

光敏三极管时间参数的瞬态分析*

何民才 赵小敏
(武汉大学物理系)

提 要

本文从光敏三极管的光电瞬态过程出发,导出了时间参数的分析表达式。还测试了光敏三极管的响应时间。实验结果与理论分析很好地符合。

一、引言

响应时间是光敏三极管的重要参数之一。随着光敏管广泛地应用,对它的时间参数提出了越来越高的要求^[1]。我们知道,光敏三极管的响应时间与光脉冲强度关系密切。在较低照度下,随着照度变弱,响应速度迅速恶化^[2]。文献[3]指出,在光敏三极管的基极加偏流后,它的响应时间可以改善。然而到目前为止,上述现象尚未得到解释。本文从光敏三极管的光电瞬态过程出发,得到了响应时间的表示式,讨论了它的物理意义,对上述现象进行了解释。由公式算出的光敏三极管响应时间的理论值与实际测量值符合得非常好。

二、理论

为了简化分析,如图1所示,我们把两种光敏三极管(图1a和b)都看成由一只光敏二极管和一只普通三极管连接而成(图1c)。这样,光敏三极管的光电过程便分解为光敏二极管的光电瞬态过程和三极管的电脉冲放大。由文献[4]知道,光敏三极管的响应时间至少也有数微秒,而光敏二极管的响应时间一般都远小于 10^{-7} 秒。我们的测试结果也与文献[4]一致。因此,光敏三极管的响应时间主要受到三极管的限制。

根据以上事实,在分析光敏三极管的响应时间时,我们可以合理地将它的光电过程分解为图2所示的几个波形。在图2(a)光脉冲的照射下,光敏二极管产生图2(b)的光电流。这个电流与光脉冲基本一致,不产生觉察得出的延迟和形变。它同基极偏流一起注入三极管的基极进行放大,在三极管集电极,得到图2(c)的输出电流。因此,对于NPN光敏三极管,脉冲光照的开始阶段,电流连续性方程是:

$$i_l + I_b = \frac{dq_e}{dt} + \frac{dq_c}{dt} + \frac{dq_b}{dt} + \frac{q_b}{\tau_{nb}} + i_{be} + i_{sb} + i_{re} \quad (1)$$

* 1980年2月11日收到。

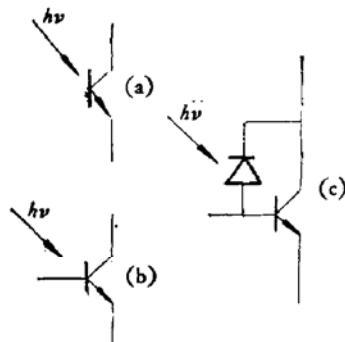


图1 光敏三极管符号及其等效图

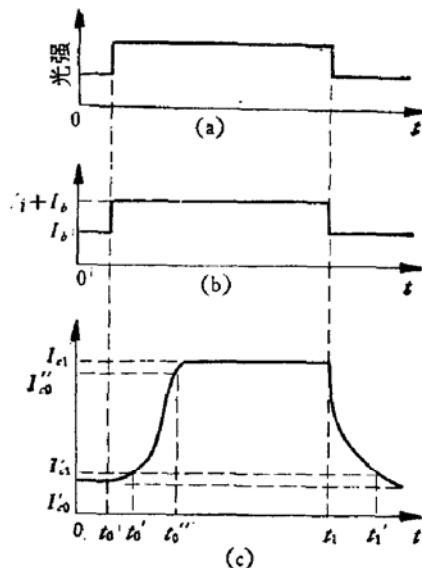


图2 光脉冲及光敏三极管光电流波形图

其中:

$$I_b = I'_b + I'_t + I_{cbo}. \quad (2)$$

i_t ——二极管产生的脉冲光电流, 它的幅值是 I_t ;

I'_t ——二极管产生的恒定光电流;

I'_b ——三极管基极偏流;

I_{cbo} ——三极管集电极结的反向饱和电流;

$\frac{dq_e}{dt}$ ——三极管发射极结电容充电电流;

$\frac{dq_c}{dt}$ ——三极管集电极结电容充电电流;

$\frac{dq_b}{dt}$ ——三极管基区非平衡空穴总量的变化率;

$\frac{q_b}{\tau_{nb}}$ ——三极管基区体内复合电流;

i_{be} ——三极管基区向发射区注入的空穴电流;

i_{sb} ——三极管基区中性表面的复合电流;

i_{rc} ——三极管发射极结过渡区体内及表面的复合电流。

把文献[5]、[6]、[7]的有关结果, 推广到瞬态情况, 式(1)右端各项均可用 i_c 表示。由此得到:

$$i_t + I_b = \frac{A_1}{i_c} \frac{di_c}{dt} + (A_2 + A_3) \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{\beta} i_c + A_4 \sqrt{i_c}. \quad (3)$$

其中:

$$A_1 = \frac{KT}{q} (C_e - C_c), \quad (4)$$

$$A_2 = R_c C_c, \quad (5)$$

A_3 为一常数。基区均匀掺杂时, $A_3 = \frac{w_c}{2D_{nb}}$, 这是我们熟知的基区时间常数。

β 是三极管进入线性运用区时的共发射极直流放大系数。

A_4 也是常数, 它与发射结过渡区复合情况有关。

R_c 是三极管的负载电阻。

q 、 KT 、 C_e 、 C_c 、 ω_b 及 D_{nb} 皆为通常含意。

按图 2(c), 我们取起始响应时间(通常的延迟时间与上升时间之和)为:

$$\left. \begin{aligned} t_s &= t_0'' - t_0, \\ \text{当 } t = t_0 \text{ 时,} \quad i_c &= \beta_b I_b = I_{c0}, \\ t = t_0'' \text{ 时,} \quad i_c &= 0.9[\beta_l(I_l + I_b) - \beta_b I_b] + \beta_b I_b = I_{c0}''. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\beta_b} &= \frac{1}{\beta} + \frac{A_4}{\sqrt{\beta_b I_b}}, \\ \frac{1}{\beta_l} &= \frac{1}{\beta} + \frac{A_4}{\sqrt{\beta_l(I_l + I_b)}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

β_l 是基极注入电流为 $I_l + I_b$ 时的放大系数, β_b 是基极电流仅为 I_b 时的放大系数。可以看出, 随着 I_l 及 I_b 的增加, β_l 及 β_b 将趋近于 β , 三极管进入线性运用区。

这样就可以得出起始响应时间:

$$\begin{aligned} t_s &= \frac{KT(C_e + C_c)}{q(I_l + I_b)} \ln F_1 + \frac{KT(C_e + C_c)}{q(I_l + I_b)} \times \frac{\beta - \beta_l}{\beta + \beta_l} \ln F_2 + \beta R_c C_c \ln F_3 \\ &\quad + \beta A_3 \ln F_3 - \beta(R_c C_c + A_3) \times \frac{\beta - \beta_l}{\beta + \beta_l} \ln F_2. \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{I_{c0}''}{I_l + I_b - I_{c0}''/\beta - A_4 \sqrt{I_{c0}''}} \times \frac{I_l + I_b - I_{c0}/\beta}{I_{c0}}, \\ F_2 &= \frac{\sqrt{D} + 2\sqrt{I_{c0}''}/\beta + A_4}{\sqrt{D} - 2\sqrt{I_{c0}''}/\beta - A_4} \times \frac{\sqrt{D} - 2\sqrt{I_{c0}}/\beta - A_4}{\sqrt{D} + 2\sqrt{I_{c0}}/\beta + A_4}, \\ F_3 &= \frac{I_l + I_b - I_{c0}/\beta - A_4 \sqrt{I_{c0}}}{I_l + I_b - I_{c0}''/\beta - A_4 \sqrt{I_{c0}''}}, \\ \sqrt{D} &= \left(\frac{1}{\beta_l} + \frac{1}{\beta} \right) \sqrt{\beta_l(I_l + I_b)}, \\ A_4 &= \left(\frac{1}{\beta_b} - \frac{1}{\beta} \right) \sqrt{\beta_b I_b}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

令式(3)中的 $i_l = 0$, 就得到下降过程的电流连续性方程:

$$I_b = \frac{A_1}{i_c} \frac{di_c}{dt} + (A_2 + A_3) \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{\beta} i_c + A_4 \sqrt{i_c}. \quad (10)$$

因光敏三极管通常不工作在饱和状态, 根据图 2(c) 取下降时间为:

$$t_f = t'_1 - t_1.$$

$t = t_1$ 时,

$$i_c = \beta_l(I_l + I_b) = I_{c1}.$$

$t = t'_1$ 时,

$$i_c = 0.1[\beta_l(I_l + I_b) - \beta_b I_b] + \beta_b I_b = I'_{c1}.$$

得到的下降时间是:

$$\left. \begin{aligned} t_f &= \frac{KT(C_e + C_c)}{qI_b} \ln F'_1 + \frac{KT(C_e + C_c)}{qI_b} \times \frac{\beta - \beta_b}{\beta + \beta_b} \ln F'_2 + \beta R_c C_c \ln F'_3 \\ &\quad + \beta A_3 \ln F'_3 - \beta(R_c C_c + A_3) \times \frac{\beta - \beta_b}{\beta + \beta_b} \ln F'_2. \end{aligned} \right\} (11)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} F'_1 &= \frac{I'_{c1}}{I_b + I'_{c1}/\beta - A_4 \sqrt{I'_{c1}}} \times \frac{I_b - I_{c1}/\beta - A_4 \sqrt{I_{c1}}}{I_{c1}}, \\ F'_2 &= \frac{\sqrt{D'} + 2\sqrt{I'_{c1}}/\beta + A_4}{\sqrt{D'} - 2\sqrt{I'_{c1}}/\beta - A_4} \times \frac{\sqrt{D'} - 2\sqrt{I_{c1}}/\beta - A_4}{\sqrt{D'} + 2\sqrt{I_{c1}}/\beta + A_4}, \\ F'_3 &= \frac{I_b - I_{c1}/\beta - A_4 \sqrt{I_{c1}}}{I_b - I'_{c1}/\beta - A_4 \sqrt{I'_{c1}}}, \\ \sqrt{D'} &= \left(\frac{1}{\beta_b} + \frac{1}{\beta} \right) \sqrt{\beta_b I_b} \end{aligned} \right\} (13)$$

式(8)和(12)的物理意义是很清楚的: 右边第一项代表了发射极结电容和集电极结电容通过发射极充电放电对光敏三极管响应时间的影响; 第二项是放大系数随基极电流变化而对第一项的修正; 第三项则是密勒电容经负载电阻产生的充电放电作用; 前面说过, A_3 是基区时间常数, 因此, 第四项指出了电子渡越基区对响应时间的贡献; 第五项又是放大系数变化对三、四两项的修正。

下面, 我们讨论具有实际意义的两种特殊情形。

(1) $0.1I_l \gg I_b$. 相当于没有基极偏流, 没有背景光, I_{cbo} 也可略去. 这样, 问题的初始条件将大大简化. 式(8)将变为:

$$\begin{aligned} t_{f0} &= \frac{KT(C_e + C_c)}{qI_l} \ln \frac{9\beta_l I_l}{I_{ceo}} + \frac{KT(C_e + C_c)}{qI_l} \times \frac{\beta - \beta_l}{\beta + \beta_l} \ln \frac{1}{1 - \sqrt{0.9}} \left(1 + \sqrt{0.9} \frac{\beta_l}{\beta} \right) \\ &\quad + \beta R_c C_c \ln 9 + \beta A_3 \ln 9 - \beta(R_c C_c + A_3) \\ &\quad \times \frac{\beta - \beta_l}{\beta + \beta_l} \ln \frac{1}{1 - \sqrt{0.9}} \left(1 + \sqrt{0.9} \frac{\beta_l}{\beta} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 I_{ceo} 是三极管集电极-发射极之间的反向饱和电流。

按同样办法, 也可以从式(12)得到下降时间的表示式. 不过 I_{cbo} 很小, 不易准确测量, 在实际问题中它的作用也不大. 为了能与实验进行比较, 令式(10)右端为0, 加上简化后的初始条件, 下降时间是:

$$t_{f0} = \frac{2KT(C_e + C_c)}{qI_l} \times \frac{\beta}{\beta - \beta_l} \left[-\frac{1}{\sqrt{0.1}} - 1 - \frac{\beta_l}{\beta - \beta_l} \ln \frac{\beta_l}{\beta_{0.1l}} \right]$$

$$+ 2\beta R_c C_c \ln \frac{\sqrt{10} \beta_t}{\beta_{0.1I}} + 2\beta A_3 \ln \frac{\sqrt{10} \beta_t}{\beta_{0.1I}} \quad (15)$$

其中:

$$\frac{1}{\beta_{0.1I}} = \frac{1}{\beta} + \frac{A_3}{\sqrt{0.1\beta_t I_t}} \quad (16)$$

式(14)和(15)比式(8)和(12)有更加明显的形式,它们能很好地解释响应时间随光脉冲幅度变化的规律。我们看到,式(14)中右端的前两项及式(15)中右端第一项皆与光脉冲幅度成反比。光脉冲幅度越小,这几项的作用也越大。将通常光敏三极管电参数代入式(14)和(15)进行估算表明,大约在 $I_t = 0.5 \mu\text{A}$ 时,这些项已起主要作用。因此,即使不太弱的照度下,随着光脉冲幅度的减小,响应时间就开始迅速恶化。

还有一点也很有趣。式(15)特别突出了放大系数及其变化对下降时间的影响。这是可以理解的。放大系数及其变化能够反映基区非平衡载流子的变化情况。这些载流子减少的快慢显然对下降时间有很大的影响。

式(14)和(15)还告诉我们,当 I_t 变得很大时,响应时间会明显地减小。

(2) $I_b \gg I_t \gg I_{cb}$, β_t 及 β_b 都近似地等于 β 。也就是说,基极偏流或背景光引起的电流远大于脉冲光电流。而且三极管已进入线性运用区。光敏三极管光电瞬态过程的初始条件会大大简化。这时,式(8)和(12)就变成下面的简单形式:

$$t_{sb} \doteq \frac{KT(C_e + C_c)}{qI_b} \ln 10 + \beta R_c C_c \ln 9 + \beta A_3 \ln 9. \quad (17)$$

$$t_{fb} \doteq \frac{KT(C_e + C_c)}{qI_b} \ln 10 + \beta R_c C_c \ln 9 + \beta A_3 \ln 9. \quad (18)$$

我们看到,式(17)和(18)有下列特点。首先, t_{sb} 和 t_{fb} 基本相等;其次,光脉冲幅值的变化已不再影响光敏三极管的响应时间。数字估算表明,式右第一项的作用大大削弱,因而响应时间也大为缩短,密勒效应的作用逐渐变得重要。因此,加上基极偏流或者背景光,能够改善响应速度。

三、实验结果与讨论

上述时间参数表示式(14)、(15)、(17)和(18)各式右端中的电参数,均能直接测出

(A_3 例外,但可以证明,它可略去不计)。根据这些测量结果,代入上述各式,可以算出时间参数。另一方面,我们又能直接测出光敏三极管的响应时间,从而可用实验直接验证上述分析是否正确。

图 3 是直接测量 t_{s0} 、 t_{f0} 、 t_{sb} 和 t_{fb} 的原理图。电脉冲发生器是 MFS-2A 型双脉冲信号发生器。它输出的电脉冲经 3DK4 放大后,加到砷化镓激光器上,便得到前后缘较好的光脉冲。虚线方块是被测光敏三极

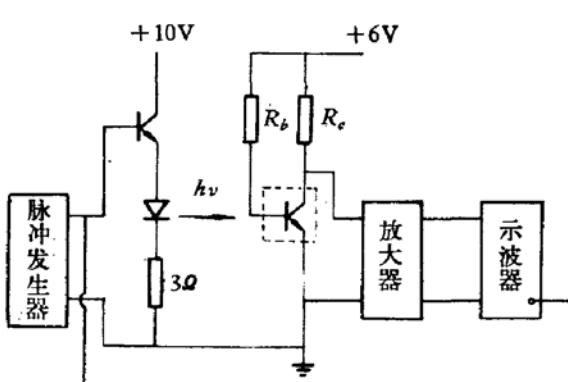


图 3 响应时间的测量原理图

管。它的输出讯号经放大后，输入到 SBM-14 型示波器上。外触发同步讯号取自脉冲发生器。这样在示波器上便能直接读出响应时间。

图 4 示出了两支光敏三极管的 t_{s0} 和 t_{f0} 的测量值及计算曲线。可以看出，测量值与计算曲线符合得相当好。我们再次看到，随着 I_t 的变化，响应时间可以变化几个数量级，从几微秒变到数百微秒不等。

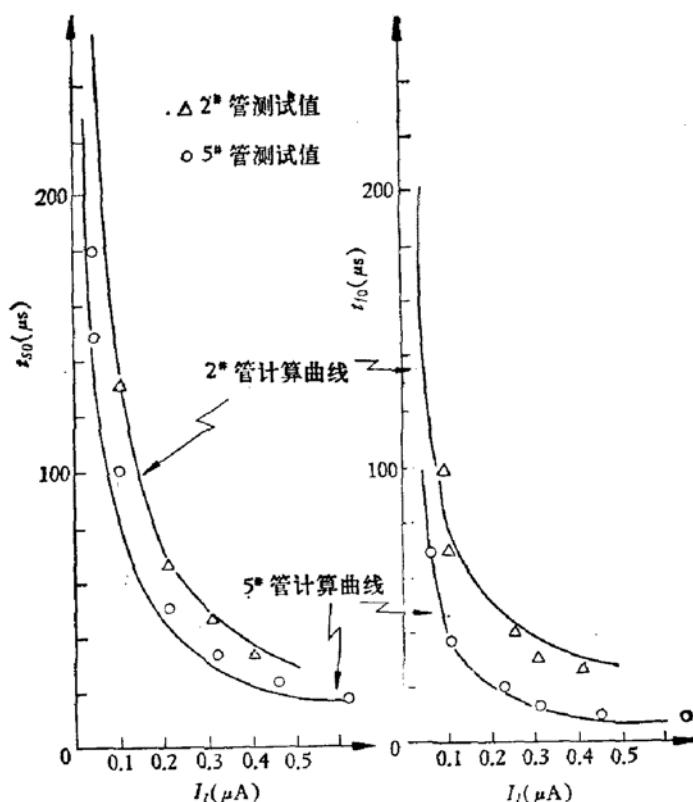


图 4 t_{s0} 、 t_{f0} 的计算曲线与实验值的比较

2# 管及 5# 管的 t_{sb} 和 t_{fb} 的测量值分别是 $2\mu s$ 和 $4\mu s$ ，比计算结果偏大（计算值分别是 $1.5\mu s$ 和 $2.9\mu s$ ），可能是没有计及放大器的输入电容和光敏三极管的基区电阻所致。但是实验证实了 I_t 变化对 t_{sb} 和 t_{fb} 的影响不大。当 I_t 从 $0.05\mu A$ 变到 $0.5\mu A$ 时，它们基本上保持不变。 t_{sb} 和 t_{fb} 确实比 t_{s0} 及 t_{f0} 小很多，而且彼此几乎相等。

四、结 束 语

从本文的分析和实验中可以看出，光敏三极管发射极结和集电极结电容通过发射极充电放电的过程显著影响光敏三极管响应速度。其响应时间可以长达数十甚至数百微秒。而只要具备下述三个条件中的一个，就可以使光敏三极管的响应速度得到明显的改善，响应时间可以缩短到几个微秒。这三个条件是：

1. 预置一定的基极偏流；
2. 加一定照度的背景光；

3. 信号光脉冲幅度较大。

本文的修改过程中, 张君和同志曾大力帮助我们, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Vernon P. O'Neil, *Electronics*, 52, 119(1979).
- [2] 吉田光男·木原敏彦, 光半导体活用ガイド, 诚文堂新光社, 42 (1973).
- [3] Gorhard Krause, *Siemens Electronic Components Bulletin*, VIII, 8(1973).
- [4] Mullard Ltd, Semiconductor Devices, Book I (Part 3), BPX25, BPX29, BPY 13A.
- [5] C. T. Sah, *IEE Trans.*, ED-9, 94(1962).
- [6] 北京大学电子仪器厂半导体专业编著, 晶体管原理与设计, 科学出版社, 105, 126, 128.
- [7] David H. Adler, *IEEE*, ED-24, 1255(1977).

Transient Analysis of Phototransistor Time Parameters

He Mineai and Zhao Xiaomin

(*Department of Physics, Wuhan University*)

Abstract

Starting from the photo-electric transient processes of phototransistors, the time parameters are derived, and the response times are measured. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis.