

文章编号: 1001-4322(2001)04-0461-06

取样成像扫描式分幅技术

李冀¹, 屈军乐¹, 廖华², 周军兰¹, 杨勤劳¹, 张焕文¹, 牛憨笨¹

(1. 深圳大学 光电子学研究所, 广东 深圳 518060; 2. 广东福地科技股份有限公司, 广东 东莞 523077)

摘要: 介绍了用于惯性约束聚变(ICF)等离子体诊断的取样成像扫描分幅技术的原理, 分析了该分幅技术的有关特性参数, 如曝光时间、画幅数目、空间分辨率等。借助于特别设计的扫描变像管进行了该技术的原理性实验, 并利用计算机数字图像处理技术进行图像的重构。实验获得了持续时间约100ps的发光过程的16幅图像, 曝光时间优于6.3ps, 阴极上空间分辨率为3.5lp/mm。

关键词: 扫描变像管相机; 分幅技术; ICF诊断

中图分类号: TL65 **文献标识码:** A

惯性约束核聚变(ICF)的研究对象之一是高温高密度激光等离子体, 其特征是, 持续时间: 5ps~10ns; 空间尺寸: 1 μ m~1cm; 温度: 50eV~500keV; 密度: 10²²~10²⁶m⁻³。由于研究对象的特殊性以及对时间、空间分辨本领的高要求, 这一研究领域的诊断技术已经成为实验物理研究的重要组成部分并形成独立的分支学科, 是ICF研究必不可少的手段和条件。

目前用于高温等离子体时空成像诊断的技术主要有三种类型: (1)扫描相机^[1-3], 其优点是时间分辨率高(2~5ps对X射线)^[3], 与分光元件配合可做时间-光谱联合诊断^[4]。但用于强度-时间诊断, 只能获得一维空间信息。(2)行波型MCP快门选通分幅技术^[5,6], 其特点是可提供二维空间信息, 单幅曝光时间较短(约100ps), 抗干扰能力较强。缺点是画幅尺寸小, 对目标的空间分辨率低。(3)电子束扫描分幅技术^[7], 其特点是分幅速率高, 画幅尺寸大(Φ), 可与显微镜配接。缺点是画幅数目少, 抗干扰能力差。

激光驱动的ICF靶核在其内爆的初始阶段具有的典型时空尺寸分别是几百ps和几百 μ m。对该阶段的诊断研究所要求的时空分辨能力一般分别为50ps和10 μ m。上述的诊断手段并配以诸如X射线针孔相机或X射线显微镜等设备已在实验中得到应用。而在内爆后期靶球被最后压缩阶段, 其典型的时空尺度为100ps和几十 μ m^[8], 于是对诊断工具时空分辨本领的要求就分别提高到10ps和1 μ m。上述诊断技术就勉为其难了。

上述诊断对象的特点要求高时、空分辨技术联合诊断。这里介绍一种具有高时空分辨本领的取样成像扫描分幅技术, 它充分利用扫描变像管所具有的工作面积大、时间分辨率高的优越性, 经过空间取样, 与计算机图像处理技术相结合, 实现超快速分幅。其特点是画幅尺寸大, 曝光时间短, 画幅数目多, 可与显微镜耦合, 提高对目标的空间分辨本领。

1 分幅原理

当前X射线扫描相机是唯一可能以优于10ps的时间分辨率获得X射线辐射过程图像的诊断设备。但该“图像”仅包含一维空间信息, 其原因是投射到相机阴极上的二维图像被阴极上的狭缝调制。X射线分幅相机可以提供二维空间信息图像, 但现有的技术很难做到优于100ps的曝光时间。我们的目的就是寻求近似完整的二维信息的图像与高的时间分辨率之间的统一。

习惯上, 图像被认为是二维的连续函数。但任何图像总是有带限的, 这是由各种图像的获取、显示和接受手段和设备的有限空间分辨率决定的。由取样定理^[9], 我们知道带限图像函数可以由周期小于其奈奎斯特(Nyquist)间隔的取样函数表示, 并可以完全恢复。这使得描述图像的数据量有所减少。取样成

像扫描分幅技术^[10]对二维图像的描述所依据的就是以上原则。其原理如图 1 所示。

待诊断现象的图像在被输入变像管光阴极之前,先经过一个二维梳状取样函数的调制,在光电阴极上得到的是具有原图像特征的点阵(对 X 射线而言取样板与光电发射层合为一体)。屏上则是点阵的像。电子束经偏转系统线性扫描,并保证各点扫描线不相互重合。就可以得到每个点对时间的信息。最后通过判读同一时刻的像点,重构该时刻的图像。同样可以得到一系列不同时刻的图像。该技术原理已被提议作为 ICF 诊断的目的^[11]。

对分幅技术,以下参数表征十分重要的技术指标。

(1) 曝光时间:其值越小,对应图像越能反映现象瞬时的特征,即设备的时间分辨本领越强。在理论上,该取样点的曝光时间可以等同于扫描变像管相机的时间分辨率,但考虑到大的阴极面积,取样成像扫描分幅技术的曝光时间 τ 为

$$\tau = [(\nu\delta)^{-2} + \tau_{md}^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中: ν 是扫描速度; δ 是扫描状态下的空间可分辨率; τ_{md} 是管子时间畸变的最大值。

这样该技术就兼有扫描和分幅相机的优点。但实际上,取样点不可能是理想的几何点而总有一定大小,这就造成了曝光时间的扩展。以 d 和 M 分别代表取样点的大小和变像管的放大倍率,取样点在屏上可以简单估计为

$$\sigma = [(Md)^2 + \delta^2]^{1/2} \quad (2)$$

由此引起的可分辨单元为

$$\tau = [t_i^2 + \tau_{md}^2 + (\sigma/\nu)^2]^{1/2} \quad (3)$$

t_i 是各种时间弥散。上式也就是该分幅技术所能具有的最小曝光时间。一个好的扫描变像管设计可以保证其具有很小的时间弥散(对 X 射线一般小于 2ps)。此外好的变像管像质使得 $Md > 1/\delta$, 所以曝光时间可以简单写成

$$t = Md/\nu \quad (4)$$

考虑到适当的扫速和大的放大倍率有利于其他因素,减小取样点尺寸 d 是改善曝光时间的措施。以上估算均以线性系统、高斯近似为假设前提。

(2) 画幅数目:对一个诊断过程,其画幅数目越多,对整个过程的描述就越细致。因此这里所说的画幅数目是指以最短曝光时间为单元对过程取样的次数。一般情况下,诊断现象的持续时间 T , 远大于诊断工具的可分辨时间单元 δ ($T \gg \delta$)。扫描变像管是线性扫描,现象的时间过程与屏上扫描方向上一定空间尺度线性对应。该尺度与可分辨的时间元对应的尺寸的比值就是最大画幅数目。

对任一个取样点,它的扫描线穿行于其他取样点的空隙之中,其扫程不可能任意长,否则会与其他点重合而影响对扫描图像的判读。通过调节扫描方向,可以获得尽可能长的扫程。这里我们认为扫速可以适当调整以充分利用有效扫程。由以上原则并经简单几何关系,可以得出最大的画幅数目 N_{max}

$$N_{max} = MD \sqrt{1 + (MDs^{-1})^2} \quad (5)$$

式中: D 是点阵周期; 而

$$s = \max(Md, 1/\delta) \quad (6)$$

在具体的诊断中,扫速和时间分辨率都是定值,有效的画幅数目可写为

$$N = \min(N_{max}, T/\delta) \quad (7)$$

以上分析都假定变像管是理想成像,无像差和畸变。虽显简单,但求物理意义明晰。

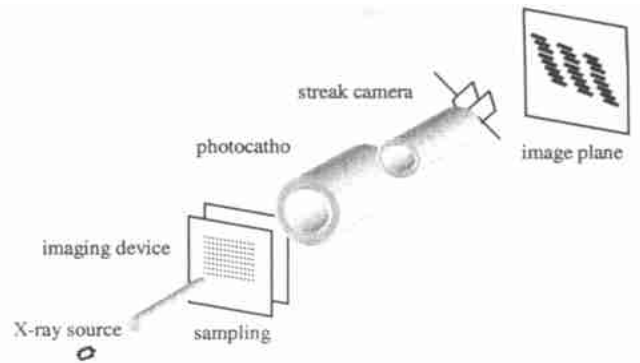


Fig 1 Sketch of principle of sampling-image streaking frame

图 1 取样成像扫描分幅技术原理

(3) 空间分辨: 取样成像扫描分幅技术的空间分辨能力受到构成该技术的各个环节或部分的影响, 包括配合使用的针孔相机或显微镜和其他光学系统以及 CCD 相机。取样板的存在也会影响系统的空间分辨。为保证足够的空间分辨能力, 取样板的设计应满足

$$D \geq \frac{1}{2} M \Delta r \tag{8}$$

其中 M 和 Δr 分别代表前级系统 (如 X 射线显微镜、针孔相机等) 的放大倍率和分辨能力。

(4) 特殊的扫描变像管: 通过如上分析, 该取样成像扫描分幅技术对扫描变像管除了良好的时间、空间分辨率特性要求外, 还特别要求变像管具有更大的动态范围。一方面这是完整描述诊断对象的需要, 另一方面也是为了防止取样点的扫描线因瞬时光强过大而展宽, 导致空间分辨率下降。此外, 变像管应具有大的工作面积、小的几何畸变。考虑到图像数字化的需要, CCD 相机作为图像记录设备。为 CCD 相机使用方便计变像管应具有较大的放大倍率。这在设计中应以考虑。

2 实验

实验的核心器件是我们设计研制的一种具有大动态范围、高时空分辨率的多用途扫描变像管。我们首先对该扫描变像管进行了实验评价, 包括其时间分辨率、空间分辨率、动态范围等。其详细内容与本文目的无直接联系, 如有必要将另文发表, 这里只罗列结果。用同步方式标定其时间分辨率 1.8 ps; 动态范围为 256; 时间畸变约 2 ps; 此外, 该变像管放大倍率 4, 空间分辨率优于 50 lp/mm。

2.1 实验装置

为了演示和评价上述取样成像扫描分幅技术原理, 我们设计了如图 2 所示的实验装置。

由于我们的实验室缺少方便的皮秒 X 射线脉冲源, 实验中我们以主-被动锁模的 YAG 激光器作为照明光源, 来模拟激光等离子体的 X 射线辐射。相应地, 扫描变像管的光电阴极制备成对可见光敏感的多碱光电阴极。YAG 激光器输出的单脉冲全宽度约在 80~100 ps 之间。为了与光阴极光谱匹配, 使用 KDP 晶体对 YAG 激光器的输出做腔外倍频, 其二次谐波 ($\lambda = 0.53 \mu\text{m}$) 经扩束器入射到取样板上。

本实验中所用的取样板的制备过程是, 首先在计算机上生成并输出不透明的二维点阵图形, 再将该图形微缩、反转复制到胶片上, 形成高对比度的二维透光点阵。实验中我们使用了两种不同空间频率的取样板, 其透光孔尺寸分别为 $150 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$, 点间距分别是 $800 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$, 如图 3 所示。

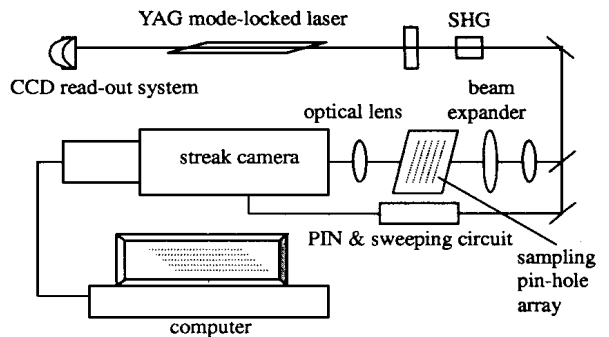


Fig. 2 Scheme of demonstrative experiment arrangement
图 2 实验示意图

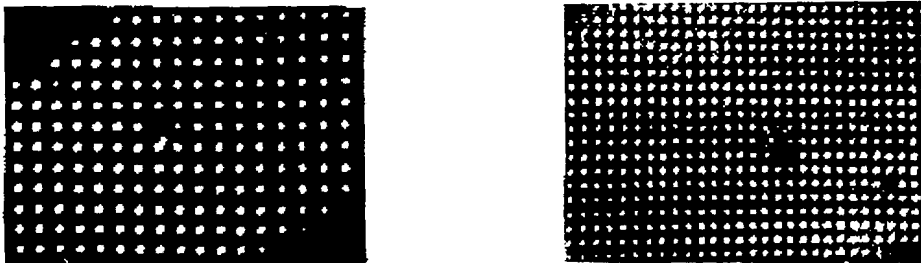


Fig. 3 Photograph of sampling panel
图 3 取样板照片

实验中扫描相机的输入透镜组具有 3:1 的缩小比率。这样在变像管光电阴极上透光孔尺寸分别为 $50 \mu\text{m}$ 和 $33 \mu\text{m}$, 点间距分别是 $267 \mu\text{m}$ 和 $133 \mu\text{m}$ 。对应空间分辨率 3.5 lp/mm 和 7.0 lp/mm。

为了避免扫描时各点的扫描线相互重合而混淆时间信息, 同时也为了在较大范围内适应不同的扫

描速度和不同的发光现象,需要旋转变像管或取样板,使扫描方向与取样点阵呈合适的几何关系从而获得尽可能大的扫描空间,如图 4 所示。

扫描图像由 CCD 读出系统记录,并存入计算机以备后续处理。实用的 CCD 读出系统应具有尽可能高的灰度等级和像素数。我们现有的读出系统的灰度等级为 256,记录单幅图像所用的像素数目为 512×256 。为了充分利用各像素以及后续判读的方便,CCD 相机亦应做适当旋转。

2.2 实验结果

我们编制了运行于 Matlab 环境下的图像处理程序,对扫描图像进行判读并重构发光过程的二维图像。图 5 是取样成像扫描分幅的照片。实验中使用了两种不同的取样板,扫描图像分别对应着不同的扫速。使用间隔 200ps 的标准具对扫速进行了标定,扫速分别约为 2.2ps/ch 和 5.5ps/ch。

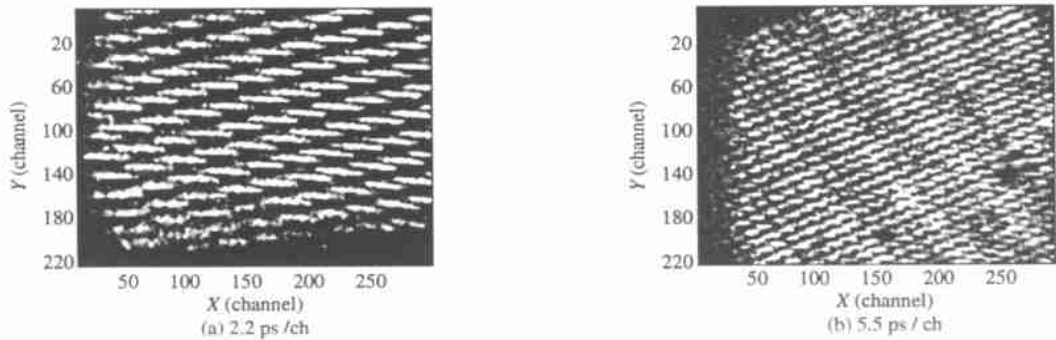


Fig 5 Photograph of streaked image of sampling panel

图 5 取样板扫描图像

作为演示,为方便计对图 5 进行了重构,获得了 16 幅图像,见图 6。时间顺序从左到右、从上到下,曝光时间约是 6.3ps,图 7 显示了发光过程的亮度变化。

3 讨论

以上的实验证实了取样成像扫描分幅技术获得高时空分辨本领的可行性。这里的空间分辨率是指受取样点阵空间周期所限定的系统的空间分辨率。文中图像重构时以周期较大的取样板为例,空间分辨率应为 3.5 lp/mm。如果使用周期较小的取样板,结果有望更好。对激光等离子体诊断言,取样板和 X 射线阴极应合二为一,制备如此的光电发射点阵是以后工作的内容。我们已提出了一种基于 MCP (微通道板) 工艺的模板来形成 X 射线光电发射点阵。

最后,我们指出该技术用于激光等离子体 X 射线诊断时。如果使用 X 射线显微镜作为分幅相机的前级系统,其放大倍率为 120,假设靶核等离子体的尺度为 $100\mu\text{m}$,则变像管阴极有效面积 $S = 12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 。如果将取样点定为 40×40 ,则取样周期 D 为 0.3mm,这样相机对等离子体细节的分辨为 $5\mu\text{m}$ 。变像管空间分辨率以 20 lp/mm,计使取样孔 $d < 50\mu\text{m}$,则获得的画幅可达 30 幅,而最短的曝光时间与管子的时间分辨率相当 (优于 10ps)。这将是一种十分有意义的激光等离子体诊断工具。

致 谢 中国工程物理研究院冯杰、管永红先生帮助完成了有关灰密度曲线,在此一并致谢。

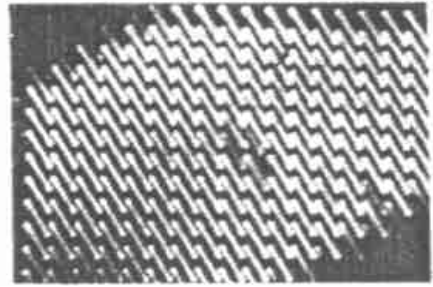


Fig 4 Sampling array image streaked by alternating voltage

图 4 取样点阵静态扫描图像

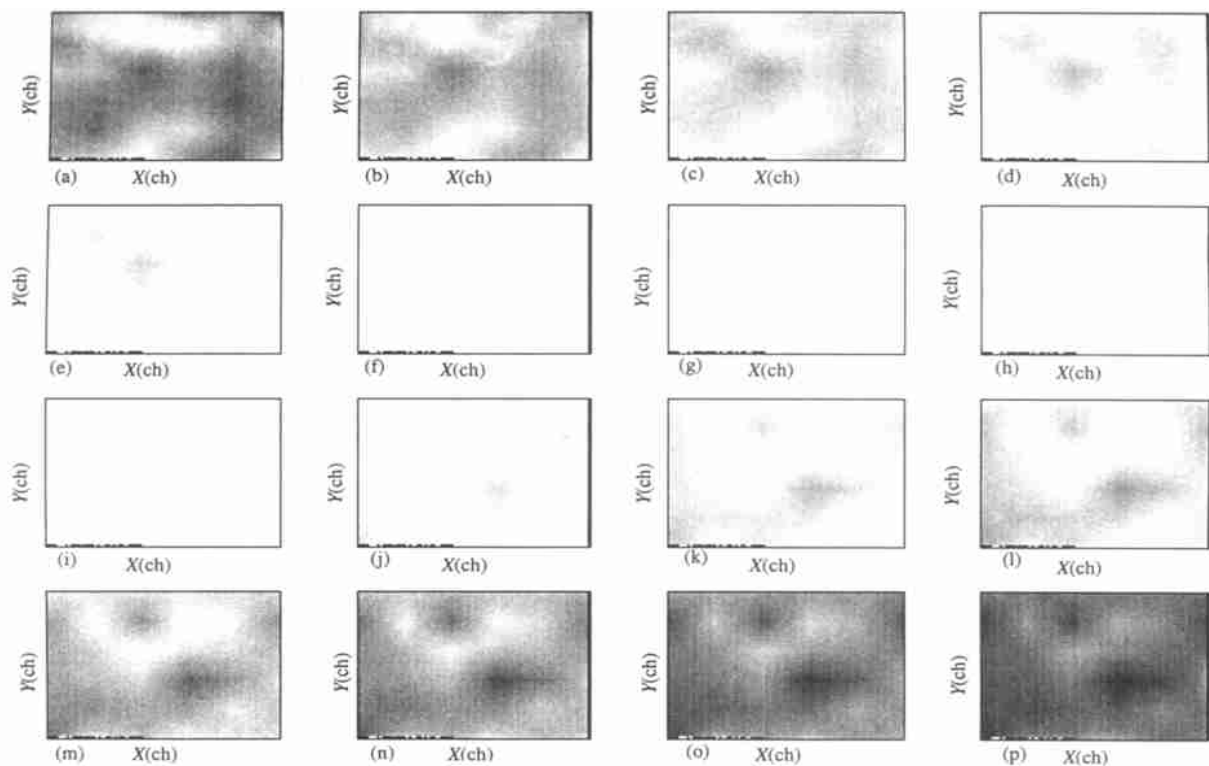


Fig 6 Reconstructed images of illuminative process

图 6 重构的发光过程图像

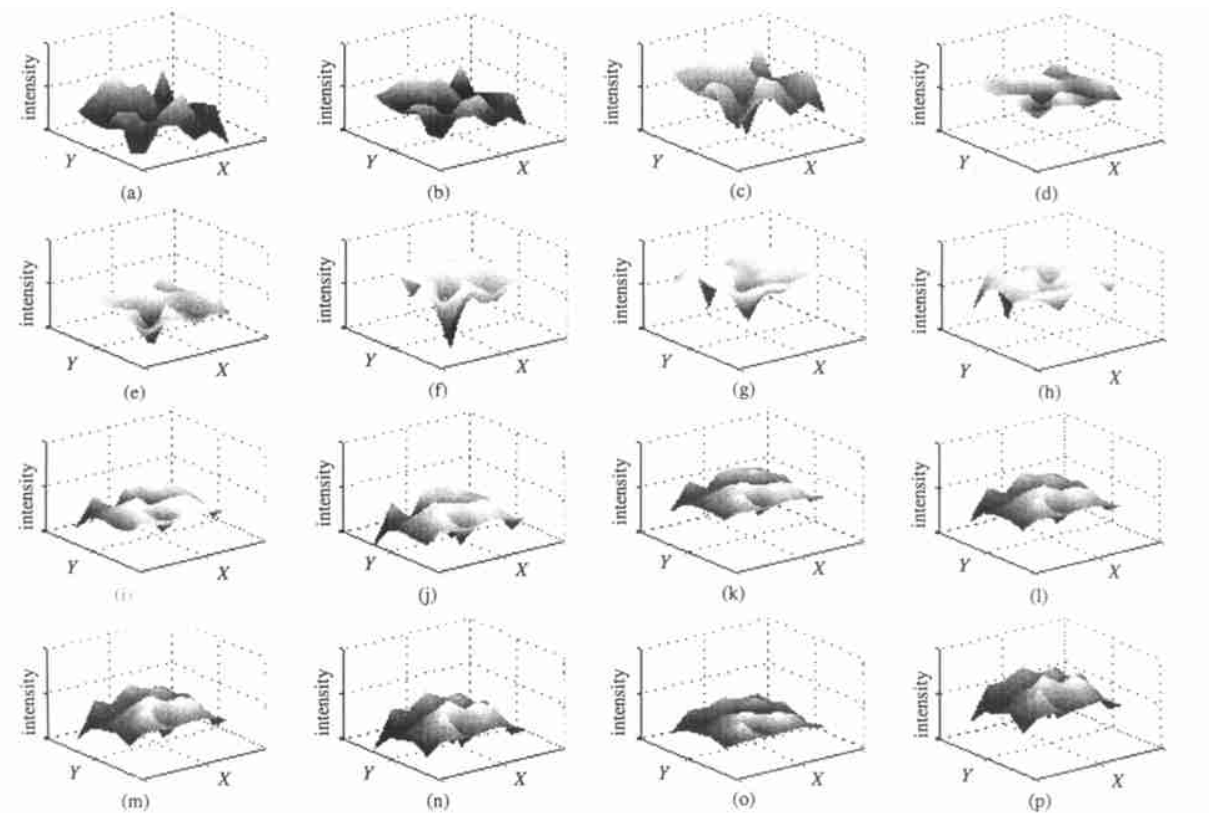


Fig 7 Distribution of transient light intensity

图 7 瞬态光强分布

参考文献:

- [1] Lebedev V B, Feldman G G, Krutik M I, et al Development and testing of subpicosecond streak camera for soft X-ray measurements[A]. Proceedings of the SPIE[C], 1999, **3516**: 74—84
- [2] Cobble J A, Fulton R D, Jones L A, et al X-ray streak camera diagnostics of picosecond laser plasma interaction[J]. *Sci Instrum Rev*, 1992, **63**(10): 5116—5118
- [3] Shepherd R, Booth R, Price D, et al Characteristics of an ultrafast X-ray streak camera[A]. Proceedings of the SPIE[C], 1994, **2278**: 78—84
- [4] Zhang H, Yang Q L, Guo B P, et al Study of soft X-ray time-resolved spectroscopy[A]. Proceedings of the SPIE[C], 1992, **1801**: 520—523
- [5] Chang Z H, Shan B, Liu X Q, et al Picosecond X-ray framing using gated MCP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, **24**(5): 501—508
- [6] Bradley D K, Bell P M, Landen O L, et al Development and characterization of a pair of 30-40 ps X-ray framing cameras[J]. *Rev Sci Instrum*, 1995, **66**(1): 716—718
- [7] 冯 杰, 丁永坤, 刘忠礼, 等 皮秒 X 射线成分幅相机性能实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 1993, **5**(3): 325—532 (Feng J, Ding Y K, Liu Z L, et al Experimental study of picosecond X-ray framing camera *High power laser and particle beams*, 1993, **5**(3): 325—532)
- [8] Shiraga H, Miyayama H, Heya M, et al Ultrafast two-dimensional X-ray imaging with X-ray streak cameras for laser fusion research[J]. *Rev Sci Instrum*, 1997, **68**(1): 745—749
- [9] 王之江, 等 成像光学[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 8—12 (Wang Z J, et al *Imaging Optics* Beijing: Science Press, 1991. 8—12)
- [10] Niu H, Sibbet W. Picosecond framing technique using a conventional streak camera[J]. *Rev Sci Instrum*, 1981, **52**(8): 1190—1192

Sampling-image streak framing technique

L I J¹, Q U Jun-le¹, L IAO Hua², Z HOU Jun-lan¹,YANG Q in-lao¹, Z HANG Huan-wen¹, N I U Han-ben¹(1. *Opto-electronics Institute, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;*2. *Guangdong Fortune Science & Technology Stock Co., Ltd. Dongguan 523077, China)*

Abstract The technique of sampling-image streaking frame for plasma diagnostics in ICF is presented. Theoretical analysis of this technique, including its exposures time, framing rate and spatial resolution is given. A specially designed streak image tube, together with an active-passive mode-locked YAG laser is used to make a preliminary proof-of-principle experiment. And by means of digital image processing the experiment result gives 16 frames with an exposure time of better than 6.3ps and spatial resolution of 3.5 lp/mm in the photocathode.

Key words: streak tube; framing camera; diagnosis of ICF