

doi:10.3788/gzxb20184712.1223003

各向异性聚焦大动态条纹变像管

赵廷靖¹, 惠丹丹^{2,3}, 田进寿², 卢裕², 刘百玉², 温文龙², 缙永胜², 陈震²

(1 陇东学院 电气工程学院, 甘肃 庆阳 745000)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 中国科学院超快诊断技术创新重点实验室, 西安 710119)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:建立了各向异性聚焦大动态条纹变像管电子光学模型,通过求解整个系统的电场分布对可能的高压打火点进行了分析,研究了电四极透镜对条纹管放大倍率以及静态和动态像质的影响,并计算了该管型的时间畸变.结果表明,在 20 mm 长狭缝的情况下,时间畸变为 15 ps,在这 15 ps 内,偏转器所施加的扫描电压的变化范围仅为 3.06 V,因此由时间畸变导致狭缝像弯曲的现象几乎可以忽略.实验测试得该条纹相机的时间分辨可达 1.8 ps,在时间分辨为 8 ps 时,动态范围超过 1 000 : 1.

关键词:条纹相机; 数值计算; 动态范围; 狭缝像; 时间畸变; 电四极透镜

中图分类号:TB872; TL65

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1223003-8

High Dynamic Range Anisotropic Focusing Streak Tube

ZHAO Ting-jing¹, HUI Dan-dan^{2,3}, TIAN Jin-shou², LU Yu², LIU Bai-yu²,
WEN Wen-long², GOU Yong-sheng², CHEN Zhen²

(1 *Electrical Engineering College, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China*)

(2 *Key Laboratory of Ultrafast Photoelectric Diagnostics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The electron-optical model of high dynamic range anisotropic focusing streak tube is built. Via calculating the electric field distribution and tracking electron beam trajectory of the whole system, high voltage electrodes which may trigger the electric sparks are analyzed; the effect of electric quadrupole lens on the streak tube magnification, static and dynamic image quality are studied; the temporal distortion is calculated. The results show that the temporal distortion in the 20 mm long slit is only 15 ps, in which the variation of the ramp voltage imposed on the deflectors is as small as 3.06 V. Thus, the slit image distortion caused by the temporal distortion can be ignored. The optimum time resolution of 1.8 ps and dynamic range of 1 000 : 1 at temporal resolution of 8 ps are successfully demonstrated in the experiments.

Key words: Streak camera; Numerical computation; Dynamic range; Slit image; Temporal distortion; Electric quadrupole lens

OCIS Codes: 320.7160; 230.2090; 320.7080

0 引言

激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究对推动高能量密度物理发展和可控核聚变能源开发等具有重要意义^[1].近年来,随着超强超短激光和高能粒子束能量、功率的不断提高,ICF 研究持续

基金项目:国家重大科研装备项目(No.2011CB00000),国家自然科学基金(Nos.50875132,60573172)和国家高技术研究发展计划(No.2011~2015AA8041018)资助

第一作者:赵廷靖(1969-),男,副教授,主要研究方向为非线性光学. Email: zhtj1969@163.com

收稿日期:2018-07-04;录用日期:2018-08-27

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

深入,取得了许多重大进展^[1].然而,在逐渐逼近认知不足的极端物理状态时,ICF 研究依然存在很多难题,如辐射或粒子与等离子体的相互作用微观机制、高能量密度物质的产生及其宏观物理性质等^[2],这些研究势必需要借助于高分辨超快诊断设备的发展.条纹相机同时具备皮秒级乃至飞秒级时间分辨和微米级空间分辨,可用于对 ICF 实验中内爆过程与靶丸运行轨迹的诊断以及内爆等离子体辐射信息的测量,是 ICF 研究中微观和超快过程探测的重要手段.

但在 ICF 实验中,需要在极端状态下(高温约 108 K,高密度约 200 g/cm³,强干扰),通过单次实验诊断极小空间尺度(约 100 μm)、超快时间尺度(小于 100 ps)的大范围辐射强度变化(约 10 000 : 1)的信号.其中,待测信号的强度变化范围对条纹相机的动态范围提出了极高的要求^[3].条纹相机的动态范围主要受到条纹变像管和像增强器两方面的限制.条纹变像管方面,限制动态范围的因素主要是电子光学系统中的空间电荷效应和噪声,当待测光信号太强时,阴极产生的光电子数很多,空间电荷效应严重,电子脉冲峰值高度降低,偏离了与原信号幅度成正比的关系,探测信号失真.当待测光信号太弱时,光电子易被噪声淹没.所以空间电荷效应与噪声限制了条纹相机可探测的强弱信号比,导致动态范围降低.为此,法国的 Photonis 公司和德国 Optronis 公司提出采用矩形框聚焦电极系统与电四极透镜组合的方案^[4-5],使电子束在变像管运行过程中时间方向与空间方向的焦点位于不同位置,从而避免产生电荷密度高度集中的交叉点,有效地抑制了空间电荷效应,提高动态范围与时间分辨^[6-7].国内西安光机所田进寿课题组在此基础上进一步优化设计^[8],研制了多种大动态范围条纹相机^[9-10],但相机的光谱响应范围均局限于紫外光到 X 射线波段,要将光谱响应范围拓展到可见光范围,还需要克服因碱金属在条纹管内沉积引起的打火、降低噪声以及提高阴极均匀性等一系列工艺难题.

本文对各向异性聚焦条纹变像管进行了数值分析与实验测试.首先,建立了条纹管电子光学模型,利用三维电磁场数值计算了其电位、电场分布,主要分析了条纹管轴上电位、边缘电场强度以及四极透镜内部场分布,发现实际中容易产生的高压打火点;其次,追踪了从阴极狭缝发射的电子运行轨迹,分析了静态和动态扫描下的狭缝像,并计算了条纹管的时间畸变;最后,实验测试了该大动态条纹相机的动态范围与时间分辨等性能参数.

1 大动态条纹管工作原理及其场分布特性

大动态范围条纹变像管采用矩形框电极组与电四极透镜组合的方案使电子束实现各向异性聚焦,有效地抑制了变像管中电子束的空间电荷效应,从而提高动态范围、时间分辨,并减小时间畸变.具体结构包括阴极、栅网、时间预聚焦电极组、空间聚焦电四极透镜、时间聚焦电极组、偏转器、荧光屏等.其工作原理是:入射光经物镜传送至光阴极上,光阴极在输入光的激发下,发射出与入射光强度成正比的光电子脉冲,且电子脉冲持续时间与入射光脉冲几乎一致;电子脉冲经栅网加速后进入时间预聚焦电极组受到时间方向(即扫描方向)的首次聚焦作用;随后进入空间聚焦电四极透镜受到空间方向(即狭缝方向)的聚焦力;再进入时间聚焦电极组,完成时间方向的进一步聚焦;经过时间与空间方向聚焦透镜组的各向异性聚焦后,电子脉冲进入偏转系统,受到随时间线形变化的偏转电压的作用,沿扫描方向展开,最终到达荧光屏上,其纵轴,即扫描方向对应着电子脉冲的时间信息,从而实现超快脉冲的诊断.

采用三维电磁场仿真软件(Computer Simulation Technology, CST)^[11]的粒子工作室(Particle studio)建立条纹管三维电子光学模型如图1所示.利用有限积分技术(Finiteintegrationtechnique)^[12]计算条纹管

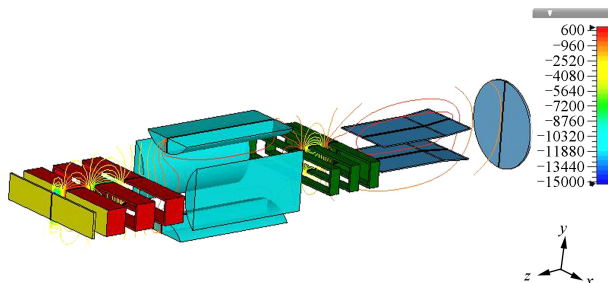


图1 各向异性聚焦条纹管电子光学结构

Fig.1 Electron-optical structure of the anisotropic focusing streak tube

内部静电场分布,图2为条纹管轴上电位差以及电场分布.在阴极($z=0$ mm)到栅网很小的距离内,条纹管电势差瞬间增大,形成很强的加速电场(5 MV/m),从而减小电子束渡越时间,减弱空间电荷效应,提高动态范围与时间分辨.电子束经过栅网后进入到较小的减速-加速交替场,如图2(b),这种交替的场结构有助于抵消部分时间畸变和时间弥散^[13].

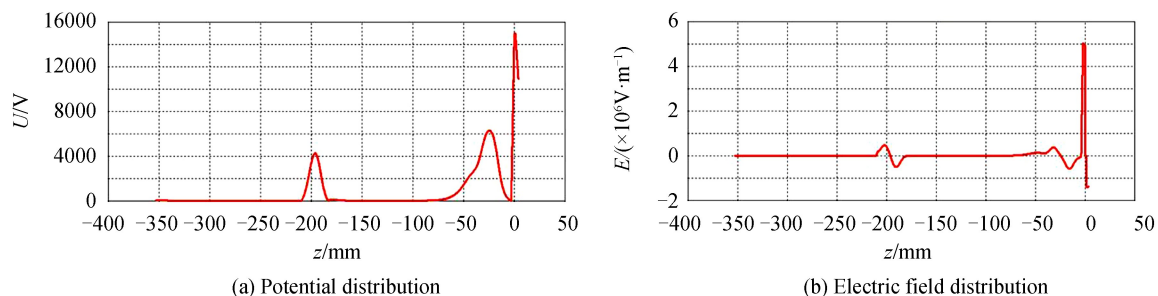


图2 条纹管轴向电势与电场分布

Fig.2 Potential and electric field distribution of the streak tube on the z -axis

四极透镜是各向异性聚焦系统中的核心部件,是控制束流横向运动最有力、也最灵活的元件.在各向异性聚焦条纹变像管中,静电四极透镜可实现电子束空间方向(沿 x 方向)的聚焦.另外,四极透镜也决定空间方向交叉点位置,因此可通过调节其压控系统放大倍率.静电四极透镜在垂直于 z 轴的 x - y 二维平面上的场分布满足双曲分布,当电极间的距离为 $2a$,电极电压为 V_a 时,忽略边缘场效应,电四极透镜内部电位分布为

$$V(x, y) = V_a \frac{x^2 - y^2}{a^2} \quad (1)$$

在 x, y 方向的电场分布为

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{2V_a}{a^2}x \\ E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{2V_a}{a^2}y \end{cases} \quad (2)$$

显然,四极透镜的横向场强与坐标成线性关系,图3(a)为电四极透镜内沿 x 方向的电场在 x 轴上的分布,满足良好的线性关系.图3(b)为距离 z 轴 10 mm 处的 x 与 y 方向的电场分布,其中绿色矩形框部分为电四极透镜区域,可见 x 方向的电场为负, y 方向的电场为正,即电子束在 x 方向受到聚焦场作用,在 y 方向受到发散场作用,体现了电四极透镜的线聚焦特性.

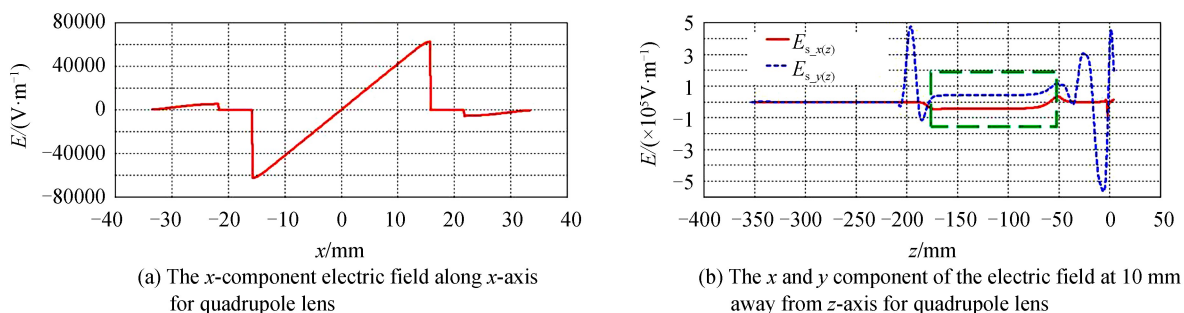


图3 四极透镜横向电场分布

Fig.3 Transverse electric field for quadrupole lens

由于大动态条纹相机具有很强的电场以及复杂的电子光学结构,可能伴有高压打火现象,为此计算了可能存在的高压打火点.计算条纹管内部电场分布,发现高压打火点主要分布在电极端点处,如图4(a),将矩形框电极局部放大后观察到的电场分布,在尖端部分由于场增强效应会产生比电极正常电场大很多的现象,容易引起打火问题.图4(b)为整个条纹管内矩形框电极对角点处的沿 z 方向的电场分布,可见在除去阴极高压处,时间预聚焦电极组与时间聚焦电极组的端点处也可能出现高压打火点,因此在加工装配中需要对这些

区域做特殊抛光处理,以防打火,影响条纹管的工作稳定性以及探测性能.

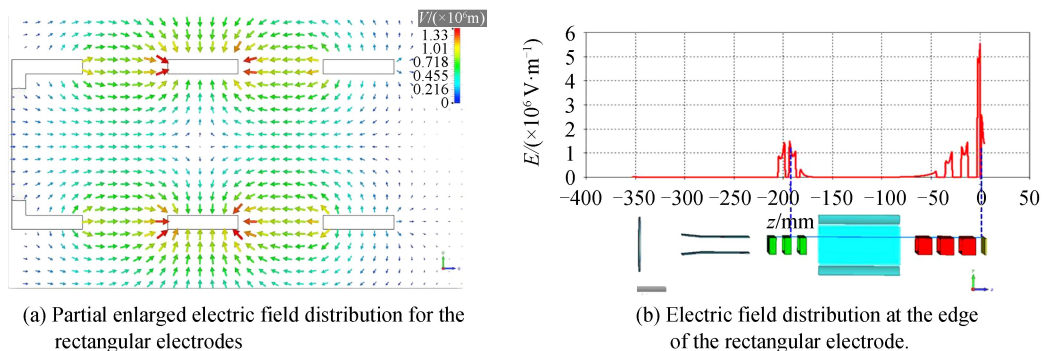


图 4 矩形框电极电场分布

Fig.4 Electric distribution for the rectangular electrodes

2 动态特性

条纹管阴极前端设有狭缝光阑,荧光屏上获得的狭缝像弥散越小时间分辨率越高.为此,模拟条纹管实际工作过程,在阴极狭缝范围内发射光电子,分析荧光屏上的狭缝像研究条纹管整体性能.阴极狭缝尺寸为 $20\text{ mm} \times 40\text{ }\mu\text{m}$,光电阴极在激光照射下激发的光电子其位置服从均匀分布,发射仰角服从 $0 \sim 90^\circ$ 的余弦分布,方位角服从 $0 \sim 2\pi$ 的均匀分布,能量服从 $0 \sim 0.6\text{ eV}$ 的 $\beta(1,4)$ 分布.采用 Monto-Carlo 法进行统计抽样,抽样有效电子数为 30 000.图 5 为条纹管狭缝电子的运行轨迹示意图.研究条纹管荧光屏上的静态与动态狭缝像,图 6(a) 为偏转板未施加偏转电压时狭缝电子到达荧光屏上的静态像.静态情况下狭缝电子在扫描方向由 $40\text{ }\mu\text{m}$ 展宽到 $200\text{ }\mu\text{m}$,狭缝方向由 20 mm 放大至 35 mm ,放大率约为 $35\text{ mm}/20\text{ mm}=1.75$.图 6(b) 为偏转板施加偏压 200 V 后狭缝电子到达荧光屏上的分布,狭缝像偏离荧光屏中心位置约 7.8 mm ,即偏转灵敏度约为 $P=7.8\text{ mm}/200\text{ V}=0.039\text{ mm/V}$.狭缝出现了弯曲现象,在扫描方向的展宽也有所增加,约为 $270\text{ }\mu\text{m}$.在偏转电压下狭缝像弯曲有两方面的原因,一是边缘电子的偏转灵敏度更大,因为边缘电子(如距中心 10 mm 处的光电子)在偏转板区域走的路程更长,受到偏转场的作用时间略微长一些;二是边缘光电子弥散更大.各向异性聚焦条纹管动态测试中,偏转板施加斜坡扫描电压,如图 7.其斜率 $k=0.185\text{ V/s}$,则扫描速度为 $v=k \cdot P=7.2 \times 10^6\text{ m/s}$.选择合适的工作点,使得狭缝电子在扫描电

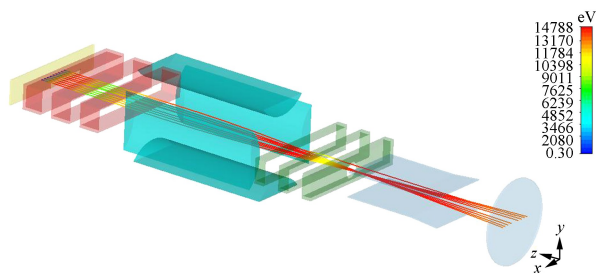


图 5 狭缝电子运行轨迹示意图

Fig.5 General view of the particles' trajectory

其斜率 $k=0.185\text{ V/s}$,则扫描速度为 $v=k \cdot P=7.2 \times 10^6\text{ m/s}$.选择合适的工作点,使得狭缝电子在扫描电

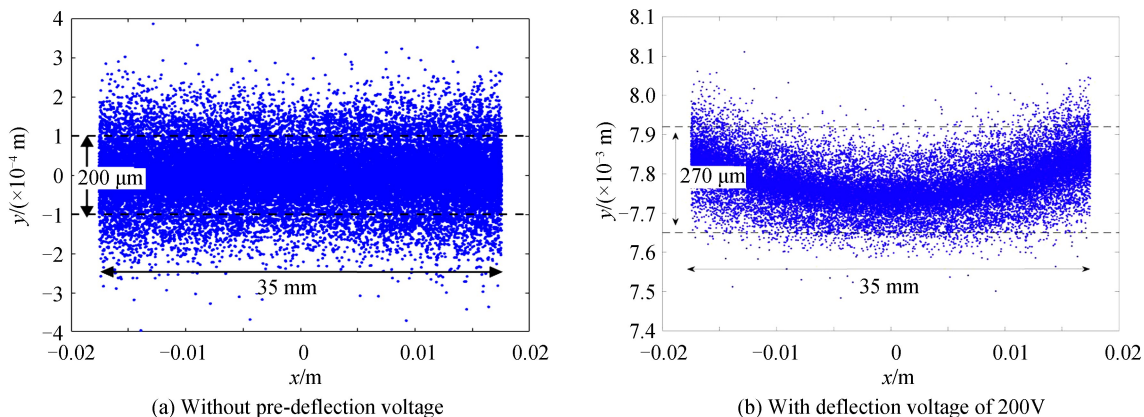


图 6 有无偏压时狭缝电子在荧光屏上的分布

Fig.6 Electrons distribution on screen with and without pre-deflection voltage

压的线性部分到达偏转板入口处.图 8 为偏转板有无预偏电压的情况下狭缝电子经扫描电压后到达荧光屏上的狭缝像.无预偏电压时,40 μm的狭缝电子源对应的狭缝像弯曲严重,展宽至 400 μm.加上 200 V预偏电压后狭缝像处于荧光屏中心位置,且狭缝像展宽很小,接近静态像,仅为 220 μm.当施加预偏电压时,狭缝像回到荧光屏中心位置,减小了边缘弥散,可见偏转板施加预偏电压可有效减小条纹管成像畸变,提高时空分辨.另外,该条纹变像管在扫描电压下狭缝像长度为 35 mm,即动态扫描下的条纹管放大倍率为 35 mm/20 mm=1.75,与静态计算结果一致.

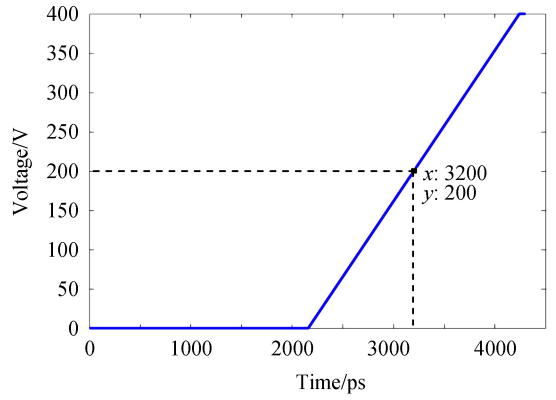


图 7 线性扫描电压
Fig.7 Linear scanning voltage

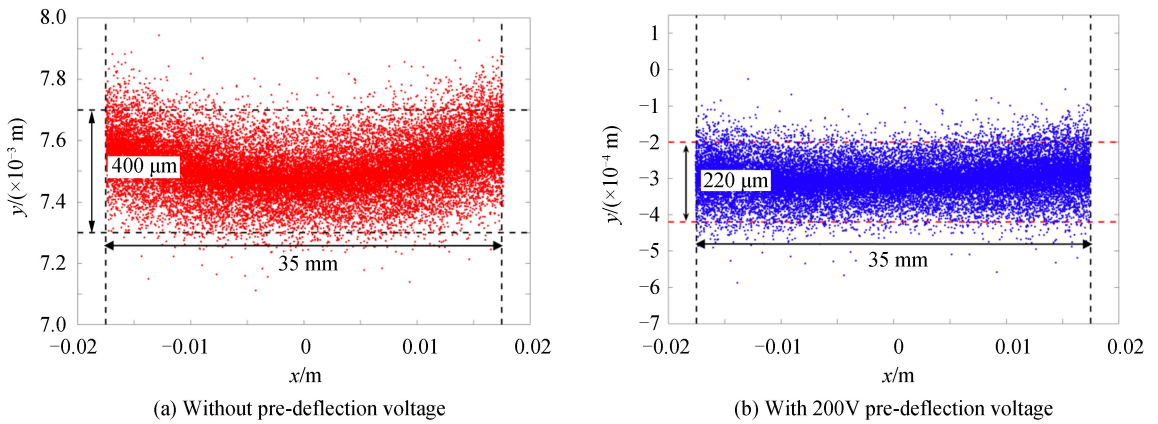


图 8 在扫描电压下狭缝电子在荧光屏上的分布
Fig.8 Electrons distribution on screen under the linear scanning voltage

3 时间畸变

时间畸变为阴极面上不同初始高度发出的光电子的主轨迹与轴上光电子的主轨迹的渡越时间之差.一般阴极工作区域越大,时间畸变越大^[14],各向异性聚焦条纹管狭缝长度达到 20 mm,但其聚焦电极采用矩形框电极与静电四极透镜组合的各向异性聚焦方案,电场分布均匀,中心和边缘的电子受到的电场力均匀一致,相比于旋转对称电极,引入的时间畸变小.为此,有必要对其时间畸变进行分析,保证该方案可以有效地减小时间畸变,从而降低成像畸变.统计阴极中心处电子与距中心 10 mm 处的电子到达偏转板入口处的

表 1 不同位置处的狭缝电子运行时间统计

Table 1 The traveling time of electrons at different positions along the slit

Position of moving electron	Entrance of deflecting plate (A)		Exit of deflecting plate (B)		At the screen (C)		
	Central electron	Fringe electron	Central electron	Fringe electron	Central electron	Fringe electron	
Unloaded pre-deflection voltage	Traveling time	3 220 ps	3 235 ps	3 918 ps	3 936 ps	5 165 ps	5 192 ps
	Temporal distortion	15 ps		18 ps		27 ps	
Loaded pre-deflection voltage	Traveling time	3 220 ps	3 235 ps	3 915 ps	3 933 ps	5 159 ps	5 187 ps
	Temporal distortion	15 ps		18 ps		28 ps	

时间,计算时间畸变.无论偏转板是否施加预偏电压,狭缝中心电子与边缘电子到达偏转板入口处的时间都分别为 3 220 ps 和 3 235 ps,即时间畸变 $\Delta t = |t_{\text{center}} - t_{\text{fringe}}| = 15$ ps,此时对应的扫描电压分别为 $V_{\text{center}} = 203.84$ V, $V_{\text{fringe}} = 206.9$ V,即 $\Delta V = 3.06$ V,可见时间畸变对狭缝像弯曲的影响很小.图 8 所示 20 mm 的长狭缝扫描像弯曲很小,也证实了这一观点.

表 1 为阴极中心处与距中心 10 mm 处(以下称边缘电子)的电子到达条纹管不同位置处(A, B, C)的运行时间统计,A 为偏转板入口处,B 为偏转板出口处,C 为荧光屏位置.不论有无预偏电压,狭缝中心电子与边缘电子到达 A、B、C 的时间差都逐渐增大;有无预偏电压对时间畸变的影响很小;但相比于无预偏电压的情况,加预偏电压后,狭缝电子到偏转板出口与荧光屏的运行距离更小,因此运行时间更短.

4 大动态条纹相机实验测试

根据理论设计与模拟计算,成功研制了具有大动态范围的高性能条纹相机,精密调节条纹管的各电极位置及电压参数,并对其性能参数进行了测试.时间分辨采用钛宝石激光器产生的 800 nm 的激光脉冲作为光源进行标定,激光器的本身脉宽为 100 fs 左右,将激光器本身的脉冲作为窄脉冲,不计激光器脉宽的影响,则可根据展宽法评价条纹相机的时间分辨率^[15].当一定时间间隔的激光脉冲入射到光电阴极,基于光电效应,光电阴极发射出强度和脉宽与激光脉冲相对应的电子脉冲,经过条纹管扫描后在荧光屏上产生狭缝扫描像,图 9(a)为脉冲间隔为 10 ps 的两条狭缝扫描像.对其强度分布进行高斯拟合,结果如图 9(b)所示,可见 10 ps 间隔的条纹清晰可辨.根据高斯函数模型拟合结果,单个条纹半高宽对应的时间分辨为 $\tau = 1.8$ ps,即该条纹相机的时间分辨可达 1.8 ps.

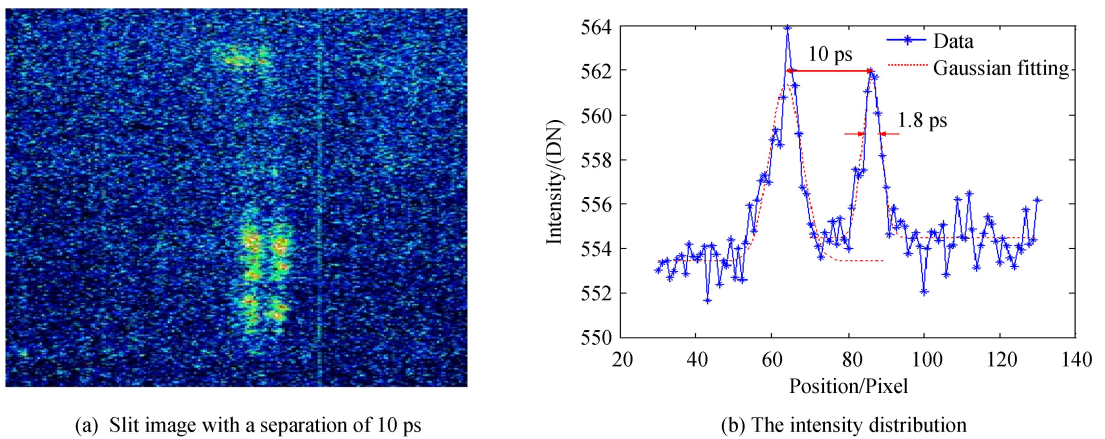


图 9 间隔为 10 ps 的狭缝扫描像及强度分布
Fig.9 Slits image with a separation of 10 ps and the corresponding intensity distribution

条纹相机的动态范围可以定义为条纹相机最强输出信号相对于最弱输出信号的条纹展宽比例不超过 120%时,最强信号与最弱信号强度的比值.采用法布里-玻罗标准具产生强度依次衰减的脉冲序列方式来标定条纹相机的动态范围.测试原理如图 10 所示,由激光器产生波长为 532 nm、脉宽为 8 ps 的激光光源,注入到一块空气隙的法布里-玻罗标准具上,标准具经过精心设计,两内表面分别镀有相应的膜层,透过率与反射率分别为 30%和 70%.当脉冲光经过标准具后产生强度依次衰减约 50%的等间距脉冲序列,即输入光强呈

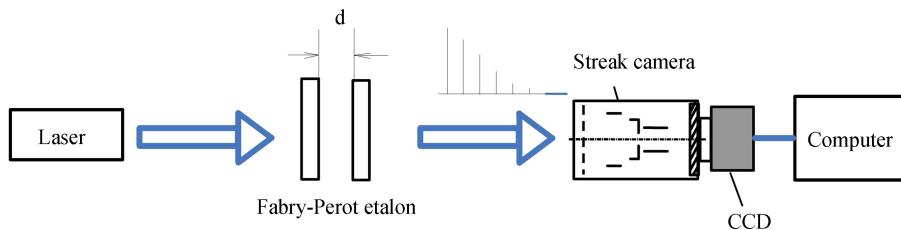


图 10 实验原理
Fig.10 Sketch of the experiment setup

指数衰减趋势,第 n 个脉冲光强度为 $I_n = I_1 \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}$,其中 I_1 为经过标准具的第一个出射光脉冲强度.在条纹相机荧光屏上读出的扫描条纹像中,从未饱和的最强输出脉冲的宽度展宽不超过最弱脉冲宽度 20% 的上限时开始计算条纹相机能分辨的子脉冲个数 n ,即可估算出其系统的动态范围为 2^{n-1} .图 11(a) 为动态扫描条纹像,图 11(b) 为条纹像强度分布,经处理后可知采集到的 12 根条纹中,最右侧一个脉冲达到饱和,即相机可分辨的条纹数为 11,即动态范围大于 $1\ 000 : 1(2^{10} : 1)$.

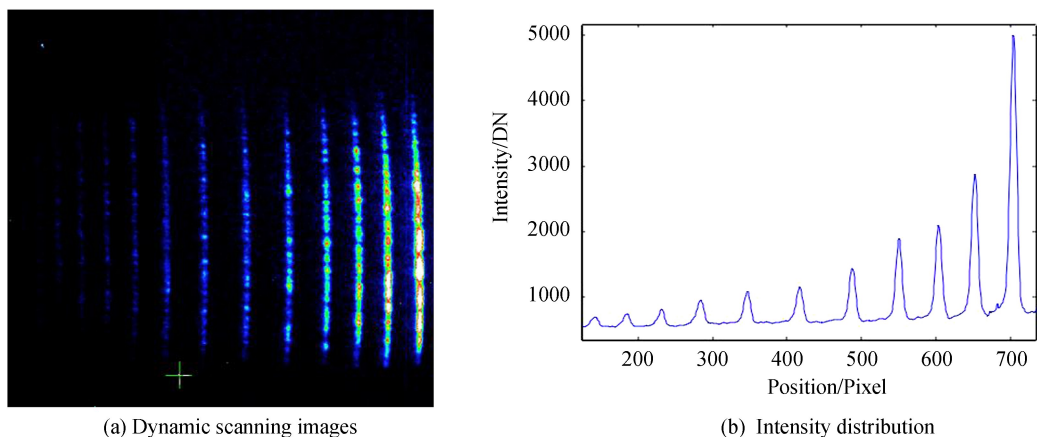


图 11 条纹动态扫描像及强度分布

Fig.11 The dynamic scanning images and intensity distribution for the slits

在动态范围测试中,输入脉冲光经过标准具后产生强度呈指数衰减的等间距脉冲序列.为验证条纹相机动态扫描信号随输入光强的变化关系,读取图 11(b) 中有效条纹像的信号强度,每个条纹的输入与输出信号归一化强度变化如图 12 所示,从图中可见荧光屏上输出信号同输入光信号一致,亦呈现指数衰减趋势.插图显示了输出信号强度随输入光强的变化关系,二者基本符合线性变化规律.在输入光信号较弱的区域,动态扫描条纹信号强度在一定程度上偏离线性,可能是由于输出信号在较弱时由阴极以及荧光屏噪声等因素导致的信噪比降低、统计误差增大等原因引起.而且输入曲线是根据法布里-玻罗标准具透过率与反射率计算的一个理论值,而不是实测值,实际中,不同强度的输入脉冲序列可能在空间上发生重叠而很难对其实现精准测量.

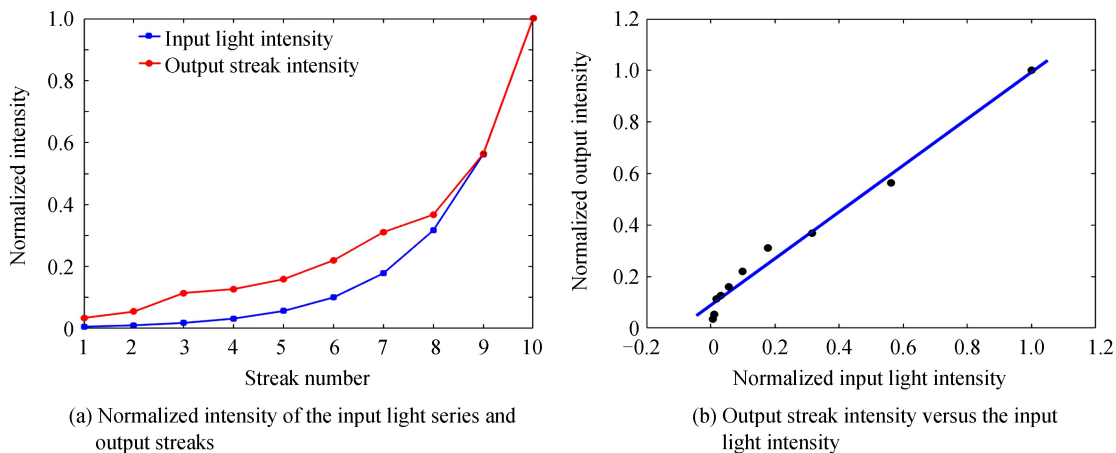


图 12 输入光脉冲与输出信号的归一化强度

Fig.12 Normalized intensity of the input light series and output streaks

进一步地观察图 11(a) 中靠右侧的条纹,可以发现其产生了弯曲现象,与图 8 所示的动态狭缝像弯曲现象一致,即由于边缘电子与中心电子在条纹管里飞行的光程不同导致其到达荧光屏的时间不同(称为时间畸变),从而产生了狭缝像的弯曲现象.该条纹管阴极长度为 20 mm 时对应的理论值为 28 ps(荧光屏处),而在测试动态范围时,阴极长度取值为 10 mm,对应时间畸变值不超过 8 ps,输入激光脉冲宽度为

8 ps,也就是说,每根条纹对应的时间宽度在 8 ps,从动态范围测试图中看出,条纹的弯曲量跟条纹本身的宽度相当,说明了其时间畸变的测试值也在 8 ps 左右,理论设计值和实验值吻合地比较好。

5 结论

本文基于各向异性聚焦条纹管的三维电子光学结构,计算了其内部电位、电场分布,结果表明阴极与栅网很小的距离内条纹管电势差瞬间增大,形成很强的加速电场,有效减小了电子束渡越时间,减弱空间电荷效应,提高动态范围与时间分辨。在时间预聚焦电极组与时间聚焦电极组的端点处由于场增强效应会产生比电极实际所加电场大很多的现象,可能导致高压打火,实际加工中需要对此区域的电极做好清洗抛光处理,降低打火风险。另外,本文计算了阴极狭缝电子在荧光屏上的分布,在动态扫描的情况下偏转板施加预偏电压,可有效降低边缘电子弥散,改善狭缝像弯曲现象,提高时空分辨。对条纹管时间畸变的分析表明各项异性聚焦条纹管中心和边缘的电子受到的电场力均匀、一致,时间畸变小,几乎消除了由时间畸变导致的狭缝弯曲现象。基于理论分析与模拟设计,研制出了最佳时间分辨可达 1.8 ps,在时间分辨为 8 ps 时,动态范围超过 1 000 : 1 的各向异性聚焦的高性能条纹相机。

参考文献

- [1] DING Yong-kun, JIANG Shao-en, LIU Shen-ye, *et al.* Recent progress on physical experiment and target diagnostics in research center of laser fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(12): 3077-3081.
丁永坤, 江少恩, 刘慎业, 等. 激光聚变研究中心聚变靶物理实验和诊断技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(12): 3077-3081.
- [2] ZHAO Yong-tao, XIAO Guo-qing, LI Fu-li, *et al.* The physics of inertial confinement fusion based on modern accelerators: status and perspectives[J]. *Physics*, 2016, **45**(2): 98-107.
赵永涛, 肖国青, 李福利, 等. 基于现代加速器的惯性约束聚变物理研究现状及发展[J]. *物理*, 2016, **45**(2): 98-107.
- [3] LI Jing, HU Xin, YANG Pin, *et al.* Double focusing lens streak tube with wide dynamic range [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(10): 2616-2620.
李晋, 胡昕, 杨品, 等. 大动态双聚焦条纹变像管设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(10): 2616-2620.
- [4] Streak tube[EB/OL].[2018-07-04]. <https://www.photonis.com/product/streak-tube>.
- [5] Optoscope SC-20 systems[EB/OL].[2018-07-04]. <https://optronis.com/en/products/optoscope-sc-20-systeme/>.
- [6] BONTÉ C, HARMAND M, DORCHIES F, *et al.* High dynamic range streak camera for subpicosecond time-resolved x-ray spectroscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, **78**(4): 043503.
- [7] ZUBER C, BAZZOLI S, BRUNEL P, *et al.* Picosecond X-ray streak camera dynamic range measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, **87**(9): 093501.
- [8] 田进寿, 徐向晏, 王俊锋, 等. 各向异性聚焦大动态条纹变像: 中国, CN201010574723[P]. 2011-05-18.
- [9] ZHU Min, TIAN Jin-shou, WEN Wen-long, *et al.* Research on large dynamic range streak camera based on electron-bombarded CCD[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(9): 507-514.
朱敏, 田进寿, 温文龙, 等. 基于电子轰击式 CCD 的大动态条纹相机研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(9): 507-514.
- [10] TIAN J S. Development of streak camera with anisotropic focusing electron optical system[C]. SPIE. 2013: 87960Z.
- [11] CST-computer simulation technology[EB/OL].[2018-07-04]. <https://www.cst.com/products/cstps>.
- [12] WEILAND M C T. Discrete electromagnetism with the finite integration technique[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2001, **32**: 65-87.
- [13] QU Jun-le, YANG Qin-lao, NIU Han-ben, *et al.* A long slit soft x-ray streak camera system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(1): 114-120.
屈军乐, 杨勤劳, 牛憨笨, 等. 一种长狭缝软 X 射线扫描相机系统[J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(1): 114-120.
- [14] HUI Dan-dan, TIAN Jin-shou, LU Yu, *et al.* Temporal distortion analysis of the streak tube[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(15): 158502.
惠丹丹, 田进寿, 卢裕, 等. 条纹变像管时间畸变的分析[J]. *物理学报*, 2016, **65**(15): 158502.
- [15] FENG J, SHIN H J, NASIATKA J R, *et al.* An x-ray streak camera with high spatio-temporal resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(13): 134102.

Foundation item: The National R&D Projects for Key Scientific Instruments (No. 2011CB00000), National Natural Science Foundation of China (Nos. 50875132, 60573172) and National High-tech R&D Program (No.2011~2015AA8041018)

引用格式: ZHAO Ting-jing, HUI Dan-dan, TIAN Jin-shou, *et al.* High Dynamic Range Anisotropic Focusing Streak Tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1223003

赵廷靖, 惠丹丹, 田进寿, 等. 各向异性聚焦大动态条纹变像管[J]. *光子学报*, 2018, **47**(12): 1223003