

doi: 10.3788/gzxb20164502.0204001

电子束时间聚焦技术

蔡厚智^{1,2}, 龙井华³, 刘进元¹, 谢维信², 白雁力¹, 雷云飞¹

(1 深圳大学 光电子器件与系统(教育部/广东省)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 深圳大学 物理科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘 要:利用时间展宽分幅相机研究电子束的时间聚焦现象. 当阴极未加载脉冲电压时, 测得相机的时间分辨率为 80 ps. 当阴极加载斜率为 14 V/ps 的脉冲电压、电路延时为 11.395 ns 时, 相机的时间分辨率为 8.8 ps, 电子束的时间宽度经历了被压缩到被展宽的过程. 改变阴极脉冲下降沿斜率, 研究电子束时间聚焦时系统时间分辨与下降沿斜率的关系. 当下降沿斜率为 1 V/ps 时, 时间分辨近似等于 80 ps, 电子束到达微通道板时其时间宽度约等于原始宽度. 当斜率大于 1 V/ps 时, 时间分辨小于 80 ps, 到达微通道板时电子束时间宽度被展宽. 当斜率为 0.5 V/ps 时, 时间分辨大于 80 ps, 到达微通道板时电子束时间宽度被压缩.

关键词: X 射线光学; 分幅相机; 时间聚焦; 时间分辨

中图分类号: TN143; O536

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0204001-5

Time Focus Technology for the Electron Bunch

CAI Hou-zhi^{1,2}, LONG Jing-hua³, LIU Jin-yuan¹, XIE Wei-xin², BAI Yan-li¹,
LEI Yun-fei¹

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

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

(3 College of Physics, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract: The time focus of electron pulse was studied by using the time dilation framing camera. While the Photo-Cathode (PC) is not pulsed, the measured temporal resolution of the camera is 80 ps. While the pulse with a 14 V/ps gradient is applied on the PC, and the delay time of the circuit is 11.395 ns, the temporal resolution is 8.8 ps. The results show that the the temporal shape of the electron signal is compressed first and then dilated. Furthermore, the relationship between the temporal resolution and the falling edge gradient of the PC pulse is obtained. While the falling edge gradient of the PC pulse is 1 V/ps, the temporal resolution is about 80 ps. It shows that the time width of the electron pulse is approximately equal to its original width while the electrons arrive at the microchannel plate (MCP). While the gradient is more than 1 V/ps, the temporal resolution is less than 80 ps. The time width of the electron pulse is dilated while it arrive at the MCP. While the gradient is 0.5 V/ps, the temporal resolution is more than 80 ps. The time width of the electron pulse is compressed.

Key words: X-ray optics; Framing camera; Time focus; Temporal resolution

OCIS Codes: 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120; 250.0040

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11305107)、中国博士后科学基金 (No. 2014M552228) 和深圳市科技计划项目 (No. JCYJ20140418182819143) 资助

第一作者: 蔡厚智 (1983-), 男, 博士后, 主要研究方向为超快诊断技术. Email: caihzlvzf@163.com

通讯作者: 龙井华 (1972-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为激光技术. Email: jhlong@szu.edu.cn

收稿日期: 2015-09-07; **录用日期:** 2015-12-04

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

0 引言

电子束时间聚焦技术是在电子光学系统中某一电极上加载脉冲电压,实现电子束时间宽度的压缩,其在同步辐射加速器技术、条纹相机等方面具有应用价值^[1].在同步辐射加速器中,采用电子束时间聚焦技术,获得了压缩后的高能电子束团(MeV)的时间宽度约 130 fs^[2].但是对于电子能量分布小于几个 eV、电子能量为 5 keV~50 keV 的较低能量电子束团,其时间宽度压缩技术尚处于初步研究阶段.2001 年 BaoLiang Qian 等在设计的电子枪中加入一个补偿电极,实现了对低能电子束的时间压缩,通过数值模拟计算出该系统可获得 350 fs 的电子脉冲^[3].2002 年,他们又设计了一种弯曲腔型电极,在该电极上加载加速电场使其对飞秒电子脉冲进行时间聚焦.理论计算可得,这种结构可将 550 fs 的电子脉冲压缩至 200 fs^[4].2007 年至 2011 年,刘进元^[5]、J. Qiang^[6]、田进寿^[7]、温文龙^[8] 等依次提出可采用电子束时间聚焦技术将条纹相机的时间分辨率提高至 100 fs 以内.2015 年赵鑫等对电子束时间聚焦和时间准直系统进行了理论研究,500 fs 的电子脉冲经过时间聚焦器作用后,时间宽度被压缩至 131 fs^[9].上述对低能电子束时域压缩的研究是将电子束时间聚焦技术引入到条纹变像管而进行的,且均是理论方面的研究.最近几年,美国 Lawrence Livermore National Laboratory 将电子束时域变化技术引入到分幅相机,研制出时间展宽分幅相机^[10-12].在时间展宽分幅相机中,光电阴极加载了脉冲电压,阴极和栅网间存在随时间变化的电场^[13-15].若入射光脉冲同步在阴极脉冲的下降沿,则后面电子获得的能量将大于前面电子获得的能量,因此后面电子的速度更大,将追赶前面电子,开始时电子束的时间宽度将被压缩(即对电子束进行时间聚焦).若光脉冲同步在阴极脉冲的上升沿,则电子束的时间宽度将被展宽.本文将光脉冲同步在阴极脉冲的下降沿,利用分幅相机在实验上对电子束的时间聚焦现象进行研究.

1 系统结构

利用分幅相机研究电子束时间聚焦现象的系统结构示意图如图 1,由微带阴极、阳极栅网、磁聚焦透镜、微通道板(Microchannel Plate, MCP)变像管、CCD 和高压脉冲发生器组成.其工作原理是:入射光照射在微带阴极上产生光电子,微带阴极加负直流偏置电压并叠加上高压脉冲电压,阳极栅网接地,光脉冲同步在阴极脉冲的下降沿,这样,后发射的光电子较前面的光电子获得更大的能量,从而使得后面的电子速度更快,电子束的时间宽度将被压缩,实现电子束的时间聚焦,通过阳极栅网到 MCP 这段漂移区后,电子束经磁聚焦透

镜成像在 MCP 输入面对应的微带线上,当选通脉冲沿微带线在 MCP 上传输时,电子束被 MCP 选通、增强,并打到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.

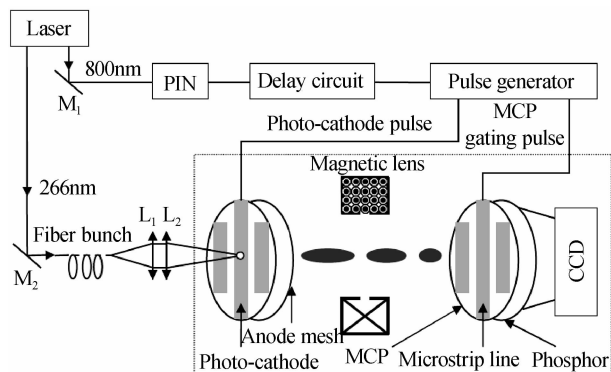


图 1 实验装置示意图,其中方框内为系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup, the schematic diagram of the system is shown in the box

微带阴极由三条厚度 80 nm、宽度 8 mm、间隔 2.8 mm 的金阴极组成.微带阴极具有两方面的作用,一是具有光电阴极的功能,将入射光转换为光电子;二是具有微带线的作用,传输脉冲电压,使得微带阴极和栅网间存在变化的电场,实现电子束的时间聚焦.

圆环形状的磁聚焦透镜由软铁和 1 200 匝铜线圈组成,其作用是使阴极面光电子成像在 MCP,成像倍率为 1:1.圆环外径 256 mm,内径 160 mm,轴线方向长度 100 mm,内侧有一圈宽度 4 mm 的狭缝,磁场经狭缝进入漂移区.

MCP 变像管由阻抗渐变线、微带线、MCP 和荧光屏组成.MCP 厚度 0.5 mm,外径 56 mm,通道直径 12 μm ,斜切角 6°,与荧光屏距离 0.5 mm.在 MCP 输入面蒸镀三条宽度 8 mm,间隔 2.8 mm 的微带线(500 nm Cu 和 100 nm Au),MCP 输出面蒸镀与输入面相同厚度的 Cu 和 Au.

高压脉冲发生器产生加载在微带阴极上的阴极脉冲和加载在 MCP 上的选通脉冲,其结构示意图如图 2,雪崩三极管线路产生的高压斜坡脉冲直接驱动二极管脉冲成形电路输出两路波形一致的皮秒高压脉冲,其中一路通过阻抗渐变线输入到微带阴极,另一路作为选通脉冲输入到 MCP.

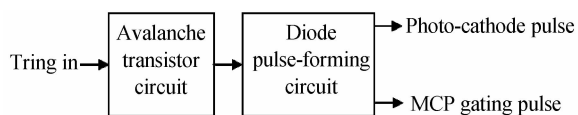


图 2 高压脉冲发生器结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of the high voltage pulse generator

2 实验系统及测量结果

高压脉冲发生器产生的阴极脉冲和 MCP 选通脉

冲如图 3 所示,脉冲幅值为 -1.9 kV ,宽度为 220 ps ,下降沿斜率为 14 V/ps ,上升沿斜率为 7 V/ps .

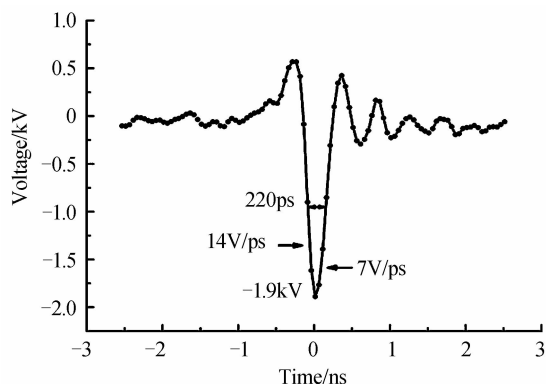


图 3 脉冲波形
Fig. 3 Wave form of the pulse

电子束时间聚焦采用光纤传光束系统. 光纤传光束由 30 根长度按等差数列递增的多模光纤组成, 光纤束输出面按照光纤的长度依次排列并编号, 如图 4, 最短的光纤编号为 1, 编号增加 1, 光纤长度增加 1 mm , 光纤中紫外光的传输时间就增加 5 ps , 从而使得这 30 个光点的到达时间均匀地增加.

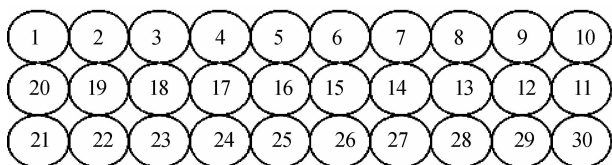
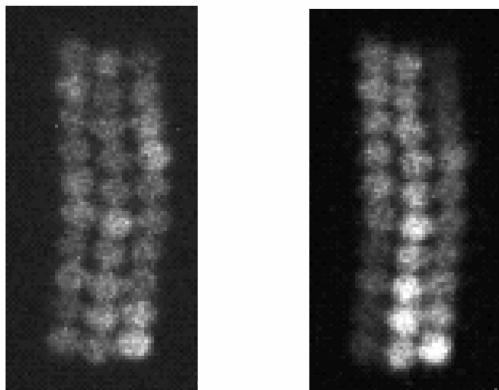


图 4 光纤传光束输出面光纤排列示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the array of the fiber bunch output end

实验时,在微带阴极、MCP 上加直流电压,测量光纤的静态像,得到入射光的静态分布. 实验装置如图 1,激光器输出的波长为 266 nm 的光脉冲经延时后照射光纤束输入面,紫外光经光纤束形成相邻时间间隔为 5 ps 的 30 个光点,这些光点经平行光管(即图 1 中 L_1 、 L_2) 成像在 MCP 微带上. 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,触发高压脉冲发生器产生阴极脉冲和 MCP 选通脉冲. 调节电路延时和选通脉冲传输线的长度,使得光脉冲和阴极脉冲到达微带阴极的时间同步,电子脉冲和选通脉冲到达 MCP 微带线的时间同步,即可获得电子束时间聚焦后的动态图像,用 CCD 读出系统记录动态图像.

微带阴极仅加 -3 kV 直流电压, MCP 仅加 -750 V 直流偏置电压时,获得的光纤静态图像如图 5 (a). 微带阴极仅加 -3 kV 直流电压, MCP 加载 -500 V 直流偏置电压和幅值 -1.9 kV 、宽度 220 ps 的选通脉冲,调节电路延时,使得电子脉冲和选通脉冲到达 MCP 微带线的时间同步,从而产生动态图像,如图 5 (b). 对动态图像和静态图像进行归一化处理,将归

一化的动态像光强空间分布换算成时间分布,结果如图 6,图中高斯拟合曲线的半峰全宽为 80 ps ,此为无电子束时间聚焦或展宽时系统的时间分辨. 若电子束到达 MCP 时,其时间宽度被展宽,则测得系统的时间分辨将好于(小于) 80 ps ,若时间宽度被压缩,则时间分辨将大于 80 ps .



(a) Static image of 5 ps fiber bunch (b) Gating image while the is applied with dc bias only

图 5 光纤静态图像及动态图像

Fig. 5 Static image and Gating image of the fiber bunch

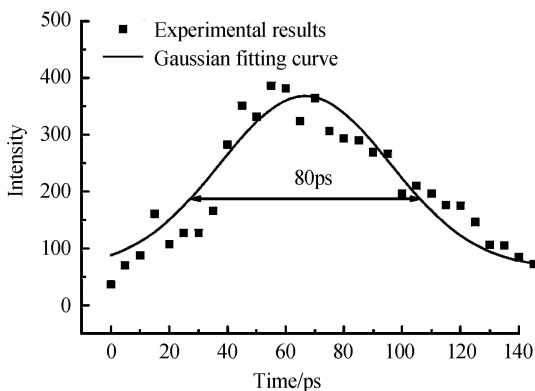


图 6 阴极未加脉冲时,时间分辨测量结果

Fig. 6 Measured temporal resolution while the PC is not pulsed

当阴极加载 -2 kV 直流偏置电压和脉冲电压, MCP 加载 -500 V 直流偏置电压和选通脉冲,将电路延时分别设置在 11.595 、 11.555 、 11.515 、 11.475 、 11.435 、 11.395 ns 时,光脉冲依次同步在阴极脉冲下降沿的不同位置,获得的一组动态图像如图 7. 延时为 11.3 ns 时,光脉冲约同步在阴极脉冲的峰值位置. 当延时大于 11.3 ns 时,光脉冲同步在阴极脉冲的下降沿,电子束的时间宽度被压缩,即电子束时间聚焦.

对图 7 中的动态图像进行归一化处理,将归一化的动态像光强空间分布换算成时间分布,即可获得各个同步位置系统的时间分辨,时间分辨与同步位置的关系如图 8. 图 8 中横坐标表示光脉冲与阴极脉冲的同步位置,如:横坐标为 -95 ps 时(此时电路延时为 11.395 ns),表示同步在距离阴极脉冲峰值 95 ps 的下

降沿处. 横坐标 $-295, -255, -215, -175, -135,$
 -95 ps 分别对应电路延时 $11.595, 11.555, 11.515,$

$11.475, 11.435, 11.395$ ns.

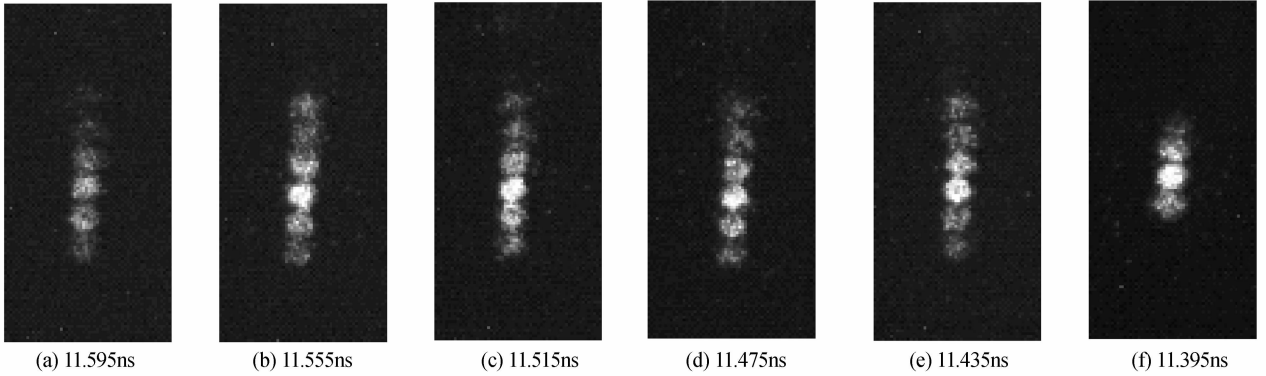


图 7 阴极加载脉冲时动态图像

Fig. 7 Gating image while the PC is applied with pulse

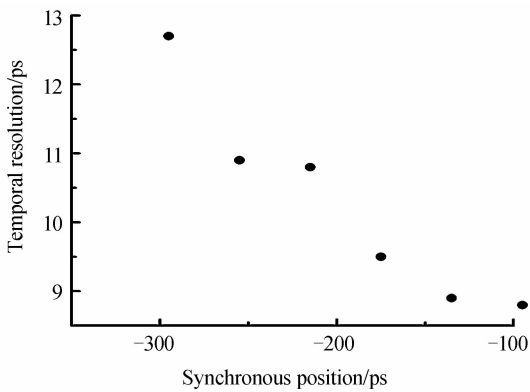


图 8 时间分辨与同步位置的关系

Fig. 8 The relationship between the temporal resolution and the synchronous position

光脉冲同步在阴极脉冲下降沿时,后发射的光电子较前面的光电子获得更大的能量,从而使得后面的电子速度更快,后面电子将追赶前面电子,电子束的时间宽度将被压缩. 但由图 8 可得,此时系统的时间分辨为 $8.8 \sim 12.7$ ps, 小于 80 ps, 即电子束到达 MCP 时,其时间宽度被展宽. 因此,在此实验条件下,电子束时间宽度经历了被压缩到被展宽的过程,电子束在阳极栅网到 MCP 这段漂移区的运动过程是:开始时后面电子追赶前面电子,电子束的时间宽度被压缩,之后后面的电子反超前面的电子,电子束的时间宽度逐渐变大,到达 MCP 时电子束的时间宽度比原始的要大,时间宽度被展宽.

将延时固定在 11.435 ns, 改变阴极脉冲的下降沿斜率,可获得不同下降沿斜率时系统的时间分辨,时间分辨与下降沿斜率的关系如图 9. 当下降沿斜率为 1 V/ps 时,系统时间分辨近似等于 80 ps, 表明电子束时间宽度被压缩后,又逐渐展宽,到达 MCP 时其时间宽度约等于原始宽度. 当斜率大于 1 V/ps 时,系统时间分辨小于 80 ps, 到达 MCP 时电子束时间宽度被展宽. 当斜率为 0.5 V/ps 时,系统时间分辨为 173 ps, 大

于 80 ps, 表明到达 MCP 处,电子束时间宽度小于其原始宽度,即电子束时间宽度被压缩.

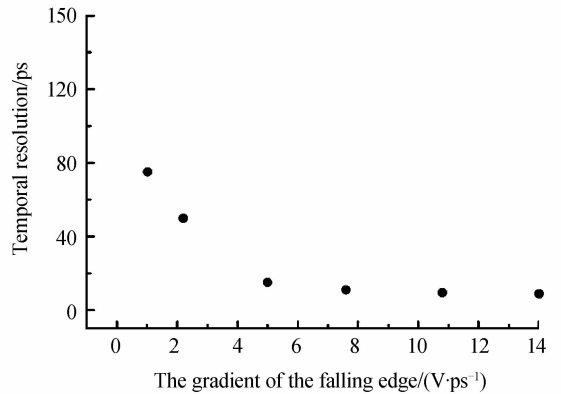


图 9 时间分辨与下降沿斜率的关系

Fig. 9 The relationship between the temporal resolution and the falling edge gradient

3 结论

利用分幅相机对电子束的时间聚焦进行了研究,当光脉冲同步在阴极脉冲下降沿时,电子束的时间宽度将被压缩,但下降沿斜率较大时,后面的电子经过较长的漂移区后可能反超前面的电子,本文对这一现象进行了实验研究,实验结果表明电子束到达 MCP 时,时间宽度被展宽. 由此可得,电子束经历了时间宽度被压缩到被展宽的过程,即开始时后面电子追赶前面电子,电子束的时间宽度被压缩,之后后面的电子反超前面的电子,电子束的时间宽度逐渐变大,到达 MCP 时电子束的时间宽度被展宽. 改变阴极脉冲的下降沿斜率,获得了系统时间分辨与下降沿斜率的关系. 当下降沿斜率为 1 V/ps 时,到达 MCP 处电子束时间宽度约等于其原始宽度. 当斜率大于 1 V/ps 时,到达 MCP 处电子束时间宽度被展宽. 当斜率为 0.5 V/ps 时,到达 MCP 处,电子束时间宽度被压缩.

参考文献

- [1] MONASTYRSKI M A, ANDREEV S V, GREENFIELD D E, *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.
- [2] RICCI K N, SMITH T I. Longitudinal electron beam and free electron laser microbunch measurements using off-phase RF acceleration[J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2000, **3**(3): 032801.
- [3] QIAN Bao-Liang, ELSAYED-ALI H E, A new compensating element for a femtosecond photoelectron gun[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(9): 3507-3513.
- [4] QIAN Bao-Liang, ELSAYED-ALI H E. Acceleration element for femtosecond electron pulse compression [J]. *Physical Review E*, 2002, **65**(4): 046502.
- [5] LIU J, NIU L, LI J, *et al.* Theoretical analysis of a time focus and time amplifier cavity in streak tube[C]. SPIE, 2007, **6279**: 62792I.
- [6] QIANG J, BYRD J M, FENG J, *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**: 465-469.
- [7] TIAN Jin-shou, LEI Xiao-hong, WEN Wen-long, *et al.* Compression of electron pulses in temporal domain[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2379-2385.
田进寿, 雷晓红, 温文龙, 等. 超快电子脉冲的时域压缩[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2379-2385.
- [8] WEN Wen-Long, LEI Xiao-Hong, HU Xin, *et al.* Femtosecond electron pulse compression by using the time focusing technique in ultrafast electron diffraction[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(11): 114102.
- [9] ZHAO Xin, CAI Hou-zhi, LIU Jin-yuan, *et al.* Theoretical research of time focus and time collimation system for electron bunch[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(s1): 17001.
赵鑫, 蔡厚智, 刘进元, 等. 电子束时间聚焦和时间准直系统理论研究[J]. *中国激光*, 2015, **42**(s1):17001.
- [10] NAGEL S R, HILSABECK T J, BELL P M, *et al.* Dilation x-ray imager a new/faster gated x-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, **83**(10): 10E116.
- [11] NAGEL S R, HILSABECK T J, BELL P M, *et al.* Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation x-ray imager [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(11): 11E504.
- [12] HILSABECK T J, HARES J D, KILKENNY J D, *et al.* Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(10): 10E317.
- [13] NAGEL S R, AYERS M J, FELKER B, *et al.* Performance measurements of the DIXI (dilation x-ray imager) photocathode using a laser produced x-ray source[C]. SPIE, 2012, **8505**: 85050H.
- [14] NAGEL S R, HILSABECK T J, AYERS M J, *et al.* 2D magnetic field warp reversal in images taken with DIXI (dilation x-ray imager) [C]. SPIE, 2013, **8850**: 88500I.
- [15] AYERS M J, NAGEL S R, FELKER B, *et al.* Design and implementation of Dilation X-ray Imager for NIF “DIXI”[C]. SPIE, 2013, **8850**: 88500C.