

高动态范围激光等离子体诊断系统及其在 惯性约束聚变实验中的应用*

曹柱荣† 张海鹰 董建军 袁 铮 缪文勇 刘慎业 江少恩 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2010年5月22日收到; 2010年6月7日收到修改稿)

基于高功率激光等离子体 X 射线辐射谱特性, 设计和研制了一种大画幅高动态范围 MCP 选通型分幅相机. 单画幅宽度 13 mm, 长度 36 mm, 曝光时间 0.5—5 ns 可调. 与 X 射线 CCD 比较, 系统在 1.0—10 keV 的谱响应相对平整, 无高能增强效应. 利用高功率激光打靶实验进行了性能考核实验, 结果表明, 系统的信噪比明显好于 X 射线 CCD 系统, 动态范围大于 3×10^3 . 系统已经在神光 II 装置 ICF 物理实验中获得成功应用.

关键词: 动态范围, 谱响应, 激光等离子体诊断, 分幅相机

PACS: 52.70.La, 52.50.Jm, 07.85.Fv, 07.68.+m

1. 引言

利用大功率激光装置打靶方式可以在实验室产生类似黑体辐射的高温 X 射线辐射源, 从而为探索天体物理状态下的流体力学、辐射流、辐射不透明度、高马赫数射流、状态方程、相对论等离子体等物理现象提供实验数据, 也使校验超新星研究及惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 数值模拟程序成为可能^[1-6]. 多路激光或者几百路激光同步注入产生强辐射源是激光惯性约束聚变的实验条件. 激光惯性约束聚变研究的主要物理过程包括高能量密度物理、内爆物理、辐射输运和流体力学不稳定性等^[3].

目前, 美国国家点火装置使用的打靶束为 192 路, 激光能量与功率为 1.8 MJ 和 500 TW. 国内 ICF 研究平台使用的大型激光装置基本为 8 路, 激光能量与功率为 10 kJ 和 10 TW^[3,5]. 显然, 激光注入、弹着点瞄准、光斑尺寸、多路同步等是激光等离子体辐射源特性的基本参数. 这些参量的诊断需要利用实时在线的 X 射线成像方式实现. 最常用的方法是针孔相机配 X 射线 CCD (charge-coupled device, CCD) 实现在线测量^[7]. 由于 X 射线 CCD 都有一定

的饱和阈值, X 射线信号不能超过 CCD 的饱和阈值. 但是, 神光 II 和神光 III 原型装置的信号估计和测量结果都表明, 使用 X 射线 CCD 作记录设备时存在过强的输入信号, CCD 信号超过阈值两个量级. 因此, 需要利用滤片和平面镜衰减信号才能获得有效的数据^[8].

本工作利用微通道板 (MCP) 选通技术建立了一种适合大型激光装置 X 射线诊断的软 X 射线在线测量技术, 在谱响应范围、灵敏度调整、信噪比等方面具有较强的实用性. 利用神光 II 装置第九路打靶实验, 考核了系统性能, 并获得初步应用.

2. 系统的物理设计

大型激光装置开展的 ICF 实验中, 通常使用针孔成像技术获得实验系统的激光瞄准检测、多路激光同步以及激光等离子体运动状态等信息^[8]. 因此本系统以针孔成像配 MCP 选通技术型分幅相机进行物理设计^[9], 系统原理示意图如图 1 所示. 图 1 (a) 为针孔成像原理, 激光打靶产生的 X 射线辐射通过针孔成像被记录系统记录, 本系统记录设备采用 MCP 选通相机, 图 1 (b) 为 MCP 选通原理. X 射线辐照 MCP 微孔结构的光电阴极后产生光电子, 光

* 国家自然科学基金 (批准号 10905050) 资助的课题.

† E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn

电子通过 MCP 获得高增益输出,进而被加速到荧光屏,屏发光再被科学级可见光 CCD 记录,最终获得 X 射线图像. 其中 MCP 表面的微带状光电阴极为金属导电层,具有传输高压窄脉冲的特性,因此,在窄脉冲通过时作为光电子选择增益的时间,从而建立时间选通型照相技术^[10].

本系统设计的微带宽度 13 mm,长度 36 mm,微

带数目为两条,对于 500 μm 目标至少需要可以放大 26 倍,并实现四分幅同时记录. 两条微带对应两个选通脉冲传输通道,可以方便的对图像增益进行调节和对比,选通脉冲电源为宽度曝光时间 0.5 ns, 1 ns, 2 ns, 3 ns, 5 ns 档位可调,脉冲幅度 600—2000 V 连续可调. MCP 输出端和屏的间隙为 500 μm ,相机的分辨好于 20 lp/mm.

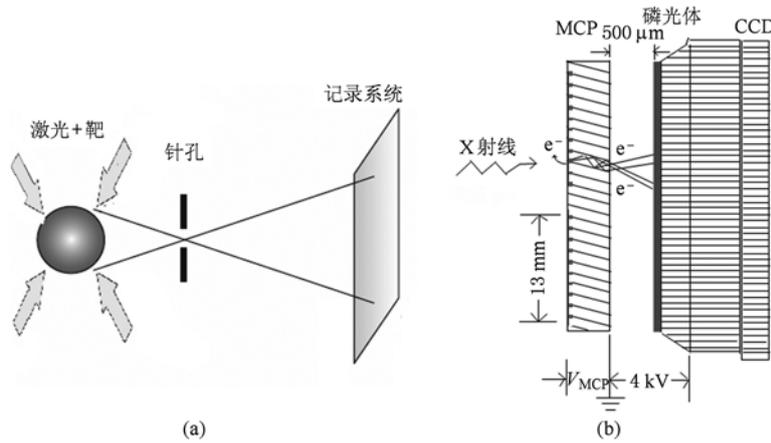


图 1 诊断方法示意 (a) 针孔成像系统;(b) MCP 记录系统原理

假设系统放大倍数为 M ,源到探测面的距离 L ,针孔直径为 d ,光源的亮度符合余弦定律的辐射体的亮度,那么记录系统单位面积上的 X 射线通量为

$$\varepsilon_x = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{\phi} \right)^2 \left(\frac{c}{L} \right)^2 \left(\frac{1+M}{M} \right)^2 \int_{\Delta\lambda} P(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

其中 ϕ 表示光源的直径(假设光源为圆形), c 表示源点通过针孔在像面上的投影面直径, $P(\lambda)$ 表示辐射谱. 在神光装置千焦耳或者万焦耳级的激光能量下, X 射线辐射通量较大,辐射近似普朗克黑体辐射谱特征,其典型的谱型如图 2 所示. 图中谱的测量来自金黑腔靶,测量方法为透射光栅配 CCD,光栅和 CCD 利用北京同步辐射装置进行标定. 由图可见,激光等离子体时空特征测量必须结合谱发射特性,比较有意义的两个能段是 600 eV 以下低能 X 射线和金 M 带 2800 eV 附近能段.

如果采用 X 射线 CCD 直接测量, X 射线能量越高计数越强. 由单位面积上的 X 辐射通量, CCD 每个像素上平均产生的自由电子数为^[8]

$$N_e = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{\phi} \right)^2 \left(\frac{c}{L} \right)^2 \left(\frac{1+M}{M} \right)^2 \times \int_{\Delta\lambda} \frac{E(\lambda)}{\omega} Q_{\text{CCD}}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

其中 ω 为 CCD 灵敏层中产生一对电子空穴对消耗的能量, Q_{CCD} 为 CCD 量子效率, E 为 X 射线能量. 图

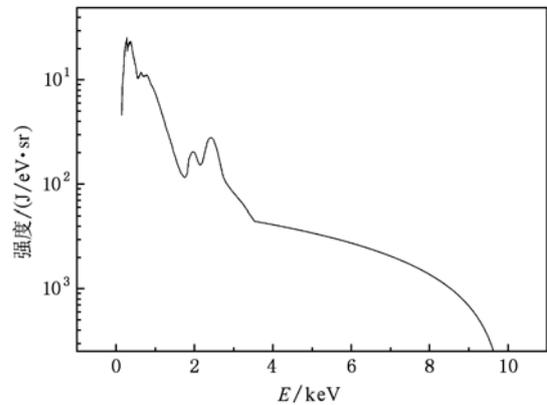


图 2 神光 II 装置典型辐射谱

3 为 CCD 量子效率和基于能量沉积估计的响应强度曲线. 量子效率是指单个光子与 CCD 的 Si 材料发生光电吸收转换的概率,图中量子效率曲线采用 PI-SX 系列 CCD 效率曲线^[11]. 能量沉积是指发生吸收后的光子将沉积能量转换为电子空穴对的过程. 通常一个电子空穴对需要 3.65 eV 能量,则 3.65 keV 的 X 射线子与 CCD 作用后,产生的电子空穴可达 1000 个,所以 X 射线能力越高计数越强,能量沉积形成的计数增强称为 CCD 内部增益. 由于对 X 射线的内部增益强,所以可以将 CCD 作为单光子计数器,并且可以同时进行 X 射线的空间和能谱分辨.

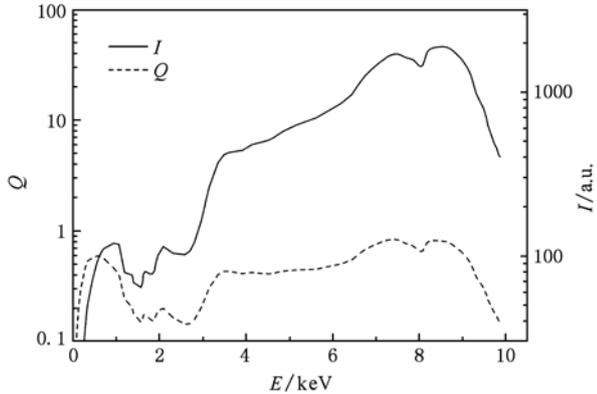


图3 X射线 CCD 量子效率曲线与信号响应曲线

由图3可见,如果作为积分成像记录系统,响应能区集中在6.4—9.3 keV,系统对激光等离子体辐射谱的积分测量将呈现较强的饱和状态.如果采用滤片衰减方法,也只能使系统响应更集中在高能区间,不能很好的表征激光等离子体的时间空间特性.

MCP 阴极为反射式阴极结构,因此不存在能量沉积带来的高能区信号增强问题.设阴极响应面的占空比为 σ ,MCP 相机的增益为 G ,则单位面积 MCP 的响应强度为

$$N_e = \sigma G Q_{MCP} \varepsilon_x = \sigma G \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{\phi}\right)^2 \left(\frac{c}{L}\right)^2 \left(\frac{1+M}{M}\right)^2 \times \int_{\Delta\lambda} Q_{MCP}(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

其中 Q_{MCP} 为MCP金阴极的量子效率. σ 主要决定于MCP反射式的阴极结构,对于 8° 倾角的MCP,阴极分布于MCP微孔深度 $10\ \mu\text{m}$ 的范围,则有效阴极面只占开口面积的10%,另外还有通道本身的开口比,一般MCP的 σ 约为5%.增益 G 主要由MCP电子增益和屏的发光效率决定,可以通过电压幅度进行调整,一般工作条件下 G 在 10^3 左右.由(2)式和(3)式可见,MCP相机的响应特性主要决定于阴极量子效率,而CCD相机则主要决定于入射X射线光子的能量.

图4为金阴极效率曲线和镀金阴极MCP的响应曲线.其中金阴极效率曲线来自Henke等人的结果^[12],镀金阴极MCP响应曲线来自Ze等人的测量结果^[13].由图可见,除了在2.4 keV附近的响应较高外,在1—10 keV范围的MCP效率曲线比较平滑.与图2的X射线辐射谱相比,MCP选通相机的响应曲线与ICF实验的辐射谱比较符合,因此MCP测量系统的谱响应特性可以避免系统响应能区偏

硬的问题.同时在中低能区(2.4 keV附近)的响应相对较强,适合金靶M带发射谱的时空诊断.

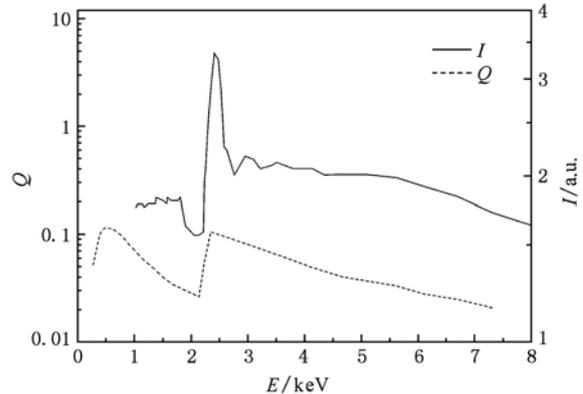


图4 金阴极效率曲线和镀金阴极MCP的响应曲线

3. 实验结果与分析

利用神光II装置第九路打靶实验可以考核MCP选通分幅相机的性能,并与X射线CCD结果进行比较.图5分别为第九路激光打靶的分幅相机图像和X射线CCD的图像.第九路激光参数为3倍频,能量1200 J,脉宽2 ns,加蝇眼透镜,照射背光靶中心,背光靶采用Mo,Mo靶线谱中心的能点2.5 keV.分幅相机的针孔放大倍数10,滤片为 $20\ \mu\text{m}$ 的Be,2.5 keV透过率85%.X射线CCD系统的针孔放大倍数10,由于低能区测试容易饱和,滤片采用 $5.2\ \mu\text{m}$ 的Ti,2.5 keV透过率29%.

系统信噪比是成像系统动态范围和图像质量的决定因素之一.由图5可以比较两套系统的信噪比.在获得的图像中统计非信号区域的CCD本底,分幅相机的本底最大值17,最小值0,平均值为0.0057,标准差0.226.X射线CCD系统的本底最大值2608,最小值23,平均值为525.244,标准差235.977.由此可见,分幅相机具有很好的信噪比,而X射线CCD系统由于对高能X射线的强响应,背景噪声较强.

分幅相机噪声水平低主要有三个方面的原因.首先是由于系统具有门控特性,避免了MCP长时间加电的暗电流噪声;其次是由于MCP金阴极对高能X射线响应度不高,避免了通过针孔板直穿光引起的噪声.再次,穿透MCP的直穿光信号荧光屏响应极小,可以忽略.而科学级X射线CCD不具有以上特性,因此噪声相对较高.

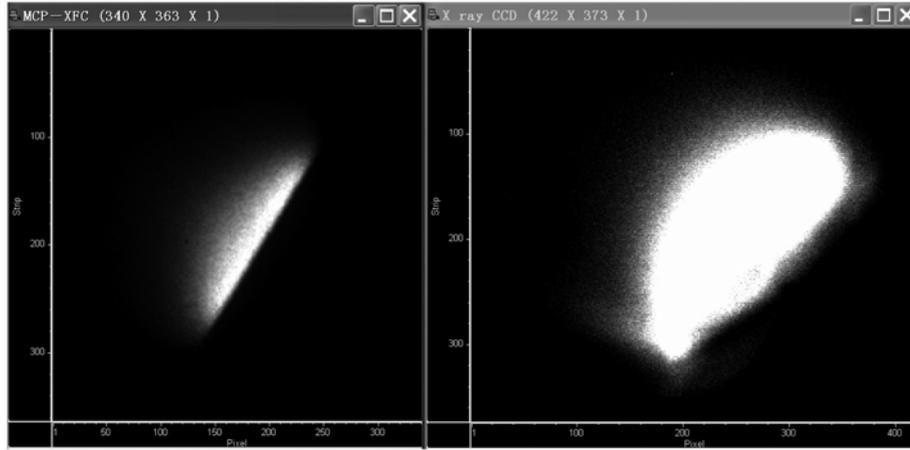


图5 第九路激光打靶的分幅相机图像和 X 射线 CCD 图像

利用一定能量的激光条件和相同的打靶条件可以获得系统的动态范围. 定义 MCP 选通分幅相机成像系统的动态范围为: 一定的源强度下, 保障图像清晰可辨并且图像中无饱和输出的情况下, 最高增益图像的亮度与最低增益图像亮度的比值. 最高增益图像是指测试图像中信号较强, 但图像中不存在饱和信号, 最低低增益图像是指测试图像的信息基本完整, 并且信噪比大于某个值, 如信噪比大于 10.

图 6 为 MCP 选通分幅相机在不同 MCP 选通电压幅度下的光斑尺寸与强度分布的关系. 选通脉冲的脉冲宽度 3 ns, 幅度分别为 640, 890, 1170 V 和 1700 V. 相机记录系统所用 CCD 为 PI-SXC 型科学级 CCD, 像元尺寸 24 μm \times 24 μm . 由图 6 可见, 光斑强度随着电压幅度升高而增大, 光斑尺寸基本一致, 不同电压值下的差异在 20% 以内 (FWHM). 如果记录系统饱和, CCD 像元的电流将会出现溢出,

所记录的图像在形貌和宽度尺寸上将会出现不一致. 本实验最大电压幅度为 1700 V 下, 光斑区无饱和和信号, 电压幅度为 640 V 下, 光斑完整且信噪比大于 10.

由 1700 和 640 V 的实验结果可以获得系统的动态范围. 不妨以图像中最强信号值作为图像亮度的表征值^[14], 图 7 画出了四个电压值下的信号与电压值的关系. 图中同时画出了 CCD 饱和和限位值在 65000, 噪声最大值 17. 由图 7 可见, 在 640 V 到 1700 V 测量范围内, 信号强度与电压值在对数坐标下基本成线性, 并且系统的动态范围大于 3×10^3 . 由图可见, 800 V 以上线性度较好, 640 V 以下响应非线性较强. 系统响应的线性度受到 CCD 响应的一致性和稳定性、源信号的一致性、MCP 增益线性度和增益的稳定性以及选通脉冲形状的变化和涨落等等因素的影响.

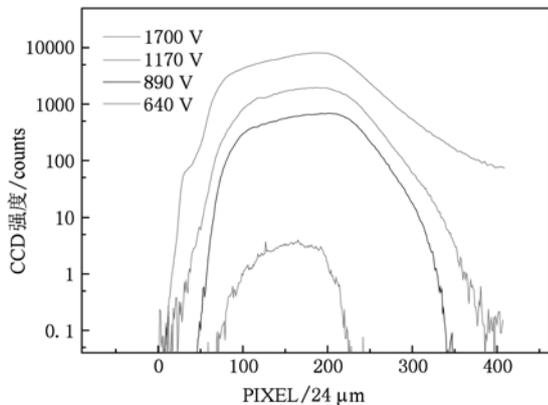


图 6 不同 MCP 脉冲电压幅度下测得的光斑尺寸与强度分布

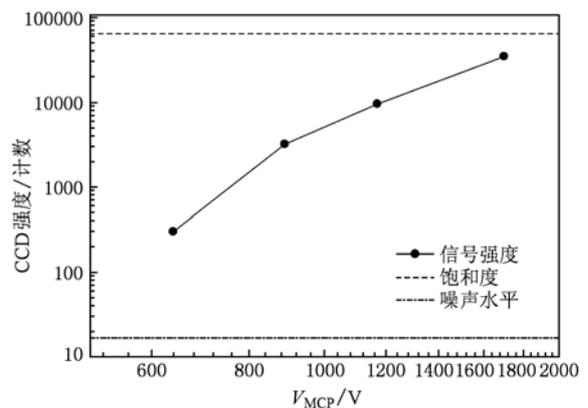


图 7 脉冲电压幅度与光斑最大亮度的关系

由于本系统具有好的谱响应特性、低噪声水平、大画幅和高动态范围等特性,在 ICF 辐射物理、黑腔物理、内爆动力学物理、流体力学不稳定性实验以及其他类型的等离子体装置中具有广泛的应用^[15-18]. 同时,利用本系统与高线对光栅、球面镜、KBA 型或 KB 型 X 显微镜等分光系统的配接^[15],可以发展多种高性能的新型诊断系统.

4. 结 论

通过 MCP 金光电阴极的谱响应特性与 X 射线

CCD 谱响应特性的比较,设计和研制了一种适合高功率激光等离子体时空测量的大画幅高动态范围 MCP 选通型分幅诊断系统. 单画幅宽度达到 13 mm,长度 36 mm,具有双通道结构. 由于系统曝光时间在 0.5—5 ns 可调,系统具有很好的信噪比. 利用神光 II 装置激光打靶实验进行了系统性能考核,并与 X 射线 CCD 进行了比较. 实验结果表明,系统谱响应平整,噪声水平低,动态范围大于 3×10^3 . 系统已在神光 II 装置 ICF 实验中获得成功应用,在 ICF 实验中具有广泛的应用前景,为发展多种高性能新型诊断技术奠定了良好的基础.

- [1] Drake R P 2006 *High Energy Density Physics* (New York: Springer) p335
- [2] Campbell E M, Hogan W J 1999 *Plasma Phys. Control. Fusion* **41** B39
- [3] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [4] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [5] Cavailler C 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** B389
- [6] Landon M D, Koch J A, Alvarez S S 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 698
- [7] Jiang S E, Li W H, Sun K X, Jiang X H, Liu Y G, Cui Y L, Chen J S, Ding Y K, Zheng Z J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3424 (in Chinese) [江少恩、李文洪、孙可煦、蒋小华、刘永刚、崔延莉、陈久森、丁永坤、郑志坚 2004 物理学报 **53** 3424]
- [8] Dong J J, Liu S Y, Yang G H, Yu Y N 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 1347 (in Chinese) [董建军、刘慎业、杨国洪、于燕宁 2009 强激光与粒子束 **21** 1347]
- [9] Cao Z R, Li S W, Jiang S E, Ding Y K, Liu S Y, Yang J M, Zhang H Y, Yang Z H, Li H, Yi R Q, He X A 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7170 (in Chinese) [曹柱荣、李三伟、江少恩、丁永坤、刘慎业、杨家敏、张海鹰、杨正华、黎航、易荣清、何小安 2010 物理学报 **59** 7170]
- [10] Cao Z R, Ding Y K, Liu S Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2640 (in Chinese) [曹柱荣、丁永坤、刘慎业 2010 物理学报 **59** 2640]
- [11] <http://www.roperscientific.com>
- [12] Henke B L, Knauer J P, Premaratne K 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 1514
- [13] Ze F, Landen O L, Bell P M, Turner R E, Tutt T, Alvarez S S, Costa R L 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 659
- [14] Cao Z R, Zhang H Y, Yi R Q, Li H, Dong J J, Gu Y Q, Liu S Y, Ding Y K 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 948 (in Chinese) [曹柱荣、张海鹰、易荣清、黎航、董建军、谷渝秋、刘慎业、丁永坤 2008 强激光与粒子束 **20** 948]
- [15] Dong J J, Cao Z R, Yuan Y T, Zhan X Y, Liu S Y, Ding Y K 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 75 (in Chinese) [董建军、曹柱荣、袁永腾、詹夏雨、刘慎业、丁永坤 2009 强激光与粒子束 **21** 75]
- [16] Chang L, Cheng G X, Li L M, Liu L, Xu Q F 2010 *Chin. Phys. B* **19** 032902-1
- [17] Zhang J Y, Ding Y N, Hu X, Huang Y X, Jiang S E, Li Y S, Yang G H, Yang J M, Zhang J Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 025201-1
- [18] Bian B M, Ji Y J, Lu J, Tong C X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 980 (in Chinese) [卞保民、纪运景、陆建、童朝霞 2008 物理学报 **57** 980]

High dynamic range imaging and application to laser-plasma diagnostics in inertial confinement fusion (ICF) experiment*

Cao Zhu-Rong[†] Zhang Hai-Ying Dong Jian-Jun Yuan Zheng Miao Wen-Yong Liu Shen-Ye
Jiang Shao-En Ding Yong-Kun

(Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 22 May 2010; revised manuscript received 7 June 2010)

Abstract

High dynamic range and large format technique of micro-channel plate (MCP), gated framing camera is developed to diagnose high-power laser-plasma X-ray emission spectra. The single frame format is 13 mm × 36 mm, and exposure time is adjustable from 0.5 ns to 5 ns. Its spectral response in 1.0—10 keV is more flat than that of X-ray charge-coupled device (CCD), and there exists no energetic enhancement effect. Performance evaluation has been conducted on high power laser devices, and the results show that the system has a high signal-to-noise ratio and the dynamic range is greater than 3×10^3 . The system has been applied successfully to inertial confinement fusion (ICF) physics experiment.

Keywords: dynamic range, spectral response, laser-plasma diagnostics, framing camera

PACS: 52.70.La, 52.50.Jm, 07.85.Fv, 07.68.+m

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905050).

[†] E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn