

自扫描光敏二极管阵列探测器的性能和使用

刘 竞 青

(中国科学院物理研究所)

光电转换探测器大致可分为单道接受和多道接受两大类。应用广泛、类型繁多的光电倍增管(PMT)是典型的单道接受器。光电图象探测器(OID)是近十多年来发展起来的一类平行多道接收器,它能代替照相干板那样老式的多道系统,并能同时地接受信号和进行光电转换。它们把聚焦在入口光窗上的一维或二维的光强分布转换成电信号,由计算机控制系统对相应的数据进行处理,可以在荧光屏上实时地显示出信号的强弱分布,也可以通过磁盘机、打印机等记录和输出有关结果。这样的多道系统速度快、操作简便,大大优于老式多道系统,既可以与色散系统(如光谱仪)联用,做几乎所有的光电倍增管可以做的光谱方面的工作,又可以在不加色散系统时,适应一些特殊的需要,如光强的线性或平面分布和光束的微小角度或微小距离改变的测量。这是单道系统无能为力的。因此,光电图象探测器已成为很有吸引力的光电转换探测器件。

在各种光电图象探测器中,有一种很受重视的器件——自扫描光敏二极管阵列探测器。本文依据我们光散射实验室中所使用的1420型光敏二极管阵列探测器[EG&G 普林斯顿应用研究公司(PARC)生产]来谈谈这类探测器的性能、使用特点及发展前景等。

一、自扫描光敏二极管阵列探测器的构造

自扫描光敏二极管阵列(简称SPD)是线性排列的一排光敏二极管,常为128, 512或1024个。阵列本身的构造和原理可参看文献

[1—3],本文不赘述了。这里只介绍由SPD做成的1412型和1420型探测器的整体结构和原理。

1412型与1420型都是1024个象元的一维线性阵列探测器。1412型没有增强级,而1420型加了微通道板(MCP)增强级。1420型的结构如图1所示。它的工作原理是:光由光窗进入,打在光阴极上产生光电子,在-200V电压下,光电子进入近距离的微通道板。微通道板本身加有高压,它如同光电倍增管的倍增级一样,有 10^3 以上的增益。从微通道板出来的光电子打在一块磷光材料的屏上,激发出光子,由光纤耦合到列阵的光敏二极管上(这时的光子数远大于最初进入光窗的光子数),完成第二次光电转换,输出信号。^[1]可见,有增强级的1420型探测器加了微通道板,增加一次光电转换,达到增强的目的。只是由于微通道板的直径只有18mm,这样25mm宽的1024个象元阵列只有中间700多个象元被增强了。

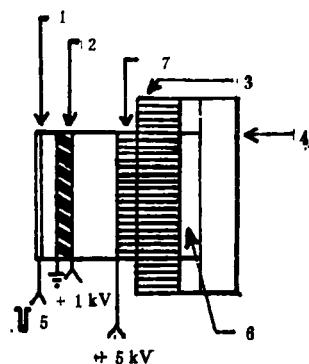


图1 1420型探测器构造

1.光阴极; 2.微通道板; 3.光纤耦合的列阵; 4. Peltier 热电冷却器; 5. -200V 门脉冲; 6. 被增强的730个象元; 7. 磷光体光纤输出

与没有增强级的 1412 型比较, 1420 型几乎可以达到每个光子产生一个计数, 而 1412 型要 100 多个光子才有一个计数, 灵敏度差别很大, 从图 2 中可以直观地看出这一点。

二、列阵探测器的主要性能

1. 光谱响应

图 2 为 1420 型、1412 型列阵探测器与典型的光导摄像管类探测器 (vidicon) 1254 型的光谱响应曲线。可看出列阵探测器的光谱响应区域要宽阔得多, 尤其是在紫外的一侧, 到 200 nm 还没有下降的趋势。

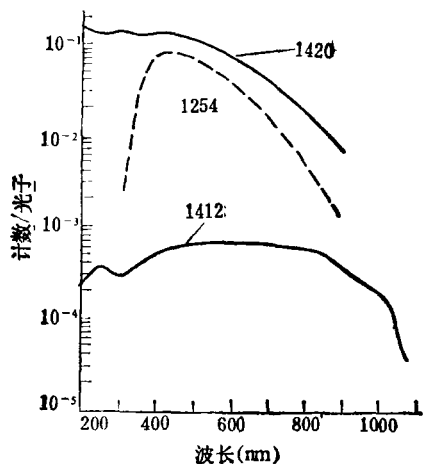


图 2 1420 型等探测器光谱响应曲线

另据文献报道, 列阵本身对更高能量的光子, 甚至 X 射线都可以响应, 因此可以用它做检测小于 10keV 的软 X 射线的探测器。^[2]

2. 噪声

以下三方面构成了列阵探测器的总体噪声:

(1) 固定噪声: 它约占满刻度信号的 1% (1420 型约为 150 个计数)。这个固定噪声虽然可由最终信号中很容易地减掉, 但它的暂态变化会增加总体噪声。

(2) 暗噪声: 所有的硅图象探测器都有热生暗电流及与之相联系的统计涨落。一方面是暗电流本身建立的噪声, 这部分虽然最后也可减掉, 但它减小了光信号可读范围, 特别是当光

信号十分微弱, 需要长时间积累时, 积累时间越长, 列阵的光敏二极管回路中暗噪声带来的电荷积累也越多。在一定的温度下, 存在一个时间极限, 积累到这个时间, 暗噪声本身就使回路中积累的电荷达到饱和, 光信号就根本无法取到了。温度越高, 这个极限时间越短。因此微弱光信号能否被检测到, 要看它本身积累的电荷能否在极限时间到达之前, 就多到能够被检测出来。另一方面, 环境温度的涨落引起暗电流涨落而带来的噪声会增大总体噪声。以上这两方面都可以用冷却的办法来减小。列阵温度每降低约 6.7℃, 暗电流噪声可减低大约一半。

(3) 读出噪声: 每次读出信号带来的噪声。总读出噪声

$$N_r = (N_s^2 + N_{th}^2)^{1/2},$$

其中 N_s 为前置放大噪声, 是微电子前置放大大部分工作引起的噪声。要挑选合适的器件来减低它, 可小于 N_{th} 。 N_{th} 是热力学噪声, 它来自于自扫描列阵读出信号时, 依次对每个光敏二极管回路充电所建立的电位差的不稳定性。在 25℃ 时, 1024 个象元的列阵噪声计数的均方根值约为 1000 个电子。

3. 读出滞后

由电子束读出的真空图象器件都存在读出滞后问题, 即存贮在象元上的信号不能由一次扫描全部读出。而列阵探测器的信号读出方式完全不同, 可以认为没有滞后。

曾有资料报道^[3], 在列阵探测器信号饱和后, 把信号读出一次, 然后再进行观察, 只观察到 1% 的剩余电荷, 这就是滞后。但根据分析, 这是预放的反馈电路造成的。当这个因素被去掉之后, 例如 EG&G 的 PAR 公司改用电压型预放, 这一点点剩余电荷也基本观察不到了。可以认为列阵本身滞后小于 0.1%。

4. 分辨率和光谱谱形转换

单道系统进行光谱分析时, 分辨率和谱形转换完全由色散仪器如光谱仪来决定。多道系统用于光谱分析时, 分辨率和谱形首先取决于色散仪器, 即落在多道探测器上的光的色散程度。现需要讨论的是色散一定时, 多道探测器

本身对分辨率和光谱谱形转换的影响。

事实上,多道探测器象元数目有限,相互间隔一定距离,当色散程度相对地大,多个象元描绘一条谱线时,由光谱仪所决定的分辨率和谱形都能得到如实反映。相反,在光谱仪色散相对地小,光谱线宽与象元宽度差不多,或光谱线宽小于象元宽度时,多道探测器描绘出的光谱的分辨率和谱形都可能有很大改变。尤其是在光谱色散后有周期结构,其周期又与象元的空间周期差不多时,就可能出现光谱转换失真。

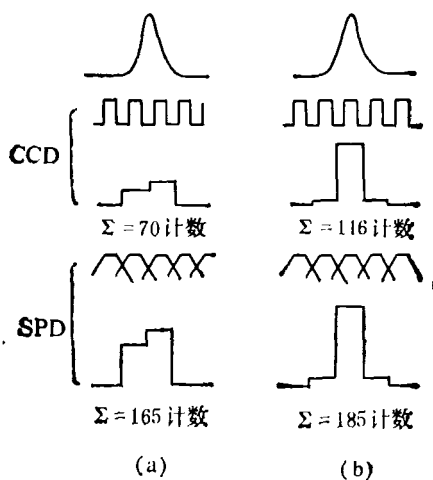


图3 CCD与SPD对线宽约等于象元宽的谱线的描绘

(a) 当谱线落在两象元之间时;
(b) 当谱线落在一个象元上时

图3给出了自扫描阵列(SPD)和电荷耦合器件(CCD)两种多道探测器各自的响应函数和对一条与象元同宽的谱线的描绘。表面上看, CCD的象元间没有交叉覆盖的矩形响应函数的分辨率,似乎比SPD的有交叉覆盖的梯形响应函数的分辨率好;实际上SPD的交叉覆盖响应在线宽与象元宽差不多时,减轻了分离的象元可能造成的谱形的失真。在图3中,SPD收集光子的数目及对谱形的“翻译”都优于CCD器件。

图4是SPD与CCD对一个有周期结构,其周期又与象元空间周期差不多的谱形所给出的结果。可以看出结果是失真很严重。

5. 动态范围

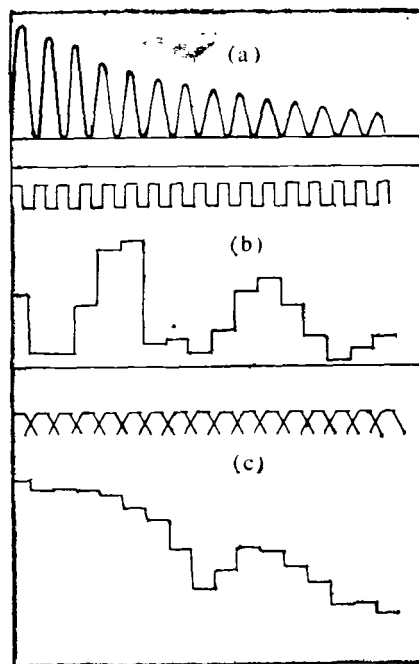


图4 CCD与SPD对周期结构光谱的转换

(a) 有周期结构的光谱; (b) CCD的矩形响应函数及所得谱图; (c) SPD的梯形响应函数及所得谱图

对阵列本身讲,有单个光敏二极管的动态范围和阵列整体的动态范围:前者指一个光敏二极管所能检测的最强信号与最弱信号之比;后者指阵列整体接受信号时一次可同时测出的最强谱结构与最弱谱结构之比。当然前者对后者有决定性影响。下面列举一些影响阵列动态范围的因素。

首先是闪烁现象。它是由阵列做成的探测器内部的反射杂散光造成的,有象增强级的(如1420型)尤为严重。这是因为内部的金属部分,硅二极管表面和光窗等都会引起反射。杂散光的增加减小了阵列可测的信号强度范围。闪烁现象,是使阵列探测器整体动态范围比单个光敏二极管动态范围显著减小的主要原因。

其次是相对来说不算小的二极管到二极管的暗电流大小的涨落,它无法用电路上的简单的限制来改变。

另外,光多道系统都是用计算机控制收集信号、实行模数转换和输出信号,因此阵列探测器整体可测最强信号还受微机系统存贮动态范围的影响和限制。例如EG&G的PAR公司

的光多道分析仪 OMA-II 系统 (1420 型是此系统的探测器) 理论上可有 $21 \times 10^9 (2^{31})$ 的存贮动态范围 (实际值比它小一些)。经过测试, 1420 型单个光敏二极管动态范围与 14bit 的模数转换符合很好, 这是由 SPD 无滞后特性及单个光敏二极管相对高的饱和水平 (10^5 计数) 所决定。在 $10^4:1$ 的测量范围内, 线性可达 $<1\%$, 在 $10^6:1$ 范围内, 线性 $<3\%$ 。

减少闪烁和改善总体噪声水平 (包括降温等措施) 是可以采取的加大动态范围的方法。实验表明^[4], 1420 型的列阵的闪烁光强比一些与多道分析仪连用的典型的短、焦距多色仪杂射光水平低。因此探测器本身的动态范围应该说还是比较好的, 尤其是在探测器冷却的情况下。

三、列阵探测器的操作使用特点

1. 要注意选择光谱仪

一般与光电倍增管连用的光谱仪 (单色仪) 的内光路保证出射光聚焦在出射狭缝处, 而被色散开的不同波长的光的聚焦点往往不在同一平面内。这样的光谱仪是无法与 1420 型这样的列阵探测器联用的。

与列阵探测器联用的光谱仪要满足以下三点: (1) 出射口大小与探测器光窗大小相配, 即输出的是一段光谱 (多色仪)。(2) 出射光聚焦面是一个平面, 且色散方向平行于列阵方向。(3) 聚焦面应在谱仪出射口之外 5—8cm 处。这样通过适当的机械联接和调整, 才能使列阵面与焦面重合, 使最后谱线达到最细锐, 以保证光谱分辨率和强度达到最佳状态。

由于光多道系统近年来的发展, 与之联用的光谱仪型号正在增多。有专为多道系统使用的小型谱仪, 如 PAR 公司提供的 1228 型、1229 型、1233 型和美国 Spex 公司的 1877 型三光栅多色仪等; 也有越来越多的供单道和多道两种探测器兼用的谱仪, 如法国 Jobin Yvon 公司的 U-1000 型与 Spex 公司的 1403 型这两种双光栅喇曼谱仪都有两个出光口, 可分别接光电

倍增管和多道探测器。

2. 要注意避免闪烁现象

除前面提到的对噪声的影响外, 反射杂射光甚至会产生假的光谱结构, 这主要是在强光源的情况下产生的。图 5 是 1420 探测器与 1877 型光谱仪连用时做的光谱: (a) 是激光刚刚移出象元靶面, 落在光窗边缘上。较强的反射杂散光使得 Δl 范围内象元上的信号增大。(b) 是转动一下光栅使激光线移远后所得的真正光信号的谱。可见 (a) 谱的形状、大小在 Δl 范围内是失真的。因此必须注意避免闪烁现象。

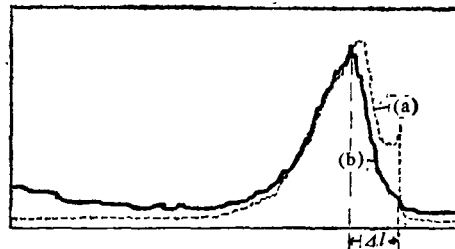


图 5 1420 型探测器与 1877 型光谱仪联用收集的光谱

- (a) 包含激光在光窗边上的反射成分的光谱;
(b) 激光谱线移出探测器后的正常光谱

3. 水汽冷凝问题

降低列阵温度可改善探测器的总体噪声。但空气中的水汽会凝结在低温的列阵附近, 轻则减弱信号, 重则危害有高压的探测器电路。因此, 除了尽量降低环境的湿度外, 或是抽真空 (1412 型), 或是通入纯净氮气加以保护, 才能保证探测器在环境湿度超过 50% 的情况下连续工作。

至于降低温度, 1412 型与 1420 型都采用 Peltier 热电冷却器, 它紧贴列阵, 只冷却列阵局部 (见图 1)。改变有关桥式电路的电阻值即可改变冷却温度。开机后五分钟即可达到温度平衡, 很方便, 而光导摄像管类的多道探测器需要对整个探测器冷却才能达到降低噪声的目的。而这样的冷却系统安装与操作都很困难。

四、自扫描光敏二极管列阵的发展趋势

由于光检测技术的发展, 使得近年来有许

多新型光电图象探测器问世。平行多道探测系统越来越受到重视。自扫描光敏二极管阵列与种类繁多的光导摄像管相比,具有谱响应宽、没有滞后、易于冷却等优点,与阵列式的电荷耦合器件 (CCD) 比,也有长处。

自扫描光敏二极管阵列应用方面的主要特点是能有效地进行弱信号检测和快速过程检测。

检测弱信号时的优点是: (1) 如果用 N 个光敏二极管组成的阵列收集光谱的积累时间与用单色仪加光电倍增管系统取 N 个点扫描同一段光谱所需的总的时间相同的话,理论上,阵列噪声应为单道系统噪声的 $1/\sqrt{N}$ 。(2) 与其它多道系统相比,阵列可冷却到较低温度,还可增加积累时间,对采集弱信号特别有利。

阵列最吸引人的是它的速度。对于一次脉冲的光瞬态过程和光照下样品有损伤的过程,取得信号的速度就变成最重要的了;连续快速收集多个光谱可反映在时间过程中变化的光现象;还有一些光学实验室的激光系统的监控,都需要快速并能实时显示的系统。以 1420 型探测器及其 1460 型主机 (OMA-III) 为例,在实时扫描工作方式下,每 16ms 可扫完一个谱,平均每个象元 $16\mu\text{s}$ 。如果应用几个象元采集一个数据(分组扫描方式)和快速扫过不需要数据的象元 ($0.5\mu\text{s}/\text{象元}$ 的快速扫描方式) 等功能,取谱速度还可加快。因此用 1420 型这样的阵列探测器来做快速过程的光检测或测量变化过程的时间分辨谱是很有效的。

自扫描光敏二极管阵列的发展方向集中在两方面: 一是增加一维阵列的象元数目,二是生产二维阵列以代替光导摄像管类的二维探测器。

EG&G 的 PAR 公司最近已推出 1024 个象元全部增强的 1421 型(可选通)和 1422 型(不可选通)探测器。除了增强的象元数比 1420 型多以外,光谱响应范围都很宽,后者特别向红色波段范围加宽。有消息报道^[4], 国外有些厂

家正在制作 3456 个象元的一维阵列。

实现二维自扫描光敏二极管阵列探测器的困难除了对阵列本身的制作工艺要求很高以外,还需要与之相配的计算机系统有很大的存储量。例如 OMA-III 的 1460 型主机用以控制 1420 型一维阵列探测器时,加上扩展的 RAM,可连续存贮 1024 个点的光谱 1000 条左右,可以说存储量已经不小了。但试想如果用来存贮 1024×1024 个点的二维阵列收集的谱图,仅够存一个! 那末,在测量时间分辨谱时,要连续取多个谱图,就还要大规模增加存储能力。

现在 EG&G 的 Reticon 公司(专门生产阵列的公司)已有 RA-50 \times 50A 和 RA-32 \times 32A 的二维阵列产品,象元总数分别为 2500 个和 1024 个,图 6 为其示意图。X, Y 两个移位寄存器分别由二相时钟带动扫描。

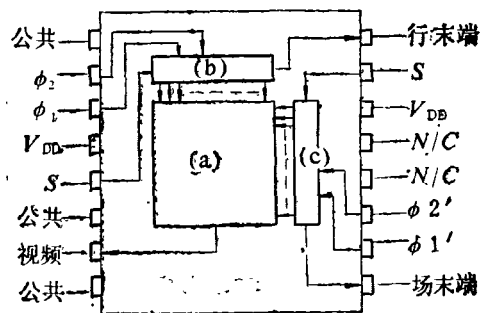


图 6 二维光敏二极管阵列

(a) 光敏二极管矩阵; (b) X 移位寄存器;
(c) Y 移位寄存器

最近在有关刊物上也报道了 1024×1024 的二维阵列开始投入生产的消息^[4]。

陈佳圭同志为本文提供了资料,并提出了宝贵意见,特此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Y. Talmi and W. Simpson, *Appl. Opt.*, 19(1980), 1401.
- [2] L. N. Koppel, *Rev. Sci. Instrum.*, 47(1976), 1109.
- [3] S. S. Vogt, R. G. Tull and P. Kelton, *Appl. Opt.*, 17(1978), 574.
- [4] 李朝安译,从征校,国外激光, No. 9(1985), 33.