

文章编号 1004-924X(2018)02-0261-07

空间电荷效应对时间展宽分幅变像管时空性能的影响

白雁力*, 姚荣彬, 高海英, 党选举, 何国民
(桂林电子科技大学 教学实践部, 广西 桂林 541004)

摘要: X 射线分幅相机是惯性约束聚变实验中的重要二维超快诊断设备, 具有长漂移区结构的时间展宽分幅相机, 在大幅度提升时间分辨性能的同时, 会使空间电荷效应时空弥散变大。为探讨空间电荷效应的影响, 以短磁聚焦分幅变像管为例, 通过平均场模型和电子轨迹及成像分布研究空间电荷效应的时空弥散, 并分析其对像管的影响。研究和分析结果表明, 空间电荷效应引起的时间弥散与阴极电压、展宽脉冲斜率和漂移距离有关, 空间弥散与成像系统和电子脉冲电流密度相关。当分幅变像管的时间分辨率提升至 2 ps 左右时, 空间电荷效应的时间弥散相当于物理时间分辨, 成为制约时间分辨性能进一步提升的主要因素, 此时像管空间分辨性能降低 8 % 左右。通过对像管空间电荷效应研究及其降低方法的探讨, 为亚皮秒时间分辨分幅变像管的研制提供理论参考。

关键词: 光电子学与激光技术; 空间电荷效应; 平均场模型; 时间展宽分幅变像管; 时间分辨性能; 空间分辨性能
中图分类号: TN143; O536 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0261

Influence of space charge effect on temporal-spatial performance of pulse-dilation framing tube

BAI Yan-li*, YAO Rong-bin, GAO Hai-ying, DANG Xuan-ju, HE Guo-min

(Department of Education Practice, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: bayalf@guet.edu.cn

Abstract: X-Ray framing cameras are an important two-dimensional ultrafast diagnostic tool in inertial confined fusion experiments. Although the temporal performance of framing cameras is further improved by the long drift area, the space charge effect (SCE) is increased as well. In order to study the influence of SCE on the framing tube, similar to the magnetic focused framing tube, for example, the temporal dispersion and spatial dispersion of SCE are studied using the mean field model, electron trajectory, and imaging distribution, and the influence of SCE on the framing tube is analyzed. The results of study and analysis show that the temporal dispersion is related to the cathode bias, dilated pulse, and drift distance, and the spatial dispersion is related to the imaging system and electron density. When the temporal resolution is improved to ~ 2 ps, further increase of temporal resolution is restricted by the temporal dispersion, which is a major factor and close to physical temporal; the spatial resolution is decreased to ~ 8 %. A theoretical reference for the sub-picosecond framing tube is

收稿日期: 2017-07-13; 修订日期: 2017-08-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61263013); 广西自然科学基金重点项目 (No. 2016GXNSFDA380001); 广西高校中青年教师基础能力提升项目 (No. 2017KY0199); 广西教育厅高校科学技术研究项目 (No. YB2014131)

provided by studies on SCE and methods of its reduction.

Key words: optoelectronics and laser technology; space charge effect; mean field model; pulse-dilation framing tube; temporal resolution; spatial resolution

1 引言

X 射线分幅相机是一种具有皮秒级(ps)时间分辨和微米级(μm)二维空间分辨能力的超快诊断设备,在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)实验中广泛应用于聚变持续时间测量和内爆运动图像获取^[1-7]。随着 ICF 实验对高时间分辨的需求,近年来,国内外研究者采用电子束时间展宽技术研制出时间分辨率优于 10 ps 的时间展宽分幅相机^[8-11],并对其时空性能展开了进一步的理论分析。美国利弗莫尔实验室的研究者^[9-10]指出:相机时间分辨性能与漂移区长度、阴极电压和展宽脉冲斜率有关,而采用均匀磁场成像的相机的空间分辨性能则与阴极逸出电子能量和磁场强度相关。国内研究者采用短磁聚焦成像技术设计时间展宽分幅变像管,使其空间分辨提升至 $100 \mu\text{m}$ ^[12],并指出时间分辨性能受到技术因素(阴极电压、漂移区长度和展宽脉冲斜率等)和物理因素(阴栅间时间弥散和空间电荷效应)的影响^[13-14]。

时间展宽分幅变像管的时间分辨性能与其长漂移区的结构设计有关。与飞秒条纹管和超快衍射系统相似^[15-16],随着时间分辨性能的进一步提升,像管结构等物理因素将严重影响其时空性能,特别是空间电荷效应现象。为研究和分析空间电荷效应对二维超快诊断设备的影响,本文在前期研究^[12-13]的基础上,以短磁聚焦时间展宽分幅变像管为对象^[7],采用平均场模型研究空间电荷效应,深入探讨它对像管时空分辨性能的影响。首先分析时间展宽分幅变像管的工作原理和电子脉冲传输特性;然后,优化平均场模型,数值模拟空间电荷效应对电子脉冲在轴向和径向的展宽;最后,分析空间电荷效应对像管时空分辨性能的影响,并探讨降低空间电荷效应的方法。

2 像管内电子脉冲特点

时间展宽分幅变像管的基本结构和工作原理

如图 1 所示。光电阴极将入射信号转换为光电子,由于阴栅间加载展宽脉冲,使先产生的光电子具有较大的漂移速率。当具有不同漂移速率的光电子通过长距离漂移后到达 MCP 时,光电子信号在时间上被展宽。在漂移区末端,由于 MCP 分幅像管选择展宽后的光电子信号,因此时间分辨率得到了成倍提升。

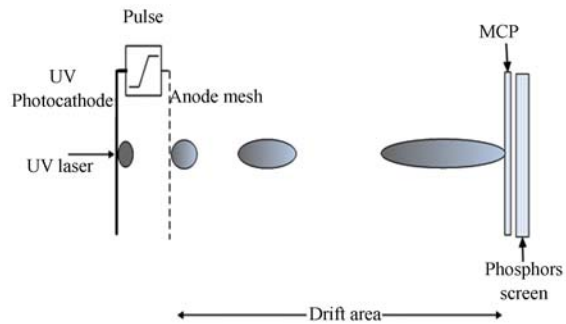


图 1 时间展宽分幅变像管的结构和工作原理

Fig. 1 Structure and working principle of pulse-dilation framing tube

以光电子脉冲初始宽度 $P_w = 130 \text{ fs}$ 、半径 $r = 200 \mu\text{m}$ 、电子数 $N_0 = 1\ 000$ 、阴极电压 $\Phi = -4 \text{ kV}$ 、展宽脉冲斜率 $R = 10 \text{ V/ps}$ 和漂移距离 $= 500 \text{ mm}$ 为例,在不考虑空间电荷效应和脉冲半径变化的情况下,脉冲宽度 l_i 和电子密度 n_i 的计算如式(1)~式(3)所示:

$$l_i = (v_1 - v_2) \times t_i + l_0, \quad (1)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{2e|\Phi_i|}{m}}, \quad (2)$$

$$n_i = \frac{N_0}{\pi r^2 l_i}, \quad (3)$$

其中:脉冲初始脉宽 $l_0 = v_1 \times P_w$;电子脉冲前沿的加速电压和电子速率分别为 $\Phi_1 = \Phi$ 和 v_1 ;后沿的加速电压和电子速率分别为 $\Phi_2 = \Phi + R \times P_w$ 和 v_2 ; l_i 和 n_i 分别是 t_i 时刻的脉冲宽度和电子密度; v_i 是电子漂移速度; e 和 m 分别是电子的电量和质量。根据上述公式,脉冲宽度和电子密度与漂移时刻 t_i 的关系如图 2 所示。

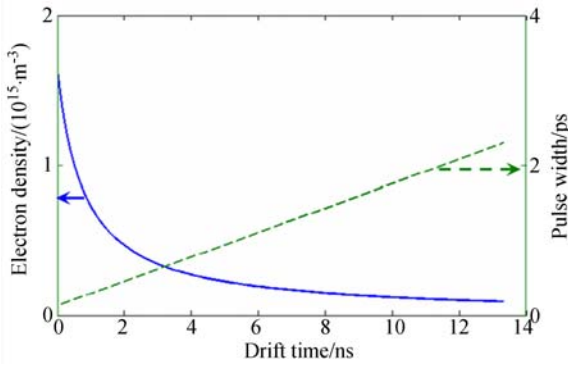


图 2 光电子脉冲宽度和电子密度与漂移时间的关系
Fig. 2 Pulse width and photoelectron density vs. drift time respectively

3 研究方法

空间电荷效应是真空电子器件中普遍存在的一种物理现象, 即当带电粒子束的电子密度达到一定程度时, 库伦力对电子的运动时间和轨迹产生明显影响, 并导致电子脉冲在时空上产生弥散。由于时间展宽分幅变像管中的电子脉冲受到脉冲展宽技术的影响, 在漂移过程中将出现脉宽 l 大于脉冲半径 r 的情况, 因此根据文献[17], 采用平均场模型更能准确地描述空间电荷效应引起的展宽。

平均场理论研究空间电荷效应的模型如图 3 所示, 其中电子脉冲是满足半径 r (x 和 y 方向) 和脉宽 l (z 方向) 的圆柱体, 并且均匀分布。在不考虑电子密度变化的情况下, 空间电荷效应引起的轴向展宽和径向展宽分别为^[17-20]:

$$\frac{d^2 l}{dt^2} = \frac{2 N_0 e^2}{m \epsilon \pi r^2} \frac{1}{1 + l/r + \sqrt{1 + l^2/r^2}}, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{N_0 e^2}{m \epsilon \pi r^2}. \quad (5)$$

根据二阶微分方程的物理意义, 通过求解式(4)和式(5), 可获得电子脉冲轴向展宽和径向展宽与漂移时间的关系:

$$\Delta l = \frac{N_0 e^2}{m \epsilon \pi r^2} \frac{1}{1 + l/r + \sqrt{1 + l^2/r^2}} t^2, \quad (6)$$

$$\Delta r = \frac{N_0 e^2}{2 m \epsilon \pi r^2} t^2, \quad (7)$$

其中: N_0 是电子脉冲的电子数, r 是电子束半径, ϵ 是真空中介电常数, t 是漂移时间。

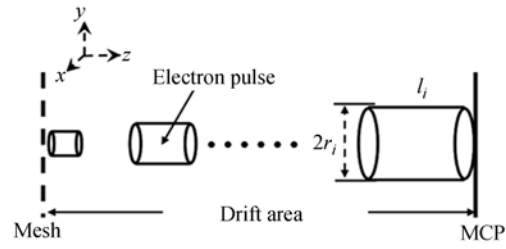


图 3 空间电荷效应对电子脉冲的展宽

Fig. 3 Broaden of electron pulse by space charge effect

根据图 2 脉冲电子密度随漂移时间变化的传输特性, 将式(6)和式(7)分别修正为式(8)和式(10):

$$\Delta l = \sum_0^{i-1} \Delta l_i = \frac{N_0 e^2}{m \epsilon \pi r_i^2} \frac{\Delta t_i^2}{1 + l_i/r_i + \sqrt{1 + l_i^2/r_i^2}}, \quad (8)$$

$$\Delta T_{dsp} = \Delta l / v_m, \quad (9)$$

$$\Delta r = \sum_0^{i-1} \Delta r_i = \frac{N_0 e^2}{2 m \epsilon \pi r_i^2} t_i^2, \quad (10)$$

其中: l_i 和 r_i 分别为 t_i 时刻的电子脉宽和半径, Δt_i 是脉宽 l_i 的电子漂移时间, ΔT_{dsp} 是轴向展宽, v_m 为电子脉冲的平均速率, Δr 是径向展宽, e 和 m 是电子的电量和质量。

4 数值模拟和分析

4.1 数值模拟

假设电子脉冲的初始宽度 P_w 为 130 fs、半径 r 为 200 μm 、电子个数 N_0 为 1 000, 展宽脉冲斜率 R 为 10 V/ps, 通过式(1)~式(10), 空间电荷效应引起的轴向展宽和径向展宽与阴极电压和漂移距离的关系如图 4 所示。

在不同阴极电压下, 当漂移距离为 500 mm, 阴极电压 Φ 由 -2 kV 提高到 -5 kV 时, 电子脉冲的轴向展宽从 1.35 ps 下降到 0.38 ps, 径向展宽从 37.5 μm 减小到 16.6 μm ; 在不同漂移距离下, 当阴极电压 Φ 为 -4 kV, 漂移距离由 500 mm 延长到 1 000 mm 时, 轴向展宽由 0.52 ps 上升到 1.63 ps, 径向展宽由 20.4 μm 增加到 66 μm 。模拟结果显示, 空间电荷效应的影响随阴极电压的提高而减小, 随漂移距离的增加而变大。

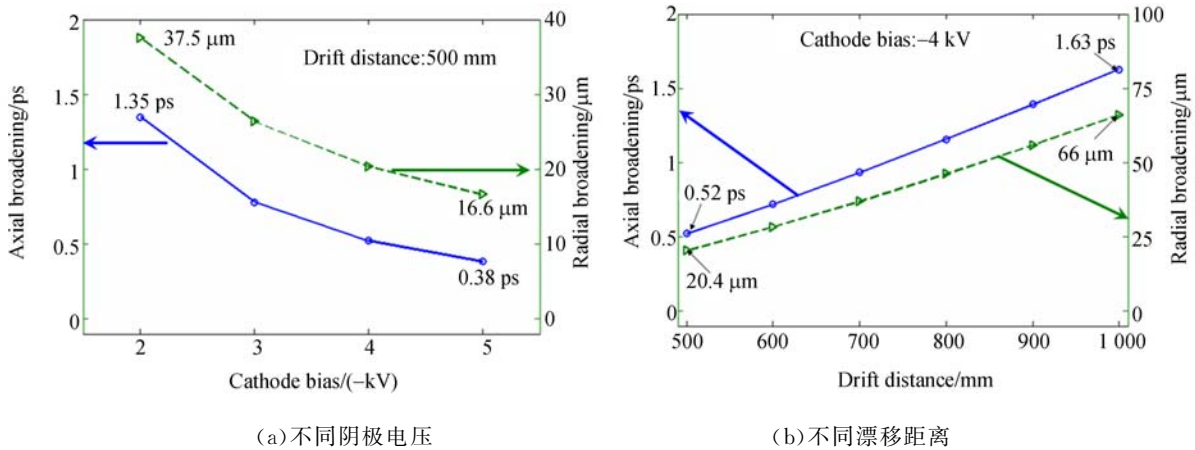


图 4 空间电荷效应引起的电子脉冲轴向展宽和径向展宽

Fig. 4 Axial and radial broadenings of electron pulse induced by space charge effect

4.2 空间电荷效应对时间分辨性能的影响

时间展宽分幅变像管的时间分辨率 T_{temp} 为:

$$T_{temp} = \sqrt{T_{phy}^2 + T_{tec}^2}, \quad (11)$$

$$T_{phy} = \sqrt{\Delta T_{pca}^2 + \Delta T_{dsp}^2}, \quad (12)$$

$$\Delta T_{pac} = 2.63 \sqrt{\delta}/E, \quad (13)$$

$$E = |\Phi_0|/d, \quad (14)$$

$$T_{tec} = T_{mcp}/M, \quad (15)$$

其中: T_{phy} 和 T_{tec} 分别为物理和技术时间分辨率, ΔT_{pca} 为阴栅间的时间弥散, ΔT_{dsp} 为空间电荷效应引起的时间弥散, T_{mcp} 为 MCP 选通分幅像管的时间分辨率, M 为电子脉冲展宽倍率。

以 130 fs 初始宽度、200 μm 半径和包含

1 000 个电子的电子脉冲, 展宽脉冲斜率为 10 V/ps, 以及 80 ps 时间分辨率的 MCP 选通分幅像管为分析条件, 在不同阴极电压和漂移距离下, 空间电荷效应对像管时间分辨率的影响如图 5 所示。模拟结果显示, 空间电荷效应引起的时间弥散随阴极电压的提高和漂移距离的减小而降低, 并引起物理时间分辨率呈现相同的变化趋势; 此时, 由于电子束展宽倍率减小, 技术时间分辨率与物理时间分辨率的变化趋势恰好相反。由于两者变化趋势不一致, 像管总时间分辨率始终与数值较大一方的变化趋势相同。图 5(a) 中当像管时间分辨率接近 2 ps 时, 物理时间分辨率略大于技术时间分辨率, 那么空间电荷效应对优于 2 ps 时间分

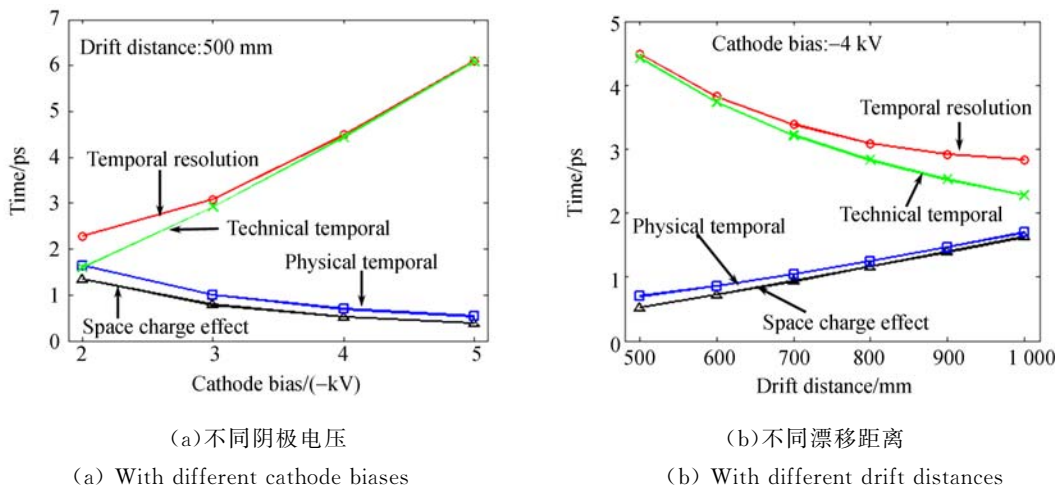


图 5 空间电荷效应对时间分辨率的影响

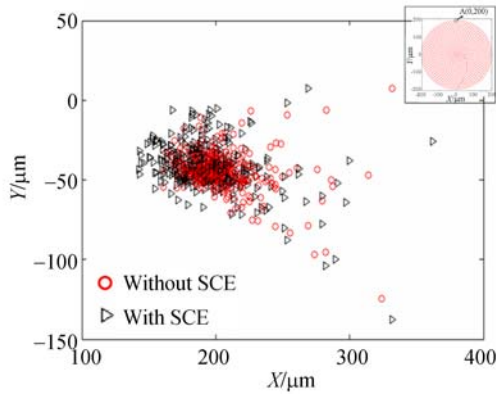
Fig. 5 Influence of space charge effect on temporal resolution

分辨率的设备将产生显著的影响;而当时间分辨率超过 3 ps 时,空间电荷效应的影响则较小。模拟结果与飞秒条纹变像管的情况一致,验证了像管时间分辨率越快,空间电荷效应影响越大的理论。

4.3 空间电荷效应对空间分辨性能的影响

采用短磁透镜成像的时间展宽分幅像管^[7],其电子脉冲在阴极到 MCP 成像过程中,受到轴对称磁场作用会产生成像弥散,受到空间电荷效应影响会引起空间弥散。由于电子运动轨迹、成像分布以及空间电荷效应都受到电流密度的影响,因此本文通过设置电流密度,采用文献[7]的方法模拟磁透镜和空间电荷效应共同影响下脉冲边缘电子的成像分布,分析空间弥散对像管空间分辨性能的影响。

以 130 fs 电子脉冲初始宽度、200 μm 半径和 1 000 个电子数为例,在阴极电压 Φ 为 -4 kV 和展宽脉冲斜率 R 为 10 V/ps 时,采用文献[17]的方法计算得到电流密度约为 1.36 mA/mm²。在单磁透镜像管中,考虑空间电荷效应前后,脉冲边缘电子的成像分布如图 6(a)所示,其中右上角小图表示脉冲边缘电子的发射位置为(0,200),考虑空间电荷效应前后的成像分布分别采用“o”和“▷”标识。通过成像分布统计和调制函数计算,两种分布的调制曲线如图 6(b)所示。当调制度为 0.1 时,不考虑空间电荷效应和考虑空间电荷效应的空间频率分别为 18 lp/mm 和 16.67 lp/mm,即空间分辨率分别为 55.6 μm 和 60 μm 。空间电荷效应使像管的空间分辨率下降了 8%左右。

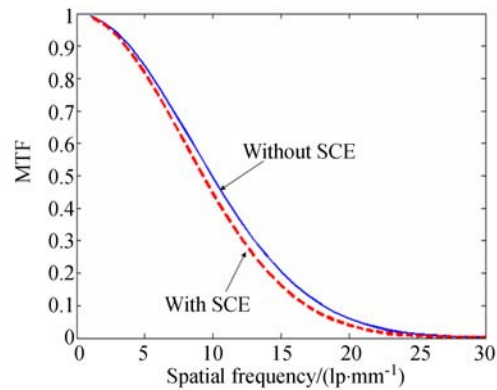


(a) 电子脉冲边缘位置成像分布

(右上角小图表示脉冲边缘电子的发射位置为(0,200))

(a) Imaging distribution of electronic pulse edge

(Location of upper right corner image is (0,200))



(b) 调制传递函数曲线

(b) Curves of modulation transfer function

图 6 空间分辨率模拟

Fig. 6 Simulation of spatial resolution in special case

5 结 论

本文以短磁聚焦分幅变像管为例,根据电子脉冲的传输特性,采用平均场模型研究空间电荷效应时间弥散,通过电子轨迹和成像分布分析空间电荷效应的空间弥散,并探讨时空弥散对像管时空分辨性能的影响。研究和分析结果显示,空间电荷效应引起的时空弥散与阴极电压、展宽脉冲斜率和漂移距离密切相关。当像管时间分辨率提升至 2 ps 左右时,空间电荷效应的时间弥散几

乎等同于像管的物理时间分辨率,并成为制约时间分辨性能进一步提升的主要因素,此时空间弥散导致像管空间分辨性能降低 8%左右。

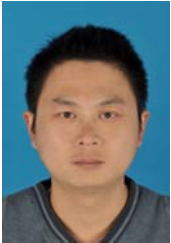
随着 ICF 实验要求的不断提高,分幅变像管的时空性能仍需进一步提升,特别是亚皮秒或飞秒量级时间分辨设备的研制。因此,如何在提高电子脉冲展宽倍率的同时,降低空间电荷效应的影响,是提升像管性能的关键。目前,在理论上可采用较低的阴极电压和较快的脉冲斜率解决技术时间分辨提升和空间电荷效应降低的矛盾,但仍需在未来工作中进行验证。

参考文献:

- [1] OERTEL J A, ARAGONEZ R, ARCHULETA T, *et al.*. Gated x-ray detector for the national ignition facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10):10E308.
- [2] BELL P M, BRADLEY D K, KILKENNY J D, *et al.*. Radiation hardening of gated x-ray imagers for the National Ignition Facility (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10):10E540.
- [3] CAI H ZH, LIU J Y, NIU L H, *et al.*. Note: Non-gain microchannel plate gated framing camera [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(5): 056102.
- [4] 蔡厚智, 刘进元, 彭翔, 等. 宽微带 X 射线分幅相机的研制[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 117001.
CAI H ZH, LIU J Y, PENG X, *et al.*. Design of an x-ray framing camera with wide microstrip line [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 117001. (in Chinese)
- [5] 白雁力, 张驰, 张敬金. X 射线分幅相机发展研究 [J]. *电视技术*, 2013, 37(19): 254-257.
BAI Y L, ZHANG CH, ZHANG J J. X-ray framing camera review [J]. *Video Engineering*, 2013, 37(19): 254-257. (in Chinese)
- [6] 白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 短磁聚焦分幅变像管空间分辨率的模拟与测试[J]. *深圳大学学报理工版*, 2015, 32(2): 178-182.
BAI Y L, LONG J H, CAI H ZH, *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)
- [7] 邵建达, 戴亚平, 许乔. 惯性约束聚变激光驱动装置用光学元器件的研究进展[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2889-2895.
SHAO J D, DAI Y P, XU Q. Progress on optical components for ICF laser facility[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 2889-2895. (in Chinese)
- [8] HILSABECK T J, HARES J D, KILKENNY J D, *et al.*. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10):10E317.
- [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.
- [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 (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11):11E504.
- [11] CAI H ZH, ZHAO X, LIU J Y, *et al.*. Dilation framing camera with 4 ps resolution [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 16101.
- [12] BAI Y L, LONG J H, CAI H ZH, *et al.*. Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(12): 124103.
- [13] 白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 时间展宽分幅变像管的时间分辨率探究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S1): 63-67.
BAI Y L, LONG J H, CAI H ZH, *et al.*. Research on temporal resolution of pulse-dilation framing tube [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 63-67. (in Chinese)
- [14] 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.
CAI H ZH, LONG J H, LIU J Y, *et al.*. Pico-second framing camera based on electron pulse time-dilation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206001. (in Chinese)
- [15] FENG J, ENGELHORN K, CHO B I, *et al.*. A grazing incidence x-ray streak camera for ultrafast, single-shot measurements [J]. *Applied Physical Letters*, 2010, 96(13): 134102.
- [16] 王强强, 田进寿, 丁永坤, 等. 行波前置短磁聚焦飞秒条纹管设计[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(3): 034005.
WANG Q Q, TIAN J SH, DING Y K, *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. (in Chinese)

- [17] SIWICK B J, DWYER J R, JORDAN R E, *et al.*. Ultrafast electron optics; Propagation dynamics of femtosecond electron packets[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(3): 1643-1648.
- [18] QIAN B L, ELSAYED-ALI H. Comment on “Ultrafast electron optics; Propagation dynamics of femtosecond electron packets” [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(1): 803-806.
- [19] SIWICK B J, DWYER J R, JORDAN R E, *et al.*. Response to “Comment on ‘Ultrafast electron optics; Propagation dynamics of femtosecond electron packets?’” [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(1): 807-808.
- [20] 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.

作者简介:



白雁力(1979—),男,广西桂林人,博士,副教授,2017年于深圳大学获得博士学位,主要从事光电子信息处理和超快诊断方面的研究。E-mail: bayaly@guet.edu.cn