

基于微通道板选通的飞行时间测量技术

蔡厚智¹, 刘进元¹, 付文勇¹, 雷云飞¹, 廖昱博¹, 龙井华^{2*}

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深圳大学物理与能源学院, 广东 深圳 518060

摘要 研究了基于微通道板(MCP)选通技术的电子飞行时间(TOF)测量系统。调节 MCP 选通脉冲延时,使得电子和选通脉冲同时到达 MCP,从而产生动态图像。利用高速示波器获得电子在 50 cm 漂移区的 TOF。当阴极电压为-3.5 kV 时,测得电子从阴极到 MCP 的 TOF 约为 15 ns。改变阴极电压,获得了 TOF 与电子能量之间的关系。结果表明,随着电子能量的增大,TOF 不断减小。该 TOF 测量系统的时间分辨率为 88 ps。

关键词 探测器; 电子能谱; 飞行时间; 微通道板; 选通; 时间分辨率

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0204002

Measurement Technology of Time of Flight Based on Gated Microchannel Plates

Cai Houzhi¹, Liu Jinyuan¹, Fu Wenyong¹, Lei Yunfei¹, Liao Yubo¹, Long Jinghua²

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

²College of Physics and Energy, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract A time of flight (TOF) measurement system based on the gated microchannel plate (MCP) technology is reported. The electrons and the strobe pulse can simultaneously arrive at the MCP under a suitable MCP strobe pulse delay, and so that dynamic images can be produced. The TOF of electrons at the drift space of 50 cm is measured by using a high speed oscilloscope. When the cathode voltage of -3.5 kV is applied, it takes electrons about 15 ns to travel from cathode to MCP. The relationship between the TOF and electron energy is obtained via tuning the cathode voltage. The results show that the TOF decreases with the increase of electron energy, and the temporal resolution of the TOF measurement system is 88 ps.

Key words detectors; electronic energy spectrum; time of flight; microchannel plate; gating; temporal resolution

OCIS codes 040.1490; 040.5160; 040.7480; 320.7120; 250.0040

1 引 言

在电子光学系统中,飞行时间(TOF)是一个十分重要的物理量,通过 TOF 可以获得电子或其他粒子的速度及能量,因此可以利用 TOF 区分或选择具有不同参数(如能量、动量或质量等)的粒子。1946 年,Stephens^[1]首次利用 TOF 原理制作质谱仪。1948 年,Cameron 等^[2]成功研制出第一台 TOF 质谱仪样机。随着研究的深入,质谱仪性能不断提高,被广泛应用于材料科学、生物医学、地球科

学、环境科学、分析化学、微电子学等领域^[3-8]。此外,TOF 也是激光与等离子体相互作用、同步辐射等高能物理研究领域的重要研究对象之一^[9-11]。

本文利用微通道板(MCP)选通技术对电子的 TOF 进行了测量,该技术目前主要应用于 X 射线分幅相机中^[12-18]。1986 年,Eckart 等^[19]提出把微带线直接镀在 MCP 的输入面上,在 MCP 输出面镀电极,使得 MCP 的两个端面形成微带传输线结构。在 MCP 输入面的微带线上加载时间宽度很窄的选通脉冲,当被探测的信号与选通脉冲不同步时,该信

收稿日期: 2017-08-11; 收到修改稿日期: 2017-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(11775147)、深圳市科技计划项目(JCYJ20170302153912966, JCYJ20160608173121055)、深圳大学新引进教师科研启动项目(2017015)

作者简介: 蔡厚智(1983—),男,博士,副研究员,主要从事超快诊断技术方面的研究。E-mail: caihlzvfz@163.com

* 通信联系人。E-mail: jhlong@szu.edu.cn

号将被 MCP 吸收,没有图像输出。反之,信号产生的光电子将被 MCP 选通、增益,倍增后的电子图像通过荧光屏转换成可见光图像。由于选通脉冲的时间宽度很窄,一般为几百皮秒,因此利用 MCP 选通技术可以获得很高的系统时间分辨率。目前采用 MCP 选通技术的实用化 X 射线分幅相机,其时间分辨率为 60~100 ps,常用于探测持续时间为纳秒量级的 X 射线脉冲(如惯性约束聚变、Z-pinch 等产生的 X 射线)^[20-25]。

本文将 MCP 选通技术应用于电子 TOF 测量,有效提高了时间分辨率,并对 TOF 与电子能量之间的关系进行了研究。

2 TOF 测量系统结构

基于 MCP 选通技术的 TOF 测量系统,其结构示意图和实物图如图 1 所示,主要由光电阴极(PC)、阳极栅网、磁透镜、MCP 变像管(包括 MCP 微带线、MCP、荧光屏)、选通脉冲发生器和图像传感器(CCD)组成。栅网与 MCP 的距离为 50 cm,两者之间的区域为电子漂移区。入射光照射 PC 产生光电子,PC 加载负直流高压,栅网接地,PC 和栅网间的电场加速光电子,使光电子获得能量,光电子通过漂移区,经磁透镜成像在 MCP 微带线上。选通脉冲沿微带线在 MCP 上传输,当电子与选通脉冲不是同时到达 MCP 微带线时,该电子会被 MCP 吸收,MCP 变像管无信号输出;当电子与选通脉冲同时到达 MCP 微带线时,电子被 MCP 选通、增益,增益电子被屏压加速后轰击荧光屏,形成可见光图像,该可见光图像再用 CCD 进行采集处理。当 CCD 采集到动态图像时,表明电子与选通脉冲到达 MCP 微带线的时间同步,则 PC 光电子的产生时间和选通脉冲到达 MCP 微带线的时间差即为电子从 PC 至 MCP 的 TOF。

TOF 测量系统有三条厚度均为 80 nm 的金 PC,每条 PC 宽度为 8 mm,相邻 PC 的间隔为 2.8 mm,PC 加载直流电压。阳极栅网接地,距离 PC 1.8 mm。MCP 变像管具有三条宽度均为 8 mm 的微带线,相邻微带线的间距为 2.8 mm。MCP 厚度为 0.5 mm,外径为 56 mm,通道直径为 12 μm ,相邻两通道的间距为 14 μm 。在 MCP 输入面加载直流电压和选通脉冲,输出面接地。荧光屏加载直流高压,与 MCP 输出面的距离为 0.5 mm。磁透镜制作成圆环形状,由 1200 匝铜线圈及软铁构成,其内径为 160 mm,外径为 256 mm,厚度为 100 mm,内

侧有一宽度为 4 mm 的圆环狭缝,产生的磁场通过该狭缝传输至漂移区,使得阴极产生的光电子成像在 MCP 上。

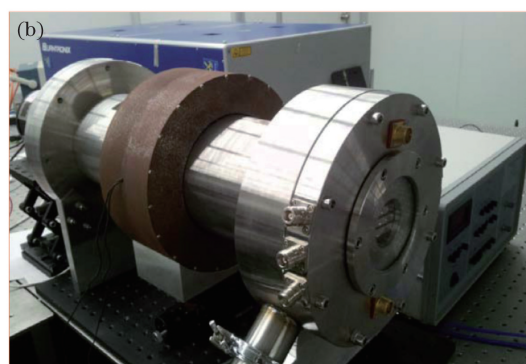
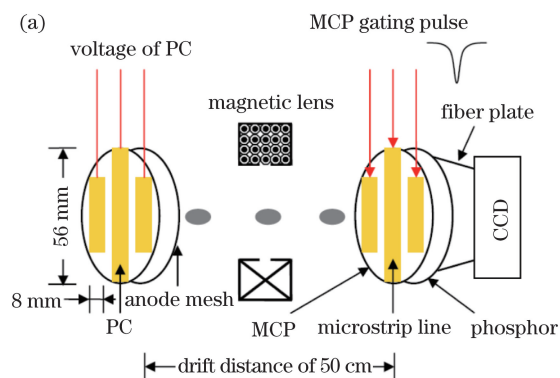


图 1 基于 MCP 选通技术的 TOF 测量系统。

(a)结构示意图;(b)实物图

Fig. 1 TOF measurement system based on gated MCP technology. (a) Structural diagram; (b) photograph

选通脉冲发生器由斜坡脉冲电路和脉冲成形电路两部分组成,将多个雪崩三极管接成 Marx 脉冲发生器及雪崩管串组合的形式,三极管安装在具有 50 Ω 传输线结构的信号传输路径上,供电后电路处于高电压小电流状态。当有触发信号时,触发信号经变压器放大而触发其中某个三极管,该三极管随后雪崩导通,电路立即变为大电流低电压状态,电流流过整个线路并增大,当电流增大到一定程度时,三极管被二次击穿,产生具有皮秒量级上升沿的超快高压斜坡脉冲。该斜坡脉冲经限流电感传输至雪崩二极管,并作为驱动脉冲使二极管反向加压,当输入斜坡脉冲到达一定幅值时,二极管被雪崩击穿,随之产生极快的电压下降沿,脉冲经过输出电容耦合微分,再经由电感与电容组成的高通滤波器的再次滤波,从而输出宽度很窄的选通脉冲^[26]。

3 实验系统及测量结果

电子 TOF 测量采用光纤传光束法。光纤传光束由 30 根长度依次增大的多模光纤组成,其输出面

排列示意图如图 2 所示,排成三行,每行 10 根光纤,编号为 1 的光纤长度最短,往后编号每增加 1,光纤长度增加 2 mm,紫外光在光纤中的传输时间增加 10 ps,从而获得时间间隔为 10 ps 的 30 个光点。

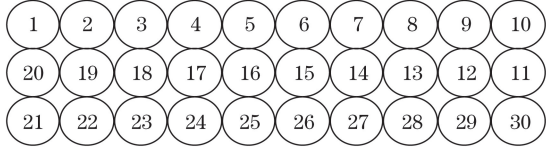


图 2 光纤传光束输出端的光纤排列示意图

Fig. 2 Schematic of output end array of fiber bunch

TOF 测量装置示意图如图 3 所示,激光器输出波长为 266 nm、宽度为 130 fs、强度为 0.1 mJ 的光信号,该光信号经延时后传输至光纤传光束的输入端,紫外光脉冲经光纤传光束后形成相邻时间间隔为 10 ps 的 30 个光点,这些光点经半透半反镜 M_2 后被分成两路,其中一路进入探测器 PIN 1 产生电脉冲信号,之后该电脉冲被送入高速示波器,另一路经透镜 L_1 、 L_2 成像至 PC 并产生光电子,光电子被

PC 和栅网间电场加速后向 MCP 方向运动。 M_2 到 PIN 1 的距离和到 PC 的距离相同,PIN 1 产生电脉冲的时间与 PC 产生光电子的时间几乎相同。飞秒激光器输出的另一路波长为 800 nm 的光信号经延时后被送入探测器 PIN 2 并产生触发信号,该信号触发选通脉冲发生器产生选通脉冲,调节电路延时,使得光电子与选通脉冲同步到达 MCP 微带线,光电子被 MCP 选通并增益,倍增后的电子轰击荧光屏产生可见光动态图像,用 CCD 观测采集该动态图像。因此,当 CCD 观测到动态图像时,说明光电子和选通脉冲到达 MCP 微带线的时间同步。选通脉冲 1 到达高速示波器的时间和选通脉冲 2 到达 MCP 微带线的时间一样,将选通脉冲 1 输入到高速示波器,在示波器上测量 PIN 1 产生的电脉冲时间(即 PC 产生光电子的时间)和选通脉冲 1 的时间(即选通脉冲 2 到达 MCP 微带线的时间,也就是光电子到达 MCP 微带线的时间),这两者的时间差即为电子从 PC 到 MCP 的 TOF。

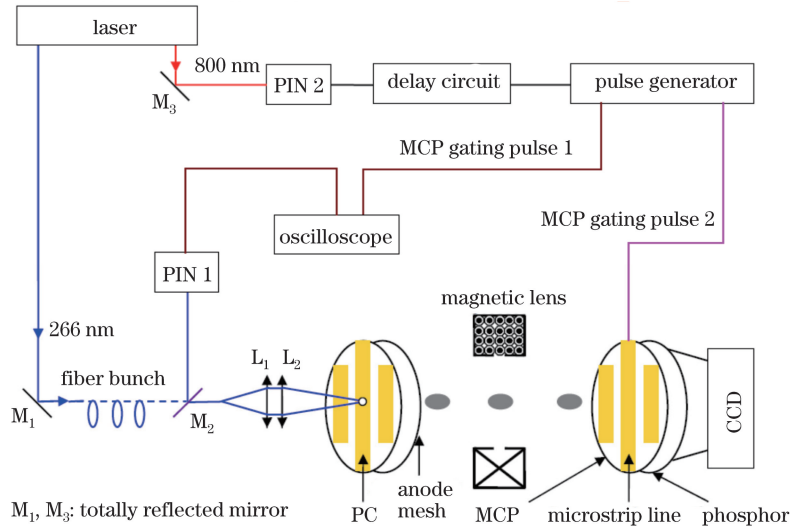


图 3 TOF 测量装置示意图

Fig. 3 Experimental setup of TOF measurement

当 PC 电压为 -3.5 kV, MCP 加载选通脉冲幅值为 -1.6 kV、半峰全宽(FWHM)为 200 ps,直流偏置电压为 -400 V,荧光屏电压为 3.4 kV 时,CCD 观测到动态图像,即电子和选通脉冲同步到达 MCP,此时示波器上获得的脉冲波形如图 4 所示。可以看出,PIN 1 电脉冲和选通脉冲 1 的时间差为 15 ns,即能量为 3.5 keV 的电子从 PC 到 MCP 的 TOF 约为 15 ns。

由于只有当电子到达 MCP 时,选通脉冲才传输至 MCP,故可以忽略选通脉冲对 TOF 的影响。当考虑 MCP 所加的 -400 V 直流偏置电压对 TOF

的影响时,TOF 可以简单计算如下。

电子经过栅网时的速度为

$$v = \sqrt{-2eU/m}, \quad (1)$$

式中 e 为电子电荷量, U 为 PC 电压, m 为电子质量。

PC 和栅网间电子的 TOF 为

$$t_1 = \frac{2L_1}{v}, \quad (2)$$

式中 PC 与栅网间的距离 $L_1 = 1.8$ mm。

电子到达 MCP 时的速度为

$$v' = \sqrt{v^2 + 2eU'/m}, \quad (3)$$

式中 U' 为 MCP 直流偏置电压。

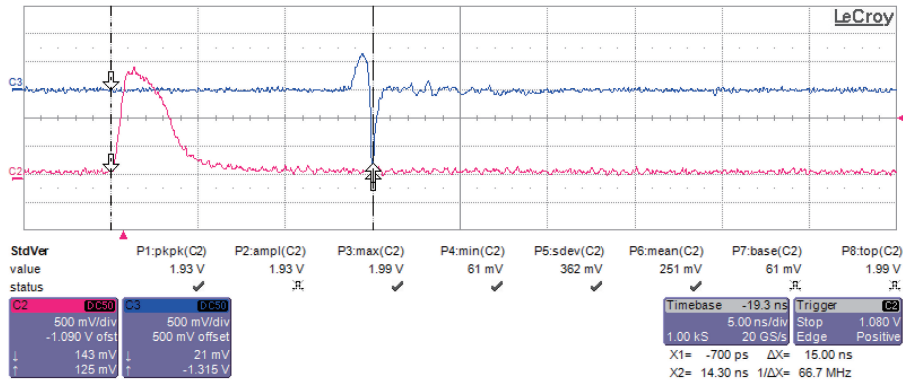


图 4 TOF 测量结果

Fig. 4 Measurement results of TOF

栅网和 MCP 间的电子 TOF 为

$$t_2 = \frac{2L_2}{v + v'}, \quad (4)$$

式中栅网与 MCP 间的距离 $L_2 = 50$ cm。

电子从 PC 至 MCP 的 TOF 为

$$t = t_1 + t_2. \quad (5)$$

改变 PC 电压, 获得的电子 TOF 与电子到达栅网时的能量之间的关系如图 5 所示。可以看出, 电子能量越大, 电子的 TOF 越小, 理论结果和实验结果一致。

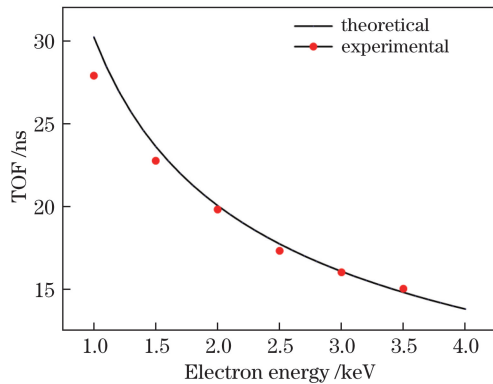


图 5 电子 TOF 与能量的关系

Fig. 5 Relationship between TOF of electrons and electron energy

当 PC 电压为 -3.5 kV, MCP 仅加载 -600 V 的直流电压时, 光纤的静态图像如图 6 所示。当 PC 电压为 -3.5 kV, MCP 加载选通脉冲和 -400 V 的直流偏置电压时, 光纤的动态图像如图 7 所示。将动态图像用静态图像进行归一化处理, 然后将归一化后动态图像的光强-空间分布转换成光强-时间分布, 再对实验数据进行高斯拟合, 即可获得动态图像的长度-时间分布曲线, 如图 8 所示, 该曲线的 FWHM 即为系统的时间分辨率。由图 8 可得, 高斯拟合曲线的 FWHM 为 88 ps, 即系统的时间分辨

率为 88 ps。系统时间分辨率与 MCP 厚度、MCP 选通脉冲密切相关, 减小 MCP 厚度、减小选通脉冲 FWHM 或增大选通脉冲幅值均可以提高时间分辨率^[14,27]。因此, 优化上述参数可以使系统获得更高的时间分辨率。

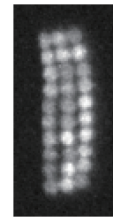


图 6 光纤的静态图像

Fig. 6 Static image of fiber

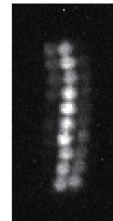


图 7 光纤的动态图像

Fig. 7 Dynamic image of fiber

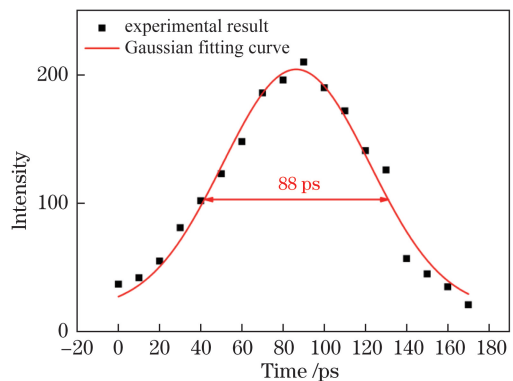


图 8 时间分辨率的测量结果

Fig. 8 Measurement results of time resolution

4 结 论

研究了基于 MCP 选通技术的电子 TOF 测量系统。当电子与选通脉冲到达 MCP 的时间同步时, CCD 上可获得动态图像, 否则, CCD 上无信号。当 CCD 观测到动态图像时, 利用高速示波器获得 PIN 1 电脉冲和选通脉冲的波形, 这两者的时间差即为电子从 PC 到 MCP 的 TOF。当 PC 电压为 -3.5 kV, 测得能量为 3.5 keV 的电子从 PC 到 MCP 的 TOF 约为 15 ns。理论和实验研究了电子 TOF 和电子能量的关系, 电子 TOF 随着电子能量的增大而减小, 且理论结果和实验结果相符。此外, 现有参数下系统的时间分辨率为 88 ps, 减小 MCP 厚度、减小选通脉冲 FWHM 或增大选通脉冲幅值可使系统获得更高的时间分辨率。该系统为电子 TOF 的测量提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] Stephens W E. A pulsed mass spectrometer with time dispersion[J]. *Physical Review*, 1946, 69(11): 691-670.
- [2] Cameron A E, Eggers D F. An ion "velocitron"[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1948, 19(9): 605-607.
- [3] Wang C, Tian J S, Zhang M Z, *et al.* Design of combined magnetic field system for magnetic-bottle time-of-flight spectrometer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1810-1812.
王超, 田进寿, 张美志, 等. 磁瓶飞行时间谱仪用复合磁场系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1810-1812.
- [4] Gao R, Brook N, García L C, *et al.* Precision electronics for a system of custom MCPs in the TORCH time-of-flight detector[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12(3): C03008.
- [5] García L C, Brook N, Cussans D, *et al.* The TORCH time-of-flight detector for particle identification and photon vertex association[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12: C02005.
- [6] Buckwalter S P, Olson S L, Connelly B J, *et al.* Evaluation of matrix-assisted laser desorption ionization-time of flight mass spectrometry for identification of mycobacterium species, nocardia species, and other aerobic actinomycetes[J]. *Journal of Clinical Microbiology*, 2016, 54(2): 376-384.
- [7] Sano K, Takahashi Y, Yamanashi Y, *et al.* Demonstration of single-flux-quantum readout circuits for time-of-flight mass spectrometry systems using superconducting strip ion detectors[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2015, 28(7): 074003.
- [8] Kataoka M, Johnson N, Emary C, *et al.* Time-of-flight measurements of single-electron wave packets in quantum Hall edge states[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(12): 126803.
- [9] Lin W J, Zhao J W, Sun B H, *et al.* Plastic scintillation detectors for precision time-of-flight measurements of relativistic heavy ions[J]. *Chinese Physics C*, 2017, 41(6): 066001.
- [10] de Angelis R, Consoli F, Verona C, *et al.* High performance diagnostics for time-of-flight and X ray measurements in laser produced plasmas, based on fast diamond detectors[J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 11(12): C12048.
- [11] Caggiano J A, Barbosa F, Clancy T J, *et al.* Design of a north pole neutron time-of-flight (NTOF) system at NIF[J]. *Journal of Physics*, 2016, 717(1): 012087.
- [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 Science Instruments*, 2010, 81(10): 10E317.
- [13] Cai H Z, Long J H, Liu J Y, *et al.* Picosecond framing camera based on electron pulse time-dilation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206001.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 电子束时间展宽皮秒分幅相机[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1206001.
- [14] 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.
- [15] Cai H Z, Long J H, Liu J Y, *et al.* Non-gain microchannel plate picosecond framing technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 109-112.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 无增益微通道板皮秒分幅技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S): 109-112.
- [16] 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 Science Instruments*, 2014, 85(11): 11E504.
- [17] Cai H Z, Long J H, Liu J Y, *et al.* Time focus technology for the electron bunch[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 36(2): 0204001.
蔡厚智, 龙井华, 刘进元, 等. 电子束时间聚焦技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0204001.
- [18] Bai Y L. Research on temporal and spatial resolution of pulse-dilation framing tube[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017: 1-10.

- 白雁力. 时间展宽分幅变像管时空性能研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017: 1-10.
- [19] Eckart M J, Hanks R L, Kilkenny J D, *et al.* Large-area 200-ps gated microchannel plate detector[J]. Review of Scientific Instruments, 1986, 57(8): 2046-2048.
- [20] Lei Y F, Long J H, Liu J Y, *et al.* Design of framing image tube with large detection area[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904009. 雷云飞, 龙井华, 刘进元, 等. 大探测面积分幅变像管设计[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904009.
- [21] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. Nature Physics, 2016, 12: 435-449.
- [22] Liao Y B, Long J H, Cai H Z, *et al.* Numerically simulated static spatial resolution of framing image converter using magnetic focusing via matlab[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 012301. 廖昱博, 龙井华, 蔡厚智, 等. 磁聚焦分幅变像管静态空间分辨率的 Matlab 模拟研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 012301.
- [23] Callahan D A, Hurricane O A, Hinke D E, *et al.* Higher velocity, high-foot implosions on the national ignition facility laser[J]. Physics of Plasmas, 2015, 22(5): 056314.
- [24] Bai Y L, Long J H, Cai H Z, *et al.* Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 013201. 白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013201.
- [25] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, *et al.* Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. Nature, 2014, 506(7488): 343-348.
- [26] Cai H Z, Liu J Y. Investigation and application of ultrafast pulse circuitry[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2010, 27(1): 33-36. 蔡厚智, 刘进元. 超快脉冲电路的研制及应用[J]. 深圳大学学报理工版, 2010, 27(1): 33-36.
- [27] Bell P M, Kilkenny J D, Hanks R, *et al.* Measurements with a 35-psec gate time microchannel plate camera[C]. SPIE, 1990, 1346: 456-464.