

微弱信号讲座

第六讲 弱光的测量

陈一询

(中国科学院物理研究所)

光测量广泛用于各个领域,例如光谱学、天文学、激光光谱分析以及光纤特性测量等。由于噪声的影响,弱光测量不同于强光的测量,因此必需采用特殊的方法来降低噪声,改善信噪比,以提高测量精度。本文将通过对噪声的分析及改善信噪比方法的介绍来讨论弱光测量中的问题。

一、光检测系统

光检测系统通常包括四个部分(如图 1 所示),即检测对象和应用目的;检测器,例如测辐射热计、光电倍增管、视象管、固态摄像管、光二极管阵列、可门控的或增强的各种器件;信号处理部分,包括放大器、取样线路、模数转换器等;信息处理部分,由最简单的 X-Y-Z 监视器(示波器或 X-Y 记录仪)至复杂的光多道分析器。

众所周知,最通用的光检测器是光电倍增管(PMT)。因此,除在讨论光多道分析时,需考虑另外不同类型的检测器外,我们仅讨论光电倍增管作为检测器的各种检测方法。当然,这种讨论也适用于其他场合。

检测 PMT 的输出有许多方法,其中包括直流静电计法、交流锁相放大器法、脉冲取样积分器法以及光子计数器法等。

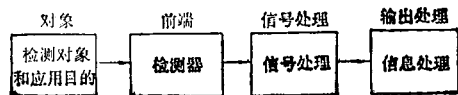


图 1 光检测系统

二、减小噪声

不论用哪一种检测方法,首先要尽可能使环境干扰减至最小。在实验中,50Hz 市电及其谐波的干扰很大,故必须使输入电路与电源

线间的耦合最小。例如,若被测信号功率为 $10^{-19}W$,一般电源线的功率为千瓦级,则信号线与电源线之间的功率耦合系数必须小于 10^{-22} ,这是一个很小的数字。由此可见,必须认真处理干扰问题。干扰主要表现为:(1)接地系统不等电位;(2)任何线路都有残余面积,它使磁通变化转换成线路电压;(3)任何静电屏蔽都有孔洞漏电场;(4)任何同轴屏蔽线都有能量漏进中心导体;(5)任何电气设备,如马达、日光灯、变压器等都会向周围散发出大量能量。所采取的防干扰措施有:

(1)防止静电干扰:采用差分输入的前置放大器,连至阳极负载的信号电缆端接匹配阻抗, PMT 及其阳极负载电阻,检测匹配电阻和信号端接头都要屏蔽。有时可考虑将阳极负载电阻放在前放端, PMT 的高内阻等效于一个地回路。

(2)防止磁场干扰:因各种漏磁通影响地回路,穿过各地线闭合环路的交流磁通会在地线上感生相当大的电流。这个电流将在信号线的屏蔽线上产生压降,并叠加在信号上,送至放大器的输入端。因此要尽量避免地线环,使之缩至最小。

(3)尽可能减少地线系统中的感生电流:应该注意,在实验室中各馈电线的相线有时是供电变压器的不同相线或不同供电变压器的相线,它们对地线可以有很大的电位差。因此,各种仪器连成的系统地线间的电位差会很大,甚至有安培级的电流在内部接线中流过,产生很大的内部干扰。

(4)电动机及未屏蔽的或过荷的变压器是很大的磁干扰源,日光灯也是很大的静电干扰源,电动机电刷抖动产生很宽频带的噪声。因

此,在一些实验中应避免使用这些设备。

(5) 防止 50Hz 的干扰: 可用窄带滤波的办法去除,当然用锁相放大器是最好的办法。

在文献[1]中给出了各种消除干扰的方法,应参照执行。

检验一个系统是否实现了良好的防干扰措施,最实用的方法是将接线、设备等前后左右动一动,如果检测仪器的输出(幅值、计数)不变,则证明抗干扰的措施没有问题了。

三、直流静电计测量系统

典型的直流静电计测量系统如图 2 所示。PMT 的输出电流通过运算放大器反馈时间常数为 RC 的并联阻容进行积分。静电计的输出电压正比于输入电流的平均值。对于这个系统,其噪声源为:

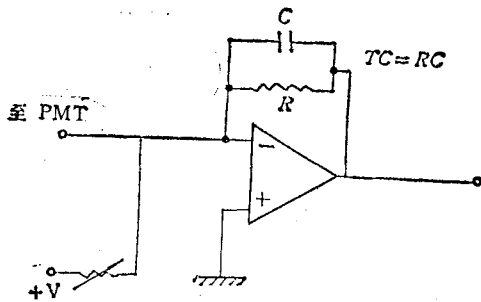


图 2 电流测量静电计系统

(1) PMT 电路的直流暗噪声: 它由杂散光和暗(漏)电流引起。若 PMT 不考虑打拿极附加噪声,则 PMT 散弹噪声电流谱密度的均方根值 i_{n1} 为 $i_{n1} = \sqrt{2AeI_{dc}}$, (1) 式中 A 为 PMT 的增益, e 为电子电荷, I_{dc} 为 PMT 阳极电流的暗噪声成分。

(2) 为使 PMT 的 I_{dc} 成分为零,采用零补偿办法给出与 I_{dc} 方向相反大小相同的 I_s ,它由晶体管电流源提供,其散弹噪声电流密度 i_{n2} 为 $i_{n2} = \sqrt{2eI_s} = \sqrt{2eI_{dc}} = \frac{i_{n1}}{\sqrt{A}}$. (2)

(3) 反馈电阻 R 的热噪声电压密度 e_{n3} $e_{n3} = \sqrt{4KTR}$, (3)

K 为玻耳兹曼常数, T 为绝对温度, R 为电阻。

(4) 放大器内部噪声电压发生器的散弹噪

声电压谱密度 e_{n4} 。

(5) 放大器内部噪声电流发生器的散弹噪声电流密度 i_{n5} 。

因此,总输出噪声电压谱密度 e_n 为

$$e_n = \sqrt{e_{n1}^2 + e_{n2}^2 + e_{n3}^2 + e_{n4}^2 + e_{n5}^2}. \quad (4)$$

由于 $e_{n1}^2 \gg e_{n2}^2, e_{n3}^2, e_{n4}^2$ 及 e_{n5}^2 , 故 $e_n \approx e_{n1}$ 。所以,这个系统是受检测器限制的。例如,泄漏电流 I_{dc} 为 $1nA$, 即使用 I_s 来对消 I_{dc} , 但因 I_{dc} 是温度和倍增管电源电压的函数,故变化起伏不定,很难达到对消的目的。因此,这种方法适用于光电流大于 $10nA$ 的情况。

如果我们认为光电流是光子流,则对 $10nA$ 而言,相当于每秒有 6.25×10^{10} 个光电子流过。用现代电子技术无法分辨出这样的光电子的。

四、锁相放大器系统

若用光斩波器对输入光斩波,则可有效地将上述的 I_{dc} 慢变化隔离掉。图 3 是一个典型的锁相放大器测量系统。输入到单色仪的白光被光斩波器调制,借助参考信号使频率与调制频率相同的输入信号通过锁相放大器,而 PMT 所产生的斩波频率以外的各种杂散信号均被锁相放大器抑制。

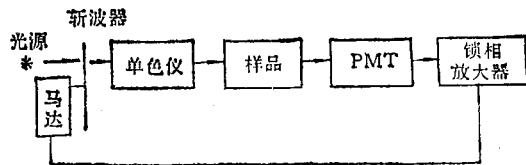


图 3 锁相放大器系统

如果尽力消除 PMT 管壳的漏电,电场和磁场对它的影响,漏光和电磁干扰的拾入,则 PMT 的内部噪声即为主要噪声源。在放大器的噪声贡献可忽略时,在光信号调制为方波并无畸变地送至相敏检波器的情况下,我们可以计算出锁相放大器输出端的信噪比为

$$\left(\frac{S}{N}\right)_0 = \frac{\sqrt{n_s}}{2\sqrt{(1+2\alpha)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{K\Delta f}}, \quad (5)$$

式中 $\alpha = \frac{n_d}{n_s}$, n_s 为信号光电子数/s, n_d 为暗光

电子数/s, Δf 为频带宽度(Hz), K 为过量噪声因子。 K 是指由于电子轨道差别和各级表面情况不同而产生的倍增器的增益变化, 从而使实际噪声增大的一个校正因子。 $K > 1$, 对于差的光电倍增管此值可高达 4。

由(5)式可见, 若 $n_s \gg n_d$, 则 $\left(\frac{S}{N}\right)_0$ 可看作为信号光电子率的方根。 对于给定 n_d 值, 可找出特定带宽条件下信号光电子率与 $\left(\frac{S}{N}\right)_0$ 的关系。

下面讨论 PMT 与放大器的连接。 在单位带宽(1Hz) 的情况下, 设 PMT 的总增益为 200,000, $n_s + 2n_d = 1000/s$, 温度为 300K, 则由 $i_1 = Ae\sqrt{(n_s + 2n_d)K\Delta f}$, 可得 PMT 的噪声电流为 $10^{-12}A$, 由 $i_2 = \sqrt{\frac{4KT\Delta f}{R}}$, 可得 PMT 的阳极负载电阻与放大器输入电阻并联的噪声电流为 $\frac{1.29 \times 10^{-10}}{\sqrt{R}} A$, 由 $10^{-14}\sqrt{\Delta f}$, 可得放大器有源元件产生的噪声电流 i_3 为 $10^{-14}A$, 由 $e = 4 \times 10^{-9}\sqrt{\Delta f}$, 可得相应的噪声电压为 $4 \times 10^{-9}V$ 。

由此可见, $i_1 \gg i_3$ 。 若 R 大于 100k Ω , 则 $i_1 > i_2$ 。 因此, 弱光测量时应尽力减小 i_1 , 所用方法是: PMT 加冷却套和机械加固使 $n_s + 2n_d$ 达 10/s, 则 i_1 可降至 $10^{-13}A$, 但若 $R \geq 10M\Omega$, i_1 还大于 i_2, i_3 。

PMT 的有效输出电压等于 i_1R , R 越大, e_1 的影响越小。 由放大器的噪声因子图可知, 应选 PMT 的阳极负载为最佳源阻抗值, 从而得到最低的噪声因子。 实际上 PMT 是一个电流信号源, 且有较高的负载电阻, 所以更多的是由管子的内部噪声来支配其他噪声。 因此, 应选择低温的高负载阻抗的及稳固的 PMT 工作状态。 此电阻值一般选为 1—5M Ω 。 实际上, PMT 的阳极电路负载有管子的 10pf 输出电容及 20 pf 的放大器输入电容以及 100pf/m 的电缆电容。 这类电容产生两个坏作用: (1) 在斩波工作情况下限制 PMT 的阻抗; (2) 产生光信号与电输出间的相位位移。 为减少它们的影响, 前

置放大器应尽可能靠近光电倍增管。

暗电流噪声主要是光阴极的电子发射造成的, 但随着电压的增高, 由于打拿极结构上的锐点或毛刺产生场发射效应, 从而给出很大的噪声电流。 通常工作电压应低于这个突变点。

五、光子计数器系统

众所周知, PMT 对电压变化是很敏感的, 如铯化碱材料, 倍增级 $n = 10$, 则

$$\frac{dA}{A} = 7 \frac{dV_s}{V_s} \quad (6)$$

此式表示 PMT 增益 A 的相对变化为电压 V_s 相对变化的七倍, 因此需要寻找新的方法。

如前所述, 光束可以认为是一个个光子的光子流, 每个光子具有一定的能量, 可以进行测量。 因此, 当光子打到光电阴极材料上时, 可变换出光电子, 这些光电子转换成光电流, 可进行各种电信号处理。 工作在某一波长范围内的光源强度可用每秒发射出光子的平均数来表示, 故测量光子的发射率(即测量光电流)就可以测出光源强度。

常常需要测极微弱的光, 这时光子的发射率达几个或几百个光子/s。 采用通常的测量方法, 很难把“信号”与相干噪声分开。 用 PMT 作光检测器时, 由于电流测量系统中的噪声和漂移的影响以及光电管本身的漏电流等原因, 很难精确测量光电流。 由于 PMT 对每一个打到其阴极上的光子可给出确定的输出脉冲, 因此将 PMT 与相应的电子计数器连接起来, 即可直接测量光子发射率。 这种方法称为光子计数法。

在进行极微弱的光子计数前, 必须留心下列几点:

- (1) 电源及内部连接线路必须是低噪声特性的。
- (2) 光学系统必须仔细设计, 使光漏最小, 并防止物象在 PMT 阴极表面移动。 因为阴极表面不均匀会产生误差, 故最好在光阴板上为散焦象, 使阴极非均匀性产生的后果为最小。
- (3) PMT 稳定, 即在使用前管子不对紫外

线曝光,如有可能,应在加高电压的情况下无数据送入时工作 24 小时。

(4) 尽可能使 PMT 工作在阴极接地,如管子工作在负高电压的光阴极情况下,管子玻璃壳、电木类的噪声及手摸等对地都会产生很大的暗电流。

(5) 在冷却时,管子上不允许有很大的热梯度,以防止接头或表面产生过量的凝结。

下面介绍光子计数系统,它由置于暗盒中的 PMT, PMT 用的高电压电源,脉冲放大器,脉冲高度甄别器,数字计数器,数字显示器以及打印机组成(见图 4)。

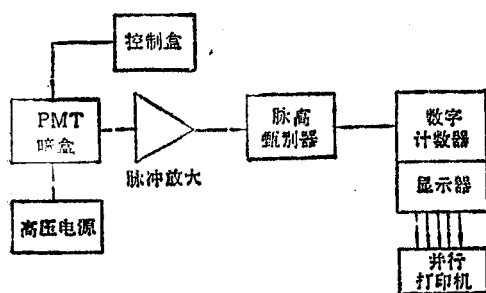


图 4 光子计数器系统

系统中的脉冲放大器用来放大 PMT 的输出脉冲。因为这个脉冲通常仅有几个毫伏,故需要进行足够的放大,以供以后处理电子线路时使用。有的光子计数器为双通道,这样可同时连接两只 PMT。脉冲高度甄别器可通过确定最小和最大阈值来限定通过它的脉冲大小,即用甄别器可以去掉较小和较大的噪声脉冲。计数器可以有几个,例如一个用来累计被测脉冲个数,另一个是高精度的“计时”器,在测量时将它预置在某一数值上。由晶体振荡器提供的时钟脉冲达到预置数值时,停止计数,在数字显示器上可显示出累计脉冲数。因此,系统测得的计数率为

$$\text{计数率} = \frac{\text{累计计数}}{\text{测量周期时间}} \quad (7)$$

根据需要可在面板上选择测量周期时间(MCT)。

设 MCT 已选定,测量一恒定光源的计数率。我们发现,每次测量所得的计数率不是准

确一致的。它告诉我们,光子不是有规则地发射的,而是随机的。因此,我们所测到的是光子发射的平均值。

若选用不同的 MCT 进行测量,则我们将发现 MCT 小时所得的计数率不如 MCT 大时所得的计数率来得可靠。为使实验误差最小,可以无限地增大 MCT,但这种办法太浪费时间,有的实验不允许。因此要考虑进行多少次测量才能得到实验误差允许的平均计数率。

对于光子计数,我们得到它的标准偏差为 \sqrt{N} , N 是平均计数率,相对标准偏差为 $\frac{1}{\sqrt{N}}$ 。

这些证明光子计数遵从 Poisson 统计规律。因此,与作为真正的计数率偏差相比其百分误差为 $\frac{100}{\sqrt{N}}\%$ 。

光子计数中计数器所示出的计数率与工作条件有关,若建立的条件不正确,则许多“计数”会漏掉,从而使工作无效。因此在实际工作中,正确设定计数系统的“面板”是关键。

为达到最佳工作条件,必须做到:(1)达到数据计数器的计数最多。(2)受高压电源、放大器增益以及甄别器窗口设定等变化的影响最小。对于 PMT 我们注意到:

(1) 由 PMT 输出的脉冲大小与高电压有密切关系。

(2) PMT 的增益不是恒定的,从一个脉冲到下一个脉冲是变化的,这是二次发射过程的直接结果。因此,需考虑一个平均的脉冲高度,而一个个脉冲的高度可能大于或小于此值。所以,在甄别器输入端,出现的脉冲平均高度依赖于 PMT 的平均增益与脉高放大器增益的乘积。最后脉高甄别器“接收”落在窗口内的全部大于所设阈值的脉冲。

由于 PMT 受高电压变化的影响很大,因此我们要选高电压变化影响不大的工作区域,对光子计数 PMT 而言有坪曲线,如图 5 所示。

所选高电压值与阈值及放大器的增益有关。由图 5 中可见,高电压值增高,计数率增大,不同的 PMT 的坪曲线不同,因此不是所有

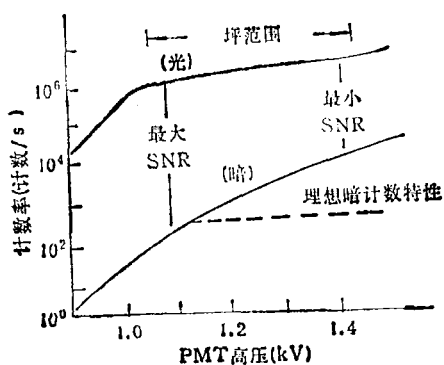


图 5 计数坪曲线

PMT 工作在同一高电压下都有相同的增益。

若将 PMT 置于暗盒中测量其暗计数，我们发现和信号脉冲大小相近的热电子阴极暗计数，而打拿极热电子发射或脉冲放大器的噪声贡献都比较小，因此需要采用致冷的手段来降低暗计数，以设定最小暗计数率这个工作条件。

从以上讨论可见，甄别器窗口下限越高，需要的高电压越高，放大器增益越低，需要的高电压也越高，皆不可取。通过测量暗计数与阈值的关系，可以找出合适的阈值。在有光信号情况下，注意信号/暗计数比是否随阈值微小增加而得到改善，如条件选择正确，可使这些影响减至最小，也即选定最佳工作条件。

六、光多道分析系统

瞬变的光学过程存在于我们生活的各个方面，研究、观察和测量这些过程有着重大的意义。利用多道并行检测器新工艺、球面全息衍射光栅以及微机的最新成就，做出了一种光并行检测系统——光多道分析系统，其原理见图 6。将实验装置给出的被测光信号送入球面全息光栅多色仪，然后多色仪再将被测光信号聚焦在有一定波长分布的平面场上，此平面场与检测器的检测面相吻合。并行检测器的各个检测单元可同时检测出各波长位置的光强或光子数。由电子扫描线路对检测器各单元进行扫描，可读出各位置的电荷信号，这些信号被低噪声电荷灵敏放大器放大后经峰值检测送至模数

转换器。模数转换器的输出连至数据存储器。微处理机是用来对系统各部分进行控制并完成各种数学功能(如波长定标、谱平滑、背景扣除、透过和吸收的计算、四则运算、微分、积分等)。目前，有的设备其功能可达 200 余种。经过处理的结果，可从数据存储器给出数据或在示波屏上显示，也可记录在 X-Y 仪、软盘上，或通过电传打字机进行处理。

这种方法的真正能力在于同时检测整个光谱。新的检测器不断出现，大致有摄像管、硅靶摄像管、硅光二极管阵列、增强硅光二极管阵列和门控增强二极管阵列等，并达到了快速、高分辨率、单光子检测器件的水平。例如采用硅光二极管阵列，这个阵列的每一单元单值地对谱线的某一位置敏感。检测器阵列读出速度极快，可在几个毫秒内采集完整个谱。相比之下，经典方法每次仅采集谱的一个位置，并且为采集一个完整谱要用机械扫描。

具体的硅光二极管阵列是在一片硅单晶上加工的大规模集成电路，它是由光二极管阵列、开关光二极管的开关管(如场效应晶体管)以及数字移位寄存器构成。典型的光二极管阵列结构如图 7 所示。它是在 n 型硅片上扩散 p 型细条作成反偏 p-n 结。n 型和 p 型表面两者都对光敏感，当光二极管反偏 V_R 时，在其耗尽层电容 C_j 上贮存电荷为

$$Q_j = C_j V_R. \quad (8)$$

当除去 V_R ，无光照时，存在在 C_j 上的电荷 Q_j 将被 I_D 反向漏电流泄放。光照时， Q_j 被 I_D 和光电流 I_j 泄放，因而 p-n 结两端的电压随之下降。当结电容放电时间一定(即光照的积累时间一定)时，二极管两端电压的衰减随光强的增加而加大；当光强一定时，放电时间愈长，二极管两端电压衰减也将增大。光照结束，立即对 p-n 结充电，使其恢复到初始电平，显然对 p-n 结电容充电的电荷数等于光照期间 p-n 结电容上所消失的全部电荷数。因此，这个光电电流脉冲幅度就反映了入射在光二极管上的光强在这段时间内的平均值。

以电子驱动的移位寄存器依次对每一个二

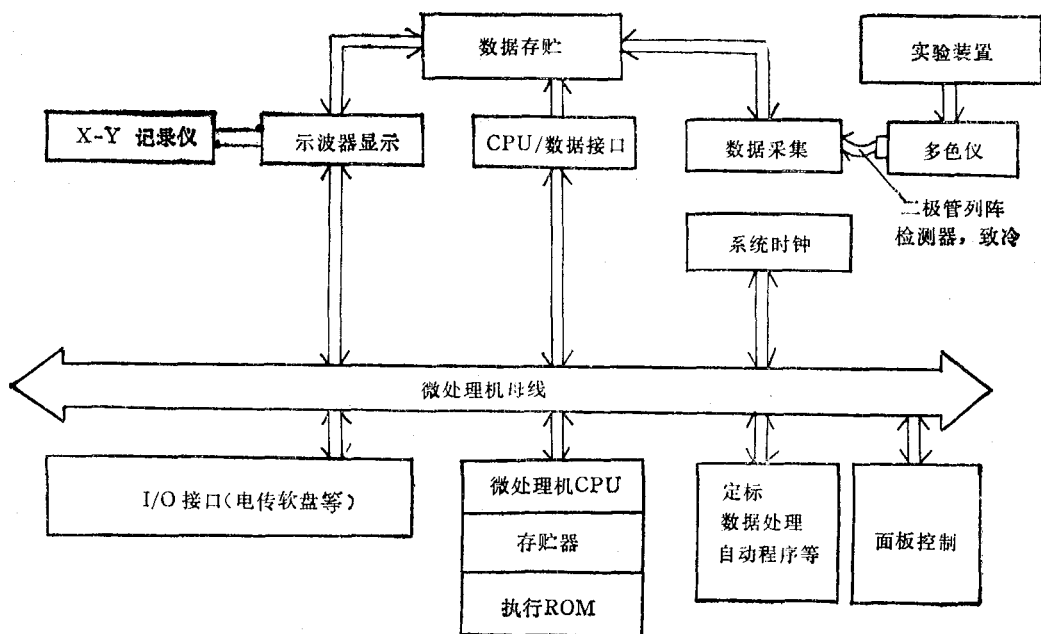


图 6 光多道分析系统

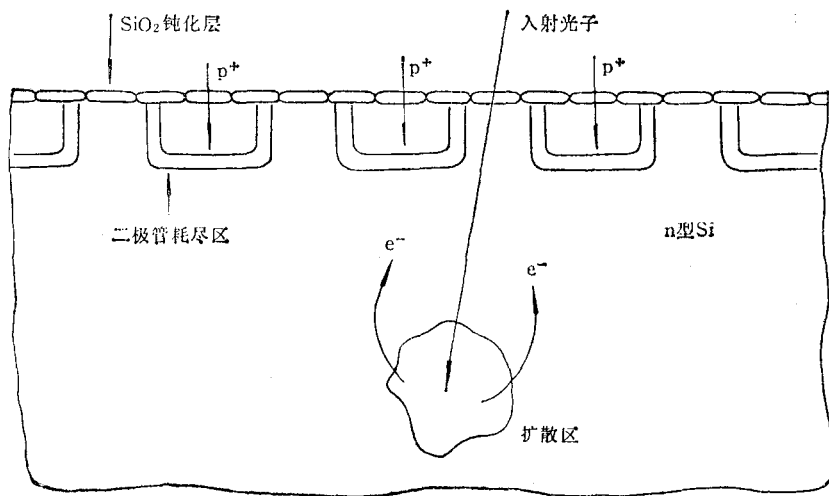


图 7 光二极管阵列结构

极管扫描,这时场效应晶体管开关闭合,使+5V偏压通过二极管加在电荷灵敏放大器的输入端,由于线路闭合,二极管与相连的电容重新充电,并且重新充电信号被放大,通过峰值检测后送至模数转换器(ADC)。

硅在190—1100nm范围内有很高的量子效率(40—80%),但纯硅的灵敏度还是比较低

的。在525nm时,需要6700个光子才能在含有14位ADC的线路中记录一个计数。对于很高的信号电平,则无所谓。然而对于非常弱的信号,这时光二极管阵列如果要与光电倍增管相竞争的话,则可利用相增强器。它的原理是在一个光阴极上将光子转换成光电子,通过
(下转第294页)