

捕捉瞬变光现象的利器

——超高速变象管相机

周 旋

(中国科学院半导体研究所)

许多人早已熟悉普通相机的原理、性能和操作,但对高速照相技术可能还比较陌生。顾名思义,高速照相技术主要是研究高速运动目标或瞬变光现象和流逝过程的复演(摄影)问题。对照相系统而言,所谓“高速”指两个方面:一是意味着具有很高的拍摄频率(用单位时间内拍摄多少帧图象描述);另一个含义是时间分辨能力,即该照相机能够捕捉多快的瞬变过程(对于快门式相机,用最短曝光时间描述)。这两者是互相联系的。当要求较高拍摄频率时,实际上也同时提出了对较高时间分辨率的要求。

对于具有机械式快门的普通照相机来说,最短曝光时间为几千分之一秒,对于拍摄日常生活中的大部分运动目标,已经具有足够的时间分辨率。然而在科学研究中所涉及的许多光现象和流逝过程要短促得多,以致用普通照相机摄取这类高速现象是完全不可能的。除要求极短曝光时间外,高速摄影遇到的另一个困难是目标物的光强度问题。照相过程的实质,就是使记录底片获得一定的曝光量。当曝光时间极短时(这是拍摄高速现象所必须的),为了获得一定曝光量,就要求极高的照度。为适应现代科学和技术的发展,已经出现了各种类型的高速照相设备,诸如转镜相机、克尔盒(或普克尔盒)式相机以及采用激光光源的全息相机等。这些相机都获得了不同程度的应用。但是,直到采用近代的具有微通道板的变象管作为信息变换部件的高速相机出现以前,还没有那一种相机(如变象管相机)能较好地解决高速响应和高灵敏度这二者之间的矛盾。

这里介绍的两种超高速变象管相机——单次快门式和扫描条纹式相机,是目前超高速相机发展的主流。特别是扫描条纹相机的时间分辨率已小于 1ps ,是研究皮秒时域范围内高速现象几乎唯一可用的仪器。可以预料,高速变象管相机作为一种新颖的光测量仪器,将会在科学研究中发挥越来越大的作用。

一、捕捉单次光现象的高速照相的基本问题点

我们以气体放电的电光研究为例,阐述超高速照相技术所要解决的一些基本问题。

利用火花隙研究气体放电过程,是了解高压下气体击穿特性的基本方法之一。气体放电具有如下特点:

(1) 气体击穿取决于火花隙极间电压,气体离化程度等多种因素,因而难以事先精确确定发生击穿的时刻。气体击穿过程大致分成三个阶段。在初始阶段中,尽管火花隙电极间已加有直流高压,尚需经过一段延迟方能产生用于雪崩倍增的初始电子。接着雪崩倍增开始,雪崩电流迅速上升并达到其临界值。最后,火花隙间的气体完全击穿并形成导电沟道。无疑若能将整个击穿流逝过程记录下来,可从中将获得大量有用信息。可是,气体放电在达到它的临界点以前只伴有微弱的光辐射产生,因而拍摄气体的预放电过程,要求相机具有极高灵敏度。

(2) 气体放电过程的持续时间是短促的,尤其是在具有很高介电常数的压缩气体(如

SF₆) 中, 持续时间已进入纳秒范围。因而, 为了捕捉这种瞬变过程, 相机必须具有相应的尽可能短的曝光时间。气体击穿实际上是单次现象, 击穿发生的时间点又难以事先准确确定。因此, 为了记录这种过程, 相机的快门必须由被测事件本身启动。由于这个原因, 从事件发生到相机快门开启之间, 必然存在一段延迟时间。这个时间必须尽可能缩短, 才有可能记录到被测现象的初始过程。当然可以通过延长从被测物到相机物镜之间的光路来补偿上述延迟时间的影响(在空气中, 1ns 相应 30cm 长光路)。但这样做在技术上并不总是可行的, 因为它使本来已很微弱的光辐射将进一步衰减。最好的解决办法是相机本身具有光增强的能力。

(3) 伴随气体放电的光辐射, 可能具有很宽的光谱范围。因此, 相机也应具有相应的光谱响应范围, 并最好能将很宽范围的人射光直接转换成适于肉眼观察或普通胶片记录的可见光谱。

(4) 照相的目的是为了真实复现被测目标。为了对火花隙放电沟道进行精细研究, 相机还应具有尽可能高的空间分辨率和尽可能小的失真。

根据上述特点, 对用于气体放电过程研究的照相系统, 可归纳出以下几项基本要求: (1) 具有很高的时间分辨率; (2) 具有很高的、可调的光增益; (3) 可以由被测事件本身触发启动, 并具有尽量小的触发延迟和晃动; (4) 具有宽广的光谱响应范围; (5) 具有较高的空间分辨率; (6) 具有丰富的信息处理功能; (7) 结构紧凑和小型轻量。

上述各项基本要求也是高速摄影技术长期以来所致力解决的主要问题。变象管相机能兼顾上述各项基本要求, 它已成为捕捉、记录和分析瞬变光现象的利器, 在高速现象的研究中起着十分重要的作用。

二、几种常用高速光闸的比较

光快门(光闸)是任何类型快门式相机中的

核心部件。机械式快门提供的最短曝光时间大致在 50ns 左右^[1]。克尔盒和普克尔盒是最早用作光快门的电光元件, 但它们都具有光谱响应范围窄、开启电压高以及对传输光的能量损耗大等缺点。基于电子光学原理的新型变象管的出现, 为高速摄影技术的发展, 增添了新的推动力。

变象管的种类和结构是十分多样化的。但各种形式的变象管都包含一个基本原理: 首先借助光阴极形成被测目标光图象的电子模拟, 然后对由光阴极释放的光电子进行控制, 使其在强电场作用下加速。最后这些高能光电子与荧光屏(阳极)碰撞, 激发荧光, 由此形成二次光图象。该图象可通过人眼观测或用常规照相技术记录。

由于对电子束进行控制和放大比较容易, 从而使变象管可用作近似无情性的高速光快门。不同类型变象管, 主要是根据控制电子束所采用的不同方法加以区分的。值得一提的是, 近代发展了一种称为近贴聚焦的方法, 其实质是使光阴极与光屏极表面相距极近(仅数毫米), 以致在光阴极表面附近形成的电子云能够被强电场加速并沿电场梯度直接走向光屏极, 而不引起显著的弥散。这种仅包含光阴极和光屏极的变象管, 称作二极管型变象管。当它用作光快门时, 在两个电极间加有 5—10kV 的脉冲电压。如果在这种变象管中再设置第三个电极(控制栅), 则成为三极管型变象管。在控制栅只须几十伏电压, 就能对电子束起到有效控制作用。在最近十余年间, 又出现了一种更新的具有微通道板的近贴聚焦式变象管。由于它

表 1 不同类型光闸的典型性能比较

	光增益	响应时间	控制电压	运用方式
克尔盒	0.1	100 ps	15~30kV	单帧
普克尔盒	0.5	100ps	1~5kV	单帧
二极管型变象管	10	<1ns	5~10kV	单帧
三极管型变象管	100	<1ns	200V	多帧或条纹记录
具有MCP的近贴聚焦变象管	10 ⁴ —10 ⁵	<1ns	200V	单帧

具有极快的响应时间和很高的光增益以及灵活的控制能力,已被广泛用于高速摄影技术中。不同类型电光式高速光闸的典型性能比较见表 1。

三、最简单的二极管型变象管

二极管型变象管的基本结构示于图 1。入射光照射到光阴极 P,并从中释放出光电子,从而在光阴极表面附近形成电子云。若在光阴极 P 和阳极 A 之间加有直流高压,则光电子将被强电场加速并通过适当的电子光学系统 O,又被聚焦于光屏极(阳极) A,并从中再次释放出光子,结果在光屏极处形成了光的图象。通过上述光-电和电-光的两次变换,入射光图象得到了增强,这类具有图象增强能力的变象管称作象增强器。必须指出,对于光阴极和阳极相距极近的近贴聚焦变象管,实际上不存在附加的电子光学系统 O。只是由于光阴极和阳极相距极近(数毫米),当电极间施加数千伏高压时,场强极高。故从光阴极释放的光电子将处于一个类似平板电容器的均匀电场中运动,并被电场加速几乎平行地到达光屏极,由此实现了电子束聚焦。

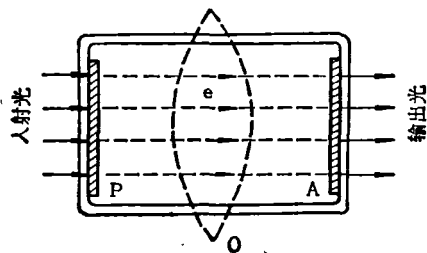


图 1 二极管型变象管

采用近贴聚焦二极管型变象管作为光快门的单次高速摄影的原理如图 2 所示。

从被测物 G 发出的光,通过物镜 O_1 聚焦于光阴极 P 的表面。另一方面,与被测光现象同步的光信号经过光电转换变成启动高压窄脉冲发生器工作的电触发信号。发生器输出的高压窄脉冲加在变象管的光阴极和光屏极之间。在脉冲宽度作用时间(即曝光时间)内,从 P 发出

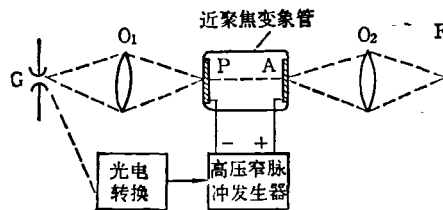


图 2 用变象管作光快门的单次高速摄影原理

的光电子被强电场加速,而后与光屏极碰撞激发产生新的光子,形成新的可见光图象。在光屏极处形成的光象借助透镜 O_2 ,在记录底片 F 上成象。

对于碰撞到光屏极表面的每一个入射高能电子,有可能产生许多个光子(典型值为 100—200),因而变象管本身是具有很高光增益的元件。然而,这种由电子激励的光放大却被下述两个因素几乎完全抵消了。第一,光阴极的典型量子效率仅约 20%;第二,由高能光电子碰撞光屏极产生的光子完全无规地向各个方向散射,由此形成的输出光强度分布也是弥散的,考虑这些因素后,图 2 所示照相系统总的光增益接近 1,故性能不能令人满意,尤其不适用于弱光目标。

四、具有微通道板和光纤耦合窗的新型变象管

近年来所取得的两大技术进展,极大地改善了上述二极管型变象管的性能。第一个进展得益于光纤技术的成就。用一个光纤耦合窗代替二极管型变象管的普通输出后窗,允许将一个平面上产生的光图象几乎无畸变地传输到另一个平面。由于光象传输效率提高,使得照相系统总的光增益从接近 1 提高到 15—30。在技术上所取得的第二个进展,是采用所谓微通道板(MCP)结构^[2]。

一个具有 MCP 和光纤输出窗的新型近聚焦快门管的结构如图 3 所示。光阴极和 MCP 的输入平面之间以及光屏极与 MCP 的输出平面之间,相距均为数毫米(即近贴聚焦)。光阴极电位比 MCP 输入端电位要低,来自光阴极

并携带图象信息的光电子投射到 MCP 的输入端面并进入微通道内部。在 MCP 的输入和输出端面之间加有典型值约 1kV 的加速电压。进

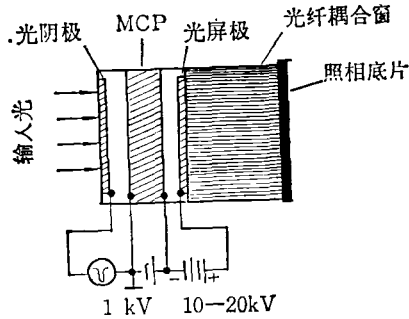


图3 具有 MCP 和光纤输出窗的快门管

入微通道内部的电子经倍增后将重新出现于 MCP 的输出端。从 MCP 输出的电子又被 10—20kV 的高压加速，并通过约几毫米的间隙到达光屏极，激发荧光。荧光图象经光导纤维传送至照相底片。这样构成的照相系统，在光阴极和照相底片之间取得的总的光增益高达几十万倍！必须指出，这种变象管用作光快门时，在光阴极和 MCP 输入端之间施加的是脉冲电压，曝光时间则由选通脉冲宽度所决定，通常在纳秒范围。因此，这种具有 MCP 和光纤耦合窗的新型变象管，特别适用于高速弱光目标的检测。

五、具有微通道板的条纹变象管

条纹变象管是构成条纹相机的核心部件。图4表示一个最简单的扫描条纹相机系统^[3]。所用条纹变象管和图3所示快门管的主要区别，在于前者增添了一对扫描偏转板和必要的附加电极。条纹相机的工作原理简述如下：被测光(比如一组激光脉冲)借助光分束装置被分成两路。一路经狭缝(典型值 $10\mu\text{m}$)和辅助光学系统成像于光阴极上，由此激发产生的光电子经过聚焦和加速进入偏转板。与此同时，另一路光信号经过光电转换为启动高压斜波(扫描电压)发生器工作的电触发信号。该发生器输出的一对推挽的快速上升的高压斜波脉冲

物理

被加到两个偏转板电极，因此进入偏转板的光电子束在与偏转板平面垂直的方向上按时间被展开。然后，被展开的光电子束进入 MCP，在大大倍增以后到达光屏极并激发荧光，于是在光屏极处得到增强的光图象。由于输入光信号是一组光脉冲，在光屏极上获得的将是亮度变化的条纹，这种条纹变化反映了光强随时间的变化。经过显微密度计变换，则可获得被测光脉冲的波形。

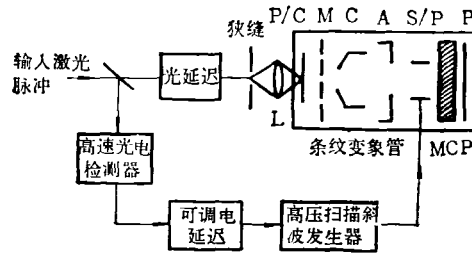


图4 简单的扫描条纹相机系统

L为透镜；P/C为光阴极；M为栅网；C为聚焦电极；A为阳极；S/P为偏转板；MCP为微通道板；P为光屏极

条纹相机的时间分辨率，不仅取决于变象管本身的物理设计，也同外扫描电路有关。目前时间分辨率已小于 1ps，据称有可能达到 10 fs^[4]。

六、变象管的脉冲控制

快门式变象管与控制其快门作用的选通脉冲发生器相结合，便构成具有高的光增益和快速响应的最简单的快门式变象管相机。同样，扫描条纹变象管与控制光电子束偏转的扫描发生器相结合，便构成最简单的扫描条纹相机。毫无疑问，这两种变象管相机的性能主要取决于所用变象管本身，但是这里也存在着一个如何有效地利用变象管性能的问题。特别是，快门式变象管相机的两个重要性能指标——光增益和曝光时间直接取决于选通脉冲的幅度和宽度；而扫描条纹相机最重要的性能指标——条纹速度直接取决于扫描电压脉冲的幅度和上升时间。总之，两者都归结于对高压高速脉冲的

需求,在所用变象管确定之后,变象管的脉冲控制便成为变象管相机研制中的关键技术问题之一。

对用于变象管控制的脉冲发生器的基本要求可概括如下:(1)具有很高的输出脉冲幅度和所要求的极性;(2)具有所要求的脉冲形状(对于快门式相机,要求尽可能接近矩形;对于条纹相机,则要求线性度良好的斜波)和窄的脉冲宽度(或快速上升);(3)发生器是可触发的(电或光),并且有尽可能小的触发延迟和触发晃动;(4)具有较强的容性负载能力;(5)体积小、重量轻、能长期可靠运用。

在一个相当长的时间内,是采用闸流管或火花隙等作为变象管的控制脉冲源。在此涉及的触发延迟和晃动都比较大。随着各种新型高速半导体器件的出现,变象管的控制脉冲源已逐步为具有优良性能的固体脉冲源所取代^[5-8]。

七、超高速变象管相机的基本组成与应用

如上所述,有各种类型的超高速照相系统。对于采用变象管作为信息变换部件的高速相机,变象管及相应的控制脉冲发生器是不可缺少的两个基本组成部分。图5表示高速变象管相机系统的基本方框图。其中图象信息处理单元的设计是十分灵活的,可视具体情况而定。

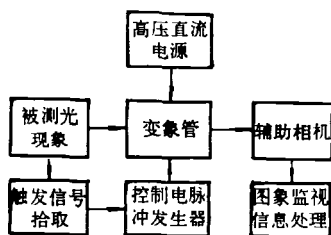


图5 超高速变象管相机的组成

迄今介绍的高速相机是所谓“单帧”相机,即对应一次触发信号(与被测光现象同步),产生一个用于快门式变象管的选通窄脉冲,或产生一次用于条纹变象管扫描的高压快斜波脉冲,从而使高速相机在相应的时间内拍摄目标

图象,获得一帧照片。尽管曝光时间(或扫描时间)很短,但是相邻两次曝光(或两次扫描)之间的间隔时间却很长,因而实际上可以认为照相是单次进行的。在实际应用中,有时需要对被测目标进行连续摄影,即希望获得多帧照片。此时必须在上介绍的变象管的基础上,增加附加控制电极和相应的控制电路。比如,对快门式变象管,可在每次曝光后,用阶梯电压偏转电子射线到荧光屏的另一位置作下一幅曝光。这样,每次曝光不仅在时间上是错开的,在空间上也处于荧光屏上不同位置。经多次曝光,可获得若干幅相片。这种多帧运用方式在实际应用中具有很重要的意义。例如可以拍摄飞行体(如导弹)的姿态变化和火花隙中放电沟道的演变等等。当然,对于确定尺寸的荧光屏而言,分幅越多,图象越小。文献[9]还介绍了一种析象型的特殊分幅变象管,它能记录三帧分幅图象,分幅周期小于100ps,采用这种变象管的分幅相机已被用于激光核聚变的研究。为了用扫描条纹相机研究极高重复频率的高速光现象(如检测连续锁模激光脉冲序列),可用高频正弦波电压代替线性斜波电压作为条纹变象管的扫描信号。这种扫描方式称作“同步扫描”(synchroscan)^[10]。现在标准的商品扫描条纹相机(如IMACON 675型)已配备这种同步扫描装置。

具有MCP的各种类型的超高速变象管相机,由于具有极高的光增益和极短的时间分辨率,已成为高速现象研究中不可缺少的工具,其应用范围涉及许多重要的科技领域。除上述超高速变象管相机应用于气体击穿、激光核聚变和超短光脉冲测量等方面外,还可应用于激光产生等离子体的测量、分子激活态的研究、X射线诊断、非线性光学、皮秒光谱学、荧光光谱学、同步加速器辐射、爆炸、光通信和光信息处理以及光生物学、光化学、光物理学等各个方面。当然,为了适应不同的应用目的,需要将图5所示基本照相系统加以变通或扩展,所用变象管类型也要视具体研究对象加以选择,但就变象管相机涉及的一些基本问题而言,大致如本文所述。(下转第164页)