

引用格式: LEI Yunfei, LIU Jinyuan, CAI Houzhi, et al. Characteristic Analysis of Chromatic Aberration of Pulse-dilation Framing Tube[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(8):0850215

雷云飞,刘进元,蔡厚智,等.脉冲展宽分幅变像管色差特性分析[J].光子学报,2021,50(8):0850215

脉冲展宽分幅变像管色差特性分析

雷云飞,刘进元,蔡厚智,黄峻堃,王勇,邓珀昆

(深圳大学 物理与光电工程学院,广东 深圳 518060)

摘 要:提出了一种短磁透镜成像的脉冲展宽分幅变像管,变像管阴极加载偏置 $-3\ 000\ \text{V}$ 直流电压和斜率为 $10\ \text{V/ps}$ 的斜坡电脉冲,斜坡脉冲使阴栅间加速电压发生变化,进而引入了与脉冲斜率成正比的额外色差,对该色差特性进行了分析。仿真结果表明,在色差作用下,不考虑电子图像时间长度,瞬态轴上空间分辨率在 $20\ \text{ps}$ 内从约 $60\ \text{lp/mm}$ 下降至约 $2\ \text{lp/mm}$;考虑电子图像时间长度后,电子图像的空间分辨率在 $20\ \text{ps}$ 内从约 $10\ \text{lp/mm}$ 下降至约 $2\ \text{lp/mm}$ 。根据仿真模型搭建了实验平台,实验结果表明,当阴极电压从 $-3\ 000\ \text{V}$ 变化至 $-2\ 860\ \text{V}$ 时, $2.5\ \text{lp/mm}$ 分划板的图像调制度下降约为 10% 。

关键词:超快诊断;分幅变像管;脉冲展宽技术;色差;空间分辨率;短磁聚焦

中图分类号:TN143;TN16

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215008.0850215

Characteristic Analysis of Chromatic Aberration of Pulse-dilation Framing Tube

LEI Yunfei, LIU Jinyuan, CAI Houzhi, HUANG Junkun, WANG Yong, DENG Pokun
(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: A pulse-dilation framing tube with magnetic lenses was developed, the photocathode biased at $-3\ 000\ \text{V}$ was loaded with $10\ \text{V/ps}$ oblique pulse. The pulse changed the accelerating voltage between the cathode and the anode, then the additional chromatic aberration which is proportional to the pulse slope was caused. The chromatic aberration characteristics of this tube were analyzed. The simulation results show that the spatial resolution on the axis decreases from about $60\ \text{lp/mm}$ to about $2\ \text{lp/mm}$ in $20\ \text{ps}$ with ignore the time length of the electronic image; otherwise, the duration of the image is included, the spatial resolution on the axis decreases from about $20\ \text{lp/mm}$ to about $2\ \text{lp/mm}$ in $20\ \text{ps}$. The experimental setup is built according to the simulation, and the experimental results show that the modulation of the $2.5\ \text{lp/mm}$ resolution mask declines 10% when the accelerating voltage decreases from $-3\ 000\ \text{V}$ to $-2\ 860\ \text{V}$.

Key words: Ultrafast measurements; Framing tube; Pulse-dilation; Chromatic aberration; Spatial resolution; Magnetic lens

OCIS Codes: 320.7100; 320.5550; 220.1000; 330.6130

0 引言

行波选通分幅相机作为一种高速诊断设备,因其亚纳秒级时间分辨与二维空间分辨本领,常被用于惯性约束核聚变、Z箍聚变以及同步辐射等实验的X射线探测和中子诊断^[1-4]。传统X射线分幅相机使用光电阴极进行图像转化,转化后的电子图像经过微通道板(Microchannel Plate, MCP)倍增后轰击荧光屏,其时间

基金项目:国家自然科学基金(No.11775147),中国博士后科学基金(No.2018M643183)

第一作者:雷云飞(1985—),男,博士后,主要研究方向为光电子学。Email:314791258@qq.com

导师(通讯作者):刘进元(1963—),男,教授,硕士,主要研究方向为超快诊断技术。Email:ljiy@szu.edu.cn

收稿日期:2021-03-04;录用日期:2021-04-22

<http://www.photon.ac.cn>

分辨率受到选通脉冲宽度、MCP的渡越时间和渡越时间弥散等因素影响,一般只能达到35~100 ps^[5-7]。采用薄型MCP可以将时间分辨率提升到几十皮秒^[8],但薄型MCP容易损坏,难以进行大面积制备,无法满足大工作面分幅相机的需求。

近几年,美国利弗莫尔实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)提出了一种脉冲展宽分幅相机,其时间分辨率约能达到5~10 ps^[9-11]。脉冲展宽分幅相机将传统行波分幅技术与脉冲展宽技术相结合,光电子在产生之后会受到一个斜坡脉冲进行加速,从而使不同时刻产生的电子轴向速度产生差异,这样电子束团将在漂移区发生脉冲展宽,从而提升了相机整体的时间分辨率^[12-13]。电子在漂移区的运动也会在空间上产生弥散,因此需要电子光学透镜来确保电子图像能够成像于MCP的接收面上^[14]。早期的脉冲展宽分幅相机空间分辨率较差,如LLNL在2010年提出的相机,空间分辨率约为2 lp/mm^[8];深圳大学超快诊断课题组研制的电子束脉冲展宽皮秒分幅相机,空间分辨率能够达到5 lp/mm,但仅限于近轴区域^[15-16]。由于技术的进步和工艺的改进,目前,美国LLNL研制的单视线X射线脉冲展宽分幅相机,工作面积达到25.6 mm×12.8 mm,空间分辨率约为15 lp/mm^[17];深圳大学超快诊断课题组研制的4 ps分幅变像管,采用多个短透镜提升系统的离轴空间分辨率^[18-20],工作面积半径达到约30 mm,静态空间分辨率为10 lp/mm^[21-22]。但是,对脉冲展宽分幅变像管空间分辨率的研究多数停留在静态测试阶段,较少涉及斜坡电脉冲对空间分辨率造成的影响^[23],实验表明,在相同成像条件下,分幅变像管的动态空间分辨率低于静态空间分辨率^[14,22]。

脉冲展宽分幅相机中的电子束团在时间上进行展宽,电子在斜坡脉冲作用下发生能量弥散,将在成像过程中引入额外的色差,从而对系统的空间分辨造成影响。本文结合脉冲展宽分幅相机的特点,对短磁透镜成像过程中的色差问题进行分析,并通过理论仿真绘制出电子能量与轴上空间分辨率之间的关系曲线。分析结果表明斜坡电压引起阴栅间加速电压随时间变化,空间分辨率随时间变化迅速下降。根据仿真结果搭建实验平台进行实验验证。

1 脉冲展宽分幅变像管结构与原理

脉冲展宽分幅变像管结构如图1所示。变像管主要光电子发射与加速系统、漂移管、MCP变像管以及磁透镜成像系统四部分组成。光电子发射加速系统由光电阴极和阳极栅网组成,阴极与阳极之间存在一个加速电场,通过在阴极上输入斜坡脉冲的方法,可以使加速电场随时间而改变。当紫外光或X射线照射到光电阴极时,激发的光电子在阴栅间被电场加速,加速电场随时间增加而减小,因此先产生的光电子比后产生的光电子获得更高的能量,并以更快的速度进入漂移管。漂移管为一段有一定长度的金属管,用于屏蔽外部电场对漂移区电子的作用,产生时间较早的电子由于速度更快,通过漂移区所需时间比产生时间较晚的电子更短,电子束团因此在漂移区在时间上发生了展宽。MCP变像管由MCP和荧光屏组成,MCP的接收面镀有3条传输阴极,选通脉冲在传输阴极上传播,起到快门的作用,MCP背面与荧光屏之间采用近贴聚焦,经过MCP倍增后的电子轰击到荧光屏上,电子图像被转变为可见光图像^[24]。电子在漂移区运动过程中会发生空间弥散,因此必须利用成像系统对电子束团进行约束,以确保阴极的电子图像能够成像于MCP接收面上。采用的成像系统为4个大孔径短磁透镜,用联合成像的方法将阴极产生的电子图像成像于MCP接收面,为避免产生传输快门效应^[25],缩放倍率设定为1:1。

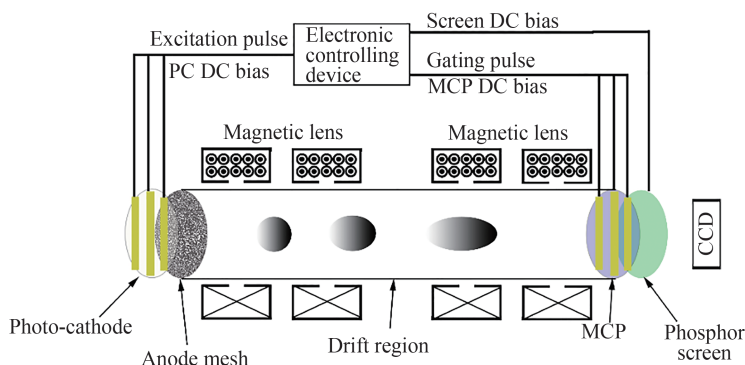


图1 脉冲展宽分幅变像管结构图
Fig.1 Schematic diagram of the pulse-dilation framing tube

2 色差理论与仿真

色差是与电子的德布罗意波长有直接联系的聚焦成像误差。具体来说,电子光学成像器件中,产生色差的主要因素是电子从阴极发射时初能量弥散或电子的加速电压不稳定。此外,由于磁透镜的电流不稳定和静电透镜的电位波动所产生的误差,在效果上与加速电压不稳定产生的像差相同,也被归于色差的范畴。由于相同的成像系统在对应不同德布罗意波长的电子时折射率会发生变化,因此不同电子的成像距离各不相同,从而使成像结果产生误差,如图2所示。

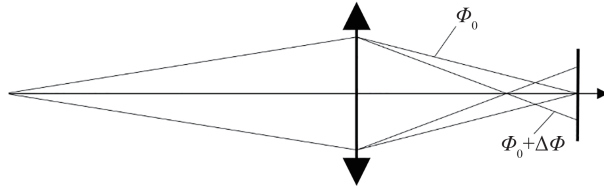


图2 色差示意图

Fig. 2 Principle of the chromatic aberration

对于轴上物点,受到色差的影响,在高斯像面上所成的图像为一圆斑,在磁透镜成像系统中,该圆斑的半径可以表示为^[26]

$$\delta = |O| a_0 C \left(\left| \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| \right) \quad (1)$$

式中, O 为放大倍率, a_0 为孔径角, C 为中心色差系数, Φ_0 为加速电压, $\Delta\Phi$ 为电压变化值, I 为磁透镜电流, ΔI 为磁透镜电流变化值。对于使用直流稳压供电的短磁透镜, ΔI 可以忽略不计,因此式(1)可写为

$$\delta = |O| a_0 C \left| \frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} \right| \quad (2)$$

在一般电子光学成像器件中,由于加速电压 Φ_0 较大,而且 $\Delta\Phi$ 主要由电子初能量弥散 $\Delta\Phi_0$ 造成,相对较小,所以色差对成像结果的影响较小。在脉冲展宽分幅相机中, $\Delta\Phi$ 除了来自电子初能量弥散 $\Delta\Phi_0$ 之外,还需考虑脉冲展宽用的斜坡脉冲 $\Delta\Phi(t)$ 的影响。研究表明,当时间 t 的变化范围不太大时,斜坡脉冲可以近似看作时间 t 的线性函数,则式(2)可写为

$$\delta = |O| a_0 C \left| \frac{\Delta\Phi_0 + kt}{\Phi_0} \right| \quad (3)$$

式中, k 为斜坡脉冲的斜率。在式(3)中,放大倍率 $O=1$,中心色差系数 C 、孔径角 a_0 与加速电压 Φ_0 均为常数,因此色差大小仅与原生的电子初能量弥散 $\Delta\Phi_0$ 以及由展宽脉冲引入的 kt 有关。在脉冲展宽分幅相机中,为了获得更好的展宽性能,一般会选取斜率 k 较高的展宽脉冲,电子初能量弥散 $\Delta\Phi_0$ 相对 kt 可以忽略不计。因此在脉冲展宽分幅相机中,系统的时间分辨率和展宽脉冲引入的额外色差成正比,随着变像管性能的提升,色差将会成为脉冲展宽分幅变像管近轴区域成像过程中的主要像差。本文中阴栅间的加速电压为 $\Phi_0 = -3\,000\text{ V}$,采用的脉冲斜率为 10 V/ps ,在不考虑脉冲长度的前提下, 0.3 ns 后加速电压将被降为 0 。

根据脉冲展宽分幅变像管工作原理所建立的仿真模型如图3所示。成像系统由4个短磁透镜组成,径向厚度为 5 cm ,外包软铁壳厚度为 0.5 cm ,外径为 25.6 cm ,内径为 16 cm ,内径中心处开有 4 mm 孔隙作为磁靴,透镜中心与阴极间距分别为 11 cm 、 22 cm 、 34 cm 和 45 cm ,成像系统的放大倍率为 $1:1$,漂移区长度为 56 cm ,漂移管与阳极栅网接地,MCP电压为 -700 V ,阴极静态偏置电压设定为 $-3\,000\text{ V}$,透镜线圈中的电流为 195 A 。此时漂移区磁场为4个钟形场的叠加,共有4个峰值,其中距离阴极 22 cm 、 34 cm 的两个峰值为 21 Gauss ,距离阴极 11 cm 、 45 cm 处的峰值为 18 Gauss ,该磁场下系统静态空间分辨率达到最佳。仿真脉冲的斜率为 10 V/ps 。在阴极轴上点发射 750 个光电子,忽略光电子初能量弥散,仅考虑斜坡脉冲的影响,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,不考虑电子图像时间长度, 0 时刻电子在MCP接收面的弥散斑大小如图4所示。

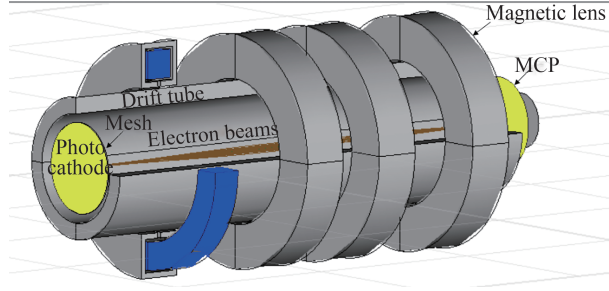


图3 脉冲展宽分幅变像管仿真模型
Fig.3 Simulation model of the pulse-dilation framing tube

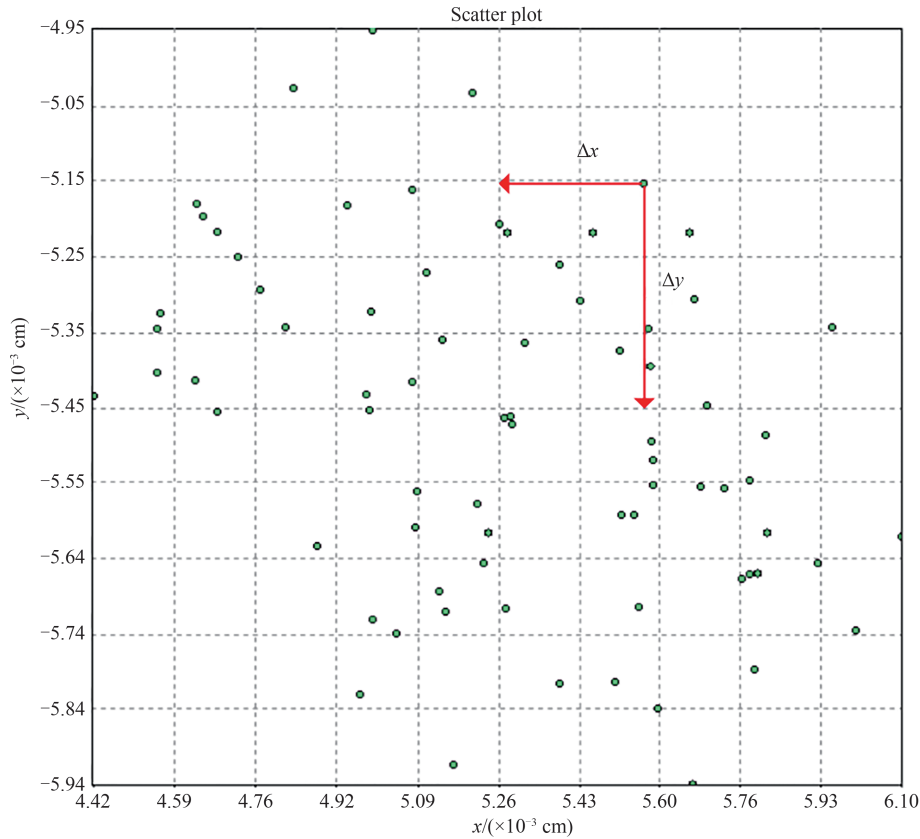


图4 阴极电压-3 000V时0时刻瞬时像面电子散布
Fig.4 Transient electrons scatter on the image plane with -3 000 V accelerating voltage on cathode at 0 time

通过计算弥散斑中电子分布的均方根半径为^[27]

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

将式(4)代入调制传递函数得到调制度 M 与空间频率 f 之间的关系

$$M = \exp\left[-(\pi \overline{\Delta r} f)^2\right] \quad (5)$$

式中, $\overline{\Delta r}$ 为均方根半径, f 为空间频率, Δx 、 Δy 分别为电子散布位置距离像点中心处在 x 、 y 轴方向上的距离。定义调制度 $M=5\%$ 处的空间频率 f 为成像系统的空间分辨率,对不同时时刻的电子散布进行取样,并计算空间频率 f 即可得到空间分辨率随时间变化曲线。图5中曲线1实线为轴上物点在不同时刻成像于MCP接收面的瞬态空间分辨率曲线。可以看出,空间分辨率在0时刻达到最大,此时电子散布图如图4所示,阴极电压为-3 000 V,由于未考虑电子图像的时间长度,斜坡脉冲并未对此时刻电子图像产生影响,此后受到斜坡脉冲影响,阴栅间的加速电场随时间增大而减小,电子图像的成像位置与标准像平面之间的距离越来越远,空间分辨率也随之迅速下降。

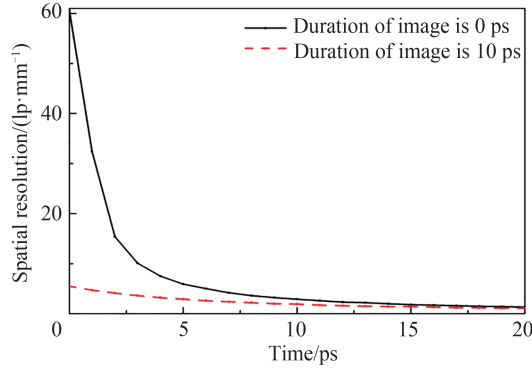


图5 阴极电压为-3 000 V时变像管空间分辨率随时间变化曲线
 Fig.5 Spatial resolution versus times with -3 000 V accelerating voltage on cathode

在实际成像过程中,图像具有一定的时间长度,实际图像为该时间长度范围内所有时刻瞬时图像的叠加,考虑到时间长度范围内加速电压的变化,式(4)可改写为

$$\overline{\Delta r(t_i)} = \frac{\int_{t_i}^{t_i + \Delta t} \sqrt{(\overline{\Delta x})^2 + (\overline{\Delta y})^2} dt}{\Delta t} \quad (6)$$

式中, t_i 为图像的起始时间, Δt 为图像的持续时间,若电子图像的持续时间大于系统的时间分辨率,则 Δt 可近似表示为系统的时间分辨率,文中变像管的时间分辨率约为10 ps,因此设 $\Delta t=10$ ps,此时轴上空间分辨率如图5中虚线所示。考虑电子图像的时间长度后,阴极电压为-3 000V时0时刻电子散布如图6所示,这种情况下斜坡脉冲对0时刻电子图像产生影响,空间分辨率出现了较为明显的下降。将阴极电压调整为-3 050 V,其他条件不变,空间分辨率曲线如图7所示。可以看出,不考虑图像的时间长度,图7中实线表示的瞬时空间分辨率在4 ps时刻达到最大值,这是因为斜坡脉冲将阴极电压在4 ps后降低为-3 000 V,瞬时

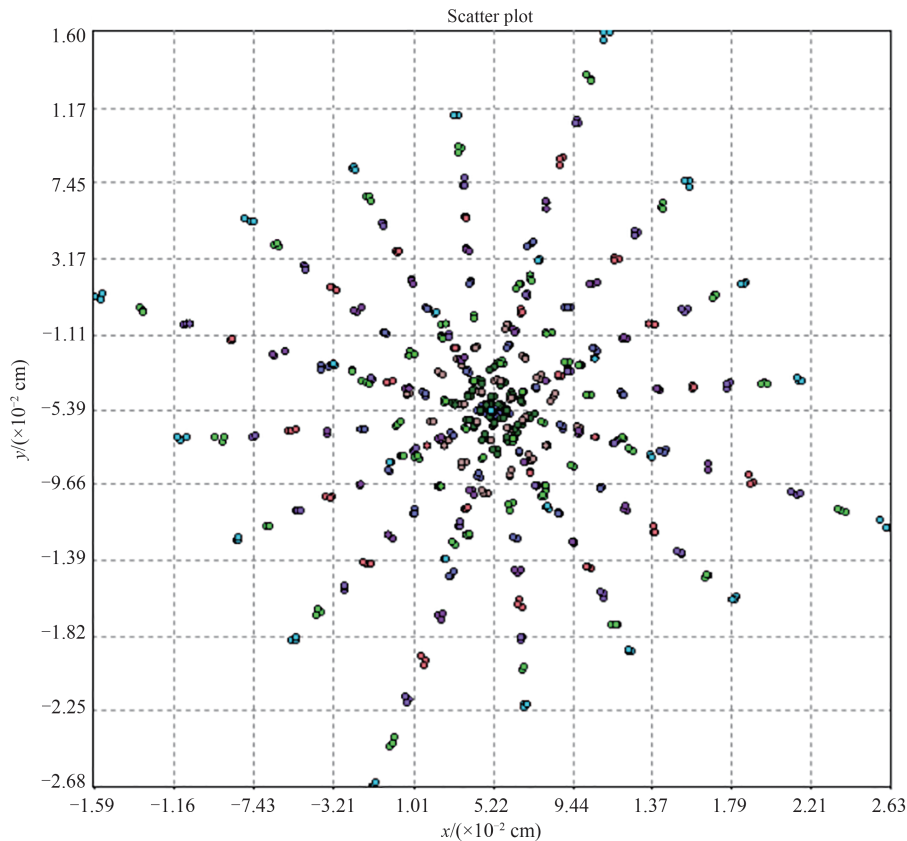


图6 阴极电压-3 000V时0时刻持续时间为10 ps图像电子散布
 Fig.6 Duration 10 ps electrons scatter on the image plane with -3 000 V accelerating voltage on cathode at 0 time

空间分辨率在该电压处达到最大;从图7中虚线可以看出,考虑电子图像时间长度后的空间分辨率最大值出现在1 ps时刻,此时的阴极电压为-3 040 V,这是因为考虑电子图像时间长度后,空间分辨率并不完全由图像起始时刻 t_i 所决定,而是持续时间 Δt 内所有瞬时空间分辨率的平均值。因此,工作于展宽模式下的变像管空间分辨率极大值点所需电压偏置高于静态电压偏置,在实验中可以采取提高电压偏置或降低磁透镜电流的方法获得更好的成像结果。

3 实验

3.1 实验平台

根据仿真结果搭建了实验平台,如图8所示。光电阴极为3条厚度为80 nm的金阴极,制作于直径90 mm的石英衬底上,金阴极的宽度为12 mm,彼此间距为10 mm。分辨率测试用的分划板被直接覆盖于阴极上,分划板图形如图9所示。阳极栅网为20 lp/mm的镍制栅网,透过率为70%,栅网安装在距离光电阴极1 mm处。漂移管长度为56 cm,两端分别连接阴极法兰盘和MCP变像管,形成密闭结构,通过真空泵使管壳内部气压低于 3.0×10^{-3} Pa;4个短磁透镜共轴安装于漂移区,线圈采用2 410匝铜线圈,电流为0.082 A,外包铁壳参数与仿真数据相同,透镜中心与阴极间距分别为,11 cm、22 cm、34 cm和45 cm;MCP直径为90 mm,接收面镀有三条金微带,微带宽度为15 mm,间距为7 mm,当阴极以1:1倍率成像于MCP接收面上时,通过调整像转角,可使阴极图像完全成像于金微带上;电子图像经过MCP倍增后从发射面射出并轰击荧光屏,MCP发射面接地,与荧光屏间距为0.5 mm,荧光屏上电压为3 400 V;电子图像通过荧光屏转变为可见光图像,一个水冷型CCD与荧光屏通过光锥耦合,用于记录可见光图像并传输至电脑终端。

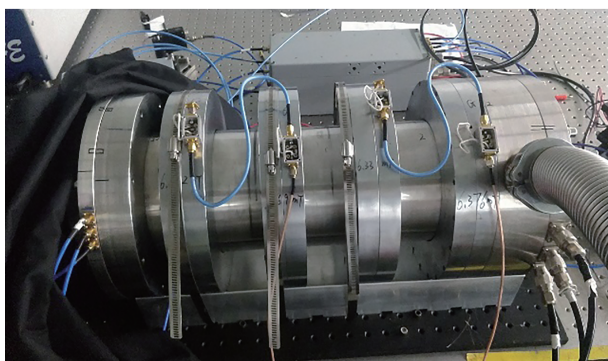


图8 脉冲展宽分幅变像管实物图

Fig.8 Photograph of the pulse-dilation framing tube

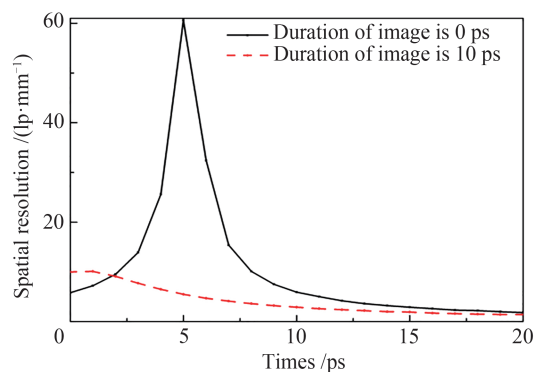


图7 阴极电压为-3 050 V时变像管空间分辨率随时间变化曲线
Fig.7 Spatial resolution versus times with -3 050 V accelerating voltage on cathode

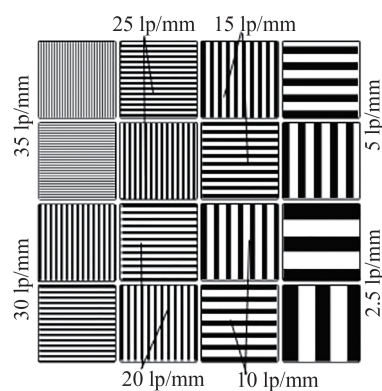


图9 阴极分划板结构图

Fig.9 Schematic diagram of the resolution mask on the PC

3.2 实验结果

调节电控系统,将变像管管壳与栅网置地,MCP和阴极条带通过传输线与电源连接,MCP电压为-700 V,阴极电压在-2 860~-3 040 V范围内连续变化,实验结果如图10所示,分划板调制度曲线如图11所示,当调制度低于1%时,认为图像无法分辨。可见当电压为-3 000~-2 980 V时,空间分辨率最高,达到15 lp/mm;当电压上升至-3 020 V或下降至-2 960 V时,空间分辨率下降至10 lp/mm;而当电压上升至-3 040 V或下降至-2 920 V以下时,空间分辨率下降至5 lp/mm;而当电压低于-2 860 V时,空间分辨率仅为2.5 lp/mm。图12表示仿真数据15 lp/mm分辨率处的调制度随阴极电压变化曲线,在低分辨率区域实验结果与仿真数据符合得很好,但在高分辨率区域实验结果则明显低于仿真值,主要是由于两个因素造成:1)实验采用的分划板位置没有严格满足轴上条件,成像结果受到离轴像差和装配误差的影响;2)最

大空间分辨率受MCP孔径大小和MCP与荧光屏间近贴聚焦的空间分辨率制约,一般难以超过20 lp/mm。

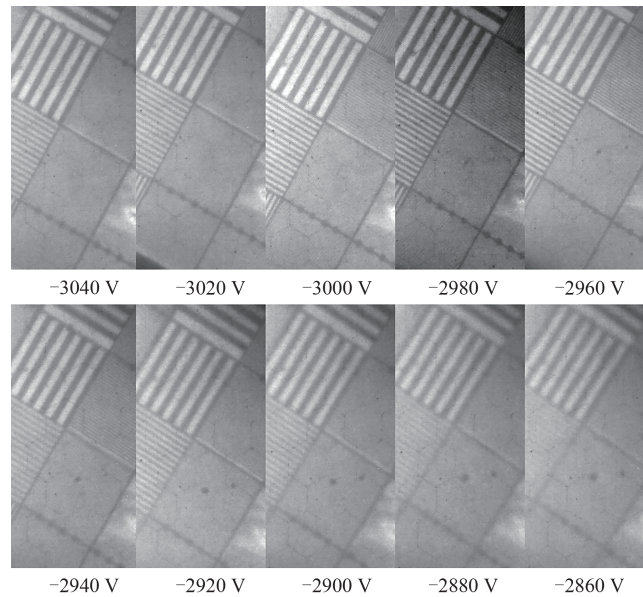


图10 不同阴极电压成像结果

Fig.10 Imaging result with different accelerating voltage on cathode

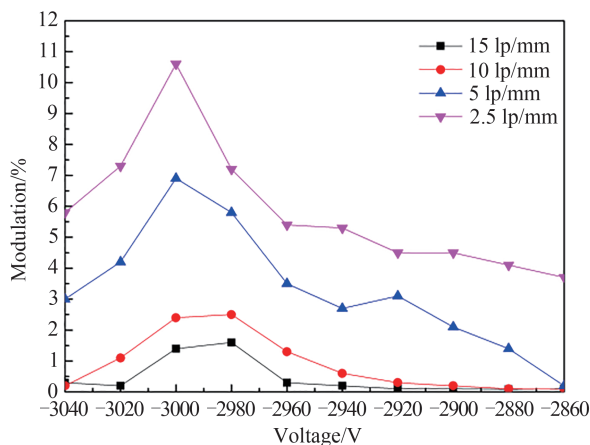


图11 分划板调制度随阴极电压变化曲线

Fig.11 Modulation of the mask versus the accelerating voltage on cathode

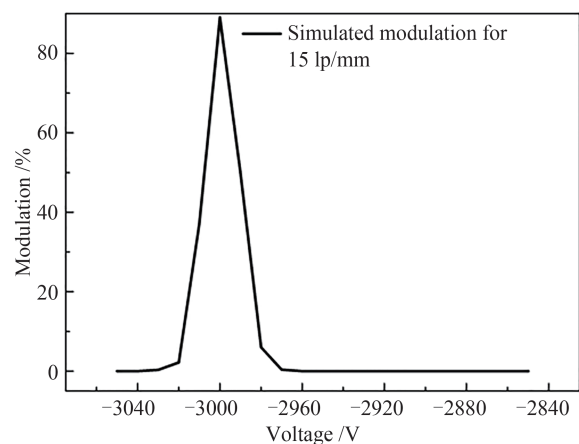


图12 15 lp/mm分划板调制度随阴极电压变化仿真曲线

Fig.12 Simulated result of the 15 lp/mm mask modulation versus the accelerating voltage on cathode

4 结论

本文对短磁透镜脉冲展宽分幅相机的色差进行了理论仿真,并根据仿真结果搭建了实验平台进行验证。分析指出脉冲展宽分幅变像管在展宽过程引入的斜坡脉冲会造成额外色差,且该色差正比于展宽脉冲的斜率。仿真结果表明,加入展宽脉冲后,加速电压随时间发生改变,进而引起空间分辨率下降。变像管的瞬态空间分辨率在阴极电压为-3000 V时达到最大,之后随时间增加而降低;考虑图像时间长度后,图像的空间分辨率低于瞬态空间分辨率,且其最大值对应阴极电压为-3040 V。实验结果与仿真数据符合得很好,表明在斜坡脉冲影响下,成像质量随偏置电压变化而下降,空间分辨率低于静态空间分辨率。

参考文献

- [1] HURRICANE O A, CALLAHAN D A, CASEY D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. Nature, 2014, 506(506):343-348.
- [2] PARK H S, HURRICANE O A, CALLAHAN D A, et al. High-adiabat high-foot inertial confinement fusion implosion experiments on the National Ignition Facility[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(5):055001.

- [3] TOWN R P J, BRADLEY D K, KRITCHER A, et al. Dynamic symmetry of indirectly driven inertial confinement fusion capsules on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(5):056313.
- [4] LIU Jinyuan, NIU Lihong, PENG Wenda, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(5):055104.
- [5] ECKART M J. Large-area 200 ps gated microchannel plate detector[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1986, 57(8):2046-2048.
- [6] KILKENNY J D, BELL P M, BRADLEY D K, et al. High-speed gated X-ray imagers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, 59(8):1793-1796.
- [7] BRADLEY D K, JAANIMAGI P A, DELLETREZ J. X-ray gated images of imploding microballoons[C]. 32nd Annual Technical Symposium, 1989, High Speed Photography, Videography, and Photonics VI.
- [8] FAILOR B H, GORZEN D F, ARMENTROUT C J, et al. Characterization of two-gated microchannel plate framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, 62(12):2862-2870.
- [9] 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
- [10] 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, 81(10):10-E137
- [11] 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):11-E504.
- [12] CAI Houzhi, FU Wenyong, BAI Yanli, et al. Simulation of a dilation X-ray framing camera[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26(4):043003.
- [13] CAI Houzhi, LONG Jinghua, LIU Jinyuan, et al. Time focus technology for the electron bunch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(2):0204001.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 电子束时间聚焦技术[J]. *光子学报*, 2016, 45(2):0204001.
- [14] CAI Houzhi, ZHAO Xin, LIU Jinyuan, et al. Dilation framing camera with 4 ps resolution[J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1):016101.
- [15] CAI Houzhi, LONG Jinghua, LIU Jinyuan, et al. Picosecond framing camera based on electron pulse time-dilation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12):1206001.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 电子束时间展宽皮秒分幅相机[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12):1206001.
- [16] BAI Yanli, LONG Jinghua, LIU Jinyuan, et al. Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12):178-178.
- [17] ENGELHORN K, HILSABECK T J, KILKENNY J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) X-ray imagers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10):10-G123.
- [18] BAI Yanli, LONG Jinghua, CAI Houzhi, et al. Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1):013201.
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(1):013201.
- [19] ZHANG Ke, CAI Houzhi, LIU Jinyuan, et al. Spatial resolution for the time dilation X-ray framing camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2):0211003
张珂, 蔡厚智, 刘进元, 等. 时间展宽射线分幅相机空间分辨特性[J]. *光子学报*, 2018, 47(2):0211003.
- [20] LIAO Yubo, LIU Jinyuan, CAI Houzhi, et al. Improvement of field curvature in magnetic-focusing image converter tube[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10):1004004.
廖昱博, 刘进元, 蔡厚智, 等. 磁聚焦变像管像场弯曲的改善研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(10):1004004.
- [21] CAI Houzhi, FU Wenyong, WANG Dong, et al. Large-format pulse-dilation framing tube with 5 lp/mm spatial resolution[J]. *Optik*, 2019, 185:441-446.
- [22] LEI Yunfei, LONG Jinghua, LIU Jinyuan, et al. Design of framing image tube with large detection area[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9):0904009.
雷云飞, 龙井华, 刘进元, 等. 大探测面积分幅变像管设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(9):0904009.
- [23] CAI Houzhi, FU Wenyong, WANG Dong, et al. Dilation X-ray framing camera and its temporal resolution uniformity[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3):2817.
- [24] CAI Houzhi, DENG Pokun, FU Wenyong, et al. X-ray imager with a 20 mm width microstrip line for the extreme ultraviolet spectrometer[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 98771-98775.
- [25] CAI Houzhi, FU Wenyong, WANG Dong, et al. Synchronous gating in dilation X-ray detector without 1:1 image ratio[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9):12470-12482.
- [26] 唐天同. 高等电子光学[M]. 北京理工大学出版社, 1996: 82-85.
- [27] 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):39-54.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 11775147), China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M643183)