

电子束时间聚焦和时间准直系统理论研究

赵 鑫^{1,2,3} 蔡厚智^{1,2*} 刘进元¹ 谢维信²

¹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

²深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060

³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

⁴西北电网有限公司, 陕西 西安 710048

摘要 为了补偿条纹变像管阴极和栅极之间的电子渡越时间弥散,提出了电子束时间聚焦和时间准直系统。系统中,时间聚焦器用来压缩补偿电子束团在加速过程中产生的时间宽度展宽,压缩补偿后的电子束团再通过时间准直器,时间准直器用来使输出的电子具有相同的能量,这样电子束团在后面的传输过程中就不会产生新的时间弥散。采用蒙特卡罗方法和有限差分法对系统进行了理论模拟。模拟结果表明,500 fs 的电子脉冲经过时间聚焦器作用后,时间宽度变为 131 fs,时间压缩比为 3.8:1,此后由于时间准直器的作用,电子脉冲宽度保持在 131 fs 左右,时间准直性为 16.8%。

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/CJL201542.s117001

Theoretical Research of Time Focus and Time Collimation System for Electron Bunch

Zhao Xin^{1,3,4} Cai Houzhi^{1,2*} Liu Jinyuan¹ Xie Weixin²

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

²College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

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

⁴Northwest China Grid Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract In order to compensate the time dispersion between photocathode and anode in the streak tube, a time focus and time collimation system for electron bunch is presented. The time focus system is used to compensate the time dispersion in the process of accelerating. Then, the compensated electron pulse traverses the time collimation system. The energies of the electrons are equal as they emerge from the time collimation system. Therefore, the pulse width of the electron bunch is invariable in the latter transmission process. The system is simulated by using the Monte Carlo method and the finite difference method. The electron pulse with width of 500 fs is generated at the photo-cathode. The width of the electron pulse is shortened to 131 fs by using the time focus system. The time compression ratio is 3.8:1. Then, the pulse width maintains 131 fs by using the time collimation system. The time collimation ratio is 16.8%.

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

OCIS codes 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120; 250.0040

收稿日期: 2015-01-23; **收到修改稿日期:** 2015-02-28

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,博士后,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

1 引 言

条纹相机具有较高的时间分辨率和空间分辨率,被广泛应用于惯性约束聚变、Z-pinch、同步辐射、X射线激光、等离子体物理、强场物理、光生物学、光化学等研究领域^[1-6]。影响条纹相机时间分辨率或电子束团时间宽度的主要因素首先是光电子的初能量分布导致的阴极和栅极之间的电子渡越时间弥散,其次是电子束团的空间电荷效应。近几年条纹相机的时间分辨率已提高至 200 fs 左右^[7-9],这些实验结果是通过提高变像管阴极和栅极之间的场强来减小电子渡越时间弥散而实现的,但是阴极和栅极之间的场强不可能太高,否则将产生由阴极材料表面电子发射引起的高压击穿。若要进一步提高时间分辨率,可以对时间弥散进行补偿。目前主要有两种方法对电子渡越时间弥散进行补偿或压缩,1)采用电子单色仪对电子初能量分布进行限制和补偿^[10],减小电子渡越时间弥散。这种方法要求电子单色仪具有很高的能谱分辨率,它的实质是将获得高时间分辨的难度转嫁到获得高能谱分辨的难度上,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。2)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)^[11-14],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^[15]。基于这一技术,本文提出了一种腔型结构的电子束时间聚焦和时间准直系统,并对系统进行了理论研究。

2 系统结构及理论模型

电子束时间聚焦和时间准直系统的结构如图 1 所示,光电阴极接负高压,具有狭缝结构的阳极板接地,当光辐射信号入射到光电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(原来能量较低的能量)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,这样在该两个电极之间就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。值得注意的是,聚焦脉冲的斜率要合适,保证在漂移区 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。

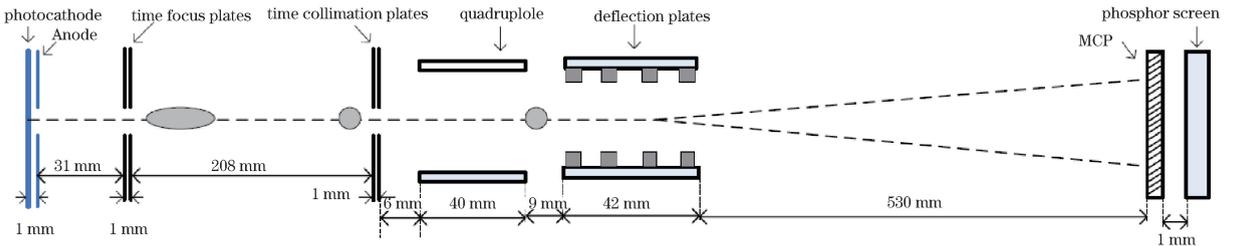


图 1 电子束时间聚焦和时间准直系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of time focus and time collimation system for electron bunch

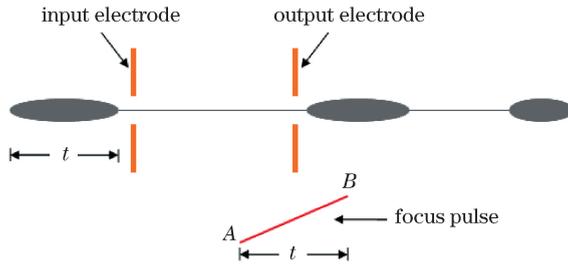


图 2 时间聚焦器的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of time focus system

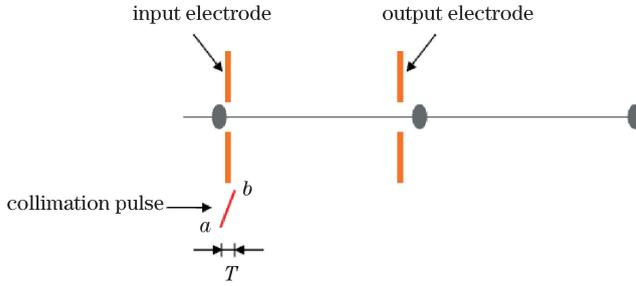


图 3 时间准直器的结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of time collimation system

从光电阴极上发射出来的电子满足一定的统计分布,这些分布主要包括初能量分布、初位置分布、发射角度分布和发射时间分布。

光电子初能量一般服从 $\beta(k, l)$ 分布

$$N(\xi) = \frac{(k+l+1)!}{k!l!} \xi^k (1-\xi)^l, \quad (1)$$

本文采用 $\beta(1, 4)$ 分布。

电子的初位置分布采用均匀分布,发射仰角采用余弦分布,方位角采用均匀分布,光电子脉冲发射时间采用高斯分布,利用蒙特卡罗方法对光电子统计分布进行抽样。

系统中存在随时间变化的电场,也存在静态电场,这些电场的计算均采用有限差分法。电子在系统中运动时,除了受到各电极间产生的电场作用外,还受到与其它电子产生的空间电荷电场的作用。空间电荷电场表现为库仑力,由电场叠加原理可得, t 时刻,第 i 个电子受到的空间电荷作用等于此电子与其它每一个电子的电场力之和

$$F_i(t) = K \cdot e^2 \cdot \sum_{i \neq j} \frac{r_i(t) - r_j(t)}{|r_i(t) - r_j(t)|^3}, \quad (2)$$

式中 K 为库仑常数, e 为电子电荷量。

电子运动轨迹采用四阶 Runge-Kutta 法进行计算。模拟时,阴极电压取 -5 kV,阴极发射光电子的区域为直径 2 mm 的圆内,阴极中心为坐标原点,竖直向上方向为 Y 轴,轴向方向为 Z 轴。

3 模拟结果

3.1 皮秒脉冲模拟结果

对两个高斯电子脉冲的追赶过程进行模拟,两电子脉冲的宽度均为 10 ps,时间间隔为 100 ps。只加聚焦脉冲(斜率为 2 V/ps),不加准直脉冲, Z 坐标值分别为 $3.2, 24.2, 24.9, 25.1, 25.3, 30$ cm 时,两电子脉冲到达上述各处的时间分布如图 4 所示。由图 4 可得,两电子脉冲通过聚焦极后,后电子脉冲(图中蓝色标记的电子脉冲 $N2$)开始追赶前电子脉冲(图中红色标记的电子脉冲 $N1$),脉冲时间间隔逐渐缩小,在 Z 坐标值为 25.1 cm 处后电子脉冲追赶上前电子脉冲,之后后电子脉冲反超,脉冲时间间隔逐渐增大。为了区分两脉冲追赶过程和反超过程的时间间隔,定义反超后两脉冲时间间隔为负值。

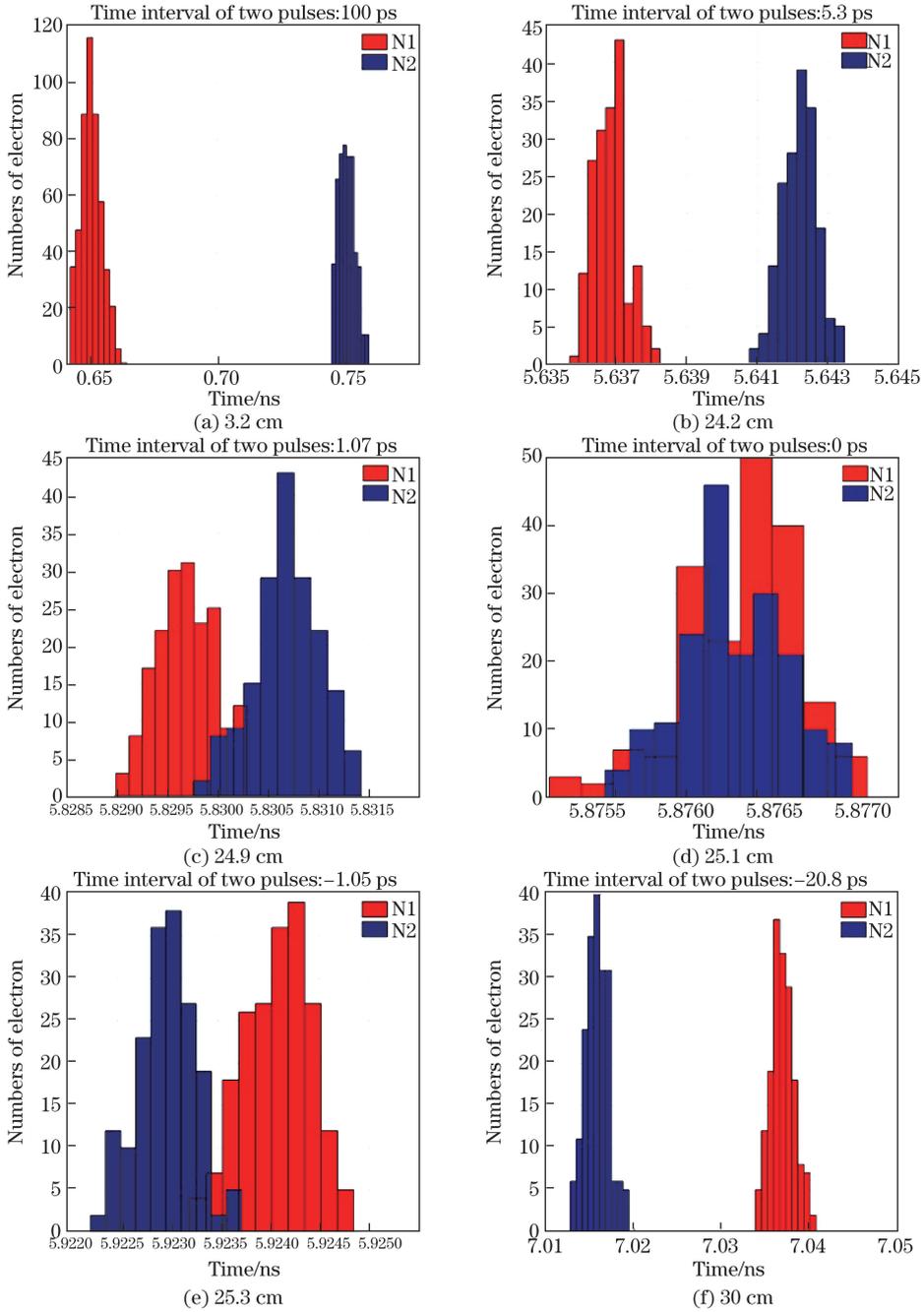


图 4 只加聚焦脉冲时,两电子脉冲在不同 Z 坐标值的时间分布

Fig. 4 Time distributions of two electron pulses at different Z coordinate values while system is applied with focus pulse and without collimation pulse

只加聚焦脉冲,斜率分别为 1、2、3、4 和 5 V/ps 时,两脉冲之间的时间间距与 Z 坐标值的关系如图 5 所示。由图 5 可得,聚焦脉冲斜率越大,两脉冲之间时间间距减小得越快,后电子脉冲能更快反超前电子脉冲。

当加聚焦脉冲(斜率为 2 V/ps)和准直脉冲(斜率为 36.1 V/ps)时,不同 Z 位置处两脉冲间的时间间距如图 6 所示。进入聚焦极时两脉冲间距为 100 ps,随后时间间距逐渐减小,经过准直极后(24.2 cm 处)时间间距为 5.3 ps,时间压缩比为 18.9:1,到达 40 cm 处时间间距为 5.8 ps,时间准直性为 9.4%。定义某位置的时间压缩比为电子脉冲的初始时间宽度(或两电子脉冲的初始时间间距)与电子脉冲到达该位置的时间宽度(或两电子脉冲的时间间距)的比值。若电子脉冲到达 a 点时其时间宽度(或两电子脉冲的时间间距)为 t_a , b 点的时间宽度(或两电子脉冲的时间间距)为 t_b ,则 a 点至 b 点的时间准直性定义为 $\frac{(t_b - t_a)}{t_a}$ (a、b 两

点均是准直极后的点)。

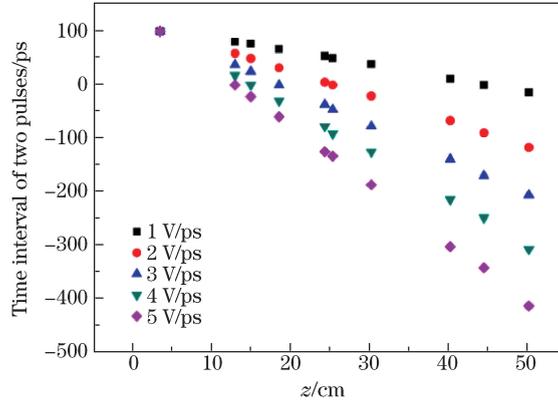


图 5 聚焦脉冲斜率不同时,两脉冲之间的时间间距与 Z 坐标值的关系

Fig. 5 Time interval of two electron pulses versus Z coordinate while gradient of focus pulse ranges from 1 V/ps to 5 V/ps

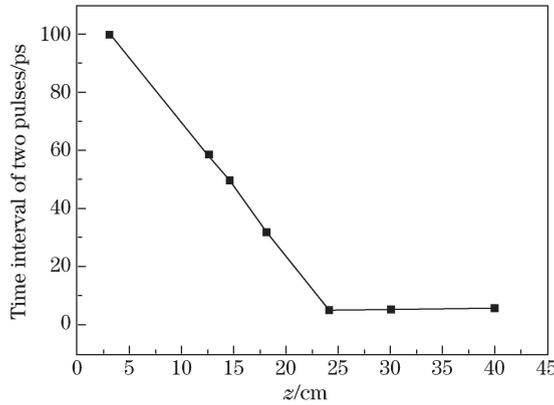


图 6 加聚焦脉冲和准直脉冲时,两电子脉冲的时间间距与 Z 坐标值的关系

Fig. 6 Time interval of two electron pulses versus Z coordinate while system is applied with focus pulse and collimation pulse

3.2 飞秒脉冲模拟结果

当电子脉冲初始宽度为 500 fs,只加聚焦脉冲(斜率为 7.1 V/ps),不加准直脉冲时,电子脉冲宽度与轴线位置(Z 坐标值)的关系如图 7 所示。由图 7 可得,由于渡越时间弥散的存在,到达聚焦极时,电子脉冲被展宽,考虑空间电荷效应比没考虑时电子脉冲更宽。经过聚焦极后电子脉冲宽度逐渐减小到最小,此后电子脉冲宽度逐渐增大。考虑空间电荷效应时,在 16.9 cm 处电子脉冲宽度最小,为 127 fs。不考虑空间电荷效应时,在 24.2 cm 处电子脉冲宽度最小,为 76 fs。由此可得,空间电荷效应将阻碍电子脉冲时间宽度的减小。

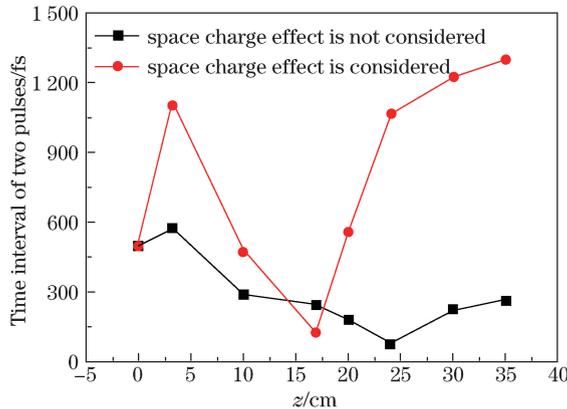


图 7 只加聚焦脉冲时,电子脉冲宽度与 Z 轴位置的关系

Fig. 7 Width of electron pulse versus Z coordinate while system is applied with focus pulse and without collimation pulse

当加聚焦脉冲(斜率为 5.7 V/ps)和准直脉冲(斜率为 33.6 V/ps)时,在轴线方向上不同位置处电子脉冲的宽度如图 8 所示。电子脉冲初始宽度为 500 fs,由于渡越时间弥散和空间电荷效应,到达聚焦极时电子脉冲宽度变为 1.1 ps,随后聚焦脉冲作用于电子脉冲,经过漂移区时电子脉冲宽度逐渐减小,经过准直极时准直脉冲作用于电子脉冲使得电子的能量近似相等,出准直极电子脉冲宽度为 131 fs,时间压缩比为 3.8:1,到达 40 cm 处宽度为 153 fs,时间准直性为 16.8%。

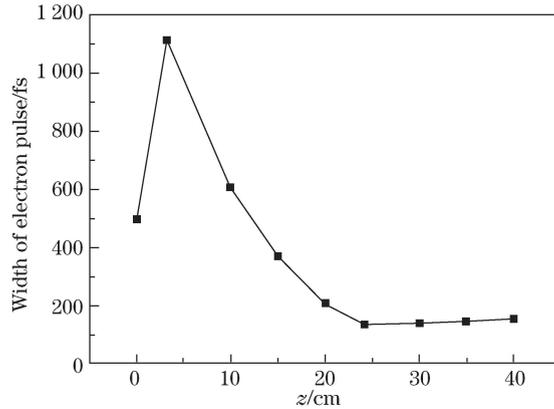


图 8 加聚焦脉冲和准直脉冲时,电子脉冲宽度与 Z 轴位置的关系

Fig. 8 Width of electron pulse versus Z coordinate while system is applied with focus pulse and collimation pulse

4 结 论

为了补偿条纹变像管阴极和栅极之间的电子渡越时间弥散,建立了电子束时间聚焦和时间准直系统,采用蒙特卡罗方法和有限差分法对系统进行了理论模拟。对两个皮秒电子脉冲的追赶过程进行了模拟,模拟结果表明聚焦脉冲斜率越大,两电子脉冲时间间距减小得越快,后电子脉冲能更快反超前电子脉冲。对飞秒电子脉冲时间宽度的变化过程进行了模拟,当加聚焦脉冲(斜率 5.7 V/ps)和准直脉冲(斜率 33.6 V/ps)时,500 fs 的电子脉冲经过聚焦器作用后宽度变为 131 fs,时间压缩比为 3.8:1,此后由于准直器的作用,电子脉冲宽度保持在 131 fs 左右,时间准直性为 16.8%。电子束时间聚焦和时间准直系统为研制更高时间分辨率的条纹相机提供了一种技术途径,为超短电子束团的获得提供了一种思路。

参 考 文 献

- O A Hurricane, D A Callahan, D T Casey, *et al.*. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 343-348.
- Chen Guanghua, Liu Shouxian, Liu Qiao, *et al.*. Fabry-Perot interferometry for high-speed flyer velocities measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 111201.
陈光华,刘寿先,刘 乔,等. 用于高速飞片测量的法布里珀罗干涉测速技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 111201.
- Peng Xiaoshi, Wang Feng, Tang Daorun, *et al.*. Development and application of a system for fusion reaction history measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(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, 31(1): 0112006.
- Peng Xiaoshi, Wang Feng, Liu Shenye, *et al.*. Development of an imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3207-3211.
彭晓世,王 峰,刘慎业,等. 成像型任意反射面速度干涉仪研制[J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3207-3211.
- Huang Xiuguang, Fu Sizu, Shu Hua, *et al.*. Experimental measurements on equation of state of gold by using high power laser driving shocks[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(6): 743-747.
黄秀光,傅思祖,舒 桦,等. 利用高功率激光驱动冲击波进行金属材料状态方程实验测量[J]. *中国激光*, 2007, 34(6): 743-747.
- 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.
- Valerii Losovoi, I A Ushkov, Eduard Prokhorenko, *et al.*. 200 femtosecond streak camera: development and dynamic measurements[C]. *Proc SPIE*, 2003, 4948: 297-304.
- 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.
- 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.
- P A Jaanimagi. Breaking the 100-fs barrier with a streak camera[C]. *Proc 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]. Proc 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]. Proc 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 Wen Wenlong, Lei Xiaohong, Hu Xin, *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.

栏目编辑: 刘丰瑞