

## 时间展宽分幅变像管的时间分辨率探究

白雁力<sup>1,2</sup>, 龙井华<sup>3</sup>, 蔡厚智<sup>1</sup>, 廖昱博<sup>1</sup>, 雷云飞<sup>1</sup>, 刘进元<sup>1</sup>

(1. 深圳大学 光电工程学院, 广东 深圳 518060;

2. 桂林电子科技大学 教学实践部, 广西 桂林 541004; 3. 深圳大学 物理学院, 广东 深圳 518060)

**摘要:** 采用经典公式、平均场理论和脉冲展宽模型研究时间展宽分幅管的物理和技术时间分辨率。分析电子初能、阴极偏置、阴极脉冲斜率和漂移距离等参数对时间分辨率的影响。讨论时间分辨率处于皮秒级和亚皮秒级时物理和技术时间分辨率所起的作用, 并探讨实现亚皮秒级时间分辨率的可能性。研究表明: 物理和技术时间分辨率相互制约, 当像管时间分辨率处于 5 ps 量级时, 技术时间分辨率决定像管时间分辨率; 当像管时间分辨率提升到亚皮秒量级时, 物理和技术时间分辨率处于同量级, 像管时间分辨率由两者共同决定。

**关键词:** 分幅变像管; 时间展宽技术; 时间分辨率; 超快诊断技术

**中图分类号:** TN143; O536 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0063-05

## Research on temporal resolution of pulse-dilation framing tube

Bai Yanli<sup>1,2</sup>, Long Jinghua<sup>3</sup>, Cai Houzhi<sup>1</sup>, Liao Yubo<sup>1</sup>, Lei Yunfei<sup>1</sup>, Liu Jinyuan<sup>1</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Department of Education Practice, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

3. College of Physics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The physical and technology temporal resolution of pulse dilation frame tube were studied by the classic formula, the mean field theory and the pulse dilation model. The influence of the parameters on temporal resolution was analyzed, which are the initial energy, the cathode biased, the ramp pulse and the drift distance, etc. The effect of the physical and technology temporal resolution in picosecond (ps) and the sub-ps time scale and the possibility of achieving sub-ps of temporal resolution were discussed. The results show that the physical and technology temporal resolution are restricted each other. The temporal resolution of tube is decided by the technology temporal resolution when temporal resolution is 5 ps time scale. The temporal resolution of tube is decided by the physical and technology temporal resolution when the temporal resolution is sub-ps time scale.

**Key words:** framing tube; pulse dilation technology; temporal resolution; ultrafast diagnostic technique

收稿日期: 2015-10-18; 修订日期: 2015-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(11305107); 广西教育厅科研项目(LX2014125)

作者简介: 白雁力(1979-), 男, 博士, 主要从事超快诊断方面的研究。Email: bayaly@szu.edu.cn

通讯作者: 龙井华(1972-), 女, 副教授, 博士, 主要从事超短激光脉冲测量和全固态激光技术方面的研究。Email: jhlong@szu.edu.cn

## 0 引言

惯性约束聚变(Inertial Confined Fusion, ICF)即靶丸聚变,是利用高功率的脉冲能束均匀照射微球靶丸,由靶面物质的消融喷离产生的反冲力使靶内氘氚燃料快速地爆聚至超高密度和热核温度,从而点燃的高效率释放聚变能的微型热核爆炸<sup>[1]</sup>。X射线分幅相机是一种具有皮秒级时间分辨和微米级二维空间分辨能力的超快诊断设备<sup>[2-4]</sup>,因此广泛应用于 ICF 实验中。目前,大多数用于 ICF 实验的分幅相机是基于微通道板(Micro-Channel Plates-MCP)的近贴聚焦设备,时间分辨率约为 100 ps<sup>[5-7]</sup>。近几年,研究者成功研制了时间展宽分幅变像管,其时间分辨率约为 10 ps,并指出该像管的时间分辨率与阴极偏置、脉冲斜率、漂移距离和 MCP 门控时间等参数密切相关,为进一步提升像管时间分辨率提供了研究基础<sup>[8-10]</sup>。

时间展宽分幅像管的时间分辨率能成倍提升,源于其结构的改变。像管采用长漂移区设计,在漂移区两边分别是产生光电子的光阴极和采集光电子的 MCP。通过脉冲展宽技术将漂移的光电子信号在时间上展宽,使 MCP 采集到展宽后的部分光电子信号,以此成倍提高分幅像管的时间分辨率。参考文献[9-10]中提到与时间分辨相关的参数,实质上主要影响电子脉冲展宽倍率,属于技术时间分辨率范畴,可以通过优化参数不断提升技术时间分辨率。但实际上,当技术时间分辨率提升到一定程度时,像管结构改变带来的内部因素将对其时间分辨率产生一定的影响,即物理时间分辨率的影响,这一点在文献中并未提及。因此,在像管时间分辨率不断提升的情况下,对物理时间分辨的详细分析是非常必要的,具有重要的理论和实践意义。文中对时间展宽分幅管的时间分辨率进行全面研究。详细分析电子初能、阴极偏置、阴极脉冲斜率和漂移距离等参数对物理和时间分辨率的影响,讨论时间分辨处于皮秒和亚皮秒级时,物理和技术时间分辨所起的作用和两者之间的关系,并探讨实现亚皮秒级时间分辨的可能性。

## 1 像管工作原理和时间分辨率

图 1 所示为时间展宽分幅管的结构和工作原理。光阴极将入射信号转换为光电子,由于阴极加负直流高压和正斜坡脉冲,先产生的光电子具有较大的漂

移能量和漂移速度。所以,当光电子信号通过漂移区到达 MCP 时,光电子信号在时间上被展宽。在漂移区末端,由于 MCP 分幅相机选择展宽后的部分光电子信号,成倍提高了其时间分辨率。

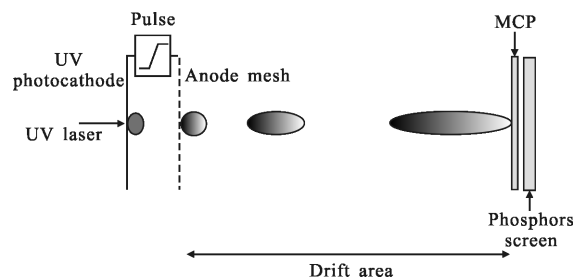


图 1 时间展宽分幅管工作原理

Fig.1 Working principle of pulse dilation framing tube

图 1 的像管结构与飞秒条纹管相似<sup>[11]</sup>,因此,其时间分辨率  $T_{temp}$  由物理时间分辨率  $T_{phy}$  和技术时间分辨率  $T_{tec}$  组成:物理时间分辨率  $T_{phy}$  主要考虑阴栅极之间的时间弥散  $\Delta T_{pca}$  和漂移区中空间电荷效应引起的时间弥散  $\Delta T_{dsp}$ 。其中  $\Delta T_{pca}$  由  $\Delta T_e$ (电子初能引起的时间弥散)和  $\Delta T_{asp}$ (阴栅极中空间电荷效应引起的时间弥散)组成。技术时间分辨率  $T_{tec}=T_{mcp}/M$ ,其中  $T_{mcp}$  为 MCP 的门控时间, $M$  为电子脉冲的展宽倍率。因此,时间分辨率可描述为:

$$T_{temp} = \sqrt{T_{phy}^2 + T_{tec}^2} \quad (1)$$

$$T_{phy} = \sqrt{\Delta T_{pca}^2 + \Delta T_{dsp}^2} \quad (2)$$

$$\Delta T_{pca} = \sqrt{\Delta T_e^2 + \Delta T_{asp}^2} \quad (3)$$

## 2 技术时间分辨率分析

假设阴极产生的电子束能量分布如图 2 所示,  $\Delta t_{pw}=t_2-t_1=10$  ps 为能量分布半宽度,电子初能 0.5 eV,电子脉冲的漂移能量  $E$  eV。当阴栅极间加斜率为  $\alpha=-10$  V/ps 的超快斜坡脉冲时,先产生的电子具有较高的漂移能量。图 2 中,对于能量为  $E_1=E+0.5$  eV 的电子,在加有斜坡脉冲的阴栅极间,加速电压为  $(V_{DC})_{E1}=0$ 。能量为  $E_2=E$  的电子,加速电压为  $(V_{DC})_{E2}=10 \times -10 = -100$  V。其中电子脉冲宽度为 10 ps,斜坡脉冲为  $-10$  V/ps。因此,在斜坡脉冲作用下,  $E_1'=E_1$ ,  $E_2'=E_2-100$  eV,电子脉冲能量分布半宽度  $\Delta E'=E_1'-E_2'=100.5$  eV。假设电子脉冲通过漂移区  $L$  中没有能量损耗,那么电子脉冲分布宽度和展宽倍率分别可用公式

(4)和(5)描述,其中  $m$  为电子质量,  $e$  为电荷量。

$$\Delta T_{dm} = L \left( \sqrt{\frac{m}{2E_2'}} - \sqrt{\frac{m}{2E_1'}} \right) + \Delta t_{pw} \quad (4)$$

$$M = \Delta T_{dm} / \Delta t_{pw} \quad (5)$$

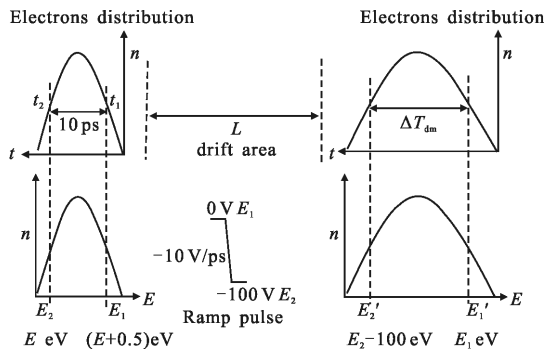
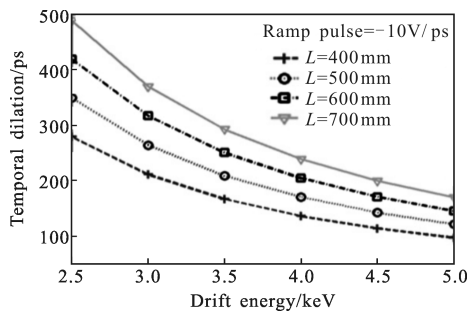


图 2 电子束在漂移区中的展宽过程

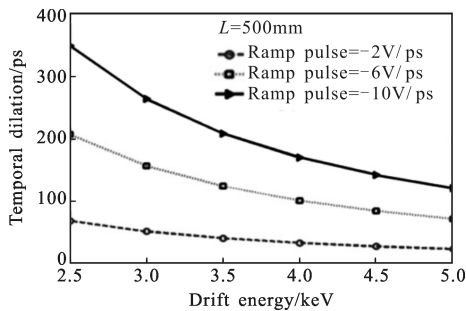
Fig.2 Process of electron dilation in the drift area

以初能 0.5 eV 和能量分布半宽度 10 ps 的电子脉冲为例,漂移能量、斜坡脉冲和漂移距离与电子脉冲展宽的关系如图 3 所示。从图中可以看出,电子脉



(a) 不同漂移距离下电子脉冲展宽与漂移能量的关系

(a) Temporal dilation vs drift energy in the case of different drift distance



(b) 不同斜坡脉冲下电子脉冲展宽与漂移能量的关系

(b) Temporal dilation vs drift energy in the case of different ramp pulse

图 3 电子脉冲在漂移区中的展宽

Fig.3 Temporal dilation in the drift area

冲展宽与漂移能量成反比,与漂移距离和斜坡脉冲成正比。

### 3 物理时间分辨率分析

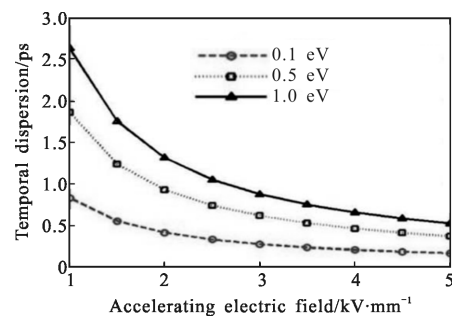
#### 3.1 阴栅极间的渡越时间弥散

阴栅极间的渡越时间弥散  $\Delta T_{pca}$  由电子初能和空间电荷效应引起的时间弥散  $\Delta T_e$  和  $\Delta T_{asp}$  组成,具体分析如下。

(1) 电子初能引起的时间弥散  $\Delta T_e$  采用经典公式描述<sup>[12]</sup>:

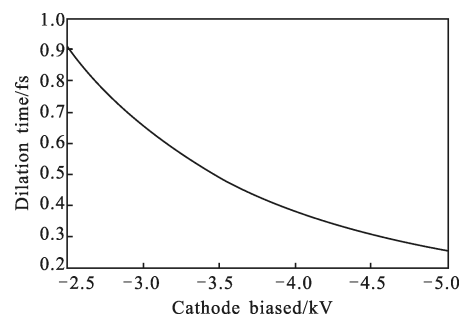
$$\Delta T_e = 2.63 \sqrt{\delta} / E \quad (6)$$

式中:  $\delta$  为电子初能, eV;  $E$  为阴栅极间的加速电场, kV/mm。加速电场、电子初能和渡越时间弥散的关系如图 4(a)所示,三条曲线分别代表电子初能为 0.1 eV、0.5 eV 与 1 eV 在不同加速电场中的时间弥散变化趋势。当  $\delta=0.1$  eV、 $E=5$  kV/mm 时,  $\Delta T_e=0.17$  ps; 当  $\delta=1$  eV、 $E=1$  kV/mm 时,  $\Delta T_e=2.63$  ps。因此,渡越时间弥散与电子初能成正比,与加速电场成反比。



(a) 不同电子初能的电子在不同加速电场中的时间弥散

(a) Temporal dispersion vs accelerating electric field in the case of different initial energy



(b) 空间电荷效应引起的时间弥散与阴极电压的关系

(b) Dilation time of space charge effect vs cathode biased

图 4 阴栅极之间的渡越时间弥散

Fig.4 Temporal dispersion in the cathode-anode gap

(2) 阴栅极间空间电荷效应引起的展宽  $\Delta T_{\text{asp}}$

空间电荷效应是真空电子器件中普遍存在的物理现象, 即当带电粒子束的电子密度达到一定程度时, 库仑力对电子运动轨迹产生明显影响, 并导致电子束发散的现象。考虑到时间展宽分幅管的电子脉冲宽度大于其半径的情况, 文中采用平均场模型<sup>[13]</sup>, 不考虑脉冲半径变化, 阴栅极间空间电荷效应引起的时间弥散  $\Delta T_{\text{asp}}$  可描述为:

$$\Delta l = \frac{Ne^2}{m\varepsilon\pi r^2} \frac{1}{1+l/r+\sqrt{1+l^2/r^2}} t_d^2 \quad (7)$$

$$l = \Delta t_{\text{pw}} * v_d \quad (8)$$

$$\Delta T_{\text{asp}} = \Delta l / v_d \quad (9)$$

式中:  $t_d$  为电子脉冲通过阴栅极的时间;  $v_d$  为电子脉冲速度;  $e$  和  $m$  分别为电子的电荷和质量;  $\varepsilon$  为真空介电常数;  $l$  为电子脉冲初始脉宽;  $r$  为电子脉冲半径。

以  $N=1\,000$ 、 $r=200\ \mu\text{m}$ 、 $\Delta t_{\text{pw}}=10\ \text{ps}$ 、阴栅间距  $1\ \text{mm}$  为例, 空间电荷效应引起的时间弥散如图 4(b) 所示。图中显示: 空间电荷效应引起的时间弥散相当小, 对物理时间分辨的影响也很小。

### 3.2 漂移区中空间电荷效应引起的展宽 $\Delta T_{\text{dsp}}$

由图 1 和公式(4)可知, 在时间展宽分幅管中, 电子脉宽随漂移时间变宽, 即其电子密度逐渐变小。不考虑脉冲半径变化, 通过公式(7)修正, 漂移区中空间电荷效应引起的时间弥散可描述为:

$$\Delta l = \sum_0^{i-1} \Delta l_i = \frac{N_0 e^2}{m\varepsilon\pi r^2} \frac{1}{1+l_i/r+\sqrt{1+l_i^2/r^2}} \Delta t_i^2 \quad (10)$$

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \quad (11)$$

$$\Delta T_{\text{dsp}} = \Delta l / v_m \quad (12)$$

$$n_i = \frac{N}{\pi r^2 l_i} \quad (13)$$

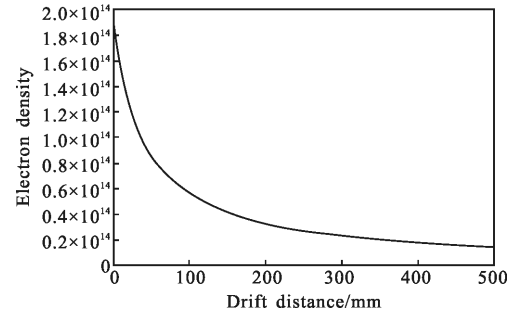
由公式(4)可推导  $l_i$  与  $t_i$  的关系如下:

$$l_i = \left( \sqrt{\frac{2E_1}{m}} - \sqrt{\frac{2E_2}{m}} \right) * t_i + l_0 \quad (14)$$

式中:  $n_i$  和  $l_i$  分别为  $t_i$  时刻的电子密度和电子脉宽;  $\Delta t_i$  为脉宽为  $l_i$  的电子脉冲的漂移时间;  $v_m$  为电子脉冲的平均速率;  $e$  和  $m$  为电子电量和质量;  $r$  为电子脉冲半径;  $N$  为电子数目;  $\varepsilon$  为真空介电常数。

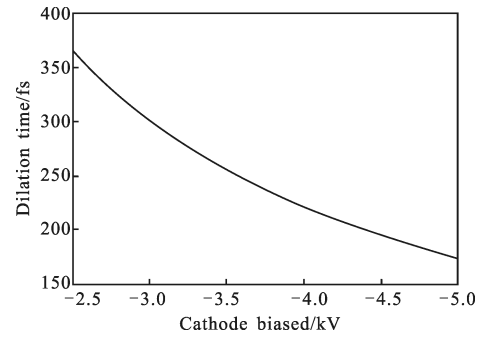
以  $N=1\,000$ 、 $r=200\ \mu\text{m}$ 、斜坡脉冲为  $10\ \text{V/ps}$ 、漂移距离为  $500\ \text{mm}$ 、阴极电压  $-5\ \text{kV}$  为例, 图 5(a) 表示电子密度  $n$  随漂移距离而变化, 漂移距离越大, 电子脉宽越大, 电子密度越小。图 5(b) 描述的是不同阴极电压下,

空间电荷效应引起电子脉冲展宽。在相同条件下, 阴极电压越高, 空间电荷效应引起的时间弥散越小。



(a) 电子密度随漂移距离变化关系

(a) Electron density vs drift distance



(b) 不同阴极电压下空间电荷效应引起的展宽

(b) Temporal dilation of space charge effect vs different cathode biased

图 5 空间电荷效应展宽

Fig.5 Space charge effect

## 4 物理和技术时间分辨的影响分析

公式(1)指出, 时间展宽分幅变像管的时间分辨率由物理和技术时间分辨率组成。以初能量  $0.5\ \text{eV}$  的电子(其脉宽为  $10\ \text{ps}$ 、漂移距离为  $500\ \text{mm}$ 、加速带为  $1\ \text{mm}$ 、阴极电压为  $-4\ \text{kV}$ 、斜坡脉冲为  $10\ \text{V/ps}$ 、电子个数为  $1\,000$ 、电子束半径为  $200\ \mu\text{m}$ )为例, 通过公式(4)~(12)计算可知: 在阴栅极间, 电子初能造成的时间弥散  $\Delta T_e=0.47\ \text{ps}$ , 空间电荷效应引起的时间弥散  $\Delta T_{\text{asp}}=4*10^{-4}\ \text{ps}$ ; 在漂移区中, 空间电荷效应引起的时间弥散  $\Delta T_{\text{dsp}}=0.27\ \text{ps}$ , 电子脉冲的展宽倍率  $M \sim 17\times$ ; 根据公式(2)~(3)计算物理时间分辨率  $T_{\text{phy}} \sim 0.54\ \text{ps}$ ; 假定 MCP 门控时间  $T_{\text{mcp}}=80\ \text{ps}$ , 技术时间分辨率  $T_{\text{tec}} \sim 4.7\ \text{ps}$ ; 时间展宽分幅管的总时间分辨率  $T_{\text{temp}} \sim 4.8\ \text{ps}$ 。

由上述分析可知, 时间展宽分幅管的时间分辨率提升, 在一定程度上取决于技术时间分辨率, 而物

理时间分辨率影响相对较小。但是,如果要进一步提升时间分辨的量级,在提高技术时间分辨率的同时,还需考虑物理时间分辨率的影响。在条件不变的情况下,将漂移区设为 1 000 mm 和阴极电压-3.5 kV,那么在漂移区中,电子脉冲展宽倍率  $M \sim 43 \times$ ,技术时间分辨率  $T_{\text{tec}} \sim 1.86$  ps,空间电荷效应引起的时间弥散  $\Delta T_{\text{dsp}} \sim 0.68$  ps;在阴栅极之间:电子初能造成的时间弥散  $\Delta T_e = 0.53$  ps,空间电荷效应引起的时间弥散  $\Delta T_{\text{asp}} = 5 \times 10^{-4}$  ps;物理时间分辨率  $T_{\text{phy}} \sim 0.86$  ps;总的分辨率  $T_{\text{temp}} \sim 2.05$  ps。从上述情况分析,技术时间分辨率的提升要求改变像管的物理条件,如漂移距离,这直接影响到物理时间分辨。随着总时间分辨率的不断提升,物理时间分辨率所占比例不断上升,而技术时间分辨率所占比例反而减小。因此,对于时间展宽分幅管来说,当时间分辨率处于 5 ps 左右时,技术时间分辨率起主导作用,物理时间分辨率影响较小;但当时间分辨率达到亚皮秒级时,技术和物理时间分辨率的作用相当。

## 5 结论

从阴栅极之间的时间弥散、电子脉冲在漂移区的展宽和空间电荷效应展宽三个方面对时间展宽分幅管的物理和技术时间分辨率进行研究,分析电子初能量、加速电场、阴极电压、电子密度、脉冲斜率和漂移距离等参数对时间分辨率的影响,并讨论在皮秒级和亚皮秒级时间分辨率情况下,物理和技术时间分辨率对像管的影响。模拟结果显示,物理时间分辨与电子初能、阴极电压、电子密度以及漂移距离等参数有关;而技术时间分辨与电子脉冲展宽倍率相关。通过对模拟结果的分析得到,物理和技术时间分辨率之间相互制约,时间分辨越快,制约越明显,特别是时间分辨达到亚皮秒量级。因此,通过参数优化解决物理与技术时间分辨率之间的制约,是实现亚皮秒或更高量级时间分辨率的关键,也是时间展宽分幅管性能提高的研究重点之一。

## 参考文献:

- [1] Jiang Shaoen, Jing Longfei, Huang Yunbao, et al. Novel free-form hohlraum shape design and optimization for laser-driven inertial confinement fusion [J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 102710-1-102710-10.
- [2] Xiong Gang, Hu Zhimin, Li Hang, et al. One-dimensional space resolving flat-field holographic grating soft X-ray framing camera spectrograph for laser plasma diagnostics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82 (4): 043109-1-043109-5.
- [3] Bai Yanli, Zhang Chi, Zhang Jingjin. X-ray framing camera review [J]. *Video Engineering*, 2013, 37(19): 254-257. (in Chinese)
- [4] Bai Yanli, Long Jinghua, Cai Houzhi, et al. Simulated and measured spatial resolution of framing converter using short magnetic focusing [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2015, 32(2): 178-182. (in Chinese)
- [5] Oertel J A, Archuleta T N, Schrank L S. The large format X-ray imager [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 701-704.
- [6] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Niu Lihong, et al. Non-gain microchannel plate gated framing camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(5): 056102-1-056102-3.
- [7] Cai Houzhi, Liu Jinyuan, Peng Xiang, et al. Design of an X-ray framing camera with wide microstrip line [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0117001-1-0117001-7. (in Chinese)
- [8] 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): 10E317-1-10E317-6.
- [9] 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): 10E116-1-10E116-3.
- [10] 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): 11E504-1-11E504-6.
- [11] Wang Qiangqiang, Tian Jinshou, Ding Yongkun, et al. Design of magnetic focusing femtosecond streak tube with prepositive traveling wave deflector [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 034005-1-034005-5. (in Chinese)
- [12] Tian Jinshou, Lei Xiaohong, Wen Wenlong, et al. Compression of electron pulses in temporal domain [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2379-2385. (in Chinese)
- [13] Collin S, Merano M, Gatri M, et al. Transverse and longitudinal space-charge-induced broadenings of ultrafast electron packets [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98 (9): 094910-1-094910-6.