

四通道 X 射线 MCP 行波选通分幅相机

山 冰 常增虎 刘进元 刘秀琴

高胜琛 任有来 朱文华 骆永明 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

成金秀 杨存榜 温天舒 唐道源 温树槐

(西南核物理与化学研究所, 成都 525-77 信箱, 成都 610003)

摘 要 简述了 MCP 行波选通分幅相机的工作原理及技术指标, 报道了最新研制的四通道行波选通分幅相机的研制结果及使用情况, 相机可接连拍摄 12 幅图象, 每幅象的曝光时间为 60 至 100ps、空间分辨率 15 lp/mm 时调制度 10%, 观测时间在几百皮秒至几纳秒内可调。在星光装置上的使用表明相机的实用性强、抗干扰能力高, 并在国内首次较全面地测量了各种靶型的时间分辨分幅结果。

关键词 超高速摄影; 皮秒; 变象管; 微通道板

0 引言

X 射线皮秒分幅相机是激光核聚变及激光等离子体物理研究的重要工具。激光核聚变实验的整个过程发生在数纳秒内, 对实验过程中等离子体不稳定性及聚爆对称性等的研究希望测出等离子体温度和密度二维空间分布及其随时间的变化, 皮秒分幅摄影技术就是为此而发展起来的。

微通道板行波选通技术是近年来才发展起来的一门实用性较高的新型分幅技术, 具有画幅数多、动态范围大、抗干扰能力强、灵敏度高等一系列优点。国内外从八十年代中期就开始研究¹⁻³, 但当时用光电导开关产生皮秒高压快门脉冲, 难以实用化。近年来随着皮秒高压电脉冲技术的突破, 这种技术的研究取得了很大进展⁴⁻⁶, 并在惯性约束聚变等激光等离子体研究中取得了一些应用。

除惯性约束聚变研究外, 由于这种相机的光阴极对从真空紫外到 X 射线范围的电磁辐射都有响应, 它在 X 射线激光、等离子体物理、强场物理等研究中有着重要的应用。如果将阴极更换成近红外或可见光光阴极, 则对激光、光物理、光化学、光生物等瞬态光学现象的研究有广阔的应用前景。

我们此前曾报道对单条弯曲微带线阴极的 MCP 行波分幅相机, 本文报道我们最新研制的实用型 MCP 行波选通分幅相机。与单条弯曲微带相机相比, 这种相机具有测量时间范围大、增益均匀性好、使用中各幅象的时间关系灵活可调等优点, 因而具有更高的实用性。

1 工作原理与技术指标

MCP 行波选通 X 射线皮秒分幅相机主要由成像针孔阵列、四通道 MCP 行波选通分幅管、皮秒高压脉冲发生器和图象记录装置构成, 其原理结构如图 1 所示。其中行波分幅管由 MCP 和制作在光纤面板上的荧光屏组成。MCP 的输入面镀有 X 射线光电阴极, 选通电脉冲通过以 MCP 为电介质的微带线加在 MCP 上。

被拍摄等离子体的 X 射线象经多个针孔或针孔光栅同时成在 MCP 的输入面的不同部位, 如果 MCP 上不加电压, 这些 X 射线图象将被 MCP 吸收, 在变象管的荧光屏上没有图象输出. 当宽度很窄的快门脉冲沿微带线在 MCP 上传输时, 某一时刻只有一段微带区域有电压, 经某一个针孔成在该区域的 X 射线象在 MCP 输入而产生的光电子象将被 MCP 增强, 并到达荧光屏形成输出图象. 经过一段传输时间后, 电脉冲到达另一个针孔所成的 X 射线图象区域, 此刻该图象再输出. 这样, 这些针孔所成的象将依次逐个被选通. 输出象用紧贴在光纤面板上的照相底片拍下.

相机的曝光时间定义为 MCP 增益与时间关系曲线的半高全宽(FWHM), 即 MCP 某一点的开门时间, 显然减小快门电脉冲的宽度有利于缩短曝光时间, 但由于 MCP 渡越时间的影响, 曝光时间要小于所加选通脉冲的宽度, 如果电脉冲过窄, 逸出 MCP 的电子数将减小, 导致增益降低. 因此一般实际应用的选通脉冲的宽度为 200~300ps, 对应的曝光时间为 80ps 左右.

整个相机的空间分辨率包括成像针孔的空间分辨率和行波分幅管的空间分辨率, 因为成像针孔的空间分辨率与使用条件有关, 所以一般所说相机的空间分辨率都指的是后者. 这种近贴式管型的空间分辨率由 MCP 本身的空间分辨率、荧光屏的空间分辨率及 MCP 输出面至荧光屏近贴的空间分辨率决定. 由于前两项的空间分辨率远大于 MCP-荧光屏近贴的空间分辨率, 因此整个变象管的空间分辨率主要取决于 MCP-荧光屏近贴的空间分辨率. MCP-荧光屏近贴的空间分辨率实际上就是电子从 MCP 输出后打到荧光屏上的弥散, 可表示为

$$r = 2l \sqrt{\frac{v}{V}} = 2 \sqrt{\frac{v \cdot l}{E}}$$

这里 v 是电子从 MCP 逸出的横向初速度, l 是 MCP 输出面与荧光屏的间距, V 是 MCP 与荧光屏间所加的电压, E 即为 MCP-荧光屏近贴的工作场强.

因此, 缩短 MCP-荧光屏间距及提高此近贴的工作场强可以提高相机的空间分辨率. 但在实际应用中, 这两个参数的选择要保证相机稳定工作(MCP-荧光屏之间不打火击穿), 不能选择过高.

相机所拍摄的画幅尺寸取决于镀在 MCP 上微带传输线的宽度. 由于微带加宽后其传输阻抗也会随之降低, 从而对选通脉冲提出更高要求, 因此实际上是线路的驱动能力制约了相机工作的画幅尺寸.

2 技术路径与关键技术

2.1 快门脉冲

皮秒高压窄脉冲的产生是行波分幅技术的最重要的技术难点. 为使相机能正常稳定地工作, 就必须采用纯电子学线路来产生选通脉冲, 与光导开关技术相比, 这种线路具有触发能量小、输出脉冲不随触发光变化等优点. 目前国际上只有少数几家具具有较完善的技术.

我们先用雪崩三极管线路产生一个有较快前沿的高压斜坡脉冲⁷, 再用此高压斜坡脉冲驱动雪崩二极管脉冲成型线路, 从而得到皮秒高压窄脉冲⁸, 用于行波分幅的皮秒高压窄脉冲一般为⁹ 幅度约 2~2.5kV, 宽度 200~300ps.

对于四通道行波分幅相机所需的选通脉冲, 首要的问题是同时产生四路选通脉冲的技术难度及四路脉冲源间的串扰, 对这种高压超功率线路而言, 产生四路选通脉冲不能简单地将四个脉冲发生器叠加在一起, 我们曾试过用四个斜坡驱动器分别带四个脉冲成型器, 结果因为相互间的干扰很大, 一个驱动源动作后, 其它三个因为干扰信号的影响即使没有触发也会动作.

脉冲线路另外还要解决选通脉冲的一致性问题, 这主要包括四路脉冲的波形一致性和触发一致性,

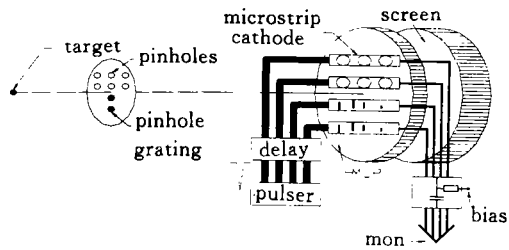


图 1 四通道行波选通相机的原理结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the four-stripline MCP gated camera

只有四路脉冲的波形一致,才能保证在四条微带上测得的信号的可比性;而触发一致性则保证了四条微带间时间上的延续性和一致性.我们目前线路的触发晃动约为 50ps,如果四条微带上的选通脉冲各有 50ps 的时间不确定性,同样会影响到最终四条微带上数据的比较与时间延续性.

经过多次实验,我们最终采用的方案是用一个驱动源来驱动两个脉冲成型线路,最终分出四路选通脉冲,如图 2 所示.这种线路形式最大益处是四个选通脉冲同时产生,而二极管成型线路的晃动很小,各脉冲相互之间几乎没有触发晃动;同时使用同一驱动源也较容易调整成型线路的参数,使各路脉冲波形一致.但这种方案在具体实现上困难较大,特别是对驱动源有较高要求,为此我们在驱动线路与成型线路间又加上了一级二极管整形线路,用以调整驱动脉冲的波形,使之更适于驱动成型线路,从而降低了对驱动线路的要求.

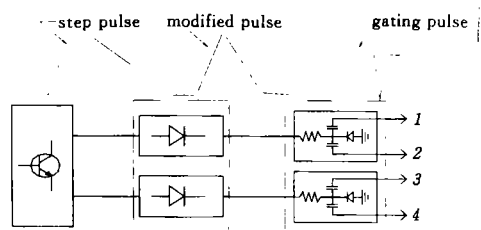


图 2 皮秒高压选通脉冲线路原理结构

Fig. 2 Schematic diagram of gating pulse circuit

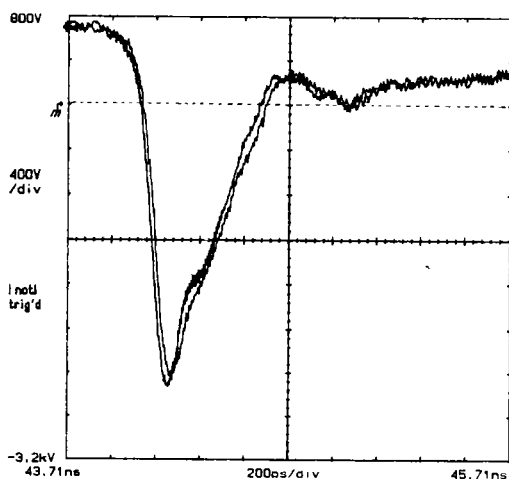


图 3 测得的第一及第三路脉冲

Fig. 3 Measured gating pulses of 1st and 3rd output

图 3 所示为用取样示波器 TEK 11801A 测得的第一及第三路脉冲,每路脉冲宽度约 280ps,幅度约 2.5kV.由图可见两路脉冲的波形基本一致,而一二路及三四路波形因是由同一线路并联输出几乎没有差别,从而这个线路所输出的四个脉冲可以满足四通道行波相机的需要.

2.2 MCP 行波选通分幅管

行波分幅管的特殊之处在于 MCP 上的微带既要保证对 X 光的灵敏度,同时还要兼顾对选通脉冲的传输能力.MCP 的输入面上镀有微带传输线型反射式黄金阴极,传输线的特性阻抗约为 17Ω (6mm 宽微带),而在其上的黄金阴极对 0.1~10keV 范围的 X 射线有较高的量子效率.

如前所述,要得到 100ps 的曝光时间,需用 300ps 或更窄的电脉冲,这就对分幅管的选通脉冲传输通路的频带响应提出了要求.

首先是选通脉冲传输通路的传输能力十分重要,因为加在 MCP 上的有效电脉冲是经过外引线传输进来的,同时此选通脉冲的频带已相当高,因此传统的变象管的引线结构已不能使用,否则会对选通脉冲造成很大的损耗,并引起波形畸变、反射等一系列不良的后果,使加在 MCP 上的波形杂乱或降低了有效电压,从而无法得到真正的选通结果.在我们的相机中,电子线路产生的高压皮秒电脉冲经 50 Ω 同轴电缆送入制作在印刷线路板上的 50 Ω 微带线,再经过一段 17~50 Ω 阻抗变换线与 MCP 上的微带阴极阻抗匹配,通过 MCP 上的微带阴极后,再经过另一段 17~50 Ω 阻抗变换线与 50 Ω 同轴电缆联接至外引线,并在外引线端头应实现阻抗匹配,整个微带传输线的情形如图 4 所示.在制作过程中,特别注意了四条微带的传输一致性问题.

制作完成后,我们用时域反射法来测量四条微带线的传输特性的情况⁸.图 5 即为测得的四条微带传输线的时域反射谱.由图中可看出,最左端入射点为 50 Ω 阻抗,经一段阻抗渐变线后到达 MCP 的低阻抗段,再经一段渐变线至 50 Ω 输出.由图 5 还可看出四条微带传输通路的传输特性基本一致,从而

保证了相机四条通道的响应一致性。



图4 制作在MCP及印刷线路板上微带传输线

Fig. 4 Microstriplines on PCB and MCP

此外是MCP上微带的欧姆电阻要尽可能小,因为MCP本身是一个布满孔洞的平板(开口比约60%),所以在其上制作欧姆阻抗较小且对X光有相当灵敏度的微带阴极难度很大.我们用特殊方法制作了镀有反射式黄金阴极的微带传输线,一方面保证了对X射线的响应,同时在很大程度上降低了其欧姆电阻¹².

3 实用型四通道相机

如图6所示为四通道MCP行波选通分幅相机的照片.系统主要包括行波分幅管,电控箱、针孔调节装置及近贴相机.



图6 四通道行波选通分幅相机外型照片

Fig. 6 Photograph of the four-way MCP gated framing camera

在行波分幅管中,MCP的输入面上镀有四条相互独立的微带,分别由四个独立的选通脉冲驱动,这样各选通脉冲之间的延时就可任意调节,从而可做较长时间的测量,还可加上滤片或针孔光栅做不同谱段的同时比较测量;此外,由于各微带的长度大大缩短,增益沿微带传输的衰减也得到了很大改善.

电控箱提供了相机所有的电源及控制信号,包括四路选通脉冲、MCP偏压、荧光屏电压、步进电机控制信号及紫外灯照明灯电源.针孔调节装置主要由两个正交的步进电机构成,可将针孔阵列精确地调节在所需位置.

在相机的研制设计中我们特别注意了其实用性.在整机中加上了紫外灯照明灯一些功能,很大程度上方便了相机的操作.下面就整机技术的几个方面加以介绍:

由于这台相机是准备交付用户使用的实用型相机,因此针对国内“星光”装置及“神光”装置的具体使用环境进行了整机工作参数及实际工作条件设计,并在具体的操作调节方面考虑了很多因素.以下

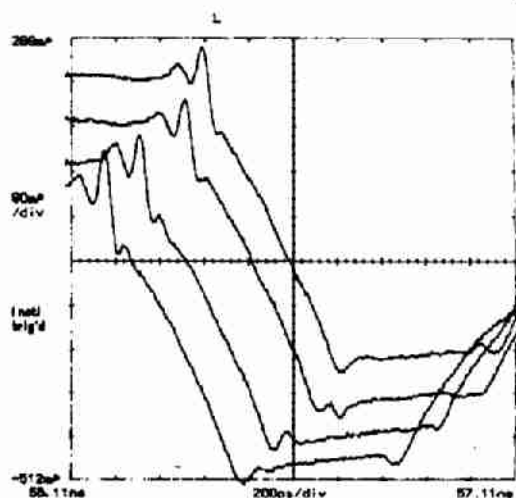


图5 四条微带线的时域反射谱

Fig. 5 Measured TDR of the four microstripline

就其中较重要的部分加以说明:

3.1 相机实际使用条件

相机使用时是直接接在真空靶室上的,由于分幅管各电极间加有高压,因此相机工作时需要有一定的真空度. 国外类似相机(英国 KENTECH 公司)工作时要求有 $10^{-6} \times 133.3224\text{Pa}$ 以上的真空度,而国内这方面的条件要差的多,“星光”装置靶室的极限真空度也只有 $10^{-6} \times 133.3224\text{Pa}$,一般具体实验时要求抽 2~3 小时真空后就开始打靶,此时的真空度约为 $5 \times 10^{-5} \times 133.3224\text{Pa}$. 在相机整机化时我们充分考虑了这些因素,相机被设计成可在低、中、高三种真空度条件下工作,最低可在 $5 \times 10^{-5} \times 133.3224\text{Pa}$ 下工作,此时荧光屏上所加的电压略低,相机除增益及空间分辨率外其它技术指标及工作参数不受影响,这样就可较低真空度下调好相机,在较高真空度下抓重要数据.

3.2 相机的增益调节

由图 1 相机原理结构图可看出,相机的增益主要由变化加在 MCP 上的偏压来调节,相机共设计了 5 档偏压. 值得一提的是,这种调节方式会影响相机的曝光时间. 此外,荧光屏电压的变动也会影响到相机的增益.

3.3 针孔调节装置

对于这种用多针孔先光学分幅,再用行波脉冲实现时间分辨的技术而言,在具体操作上针孔的调节尤为困难,因为这已不是单个针孔的对中,而是要将许多个针孔同时对准在四条微带的合适部位. 除了靶场的调节技术外,相机本身提供的调节手段也非常重要.

我们相机自带的针孔调节装置带有二维平动及一维旋转调节,针孔平移调节范围为 13mm,调节方式有平动及步进电机控制两种,步进电机可用手动遥控盒或计算机控制. 相机可做多种放大倍数的测量,加上附加的真空系统后,相机阴极面至靶的距离可拉大至 1.8m,这样在使用针孔光栅做光谱分辨测量时可以得到较大的光谱分辨率.

此外,相机还自带了可移动的照明装置,用此装置可同时对微带及针孔照明,很大程度上方便了针孔的调节.

3.4 自检及时标

为方便相机的使用与检测,相机内安装了一套紫外光系统,从而在实际使用中可在原位用自带的紫外光系统对相机进行静态工作检查.

此外,还将相机内的选通脉冲引出,并精确标定了引出端头至微带中央的传输时间,这样将此信号与主光路信号合成后送入示波器即可形成时标系统;或与 XRD 信号合成后可精确测定相机所得图象与 X 光脉冲之间的时间关系.

4 相机指标测试与实际应用

4.1 时间分辨率测量

测试系统框图如图 7(a)所示,碰撞锁模 Nd:YAG 激光器产生的光脉冲经四倍频和扩束后照射在 MCP 的微带上,变像管的光输出用 CCD 图象系统记录. 当 MCP 加上快门脉冲时,在激光照射的时间内(约 20ps),只有电脉冲到达处的部分区域增益足够大,能产生输出,如果微带上电脉冲的传播速度已知,则根据沿电脉冲传播方向输出光强度的空间分布就可得到 MCP 增益随时间的变化,从而可求得曝光时间. 我们用时域反射法测得微带的传播速度为 1.8×10^8 米/秒(0.6c). 通过把动态象和静态象进行归一化处理消除了光脉冲的空间不均匀性的影响. 图 7(b)是在最小增益档测得的增益随时间变化曲线,此时 MCP 上加有 90V 的直流反向偏压,测得的曝光时间为 60ps. 对应相机不同的增益,我们测得曝光时间为 60~100ps.

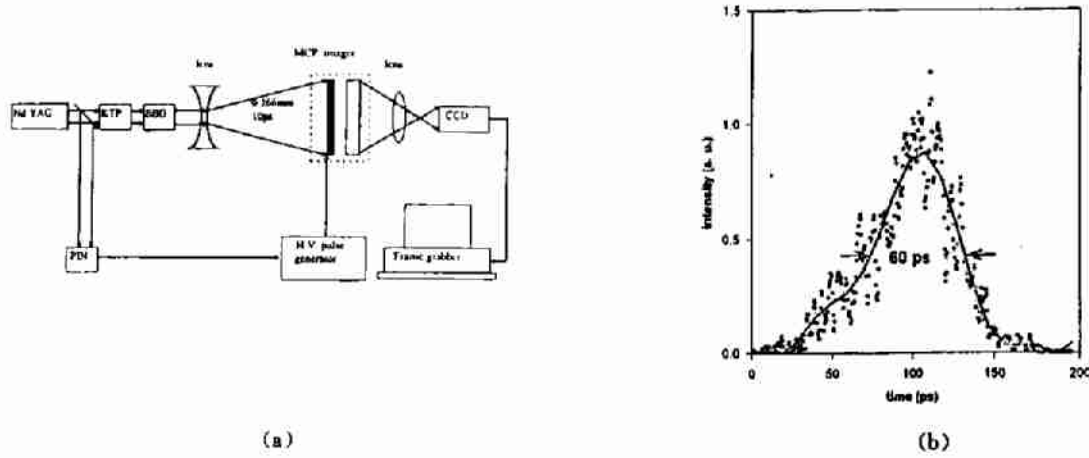


图7 相机曝光时间测试结果及测试系统

Fig.7 System setup and results of exposure time measurement

(a) Exposure time measurement system

(b) Measurement results setup

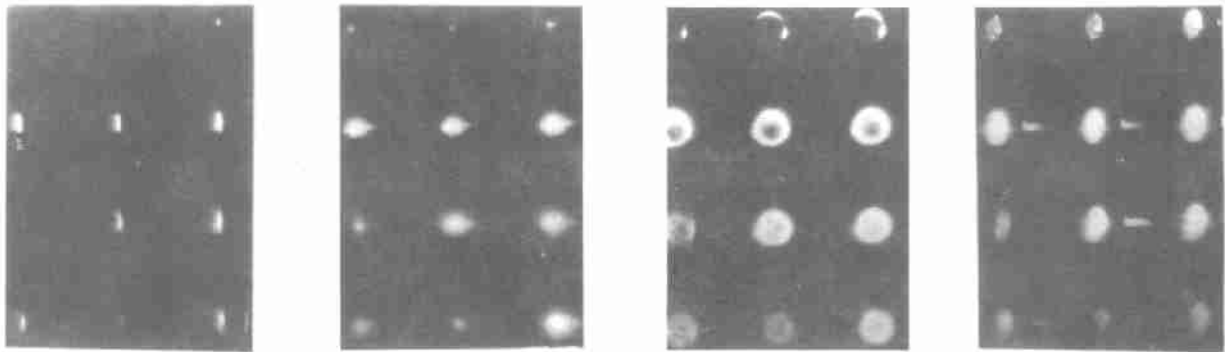
4.2 空间分辨率测量

相机的空间分辨率由针孔相机和分幅管的性能所决定。由于针孔相机的分辨率与使用条件有关，所以一般所说均指分幅管的空间分辨率。在分幅管 MCP 的输入面贴一块鉴别率板，用紫外光均匀照明后，即可用近贴相机或制冷 CCD 拍摄分辨率照片，再由显微密度计或计算机图象系统得到某一分辨率下的调制度，也可用读数显微镜直接观察分辨率。我们所用的是国产 4 号标准鉴别率板，目前可看到分辨率 25 lp/mm (第 25 组)，经数据处理后得到调制度为 10% 时分辨率为 15 lp/mm。

4.3 其它指标测量

动态范围的测试在“星光”装置上进行，相机保持在同一使用条件下，用从大到小各种不同的能量打靶，同时用 XRD 检测 X 光相对强度的变化，最终做 X 光与相机输出强度关系曲线，取此曲线的线性段（线性度 5%）所对应的最大与最小光强之比就是相机的线性动态范围。

在动态范围测试的同时还测量了相机的探测灵敏度，因很难得到 X 光的绝对光强，所以只能做定性测量，实验时 MCP 距靶 568mm，针孔直径为 30~40 μ m，所用靶为金平面靶，相机观测方向 45°，在只用触发光（能量约零点几焦耳）打靶的情况下仍然测到了时间分辨结果，表明相机有很高的探测灵敏度。结果见图 8。



(a) 金盘靶切向(激光能量 27.8J) (b) 金圆盘靶法向(激光 23.4J) (c) 筒靶激光入口(激光 85.4J) (d) 缝靶(激光 91.3J)

图 8 相机实际激光打靶的时间分辨测试结果(从左至右 12 幅象的相对时间分别为: 0.55ps, 110ps, 500ps, 555ps, 610ps, 1ns, 1.05ns, 1.1ns, 1.55ns, 1.6ns, 1.65ns)

Fig. 8 Framing photos of laser produced plasma (The time of the 12 image is 0.55ps, 110ps, 500ps, 555ps, 610ps, 1ns, 1.05ns, 1.1ns, 1.55ns, 1.6ns, 1.65ns)

对相机的触发晃动与四路脉冲相对晃动也做了测量,将触发脉冲和两路选通脉冲合成后送入示波器中,测量触发脉冲与选通脉冲的时间差及两路选通脉冲的时间差,所得结果的统计标准均方差即为触发晃动与相对晃动.实验得到触发晃动小于 50ps,相对晃动在测量精度以内,估计小于 10ps.

此外还测量了相机的相对增益、微带均匀性、四条微带一致性等指标.

4.4 相机技术指标及实际应用结果

综上所述,这一套实用型 MCP 行波选通分幅相机的主要技术指标为:

时间分辨率 60~100ps(随各增益档变化),空间分辨率 15 lp/mm(调制度 10%),动态范围:1000(线性段优于 100),画幅尺寸 6mm,画幅数 12,触发晃动 50ps,微带间相对晃动: $<10ps$,测量时间范围 $\times 100ps \sim \times 10ns$,针孔平移调节范围 $\pm 13mm$,针孔调节方式手控、手动遥控及计算机控制,自带针孔及微带照明装置,自带紫外灯自检装置.

相机 1996 年 6 月在“星光”装置上实际使用,对各种靶型进行了测量,如图 8 为实际实验结果,这是国内首次对各种靶型在激光打靶实验中较全面的分幅测量.

5 今后工作

目前正在研制一台大画幅宽微带(12mm)MCP 行波选通分幅相机,此相机与平场谱仪配合后可同时测得时间、空间及光谱信息.

此外,更高时间分辨率的相机也是我们今后发展的目标,国外已有用薄 MCP 实现约 30ps 时间分辨率的结果,这也是我们的发展方向之一,但薄 MCP 的信噪比较差,为此我们已提出一种用两块 MCP 叠加选通的方法¹³,经模拟计算可达到 20~30ps 的时间分辨率,并具有较高的信噪比与增益.

参考文献

- 1 Katayama, Nakai M, Yamanaka T, Izawa Y, Nakai S. Rev Sci Instrum, 1991, 62(1): 124~129
- 2 Watt R G, Oerter J, Archeluta T. Rev Sci Instru, 1994, 65(8): 2585~2586
- 3 Landen O L, Bell P M, Oertel J A, Satariano J J, Bradley D K. SPIE, 1993, 2002: 2~13
- 4 Chang Zenghu, Shan Bing, Liu Xiuqin, Yang Hongru, Zhu Wenhua, Liu Jinyuan, Hou Jidong, Gong Meixia. High-Speed Photography and Photonics, SPIE 1994, 2513: 106~111
- 5 刘进元,常增虎.光子学报,1994,23(Z3):114~116
- 6 山冰,刘进元,常增虎.2.8kV、140ps 高压脉冲的产生.电子科学学刊(已录用)
- 7 山冰,侯继东,常增虎.光子学报,1994,23(Z3):170~172
- 8 刘秀琴,常增虎,山冰,牛丽红,侯继东.光子学报,1994,23(Z3):205~210
- 9 Chang Zenghu. High-Speed Photography and Photonics, SPIE, 1994, 2513: 119~124

MCP GATED PICOSECOND X-RAY FRAMING CAMERA

Shan Bing, Liu Jingyuan, Chang Zenghu, Liu Xiuqin

Gao Shengchen, Ren Youlai, Zhu Wenhua, Luo Yongming, Hou Xun

State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Academia Sinica, Xi'an, Shaanxi 710068, P. R. China

Tel. 86/029/8498711,

Fax: 86/029/5261374

Cheng Jinxiu, Yang Cunbang, Wen Tianshu, Tang Daoyuan, Wen Shuhuai

Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003, China

Received date: 1996-07-18

Abstract The working principle of gated MCP framing camera is reviewed. And a new gated MCP framing camera system is reported. Some technical consideration of system design of the framing camera system is discussed.

The new camera system consists of a proximity focused MCP imager with four parallel stripline cathodes, a control unit, and a mechanical system for pinholes mounting and adjustment. The MCP of the imager is 56mm in diameter and 0.5mm in thickness, and the channel diameter is $12\ \mu\text{m}$. The fiber-optic face plate is coated with P20 phosphor screen. The pinholes system with its two orthogonal arranged stepping motors can adjust the pinholes precisely to the correct position. The control unit provides all the power supply of the camera system including voltage to phosphor screen, gating pulses to MCP, bias and static checking voltage of MCP, control signals for stepping motors, and power for UV light and illuminating light for pinholes. The four gating pulses of the striplines are generated by two sharpening diode circuit driven by one high voltage step pulse which is formed by avalanche transistor circuit. The time interval between striplines can be adjusted easily by varying the length of the coaxial connected sharpening circuit to imager. The pinholes can be driven either by manual or computer controls. The images is recorded with a film contacting the face plate of a TE/CCD system.

With the screen voltage supplied by control unit set to 2.6kV, 3.5kV, the camera system can work at low vacuum to $5 \times 10^{-5} \times 133.3224\text{Pa}$ with 2.6kV or at higher vacuum to get a better spatial resolution and gain with 4.5kV. The static spatial resolution of the camera is measured to be 15lp/mm with 10% modulation. And measured exposure time of the camera ranges from 60 ps to 100 ps with different MCP bias set with 90V to -90V. The camera had been used at the 11# high power laser system and several important results of different target type were taken by the camera successfully.

Keywords MCP gating; Framing camera; Picosecond; High voltage pulse

Shan Bing was born in 1965, graduated from Wuhan University in 1985, and did his M. S. at Institute of Solid Physics, Academia Sinica. He has been working in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics from 1988. His scientific interests are ultrahigh speed photography, and high voltage ultrafast electrical pulse.

