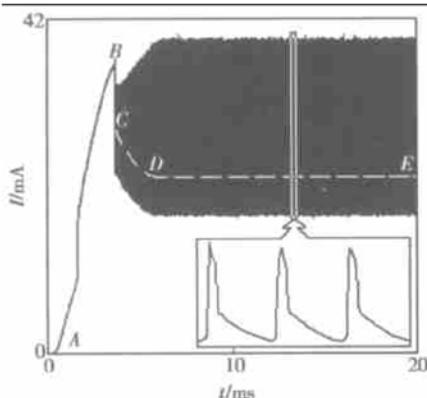


图 3 PDUBAT 输出图

Fig. 3 Output characteristics of PDUBAT

平均值, 它和未振荡时的黑实线一起构成的曲线 ABCDE, 对应于文献[5]给出的 PDUBAT 逐点法测得的输出曲线(以上这些对图形的说明同样适用于后文的类似图形), 通过对照可以看出, 它们是一致的. 在这次模拟过程中设定 NPN_L 和 NPN_B 的面积

比值为 1:20. 图 4(a) 是它的 NPN_B 部分的电流, 非常类似于 PDUBAT 的实验拍摄的照片图 5(a).

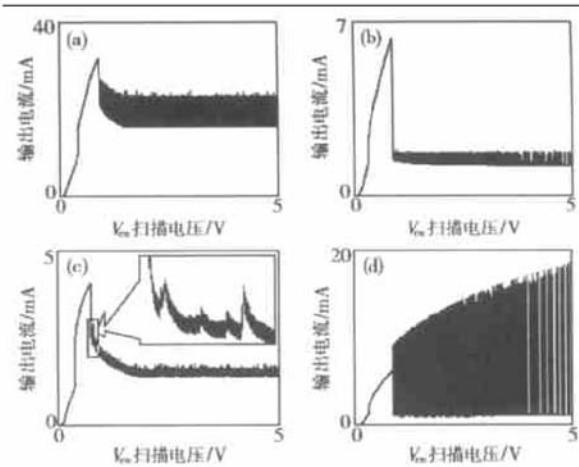


图 4 模拟获得的不同管子的纵向 NPN 管输出电流图

Fig. 4 Simulated output characteristics of vertical NPN transistors for different PDUBATs

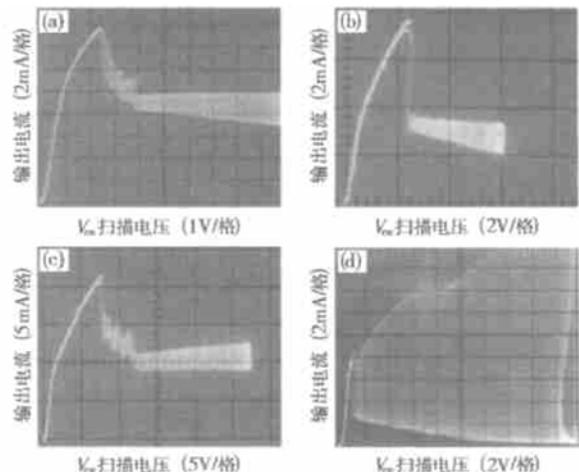


图 5 实验拍摄的不同管子扫描图形

Fig. 5 Experimental results of output characteristics for different PDUBATs

从我们做的管子版图来看, 实际 PDUBAT 管子的输出电流应当主要由 NPN_B 部分的电流决定. 因此图 4 给出不同参数下的 NPN_B 输出电流的各种图形. 其中 (c) 的右上角是电流突降后的一种不稳定的特殊振荡现象的放大图, 它同样存在于图中 (a)、(b)、(d) 的相应部位. 图 5 是实际拍摄的不同管子作 V_{ce} 扫描的照片. 图 4 和图 5 对照起来, 说明本文给出的等效电路能够在一定程度上定性描述实际的器件.

4 结合等效电路模拟结果分段说明 PDUBAT 物理过程

4.1 上升区

如第二节所述,在光强达到阈值光强的条件下,随 V_{ce} 增加 PDUBAT 进入耦合态, NPN_L 管饱和程度加深。在 V_{ce} 不是很大的情况下,光生电流随 V_{ce} 增加提供给 NPN 管的部分逐渐增大,输出电流增大。这时候耦合区体电阻 R_{bc} 上的压降增加,可以抵消 V_{ce} 的增加,使得耦合区电压 V_{ca} 增加很小,从而维持 NPN_L 的饱和状态。但是光强一定,光生空穴电流近似是个定值,这就使得在 V_{ce} 增加一定程度之后, NPN 管流向耦合区的横向电子电流增加速度变慢,所以耦合区纵向体电阻上的压降的增加速度也变慢,从而不能抵消 V_{ce} 的增加。这个后果是, V_{ca} 会随着 V_{ce} 的继续增加得到提升而使 NPN_L 管逐步退出饱和状态, NPN_L 管的有效电流放大倍数(它是 V_{ce} 的函数,记为 $\beta_{NPNL}(V_{ce})$)迅速增大。这个过程导致耦合态变得越来越不稳定: 它使得 NPN 管对基极空穴电流的微小扰动(比如热噪声引起的电流涨落)很敏感,这是因为 PNP 管和 NPN 管通过耦合区体电阻形成正反馈的缘故。这种微小变动就可以引发振荡。如果正反馈倍增因子 $K \beta_{PNP} \beta_{NPNL}(V_{ce}) < 1$ (其中 K 是耦合区电子电流分配系数: 用于与空穴复合和流入 p 区的电子电流占 NPN 管流向耦合区总电子电流的比率,它随 V_{ce} 增加略有增加),那么这种振荡的振幅是有限的。当正反馈倍增因子 > 1 后,振荡发散,但是由于可提供的光生电流有个上限,输出电流即使在这个发散的振荡下也不会比 B 点峰值电流大很多(在上升区光生电流本身就已基本提供给 NPN 管了),但是输出电流可以减小(耦合程度变浅直至进入未耦合状态),一旦电流快速减小,就会进入振荡状态。这样, NPN_B 管的输出电流就会减小,PDUBAT 的输出电流也会减小,从而

$$K \beta_{PNP} \beta_{NPNL}(V_{ce}) = 1 \quad (1)$$

处对应着上升区电流的峰值,相应的 V_{ce} 值就是峰值电压 V_p ,也就是起振电压。

4.2 振荡区

(1) 振荡

PDUBAT 是个实际的振荡器,产生振荡电流,因此串接一个电阻就可以得到振荡电压^[5]。PDU-

BAT 的振荡来源于 PNP、NPN_L 管和耦合区体电阻 R_{bc} 构成的正反馈作用以及大面积感光结的大电容 C_{pa} 延时作用导致的悬浮 p 区电位 V_{pa} 和耦合区电位 V_{ca} 的变化步调不一致。下面具体说明振荡的物理过程。

假设已经由热噪声起振且输出电流处于下降期(上升区末电流突降也属于这种情况), V_{ce} 处于振荡区的某定值。如图 6 的 T_1 时刻,这时候 V_{ca} 上升,由于大面积感光结的大电容 C_{pa} 延时作用, V_{pa} 不能突变,就会使 D_L 正偏减弱而使提供给 NPN 管的空穴电流减小,导致其流向耦合区的电子电流减小,因此 R_{bc} 上的压降减小, V_{ca} 进一步上升。这是个正反馈过程。 V_{pa} 因为光生电流给大面积感光结充电而上升,但它的上升的速度远小于 V_{ca} 的上升速度,所以 V_{ca} 迅速上升并接近于 V_{ce} 值,这对应输出电流的快速下降,但是不会下降到零,因为此时还有 p 区靠注入机制^[8] 提供给 NPN 管的电流和 NPN 管自身的光生空穴电流作 NPN 管的基极电流。随着充电, V_{pa} 继续上升,在这个过程中,光生电流主要用于大面积感光结的结电容充电(损失于 D_B 的光生电流也增大),这使 PDUBAT 处于未耦合状态,它对应于输出电流脉冲的底部。这个过程对应于图 6 的 $T_1 \sim T_2$ 段。由于光强超过阈值光强,所以 V_{pa} 上升到足够程度后又可以使 PNP 和 NPN_L 通过正反馈使 PDUBAT 进入耦合状态,对应着输出电流的上升、 V_{ca} 的迅速下降,如图 6 的 T_2 时刻。

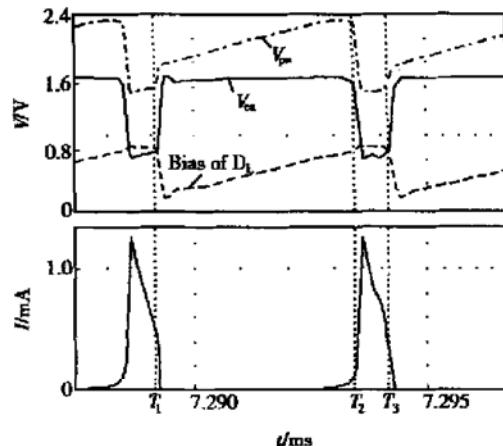


图 6 V_{pa} 、 V_{ca} 、 D_L 电压偏置、NPN 基极电流在振荡中的变化情况

Fig. 6 Related states of V_{pa} , V_{ca} , bias of D_L and base current of NPN transistor during oscillation

同样由于大面积感光结的大电容 C_{pa} 延时作用, V_{pa} 不能突变, 随着 V_{ca} 的下降, V_{pa} 和 V_{ca} 的差值迅速增大至 0.7V 左右而使 D_L 电流迅速增大。开始时 V_{pa} 下降不多, 所以就给 NPN 管提供了很大的放电电流(远大于光生电流), 如图 6 所示的脉冲峰值。由于 D_L 的电压和电流的指数关系, 其偏置到 0.8V 左右后电压增量很小, 所以 V_{pa} 跟随 V_{ca} 迅速下降。但是随着放电 V_{pa} 下降, 放电电流迅速减小至光生电流。这对应于图 6 中 $T_2 \sim T_3$ 之间 D_L 电压较平缓的一段。由于单独靠光生电流 I_L 维持不了 NPN_L 发射结因很大的放电电流而处的偏置状态(放电造成电流过冲), 于是 V_{ca} 上升, 输出电流下降, 对应于图 6 的 T_3 时刻。

以上这两个过程周而复始, 形成 PDUBAT 的振荡过程。

(2) 负阻区

由于上升区末(B 点)发生电流突然下降的时候, NPN_L 管并未完全退出饱和。因此当 PDUBAT 处于耦合态的时候, 随 V_{ce} 增大 NPN_L 的有效电流放大倍数可以继续增加, 直到达到最大值, 这个过程对应于负阻区, 它是连接上升区电流峰值和稳定振荡区谷值电流的过渡区域。 V_{ce} 增加, NPN_L 的有效电流放大倍数增加, 将使得正反馈倍增因子增大, V_{ca} 上升速度的增强, 可以使 D_L 反偏速度加快, 进而使 D_L 反偏程度加强, 使得 PDUBAT 处于耦合态的时间变短, 处于未耦合态时间变长, 所以基极电流占空比变小, NPN_B 管输出电流变小。因此, PDUBAT 的负阻区不是通常意义上的负阻区, 它仅是输出振荡电流的平均值随 V_{ce} 增加而减少的区域, 是 PDUBAT 发生振荡的结果。同时也看出, 在负阻区内振荡尚不稳定, 如果将 PDUBAT 作为光控振荡器使用, 应让它工作于稳定振荡区。

5 振荡频率 f 、起振电压(峰值电压) V_P 和光强 IN_L 的函数关系

假设光生电流和光强近似成线性关系, 即

$$I_L = \eta IN_L \quad (2)$$

其中 η 表示光电转换系数。

(1) $f - IN_L$

PDUBAT 是光控振荡器, 定量研究频率和光强的关系有重要意义。在稳定振荡区内, 输出电流脉冲

由于正反馈程度强而处于脉冲峰值的时间很短, 主要的时间是处于脉冲谷值, 这段时间用于 p 区充电。脉冲周期近似为:

$$T = T_p + C_{pa} \Delta V / I_L \quad (3)$$

其中 T_p 是处于脉冲峰值时间(包括上升下降); C_{pa} 是 p 区平均结电容; ΔV 是需要充电的电压。按照前面讨论, 当 V_{ce} 较大时, T_p 相对可以忽略。所以代入(2)式有:

$$f = 1/T \approx \eta IN_L / (C_{pa} \Delta V) \quad (4)$$

所以振荡频率和光强近似成线性关系, 这解释了文献[5]的实验结果。

(2) $V_P - IN_L$

由于通常使 PDUBAT 发生振荡时 V_{ca} 已经接近于 NPN_L 完全退出饱和时的此值, 所以(1)式成立时确定的耦合区电压 V_{ca} 可以用 NPN_L 管临界饱和电压 V_{sat_th} 近似表示。

$$V_P = \eta IN_L \beta_{NPN_L} (1 - K) R_{bc} + V_{sat_th} \quad (5)$$

其中 K 的定义同(1)式。可以看出峰值电压和光强近似成线性关系。这与文献[1]的实验结果相同。

6 结论

(1) 通过分析内部载流子的二维传输过程, 首次得出 PDUBAT 本身就是个光控振荡器, 所谓负阻不具通常意义, 并从理论上得到振荡频率、起振电压和照射光强的线性关系, 这为 PDUBAT 用于光信号探测提供基本的指导作用。(2) 实际上给出并解释了一种新的振荡结构: 一个具有有限注入的基区当靠近另一个同型基区三极管时, 在适当条件下, 将会发生振荡。这种机制具有理论分析和开发意义。(3) 基于载流子的二维传输过程, 将大面积 pn 结分成横向和纵向两个 pn 结, 得到 PDUBAT 物理模型, 然后用 SPICE 电路模拟来分析器件工作机理, 其有效性得到证实, 这种方法对分析体器件将有借鉴意义。

参考文献

- [1] He Mincai, Zhong Zhe, Chen Bingruo, et al. Characteristics of photonegative resistance in indirect coupling photodetecting structure. Chinese Journal of Semiconductors, 1991, 12(10): 637 (in Chinese) [何民才, 钟哲, 陈丙若, 等. 间接耦合光电探测器结构的光致负阻特性. 半导体学报, 1991, 12(10): 637]
- [2] Chen Changqing, He Mincai, Xin Huoping, et al. Singularity of

- response speed of a indirect coupling photodetecting structure. Journal of Transducer Technology, 1995, 9(3) : 64 (in Chinese) [陈长清, 何民才, 辛火平, 等. 一种间接耦合光电探测器件响应速度的奇异性. 传感技术学报, 1995, 9(3) : 64]
- [3] Zhang Shilin, Guo Weilian, Sha Yanan, et al. Photo capability of silicon photoelectric negative resistance devices. Journal of Semiconductor Technology, 2000, 25(5) : 17 (in Chinese) [张世林, 郭维廉, 沙亚男, 等. 硅光电负阻器件的光学功能. 半导体技术, 2000, 25(5) : 17]
- [4] Chen Changqing, He Mincai, Xin Huoping, et al. Preparatory physical model of photoelectric negative resistance for indirect coupling photodetecting structure. Journal of Wuhan University, 1994, (3) : 55 (in Chinese) [陈长清, 何民才, 辛火平, 等. 间接耦合光探测器结构光致负阻效应的物理模型. 武汉大学学报, 1994, (3) : 55]
- [5] Sha Yanan, Li Shurong, Guo Weilian, et al. Experimental investigation on PDUBAT light controlled pulse oscillator. Microelectronics, 2001, 30(1) : 11 (in Chinese) [沙亚男, 李树荣, 郭维廉, 等. PDUBAT 光控脉冲振荡器的实验研究. 微电子学, 2001, 30(1) : 11]
- [6] Sha Y N, Varadan V K, Li S R, et al. New type of silicon photoelectric negative resistance devices PDUBAT. Smart Structures and Materials 2001 Conference. Newport Beach, California, Mar, 2001: 05
- [7] Zheng Yunguang, Zhang Shilin, Guo Weilian, et al. Discussion on the physical model in photoelectric dual base transistor. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(8) : 1123 (in Chinese) [郑云光, 张世林, 郭维廉, 等. 光电双基区晶体管(PDUBAT)的物理模型探讨. 电子学报, 2001, 29(8) : 1123]
- [8] He Mincai, Chen Bingruo, Huang Qijun, et al. Indirect coupling photodetecting structure. Science in China (Series A), 1990, 33(6) : 431 (in Chinese) [何民才, 陈丙若, 黄启俊, 等. 间接耦合光电探测器. 中国科学(A辑), 1990, 33(6) : 431]

Principle of Photoelectric Dual Base Transistor

Xia Kejun, Li Shurong, Li Dan, Zheng Yunguang, Mao Luhong and Guo Weilian

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: It is concluded that photoelectric dual base transistor (PDUBAT) is a novel photon-controlled oscillator using a physical model about PDUBAT which is gained by analysis of two-dimension transportation of its internal charge carriers, and it is indicated that the so-called negative resistance is not a general one and it is attributed to PDUBAT's oscillation. An equivalent circuit is brought forward according to the model presented. The results calculated by SPICE are consistent with the experimental ones. This work interprets PDUBAT's phenomena of coupling, negative resistance and oscillation respectively for the first time with the aid of the calculated results. Furthermore, functional relationships between the intensity of light injected and the frequency of oscillation, the threshold voltage of oscillation (the voltage at the peak of output current) are deduced, which qualitatively explain the corresponding experimental results.

Key words: oscillator; negative resistance; photoelectric device; simulation

PACC: 7220 **EEACC:** 2560B; 2560E; 4250; 7230

Article ID: 0253-4177(2003)08-0850-06

Xia Kejun male, was born in 1978, graduate student. His research area is in new materials of semiconductors and physics of devices.

Li Shurong male, was born in 1946, professor. His research fields include new devices on semiconductors and VLSI.

Li Dan female, was born in 1980, graduate student. Her research area is in new devices on semiconductors and VLSI.

Received 30 August 2002, revised manuscript received 28 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics