

# 电子束时间聚焦和时间准直系统研制

赵鑫<sup>1,3,4</sup> 蔡厚智<sup>1,2\*</sup> 刘进元<sup>1</sup> 谢维信<sup>2</sup>

<sup>1</sup>深圳大学光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060

<sup>2</sup>深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060

<sup>3</sup>西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049

<sup>4</sup>西北电网有限公司, 陕西 西安 710048

**摘要** 研制了电子束时间聚焦和时间准直系统, 由时间聚焦器、时间准直器、条纹变像管、脉冲发生器和 CCD 等组成。测量了系统对电子束的时间压缩比, 当聚焦脉冲斜率为 800 mV/ps 时, 测得系统的时间压缩比为 3.4:1。研究了时间压缩比与聚焦脉冲斜率的关系, 实验结果表明时间压缩比随着聚焦脉冲斜率的增大而提高。

**关键词** X射线光学; 条纹相机; 时间聚焦; 时间准直; 时间分辨率

中图分类号 TN143;O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.100401

## Design of a Time Focus and Time Collimation System for the Electron Bunch

Zhao Xin<sup>1,3,4</sup> Cai Houzhi<sup>1,2</sup> Liu Jinyuan<sup>1</sup> Xie Weixin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

<sup>2</sup>College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

<sup>4</sup>Northwest China Grid Co. Ltd, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** A time focus and time collimation system is presented in this paper. It consists of time focus system, time collimation system, streak tube, pulse generator and CCD. Time compression ratio of the system to electron beam is measured. While gradient of the focused pulse is 800 mV/ps, measured time compression ratio is about 3.4:1. Relationship between time compression ratio and gradient of the focused pulse is obtained. The measured results show that time compression ratio increases with the increase of the gradient of focused pulse.

**Key words** X-ray optics; streak camera; time focus; time collimation; temporal resolution

**OCIS codes** 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120

## 1 引言

在激光与物质相互作用、惯性约束聚变、Z-pinch、等离子体物理等超快研究及其应用领域, 需要研究持续时间为纳秒及亚纳秒量级的超快物理过程及物理参数, 条纹相机是关键诊断工具之一, 它可完成超快现象的高时间、空间分辨与捕获<sup>[1-6]</sup>。条纹相机的时间分辨率已提高至 200 fs 左右<sup>[7-9]</sup>, 由于从光电阴极发射的光电子束团具有较大的初能量分布, 导致电子束团在加速或传输过程中产生时间弥散, 使电子束团时间宽度展宽, 因此要使条纹相机的时间分辨率突破 100 fs, 就必须对时间弥散进行补偿。目前主要有两种方法对时间弥散进行补偿或压缩, 一是采用电子单色仪对电子初能量分布进行限制和补偿<sup>[10]</sup>, 从而减小电子渡越时

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改日期: 2015-02-26; 网络出版日期: 2015-09-02

基金项目: 国家自然科学基金 (11305107)、中国博士后科学基金 (2014M552228)、深圳市科技计划项目 (JCYJ20140418182819143)

作者简介: 赵鑫 (1984—), 男, 博士, 主要从事电子技术等方面的研究。E-mail: zhaoxin12345@163.com

\*通信联系人。E-mail: caihzlvzf@163.com

间弥散。这种方法要求电子单色仪具有很高的能谱分辨率,这种方法的实质是将获得高时间分辨的难度转嫁到获得高的能谱分辨的难度上,这样就给实验工作带来了很大的困难。因此,采用这种方法目前在实验上还没有取得进展,仅限于理论分析和数值模拟。二是采用随时间变化的电场对电子束的一次弥散进行补偿压缩(或称电子束的时间聚焦)<sup>[11-14]</sup>,该方法在同步辐射加速器中对电子束流时间宽度压缩的实验中得到了一些应用<sup>[15]</sup>。基于这一技术,本文研制了一种腔型结构的电子束时间聚焦和时间准直系统,并对系统的时间压缩比进行了测量。

## 2 系统结构

电子束时间聚焦和时间准直系统的结构示意图和实物图如图1所示,光阴极接负高压,具有狭缝结构的阳极板接地,当光辐射信号入射到光阴极上激发出光电子,光电子被阴极和阳极之间的高电场加速后进入时间聚焦器,时间聚焦器输出和输入电极间构成一个共面波导传输线结构,使其能够支持宽带超快斜坡电脉冲,聚焦器输入电极接地,输出极接超快斜坡电脉冲(聚焦脉冲),即时间聚焦器输出和输入电极间存在一个随时间变化的电场使得不同时刻进入时间聚焦器的电子获得的能量不同。时间聚焦器的结构示意图如图2所示,时间宽度为 $t$ 的电子束团中第一个电子进入聚焦器时,同步到聚焦脉冲的A点,随着进入聚焦器的时间往后推移,电子对应的聚焦脉冲电压依次增加,即进入时间聚焦加速场的电子获得的能量依次增加,通过时间聚焦器后后面电子(原来能量较低的电子)的能量将超过前面电子(原来能量较高的电子)的能量,因此经过一段距离 $L$ (208 mm)的漂移,电子束团的时间宽度将减小,从而补偿电子束团在阴极和阳极之间产生的渡越时间弥散。经过漂移区后,电子束团进入电子时间准直器。时间准直器的结构示意图如图3所示,时间准直器也由两个具有狭缝的电极板组成一个共面波导结构,准直脉冲加到其输入电极,其输出电极接地,在两个电极之间形成一个随时间变化的减速场。准直脉冲和聚焦脉冲在时间上有一定的延迟,其延时量等于电子在 $L$ 的漂移时间。电子束团进入时间准直器经历一个减速过程,后面电子减少的能量多于前面电子减少的能量,选择合适斜率的准直脉冲,使得所有电子通过时间准直器后能量相等,则后面的运动过程将不再产生新的电子渡越时间弥散。此处值得注意的是,聚焦脉冲的斜率要合适,使得在漂移区 $L$ 的运动过程中后面的电子不会反超前面的电子,否则准直器将失去作用。通过准直器后电子束团进入四柱面电极系统进行空间聚焦,再进入加有超快扫描电脉冲的行波偏转板将电子束团在时间上的分布转换成空间分布,并通过微通道板(MCP)增益成像在荧光屏上形成可见光图像,输出的可见光图像用CCD进行记录处理。

整个系统可分为以下几个部分,时间聚焦器和时间准直器、条纹变像管、脉冲发生器、CCD。

由于时间聚焦器和准直器均需要加载超快高压斜坡电脉冲,因此时间聚焦器和准直器设计成传输的微带线结构并具有超宽的频带响应,同时时间聚焦器和准直器构成一种腔型结构,使所加的高压斜坡电脉冲不会对腔外的电子产生影响。

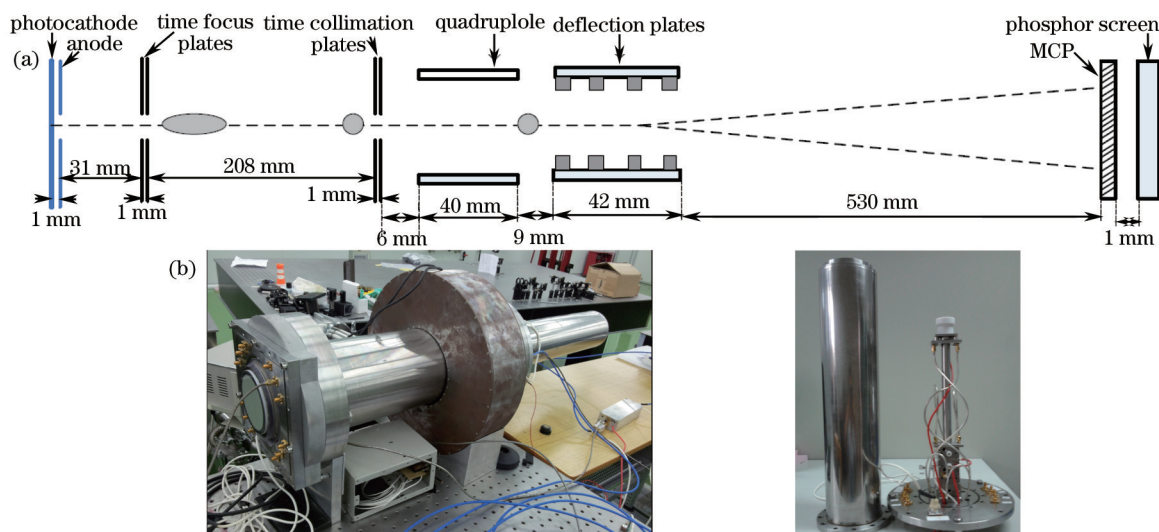


图1 (a) 电子束时间聚焦和时间准直系统结构示意图; (b) 系统实物照片

Fig.1 (a) Schematic diagram of time focus and time collimation system for electron bunch; (b) photograph of the system

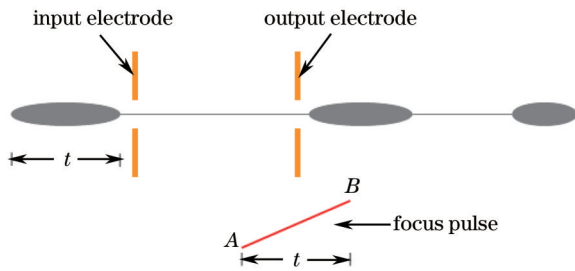


图2 时间聚焦器的结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of time focus system

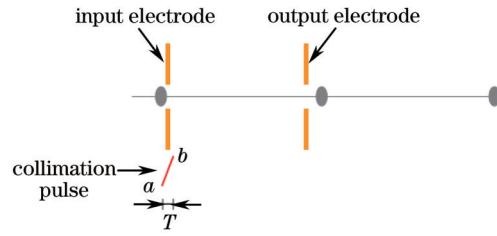


图3 时间准直器的结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of time collimation system

条纹变像管用于测量电子束团的时间宽度,是系统的核心部件,包括光电阴极、阳极、四柱面电极、偏转板、MCP和制作在光纤面板上的荧光屏。在石英玻璃上蒸镀厚度为 20 nm 的金制成透射式光电阴极。MCP 外径为 106 mm,厚度为 1 mm,通道直径为 21  $\mu\text{m}$ ,MCP 与荧光屏距离为 1 mm,MCP 和荧光屏实物图如图 4 所示。

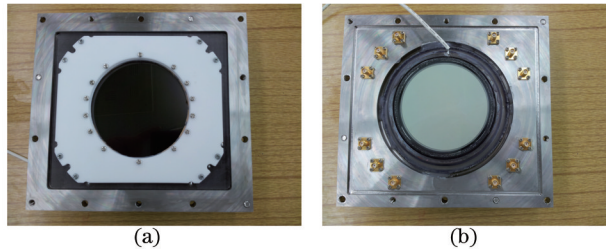


图4 实物图。(a) MCP; (b) 荧光屏

Fig.4 Photograph. (a) MCP; (b) phosphor screen

脉冲发生器产生加载在时间聚焦器上的聚焦脉冲、加载在时间准直器上的准直脉冲和加载在偏转板上的扫描脉冲,其结构示意图如图 5 所示,由雪崩三极管线路和二极管脉冲成形电路组成<sup>[6]</sup>。雪崩三极管线路产生的高压斜坡脉冲分成两部分,一部分直接输入到偏转板,另一部分用于驱动二极管脉冲成形电路产生聚焦脉冲和准直脉冲。

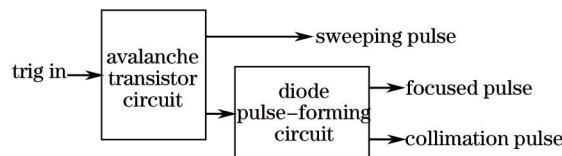


图5 脉冲发生器结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of pulse generator

### 3 实验系统及测量结果

系统时间压缩比的测量装置示意图如图 6 所示。飞秒激光器产生的波长为 266 nm 的光脉冲经全反镜  $M_2$  和  $M_3$  延时后照射半反半透镜  $M_4$ ,经  $M_4$  反射的光脉冲由  $M_5$  全反后透过  $M_4$  到达光电阴极,经  $M_4$  透射的光脉

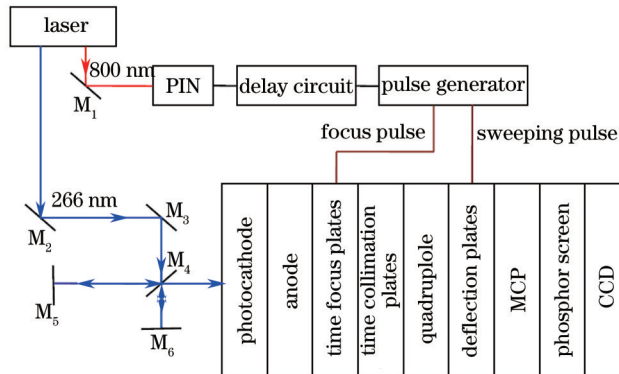


图6 测量装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of experimental setup



冲由  $M_6$  全反再由  $M_4$  反射后到达光电阴极, 固定  $M_6$  的位置, 调节  $M_5$  的位置就可调节两束光脉冲到达光电阴极的时间差  $t_0$ , 两光脉冲照射光电阴极后产生两个具有时间差的光电子束。主光路另一束波长为 800 nm 的光脉冲送入 PIN 探测器, 产生一个触发脉冲, 触发脉冲发生器, 调节延时电路上的电路延迟, 使得光信号和聚焦脉冲、扫描脉冲的时间同步, 即可产生电子束时间被压缩后的动态条纹图像, 用 CCD 读出系统记录动态条纹图像, 将条纹图像光强空间分布换算成时间分布, 就可以获得条纹图像中两条纹的时间间距  $t$ ,  $t_0$  与  $t$  的比值即是系统的时间压缩比。

实验时, 光电阴极加 -5 kV 的直流电压, MCP 加 -950 V, 屏压为 3.6 kV,  $t_0$  为 330 ps, 扫描脉冲上升沿斜率为 25 mV/ps。

加载扫描脉冲, 不加聚焦脉冲, 获得的电子束时间没被压缩时的动态条纹图像如图 7 所示, 图像竖直方向代表时间坐标。图 7 中条纹图像的光强空间分布如图 8 所示。由图 8 可得, CCD 竖直方向上每个像素代表 1.875 ps。



图 7 不加聚焦脉冲时, 动态条纹图像

Fig.7 Dynamic streak image while the system is not applied with focused pulse

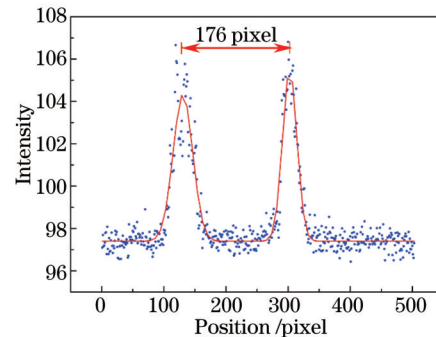


图 8 条纹图像的光强空间分布

Fig.8 Spatial intensity distribution of streak image

加载扫描脉冲和聚焦脉冲(上升沿斜率 760 mV/ps)测量系统的时间压缩比。实验时, 先同步扫描脉冲和光脉冲获得电子束时间没被压缩时的动态条纹图像, 然后保持扫描脉冲的延时不变, 再调节聚焦脉冲的延时时间, 当阴极产生的两个光电子束同步在聚焦脉冲的上升沿时, 两个光电子束将获得不同的能量增量, 通过时间聚焦器后, 后面电子束的速度将大于前面电子束的速度, 两电子束时间间距将减小, 从而使得 CCD 采集到的动态条纹图像中两条纹的间距减小。扫描脉冲与聚焦脉冲的延时差分别为 5.5、6、6.5、7、7.5、8、8.5、9、9.5 ns 时, 获得的动态条纹图像分别如图 9 所示(依次从左到右排列)。将延时差为 7.5 ns 的动态条纹图像光强空间分布换算成时间分布后, 结果如图 10 所示, 两条纹间的时间间距被压缩至 106 ps。将其他延时差的动态条纹图像进行处理, 即可获得其他条纹图像中两条纹间的时间间距, 时间间距与延时差的关系如图 11 所示。图 11 中, 延时差为 7.5 ns 时, 时间间距最小, 系统时间压缩比为 330 ps: 106 ps=3.1:1。

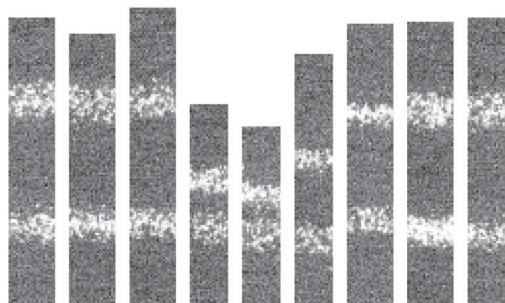


图 9 聚焦脉冲斜率为 760 mV/ps, 不同延时差获得的动态条纹图像

Fig.9 Dynamic streak images of different delay times while gradient of focus pulse is 760 mV/ps

加载扫描脉冲和聚焦脉冲, 聚焦脉冲的斜率分别为 800、760、700、640、600 mV/ps 时, 获得的电子束时间被压缩后的动态条纹图像分别如图 12 所示(依次从左到右排列), 聚焦脉冲斜率越大, 两条纹间的间距越小, 时间间距分别为 96、106、135、176、217 ps。系统时间压缩比与聚焦脉冲斜率的关系如图 13 所示。由图 13 可得, 时间压缩比随着聚焦脉冲斜率的增大而提高, 斜率为 800 mV/ps 时, 时间压缩比为 3.4:1。

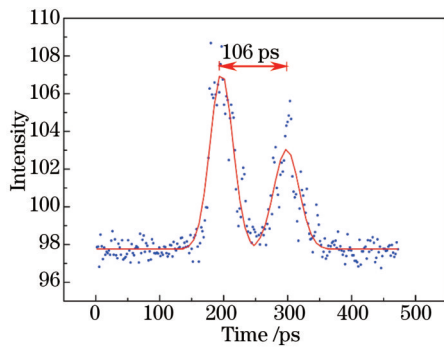


图 10 延时差 7.5 ns 时获得的条纹图像的时间分布

Fig.10 Temporal distribution of streak image while delay time is 7.5 ns

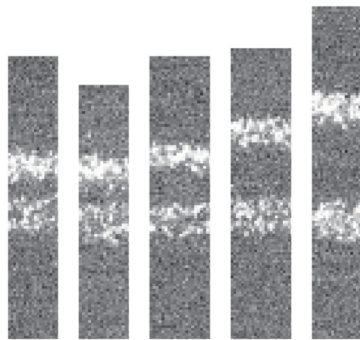


图 12 不同聚焦脉冲斜率获得的动态条纹图像

Fig.12 Dynamic streak images of different focused pulse gradients

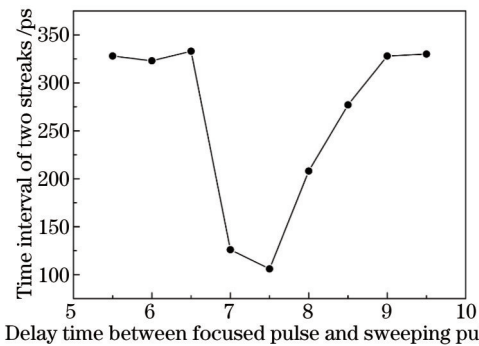


图 11 聚焦脉冲斜率为 760 mV/ps 时, 条纹间距与延时差的关系

Fig.11 Time interval of two streaks versus delay time while gradient of focused pulse is 760 mV/ps

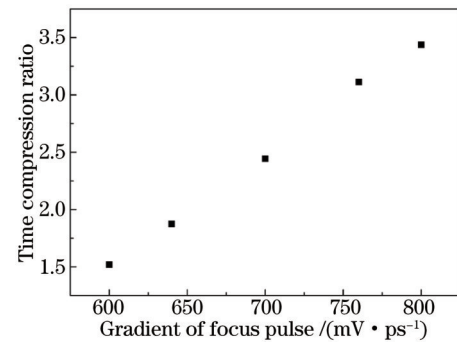


图 13 时间压缩比与聚焦脉冲斜率的关系

Fig.13 Time compression ratio versus gradient of focus pulse

## 4 结 论

研制了电子束时间聚焦和时间准直系统,对系统的时间压缩比进行了测量。加载扫描脉冲,不加聚焦脉冲时,获得了电子束时间没被压缩时的动态条纹图像,由此计算出 CCD 垂直方向上每个像素代表 1.875 ps。加载聚焦脉冲后,电子束时间被压缩,动态条纹图像中两条纹的间距减小,当聚焦脉冲斜率为 800 mV/ps 时,两条纹间的时间间距被压缩至 96 ps,时间压缩比为 3.4:1。研究了时间压缩比与聚焦脉冲斜率的关系,实验结果表明时间压缩比随着聚焦脉冲斜率的增大而提高。后续工作将完成以下两点,1) 加载斜率更大的聚焦脉冲来提高系统的时间压缩比,2) 加上准直脉冲研究系统的时间准直特性。

## 参 考 文 献

- 1 D T Michel, R S Craxton, A K Davis, *et al.*. Implosion dynamics in direct-drive experiments[J]. Plasma Phys Control Fusion, 2015, 57(1): 014023.
- 2 Sun Zhihong, Dong Jun, Peng Zhitao, *et al.*. Synchronization measurement of multi-beams for high power laser facility [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0908004.  
孙志红,董军,彭志涛,等.高功率激光装置多路光束时间同步测试技术[J].中国激光,2014,41(9):0908004.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 Sun Jianfeng, Liu Di, Ge Mingda, *et al.*. Image pre-processing algorithm of underwater target for streak tube imaging Lidar[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0714002.

- 孙剑峰, 刘迪, 葛明达, 等. 条纹管激光雷达水下目标图像预处理算法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0714002.
- 6 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Tang Daorun, *et al.*. Development and application of a system for fusion reaction history measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 38(1): 0112006.
- 彭晓世, 王峰, 唐道润, 等. 聚变反应历程测量系统研制及应用[J]. 光学学报, 2011, 38(1): 0112006.
- 7 Valerii Losovoi, Il'ya Ushkov, Eduard Prokhorenko, *et al.*. 200 femtosecond streak camera (development and dynamic measurements)[C]. SPIE, 2003, 4948: 297-304.
- 8 J Feng, H J Shin, J R Nasiatka, *et al.*. An x-ray streak camera with high spatio-temporal resolution[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(13): 134102.
- 9 Mahendra Man Shakya, Zenghu Chang. Achieving 280 fs resolution with a streak camera by reducing the deflection dispersion[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87(4): 041103.
- 10 P A Jaanimagi. Breaking the 100-fs barrier with a streak camera[C]. SPIE, 2004, 5194: 171-182.
- 11 Mikhail A Monastyrski, Sergei V Andreev, Dmitry E Greenfield, *et al.*. Theoretical and computer study on the possibility of subfemtosecond (attosecond) temporal focusing of photoelectron probing bunches with quasi-stationary electromagnetic fields[C]. SPIE, 2003, 4948: 305-310.
- 12 J Liu, L Niu, J Li, *et al.*. Theoretical analysis of a time focus and time amplifier cavity in streak tube[C]. SPIE, 2007, 6279: 62792I.
- 13 J Qiang, J M Byrd, J Feng, *et al.*. X-ray streak camera temporal resolution improvement using a longitudinal time-dependent field[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, 598(2): 465-469.
- 14 Hu Xin, Wen Wenlong, Lei Xiaohong, *et al.*. Femtosecond electron pulse compression by using the time focusing technique in ultrafast electron diffraction[J]. Chin Phys B, 2011, 20(11): 114102.
- 15 Kenneth N Ricci, Todd I Smith. Longitudinal electron beam and free electron laser microbunch measurements using off-phase RF acceleration[J]. Phys Rev ST Accel Beams, 2000, 3(3): 032801.
- 16 Jinyuan Liu, Lihong Niu, Wenda Peng, *et al.*. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera [J]. Rev Sci Instrum, 2007, 78(5): 055104.

栏目编辑: 刘丰瑞