

分幅变像管动态空间分辨率的标定

袁铮 董建军 李晋 陈韬 张文海 曹柱荣 杨志文 王静 赵阳 刘慎业 杨家敏 江少恩

Calibration of the dynamic spatial resolution of framing image-converter

Yuan Zheng Dong Jian-Jun Li Jin Chen Tao Zhang Wen-Hai Cao Zhu-Rong Yang Zhi-Wen  
Wang Jing Zhao Yang Liu Shen-Ye Yang Jia-Min Jiang Shao-En

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 095202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.095202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.095202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碰撞等离子体中电中性条件对单探针测量的约束

The electrical-neutrality constraint of single Langmuir probe measurement in collisional plasma

物理学报.2015, 64(11): 115201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.115201>

高压均匀直流辉光放电等离子体的光学特性

Optical properties of direct current glow discharge plasmas at high pressures

物理学报.2015, 64(4): 045206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.045206>

软X射线激光探针诊断高Z材料等离子体

Diagnosis of high-Z plasma with soft X-ray laser probe

物理学报.2014, 63(21): 215203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215203>

利用软X射线双频光栅剪切干涉技术诊断金等离子体

Diagnoses of Au plasma with soft X-ray double frequency grating interference technique

物理学报.2014, 63(12): 125210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125210>

多目标优化推断内爆芯部温度和密度空间分布

Deduction of temperature and density spatial profile for implosion core by multi-objective optimization

物理学报.2014, 63(12): 125209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125209>

## 分幅变像管动态空间分辨率的标定\*

袁铮 董建军 李晋 陈韬 张文海 曹柱荣 杨志文<sup>†</sup> 王静  
赵阳 刘慎业 杨家敏 江少恩

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2015年12月21日收到; 2016年2月9日收到修改稿)

为了提高激光惯性约束聚变实验二维成像诊断的精密化程度, 提出了分幅变像管动态空间分辨率的标定方法. 标定原理是以直边函数为物, 经光学系统成像后求解系统的调制传递函数, 从而获得系统的空间分辨率. 在神光II装置上利用八路激光打靶产生1—3.5 keV能区的连续X射线标定源, 照射高Z刀边材料, 并成像到分幅变像管阴极上, 分幅变像管采用脉冲选通工作模式获得动态像. 对分幅变像管采集的动态图像进行处理得到系统的调制传递函数. 根据调制传递函数为0.1时对应的空间截止频率, 得到系统的空间分辨率为20 lp/mm. 根据分幅变像管的动态空间分辨理论, 计算系统的极限空间分辨率为22.8 lp/mm. 标定结果略低于极限空间分辨率, 与理论基本吻合. 根据传统标定方法得到该分幅变像管的静态空间分辨率为22 lp/mm, 比动态空间分辨率略高. 在二维成像诊断时, 分幅变像管工作于动态选通模式, 故动态空间分辨率的标定结果更能真实地反映其成像诊断能力.

**关键词:** 分幅变像管, 动态空间分辨率, 调制传递函数**PACS:** 52.70.-m, 87.57.cf, 06.20.fb**DOI:** 10.7498/aps.65.095202

## 1 引言

X射线分幅变像管是激光惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 领域的重要诊断设备之一, 可与针孔阵列配合构成X射线分幅相机, 也可以配接KB显微镜、曲面多层镜、曲面晶体等成像设备和测谱设备, 构成多样化的物理实验诊断设备<sup>[1-4]</sup>. 这些诊断设备共有—个非常重要的性能指标, 即空间分辨率. 分幅变像管的空间分辨率将决定诊断设备的成像能力与谱分辨能力. 在ICF诊断精密化的大背景下, 对分幅变像管的空间分辨率进行精密定标是亟待解决的问题.

关于分幅变像管空间分辨的已有研究工作主要是从理论角度来分析其空间分辨特性<sup>[5,6]</sup>, 或者是对其静态空间分辨率的测量<sup>[7-9]</sup>. 所谓静态空间分辨率是指分幅变像管工作于直流增益的静态工

作模式时的空间分辨率, 而动态空间分辨率则是指分幅变像管工作于脉冲选通的动态工作模式时的空间分辨率. 传统的分幅变像管空间分辨测量方法是采用紫外光源照射石英分辨率板, 并将分辨率板成像到工作于直流增益工作模式的分幅变像管阴极上, 从而得到分辨率板图像, 以清晰图像对应的线对数作为静态空间分辨率. 由于分幅变像管的光电阴极是金, 其在紫外波段的响应<sup>[10]</sup>与X射线波段的响应<sup>[11,12]</sup>是不一样的, 且紫外光波长较长, 存在衍射限制, 影响空间分辨率的测量准确性. 同时, 分幅变像管的核心元件——微通道板 (MCP) 工作于脉冲选通模式时的动态空间分辨率相对于MCP工作于直流模式的静态空间分辨率是不完全一样的<sup>[13,14]</sup>. 在ICF实验的诊断测量中, 分幅变像管的工作状态均为动态选通模式. 因此传统的测量方式并不能准确地反映分幅变像管在实际ICF激光打靶实验时的空间分辨率. 为了更准确地评估诊断设

\* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2014B0102010) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: y-zw@163.com

备测量数据的准确度和精度,有必要研究分幅变像管动态空间分辨率的标定方法.

Zhu等<sup>[15]</sup>利用窄狭缝对同样以MCP为核心元件的像增强器的动态空间分辨率进行了测量.其测量原理为:利用光学镜组将窄狭缝成像到像增强器的阴极上作为输入,通过工作于动态选通模式的像增强器输出端记录的图像得到线扩散函数(LSF),对LSF做傅里叶变换得到光学传递函数(OTF),对OTF的模进行归一化处理即得到动态调制传递函数(MTF),从而得到系统的动态空间分辨率.但其所采用的光源为氙灯,为可见光波段,成像所采用的镜组也为光学镜片,对分幅变像管并不适用. Bakeman等<sup>[16]</sup>针对4.51 keV的X射线,采用钨刀边对分幅相机的动态调制传递函数进行了测量.刀边厚6.3  $\mu\text{m}$ ,距靶380 mm,得到了分幅相机在单能点X射线照射下的动态空间分辨率为7.21 lp/mm.由于其针对的是单能点,对于ICF实验测量的1—4 keV连续能区并不适用.

为了明确分幅变像管在1—4 keV能区的动态空间分辨能力,本文利用神光II激光装置打靶产生的1—3.5 keV能区的连续X射线源作为标定光源,分幅变像管工作于动态选通工作模式,采用光电阴极前近贴高Z刀口材料的方式对分幅变像管的动态空间分辨率进行标定.为了对比,采用传统标定方法对同一分幅变像管的静态空间分辨率进行测量.

## 2 X射线分幅变像管工作原理

分幅变像管的工作原理如图1所示. X射线辐照MCP, MCP前表面所镀的微带金阴极完成光电转换,形成光电子,进入MCP板的微通道内. 光电子在MCP微带所加行波选通电压作用下,轰击微通道内壁的铅层,产生多个二次电子,二次电子再轰击铅层产生更多的二次电子,由此获得1000倍以上的倍增后从微通道输出. 从微通道板出射的电子在荧光屏电压作用下,高速轰击荧光屏,发出可见光,再由可见光电荷耦合器件(CCD)将信号收集读出. MCP的输入、输出端面上所加电压可以是几百伏的直流电压,也可以是脉宽约200 ps,幅值约2000 V的负脉冲电压. 当MCP工作电压为直流电压,则说明分幅变像管工作于静态工作模式;

当MCP上加皮秒选通脉冲电压,则表示分幅变像管工作于动态工作模式.

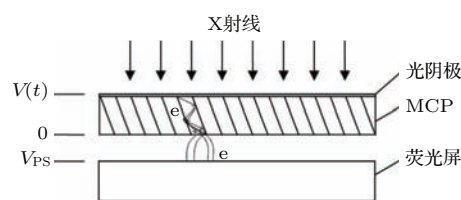


图1 分幅变像管的工作原理

Fig. 1. Working principle of framing image-converter.

## 3 标定实验设计与排布

根据光学系统像质评价知识,光学系统的分辨率定义为刚能分辨开两点像(或两物点)间的线距离,或取其倒数. 计算系统所成的像对物的调制度随空间频率变化的函数(即调制传递函数MTF)可反映系统的空间分辨率水平. 以直边函数(即刀口函数)为物, X射线通过这样的刀口样品后经光学系统成像,对其像(可认为是边缘扩散函数)做微分运算可求得系统的线扩散函数,然后对线扩散函数进行傅里叶变换就得到系统的调制传递函数,一般认为MTF值为0.1时对应的系统的空间截止频率(单位为lp/mm),即代表系统的最佳空间分辨率<sup>[17,18]</sup>.

本标定工作是分幅变像管工作于动态选通工作模式时,针对整个分幅管进行空间分辨率的整体标定,这是物理实验诊断数据测量中最直接需要的标定数据. 标定实验在神光II激光装置上开展,采用测刀口函数的方法来测量分幅变像管的调制传递函数,实验排布如图2所示. 八路激光从两端聚焦注入Au黑腔,激光能量为 $8 \times 200$  J,波长为355 nm,脉宽为1 ns. 黑腔尺寸为 $\Phi 0.8$  mm  $\times$  1 mm,腔中心装有镉样品,诊断孔尺寸为0.3 mm  $\times$  0.3 mm. 分幅变像管记录面与靶面法线的夹角为45°,分幅变像管探测面距离靶点875 mm,可计算出变像管探测面与靶点发射的X射线的立体角为2.4°. 打靶产生的X光源与探测器的距离较远,同时记录面的探测立体角较小,可视作均匀面光源. 为了避免分幅相机探测面被碎片击中,同时也为了防止信号太强导致MCP饱和,在相机阴极前面距阴极20 cm处放置了30  $\mu\text{m}$ 的Be滤片. 为了标定分幅变像管的动态空间分辨率,在阴极前端距阴极5 mm处近贴安装0.3 mm厚304

不锈钢材料的刀边. 经测量, 刀口的不平整度约  $1 \mu\text{m}$ .

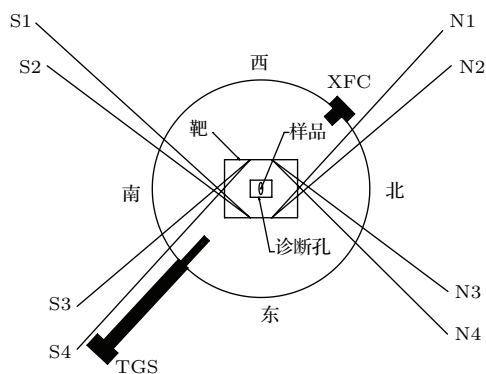


图2 标定实验排布

Fig. 2. Arrangement of the calibration experiment.

为了明确分幅变像管空间分辨率标定所用的标定源光谱, 在对称位置利用透射光栅谱仪(TGS)测量了激光打靶的发射光谱(见图3曲线“TGS”), 考虑  $30 \mu\text{m}$  厚 Be 滤片透过率后分幅变像管的实际测量能谱(见图3曲线“TGS+Be”). 由图3可知, 本次标定的光源是  $1\text{--}3.5 \text{ keV}$  的 X 射线连续能区.

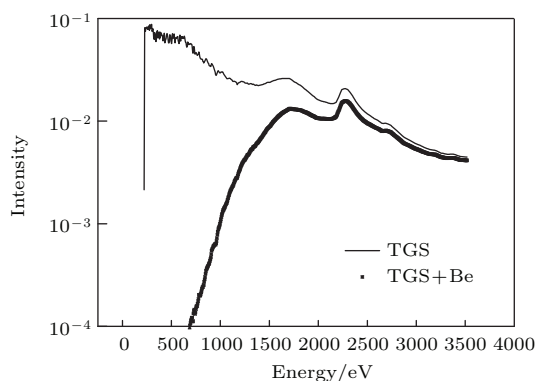


图3 发射光谱及分幅变像管的测量能谱

Fig. 3. The emission spectrum and measurement energy spectrum

## 4 标定结果与分析

### 4.1 标定结果处理

根据以上标定方法, 得到了分幅变像管所记录的动态刀口图像. 动态图像在刀边位置相当于一个二维阶跃函数与系统点扩散函数卷积的结果, 通过刀口后的阶跃 X 光强分布的陡变边缘被点扩散函数展宽, 构成一条边缘扩散函数, 如图4所示(其中“Measurement”所代表的曲线). 由于记录设备

的计数误差等因素, 函数后端的点并不平滑, 且有下降趋势, 不利于后续计算, 因此采用 Boltzmann 函数将边缘扩散函数拟合成一条平滑的上升曲线(图4中“Boltzmann”所代表的曲线). 对边缘扩散函数求导即得到系统的线扩散函数, 如图5所示, 对线扩散函数进行傅里叶变换即得到系统的调制传递函数, 如图6所示.

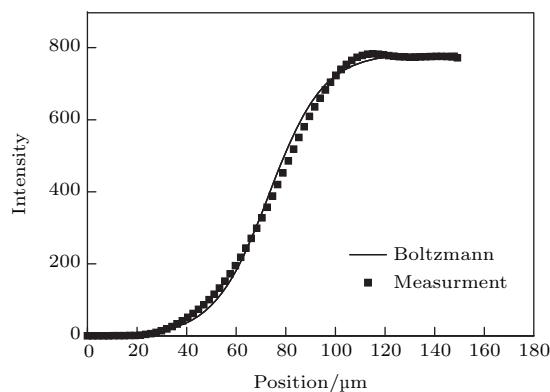


图4 边缘扩散函数

Fig. 4. Edge-spread function.

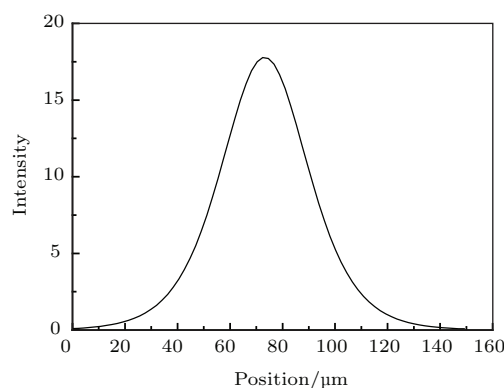


图5 线扩散函数

Fig. 5. Line spread function.

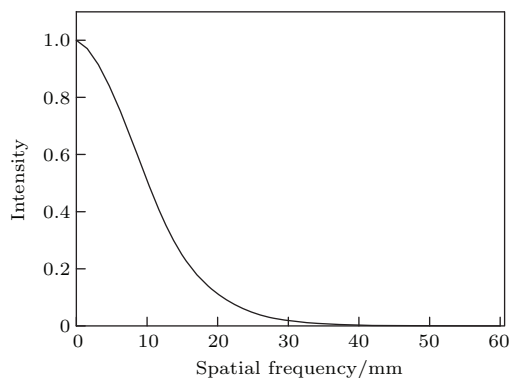


图6 调制传递函数

Fig. 6. Modulation transfer function.

根据像质评价理论<sup>[17-19]</sup>, 一般认为调制传递函数为0.1时的空间频率所对应的空间分辨率为系统的最大分辨率, 由图6可知系统的空间截止频率为20 lp/mm, 故分幅变像管动态空间分辨率标定结果为50  $\mu\text{m}$ .

## 4.2 理论分析

根据分幅变像管的工作原理, 若忽略空间电荷效应、噪声等对分幅管空间分辨的影响, 只考虑MCP微通道直径、MCP斜切角、MCP工作电压、MCP与荧光屏间的近贴聚焦电场、荧光粉粒大小以及光纤面板芯径等参数的影响, 则分幅管的空间分辨率<sup>[18]</sup>  $S$ 可表示为

$$\frac{1}{S^2} = \frac{1}{S_{\text{MCP}}^2} + \frac{1}{S_{\text{PS}}^2} + \frac{1}{S_{\text{MCP-PS}}^2} + \frac{1}{S_{\text{FOP}}^2}, \quad (1)$$

其中,  $S_{\text{MCP}}$ 表示MCP的空间分辨率,  $S_{\text{PS}}$ 为荧光屏的空间分辨率,  $S_{\text{MCP-PS}}$ 为MCP到荧光屏之间的近贴聚焦电子光学系统的空间分辨率,  $S_{\text{FOP}}$ 为光纤面板的空间分辨率.

根据(1)式, 系统总的动态空间分辨率 $S$ 主要由MCP的空间分辨率 $S_{\text{MCP}}$ 、荧光屏的空间分辨率 $S_{\text{PS}}$ 、MCP与荧光屏之间的近贴聚焦电子光学系统的空间分辨率 $S_{\text{MCP-PS}}$ 、光纤面板的空间分辨率 $S_{\text{FOP}}$ 四项因素决定. 下面根据本次标定所用分幅变像管的结构参数及动态工作模式的电参数, 分别计算这四个分项的极限值.

分幅变像管所用微通道板的结构参数如下: MCP微通道直径为12  $\mu\text{m}$ , 厚度4.8 mm, 孔间距15  $\mu\text{m}$ , 斜切角 $8^\circ$ , 故MCP的极限空间分辨率<sup>[7,19]</sup>为

$$S_{\text{MCP}} = 1000/15\sqrt{3} = 38.5 \text{ lp/mm}. \quad (2)$$

分幅变像管所用荧光屏为P43屏, 其空间分辨率受粉粒大小和屏厚度影响. 根据文献<sup>[7]</sup>, 按照经验公式可得出荧光屏的空间分辨率 $S_{\text{PS}} = 98 \text{ lp/mm}$ .

光纤面板的空间分辨率取决于单根光纤直径、排列方式和光线中心距. 标定所用光纤面板单根光纤直径为6  $\mu\text{m}$ , 则其极限分辨率<sup>[20]</sup>为

$$S_{\text{FOP}} = 100/6\sqrt{3} = 96 \text{ lp/mm}. \quad (3)$$

计算MCP到荧光屏之间的近贴聚焦电子光学系统的空间分辨率 $S_{\text{MCP-PS}}$ 时, 必须考虑MCP上

所加的行波选通电脉冲、二次电子出射能量、MCP与荧光屏之间的间距、荧光屏与MCP之间的电压差等因素. 标定所用分幅变像管工作于动态模式时, MCP上所加选通脉冲幅值为1800 V, 脉宽为250 ps. 荧光屏与MCP输出面间距为0.5 mm, 荧光屏电压4500 V. 根据近贴聚焦系统的空间分辨率的评定, 若只考虑二次电子由于皮秒电脉冲选通而导致从MCP输出面出射动能的不同, 则系统的空间分辨率应以像面上弥散圆的均方根直径的倒数来表示<sup>[19]</sup>:

$$R = \left(2\sqrt{\Delta r^2}\right)^{-1}, \quad (4)$$

其中,  $\nu$ 表示空间频率,  $\Delta r$ 表示像面上弥散圆的半径. 根据像质评价理论<sup>[19]</sup>, 有计算公式:

$$\Delta r^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(2L\sqrt{V_i/V_P}\right)^2, \quad (5)$$

其中,  $n$ 表示MCP离散打拿极的级数,  $L$ 表示微通道的长度,  $V_P$ 表示荧光屏电压,  $V_i$ 表示打拿极产生的二次电子轰击通道壁时电子能量的等效电位. 由于电子在微通道中相邻两次碰撞到微通道壁的飞行距离约为通道直径的4倍<sup>[12]</sup>, 故级数 $n = 10$ . 由于微通道板的输入面和输出面均镀有Au膜, 距微通道的输入口和输出口12—24  $\mu\text{m}$ 的微通道内壁均有Au膜, 从而MCP输出面附近的二次电子是轰击Au膜上再次产生二次电子. 这些二次电子虽方向各异, 但初始能量均值为1.3 eV, 因此电子从MCP输出面出射的最小等效电位 $V_{i_{\text{min}}} = 1.3 \text{ V}$ , 故 $\Delta r_{\text{min}} = 0.016 \text{ mm}$ ,  $R_{\text{max}} = 31 \text{ lp/mm}$ . 为简化计算, 假设MCP上所加选通脉冲电压按照打拿极级数平均分配, 故 $V_{i_{\text{max}}} = 180 \text{ V}$ , 故 $\Delta r_{\text{max}} = 0.192 \text{ mm}$ ,  $R_{\text{min}} = 2.6 \text{ lp/mm}$ . 由此可得到MCP与荧光屏之间的近贴聚焦系统的空间分辨率 $S_{\text{MCP-PS}}$ 应在2.6—31 lp/mm之间, 这与文献<sup>[7]</sup>通过调制传递函数的方式计算的结果也是相符的.

将 $S_{\text{MCP}}$ ,  $S_{\text{FOP}}$ ,  $S_{\text{PS}}$ 的极限值和 $S_{\text{MCP-PS}}$ 的最佳值代入(1)式计算系统的极限空间分辨率, 可得到 $S = 22.8 \text{ lp/mm}$ . 实验测量的系统空间分辨率为20 lp/mm, 比计算值略低, 这可能与取样点间隔有关. 分幅变像管荧光屏后的记录系统采用的可见光CCD, 其像素大小为9  $\mu\text{m}$ , 这对于空间分辨50  $\mu\text{m}$ 左右的变像管, 其采样间隔略大.

## 5 与传统的分幅变像管空间分辨率标定方式的比较

传统的分幅变像管空间分辨率标定主要是对MCP工作于直流模式时的静态空间分辨率进行测量. 对于同一个分幅变像管, 采用脉宽8 ps、波长263 nm、能量8 mJ的紫外激光器作为标定光源, 利用刻有18—22线对数的分划板近贴于MCP阴极前端(空间距离为0.5 mm), 测量MCP工作电压800 V时其静态空间分辨率, 测量结果如图7所

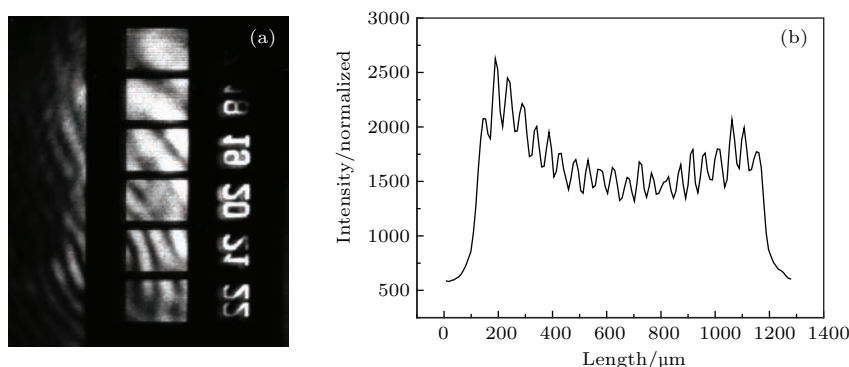


图7 传统的静态空间分辨率标定结果 (a) 分划板图像; (b) 22 lp/mm 的强度分布曲线

Fig. 7. Conventional calibration result of the static spatial resolution: (a) Reticule image; (b) intensity distribution curve of the 22 lp/mm.

由于激光器的光束质量问题, 传统标定光源的均匀性并不理想(如图7(a)中的暗条纹就是由激光光斑自身的暗条纹造成的), 会影响对标定结果的判断. 而激光打靶产生的X射线源在小立体角内的均匀性非常好, 更适合作为标定光源, 同时还可避免光电阴极在紫外能段和X射线能区的能谱响应差异引起的标定误差. 另外, 由于MCP阴极上加直流高压, 分划板近贴于MCP阴极前端极易打火, 易导致分幅变像管损坏.

分幅变像管在ICF实验中诊断测量时, MCP为脉冲选通工作模式而非直流工作模式, 这时的空间分辨率为动态空间分辨率. 因此, 无论是从标定结果的准确性考虑, 还是从标定实验的安全性考虑, 利用激光打靶的X射线源标定分幅变像管的动态空间分辨率都是更可行、更精确的标定方法.

## 6 小 结

在神光II装置上, 利用打靶产生的X射线源建立了分幅变像管在X射线段的动态空间分辨率标

示. 其中, 图7(a)为典型静态空间分辨率测量图像, 图7(b)为分划板图像上最大刻线22 lp/mm对应的强度分布曲线. 由图7可以看出分幅变像管可隐约分辨22 lp/mm刻线, 即分幅变像管的静态空间分辨率为22 lp/mm. 而激光打靶实验中标定的动态空间分辨率为20 lp/mm, 比静态空间分辨率略低, 这与MCP工作模式有关, 与文献[13, 14]中所述观点基本一致. 因此, 传统的标定方式得到的高空间分辨率容易误导科研工作者对诊断设备诊断能力的认识, 影响诊断数据的处理和物理实验的设计.

定方法, 得到了系统动态空间分辨率20 lp/mm的标定结果. 根据分幅变像管的动态空间分辨理论, 计算得到了系统的极限空间分辨率为22.8 lp/mm. 说明此标定方法是可行的, 且标定结果与理论计算值符合较好. 同时, 将此标定方法与传统的分幅变像管空间分辨率标定方法做了简单的比较, 证实了该方法能更准确地反映诊断设备的诊断能力. 门控X射线分幅变像管动态空间分辨率标定方法的建立, 为诊断仪器的设计与改进提供了可靠的检测基础, 对物理实验结果的定量理解与分析具有重要意义.

## 参考文献

- [1] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, Bradley D K, Ayers M J 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 10E116
- [2] Yi S Z, Mu B Z, Wang X, Zhu J T, Jiang L, Wang Z S, He P F 2014 *Chin. Opt. Lett.* **12** 013401
- [3] Cao Z R, Miao W Y, Dong J J, Yuan Y T, Yang Z H, Yuan Z, Zhang H Y, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 075213 (in Chinese) [曹桂荣, 缪文勇,

- 董建军, 袁永腾, 杨正华, 袁铮, 张海鹰, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤 2012 物理学报 **61** 075213]
- [4] Rochau G A, Wu M, Kruschwitz C, Joshen N, Moy K, Bailey J, Krane M, Thomas R, Nielsen D, Tibbitts A 2008 *Rev. Sci. Instr.* **79** 10E912
- [5] Zou F, Hou X, Yang W Z, Tian J S, Bai Y L, Liu B Y 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 2369 (in Chinese) [邹峰, 侯洵, 杨文正, 田进寿, 白永林, 刘百玉 2008 光子学报 **37** 2369]
- [6] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, Niu L H, Peng W D, Long J H 2011 *Proc. SPIE* **8194** 81941D
- [7] Yang W Z, Tian J S, Hou X, Bai Y L, Bai X H, Liu B Y, Qin J J, Ouyang X 2007 *Acta Photon. Sin.* **36** 2209 (in Chinese) [杨文正, 田进寿, 侯洵, 白永林, 白晓红, 刘百玉, 秦君军, 欧阳炯 2007 光子学报 **36** 2209]
- [8] Cai H Z, Liu J Y, Peng X, Li W F, Ye Y P, Wu J F, Zhang T H, Deng Q J, Niu L H, Niu H B, Liu S Y, Yang G H 2012 *Chinese J. Lasers* **39** 0117001 (in Chinese) [蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 李文飞, 叶艳平, 吴剑锋, 张桃花, 邓祁军, 牛丽红, 牛慈彝, 刘慎业, 杨国洪 2012 中国激光 **39** 0117001]
- [9] Liu Y A, Yan Q R, Sai X F, Wei Y L, Sheng L Z, Yang H, Hu H J, Zhao B S 2011 *Chin. Phys. B* **20** 068503
- [10] Yuan Z, Liu S Y, Cao Z R, Li Y F, Chen T, Li H, Zhang H Y, Chen M 2010 *Chin. Phys. Sin.* **59** 4967 (in Chinese) [袁铮, 刘慎业, 曹柱荣, 李云峰, 陈韬, 黎航, 张海鹰, 陈铭 2010 物理学报 **59** 4967]
- [11] Zeng P, Yuan Z, Deng B, Yuan Y T, Li Z C, Liu S Y, Zhao Y D, Hong C H, Zheng L, Cui M Q 2012 *Chin. Phys. Sin.* **61** 155209 (in Chinese) [曾鹏, 袁铮, 邓博, 袁永腾, 李志超, 刘慎业, 赵屹东, 洪才浩, 郑雷, 崔明启 2012 物理学报 **61** 155209]
- [12] Yuan Z, Liu S Y, Xiao S L, Cao Z R, Li H, Wang L W 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 2495 (in Chinese) [袁铮, 刘慎业, 肖沙里, 曹柱荣, 黎航, 王丽伟 2009 光子学报 **38** 2495]
- [13] Sheng L, Hei D W, Qiu M T, Wei F L, Wang P W, Wang K L 2008 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **28** 274 (in Chinese) [盛亮, 黑东炜, 邱孟通, 魏福利, 王培伟, 王奎禄 2008 核电子学与探测技术 **28** 274]
- [14] Matthew C T, George J Y, Paul Z 1995 *Proc. SPIE* **2551** 181
- [15] Zhu H Q, Wang K L, Xiang S M, Song G Z 2008 *Rev. Sci. Instr.* **79** 023708
- [16] Bakeman M S, Evans S C, Oertel J A, Walsh P J, Barnes C W 2004 *Proc. SPIE* **5194** 205
- [17] Kang H 1996 *Imaging Optics* (Tianjin: Publishing House of Nankai University) p308 (in Chinese) [康辉 1996 映像光学(天津: 南开大学出版社) 第308页]
- [18] Yuan Y T, Miao W Y, Ding Y K, Zhao Z Q, Hao Y D, Cao Z R 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 245 (in Chinese) [袁永腾, 缪文勇, 丁永坤, 赵宗清, 郝轶聘, 曹柱荣 2009 强激光与粒子束 **21** 245]
- [19] Zou Y S 1980 *Vacuum Imaging Devices (Part One)* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) pp46-71 (in Chinese) [邹异松 1980 真空成像器件(上册)(北京: 北京工业学院出版社) 第46—71页]
- [20] Liu D S, Yin Z M, Zhu S L 1987 *Fiber Optics* (Beijing: Science Press) p77 (in Chinese) [刘德森, 殷宗敏, 祝颂来 1987 纤维光学(北京: 科学出版社) 第77页]

# Calibration of the dynamic spatial resolution of framing image-converter\*

Yuan Zheng Dong Jian-Jun Li Jin Chen Tao Zhang Wen-Hai Cao Zhu-Rong  
Yang Zhi-Wen<sup>†</sup> Wang Jing Zhao Yang Liu Shen-Ye Yang Jia-Min Jiang Shao-En

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

( Received 21 December 2015; revised manuscript received 9 February 2016 )

## Abstract

In order to improve the two-dimensional imaging diagnostic accuracy of inertial confinement fusion (ICF) experiment, a calibration method of the dynamic spatial resolution of X-ray framing image-converter (XFIC) is proposed. When an object with straight edge function is projected onto the photocathode of XFIC as an input, edge spread function can be obtained by recording an image of the XFIC output. The first derivative of the edge spread function produces the line spread function (LSF). Then the modulation transfer function (MTF) of the system can be worked out by Fourier transform of the LSF. Therefore, the spatial resolution can be deduced. According to this theory, the spatial resolution of XFIC can be obtained. Based on SG-II laser facility, the calibrating X-ray source is generated by 8 bundled lasers bombarding the target. High-Z knife-edge is irradiated by the X-ray and imaged on the photocathode of XFIC, and then a dynamic image is obtained as the system works in the gating mode. By handling the dynamic image, the LSF of XFIC is given by analyzing the edge image. Then the MTF of the camera can be indicated by the Fourier transform of the LSF. When the MTF is 0.1, the corresponding spatial resolution of the imaging system is 20 lp/mm. According to the dynamic spatial resolution theory of framing image-converter, the extreme spatial resolution is 22.8 lp/mm. The calibration result agrees with the theoretical results. By contrast, the static spatial resolution of the same X-ray framing image-converter calibrated by the traditional method is presented here. The calibrated static spatial resolution is 22 lp/mm, a little higher than the dynamic one. During the two-dimensional imaging diagnosis, the X-ray framing image-converter works in the dynamic gating mode, thus the calibrated dynamic spatial resolution can be more truthful to reflect its imaging diagnosis ability.

**Keywords:** framing image-converter, dynamic spatial resolution, modulation transfer function

**PACS:** 52.70.-m, 87.57.cf, 06.20.fb

**DOI:** [10.7498/aps.65.095202](https://doi.org/10.7498/aps.65.095202)

\* Project supported by the Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2014B0102010).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [y-zw@163.com](mailto:y-zw@163.com)