

大探测面积分幅变像管设计

雷云飞¹ 龙井华^{2*} 刘进元¹ 蔡厚智¹ 廖昱博¹ 白雁力¹

¹深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060

²深圳大学物理学院, 广东 深圳 518060

摘要 设计了一种大探测面积磁透镜分幅变像管。通过理论分析和模拟仿真的方法对单透镜和三透镜两种结构的分幅变像管在不同离轴位置的空间分辨率特性进行了研究,并通过实验进行验证。在仿真计算中,当成像缩小倍率为 2:1 时,单透镜结构仅能在 10 mm 离轴半径内达到 5 lp/mm 的空间分辨率,而三透镜结构能够在 30 mm 离轴半径内达到 5 lp/mm 的空间分辨率。在实验测试中,单透镜结构仅能在 12 mm 离轴半径内达到 5 lp/mm 的空间分辨率,而三透镜结构则能在 27 mm 离轴半径内达到 5 lp/mm 的空间分辨率。实验结果表明,采用三透镜结构设计分幅变像管,其有效探测面积比单透镜结构大 4 倍以上。

关键词 测量;分幅变像管;磁透镜;大探测面积;空间分辨率;微通道板

中图分类号 TN143

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0904009

Design of Framing Image Tube with Large Detection Area

Lei Yunfei¹ Long Jinghua² Liu Jinyuan¹ Cai Houzhi¹ Liao Yubo¹ Bai Yanli¹

¹Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

²College of Physics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract A large work area framing image tube with magnetic lenses is designed. By theoretical analysis and analog simulation, the characteristics of spatial resolution in different off-axis positions of framing image tube with single lens and treble lenses are studied. Experiments are also conducted to verify the results. In the simulation, when the imaging demagnification is 2:1, the single lens structure can reach 5 lp/mm spatial resolution within 10 mm off-axis radius, while the treble lenses structure can reach 5 lp/mm spatial resolution within 30 mm off-axis radius. In the experiments, the single lens structure can reach 5 lp/mm spatial resolution within 12 mm off-axis radius, while the single lens structure can reach 5 lp/mm spatial resolution within 27 mm off-axis radius. The results show that by using the framing image tube of treble lenses structure design, its effective detection area is about 4 times as large as that of the single lens structure.

Key words measurement; framing image tube; magnetic lens; large detection area; spatial resolution; microchannel plate

OCIS codes 320.7120; 040.1490; 040.5160; 040.7480; 250.0040

1 引 言

X 射线分幅相机是一种具有高时空分辨率的脉冲诊断装置,因其对超短脉冲的探测能力和二维空间分辨本领,被广泛应用于惯性约束核聚变、同步辐射的测量当中^[1-5]。传统的 X 射线分幅相机采用微通道板近贴聚焦系统,时间分辨率约为 35~100 ps^[6-10]。目前,对 X 射线分幅相机的研究主要集中在增大探测面积和缩短曝光时间两个方面^[11-12]。在缩短曝光时间方面,Hilsabeck 等^[13-15]在 2010 年将脉冲展宽技术应用到分幅相机中,研制出时间展宽分幅相机,时间分辨率提升至 10 ps。本课题组研制的短磁聚焦时间展宽分幅相

收稿日期: 2016-05-10; 收到修改稿日期: 2016-06-10

作者简介: 雷云飞(1985—),男,博士研究生,主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: leiyunfly@163.com

导师简介: 刘进元(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: ljiy@szu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jhlong@szu.edu.cn

机,采用单透镜聚焦成像,使其时间分辨率达到 11 ps,轴上空间分辨率约为 $80 \mu\text{m}^{[16]}$ 。

对于时间展宽分幅相机而言,在变像管的阴极探测面上,以像管的中轴线为圆心,离轴距离为半径形成的圆即为探测面积。采用单透镜短磁聚焦的分幅管由于受到多重几何像差的影响,在离轴距离较大的位置处,其空间分辨特性并不理想,因此有效探测面积较小。大探测面积 X 射线分幅相机必须采用一种新的像管结构,使其在离轴距离较远处的空间分辨本领也能够达到较高的水平。因此,对短磁聚焦时间展宽分幅管离轴空间分辨特性的研究,具有重要的理论意义和现实要求。本文针对单透镜结构分幅变像管离轴空间分辨率不理想的问题,从几何像差角度进行了分析,并提出了三透镜结构方案对其进行改善。通过模拟仿真证明了新的透镜结构能有效提升变像管在离轴位置的空间分辨率。根据仿真的结果研制出的大探测面积分幅变像管,有效探测面积较文献[16]中的单透镜结构提升了 4 倍以上,在 27 mm 离轴距离上的空间分辨率达到了 5 lp/mm。

2 分幅变像管主要结构

分幅变像管主要由阴极、阳极、漂移区、微通道板(MCP)成像面和磁聚焦透镜 5 个部分组成,如图 1 所示,其中图 1(a)为单透镜结构像管,图 1(b)为三透镜结构像管。分幅变像管的阴极为一块半径 30 mm 的石英玻璃,采用光刻法在玻璃表面上制作出三条宽度为 12 mm、厚度为 100 nm 的铝金属微带,并在铝微带上再沉积 25 nm 的金用于发射电子;阳极为 20 lp/mm 的镍制栅网,以保证足够多的电子可以通过栅网进入漂移区,阴极与阳极之间存在长度为 1 mm 的加速区,加速电场强度为 3 kV/mm;漂移区为一长度约为 50 cm 的真空室,连接阴极、阳极和 MCP 成像面并使以上部分处于 3.0×10^{-3} Pa 的真空环境中,漂移区外壳上的电势和阳极相同,以保证静电屏蔽;MCP 成像面的主要作用是将电子图像转变为拥有足够亮度的可见光图像,其主要由镀有微带阴极的 MCP 和光纤面板上的荧光屏组成,MCP 的半径为 15 mm,微带阴极的宽度为 8 mm,对应阴极上的金属微带,MCP 上的阴极微带也有三条,因此阴极探测到的图像需要经过磁透镜以 2:1 的缩放比例成像在 MCP 像面上。

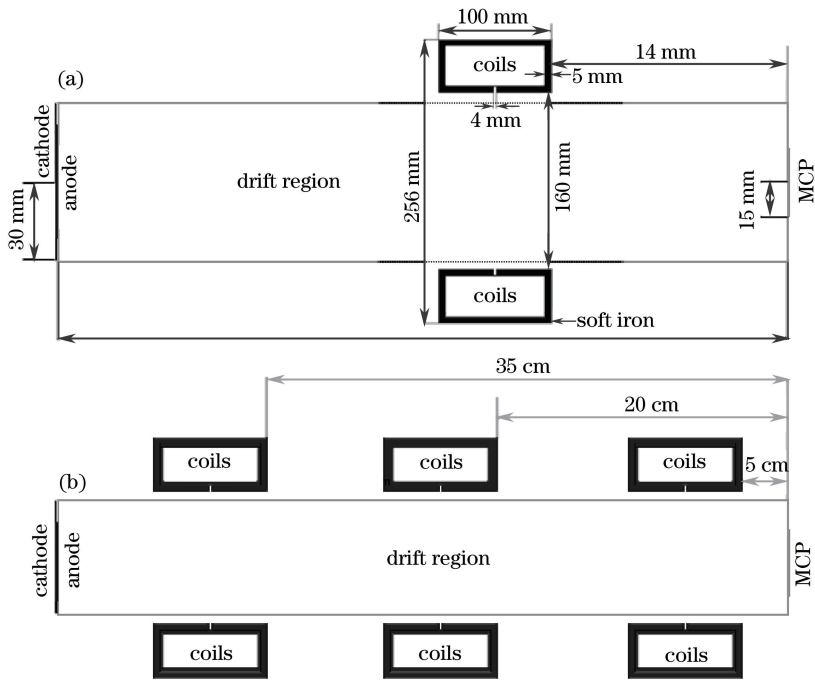


图 1 变像管模型剖面图。(a) 单透镜像管; (b) 三透镜像管

Fig. 1 Cross-section of framing image tube model. (a) Single lens coil; (b) treble lenses coil

磁透镜外径为 256 mm,内径为 160 mm,宽 100 mm,外包 5 mm 软铁壳,并在内壳中心处开 4 mm 狭缝使磁场集中,单透镜结构的分幅像管如图 1(a)所示,磁透镜安装在距离 MCP 像面 14 cm 处。三透镜结构的分幅像管如图 1(b)所示,在单透镜结构的基础上将磁透镜增加为三个,采用三透镜协同成像的方式,将第一

个透镜安装在距离 MCP 像面 5 cm 处,第二个透镜安装在中心距离 MCP 像面 20 cm 处,第三个透镜则安装在距离 MCP 像面 35 cm 处,其他参数和单透镜结构相同。两种结构在漂移区 1 上形成的轴上磁感应强度 B 如图 2 所示,三透镜结构中的光电子离开阴极后,会立刻受到磁场的作用而开始运动,而单透镜结构则会在漂移区自由飞行一段时间之后才受到磁场作用,因此三透镜结构的光电子会更多地通过磁场的近轴部分,进而减小由于电子光学系统无法满足傍轴条件而引起的像差。

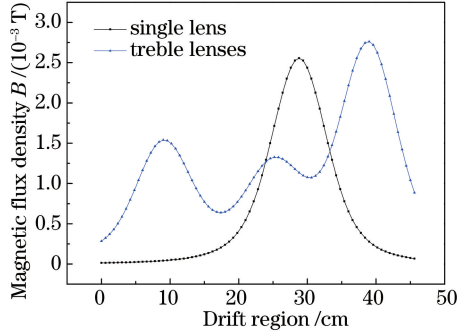


图 2 两种变像管轴上磁场强度分布示意图

Fig. 2 Magnetic field intensity distribution of two framing image tubes

3 理论分析和模拟仿真

3.1 像差理论

在电子光学系统中,因为实际器件中电子的傍轴条件无法完全满足,所以透镜存在几何像差。透镜的几何像差可以分为球差、彗差、像散、场曲以及畸变。根据三级几何像差理论,这几类像差与电子光学系统的光阑孔径和离轴距离有关。实验表明,短磁聚焦分幅变像管的空间分辨率主要受到球差和场曲的影响。球差是因为旋转对称场对离轴较远的电子产生了更大的会聚力,而使同一点发出的电子在像平面上形成一个以高斯像点为中心的圆斑;而场曲的形成原因是从物平面不同离轴距离发出的电子射线遇到不同的作用场,离轴越远的场汇聚作用越强,而使像面变成一个凹面。在极坐标下这两类像差可以表示为^[17]

球差:

$$\Delta r_b = Br_d^3, \tag{1}$$

场曲:

$$\Delta r_d = Dx_a^2 r_d, \tag{2}$$

式中 B 和 D 分别为球差系数和场曲系数, x_a 为离轴距离, r_d 为光阑孔径。

(1)式和(2)式表明,当离轴距离 x_a 很小的时候,场曲很小,可以忽略不计,电子光学系统的几何像差主要由球差决定;但是,随着探测面积逐渐变大,场曲对空间分辨率造成的影响也越来越大。设定电子初始能量为 1 eV,发射角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 上服从均匀分布,初始位置服从均匀分布,阴极电压为 -3 kV,此条件下发射的电子轨迹及散布情况如图 3 所示。图 3(a)是单透镜结构像管的电子轨迹示意图,轴上发射点的最佳成像面位于像面 b 处,而离轴 10 mm 处的发射点由于受到场曲的影响,最佳成像面位于像面 c 处, b 与 c 两个像面之间的距离为 3.8 cm。图 3(b)和(c)分别是两个像面上的电子散布情况,像面 b 由于是轴上电子的最佳成像面,因此轴上发射点在此像面上具有最小的电子散布,而离轴 10 mm 的电子则散布过大,导致空间分辨率下降;像面 c 作为离轴 10 mm 电子发射点的最佳成像面,轴上电子在此像面处的空间分辨本领则不佳。三透镜结构下的电子轨迹示意图如图 3(d)所示,轴上发射点和离轴 10 mm 发射点的最佳成像面分别为 e 和 f ,测得 e 与 f 之间的距离只有 0.8 cm。两个像面上的电子散布分别如图 3(e)和(f)所示,离轴 10 mm 发射点在像面 e 上的电子散布要明显小于在像面 b 上的散布;同样,轴上发射点在像面 f 上的电子散布也小于在像面 c 上。此外,单透镜离轴 10 mm 处发射点在像面 c 上的电子散布较轴上发射点在像面 b 处的散布更大,这主要是由于不同离轴距离的电子束通过了磁透镜的不同区域,而这些区域的磁场本身对电子束的成像本领存在差异导致的;而在三透镜结构中,离轴 10 mm 处发射点在像面 f 上的电子散布与轴上发射点在像

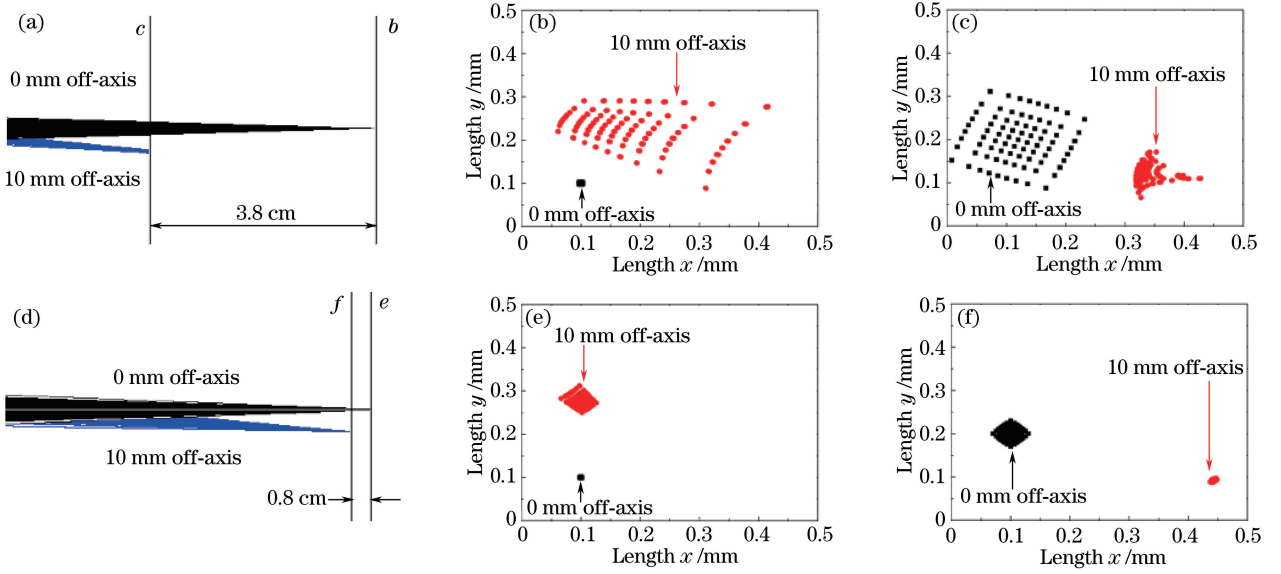


图3 电子成像轨迹及在不同像面的电子散布图。(a) 单透镜电子成像轨迹示意图；(b) 像面 b 处电子散布图；(c) 像面 c 处电子散布图；(d) 三透镜电子成像轨迹示意图；(e) 像面 e 处电子散布图；(f) 像面 f 处电子散布图
 Fig. 3 Electron imaging trace and electrons spread on different image planes. (a) Electron imaging trace for single lens; (b) electrons spread on image plane b ; (c) electrons spread on image plane c ; (d) electron imaging trace for treble lenses; (e) electrons spread on image plane e ; (f) electrons spread on image plane f

面 e 上的电子散布则差异不大。

以上结果表明,三透镜结构的变像管有效地降低了场曲,更有利于让不同离轴距离的发射点在同一像平面上成像;此外,三透镜结构对于单磁透镜随离轴距离增加而成像本领下降的情况也有一定的改善作用,因此提高了离轴像点的空间分辨率。综上所述,三透镜结构的分幅变像管较单透镜具有更大的探测面积。

3.2 分幅变像管的空间分辨率

在场曲影响下,不同离轴距离处发射的光电子的最佳成像面并不在同一个平面上,采用传统的单像面取样法无法统计出每个离轴发射点的最佳成像位置以及最佳像平面。因此,采用多个像面抽样统计法,在整个场曲面存在空间内抽取多个不同位置的像面,对每个离轴发射点在不同像面处的电子分布进行统计并根据位置计算电子分布的均方根半径^[18],最后通过调制传递函数(MTF)计算调制度 M 和空间频率 f 之间的关系,计算出每一个离轴距离发射点在不同像面上的空间分辨率,并绘制出空间分辨率随像平面位置变化的曲线,通过曲线之间的关系找到在离轴半径 30 mm 范围内空间分辨特性最佳的像面。

通常将 MTF 曲线强度下降到 0.1 处对应的空间频率定义为变像管的空间分辨率。MTF 可以表示为

$$M = \exp[-(\pi \overline{\Delta r} f)^2], \quad (3)$$

式中 f 为空间频率, $\overline{\Delta r}$ 为系统均方根半径,可以表示为

$$\overline{\Delta r} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}, \quad (4)$$

式中 Δx 和 Δy 为成像面上电子散布位置距离像点中心位置在 x 、 y 方向上的距离。

从阴极发射点发射的光电子初始参量如下:初始能量为 1 eV,发射角在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 上服从均匀分布,初始位置服从均匀分布。阴极电压为 -3 kV, MCP 像面上电压为 -560 V,阳极以及变像管的管壳部分接地。图 4 所示为单透镜和三透镜轴上发射点在最佳成像面上的 MTF 曲线,曲线强度下降到约 0.1 处对应的空间频率如图所示,因此单透镜轴上空间分辨率约为 22 lp/mm,三透镜为 30 lp/mm,说明三透镜结构的轴上空间分辨率略优于单透镜。

空间分辨率在不同像面处的变化曲线如图 5、图 6 所示,纵坐标表示空间分辨率 f ,用每毫米线对数(lp/mm)表示;横坐标为物像距离 l ,表示像面到阴极物面之间的距离,单位为 cm;不同曲线表示不同离轴距离的发射点,其中曲线 a 表示轴上发射点,其他发射点离轴距离分别为 $b=5$ mm、 $c=10$ mm、 $d=15$ mm、 $e=20$ mm、 $f=25$ mm、 $g=30$ mm,以此类推;曲线的峰值所在位置为该离轴发射点的最佳成像面,最佳成

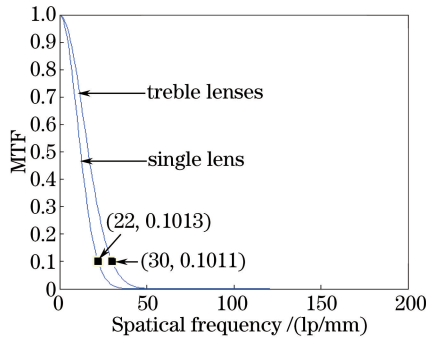


图 4 调制传递函数曲线

Fig. 4 Curves of MTF

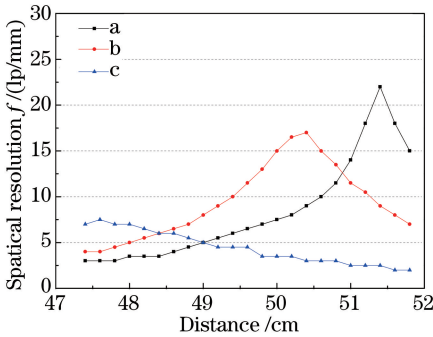


图 5 单透镜结构中不同离轴发射点的空间分辨率曲线

Fig. 5 Single lens structure spatial resolution distributions for different off-axis positions

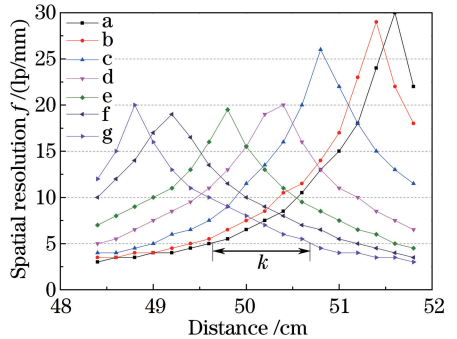


图 6 三透镜结构中不同离轴发射点空间分辨率曲线

Fig. 6 Treble lenses structure spatial resolution distributions for different off-axis positions

像面之间的间隔距离越短则表示场曲越小;对所有曲线进行综合分析即可判断该型结构的分幅变像管在整个探测面上的空间分辨本领。

单透镜结构的分幅变像管空间分辨率曲线如图 5 所示。其轴上发射点在最佳成像面上空间分辨率达到了 22 lp/mm,离轴 5 mm 之后空间分辨率下降到 17 lp/mm,而离轴 10 mm 后空间分辨率迅速下降到了 7.5 lp/mm,这是由于电子束受到加速电场作用后,实际上通过了磁透镜不同的区域,轴上和离轴 5 mm 的电子束通过的是磁透镜近轴区域,因此获得了较好的成像,而离轴 10 mm 的电子束成像质量则较差。

曲线 a 的最佳成像面距离曲线 b 的最佳成像面之间的距离为 1.2 cm,而曲线 b 与曲线 c 的最佳成像面之间的距离为 2.6 cm,是前者的两倍以上。这说明单透镜结构造成的场曲问题非常严重,并且随着离轴距离的增加,场曲变得越来越大。离轴 10 mm 后,实际成像位置在轴上像面前方的 3.8 cm 处。电子束本身的低空间分辨率加上严重的场曲,导致曲线 a 与 c 交点处的纵坐标略小于 5 lp/mm。因此,对于单透镜结构分幅变像管,当离轴距离超过 10 mm 时,已无法使整体空间分辨率达到 5 lp/mm 了,更大的离轴距离发射点已无统计的必要。

变像管采用三透镜结构之后,空间分辨率曲线如图 6 所示。可以看出,相对于单透镜结构,三透镜结构的空间分辨率有了整体的提升。其轴上发射点与离轴 5 mm 处发射点在最佳成像面上的空间分辨率分别达到了 30 lp/mm 和 28 lp/mm,较单透镜有所提升;同时离轴 10 mm 处发射点在最佳成像面上的空间分辨率达到了 26 lp/mm,并且离轴 15~30 mm 的发射点的空间分辨率均达到了 18 lp/mm 以上,这相对于单透镜结构来说有了重大的提升。这是因为三透镜结构中的电子束进入漂移区后立刻受到磁场作用,更多地通过了磁透镜的近轴部分,因此更容易满足傍轴条件,这在离轴较远处的发射点上表现得更为明显,因为这些发射点发出的电子距离轴线更远。

空间分辨率获得提升的另一个表现在于最佳成像面之间的间隔距离缩小。在三透镜结构中,曲线 a 与曲线 c 的最佳成像面之间间隔仅为 0.8 cm,远小于单透镜结构;曲线 a 与曲线 g 的最佳成像面之间的距离也仅为 2.8 cm,小于单透镜结构曲线 a 与曲线 c 之间的距离。这表示采用三透镜结构有效降低了变像管的场

曲,使不同离轴距离发射点的成像距离更为接近。三透镜结构像管同时提升了离轴像点的空间分辨率和降低了场曲,因此在图 6 中 k 所示范围内,所有曲线的纵坐标均大于 5 lp/mm,即说明选取位于该区间位置的像面,理论上能使整个阴极探测面上的所有离轴点的空间分辨率达到 5 lp/mm。

4 空间分辨特性测试

根据仿真结果所设计的分幅变像管采用紫外光源照射在阴极上的方法激发光电子,光电子经过加速后成像在 MCP 上,MCP 将光电子倍增,倍增后的光电子轰击荧光屏形成可见光信号。最后,可见光信号被电荷耦合器件(CCD)捕捉并记录到计算机上。阴极由三条微带组成,每条微带包含若干组分辨率板,每组包含 16 个小方块,每个小方块边长为 3 mm,每两个方块表示线对的横向和纵向。线对分别为 2.5,5,10,15,20,25,30,35 lp/mm。实验中只关注 2.5 lp/mm 与 5 lp/mm 这两组的分辨率板。

两种透镜的成像结果如图 7 所示,其中(a)为单透镜,(b)为三透镜。图中红点标识为透镜的轴线,两个图左右颠倒,这是因为磁透镜数量不同导致图像的旋转角度不一样所致。对于 2.5 lp/mm 的分辨率板,单透镜可以分辨出中心微带上的三组,可以看出这三组的清晰度有明显的差异,轴线旁边的一组非常清晰,而距离轴线最远的一组边缘处已经出现明显的畸变,中心微带离轴 15 mm 以外的部分和上下两条微带均出现严重畸变,已经不能成像;而三透镜结构在整个探测面积上没有出现畸变,对于全部 2.5 lp/mm 的分辨率板均可以做到清晰显示。

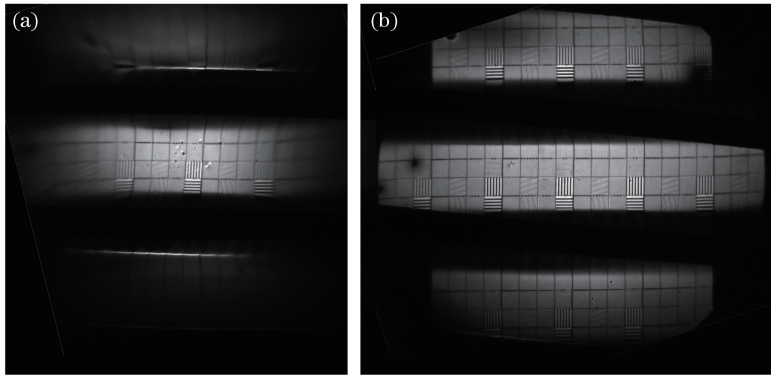


图 7 实验测试结果。(a)单透镜;(b)三透镜

Fig. 7 Experimental results. (a) Single lens; (b) treble lenses

对于两种透镜不同离轴距离的 5 lp/mm 分辨率板进行调制度分析,调制度 M 定义为

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (5)$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为光强的极大值和极小值,变像管的背景噪声约为 1%,因此当平均调制度低于 1% 则认为在该位置处不能分辨。两种变像管平均调制度统计结果如表 1 所示。单透镜结构对 5 lp/mm 的分辨距离约为 12 mm,且调制度随离轴距离增加减小得很快;而三透镜则达到 27 mm,调制度随离轴距离变化不明显,当离轴距离超过 24 mm 后才出现明显的下降。

表 1 不同离轴距离位置的调制度

Table 1 Modulation degree of different off-axis distances

| Off-axis /cm | Single lens | Treble lenses |
|--------------|-------------|---------------|
| 3 | 9.04% | 11.04% |
| 12 | 5.73% | 8.87% |
| 15 | <1% | 11.77% |
| 24 | <1% | 7.90% |
| 27 | <1% | 5.16% |

实验结果表明单透镜结构分幅变像管有效探测半径约为 12 mm,当离轴半径超过 12 mm 后空间分辨率将会迅速下降,到达 15 mm 后空间分辨率只能达到 2.5 lp/mm,超过 15 mm 后成像质量严重下降导致图

像无法分辨。这是由于场曲随着离轴距离的增大而越发严重导致的,当离轴半径超过 12 mm 后,严重的场曲导致像面位置变化,因此到达 MCP 像面的只有未能成像的电子束团。三透镜结构的分幅变像管有效探测半径约为 27 mm,在本实验的整个成像范围内,图像并没有出现明显的畸变或扭曲。由于场曲没有完全被消除,因此当离轴距离超过 24 mm 之后,5 lp/mm 分辨率板的调制度开始下降,但仍然可以识别。这说明在三透镜结构的分幅变像管中能够有效降低场曲,离轴距离 27 mm 范围内的电子束都能够被成像到 MCP 像面上,探测范围较单透镜结构增大了 4 倍以上。

5 结 论

研究了采用短磁透镜进行成像的分幅变像管的空间分辨特性。针对单透镜分幅变像管探测面积较小的问题,从像差理论的角度分析了空间分辨率随离轴距离增大而减小的原因,并设计了一种新型的分幅变像管。利用软件模拟了不同结构分幅变像管的成像过程,通过对仿真结果的分析,进一步证明了三透镜分幅变像管的空间分辨本领要优于单透镜。实验结果表明,单透镜实现 5 lp/mm 空间分辨率的有效探测面积的半径仅为 12 mm,而采用三透镜结构能够将有效探测面积的半径扩大至 27 mm,远优于单透镜结构。综上所述,采用三透镜结构设计对提升分幅变像管的空间分辨特性是切实有效的。

参 考 文 献

- Oertel J A, Aragonz R, Archuleta T, *et al.* Gated X-ray detector for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10E308.
- Liu J Y, Niu L H, Peng W D, *et al.* Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(5): 055104.
- Bell P M, Bradley D K, Kilkenny J D, *et al.* Radiation hardening of gated X-ray imagers for the National Ignition Facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E540.
- Xiong G, Hu Z M, Li H, *et al.* One-dimensional space resolving flat-field holographic grating soft X-ray framing camera spectrograph for laser plasma diagnostics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(4): 043109.
- Cai H Z, Liu J Y, Peng X, *et al.* Non-gain microchannel plate gated framing camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(5): 056102.
- Niu Lihong, Liu Jinyuan, Peng Wenda, *et al.* Microchannel plate gated X-ray nanosecond framing camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1274-1278.
牛丽红, 刘进元, 彭文达, 等. 微通道板选通 X 射线纳秒分幅相机的研制[J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1274-1278.
- Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, *et al.* Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0117001.
蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. 宽微带 X 射线分幅相机的研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0117001.
- Eckart M J, Hanks R L, Kilkenny J D, *et al.* Large-area 200-ps gated microchannel plate detector [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1986, 57(8): 2046-2048.
- Kilkenny J D, Bell P M, Hanks R L, *et al.* High-speed gated X-ray images[C]. *SPIE*, 1988, 0913:147-152.
- Bell P M, Killlenny J D, Power G D, *et al.* Multiframe X-ray images from a single meander stripline coated on a microchannel plate[C]. *SPIE*, 1990, 1155: 430-438.
- Oertel J A, Archuleta T N, Schrank L S. The large-format gated X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 701-704.
- 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]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 716-718.
- Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, *et al.* Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, *et al.* Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10E116.
- Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, *et al.* Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- Bai Y L, Long J H, Liu J Y, *et al.* Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation

technology and a magnetic lens[J]. Opt Eng, 2015, 54(12): 124103.

- 17 Du Bingchu, Wang Jianru. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 227-238.
杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 227-238.
- 18 Zhou Liwei, Ai Kecong, Fang Erlun. Study of electron optical modulation transfer function and root mean square radius in the photo electronics image focusing systems[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1982(3): 36-51.
周立伟, 艾克聪, 方二伦. 成像系统的电子光学调制传递函数与均方根半径的研究[J]. 北京工业学院学报, 1982(3): 36-51.