

# 光电倍增管对高斯脉冲的响应\*

杨胜利

(厦门大学物理系, 厦门)

**摘要:** 本文用脉冲响应函数法分析光电倍增管 (PM) 对高斯光脉冲的响应, 用计算结果解释实验观测的波形及利用公式  $\tau_p = \sqrt{\tau_i^2 - \tau_0^2}$  从输出脉宽  $\tau_i$  扣除 PM 引起的增宽  $\tau_0$ , 求得输入脉宽  $\tau_p$  的条件及限制。

The response of a photomultiplier to a Gaussian light pulse

Yang Shengli

(Department of Physics, Xiamen University)

**Abstract:** The response characteristics of a fast response photomultiplier to Gaussian light pulse are analysed by means of its pulse response function. The analysis shows that the duration  $\tau_p$  of input pulse is the function of PM time constant  $\tau_0$  and the duration  $\tau_i$  of observed output pulse. So it is necessary to use the formula  $\tau_p = \sqrt{\tau_i^2 - \tau_0^2}$  to deduct the effect of PM time constant. In this paper, the using condition and limit of the formula are give.

## 一、引 言

ns短光脉冲及ps超短脉冲在快速及超快速过程的应用日益广泛。如何准确测量这样短的光脉冲波形及其宽度, 已成为研究快速、超快速过程及发展超短光脉冲技术等领域的重要课题。用ps时间分辨的条纹相机及ps激光研究快速过程虽较为简捷, 但仪器较复杂, 且昂贵。在ns、亚ns快速过程的研究中, 用直接方法产生ns或亚ns激光脉冲, 如N<sub>2</sub>激光器等, 是一种廉价而方便的光源。光电探测器中的PM具有很高的放大倍数, 快速PM的时间分辨可达亚ns<sup>[1]</sup>。它与快速示波器或快速存储系统联用是这一领域研究者经常使用的实验手段。能否用ns或亚ns响应的光电探测器较准确地测量同一量级的光脉冲波形及其脉宽, 取决于对ns或亚ns时间分辨的光电探测器测量同一量级光脉冲响应特性的深入了解。但是, 至今人们在测量脉冲宽度(或上升、下降时间)时, 一概沿用如下公式来扣除仪器的增宽<sup>[2]</sup>, 而不管仪器的响应特性及被测脉冲形状的不同:

$$\tau_p = \sqrt{\tau_i^2 - \tau_0^2} \quad (1)$$

式中,  $\tau_p$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_0$ 分别为被测脉冲实际宽度、仪器输出脉宽和仪器的冲激响应函数的宽度,

\* 本文在第四届全国光电技术与系统会议上宣读。

或各相应脉冲的上升时间。

我们用PM和300MHz带宽的485型示波器测量了N<sub>2</sub>激光脉冲,发现N<sub>2</sub>激光器工作条件不变而改变PM的工作条件或用不同型式的PM时,输出脉冲波形不一样。图1、图2为实验观测的N<sub>2</sub>激光脉冲在示波器上显示的波形照片。图1实线是从照片描下来的波形,以便与理想高斯脉冲比较,点线为理想高斯脉冲与照片波形不一致的部分。由此可见,输出波形很接近

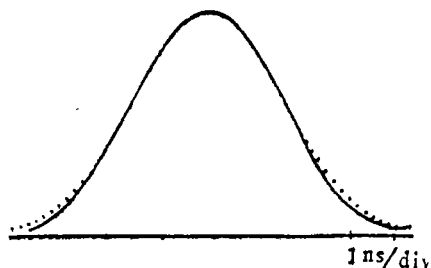


图1 用GDB50测量在示波器显示的N<sub>2</sub>激光脉冲

高斯脉冲。图2a~图2d主脉冲后都有一个峰,经实验反复验证为N<sub>2</sub>激光主脉冲后的一个有固定延迟的小脉冲。后面仅讨论主脉冲。相对于高斯脉冲,图2a~图2d波形皆有不同程度的畸变。图2d是用IP28管测量的,波形畸变最明显,其它的都是用GDB50测量的,所加电压不一样。实验采用了有效的措施以避免PM饱和,使工作在线性范围内。从测量的结果,我们看不出示波器对波形畸变的影响。

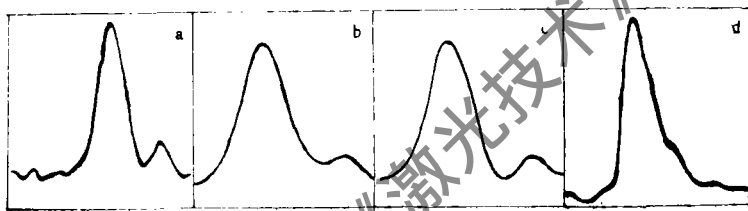


图2 用PM探测N<sub>2</sub>激光脉冲在485示波器上显示的波形  
图2a~图2c用GDB50在不同条件下测得的 图2d用IP28管测得

为分析PM对N<sub>2</sub>激光脉冲波形的影响,我们假定:(1)PM工作在线性区,是线性系统,可利用脉冲响应函数法分析PM的输出响应;(2)PM的冲激响应函数 $h(t)$ 为一高斯函数<sup>[3]</sup>,

$$h(t) = k \exp \left[ - \left( \frac{t - t_0}{\tau_0} \right)^2 \right] \quad (2)$$

(3) N<sub>2</sub>激光脉冲 $s(t)$ 为高斯脉冲:

$$s(t) = s_0 \exp \left[ - \left( \frac{t - t_p}{\tau_p} \right)^2 \right] \quad (3)$$

与 $t_0$ 一样, $t_p$ 为脉冲峰位时间,脉冲的半值宽(FWHM)为,

$$\tau_f = 2\sqrt{\ln 2} \tau_p \quad (4)$$

PM的阴极电流线性范围很大,可达好几个数量级,假定(1)的要求易于达到。两个高斯函数的卷积仍为高斯函数,故假定(2),(3)与图1观测的波形相符。

## 二、PM的输出 $R(t)$

一个具有冲激响应函数为 $h(t)$ 的线性系统,当输入信号脉冲 $s(t)$ 时,其输出脉冲为 $h(t)$ 与 $s(t)$ 的卷积:

$$R(t) = \int_0^{\tau} h(t-\tau)s(\tau)d\tau \quad (5)$$

把(2)式、(3)式代入(5)式,得到PM的输出 $R(t)$ 为:

$$R(t) = G(t) \cdot ef(t) \quad (6)$$

$$\text{式中, } G(t) = R_0 \exp \left[ - \left( \frac{t-t_{p0}}{\tau_{p0}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$ef(t) = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{t+t_0}{\beta\tau_{p0}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{t-t_0}{\tau_{p0}/\beta} \right) \right] \quad (8)$$

式中,  $t_{p0} = t_p + t_0$ ,  $t_0 = \beta^2 t_p - t_0$ ,  $t_0 = t_p - t_0/\beta^2$ ,  $\beta = \tau_0/\tau_p$ ,  $R_0 = \pi^{1/2} k S_0 \tau_p \tau_0 / \tau_{p0}$

$$\text{而} \quad \tau_{p0} = \sqrt{\tau_p^2 + \tau_0^2} \quad (9)$$

$\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数:  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy$ .

分析(9)式中参数的关系,可把它右边简化。 $t_0$ ,  $t_p$ 是两个时间参数,可按如下方法选取。对实际信号可选 $s(t=0) = 0$ , 而  $\exp \left[ - \left( \frac{t_p}{\tau_p} \right)^2 \right] = 0$ , 若  $e^{-x^2} \approx 0.05$  可认为  $e^{-x^2} \approx 0$  时, 则  $t_p \geq 1.73\tau_p$ , 当  $e^{-x^2} \approx 0.01$ , 可认为  $e^{-x^2} \approx 0$  时, 则  $t_p \geq 2.1\tau_p$ 。 $t_0$ 与 $\tau_0$ 的关系也可类似地确定。这样选取 $t_p$ ,  $t_0$ 时,可假定 $G(t)$ 和 $ef(t)$ 仅在 $t > 0$ 有定义。

实验中,  $t_0$ 与 $t_p$ 有一定关系,因为PM的冲激响应 $h(t)$ 可用 $s(t) = \delta(t-t_p)$ 的 $\delta$ 脉冲来测量。当 $s(t)$ 的脉宽远小于 $h(t)$ 的脉宽,或 $\tau_p \ll \tau_0$ 时,  $s(t) = \delta(t-t_p)$ 。则  $R(t) = \int_0^t h(t-\tau) \delta(\tau-t_p) d\tau = h(t-t_p)$ 。由此可见 $h(t)$ 峰位时间 $t_0$ 相对于 $s(t)$ 峰位时间 $t_p$ 应有一个延迟 $\Delta t$ ;

$$\Delta t = t_0 - t_p \geq 0 \text{ 或 } t_0 \geq t_p, \text{ 而且 } t_p = \gamma\tau_p \quad (10)$$

为便于分析,令(8)式中的两个误差函数:  $y_1 = \operatorname{erf} \left( \frac{t+t_0}{\beta\tau_{p0}} \right)$  和  $y_2 = \operatorname{erf} \left( \frac{t-t_0}{\tau_{p0}/\beta} \right)$  曲线的对称中心处 $t_2 = t_0$ 和 $t_1 = -t_0$ 的时间间隔为:

$$\Delta = t_0 + t_0 = \left( 1 + \frac{1}{\beta^2} \right) (\beta^2 t_p - t_0) \quad (11)$$

当 $G(t)$ ,  $ef(t)$ 及 $R(t)$ 仅在 $t > 0$ 有定义时,  $ef(t)$ 可得到简化,从而使 $R(t)$ 简化。下面分三种情况讨论:

I.  $\beta < 1$ 时,  $t_0 < t_p < 0$ ,  $\Delta < 0$ 。这时,

$$ef(t) \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{t+t_0}{\beta\tau_{p0}} \right) \right] \quad (12)$$

II.  $\beta = 1$ 时,  $t_0 = t_p = -\Delta t$ ,  $\Delta < 0$ 。这时,

$$ef(t) \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{t-\Delta t}{\tau_{p0}} \right) \right] \quad (13)$$

III.  $\beta > 1$ 时,  $\Delta$ 可分别取0、正、负三种情况;

(1)  $\Delta = 0$ 时,  $t_0 = t_p = 0$ , 有

$$ef(t) \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{t}{\beta \tau_{p0}} \right) \right] \quad (14)$$

(2)  $\Delta > 0$ 时,  $t_a > t_b > 0$ , 则

$$ef(t) \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{t - t_b}{\tau_{p0}/\beta} \right) \right] \quad (15)$$

(3)  $\Delta < 0$ 时,  $t_a < t_b < 0$ , 则

$$ef(t) \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{-t + t_a}{\beta \tau_{p0}} \right) \right] \quad (16)$$

可见,  $ef(t)$ 都可化为:  $Ef(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{t - t_0'}{\alpha \tau_{p0}} \right) \right]$  (17)

式中:

$\alpha < 1$ 时, (17)式对应于(12)式和(15)式,  $t_0'$ 分别为  $t_0' = -t_a > 0$  和  $t_0' = t_b > 0$ 。前者  $\alpha = \beta < 1$ , 后者  $\alpha = \frac{1}{\beta} > 1$ ;

$\alpha > 1$ 时, (17)式对应于(14)式、(16)式,  $t_0'$ 分别为0和  $-t_a > 0$ ,  $\alpha = \beta = 1$ ;

$\alpha = 1$ 时,  $t_0' = \Delta t$ , (17)式对应于(13)式,  $\alpha = \beta = 1$ 。因此

$$R(t) = G(t) \cdot Ef(t) \quad (18)$$

### 三、PM对被测脉冲的影响

由于  $G(t)$  与  $s(t)$  一样, 都为高斯函数, 但  $G(t)$  脉冲宽度比  $s(t)$  宽,  $G(t)$  的峰位  $t_{p0} = t_p + t_0$  比  $s(t)$  延迟  $t_0$ 。因此, PM使被测脉冲增宽了。其次, PM可使被测脉冲畸变, 畸变因子为(18)式中的  $Ef(t)$ , 如(17)式所示。 $Ef(t)$  是否使  $R(t)$  波形畸变, 取决于  $\alpha \tau_{p0}$  的大小及  $y = \operatorname{erf} \left( \frac{t - t_0'}{\alpha \tau_{p0}} \right)$  对称中心  $t = t_0'$  与  $G(t)$  对称轴  $t = t_{p0}$  之间的间隔:

$$\Delta t' = t_{p0} - t_0' \quad (\text{上面 } t_0', \Delta t' \text{ 皆 } > 0) \quad (19)$$

下面利用图3说明输出  $R(t)$  时间参数对输出  $R(t)$  波形的影响。图3a为(17)式畸变因子  $Ef(t)$  随时间变化的归一化曲线, 其中 I ~ IV 为  $\alpha$  分别为 0.21, 0.42, 0.86 和 1.66 曲线。图3b, 图3c 中  $G(t)$  曲线是(7)式的归一化增宽的高斯脉冲, I ~ IV 曲线分别对应于图3a I ~ IV 畸变因子引起的输出脉冲  $R(t) = G(t) \cdot Ef(t)$  的畸变波形(图3c中没画出 IV)。图3c  $\Delta t'$  比图3b  $\Delta t'$  小, 其  $R(t)$  波形畸变比图3b的  $R(t)$  波形畸变明显。 $\alpha \tau_{p0}$  越小,  $R(t)$  的前沿越陡, 如图3b的 I, II 和图3c的 I, 这些波形与图2d的实验主脉冲波形很相似。当  $\alpha \tau_{p0}$  较大时, 图3a 曲线的斜坡越平缓, 斜坡所占时间区域越大, 畸变因子对  $R(t)$  的前后沿都有影响, 其波形如图3b的 III, IV 及图3c的 III, 这些波形与实验测量的图2a ~ 图2c 较相似。前沿较陡, 且头部向前歪。

显然, 当  $\Delta t'$  较大时,  $G(t)$  曲线的主要部分(即  $G(t) \geq 0.1$  的部分) 所在的时间范围内  $Ef(t) = 1$ 。这时, 输出脉冲  $R(t) = G(t) \cdot Ef(t) \approx G(t)$ , 是无畸变的高斯脉冲, 其增宽可用(9)式来扣除。而如图3b I, II 及图3c I 的波形是仅仅前沿变陡的脉冲, 可测量后沿的半值半宽度再利用(9)式求得脉冲的实际宽度。图3b III, IV 及图3c III 的波形, 测量脉宽就不能简单地用(9)式来计算。

综上所述, 上面的分析可定性地说 PM 对被测高斯脉冲波形的影响: 产生畸变及不畸

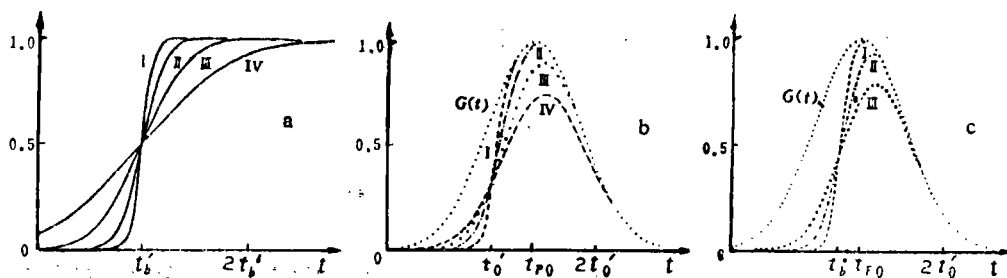


图3 按(18)式计算的PM输出脉冲波形的理论曲线

横坐标为时间 $t$  (单位ns) 纵坐标为归一化光电倍增管输出电压 (任意单位)

变与时间参数的关系。如果要计算被测 $N_2$ 激光脉冲的实际宽度, 还须在同样条件下, 测出冲激响应函数的宽度 $\tau_0$ 才行。

作者感谢中山大学高光兰教授的指导, 李文冲副教授的有益讨论, 源永安工程师等对实验工作的大力协作与支持。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈成杰, 徐正卜. 光电倍增管. 北京: 原子能出版社, 1988: 124
- [2] 密尔曼 J, 塔纳 H 著, 杨尤生译. 脉冲与数字电路. 北京: 科学出版社, 1964: 62
- [3] Sard R D. J A P, 1946, 17: 768

收稿日期: 1991年9月24日。 收到修改稿日期: 1991年11月22日。

#### · 产品简讯 ·

### 7W多谱线输出的小型离子激光器

在CLED会议上, 美国加州相干公司(加州帕洛阿尔托)介绍了该公司Innova小型离子激光系列的一种最新产品。Innova307型需输出7W的多谱线可见光以及600mW的多谱线紫外光。这些激光器结合该公司的主动稳定光学腔的“功率跟踪”、主动校准稳定性的“模式跟踪”以及在线微机诊断系统, 可让用户免去手工操作便可提高生产率。在514.5nm和488.0nm波长上 $M^2$ 的值为1.1是这类激光器的特点。据科学市场经理Tom Hatches说, 这类激光器的构思是“提供高功率、小尺寸、全功能的科学激光系统。”

译自 L F World, 1991; 27(6): 11 中尧译 马理校