

一种新型加速结构飞秒条纹相机的设计

顾 礼 宗方轲 李 翔 张敬金 张 驰 杨勤劳

深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 为提高飞秒条纹相机的性能,设计了一种新型加速结构的条纹相机,它具有加速栅网和加速狭缝通道,平行平板电极结构。考虑实际惯性约束核聚变(ICF)实验中X射线入射CsI光阴极,光电子能量弥散较大和空间电荷效应作用下,用蒙特卡罗方法抽样2000个光电子能量角度分布值,用四阶龙格-库塔法计算了电子在条纹相机中的飞行轨迹。在成像面上统计电子时空分布得到该条纹相机的时间和空间分辨特性,结果显示使用该加速结构的飞秒条纹相机空间分辨率达到211 lp/mm,时间分辨率达到508.4fs,对比传统平行平板相机,分别提高了90%和29%左右,性能提高明显。该新型条纹相机加速结构简单,具有实用性。

关键词 超快光学; 飞秒现象; 条纹相机; Monte Carlo模拟; 加速结构; 空间电荷效应; 调制传递函数

中图分类号 O434 TN143 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1134001

Designment of a Femtosecond Streak Camera with a Novel Accelerating Structure

Gu Li Zong Fangke Li Xiang Zhang Jingjin Zhang Chi Yang Qinlao

Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract To improve the performance of the femtosecond streak camera, a novel accelerating structure is designed and applied to streak camera with accelerating mesh and slit channel, parallel plate electrodes. Considering X-ray incident on CsI photocathode in actual inertial confinement fusion(ICF) experiment, large photoelectron energy dispersion and the space charge effect, 2000 photoelectrons' energy and angular are sampled with Monte Carlo simulation, their trajectories are calculated with the fourth-order Runge Kutta method. Time and space resolution of streak camera with this novel accelerating structure are obtained by analyzing electron time and space distribution on the imaging surface, and the result shows that time resolution is up to 508.4fs and space resolution is up to 211 lp/mm. Compared to the traditional parallel plate electrode streak camera, the time and space resolution are significantly improved by 90% and 29% respectively. The novel accelerating structure of the streak camera is simple and practical.

Key words ultrafast optics; femtosecond phenomena; streak camera; Monte Carlo simulation; accelerating structure; space charge effect; modulation transfer function

OCIS Codes 320.2250; 320.7160; 110.7440; 340.7440

1 引言

条纹相机是激光核聚变(ICF)诊断中的核心仪器,用于记录高温高密度等离子体的时空变化信息,也在对核物理学、光化学和光生物学等超快现象的研究中有着广泛的应用^[1-4]。快点火技术的推动,要求条纹相机具有实现飞秒量级的时间分辨率,近年来,国内国际上对可实用的X射线飞秒条纹相机进行了持续的研究^[5-6]。条纹相机的3个主要性能为时间分辨率、空间分辨率和动态范围,由于光电子初始能量弥散和空间电荷效应

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-07-12

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ230659)

作者简介: 顾 礼(1983—),男,博士研究生,主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: flutelad@126.com

导师简介: 杨勤劳(1953—),男,研究员,博士生导师,主要从事超快诊断方面的研究。E-mail: qlyang@szu.edu.cn(通信联系人)

的限制,这3个性能通常很难同时提高。牛憨笨院士等^[7]证明了空间电荷效应的累积是限制条纹相机时间分辨率的根本因素。近年来,在提高条纹相机时空分辨率方面取得了一些进展。国内中国科学院西安光学精密机械研究所^[8]采用行波偏转器前置短磁聚焦技术,设计的条纹相机理论上时间分辨率可以达到 220 fs,该相机克服了静电聚焦方式存在的减速场,因为电子减速使空间电荷效应作用时间变长,降低了条纹相机的时空分辨率。法国 Photonis 公司^[9]研制的平板电极结构的条纹相机,利用平板电极代替传统轴对称条纹相机中的电子光学透镜,控制电子在一个方向聚焦在另一个方向相对发散,从而可以抑制空间电荷效应,改善成像质量,提高了时空分辨率,其商用产品时间分辨率为几百飞秒。对此平板电极结构条纹相机,国内也进行了相应的模拟和设计^[6,10]。飞秒时间聚焦和准直系统通过电子学的手段,使用斜坡电压发生电路给电子团中快慢电子加不同的电压,从而使电子团压缩时间弥散变小,理论上该技术能使电子时间弥散减少到 100 fs 以下,目前该技术正努力应用在飞秒条纹相机和飞秒衍射系统中^[11]。

本文研究和设计了一种新型加速结构的飞秒条纹相机,通过使用栅网加一定长度的狭缝通道,配合电压分布,拦截通道内大角度的电子,减少了使像质变差、时间弥散变大的边缘电子,同时减弱了空间电荷效应从而提高了条纹相机时空分辨率。在平板电极相机模拟中验证了这种结构的作用,结果表明这种结构明显提高了相机的时空性能,边缘空间分辨率达到 21 lp/mm,比传统结构提高了 90%,时间分辨率达到 508.4 fs,相对提高了 29%。

2 理论模型

图 1 为平板 X 射线条纹相机电子光学结构,其中,A 为光阴极,B 为加速电极,C 为聚焦电极,D 为阳极和行波线偏转板(TWD),E 为荧光板。表 1 为电极和电压参数,其中第一到五电极间距 10 mm。如图 2 所示,采用栅网加一定宽度为 $2W$ 和轴向长度为 L 的狭缝通道的结构,加速初始发射的光电子,在电子经过的狭缝通道内拦截大角度大于 θ 的电子。这部分电子对成像质量起到恶化作用,主要是一方面使成像斑变大从而使空间分辨率变差,另一方面由于飞行路径大使电子团时间弥散加大导致时间分辨率变差。同时,电子总数的减少也使空间电荷效应减弱,提高了条纹相机的时空性能。栅网的作用是保证在阴栅之间匀加速场不会由于狭缝的存在被破坏,使电子能量可以被迅速并均匀的增大。

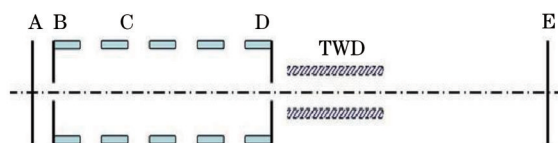


图 1 电子光学系统结构。

Fig.1 Geometry of electro-optical system.

表 1 X 射线条纹相机的参数

Table 1 Specifications of X-ray streak camera

Electrode	Photocathode	First	Second	Third	Fourth	Fifth	TWD	Phosphor screen
Voltage/kV	0	12	8	16	7.8	12	-	12
Position/mm	0	1	19	37	55	73	84	264

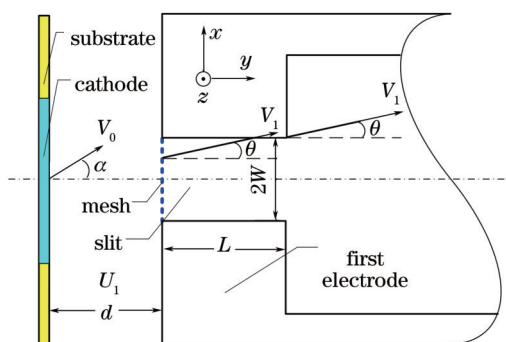


图 2 光阴极和加速电极结构

Fig.2 Geometry of photocathode and accelerating structure

2.1 静电场求解

直角坐标系下的电位分布拉普拉斯方程,如(1)式所示。根据相机电极结构和电压分布,得到边界条件,利用有限差分法求解方程,并用高斯-赛德尔迭代加快计算速度,对得到的电位分布的矩阵求梯度就可以得到电场分布矩阵:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

2.2 光电子发射

光电阴极发射出来光电子的能量、初始位置、出射方向角和方位角都是随机的,但是其服从一定的统计分布规律,可以利用蒙特卡罗方法进行抽样。本文光电子发射模拟基于以下几个条件;1) 初始能量概率密度分布服从 Henke 的 CsI 能量模型,如(2)式所示,式中 ε 是光电子能量,其取值范围为 $0 \sim 6\text{eV}^{[12]}$,采用乘抽样法;2) 光电子发射方向角 α 服从 $[0, \pi/2]$ 范围内的余弦分布,采用积分抽样法,表示如(3)式。3) 方位角 β 服从 $0 \sim 2\pi$ 范围内的均匀分布;4) 初始位置服从均匀分布。这些抽样结果需要经过可靠性检验才能使用。

$$f(\varepsilon) = \frac{13.5\varepsilon}{(\varepsilon + 1.5)^4} \quad (2)$$

$$p(\alpha) \propto \cos \alpha, \quad dN(\alpha) = \sin 2\alpha d\alpha \quad (3)$$

式中 $p(\alpha)$ 为概率密度, $N(\alpha)$ 为电子个数。

2.3 电子轨迹

电子轨迹求解采用四阶精度的龙格-库塔法,此法需要知道电子在每个位置的具体三维电场分量,通常电子落点并不是在网格点上,所以需要利用拉格朗日插值周围网格点的值(文中取 8 个点)求出电子所在空间位置的电场值。

2.4 空间电荷效应

空间电荷效应表现为 N 个电子之间的库伦排斥力。在每个时间步长下,计算一个电子所受到库仑力要计算 $N-1$ 个电子对其作用力之和^[13]。当所计算的电子数目增加或时间步长减少时,计算量呈指数增长。虽然有天体演化等简化算法,但是计算量仍然很大。

3 时空分辨率

3.1 电场与电子轨迹

若只使用狭缝代替栅网后置于阴极对初始发射的光电子进行加速,阴极和狭缝之间电场不是均匀场而是产生微小的弯曲,如图 3 所示,以 $L=0.3 \text{ mm}$, $W=15 \mu\text{m}$ 为例。模拟 20 个光电子从阴极宽度为 $20 \mu\text{m}$ 范围内发射,记录其在加速区的飞行轨迹。电子团被弯曲电场发散,后面电场对其聚焦更困难,不利于提高时空分辨率,同时对发散电子的拦截率更高从而使系统动态范围降低,如图 4(a)所示。栅网和狭缝通道组合的方式可以克服这一问题,如图 4(b)所示,栅网封闭了通道入口使阴栅之间电场均匀,电子被均匀加速且轨迹不发散。具有该种加速结构相机电子光学系统的轴向电位分布如图 5(a)所示,电子在相机内的轨迹如图 5(b)所示。

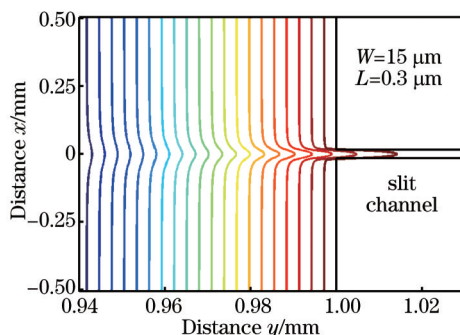


图 3 无栅网加速区的等势线弯曲

Fig.3 Electric bending in accelerating region without mesh

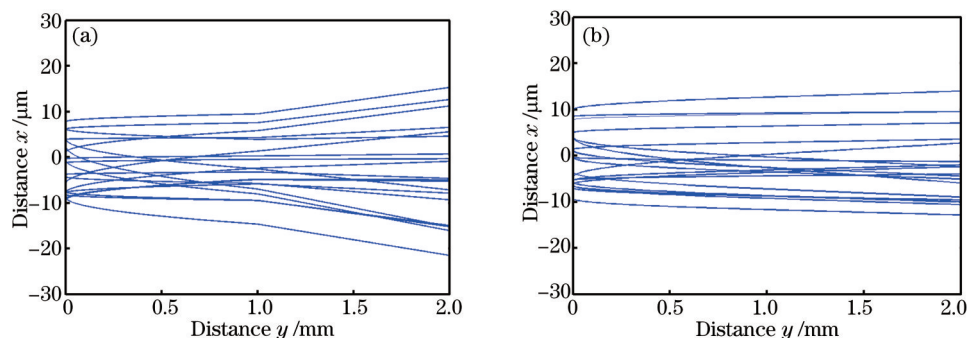


图4 加速区的电子轨迹。(a)无栅网;(b)有栅网

Fig.4 Electron trajectory in accelerating region. (a) Without mesh; (b) with mesh.

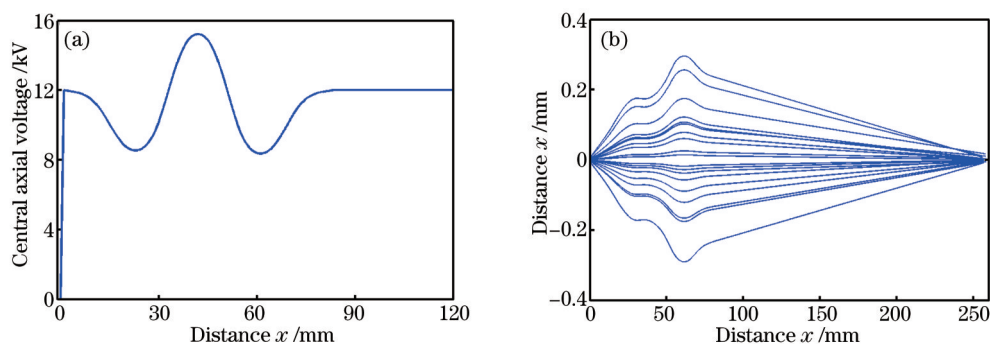


图5 相机内中心轴上电压分布和电子轨迹。(a)中心轴上电压分布;(b)电子轨迹

Fig.5 Central axial potential distribution and electron trajectory in the camera.

(a) Central axial potential distribution; (b) electron trajectory

3.2 狭缝通道拦截电子

狭缝通道内拦截了大方向角光电子,通道的长度和宽度直接影响了拦截数目。首先在XY二维平面模型中做定性研究,假设光电子从阴极中心点发射,电子在阴栅之间做匀加速运动,在狭缝通道内做匀速运动,不考虑空间电荷效应和相对论效应。在图2中,光电子从阴极发射初始速度为 v_0 ,初始方向角为 α ,到达栅网即狭缝通道入口时速度为 v_1 ,方向角为 θ ,阴栅电压为 U_1 ,距离 $d=1\text{ mm}$,狭缝通道长度 L ,宽度 $2W$ 。由(4)~(10)式可以得到光电子初始方向角和狭缝通道长宽的关系如图6(a);通道狭缝入口电子方向角 θ 和通道长宽的关系,如图6(b)。在(4)~(10)式中, ε_i 是光电子初始能量; a 是电子加速度; t 是电子阴栅飞行时间; η 是电子荷质比, n 是抽样电子数为 10^5 。

$$v_0 = \sqrt{2\eta \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i}, \quad (4)$$

$$v_1 = \sqrt{2\eta \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i + U_1 \right)}, \quad (5)$$

$$a = \eta v_1 / d, \quad (6)$$

$$v_1 \sin \theta = v_0 \sin \alpha, \quad (7)$$

$$v_1 \cos \theta = v_0 \cos \alpha + at, \quad (8)$$

$$d = v_0 \cos \alpha + 0.5at^2, \quad (9)$$

$$\frac{v_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha + at} = \frac{W - v_0 t \sin \alpha}{L}, \quad (10)$$

由图6中可以看出,当 L 一定时, W 从 $10\ \mu\text{m}$ 增加到 $25\ \mu\text{m}$,可以通过狭缝通道的光电子的角度 α 和 θ 也随之增大;当 W 一定时, α 和 θ 增大时,光电子能通过的通道距离 L 在减小。 L 和 W 一定时候,可以得到通过狭缝通道的光电子的 θ 角,以及光电子的 α 角,可以由(3)式得到光电子的通过率(拦截率)。这种定性研究的误差在于没有考虑电子在XZ平面的发散,且在XZ平面狭缝通道拦截几率较小,以及没有考虑空间电荷效应使电子相互排斥而发散。

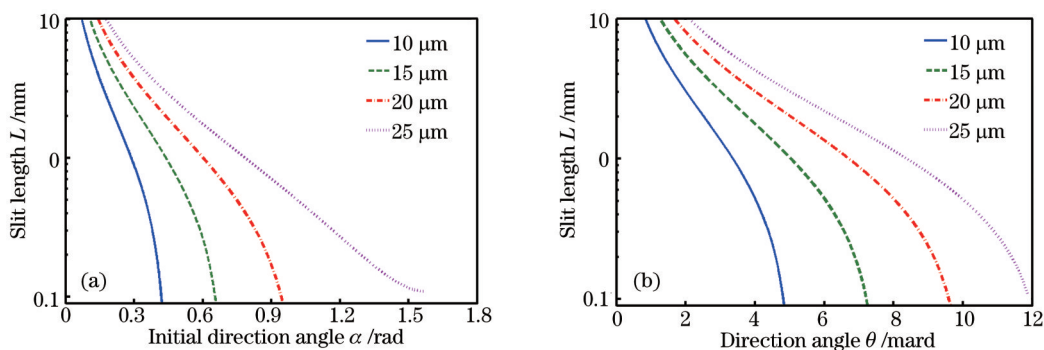


图6 电子方向角 α , θ 和 L 关系 ($W=10, 15, 20, 25 \mu\text{m}$)。 (a) α 和 L 关系; (b) θ 和 L 关系

Fig.6 Electronic direction angle α, θ versus L at $W=10, 15, 20, 25 \mu\text{m}$. (a) Relationship between α and L ; (b) relationship between θ and L

模拟 2000 个光电子从阴极尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}$ 范围内发射, 电流密度为 3.2A/cm^2 。通道狭缝的长 L 以及宽 $2W$ 和电子拦截率的关系如图 7 所示。一定长度下, W 从 $10 \mu\text{m}$ 增加到 $40 \mu\text{m}$, 电子拦截率从 58% 降低到不足 4%。一定宽度下, 长度 L 从 0.1mm 增加 0.7mm , 电子拦截率相差 10% 左右。此关系表明较长较窄的狭缝通道可以获得较大的拦截率。较大的拦截率使得处于中央空间分布的电子占总数更多, 空间电荷效应也较小, 有利于提高相机的时空分辨率, 但是过少的电子不利于提高成像的动态范围。综合考虑以上因素, 选取 $L=0.3 \text{mm}$, $W=20 \mu\text{m}$, 对应的通道宽度为 $40 \mu\text{m}$, 此时狭缝通道内对大方向角的电子拦截率为 24.3%。图 8 为此时狭缝通道入口和出口处电子方向角分布, 可以看出通道内大方向角的电子被拦截吸收后, 电子方向角分布集中在 0rad 附近, 说明电子在出口处比在入口处更加集中。

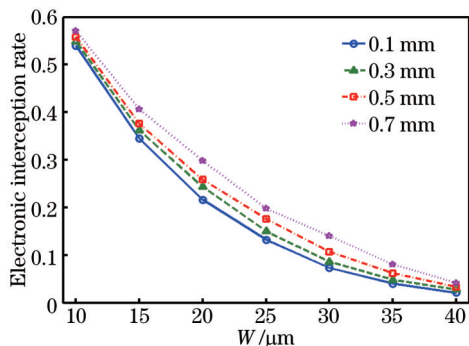


图7 电子拦截率和通道长 L 以及宽 W 关系

Fig.7 Relationship among electronic interception rate, L and W

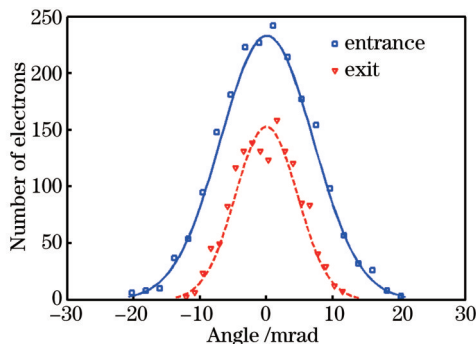


图8 通道入口和出口处的方向角分布 ($L=0.3 \text{mm}$, $W=20 \mu\text{m}$)

Fig.8 Direction angle distribution at entrance and exit of channel ($L=0.3 \text{mm}$, $W=20 \mu\text{m}$)

3.3 时空特性

空间调制传递函数(SMTF)可以全面评价条纹相机的空间响应特性, 以 SMTF 曲线下降到 0.1 时为相机空间分辨率极限。模拟 2000 个光电子从阴极中心点发射, 经偏转板在不同电压作用下发生偏转, 到达荧光屏成像面处偏转距离和空间分辨率如表 2 所示, 各位置处的 SMTF 如图 9 中所示。从表 2 中可以看出, 使用新型加速结构条纹相机的成像面上空间分辨率提高明显。在近轴附近, 空间分辨率是不使用该结构的两倍, 在离轴距离 10.12mm 处, 分辨率仍然可以达到 21lp/mm 。

表2 空间分辨率与偏转距离的关系

Table 2 Relationships between space resolution and defect distance

Defect distance /mm	1.44	4.35	7.21	10.12
Space resolution ^[6] /(lp/mm)	43	27	16	11
Space resolution (proposed) /(lp/mm)	84	51	43	21

2000 个光电子从阴极上尺寸为 $20 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}$ 的范围内发射, 发射电流密度为 3.2A/cm^2 , 在不同的偏转电压下达到荧光屏成像面各位置时的产生展宽效应。如表 3 中所示, 在近轴位置附近, 狭缝像的宽度基本等于相机放大倍率与阴极发射区域宽度的乘积; 在荧光屏远轴位置处, 电子在偏转板边缘出口处很近, 受到偏转板边缘场作用很大, 狭缝像展宽。图 10 是偏转电压与偏转距离的关系, 条纹相机表现出良好的偏转线性。

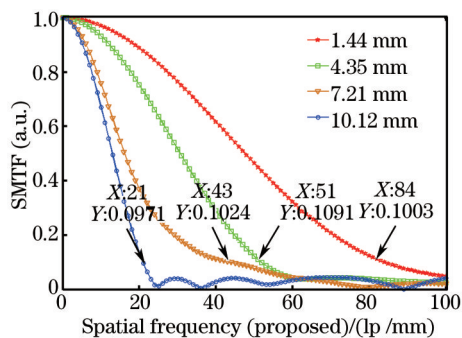


图 9 相机不同偏转距离处的空间调制传递函数

Fig.9 SMTF of proposed camera of different defect distance

表 3 狭缝像宽与偏转电压、离轴距离的关系

Table 3 Relationships between slit image and defect voltage and distance

Defect voltage /V	20	40	60	80	100	120	140
Defect distance /mm	1.434	2.884	4.339	5.765	7.182	8.671	10.103
Slit image width / μ m	80	81	80	82	85	85	86

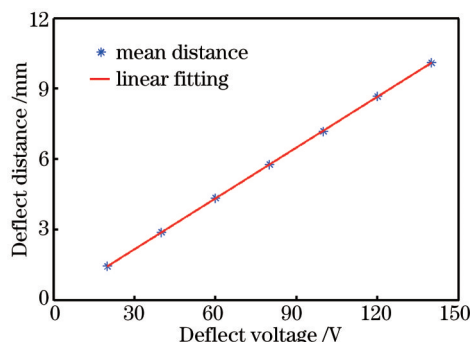


图 10 相机偏转距离和偏转电压的关系

Fig.10 Deflect distance versus deflect voltage of camera

时间调制传递函数(TMTF)可以全面评价条纹相机的时间响应特性。牛憨笨院士等^[14]率先从理论上分析和评价了TMTF的作用,以TMTF曲线下降到0.1时为时间分辨率极限,对条纹相机模拟和设计的实践表明该方法客观有效。模拟2000个光电子从阴极中心点发射,统计每个电子到达偏转板入口处的飞行时间,得到电子团的时间弥散,也就是条纹相机的物理时间分辨率 τ_p 。如图11所示,使用本加速结构相机的物理时间分辨率 $\tau_p=370.4$ fs,比未使用该结构相机的物理时间分辨率 $\tau'_p=515.5$ fs提高了28%。

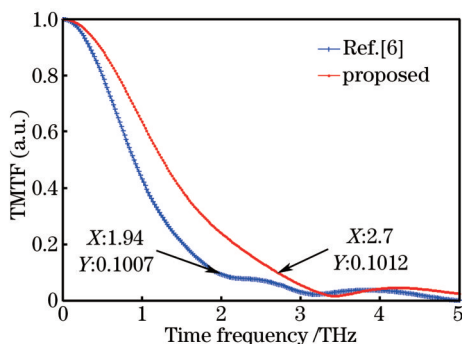


图 11 相机的时间调制传递函数

Fig.11 TMTF of Ref. [6] and proposed camera

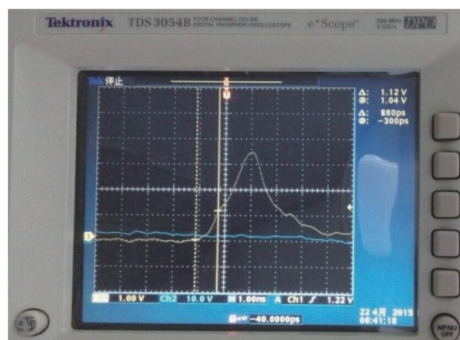


图 12 扫描电压波形

Fig.12 Scan voltage waveform

该条纹相机偏转电路中,使用雪崩管产生快速扫描斜坡电压,经过衰减器强度衰减1000倍,测量出电压波形如图12所示,使相机同步工作在波形线性程度较好的部分,斜坡电压斜率 $K=3.33$ kV/ns。相机偏转板的偏转灵敏度 $P=74.25$ mm/kV,同时采用行波偏转系统,可以改善频率响应。因此扫描速度 $v=K \cdot P=2.47 \times 10^8$ m/s,则在

荧光屏上狭缝像宽度 $\rho = 86 \mu\text{m}$ 的条纹所对应的技术时间分辨率 $\tau_1 = \rho/v = 348.2 \text{ fs}$, 则该条纹相机的总的的时间分辨率 $\tau = \sqrt{\tau_p^2 + \tau_1^2} = 508.4 \text{ fs}$. 未使用该加速结构的狭缝像宽度为 $\rho' = 123 \mu\text{m}$, 对应技术时间分辨率 $\tau_1' = 498.0 \text{ fs}$, 总的的时间分辨率 $\tau' = 716.8 \text{ fs}$. 相比较两个结果, 使用该新型加速结构的条纹相机时间分辨率可以提高 29%, 性能提高明显. 这种方法得到的估计值比较保守, 因为阴极条纹宽度 $20 \mu\text{m}$ 可以设计的更窄, 比如滨松光子飞秒条纹相机采用的 $5 \mu\text{m}$ 宽的条纹, 这对应的荧光屏上的狭缝像更窄, 这样得到的时间分辨率更高^[15].

4 结 论

本文设计了一种采用新型加速结构的条纹相机, 模拟和计算得到它的时空分辨率. 在 ICF 实验中 X 射线入射 CsI 光阴极, 光电子初始能量弥散较大和空间电荷效应作用较大等不利因素影响下, 得到该相机边缘处空间分辨率能达到 21 lp/mm , 时间分辨率达到 508.4 fs . 相比于没采用这种加速结构的平行平板相机, 这两项重要指标可以分别提高 90% 和 29% 左右. 这种新型加速结构, 结构简单, 设计和装配工艺并不复杂, 适合使用在平行平板结构的条纹相机. 在提高条纹相机性能的研究和设计中, 这种新型加速结构是简单易行的.

参 考 文 献

- 1 Hu Xin, Liu Shenye, Ding Yongkun, *et al.*. Design of SG-III X-ray streak camera[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2871-2875.
胡 昕, 刘慎业, 丁永坤, 等. 神光 III 主机 X 射线条纹相机设计[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2871-2875.
- 2 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Yang Dong, *et al.*. Characteristics study of the backscattering light on Shenguang-III prototype[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0314004.
彭晓世, 王 峰, 杨 冬, 等. 神光 III 原型背向散射光特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0314004.
- 3 Zhao Wen, Han Shaokun. Range resolution of a streak tube imaging lidar system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0714004.
赵 文, 韩绍坤. 条纹管成像激光雷达距离分辨率[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0714004.
- 4 Liu Shouxian, Lei Jiangbo, Chen Guanghua, *et al.*. Simultaneous line imaging and plane framing imaging velocity interferometer for shock physics[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108007.
刘寿先, 雷江波, 陈光华, 等. 同时线成像和分幅面成像任意反射面速度干涉仪测速技术[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108007.
- 5 Wei Huiyue, Xu Tao, Wang Feng, *et al.*. Designment of a novel optical streak camera with ultrahigh temporal resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0823003.
魏惠月, 徐 涛, 王 峰, 等. 一种新型高时间分辨的光扫描装置设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0823003.
- 6 Bai Xin, Niu Hanben, Yang Qinlao, *et al.*. Large dynamic range femtosecond soft x-ray streak image tube[J]. High power Laser and Particle Beams, 2011, 23(10): 2683-2686.
柏 鑫, 牛慈笨, 杨勤劳, 等. 大动态范围软 X 射线飞秒变像管[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(10): 2683-2686.
- 7 Niu H, Sibbett W. Theoretical analysis of space charge effects in photochron streak cameras [J]. Rev Sci Instrum, 1981, 52(12): 1830-1836.
- 8 Liu Rong, Tian Jinshou, 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 D Schirmann, A Mens, R Sauneuf, *et al.*. Performance of the ultra fast streak camera C850X[C]. SPIE, 1992, 1757: 8-18.
- 10 Chen Tao, Hu Xin, Liu Shenye. Numerical simulation of X-ray image converter tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11): 2593-2595.
陈 韬, 胡 昕, 刘慎业. 双板电极结构 X 射线变像管数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11): 2593-2595.
- 11 Liu Jinyuan, Niu Lihong, Li Ji, *et al.*. Theoretical analysis of a time focus and time amplifier cavity in streak tube[J]. SPIE, 2007, 6279: 62792I.
- 12 Henke B L, Smith J A, Attwood D T. 0.1-10 keV X-ray-induced electron emissions from solids models and secondary electron measurements[J]. J Appl Phys, 48(58), 1977: 1852-1866.
- 13 Gu Li, Zong Fangke, Li Xiang, *et al.*. Influence of photoelectron energy and angular distribution and space charge effect on streak cameras [J]. High power Laser and Particle Beams, 2015, 27(06): 062011.
顾 礼, 宗方轲, 李 翔, 等. 光电子能量角度分布和空间电荷效应对变像管条纹相机的影响[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(06): 062011.
- 14 H Niu, W Sibbett, M R Baggs. Theoretical evaluation of the temporal and spatial resolution of photochron streak image tube[J]. Rev Sci Instrum. 1982, 53(5): 563-569.
- 15 Katsuyuki K, Yoshinori I, Yoshitoshi I, *et al.*. Femtosecond synchroscan streak tube[J]. SPIE, 2001, 4183: 187-192.

栏目编辑: 宋梅梅