

一种新颖的光电测量仪器——条纹照相机

滕永禄 雷仕湛

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

人们很早就希望得到闪光时间(在物理学上叫做光脉冲宽度)很短的光脉冲,用以研究一些变化迅速的物理和化学过程。激光器发明之后,人们的这个愿望实现了。现在,人们采用诸如行波激发或共振腔瞬态响应的短脉冲激发法、谐振腔品质因素调制法,采用外部光调制的高速波形整形法以及等离子体开关法等,得到的闪光时间已经可以短到 3×10^{-14} s^[1]。怎样测量闪光时间这样短暂的一些光脉冲呢?

一、测量光脉冲宽度的方法

测量光脉冲宽度和它的波型最常用的仪器就是光电接收器加上电子射线示波器(下面简称为示波器测量)。频带宽度 1000 MHz 的示波器,能够测量闪光时间短到几百皮秒(ps)的光脉冲。频带宽度为 18 kHz 的取样示波器,能够显示出闪光时间为几十皮秒的光脉冲信号。但是,闪光时间比这还短的光脉冲,在示波器的荧光屏上观察到的是一条直线,就没有办法测量这光脉冲的宽度了。

怎样才能迅速、准确地测量出超短光脉冲的宽度?目前主要的测量方法有两类:一是采用非线性光学原理,如二次谐波、三次谐波、双光子荧光、四光子参量混频等技术以及非线性光化学或光电子学方法;二是用条纹照相机,采用非线性光学方法测量,所需仪器设备比较简单,一般普通实验室都可以进行。但是,测量的准确性比较差,而且有的方法实验手续还比较繁杂。条纹照相机则相反,它测量的准确度比较高,除了能够测量光脉冲的时间宽度之外,还能够测量光脉冲强度的空间分布。不过,条纹照相机的价格非常昂贵,普通实验室,甚至是较

大规模的实验室,目前也还很少配备这种仪器。

条纹照相机,也称象转换管条纹照相机,它是综合了电子光学、电子学、纤维光学及半导体技术等新成果而发展起来的新型光电仪器。国际上从 1968 年开始研制,在 1971 年制成第一代条纹照相机。当时采用的是磁聚焦象增强器与象转换管相配合,但因体积过于庞大(长约 2.5 m),不久也就被淘汰了。现在采用的是平板型微通道板象增强器,整机体积得以大大缩小,与一台普通的示波器尺寸大小相仿。利用条纹照相机,我们可以测量闪光时间短到 0.5 ps 的光脉冲^[2],目前还正在研制能够探测闪光时间短于 0.1 ps 的条纹照相机。

二、工作原理

为什么用条纹照相机能够测量宽度短到皮秒的光脉冲,而用示波器则办不到?为了说明这个问题,我们得先了解用示波器测量脉冲宽度所受到的限制。利用示波器测量光脉冲需要光电接收器(比如光电二极管)和示波器。光电接收器把光信号转换成电信号,再由示波器显示、计量。这种测量办法有两个因素限制了测量的时间分辨率。第一个因素是光电接收器的响应时间受材料、制作工艺和结构的限制,不能做到很短,一般也就在几十皮秒左右。第二是示波器显示信号的上升时间受到其放大器频带宽度的限制。因为从光电接收器输出的电脉冲信号,通常是很微弱的,要想在示波器的荧光屏上显示出来,必须对信号进行放大。脉冲信号愈窄,根据傅里叶变换原理,相应地它的频谱也就愈宽。也就是说,需要频带很宽,而增益又很高的放大器。例如,要显示上升时间为 70 ps 的

光脉冲,就要求频带宽度达 5 kHz 的放大器。对于放大器来说,增益与频带是不能同时提高的,要增益高一些,就得牺牲频带宽度。由于这个原因,示波器的脉冲上升时间不可能做得很快,一般也就在 100 ps 左右。由于上述的原因,采用示波器目前只能测量短到大约 100 ps 的光脉冲,脉冲宽度再短的光信号,就需要寻找其它测量办法。

条纹照相机正是针对示波器测量的弱点,加以改革之后研制而成的新型测量仪器。重大的改进就是把光电探测器和信号显示这两部分合在一起了,即仪器本身就能够直接将光信号显示成像。具体的做法是:将示波管的热阴极去掉,改成光阴极,这样一来,示波管也就可以兼有接收器和显示器的作用了。为了使信号能够清楚地显示出来,再采用象增强技术即可。光阴极材料的信号响应时间极快,可达 10^{-14} s。如果再考虑到制造工艺、结构等方面的影响,获得 10^{-13} s 的响应时间是没有问题的。电子光学处理系统的时间响应也极为迅速。所以,利用这个办法便能够探测脉冲宽度非常窄的光信号。此外,条纹管光阴极发射出来的光电子,经电子光学系统聚焦、偏转加速和增强之后,以高速线性扫描方式成像于荧光屏上,即可把时间变量转换成了空间变量。所以,从条纹照相机荧光屏上记录下来的信号,包含有时间和空间两种信息,亦即利用这种仪器可以同时获得光信号的持续时间和强度的空间分布情况。

三、脉宽测量

被测量的超短光脉冲照射到条纹管光阴极上,同时用照相底片把荧光屏上的图象记录下来,经微密度计对底片扫描后即可获得光信号的强度随时间变化波形,据此就可算出光脉冲的宽度。用条纹照相机所测得的光脉冲的时间宽度 τ ,通常包含下面三个部分的贡献,即^[3]:

$$\tau = (\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2)^{1/2}, \quad (1)$$

这里的 τ_1 是被测光脉冲本身的宽度, τ_2 是由条纹照相机引起的的时间加宽,它按下面的公式计

算:

$$\tau_2 = 1/(\nu\delta) \quad (2)$$

这里的 ν 是条纹扫描速度(常用单位是 cm/s), δ 是条纹管空间分辨率(常用单位是线对/mm); τ_3 是电子从光阴极到荧光屏的渡越时间。

公式(1)中的 τ_2 和 τ_3 是由条纹照相机本身的技术参数决定的,为了提高条纹照相机的时间测量精度,应尽量提高条纹扫描速度 ν 及条纹管空间分辨率 δ , 并尽量减小电子渡越时间 τ_3 。计算表明,如果要求 τ_2 小于 10^{-12} s, 那末条纹扫描速度就要大于 10^{10} cm/s, 空间分辨率要大于 10 线对/mm。采用激光触发的火花隙、雪崩管或者冷阴极闸流管等高压快脉冲技术,是可以达到这些要求的。

光电子的渡越时间 τ_3 由光电子初始能量分布半宽度(用 $\Delta\epsilon$ 表示)和光阴极表面的电场强度(用 E 表示)决定,如果前者以电子伏为单位,后者用静电单位,那么, τ_3 可以用下面的式子计算^[4]:

$$\tau_3 = 7.8 \times 10^{-11} [\Delta\epsilon^{2/3}/E]. \quad (3)$$

由此可见,减少 τ_3 的办法是提高在光阴极表面上的电场强度 E , 减小电子能量分布的半宽度 $\Delta\epsilon$ 。采用 S-1 光阴极,用波长 $1.06\mu\text{m}$ 的激光照射的话,得到的光电子能量分布半宽度 $\Delta\epsilon$ 大约是 0.3 eV。所以,如果要求 τ_3 小于 10^{-12} s, 就要求在光阴极表面处建立 40 静电单位(相当于 12000 V/cm)的电场强度。用精制的网状电极,放在光阴极前几厘米处,是能够得到这样高的电场强度的。

从理论上来说,条纹照相机可以测量短到 10^{-14} s 的闪光时间,但是,由于动态范围要至少大于 10,因而实际上可测量的最短闪光时间并不能达到这个数值。

下面我们以测量高功率脉冲激光照射金属钨靶发射的 X 射线脉冲为例,介绍一下用条纹照相机测量光脉冲宽度的过程和做法。图 1 是实验装置的示意图。一束高功率激光脉冲通过非球面靶镜聚焦到钨靶上,在靶面附近将产生高温等离子体,同时发射出光子能量大约几千电子伏的 X 射线。用钛箔作滤光片,选择出其

中某种光子能量的 X 射线,经狭缝或者针孔后,将其阴影像投射到条纹管光阴极上。光阴极附近的电场强度通常为 5—6 kV/cm,条纹扫描速度是 2×10^9 cm/s 左右。从光阴极发出的光电子经栅网电极加速和静电聚焦后进入偏转电场。与此同时,在偏转电极上加一锯齿形扫描电压,使电子自上而下扫描,扫描位移大小与时间成正比。为了使被测信号与偏转电极上所加的偏转电压严格同步,通常由主激光束分出一小部分,经快响应光电管转变成电信号,用来触发偏转电压发生器。光电子经扫描偏转后射到荧光屏上,再经过光纤板耦合系统进入微通道板象增强器,增强后,通过光纤板与照相机联结,即可得到具有一定亮度的条纹扫描图像。图

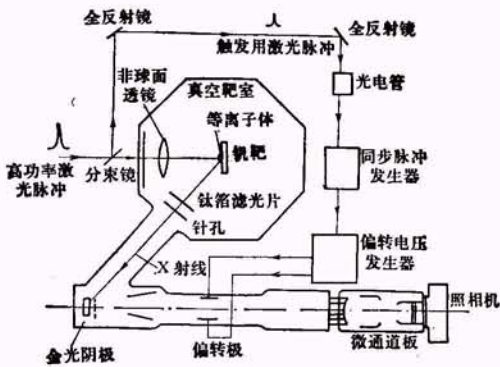


图 1 用 X 射线条纹照相机观测激光等离子体 X 射线脉冲宽度实验装置示意图

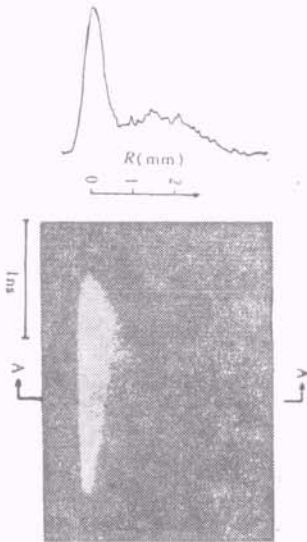


图 2 钨靶发射的 X 射线条纹照片 (左图是 AA 剖面的密度曲线)

2 是记录得到的典型照片¹⁾。用尺子从图上量出亮纹的长度,再根据记录这条条纹时所用的扫描速度,便可以获得被测光信号的脉冲宽度。例如,图 2 中的亮条纹画面长度是 5cm,扫描速度是画面长度的 2.7 cm 即相当于 1 ns,由此可以算得实验中产生的 X 射线光脉冲宽度大约是 1.8 ns。

此外,利用微密度计测量亮条纹各处的黑度,便可能得到被测光脉冲强度的空间分布。图 2 中左面的图就是亮纹在 A-A 剖面处的黑度扫描曲线。

条纹照相机除了能够对单一超短光脉冲进行观测外,也能够观测重复频率的超短光脉冲序列。在这种情况下,扫描偏转电压是以锁模脉冲序列的重复频率同步驱动的。

四、基本结构

图 3 是典型条纹照相机基本结构示意图。它主要由象转换管(亦称条纹管)、入射及出射光学系统、扫描偏转电压发生器、分幅控制及校正电路、微通道板象增强器、高压电源以及用高感光度记录软片的照相机或电视摄像系统等部分组成。早期的象转换管是由阴极射线示波管改制而成的,即把示波管的热阴极换成 S-1 U 或者 S-20 光阴极。如果是在 X 射线波段使用

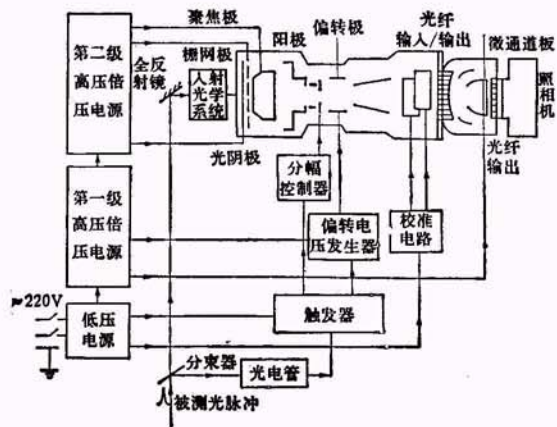


图 3 典型条纹照相机的基本结构示意图

1) 本照片取自作者访德的研究报告。

(即X射线条纹照相机), 则用金阴极或者镀膜镀金阴极; 再把第一栅极换成栅网电极。近年来, 大多数条纹照相机均采用了微通道板象增强器及光纤耦合系统, 使增益提高, 仪器体积缩得更小。同时还用光学多道分析器取代照相机, 便于信息存储及数据处理。

象转换管的时间响应特性, 直接影响到整套仪器测量的时间分辨率。如前所述, 提高条纹扫描速度和光阴极表面的电场强度, 同时设法避免光阴极饱和及空间电荷效应, 减少光阴极表面电阻及光电子的渡越时间, 是提高仪器测量快速闪光时间性能的重要措施。

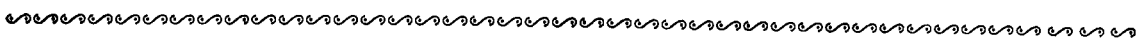
此外, 条纹照相机整机的时间分辨率还取决于条纹管光阴极和荧光屏的空间分辨率, 以及加在偏转电极上的电压上升时间。空间分辨率常以每毫米能分辨多少线对来表示, 常用的象转换管光阴极的空间分辨率, 大约是每毫米30线对, 荧光屏则略为低一些, 约为10至20线对。如果采用5kV的偏转电压, 它的上升时间小于1ns, 在荧光屏上可以得到的条纹最大偏转速度约 2×10^{10} cm/s。在这种工作状态下, 条纹照相机整机的时间分辨率可达几个皮

秒^[4]。

现有的商品条纹照相机, 大部分以条纹扫描方式工作, 而分幅扫描照相机虽然已经有商品出售, 但性能质量还欠佳。此外, 根据取样示波器的工作原理, 近年来又发展了一种皮秒光波取样示波器。它是将电信号取样技术与激光技术结合起来, 利用锁模激光器产生的皮秒光脉冲作为光开关信号, 就能够成功地显示脉冲宽度10至30ps的光信号。但这种仪器目前还处在研究试验阶段, 尚不能作为通用的光波显示测量仪器使用。预计随着超短光脉冲技术进一步发展, 更高时间分辨率(短于0.1ps)的条纹照相机不久将会出现。

参 考 文 献

- [1] R. L. Fork et al., *Appl. Phys. Lett.*, **38-9** (1981), 671.
- [2] N. H. Schiller et al., *Photonics*, **16-3** (1982), 56.
- [3] V. V. Korobkin et al., *J. Photog. Sci.*, **17** (1969), 179.
- [4] M. YA. Schelev et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **43-12** (1972), 1819.
- [5] 齐藤博, 应用物理, **45-4**(1976), 306.



(上接第632页)

存在着一些具体问题。例如, 如何选择参考图形; 如何排列特征图形, 使得构造正交矩阵更为方便计算和使用; 如何寻找在构造正交矩阵时还需要补充进的基矢…。

随着技术的发展和更多的设计经验的积累, 我们相信, 上述诸问题将会得到合理的解决和改善的。用光学方法实现普遍变换的前景是广阔的和乐观的。

参 考 文 献

- [1] J. W. Goodman 著, 詹达三、董经武、顾本源译, 傅里

- 叶光学导论, 科学出版社, (1976).
- [2] 中国科学院物理研究所、化学研究所光塑全息小组, *物理*, **3**(1974), 264.
- [3] 霍裕平、杨国楨、顾本源, *物理学报*, **24** (1975), 438.
- [4] 霍裕平、杨国楨、顾本源, *物理学报*, **25** (1976), 31.
- [5] 霍裕平, *物理学报*, **27** (1978), 487.
- [6] 杨国楨、顾本源, *物理学报*, **30** (1981), 414.
- [7] 程 路, *物理学报*, **31** (1982), 386.
- [8] 杨国楨, *物理学报*, **30**, (1981), 1340.
- [9] 杨国楨、潘少华, *物理学报*, **29** (1980), 1301.
- [10] 陈岩松、王玉堂、李秀英, *物理学报*, **29** (1980), 1307.
- [11] 霍裕平, *物理学报*, **29** (1980), 153.
- [12] 刘济林、戴建华、张洪钧, *物理学报*, **31** (1982), 437.