

微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机

常增虎 山 冰 刘秀琴 杨鸿儒 朱文华 刘进元 侯继东 龚美霞

(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 710068)

摘 要 本文报道的超高速摄影机可在 1.2ns 内连续拍摄 12 幅图象,每幅图象的曝光时间为 100ps,空间分辨率 20 lp/mm,它具有几何畸变小、动态范围大等特点.对 MCP 皮秒选通的数值模拟考虑了电子渡越时间及弥散影响.变象管研制着重解决了微通道板上微带线的欧姆损耗问题.

关键词 超高速摄影;皮秒;变象管;微通道板(MCP)

0 引 言

物理现象十分复杂的惯性约束聚变过程发生在数纳秒内,研究各种因素的影响对实验诊断设备的性能提出了很高要求.其中对等离子体不稳定性和聚爆对称性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.

国内外曾经提出和尝试过多种实现皮秒分幅摄影的方案.我们曾用光学分幅/偏转快门法首先在国内实现了皮秒分幅^{1~3}.近年来随着皮秒高压电脉冲技术的突破,用行波选通微通道板(MCP)近贴聚焦变象管的方案由于具有一系列突出的优点而受到广泛重视,并取得了很大进展^{4~6}.本课题组自 80 年代中期就开始了这种技术的研究,并得到了初步结果⁷.当时用光电导开关产生皮秒高压脉冲,虽然脉宽窄,但幅度和形状易受到触发光的影响.这里介绍我们对 MCP 选通特性进行数值模拟的结果,报道用纯电子学法产生皮秒高压脉冲并选通 MCP 变象管实现皮秒分幅摄影的研究结果.

1 工作原理和理论设计

微通道板选通 X 射线皮秒分幅相机主要由成像针孔组、MCP 近贴聚焦变象管、皮秒高压脉冲发生器和图象记录装置构成,如图 1 所示.其关键部件为变象管,它由 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 为电介质的弯曲型微带线加在 MCP 上,它在微带线上的传输速度是一定的(约为真空中光速的一半).

被拍摄的等离子体的 X 射线图象经 12 个针孔同时成在 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也就没有图象输出.如果快门脉冲电压的宽度较窄,MCP 上的微带线应视为长线,即电脉冲沿微带线在 MCP 上传输时,任一时刻只有一段区域有电压,经某一个针孔成在该区域的 X 射线象产生的光电子图象将被 MCP 增强,并到达荧光屏形成输出图象.MCP 的其它区域没有电压,落在这些区域的 X 射线图象不产生输出图象.经过一段时间后,电脉冲到达另一个针孔所成的 X 射线图象区域,该图象将有输出.这样,十二个针孔所成的象将依次逐个被选通.荧光屏输出的可见光象可以用紧贴在光纤面板上的高速照相底片拍下,也可用低噪声高灵敏度 CCD 图象系统记录处理.

对该相机的使用者来说,最关心的相机指标包括每幅图象曝光时间(时间分辨率)和一定画幅尺寸下的空间分辨率.应该指出的是,虽然制作好的相机的空间分辨率是一定的,但实际使用时,由于等离子

国家攀登计划资助项目

收稿日期:1994-07-11

体的高速运动(速度约为 10^7 cm/s),在曝光时间内将造成图象的模糊,(在 100ps 内等离子体的空间位移约为 $10\mu\text{m}$),这时空间分辨率与曝光时间是相关的. 因此应尽可能缩短曝光时间.

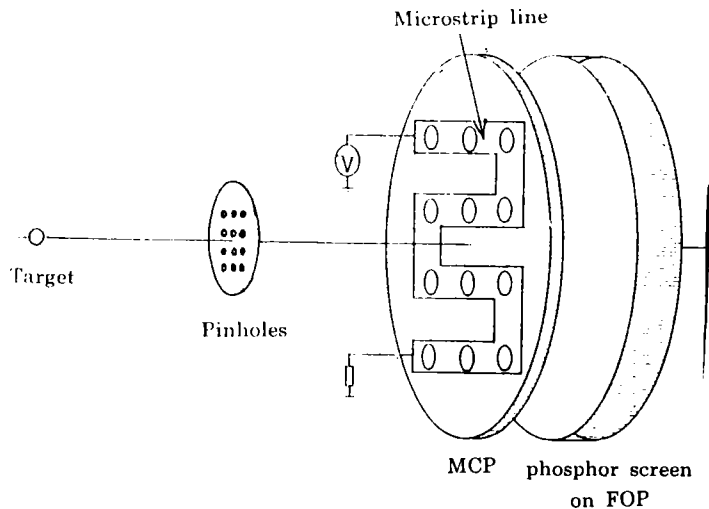


图1 微通道板选通分幅相机示意图

Fig.1 Schematic diagram of MCP gated framing camera

1.1 空间分辨率

相机的空间分辨率由针孔成像的分辨率和 MCP 近贴聚焦变象管的空间分辨率联合决定. 限制针孔成像分辨率的主要因素是几何投影和衍射效应,由针孔的大小、X 射线的波长 λ 和成像放大倍率 M 、物距等所决定. 当靶到 MCP 的距离 s 固定不变时,对于一定波长 X 射线和给定放大倍率,存在一个最佳针孔直径,使得在物面上的空间分辨率最高.

采用瑞利判据定义可分辨象元的大小,则最佳针孔直径为

$$D_0 = \text{sqrt}[1.22sM\lambda / (M + 1)^2] \tag{1}$$

在此针孔直径下的物面上的最小可分辨象元的半高全宽(FWHM)为

$$D_m = \text{sqrt}(1.22s\lambda / ((M + 1) * D_0) + D_0(M + 1) / M) \tag{2}$$

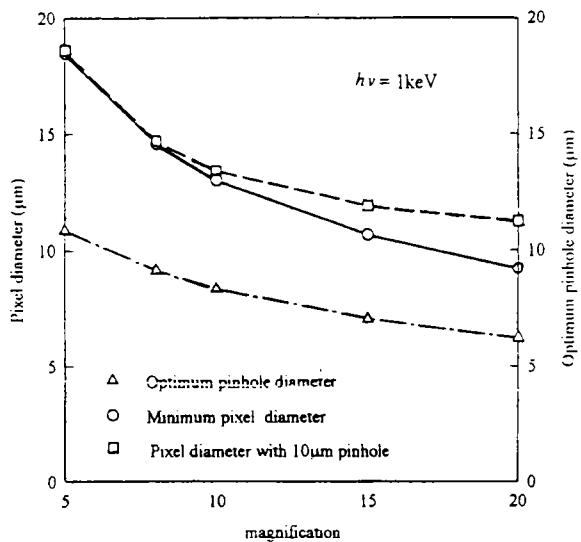


图2 针孔相机在物面处的空间分辨率

Fig.2 Spatial resolution of pinhole camera at object plane

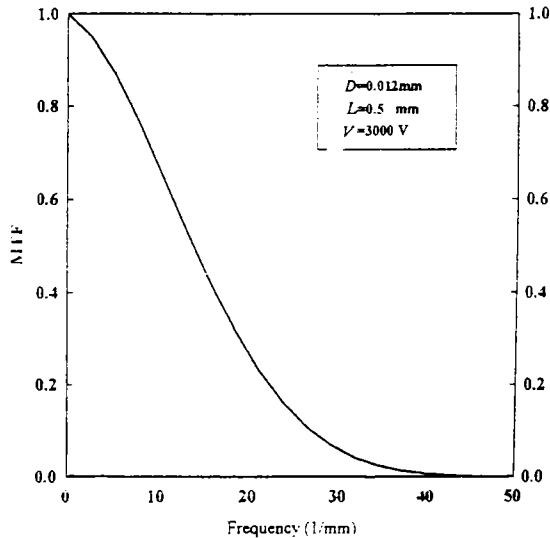


图3 MCP 象管 MTF 的计算值

Fig.3 Calculated MTF of the MCP imager

图2 给出了针对 1keV 的 X 射线、 $s=563\text{mm}$ (中物院核物理与化学研究所靶室)用式(1)、(2)所计

算出的 D_0 和 D_m 值. 图中还给出了各种放大倍率下用 $10\mu\text{m}$ 针孔所对应的物面象元尺寸, 可见它与最佳分辨率差别不大.

变象管的空间分辨率与 MCP 的通道直径、MCP 与荧光屏的间距、荧光屏的工艺以及纤维面板的纤维直径等有关, 对整机的分辨率也有影响, 通过计算每个部件的空间调制传递函数 MTF, 可以算出整管的 MTF. 图 3 是针对我们管子的参数计算出的变象管的 MTF 曲线, 它所对应的高斯型光斑的半宽 (FWHM) 约为 $30\mu\text{m}$, 将此值除以针孔成像的放大率即可得到对应物面上的由变象管决定的象元大小, 即在 $5\sim 20$ 倍放大率范围内为 $6\sim 1.5\mu\text{m}$, 与针孔相机的分辨率相比, 管子的分辨率对整机的影响较小.

1.2 时间分辨率

相机的时间分辨率可由画幅上任一空间点的曝光时间来衡量, 曝光时间定义为 MCP 增益与时间关系曲线的半宽 (FWHM). 显然减小快门脉冲的宽度有利于这一目的, 但由于电子在 MCP 中运动需要一定时间 (渡越时间), 如果电脉冲过窄, 能逸出 MCP 的电子数将减小, 从而降低了增益. 曝光时间与快门脉冲宽度、幅度、形状以及 MCP 参数的关系比较复杂, 很难用解析法给出定量结果. 我们用两种数值模拟法对此进行了研究.

第一种方法的出发点是“能量正比假设”^{8,9}, 即 MCP 二次电子的径向初能量与入射电子的能量成正比. 这与一些基于“恒定倍增次数假设”的模拟^{6,10}是不同的. 在模拟中还假定加在 MCP 上电脉冲为高斯型. 图 4 给出了曝光时间与电脉冲宽度的关系. 可见相机的曝光比电脉冲短得多, 这是由于 MCP 的增益随所加电压呈高阶非线性增长的原因, 故称之为“增益压缩效应”. 要得到 100ps 的曝光时间, 电脉冲的宽度应小于 300ps . 还考察了电脉冲的幅度以及加反向偏压对曝光时间和峰值增益的影响¹¹. 与下面介绍的方法相比, 这种模拟计算量小, 运算速度快.

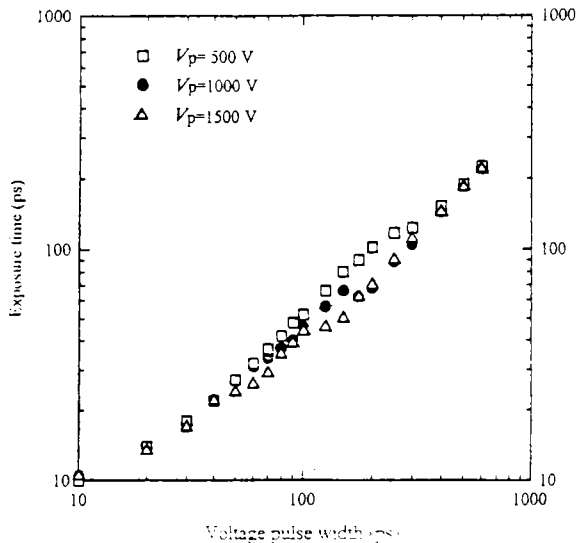


图 4 曝光时间与 MCP 所加电压脉冲宽度的关系.

V_p 为电脉冲峰值电压

Fig. 4 Exposure time vs. the width of the voltage pulse applied on the MCP, V_p is the peak amplitude of the pulse

第二种方法是蒙特-卡洛模拟¹². 它考虑了 MCP 二次发射统计特性的影响. 模拟中做了以下假设:

(1) 二次发射系数¹³: 入射角为 θ 、能量为 V_i 的电子在 MCP 通道表面的二次电子发射系列服从泊松分布, 其平均值为

$$\delta(V_i, \theta) = \delta_m(\theta)(ve^{1-v})^k \tag{10}$$

式中的 $\delta_m(\theta)$ 为入射角为 θ 时 δ 的极大值, 由下式求得

$$\delta_m(\theta) = \delta_m(0)(1 + K_s\theta)$$

其中 $\delta_m(0)$ 为垂直入射时 δ 的极大值, 参照实验值取为 3, K_s 是参数, 取为 2.4π .

式(10)中 v 为归一化入射能量

$$v = (V_{i_s} - V_0)/(V_m(\theta) - V_0)$$

其中 V_0 为与 MCP 通道表面逸出功有关的参数, 取为 3.5, $V_m(\theta)$ 为 δ 极大值所对应的入射能量,

$$V_m(\theta) = V_m(0)(1 + K_s\theta)$$

$V_m(0)$ 为垂直入射 ($\theta=0$) 时 δ 极大值所对应的入射能量, 这里参照实验值取为 245eV .

式(10)中 k 为参量, 其值与 v 有关, 参照实验曲线取为

$$k = 0.62 \quad (v < 1)$$

$$= 0.25 \quad (v > 1)$$

(2)二次电子的初能量:初能量为 E 的二次电子数目服从麦克斯韦分布,取最可几能量 E_p 为 $1.4eV$.

(3)二次电子发射角:服从余弦分布(Lambert 分布)

以上假设中参量 K 、 V_0 和 E_p 取值方法主要是拟合实测的静态增益-电压曲线.

由此模拟得出了以下结论:

(1)渡越时间及其弥散对曝光时间的影响

当 MCP 两端加上幅度为 $800V$ 宽度为 $200ps$ 的矩形快门脉冲时的增益与光子入射时刻的关系见图 5. 可见在这种快门脉冲形状下,渡越时间使得曝光时间短于快门脉冲宽度,而渡越时间弥散对增益曲线的后沿影响很大,它对曝光时间也有影响.

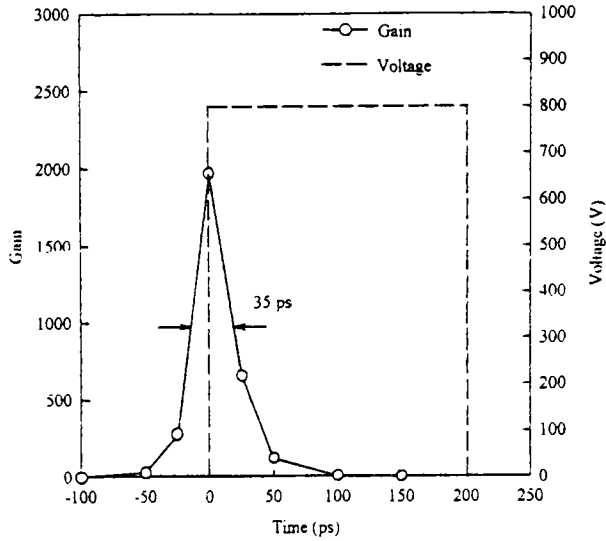


图 5 考虑电子渡越时间弥散影响用蒙特-卡洛模拟得到的瞬态增益

Fig. 5 The gain vs time curve when transit time dispersion is taken into account in the Monte-Carlo simulation

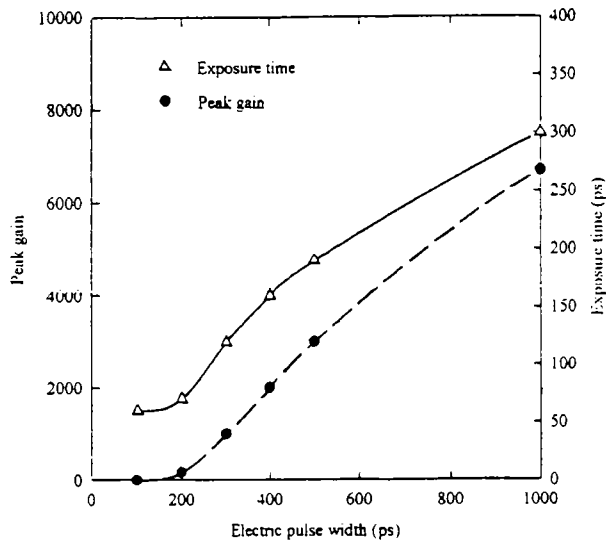


图 6 考虑电子渡越时间弥散影响得到的 MCP 在皮秒选通下的增益特性

Fig. 6 The gain of MCP gated by picosecond pulse when transit time dispersion is taken into account

(2) 快门脉冲波形的影响

计算了幅度均为 800V, 半宽均为 200ps 的三角波、高斯波和矩形波下增益与光子入射时刻的关系曲线, 发现与它们对应的曝光时间分别为 70、75 和 35ps, 峰值增益分别为 160、400 和 1986。显然矩形脉冲的效果最好, 但实验上最难产生。

(3) 快门脉冲宽度的影响

图 6 给出了幅度为 800V 不同半宽的三角波快门脉冲所对应的峰值增益和曝光时间, 可见随着快门脉冲的半宽的减小曝光时间并不随之线性减小, 当电脉冲较宽时峰值增益与之关系不大, 但当电脉冲较窄时增益随着电脉冲宽度的减小而急剧下降。这与第一种方法给出的结果具有类似的变化趋势。

(4) 板电压和微通道长度对渡越时间的影响

上述快门脉冲宽度对曝光时间和增益的影响与 MCP 中的电子渡越时间有很大关系, 而最可几渡越时间 T 主要取决于 MCP 的通道长度 L (直径一定时) 和板上所加的早压 V_{MCP} , 对模拟结果的拟合可得 $T \propto L^{1.54}/V_{MCP}^{1.29}$, 这与以前用解析法得到的结论¹⁰ $T \propto L/V_{MCP}$ 有所不同。

2 实验研究

2.1 变象管

所用微通道板的直径为 $\phi 56\text{mm}$ 、厚度为 0.5mm、微通道的直径为 $12\mu\text{m}$ 。MCP 的输入面镀有反射式黄金阴极, 它性能稳定, 对 0.1~10keV 范围内的 X 射线都有较高的量子效率。荧光屏为 P20、制备在光纤面板上, 面板的纤维直径为 $6\mu\text{m}$ 。管子的空间分辨率照片见图 7, 即它至少达分辨 20 lp/mm。

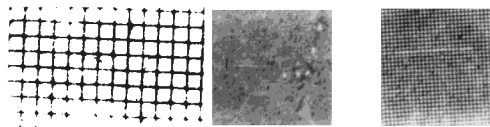


图 7 MCP 象管的空间分辨率照片, 该象管可分辨 20 lp/mm

Fig. 7 Spatial resolution of the MCP imager, 20 lp/mm is resolved.

由以上的理论研究可知, 要得到 100ps 的曝光时间, MCP 上需加以 300ps 或更窄的电脉冲, 这就对 MCP 上的微带的频带响应提出了要求。我们的变象管采用的是单一快门脉冲驱动的弯曲型微带, 微带线较长, 其欧姆损耗也要尽可能小以减少电压沿微带传播时的损耗。我们用特殊方法制作的弯曲型微带总电阻仅为 0.7Ω , 比文献报道的要小得多。为了测量微带的时间响应, 将半宽值为 50ps 的电脉冲馈入微带, 其输出脉冲的半宽为 115ps, 如图 8 所示。它能够满足传输半宽 300ps 脉冲的要求。

2.2 快门脉冲

快门脉冲发生器由两级电路组成。首先用特殊设计和制作的雪崩晶体管电路在 50Ω 负载上产生了前沿上升斜率高达 $2\sim 3\text{kV/ns}$ 的类阶跃脉冲, 在这种低阻值的负载上用雪崩管的产生如此高斜率的高压脉冲在国内尚未见到报道。然后, 用陡化二极管电路进一步减小该脉冲的前沿, 同时进行脉冲成形, 最后在 50Ω 负载上产生半宽为 $300\sim 600\text{ps}$ 、幅度为 $700\sim 3000\text{V}$ 的高压脉冲, 半宽 $< 300\text{ps}$ 的脉冲见图 9。用纯电子学线路产生如此窄的高压脉冲也未见到国内报道。与用光电导开关技术产生高压脉冲相比, 这种线路具有所需触发能量小 ($< 1\text{nJ}$)、输出脉冲幅度和宽度不随触发光变化等优点。事实上这种脉冲产生技术的应用范围很广, 例如国内条纹相机的时间分辨率目前主要受扫速限制, 其原因就是由于扫描线路所能产生的斜率太低。

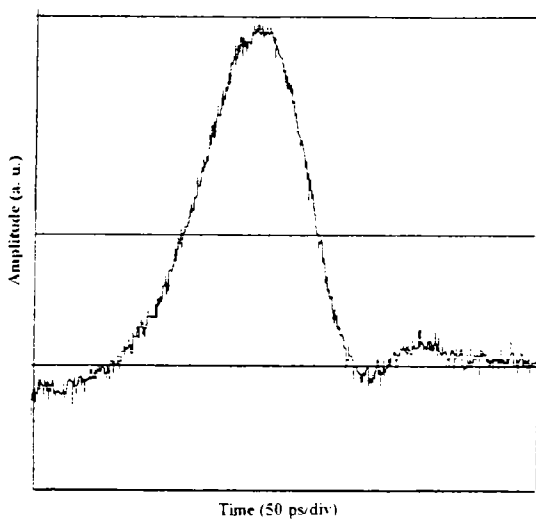


图 8 MCP 上微带线的响应时间, 输入脉冲宽度 $\Delta t_{FWHM} = 52\text{ps}$, 输出脉冲宽度 $\Delta t_{FWHM} = 115\text{ps}$

Fig. 8 Response time of the microstrip line on MCP, input $\Delta t_{FWHM} = 52\text{ps}$, output $\Delta t_{FWHM} = 115\text{ps}$

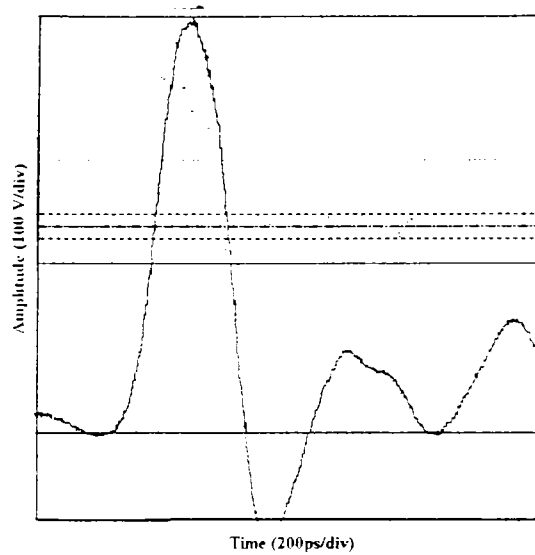


图 9 MCP 选通高压脉冲, 其宽度为 $\Delta t_{FWHM} = 292\text{ps}$

Fig. 9 High voltage pulse for gating MCP, $\Delta t_{FWHM} = 292\text{ps}$

2.3 曝光时间测量

测量装置如图 10 所示. 碰撞锁模 Nd:YAG 激光器产生的光脉冲经放大、四倍频(波长变为 $0.266\mu\text{m}$)和扩束后照射在 MCP 的微带上, 变象管的光输出用 CCD 图象系统记录. 当 MCP 上加以直流电压时, 被照射的微带都有光输出. 当 MCP 加上快门脉冲时, 由于电脉冲很短, 加上 MCP 的“增益压缩效应”, 在激光照射的时间内(约为 10ps), 只有电脉冲到达处的部分区域增益足够大, 能产生输出光. 如果光脉冲的空间分布是均匀的, 且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变象管光增益随时间的变化, 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 $1.53 \times 10^8\text{m/s}$. 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 11 是得到的增益随时间变化曲线, 此时曝光时间为 120ps . 到目前为止我们得到的最短曝光时间为 100ps .

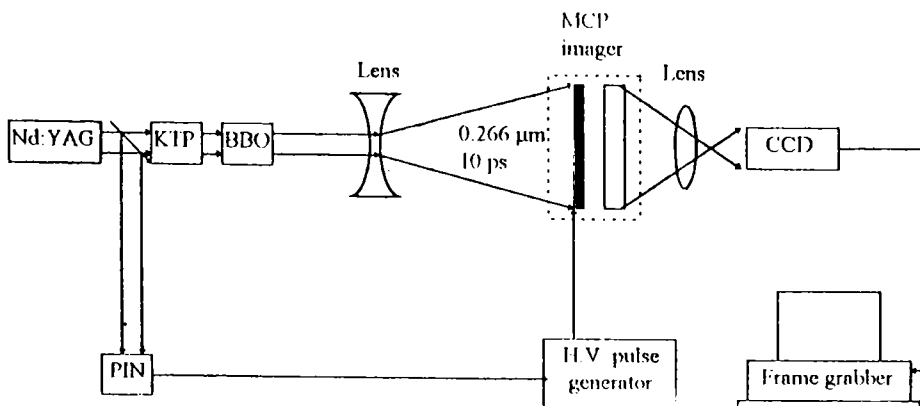


图 10 曝光时间测量系统

Fig. 10 Exposure time measurement system

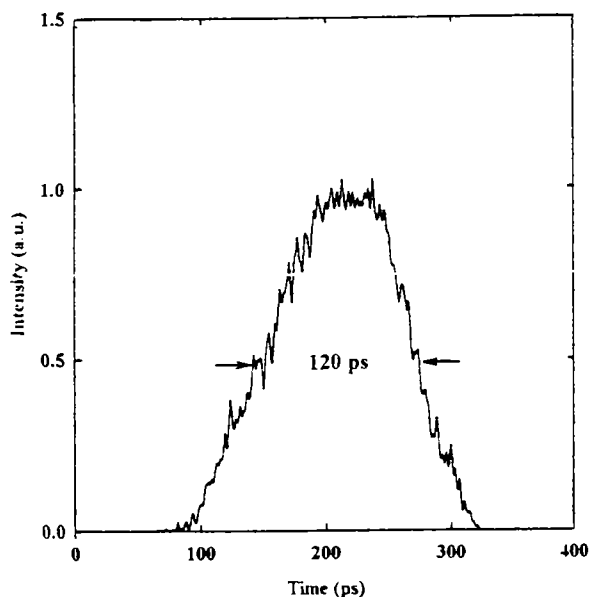


图 11 分幅相机实测曝光时间

Fig. 11 Measured exposure time of the framing camera

2.4 应用

1993 年年底, 首台样机在上海“神光”高功率激光装置上进行了试用. 针孔成象的放大率为 10 倍, 针孔的直径为 $10\mu\text{m}$, 一次可拍摄 12 幅图象. 实验结果非常直观地反映了等离子体的产生和发展过程. 实验还展示了相机具有灵敏度高、动态范围大、抗干扰能力强等特点.

3 结论

通过对 MCP 在皮秒级高压选通脉冲的增益特性的数值模拟搞清了电子渡越时间及弥散, 电脉冲宽度、高度、形状等对相机曝光时间和峰值增益的影响. 为相机的设计提供了依据.

MCP 选通皮秒分幅相机的变象管欧姆损耗小、时间响应快. 快门脉冲用纯电子学法产生, 实用性强. 对相机的曝光时间用 Nd:YAG 激光器的四倍频光进行了测量, 最短曝光时间达 100ps.

本课题承国家科委攀登计划项目“飞秒激光和超快现象研究”的资助. 感谢该项目首席专家侯洵院士的大力支持. 本相机在上海试用期间得到中物院核物理与化学研究所郑志坚、唐道源、成金秀、刘忠礼、何海恩和激光运行组高凤翹等同志大力协助, 上海光机所林尊祺同志也给予了帮助, 对此我们表示衷心感谢.

参考文献

- 1 常增虎, 侯洵, 张小秋, 龚美霞, 牛丽宏, 雷志远, 杨鸿儒, 刘秀琴. 高速摄影与光子学, 1988, 17(1): 1~6
- 2 Chang Zenghu, Hou Xun, Zhang Xiaoqiu, Gong Meixia, Niu Lihong, Yang Hongru, Lei Zhiyuan, Liu Xiuqin. 18th International Congress on High Speed Photography and Photonics, SPIE, 1988, 1032: 608~612
- 3 Chang Zenghu, Hou Xun, Zhang Xiaoqiu, Gong Meixia, Niu Lihong, Yang Hongru, Liu Xiuqin, Lei Zhiyuan. 19th International Congress on High Speed Photography and Photonics, SPIE, 1990, 1358: 614~618
- 4 Yang B K F, Stewart R E, Woodworth J G, Bailey J. Rev Sci Instrum, 1986, 57(11): 2729~2732
- 5 Katayama M, Nakai M, Yamanaka T, Izawa Y, Nakai S. Rev Sci Instrum, 1991, 62(1): 124~129
- 6 Failor B H, Gorzen D F, Amentrout C J, Busch G E. Rev Sci Instrum, 1991, 62(12): 2862~2870
- 7 余鸿斌. 微通道板焦平面行波分幅摄影技术[硕士论文]. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1989
- 8 Eberhardt E H. Applied Optics, 1979, 18(9): 1418~1432
- 9 常增虎. 微通道板增益模型的首次碰撞问题. 光子学报, 1995, 24(4): 318~323
- 10 Kilkenny P M, Landen O, Ress D B, Wiedwald J D, Bradley D K, Oertel J, Watt R. 20th International Congress on

High Speed Photography and Photonics, SPIE, 1992, 1801, 1140~1159

- 11 常增虎. 微通道板皮秒选通特性数值模拟. 光子学报, 1995, 24(4): 347~353
- 12 侯继东. 微通道板皮秒选通相机理论与实验研究[硕士论文]. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1994
- 13 Rodney J. Vaughan M. IEEE Trans of Electron Devices, 1989, 36(9): 1963~1967
- 14 侯继东, 常增虎. 微通道板电子渡越时间和弥散的数值模拟. 94陕西省青年物理学会工作者学术交流会, (待发表)

PECOSECOND X-RAY FRAMING CAMERA USING GATED MCP

Chang Zenghu, Shan Bing, Liu Xiuqin, Yang Hongru

Zhu Wenhua, Liu Jinyuan, Hou Jidong, Gong Meixia

State Key Laboratory of Transient Optics Technology,

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica

Post code 710068, Xi'an, P. R. China

Received date: 1994-07-11

Abstract The technology of gating MCP in image intensifier with picosecond high voltage pulse for ultrahigh speed photography has been developed in our group since 1987. The voltage pulse was generated by using GaAs photoswitch at that time. Great progress has been made since last year, which is reported in this paper. Our new camera consists of a special proximity focused MCP imager and a high voltage pulse generator. The picosecond high voltage pulse is generated by a sharpening diode circuit that is driven by a high voltage step pulse. A meander shape infinity-ground microstrip line was formed by special method on the input surface of the MCP and the rear face of the MCP that is coated with conducting metal layer, such configuration was used to reduce the ohmic loss of microstrip line on the MCP. The MCP is 26 mm in diameter and 0.5 mm in thickness. The channel diameter is 12.5 μm . The fiber-optic face plate is coated with P20 phosphor screen. The image is recorded in a film contacting the face plate. The gain characteristics of the MCP gated by picosecond pulse were simulated taking into account the effect of the electron transit time dispersion. The static spatial resolution of the camera is 20 lp/mm when the phosphor screen is applied with 3 kV voltage and the measured temporal resolution is ~ 100 ps. By using the meander microstrip line configuration, up to 12 frame images were gated by a single voltage pulse. The camera has been used for diagnosis of plasma produced by 1 kJ laser beams and worked well.

;Microchannel plate(MCP)



Prof. Chang Zenghu was born in 1962. After graduated from Xi'an Jiaotong University in 1982, he did M. Sc. and Ph. D. at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, where he has also spent two years as a post-doctor. Sponsored by the Royal Society of UK, he has visited Rutherford Appleton Laboratory for two years. As the vice-director of the State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Prof. Chang has interests in optronics and ultrahigh speed photography.