

doi: 10.3788/gzxb20164510.1012001

高时间分辨率条纹变像管的动态特性研究

刘蓉^{1,2}, 田进寿², 苗润才¹, 王强强², 温文龙², 李岩³, 王俊锋²,
徐向晏² 卢裕², 刘虎林², 王兴²

(1 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(3 西安石油大学 理学院, 西安 710065)

摘 要:针对高时空分辨的设计要求, 分析影响条纹相机中条纹变像管的物理时间弥散、技术时间弥散和扫描电路触发晃动的因素, 优化设计了行波偏转前置磁透镜聚焦的条纹变像管系统. 利用 CST 仿真软件研究了行波偏转器内部的时变电场分布, 计算了行波偏转器内电磁波的传播速度. 结果表明, 行波偏转器的指长为 8 mm、指宽为 1 mm、指间距为 0.24 mm、管脚长为 2.5 mm、板厚为 1 mm 及总长度为 17.12 mm 时, 实现了电子团的飞行速度与扫描电脉冲沿行波偏转器的传输速度的匹配. 采用电子轨迹法和瑞利判据分析了条纹变像管的动态时间和空间特性, 得到单次扫描动态时间分辨率为 200 fs、同步扫描时间分辨率为 208 fs、动态空间分辨率优于 20 lp/mm.

关键词: 条纹变像管; 超快光学; 调制传递函数; 动态特性; 时间分辨率; 空间分辨率; 瑞利判据

中图分类号: 0463; TN16

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1012001-7

Dynamic Characteristic Analysis on Streak Image Tube with High Temporal Resolution

LIU Rong^{1,2}, TIAN Jin-shou², MIAO Run-cai¹, WANG Qiang-qiang², WEN Wen-long², LI Yan³,
WANG Jun-feng², XU Xiang-yan², LU Yu², LIU Hu-lin², WANG Xing²

(1 School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

(3 School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aim to high temporal resolution of the streak image tube in streak camera, the factors which influence the physical temporal dispersion, technical temporal dispersion and time jitter of the sweep circuit were discussed. The streak image tube was optimized, in which a pair of traveling wave deflectors was located before a magnetic solenoid lens. The inner time-varying electric field of traveling wave deflectors was simulated by CST electromagnetic studio. And the propagation velocity of electromagnetic wave was calculated. The results show that when leg length is 8 mm, leg width is 1mm, interval is 0.24 mm, pin length is 2.5 mm, deflector thickness is 1 mm and deflector length is 17.12 mm, the moving velocity of electrons and propagation velocity of the electromagnetic wave are matching. Based on the electron trajectory tracing method and the Rayleigh criterion, dynamic temporal and spatial characteristics of the streak image tube were analyzed, a dynamic temporal resolution of 200 fs in single sweep mode, dynamic temporal resolution of 208 fs in synchronized sweep mode, and a dynamic spatial resolution of above 20 lp/mm were obtained.

Key words: Streak image tube; Ultrafast optics; Modulation transfer function; Dynamic characteristics; Temporal resolution; Spatial resolution; Rayleigh criterion

OCIS Codes: 120.4640; 120.4820; 320.0320; 320.7080; 320.7090

基金项目:国家自然科学基金(No. 61501363)、陕西省教育厅科研计划项目(No. 15JK1351)和西安工业大学光电工程学院院长基金(No. 13GDYJY01)资助

第一作者:刘蓉(1982-),女,讲师,博士,主要研究方向为超快诊断技术. Email: liurong0918@163.com

通讯作者:田进寿(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为超快诊断技术、光电成像技术. Email: tianjs@opt.ac.cn

收稿日期:2016-04-29; **录用日期:**2016-07-26

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

0 引言

条纹相机是具备超高时空分辨能力的科学仪器,可以同时记录探测目标的一维空间-强度-时间参数^[1],是研究激光材料中的超快光激发态弛豫过程、激光器产生的超短激光脉冲持续时间、强光与物质相互作用等物理过程的必要手段^[2].基于同步扫描工作模式的条纹相机通过重复高频扫描实现微弱信号探测甚至单光子超快现象的测量,可以解决碳纳米管复合材料中超快荧光发光过程、分子间或分子内弱相互作用超快弱光等现象探测的瓶颈问题.基于条纹相机的多片反射镜速度干涉系统(Velocity Interferometry System for Any Reflector, VISAR)被应用于国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)等国际重大科学工程中,解决了冲击波时序的测量问题,是研究其内爆过程及动力学效应不可或缺的重要手段^[3].因此,各国科研人员以提高条纹相机时空分辨能力为目标进行深入研究.日本 HAMAMATSU 公司设计的短磁聚焦可见光条纹相机,时间分辨率达到 180 fs^[4].伴随着惯性约束聚变的飞速发展,迫切需要可实现飞秒时间分辨的 X 射线条纹相机.美国 Berkeley 国家实验室冯军等设计的 X 射线条纹相机采用反射式 Au 光阴极,并在光阴极后面设置一个栅网阳极,在阴阳极之间形成 10 MV/m 的加速电场,实验测得条纹相机时间分辨率达到 600 fs^[5].美国 Kansas 大学常增虎课题组通过在条纹变像管内配置两条狭缝使电子满足旁轴条件,并减小偏转系统中的电子束尺寸,当阳极与聚焦极之间狭缝宽度为 5 μm 时,条纹相机的时间分辨率提高到 280 fs^[6],但是这种改进对于空间维度的信息存在一定限制.为了解决该问题,冯军课题组采用大口径磁聚焦透镜,并提高阴栅加速场,从而改善了时间分辨特性,

时间分辨率达到 233 fs^[7],这也是目前国际上报道的 X 射线条纹相机的最高时间分辨指标.

飞秒条纹相机的理论设计以前都是在基于单次扫描模式下,通过追踪从阴极中心一个理想空间点或时间点发出的光电子,计算到达荧光屏时对应的时间和空间点扩展函数,得到时间调制传递函数和空间调制传递函数,从而得到条纹管能达到的理论极限时间和空间分辨能力^[8].但条纹相机实际工作时,狭缝总是有一定长度($>3\text{ mm}$)和宽度($>5\ \mu\text{m}$),而且在小信号输入时,条纹相机往往工作在同步扫描模式,要求每次扫描都能够准确地同步在荧光屏的同一起始位置上,因此每次扫描之间的时间晃动将对同步扫描模式下条纹相机的时间分辨带来较大的影响.因此,有必要讨论制约条纹相机时间晃动的各个因素,并给出同步扫描相机总的理论时间分辨能力.

本文将系统讨论飞秒条纹相机工作在同步模式下的时间晃动、物理时间弥散、技术时间弥散、狭缝本身的长度和宽度造成的时间弥散以及时间畸变等客观因素,利用瑞利判据分析飞秒条纹相机实际能达到的时间分辨能力;为了提高偏转灵敏度以改善技术时间分辨能力,开展行波偏转器的优化设计,使得光电子束团在条纹管中的飞行速度和扫描电脉冲在行波偏转器中的传播速度基本一致.

1 行波偏转器前置短磁聚焦条纹变像管的电子光学设计

1.1 设计思路

工作于同步扫描模式下的条纹变像管主要包括光阴极、阳极、行波偏转器、磁透镜、扫描电路和荧光屏,其工作原理如图 1.条纹变像管将超快光学信号通过光电阴极转换成电子信号,经阴阳极间加速电场加速

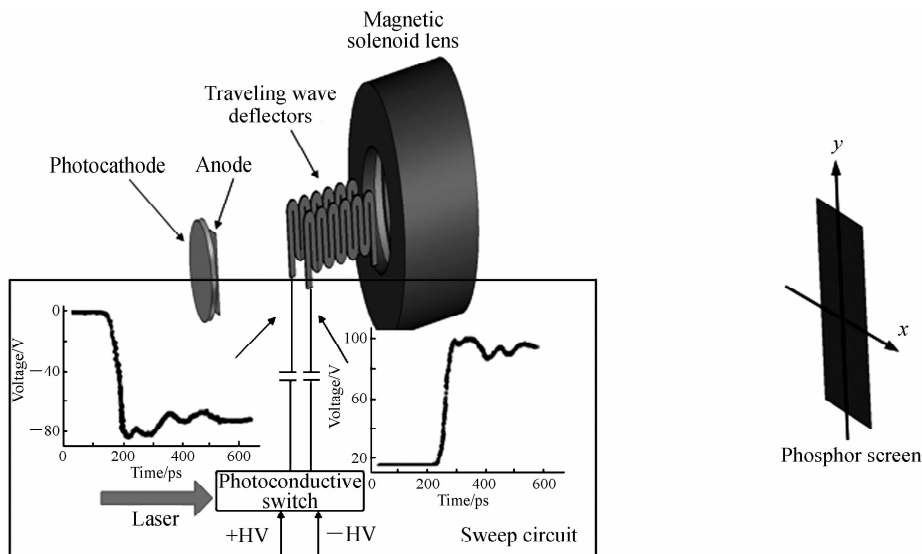


图 1 条纹变像管模型

Fig. 1 Schematic of the streak image tube

后进入行波偏转器内,飞秒激光触发光导开关扫描电路产生斜坡电压,驱动行波偏转器,并对光电子进行扫描偏转,最终由荧光屏将随时间变化的电子像转化成随空间变化的光学信号。当条纹管工作于同步扫描模式下时,在扫描管的偏转系统上加载频率与所记录光脉冲重复频率相同或者成倍数关系、且与所记录光信号同步的高频扫描电压,使探测的超短弱光脉冲精确叠加在荧光屏上,从而可以大大提高像管的探测灵敏度和动态范围,使得超快速弱光现象的线性诊断得以实现。

在电子光学设计时,为了消除光电子渡越时间弥散,除了在工艺许可的条件下尽量提高光电阴极和加速栅网之间的电场强度外,还要通过对行波偏转器和聚焦系统进行严格设计。为了提高偏转灵敏度,在考虑尽量减小光电子渡越时间弥散的前提下,实现电磁波传播速度与光电子运动速度的良好匹配,同时采用偏转系统前置方案以增加等位区长度是实现这一目的的关键。因此,偏转系统是条纹变像管探测时变信号的核心器件,其电子光学和结构设计决定了条纹变像管在高频同步扫描工作模式的综合性能。

1.2 行波偏转系统的优化设计

根据条纹变像管时间分辨率的基本理论,其技术时间弥散与扫描速度成反比,适当提高扫描速度 v 将有助于改善时间分辨特性,而扫描速度 v 又与偏转灵敏度 P 及电压变化斜率 K 成正比,即 $v = KP$,要实现较高的扫描速度、较宽的扫描电压傅里叶频谱,要求偏转系统具有高的偏转灵敏度和宽的通频带。另一方面,若电子团运动速度与扫描信号沿偏转系统的传播速度不匹配,则电子团在偏转区内所受的偏转场会发生变化,最终导致偏转线性变差,波形失真。

行波偏转器是引导电磁波沿弯曲线路方向传输,实现电子团与电磁波能量相互耦合并产生最大限度偏转的器件,可以等效为一种慢波系统。其显著优点是:通过引导电磁场沿着蛇形线弯曲的传播路径传播,可以降低电磁波的纵向传播速度(水平方向)从而匹配电子束速度,进而有效减小偏转系统的波形失真效应,使得电磁场与电子发生有效换能,实现电子脉冲最大限度的偏转,提高偏转灵敏度,改善其时间分辨特性。因此动态偏转系统采用行波偏转器代替传统的平板偏转器,其结构如图2。

为了优化设计行波偏转器的结构参数,进而提高条纹变像管的动态时间分辨特性,前提必须对行波偏转器内部电磁场进行分析。本文利用 CST 三维电磁场仿真软件求解麦克斯韦方程组^[9],模拟在实际工作时反向预偏电压 V_0 和斜坡电压 $V(t)$ 共同作用下,行波偏转器内部的时变电磁场分布,计算行波偏转器内的电磁波传播速度,分析其与电子束速度的匹配关系,优

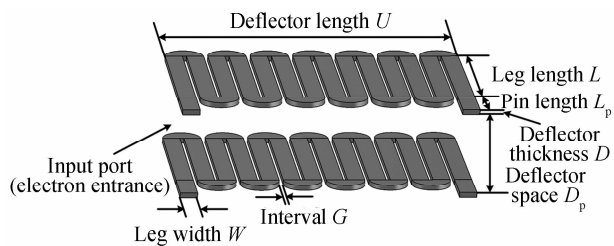


图2 行波偏转器结构

化设计行波偏转器的指长、指宽、指间距、管脚长等结构参数。行波偏转器内部电磁波传播速度的具体计算方法是:利用 CST 软件的参量扫描程序改变行波偏转器结构参数,并在行波偏转器入口和出口处分别设置监视器,计算得到行波偏转器不同结构参数下,时变电磁场沿着行波偏转器纵向传播所用的时间 t ,若行波偏转器的总长度为 U ,则行波偏转器内电磁波的纵向传播速度 $v' = U/t$ 。通过大量计算,比较在不同结构参数下电磁波纵向传播速度,得到当行波偏转器的指长 $L = 8$ mm、指宽 $W = 1$ mm、指间距 $G = 0.24$ mm、管脚长 $L_p = 2.5$ mm、板厚 $D = 1$ mm、总长度 $U = 17.12$ mm时,行波偏转器内部的时变电磁场分布如图3。图中,

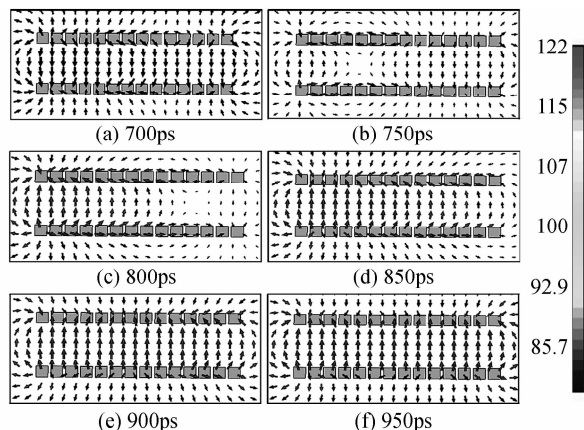


图3 优化设计后行波偏转器内的电磁场分布
Fig. 3 Distribution of electric field in the optimum traveling wave deflectors

箭头方向表征行波偏转器内部电磁场方向,不同灰度表示其强度大小(单位:V/m)。由图可得,横向电场(水平方向)非均匀,在偏转板边缘处较强,对电子波包的影响较大;但是横向电场在偏转板的中间区域非常弱,对电子运动的影响很小,因此对电子渡越时间的影响可以忽略。此外,在行波偏转器的入口处和出口处,横向电场对电子产生一定的散焦,称为偏转散焦,电子束斑越大,偏转散焦越严重,对空间分辨率的影响较大。纵向电场(垂直方向)作用电子,使电子发生偏转。同时,可以清楚看到当 $V(t) < |V_0|$ 时,行波偏转器内电场方向由上极板指向下极板;当 $V(t) > |V_0|$ 时,电场方向发生反转。设置反向预偏电压的原因是可以有效避免电子通过偏转场时打到偏转板上,同时减小偏转

散焦. 计算得到电磁波沿着行波偏转器纵向传播的传输速度为 0.744×10^8 m/s(约 $0.248c$, c 为光速). 在此变像管设计方案中, 阴栅之间电压为 15 kV, 计算得到行波偏转器中电子团纵向运动速度为

$$v_0 = \sqrt{\frac{2qV}{m}} = 0.73 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 0.242c \quad (1)$$

因此, 在上述结构参数下, 电磁波纵向传播速度与电子团运动速度达到良好匹配.

行波偏转器除了应具有良好的速度匹配特性外, 还需要具备高的偏转灵敏度, 当偏转信号很小时, 就可以获得较大的偏转位移, 实现非常灵敏的时空映射变换, 以提高时间分辨率. 偏转灵敏度的定义为

$$P_e = Y/V_d \quad (2)$$

式中, Y 为电子在像面上的偏移量, V_d 为偏转电极上施加的电压.

根据偏转灵敏度的定义, 从阴极中心位置发射大量光电子, 采用 CST 软件粒子工作室 Tracking 求解器追踪电子团运动轨迹, 并通过 2D 位置监视器得到确定偏转电压下的电子偏转位移, 根据式(2)计算其偏转灵敏度. 分析发现, 行波偏转器的板间距对其内部电场分布以及偏转灵敏度影响非常大, 结果如表 1. 当减小行波偏转器的板间距, 且其他结构参数不变时, 其内部的偏转电场增强, 电子团的偏转位移增大, 偏转灵敏度显著提高; 但是若板间距过小 (< 3 mm), 将导致电子团被偏转板拦截, 无法被荧光屏接收. 因此确定行波偏转器的板间距为 3 mm.

表 1 不同板间距下行波偏转器偏转灵敏度的计算结果

Table 1 Results of deflection sensitivity of traveling wave deflectors under different deflector spaces

Sample	D_p /mm	V_d /V	Y /mm	P_e /(mm · kV ⁻¹)
1	5	200	5.96	29.8
2	4	200	7.27	36.4
3	3	200	9.31	46.6
4	2	200	0	0

因此, 优化后的行波偏转器结构参数如表 2. 通过优化设计行波偏转器的结构参数, 使得电磁波传播速度与电子运动速度满足匹配要求, 可以实现能量最大限度地传递给电子, 使电子产生有效偏转, 为改善条纹变像管动态时间分辨率提供重要保证.

表 2 优化后的行波偏转器结构参数(单位: mm)

Table 2 Optimal structure parameters of the traveling wave deflectors (unit: mm)

Parameter	L	W	G	L_p	D	D_p	U
Value	8	1	0.24	2.5	1	3	17.12

2 同步扫描模式下时间分辨率

在可见光激发下, 从光阴极中心位置处发射大量光电子, 其初始分布条件采用蒙特卡罗法抽样, 得到该

条纹管静态极限物理时间分辨率为 189 fs, 狭缝边缘 $y=3$ mm(相当于狭缝长度为 6 mm)处发射电子的空间分辨率大于 100 lp/mm^[8].

在技术时间分辨估算方面, 假设: 变像管偏转灵敏度 $P=46.6$ mm/kV, 动态空间分辨 15 lp/mm, 扫描电压斜率 10 kV/ns, 则扫描速度为

$$v = K \times P = 4.66 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (3)$$

进而可计算出系统的技术时间分辨为

$$\tau_{\text{tech}} = \frac{1}{\delta \cdot v} \approx 72 \text{ fs} \quad (4)$$

由于条纹变像管工作在同步扫描模式时, 要求每次扫描都能够准确地同步在荧光屏同一起始位置上, 即在完全相同的外界条件下, 多次触发条纹相机扫描开关时输出的电脉冲时间和幅值一致. 因此还需要考虑触发晃动对总时间分辨率的影响. 触发晃动时间 τ_{jitt} 与触发能量 E_L 的关系^[10-11]

$$\tau_{\text{jitt}} = t_{\text{ramp}} \cdot \frac{\Delta E_L}{E_L} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 50\Omega \cdot E_L (\mu\text{J})} \quad (5)$$

式中, t_{ramp} 是扫描电压的上升时间, E_L 是触发光开关的激光能量, $\Delta E_L/E_L$ 表示激光的能量晃动, α 则是光开关的灵敏度系数. 各参数的典型值为 $t_{\text{ramp}}=150$ ps, $\alpha=25\Omega \cdot \mu\text{J}$, $\Delta E_L/E_L=1.2\%$, 触发激光的能量范围为 20~160 μJ , 估算触发晃动控制在 50 fs 以下^[12].

根据高斯近似模型, 计算得到在同步扫描工作模式下, 光阴极中心处发射光电子得到的时间分辨率, 用 τ_{total} 表示, 即

$$\tau_{\text{total}} = \sqrt{\tau_{\text{phys}}^2 + \tau_{\text{tech}}^2 + \tau_{\text{jitt}}^2} = \sqrt{189^2 + 72^2 + 50^2} = 208 \text{ fs} \quad (6)$$

3 条纹变像管的动态特性仿真

3.1 动态时间分辨率

条纹相机的诊断对象是超短光脉冲, 因此对于脉冲宽度仅为飞秒量级的光脉冲, 条纹相机可以精确测量其渡越时间, 以及光脉冲之间的时间间隔. 进而利用瑞利判据可以计算条纹相机的动态时间分辨率^[13]. 在

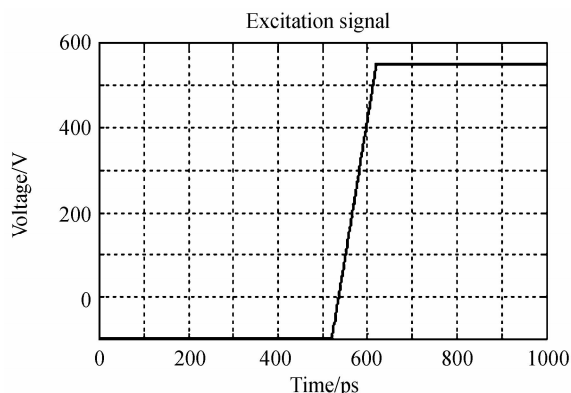


图 4 扫描电压信号

Fig. 4 Sweep voltage signals

单次扫描工作模式下,考虑条纹管的动态工作过程包含时变场作用,为了保证电子偏转后信号不失真,应尽量选取扫描电压的线性部分作为扫描工作区,如图4.

为了准确评价所设计的条纹变像管的动态时间分辨率,采用 Matlab 编程模拟不同时间间隔的超短光脉冲序列,如图5(a).条纹管动态扫描工作模式下,根据条纹管时空映射原理,不同时间间隔的光电子在偏转系统扫描电场的作用下,被偏转至不同位置,荧光屏上

的电子束斑空间分布以及映射在时间轴上的拟合曲线分别如图5(b)、(c).从图5可以得到,当脉冲时间间隔分别为300 fs和250 fs时,两个脉冲发生交叠,沿扫描方向的拟合曲线的鞍峰比低于0.707;将脉冲间隔进一步缩短至200 fs,两个脉冲的交叠更为严重,且扫描方向拟合曲线的鞍峰比值为0.6974,接近瑞利判据的上限要求.由此可知设计的条纹管的动态时间分辨率为200 fs.

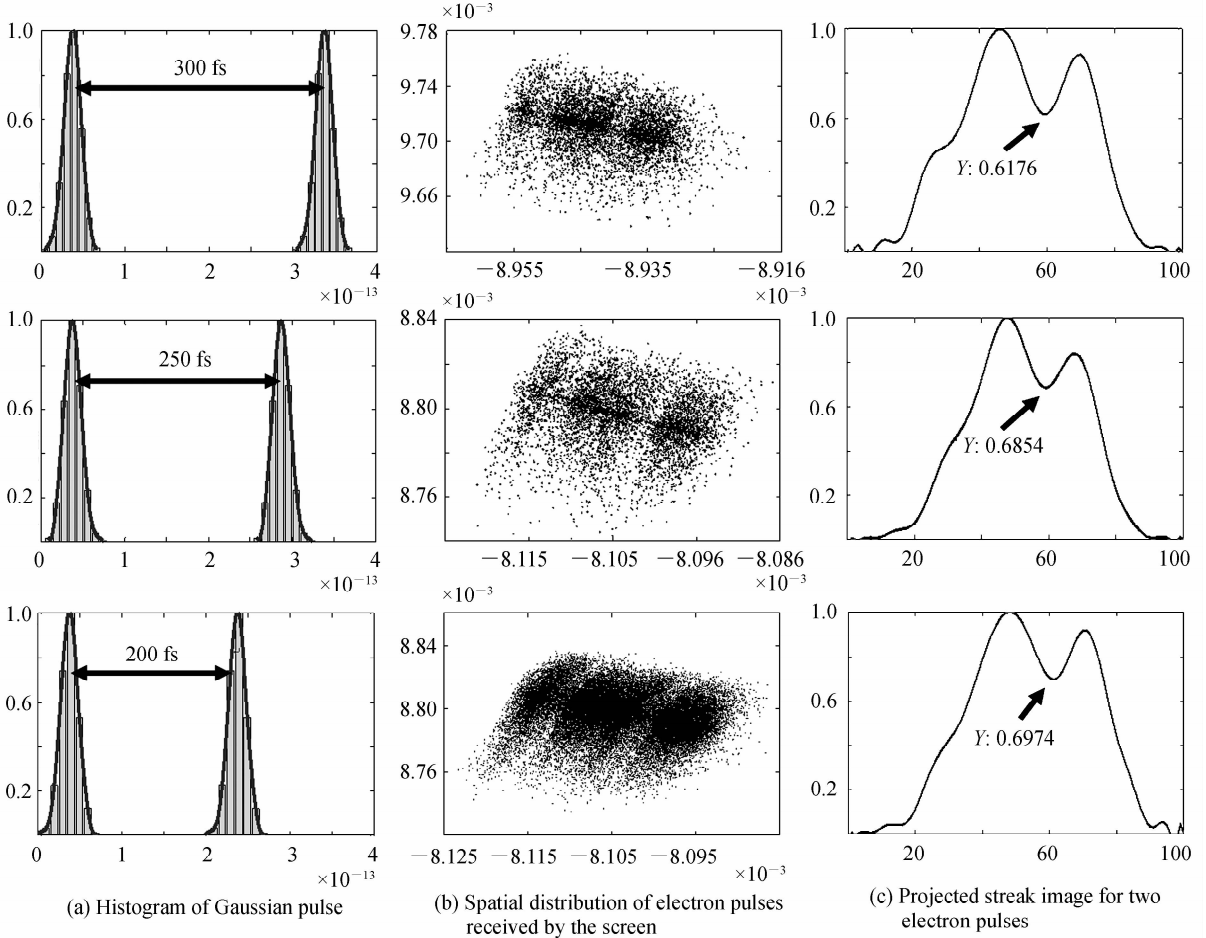


图5 时间间隔为300fs,250fs和200fs时的动态扫描结果

Fig.5 Dynamic temporal resolution with the interval of 300fs, 250fs and 200fs respectively

3.2 动态空间分辨率

动态空间分辨率是评价条纹变像管动态性能的重要指标.条纹变像管的动态空间分辨率由偏转至荧光屏有效区域边缘处的电子弥散斑空间分布决定^[14].因此,在光阴极上沿着狭缝方向每隔1mm抽样发射大量光电子,其初始能量、初始角度满足蒙特卡罗抽样法.根据实际工作条件,狭缝尺寸取为 $5\mu\text{m}\times 6\text{mm}$,选取合适的扫描电压工作点,使电子团偏转至荧光屏有效区域的边缘位置($y=14.3\text{mm}$),计算得到其扫描方向和狭缝方向的动态空间分辨率,如图6.阴极中心处($y=0\text{mm}$)狭缝方向和扫描方向的极限空间分辨率分别为41 lp/mm和22 lp/mm,明显优于阴极有效边缘($y=3\text{mm}$)的动态空间分辨率.

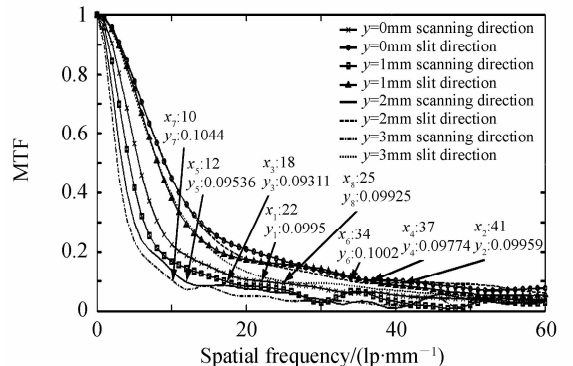


图6 动态空间调制传递函数曲线

Fig.6 Dynamic spatial modulation transfer function curves

3.3 狭缝成像特性分析

在条纹管的实际工作条件下,通常采用阳极狭缝进一步抑制走离电子,减小电子团的弥散斑,进而提高系统时间和空间分辨率,因此条纹变像管所成的像实际是狭缝像,需要对狭缝成像进行性能分析.

3.3.1 静态特性分析

连续从狭缝表面发射时间分布呈高斯分布的电子束团,电子在狭缝上的发射位置呈均匀分布,静态模式下荧光屏上的狭缝像及其线性拟合的结果如图7.经拟合计算得到,拟合直线的斜率为0.99,即磁透镜使得像相对于阴极狭缝旋转了 44.71° ;狭缝像长度为14.4 mm,狭缝像被放大2.4倍.因此,磁透镜使得狭缝像发生了旋转和放大.

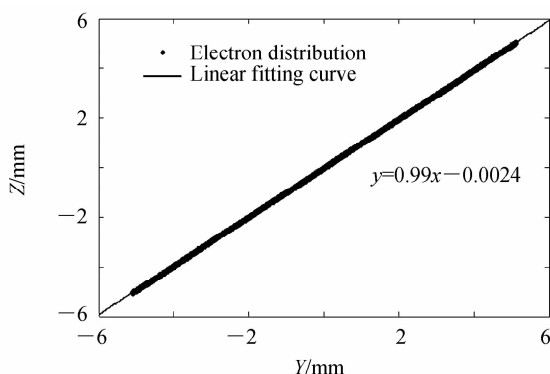


图7 静态模式下阴极狭缝在荧光屏上的像
Fig. 7 Image of the slit on the phosphor screen in the static mode

3.3.2 动态特性分析

为了比较不同偏转距离下的动态扫描结果,选取不同的工作点获得不同偏转位置的狭缝像,并利用PIC求解器追踪电子轨迹,当电子束团的时间间隔为

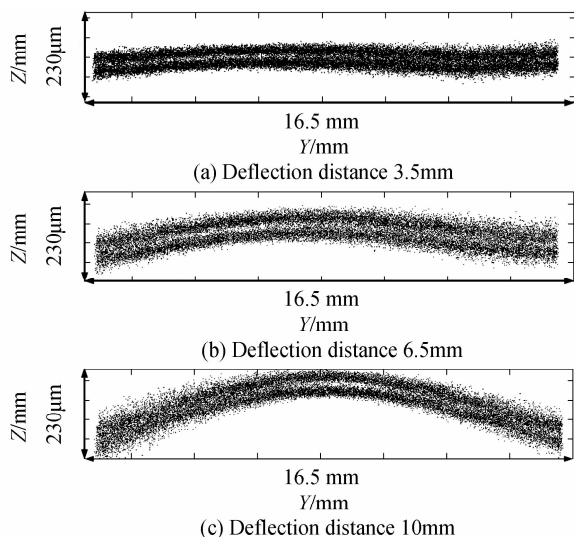


图8 $5\ \mu\text{m}$ 宽狭缝发射500 fs时间间隔的脉冲序列的动态模拟结果

Fig. 8 Dynamic simulated results of the slit with $5\ \mu\text{m}$ under different deflection voltages with the interval of 500 fs

500 fs时,仿真结果如图8.从图中可以看出:条纹管能够明显区分出两个脉冲;此外,荧光屏上的动态像不再是直条纹,即狭缝像存在弯曲,且随着偏转距离的增大,狭缝像的弯曲程度显著增大.这主要是由狭缝两端电子和中心位置发射电子在条纹管内飞行的时间差引起的时间畸变,以及条纹管的球差和慧差引起的空间畸变共同作用导致的结果.通过分析发现,引起时间畸变的因素有:1)狭缝两端和中心位置发射的光电子进入扫描板内的时刻不同(对应不同的扫描电场);2)光电子在条纹管中的光程差;3)条纹管本身存在一定的像差.

根据动态扫描仿真结果可得,狭缝为 $5\ \mu\text{m}\times 6\ \text{mm}$ 时,所设计的条纹变像管在同步扫描下的动态时间分辨率优于500 fs.

4 X射线条纹变像管的动态时间特性分析

条纹相机诊断的X射线能量主要集中在0.1~10 keV.根据B. L. Henke对CsI阴极在0.1~10 keV光子作用下产生的光电子初能量分布的研究^[15],从CsI光电阴极上发射出来的光电子,其初能量满足一定的统计分布,光电子初能量为0.5 eV时的概率最大,其最可几能量约为0.5 eV,且能量分布峰值半高宽为1.5 eV.对于抽样的能量宽度,一般取 $0\sim 2\Delta E$ 就可以包括90%以上的电子, ΔE 是光电子的峰值半高宽,因此,对CsI阴极可以认为电子初能量在 $0\sim 3\ \text{eV}$ 之间服从 $\beta(1,4)$ 分布.利用蒙特卡罗法对光电子的初能量、初始仰角、方位角分布进行抽样.其抽样结果为:光电子的初能量满足 $0\sim 3\ \text{eV}$ 上的 $\beta(1,4)$ 分布,且强度服从正态分布,初始仰角服从 $0\sim \pi/2$ 范围内的余弦分布,初始方位角服从 $0\sim 2\pi$ 范围内的均匀分布.

利用CST软件仿真条纹变像管的电子发射过程,并追踪发射的电子轨迹,如图9,通过Matlab编程计算X射线条纹变像管的物理时间弥散为

$$\tau_{\text{phys}} = 469\ \text{fs}$$

在同步扫描模式下,估算技术时间分辨率为

$$\tau_{\text{tech}} = \frac{1}{\delta \cdot v} \approx 72\ \text{fs}$$

考虑触发晃动,根据高斯近似模型,计算在同步扫描工作模式下光阴极中心处发射光电子得到的时间分辨率为

$$\tau_{\text{total}} = \sqrt{\tau_{\text{phys}}^2 + \tau_{\text{tech}}^2 + \tau_{\text{jitter}}^2} = \sqrt{469^2 + 72^2 + 50^2} = 477\ \text{fs}$$

实验中可以根据激光能量的强弱,通过在阳极孔后再设置一个宽度为 $5\sim 50\ \mu\text{m}$ 的电子光阑,进一步抑制大角度和较大能量弥散的光电子,减小渡越时间弥散,实验上测量的时间分辨率可达到300 fs.

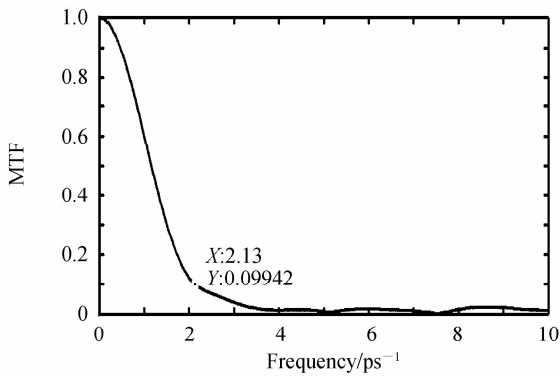


图9 X射线条纹变像管时间调制传递函数曲线

Fig. 9 Temporal modulation transfer function curves of X ray streak image tube

5 结论

本文利用 CST 软件设计了一套高时间空间分辨率的 X 射线条纹变像管,并数值分析了该条纹变像管的动态特性. 研究指出,用于飞秒时间分辨的条纹变像管对行波偏转系统结构具有非常严格的要求,通过软件仿真表明,在恰当的斜坡电压激励下,行波偏转器内部传播的电磁波速度与两板间通过的电子束群速度相匹配,保证了电磁波能量最大限度地传递给电子,实现了电子更有效的偏转作用,改善了飞秒条纹相机的动态特性. 计算得到:可见光激励下单次扫描动态时间分辨率为 200 fs,同步扫描动态时间分辨率为 208 fs,扫描和狭缝方向的动态空间分辨率分别为 22 lp/mm 和 41 lp/mm;狭缝发射光电子的动态时间分辨率优于 500 fs;同步扫描 X 射线条纹变像管的动态时间分辨率达到 477 fs. 后续将进一步增大磁透镜的内径尺寸,优化磁透镜结构,抑制动态像畸变和展宽,改善条纹管动态时空特性.

参考文献

- [1] BARTELT A F, COMIN A, FENG J, *et al.* Element-specific spin and orbital momentum dynamics of Fe/Gd multilayers[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**: 162503.
- [2] TIAN Jin-shou, ZHAO Bao-sheng, WEN Wen-long, *et al.* A multiple-slit streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36** (11): 1979-1982.
田进寿,赵宝升,温文龙,等. 一种多狭缝条纹变像管[J]. *光子学报*, 2007, **36**(11): 1979-1982.
- [3] GEORGE R L, ABBIE L W, PETER M C, *et al.* A robust in-situ warp-correction algorithm for VISAR streak camera data at the national ignition facility [C]. SPIE, 2015, **9345**:

- 93450Q.
- [4] TAKAHASHI A, NISHIZAWA M, INAGAKI Y, *et al.* New femtosecond streak camera with temporal resolution of 180fs[C]. SPIE, 1994, **2116**: 275-284.
- [5] FENG J, ENGELHORN K, CHO B I, *et al.* A grazing incidence x-ray streak camera for ultrafast, single-shot measurements [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**: 134102.
- [6] SHAKYA M M, CHANG Z H. Achieving 280fs resolution with a streak camera by reducing the deflection dispersion[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**:041103.
- [7] 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**:134102.
- [8] LIU Rong, TIAN Jin-Shou, LI Hao, *et al.* Design and evaluation of a pre-traveling wave deflector magnetic solenoid lens focused streak image tube[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(5): 058501.
刘蓉,田进寿,李昊,等. 行波偏转器前置短磁聚焦条纹变像管理论设计与实验研究[J]. *物理学报*, 2014, **63**(5): 058501.
- [9] LIU Yue-ping. Study on the traveling wave deflectors system [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, 1985:45-47.
刘月平. 行波偏转系统的理论与应用研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 1985:45-47.
- [10] LIU J, WANG J, SHAN B, *et al.* X-ray streak camera with 30-fs timing jitter[C]. SPIE, 2004, **5194**: 123-127.
- [11] WANG Qiang-qiang. Theoretical and experimental research on femtosecond temporal resolution streak camera [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
王强强. 飞秒时间分辨条纹相机的理论和实验研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [12] LIU J Y, WANG J, SHAN B, *et al.* An accumulative x-ray streak camera with sub-600-fs temporal resolution and 50-fs timing jitter[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82** (20): 3553-3555.
- [13] LIU Rong. Theoretical and experimental research on X-ray femtosecond streak image camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
刘蓉. X 射线飞秒条纹相机关键技术的研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2014.
- [14] TIAN Jin-shou, ZHAO Bao-sheng, WU Jian-jun, *et al.* Theoretical calculation of the modulation transfer function in a femto-second electron diffraction system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(7): 3368-3374.
田进寿,赵宝升,吴建军,等. 飞秒电子衍射系统中调制传递函数的理论计算[J]. *物理学报*, 2006, **55**(7): 3368-3374.
- [15] HENKE B L, KNAUER J P, PREMARTNE K. The characterization of x ray photocathodes in the 0.1~10keV photon energy region [J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, **52**(3): 1509-1520.