

# 单光子计数

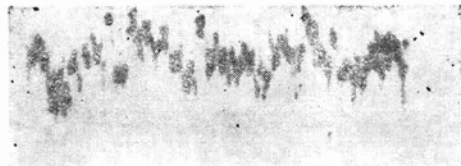
——弱光信号检测的有力手段

翁 渝 民  
(复 旦 大 学)

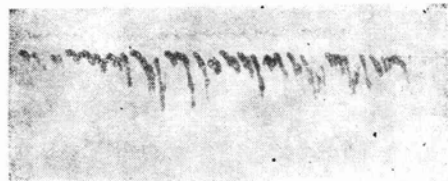
通常,在一些基本的科学研究领域,特别是在某些前沿学科,诸如分子生物学、高分辨率光谱学、表面物理学、非线性光学、束箔光谱学的研究等方面,都会遇到极微弱的光信息的检测问题。这里,光流强度通常比光电倍增管本身的热噪声水平( $10^{-14}$  瓦特)还要弱,以致于一般的直流检测方法已很难从这种噪声水平下检测出信号。因而常将弱光进行交流调制,利用锁相放大器来提取信息。这种方法是靠压缩系统信息带宽的方法来滤去噪声的。但是当噪声与信号有同样的频谱,或者信号是宽频谱时,锁相放大器便无能为力了。另外,由于模拟积分电路漂移的存在,积分时间往往只能在 100 秒以下。单光子计数是测量弱光信号目前最灵敏的实验手段,它的解调与积分过程是以无漂移的数字方式来完成,所以它可以允许有极长的积分时间来改善信噪比。单光子计数技术对量子极限信号可望达到最佳的信噪比。

## 一、弱光照射下光电倍增管输出信号的特征

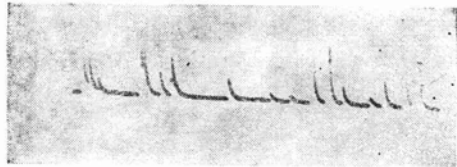
目前在弱光探测中,一般都采用光电倍增管作为光子到电子的变换器。图 1 给出了入射光强度逐渐减弱时,光电倍增管输出电流波形的观察结果。所用光源是直流供电的磷砷化镓发光二极管,其中心波长约为 5600 埃,全半功率线宽约为 400 埃。对应于图 1 从(a)到(d)的光功率量级分别约为  $10^{-13}$  瓦、 $10^{-14}$  瓦、 $10^{-15}$  瓦



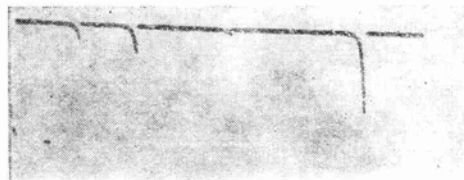
(a) 光流强度 $\sim 10^{-13}$ 瓦,示波器Y轴灵敏度0.1伏/厘米,光电子信号是在一直流电平上迭加闪烁噪声



(b) 光流强度 $\sim 10^{-14}$ 瓦,Y轴灵敏度50毫伏/厘米,直流电平减小,脉冲重迭减少,但仍存在基线起伏



(c) 光流强度 $\sim 10^{-15}$ 瓦,Y轴灵敏度20毫伏/厘米,基线开始稳定,重迭脉冲极少



(d) 光流强度 $\sim 10^{-16}$ 瓦,Y轴灵敏度20毫伏/厘米,脉冲无重迭,基线 $\sim 0$

图1 各种不同信号光强下,光电倍增管输出信号波形,示波器扫速100微秒/厘米

及  $10^{-16}$  瓦。所用光电倍增管是 EMI 9789 QB (双碱阴极), 室温下工作, 测量带宽约 200 千周。

由图 1 可以看到, 当光流强度较大时, 从光电倍增管输出的信号是一直流电平上迭加闪烁噪声分量, 通常用直流电流表或电压表测得的便是其平均的直流分量。随着光流强度的减弱, 光电倍增管输出光电流信号中的直流分量愈来愈小, 起伏的交流成分便愈来愈大, 成为一系列的脉冲信号, 到  $10^{-16}$  瓦的功率时, 1 毫秒的时间内便只有极少几个脉冲, 有时甚至一个脉冲也不能观察到。也就是说, 虽然信号光源是直流供电的, 但光电倍增管输出的光电流却是分立的尖脉冲。光功率愈大, 脉冲的平均速率愈高。当光功率足够强时, 这些脉冲就相互重迭, 连成一片, 而具有显著的直流分量。这是因为光电倍增管系量子探测器件, 一个个光子撞击到光阴极上, 产生光电发射, 经倍增后, 在阳极上便可释放出大量的电荷而形成脉冲。

脉冲宽度与渡越时间分散及光电倍增管输出回路的  $RC$  时间常数有关。当后者与前者相比小得可以忽略时, 则脉宽主要由渡越时间分散决定, 一般为 10—30 毫微秒左右。此脉冲的平均速率与光子流的速率成一定的比例, 故而我们只要在一定时间内计数此光电子脉冲, 便等于检测了光流的强度。由此可构成一种新的弱光检测方法, 即所谓光子计数。

但是, 必须注意两个问题:

其一是光电倍增管后的系统分辨时间须足够短(或带宽要足够大), 使一个个光电子脉冲可以分辨, 而不致重迭造成漏计。这里可作一简单的计算<sup>[1]</sup>。设单位时间内由光阴极放出光电子的平均个数为  $\langle n \rangle$ , 而在分辨时间为  $\tau = 1/2B$  的检测系统中( $B$  为系统带宽), 单位时间内的平均输出脉冲数为  $\langle N \rangle$ , 两者的关系由泊松概率分布

$$\langle N \rangle = \langle n \rangle \exp(-\langle n \rangle / 2B) \quad (1)$$

给出, 则漏计的概率为

$$\Pi_L = \frac{\langle n \rangle - \langle N \rangle}{\langle n \rangle} = 1 - \frac{\langle N \rangle}{\langle n \rangle}$$

物理

$$= 1 - \exp(-\langle n \rangle / 2B). \quad (2)$$

由(2)式便可求得给定的漏计概率要求下所需的系统带宽  $B$  的值。例如, 若要求漏计率  $\Pi_L \leq 5\%$ , 则  $B \geq 10\langle n \rangle$ ; 若  $\Pi_L \leq 1\%$ , 则应有  $B \geq 25\langle n \rangle$ 。也就是说, 当探测系统的带宽大于 25 倍光电子脉冲的平均速率时, 在探测系统分辨时间内同时发生两个光电子脉冲的概率便可小到 1% 以下。这时的状态便称为单光子计数状态, 处于这种工作状态下的光电子脉冲的计数系统就称为单光子计数器, 简称光子计数器。

其二是必须把信号光电子脉冲和噪声电子脉冲进行甄别, 以提高系统的输出信噪比。为此, 我们观察了 EMI 9789 QB 的噪声脉冲及信号单电子脉冲的谱, 如图 2 所示。

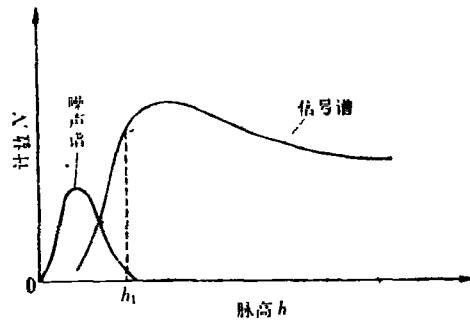


图 2 噪声谱与信号单电子谱分布的差异

由图 2 可见, 若我们设置一甄别电平  $h = h_1$ , 只计数  $h > h_1$  的脉冲, 就可以弃除噪声, 而信号脉冲的损失却可忽略, 从而提高了信噪比。所以在光子计数中, 应该恰当地选取甄别电平, 以获得满意的测量结果。

## 二、光子计数器

光子计数器的基本方框图如图 3 所示。这里设置上限甄别阈的目的是为了去掉一部分较

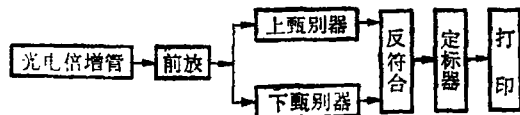
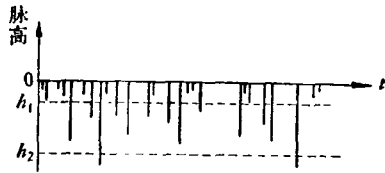


图 3 光子计数器方框图

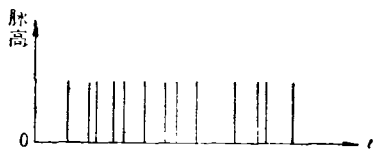
大幅度的暗噪声脉冲, 反符合电路的功能是仅

对幅度落在上、下甄别阈之间的脉冲给出输出。其作用可由图 4 进一步说明。

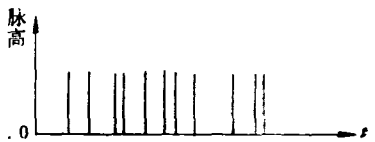
由图 4 可见,光子计数器有两种工作方式:一是仅加下甄别阈  $h_1$  ( $h_2 \rightarrow \infty$ ), 一是同时加上甄别阈  $h_2$ , 使只计数脉高处于  $h_1$  至  $h_2$  间的



(a) 光电倍增管输出(经前置放大器放大)



(b) 仅加下甄别时( $h_2 \rightarrow \infty$ )反符输出



(c) 同时加上、下甄别时( $h_1$  有限)反符输出

图 4 光子计数时上、下限甄别器的作用

脉冲,而弃除幅度过小 ( $< h_1$ ) 或过大 ( $> h_2$ ) 的脉冲。这两种工作方式都可看作是对图 2 所示的谱加权。

设  $P_s(h)$  和  $P_n(h)$  分别为信号光电子和暗噪声脉冲的脉高分布函数,则在这两种工作方式中,信号对噪声的计数效率比分别为

$$\xi(h) = \frac{\int_{h_1}^{\infty} P_s(h) dh}{\int_{h_1}^{\infty} P_n(h) dh}, \quad (3)$$

及

$$\xi(h) = \frac{\int_{h_1}^{h_2} P_s(h) dh}{\int_{h_1}^{h_2} P_n(h) dh}. \quad (4)$$

为了最大限度地弃除暗噪声脉冲而同时保存信号光电子脉冲,以提高探测信噪比,就要恰当地选择  $h_1$  和  $h_2$  的值,以使  $\xi(h)$  最大。

在制作实际的光子计数器时,必须精心挑选、处理光电倍增管,设计制作有关的电路,对此有兴趣的读者,可参阅有关的文章<sup>[2]</sup>。

### 三、光子计数器的最佳工作状态

#### 1. 光子计数时,光电倍增管的最佳工作电压

置下限甄别电平于合适的数值上,而令上限甄别电平  $h_2 \rightarrow \infty$ , 以发光二极管作光源,并使信号光电子脉冲速率远大于暗噪声脉冲速率,测得图 5 所示曲线。

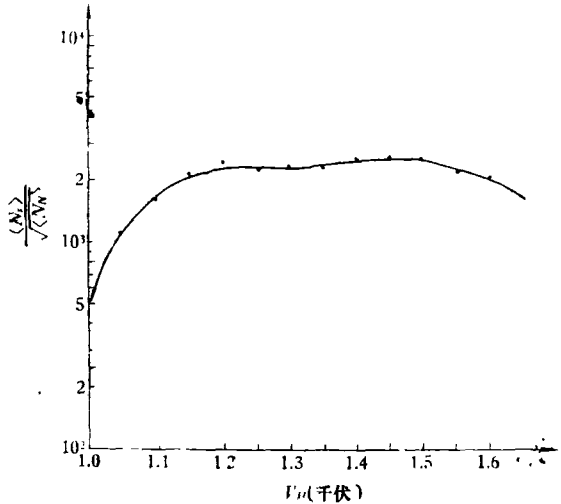


图 5 光电倍增管作光子计数时的工作坪区 (EMI 9789 QB,  $\langle N_s \rangle$  为信号光电子脉冲平均速率,  $\langle N_n \rangle$  为暗噪声脉冲平均速率)

由图 5 可以看到,光电倍增管的工作电压从 1250 伏变到 1500 伏,光子计数时的信噪比特性都较平稳,此即所谓光电倍增管作光子计数时的工作坪区。在坪区内,由于电源电压起伏所造成的数据起伏不大。由此可选取最佳工作电压。

这里,宜取  $V_H = 1250-1300$  伏,过高的工作电压,易使光电倍增管疲劳、损坏。

#### 2. 最佳甄别电平

一般说,光子计数器存在最佳甄别电平,即使  $\xi(V)$  取极大时的  $h$  值。此时,光子计数有最好的信噪比。

在  $\langle N_s \rangle \approx \langle N_n \rangle$  的近弱光条件下,测试了光子计数器的输出信噪比与下限甄别电平的关系,结果如图 6 所示。

由图 6, 设置  $h_1 = 0.20$ , 可获得最好的信

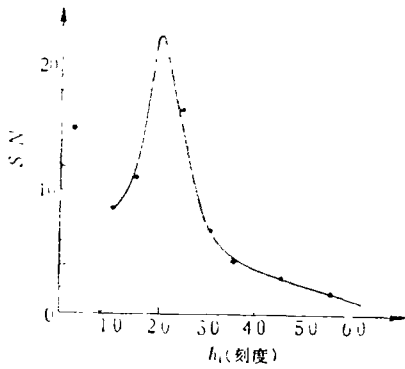


图6 近弱光条件下,探测信噪比  $S/N$  与下限甄别电平  $h_1$  的关系 (EMI9789QB,  $V_H = 1300$  伏,  $h_2 \rightarrow \infty$ ,  $\langle N_S \rangle \approx \langle N_N \rangle$  近弱光条件)

噪比。这里,信噪比  $S/N$  定义为信号平均计数对其均方差之比。

我们发现,对室温下运用的 9789 QB, 设置上限甄别电平,并不能得到信噪比的进一步改善。

实测信噪比  $S/N$  与输入光功率  $P$  的关系如图7所示<sup>[2]</sup>。积累时间皆定为1秒。由图7得,最小可探测功率为  $3.6 \times 10^{-17}$  瓦。用更长的积累时间,可探测更弱的光流,灵敏度按  $\sqrt{t}$  法则递增。若采用100秒的积累时间,则该光

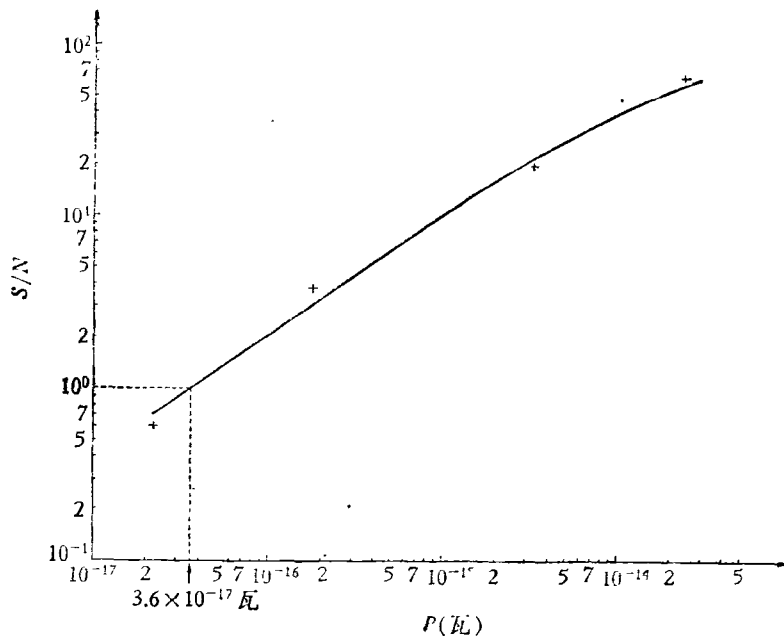


图7 光子计数探测灵敏度实验曲线 (EMI 9789 QB,  $V_H = 1300$  伏, 室温工作,  $\lambda = 4416$  埃,  $T = 1$  秒)

子计数器在 4416 埃的最小可探测功率为  $3.6 \times 10^{-18}$  瓦。

## 四、光子计数的应用例子

### 1. 在束箔光谱学中的应用

低能离子束透过薄箔(厚度约数十微克/厘米<sup>2</sup>)时受激发光。此束箔激发的离子一般处于某种非各向同性态,这种非各向同性随后就会通过所发光辐射的角分布和偏振态在时间进程上表现出来。这里,时间上的相干性将体现为辐射随箔位置的变化,即量子拍。

光子计数技术在束箔光谱学的研究中已成为有力的工具。我们把光子计数应用于束箔光谱学的实验<sup>[3]</sup>,其典型实验装置如图8所示。

对 HeI 的 3889 埃量子拍测量结果见图9,所得结果与理论计算相符。

### 2. 在生物科学中的应用

长时间以来,不少学者都试图观察光化学反应的逆反应,即考察在暗反应过程(如机体内酶代谢过程,细胞膜上能量转化过程等等)中是否有光子释放出来。由于这种过程所释放出来的光子,光通量极低,故直至光子计数技术出现后,才有了进展。

我们把光子计数应用于蛋白质水溶液和脂界面上的超微弱发光研究,试图考察作为生物膜的骨架、有机体内重要组分之一的脂与蛋白质之间的能量转化过程,以期能进一步研究生命活动的本质。

对此双相界面上化学发光的测量结果如图10所示。图中 37°C 的箭头表示从该时刻起,开始在 37°C 下恒温培养。

可以看到,色氨酸对于油酸的过氧化化学发光

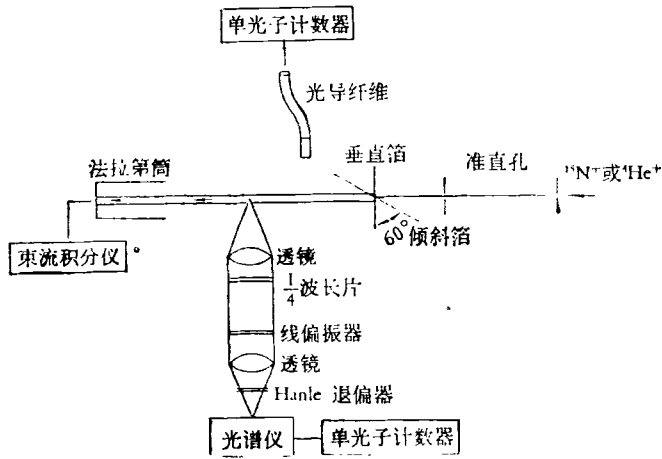


图8 束箔光谱实验装置示意图

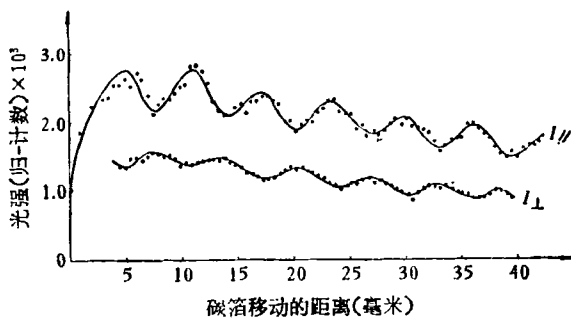


图9 He I 的 3889 埃谱线的零场量子拍  
(\*He<sup>+</sup> 能量为 400 千电子伏;  $I_0$  和  $I_{\perp}$  分别表示沿  
着和垂直于束流方向偏振的光强)

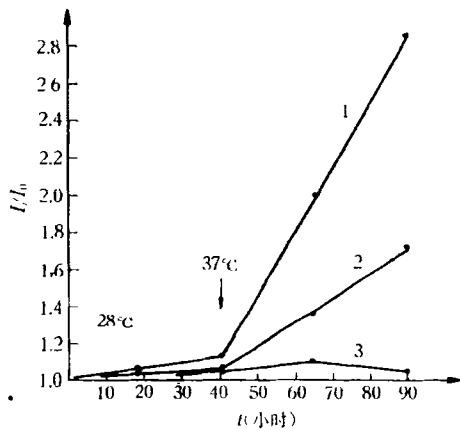


图10 色氨酸水溶液与油酸组成的双相界面上化学发光  
1 为 0.1% 色氨酸 + 油酸;  
2 为 0.05% 色氨酸 + 油酸;  
3 为 0.01% 色氨酸 + 油酸

有明显的增强效应。这种增强作用随着色氨酸浓度的加大而增强。而对化学发光光谱的测量结果(见图 11) 又进一步指出,在色氨酸水溶液

和油酸组成的双相界面上,发光光谱峰值位置与油酸发光光谱并无明显差别,这正说明了在这两种体系中,发光体是相同的,在脂氧化产物与色氨酸间存在着电子激发能级的相互作用。

总之,光子计数充分利用了弱光照射下,光电倍增管输出光电流信号自然离散化的特征,这就使得它与其他探测方法相比有下列优点:

1. 本质上是无漂移的探测处理方法,允许采用极长的积分(计数)时间来大大地提高探测信噪比,可望达到量子极限的探测能力。

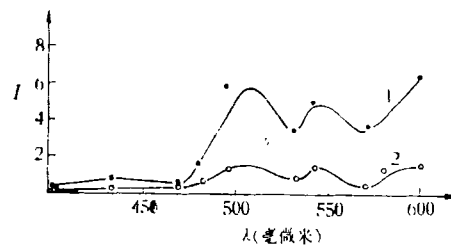


图11 化学发光光谱的测量

1 为 0.1% 色氨酸 + 油酸的化学发光光谱  
(37°C, 培养三天后测量,三次测量结果平均);  
2 为油酸化学发光光谱(60°C)

2. 本质上是一个离散的信息处理技术,所以易与计算机联接,从而可大大提高数据精度,实现快速数据处理,提高实验工作效率。

3. 有宽的线性动态范围。

4. 由于可实现高速数字处理,使得一些时间相关过程的测量也成为可能,而这一点已使该技术在许多边缘学科,特别是在分子生物学、分子束动力学等的研究中成为有力的工具。

总之,光子计数在束箔光谱学、一般的拉曼散射、瑞利散射、布里渊散射、非线性光学的测量、天文测光、大气测污、材料表面分析,以及分子生物学、分子束动力学、激光卫星测距等方面,都可得到应用。

### 参 考 文 献

- [1] 清水慶昭、遠保宏、稲場文男,光学,4-3(1975),1.
- [2] 翁渝民、张瑛舛、夏敬芳、孙錫兰、夏绍丰、胡日明,复旦大学学报,2(1979),41.
- [3] 本哈特·道许、刘崇恒等,自然杂志,2-7(1979),403.