

# 脉冲展宽系统中的飞秒光电子传输成像特性

高海英<sup>1</sup>, 白雁力<sup>1\*</sup>, 姚荣彬<sup>1</sup>, 王旬<sup>2</sup>, 刘达见<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 桂林电子科技大学机电综合工程训练国家级实验教学示范中心, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup> 桂林电子科技大学信息科技学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 设计了短磁聚焦脉冲展宽分幅相机模型,以脉冲展宽原理和光电子运动方程为基础,研究了飞秒光电子在脉冲展宽系统中的加速、传输和成像特性,分析了时空弥散,探讨了降低时空弥散影响的方法。结果表明:当脉冲展宽系统长 500 mm、展宽斜率为  $10 \text{ V} \cdot \text{ps}^{-1}$ 、加速电场为  $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  时,传输时间弥散引起的总物理时间分辨率为 1.62 ps,占相机时间分辨率的 70%;空间弥散为  $62.87 \mu\text{m}$ ,相机成像对比度降低了 13.58%。提高加速电场能有效降低时空弥散对相机物理时间分辨率和成像对比度的影响。

**关键词** 超快光学; 诊断技术; 脉冲展宽分幅相机; 飞秒光电子; 时间弥散; 空间弥散

中图分类号 TN143; O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.123201

## Transmission and Imaging Characteristics of Femtosecond Photoelectrons in Pulse-Dilation System

Gao Haiying<sup>1</sup>, Bai Yanli<sup>1\*</sup>, Yao Rongbin<sup>1</sup>, Wang Xun<sup>2</sup>, Liu Dajian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Demonstration Center for Experimental Education of Mechanical and Electrical Engineering Training, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup> Institute of Information Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** We designed and modeled a short-magnetic-focusing pulse-dilation framing camera. Based on the principle of pulse dilation and the equation of photoelectron motion, we studied the fs-photoelectron acceleration, transmission, and imaging characteristics in a pulse-dilation system. In addition, we analyzed the temporal-spatial dispersion and discussed the methods for its reduction. The simulated results show that when the pulse-dilation system has a length of 500 mm, a gradient of dilation pulse of  $10 \text{ V} \cdot \text{ps}^{-1}$ , and an accelerating field of  $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , the total physical-temporal resolution resulting from temporal dispersion is 1.62 ps, which is 70% of the temporal resolution of the camera. The spatial dispersion is  $62.87 \mu\text{m}$ , and the image contrast is reduced by 13.58%. Thus, the influence of temporal-spatial dispersion on physical-temporal resolution and imaging contrast can be effectively reduced by enhancing the accelerating field.

**Key words** ultrafast optics; diagnostic techniques; pulse-dilation framing camera; femtosecond photoelectrons; temporal dispersion; spatial dispersion

**OCIS codes** 320.7080; 320.7160; 230.0250

## 1 引言

超快诊断技术(UDT)是一种能够将发生在  $1 \mu\text{s}$  内的超快现象进行区分、记录和分析的技术,在 高能粒子轨迹、激光核聚变和固体物理研究等

领域应用广泛<sup>[1]</sup>。惯性约束聚变实验在更短时间二维超快现象上的研究需求<sup>[2-3]</sup>,对二维超快诊断设备——分幅相机的时间分辨性能提出越来越高的要求。为满足更短时间分辨超快现象的实验需求,近年来国内外相继研制出时间分辨率为 5 ps

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-01-01; 录用日期: 2019-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(11865007,61863008)、广西自然科学基金(2018GXNSFAA281073)、桂林电子科技大学校级重点项目(JGA201806)

\* E-mail: bayaly@guet.edu.cn

的脉冲展宽分幅相机<sup>[4-5]</sup>。相机通过脉冲展宽系统对光电子时间宽度进行展宽,采用微通道板(MCP)分幅相机进行采集和测量,以此提升时间分辨率<sup>[6-11]</sup>。虽然相机时间分辨率获得提升,但是由于脉冲展宽系统的存在,光电子须长距离传输后才能到达MCP输入面,因此在其传输成像过程中存在影响时空性能的时空弥散<sup>[12-14]</sup>。随着脉冲展宽分幅相机对更高时间量级研究需求的发展,该时空弥散将制约相机时空分辨性能的进一步提升。为此,研究脉冲展宽系统中飞秒光电子传输成像特性,对脉冲展宽分幅相机优化具有重要的理论意义。

目前,在超快诊断设备领域,仅有关于飞秒电子衍射系统中飞秒电子束传输特性的研究,且主要集中于时间分辨性能方面<sup>[15]</sup>。由于脉冲展宽分幅相机是具有一维时间和二维空间分辨能力的超快诊断设备,因此研究脉冲展宽分幅相机中的飞秒光电子特性,不仅要考虑其传输特性,而且要考虑其成像特性。为此,本文借鉴飞秒衍射系统,在前期研究基础上,对飞秒光电子在脉冲展宽系统中的传输成像过程展开理论分析,研究传输成像过程中飞秒光电子时空弥散变化等特性,为相机性能的进一步优化提供理论依据。

## 2 脉冲展宽分幅相机模型和工作原理

脉冲展宽分幅相机模型如图1所示,由脉冲展宽系统和MCP分幅相机(MFC)组成,其中脉冲展宽系统包括阴极(PC)、阳极、光电子漂移区和磁透镜。相机的工作原理如下:阴极将飞秒激光转换为光电子信号,由于阴栅加速带加载展宽脉冲(DP),因此光电子信号前沿具有更大的加速能量和传输速度。在通过漂移区传输后,光电子信号前后沿轴向距离逐渐变大(即时间宽度被展宽)。当展宽后的光电子到达MCP输入面时,采用传统MCP分幅相机对其进行测量,以此获得时间分辨率<sup>[4-11]</sup>。脉冲展宽系统中的磁透镜起成像作用,确保光电子从阴极传输成像到MCP输入面。

根据相机结构和工作原理,飞秒光电子从产生到成像将经历3个过程:1)阴栅间加速过程,由于光电子的零初速和阴栅间的时变加速电场,光电子在加速到每秒数千米的过程中,将伴随着电子初始能量分布和空间电荷效应的传输时间弥散;2)漂移区传输过程,经过阴栅间时变电场的加速后,由于光电子信号前沿传输速度更快,其时间宽度和电流密

度将随传输过程动态变化,并伴随空间电荷效应的传输时间弥散;3)光电子成像过程,光电子要在磁透镜聚焦作用下才能成像在MCP上,在成像过程中将伴随空间弥散。根据上述3个过程,为研究飞秒光电子在脉冲展宽系统中的传输成像特性,应考虑其加速和传输过程的时间弥散,以及成像过程的空间弥散。

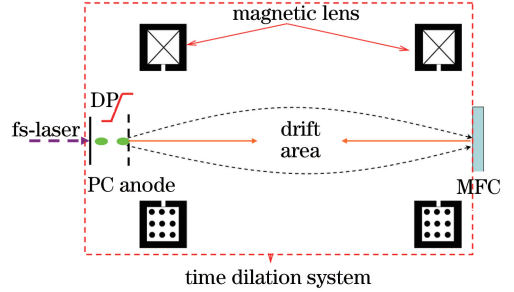


图1 脉冲展宽分幅相机模型

Fig. 1 Model of pulse-dilation framing camera

## 3 研究方法及其结果分析

### 3.1 光电子发射模型

研究采用经典光电子发射模型<sup>[15-17]</sup>,其初始能量服从贝塔分布,即满足 $0\sim 0.6$  eV上的 $\beta(1,4)$ 分布;发射角度服从 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的余弦分布;发射时间服从高斯分布。归一化光电子能量分布概率密度函数表达式为

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

式中: $\xi$ 为光电子初始能量与最可几初始能量比值; $k$ 和 $l$ 为贝塔分布形状参数。

光电子发射角度函数表达式为

$$P(\theta) \propto \cos \theta, \quad (2)$$

式中: $\theta$ 为光电子发射角度。

光电子发射时间分布函数表达式为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

式中: $t$ 为光电子发射时间; $\sigma$ 为光电子发射时间分布标准差; $\mu$ 为光电子发射时间分布均值。

$\sigma$ 与高斯曲线半峰全宽 $\Delta t$ 的关系为

$$\sigma = \sqrt{-(\Delta t/2)^2/2\ln 0.5}. \quad (4)$$

### 3.2 脉冲展宽系统电磁场计算

系统阴栅加速带电场分布采用有限差分法实现,该方法采用离散点阵代替连续区域内的点集,将求解电场的泊松方程或拉普拉斯方程中的偏微商用相邻点之间的差分代替,这样利用迭代求解差分方

程组即可得到电场场强分布<sup>[15]</sup>。系统磁感应强度计算基于边界元理论,并借助粒子与粒子束轨迹仿真分析软件 Lorentz-3EM 实现<sup>[18-19]</sup>。当加速带为 1 mm,脉冲展宽系统长 500 mm,磁透镜孔径、轴向宽度和缝隙分别为 160,100,4 mm 时,加速电场和

脉冲展宽系统轴上磁感应强度分布如图 2 所示,计算结果显示,加速电场和磁感应强度随着阴极电压提高而变大。这是因为加速电场决定光电子运动速度,当光电子运动变快时,必须提高磁感应强度才能保证光电子在系统中的成像。

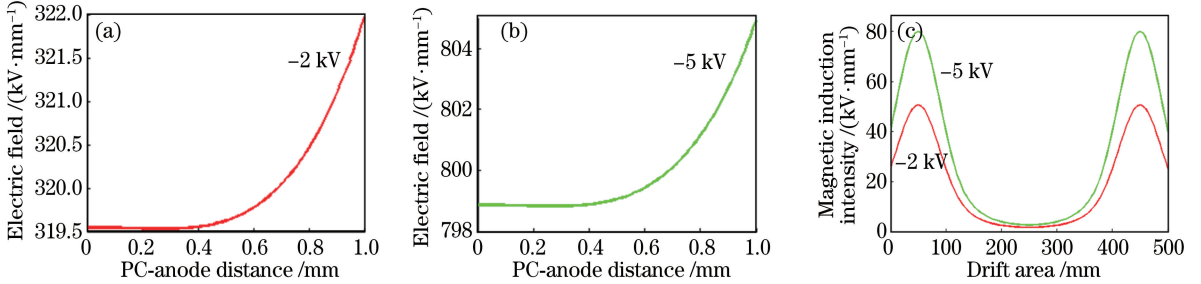


图 2 脉冲展宽系统电磁场。(a) 阴极电压为 -2 kV 时的电场分布;(b) 阴极电压为 -5 kV 时的电场分布;(c) 磁感应强度  
Fig. 2 Electromagnetic field in pulse-dilation system. (a) Electronic field distribution when PC voltage is -2 kV;  
(b) electronic field distribution when PC voltage is -5 kV; (c) magnetic induction intensity

### 3.3 阴栅间传输特性

在阴栅加速带,当光电子处于加速过程时,其自身初始能量分布和空间电荷效应将引起时间弥散。为分析加速特性,采用经典法和平均场理论展开研究<sup>[12-13]</sup>。经典法对电子初始能量分布和二维平均场理论空间电荷效应时间弥散表达式如下。其中加速电场为

$$E = |\varphi| / d, \quad (5)$$

式中: $\varphi$  为阴极电压(即加速电压),单位为 kV; $d$  为阴栅间距,单位为 mm。渡越时间弥散为

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

式中: $\delta$  为光电子初始能量分布,单位为 eV。空间电荷效应时间弥散为

$$\Delta T_a = \frac{N_0 e^2}{m\epsilon\pi r^2 v_m} \frac{t_a}{(1 + l/r + \sqrt{1 + l^2/r^2})}, \quad (7)$$

式中: $N_0$  为电子脉冲内的电子数; $l$  和  $r$  分别为脉

冲宽度和半径; $\epsilon$  是真空介电常数; $e$  和  $m$  分别是电子电量和质量; $t_a$  为电子在阴栅间的运动时间; $v_m$  为电子运动的平均速度。

根据(5)~(7)式,当阴栅加速带为 1 mm,飞秒光电子时间宽度,初始能量分布半峰全宽、半径和电子数分别为 130 fs、0.5 eV、200  $\mu$ m 和 1000 时,光电子加速过程的时间弥散如图 3 所示。阴极电压为 -2 kV 时,初始能量和空间电荷效应引起的时间弥散分别为 0.93 ps 和 10.33 fs;阴极电压提高至 -5 kV 时,两者分别减小至 0.37 ps 和 2.55 fs。由此可知,阴栅间传输时间弥散随加速电压提高而逐渐减小。

### 3.4 漂移区传输特性

在漂移区传输过程中,由于展宽脉冲作用,飞秒光电子时间宽度将被逐渐展宽,这将影响光电子电流密度和空间电荷效应时间弥散变化。因此在该过

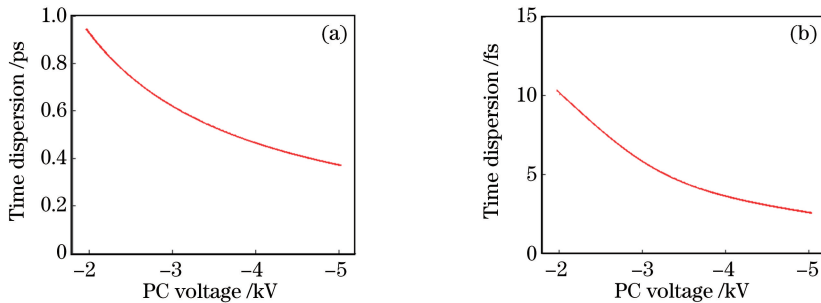


图 3 阴极和阳极间的传输特性。(a) 初始能量分布时间弥散;(b) 空间电荷效应时间弥散

Fig. 3 Transport properties between PC and anode. (a) Temporal dispersion of initial energy distribution;  
(b) temporal dispersion of space charge effect

程中,传输特性从光电子时间宽度和电流密度的动态特性,及动态时间弥散两方面展开讨论。

### 3.4.1 飞秒光电子时间宽度和电流密度动态特性

根据时间展宽原理和粒子数守恒方程<sup>[13,20]</sup>,漂移区传输过程的飞秒光电子时间宽度和电流密度计算方法为

$$l_i = (v_1 - v_2) \times t_i + l_0, \quad (8)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{2e|\varphi_i|}{m}}, \quad (9)$$

$$n_i = \frac{N_0}{\pi r^2 l_i}, \quad (10)$$

$$l_0 = v_1 \times \omega_0, \quad (11)$$

$$\varphi_1 = \varphi, \quad (12)$$

$$\varphi_2 = \varphi + R \times \omega_0, \quad (13)$$

$$I_{d_i} = en_i v_i, \quad (14)$$

式中: $i$ 为步长数; $l_i$ 、 $n_i$ 和 $I_{d_i}$ 分别是传输时间 $t_i$ 下的动态时间宽度、电子密度和电流密度( $\text{mA} \cdot \text{mm}^{-2}$ ); $v_i$ 为传输速度; $\varphi_1$ 和 $v_1$ 是光电子信号前沿加速电压和传输速度; $\varphi_2$ 和 $v_2$ 是后沿加速电压和传输速度; $R$ 为展宽脉冲斜率; $l_0$ ( $\mu\text{m}$ )和 $\omega_0$ (fs)为飞秒光电子初始宽度。

### 3.4.2 传输过程时间弥散

在传输过程中,由于飞秒光电子时间宽度逐渐增加,因此传输时间弥散也呈动态变化。基于动态时间

宽度的空间电荷效应时间弥散计算表达式为<sup>[13]</sup>

$$\Delta l_i = \frac{N_0 e^2}{m \epsilon \pi r^2} \frac{\Delta t_i^2}{(1 + l_i/r + \sqrt{1 + l_i^2/r^2})}, \quad (15)$$

$$\Delta T_i = \Delta l_i / v_m, \quad (16)$$

$$\Delta T_d = \sum_0^{i-1} \Delta T_i, \quad (17)$$

$$t = \sum_0^{i-1} \Delta t_i, \quad (18)$$

式中: $\Delta t_i$ 是光电子动态时间宽度为 $l_i$ 时的传输时间; $\Delta l_i$ ( $\mu\text{m}$ )和 $\Delta T_i$ (ps)为 $\Delta t_i$ 内的空间电荷效应动态时间弥散; $\Delta T_d$ 为漂移区内空间电荷时间弥散; $t$ 为在漂移区中的传输总时间。

采用3.3节的飞秒光电子初始参量,根据(8)~(14)式,传输过程中的电子束时间宽度和电流密度动态特性如图4所示。飞秒光电子时间展宽和电流密度分别呈线性上升和非线性下降趋势,且阴极电压越小,传输时间越长,时间展宽越大,电流密度越小。阴极电压为 $-2$  kV时,飞秒光电子传输时间约为18.84 ns,随传输过程,光电子时间宽度由130 fs展宽至8.61 ps,展宽约为66倍,电流密度由 $9.79 \text{ mA} \cdot \text{mm}^{-2}$ 降低至 $0.15 \text{ mA} \cdot \text{mm}^{-2}$ ;阴极电压提高到为 $-5$  kV时,传输时间缩短为11.92 ns,光电子时间宽度展宽至2.26 ps,展宽约为17.4倍,电流密度由 $9.79 \text{ mA} \cdot \text{mm}^{-2}$ 降低至 $0.56 \text{ mA} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。

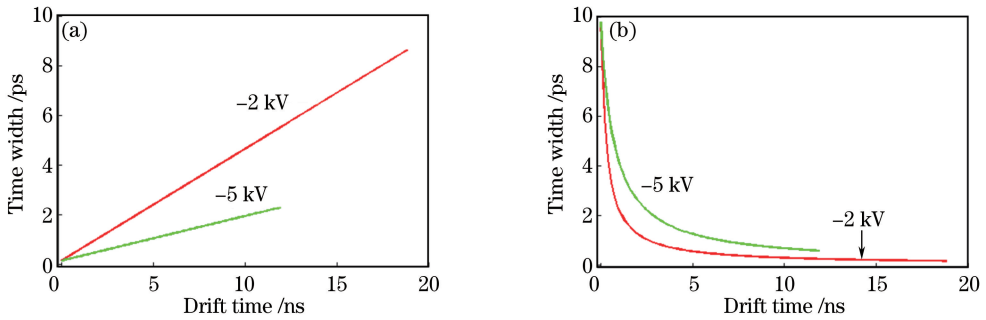


图4 传输过程中的时间宽度和电流密度。(a)动态时间宽度;(b)动态电流密度

Fig. 4 Time width and ampere density during transmission. (a) Dynamic time width; (b) dynamic ampere density

根据(15)~(18)式,传输过程时间弥散如图5所示,其中图5(a)是单位传输时间 $\Delta t_i = 200$  ps的动态时间弥散。由于光电子时间宽度随传输时间展宽,因此在 $\Delta t_i$ 内时间宽度越大,传输时间弥散 $\Delta T_i$ 越小。受光电子时间宽度动态特性影响,在漂移区中的传输时间弥散并不是以理想线性形式上升,而是随传输过程缓慢增加,如图5(b)所示。此外,加速电压直接影响传输时间弥散,即与时间弥散呈反比关系。

### 3.5 飞秒光电子成像特性

飞秒光电子在成像过程中,既受库仑力影响,又受磁场作用力影响。借助粒子与粒子束轨迹仿真软件 Lorentz-3EM 将两种影响结合,通过设置光电子传输过程中的平均电流密度和加速电压,模拟磁场中光电子运动轨迹,获得其在 MCP 输入面上的成像分布;通过成像分布的高斯拟合曲线半峰全宽估算其成像半径;通过与理想成像半径对比,分析飞秒光电子的成像特性。

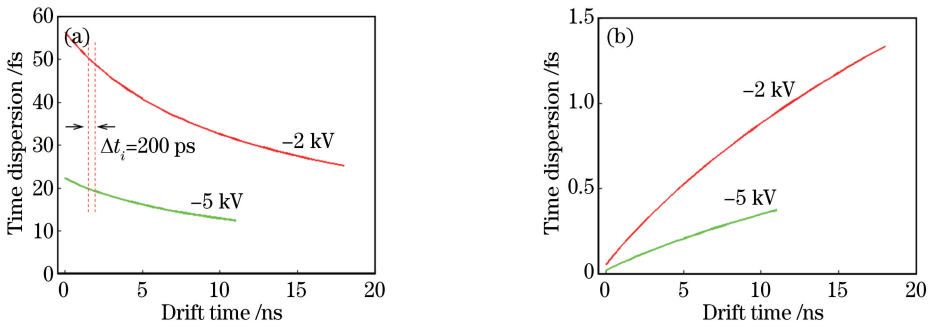


图5 在漂移区传输过程中的时间弥散。(a)  $\Delta t_i$  为 200 ps 时时间弥散的变化;(b) 传输过程中的时间弥散变化  
Fig. 5 Temporal dispersion during transport in drift area. (a) Change of temporal dispersion when  $\Delta t_i = 200$  ps;  
(b) change of temporal dispersion during the transport

飞秒光电子初始参量和脉冲展宽系统参数如 3.3 节和 3.4 节所示,根据(9)、(10)和(14)式,阴极加载  $-2 \sim -5$  kV 的脉冲平均电流密度 ( $\text{mA} \cdot \text{mm}^{-2}$ ) 分别为 0.68, 1.05, 1.39, 1.74。阴极电压(加速电压)  $-2$  kV 光电子成像空间弥散如图 6 所示(纵坐标为成像电子数归一化),其中图 6(a) 为理想情况下(无磁聚焦和空间电荷影响),满足均匀分布的飞秒光电子在 MCP 输入面上的成像分布;图 6(b) 为设置加速电压和电流密度后,

从轴上发射 405 条光电子轨迹后的成像分布。两种成像分布的高斯拟合曲线如图 6(c) 所示,其半峰全宽分别为  $200 \mu\text{m}$  和  $262.87 \mu\text{m}$ 。相较于理想成像,传输过程中飞秒光电子受库仑力和磁聚焦作用影响的空间弥散半径约为  $62.87 \mu\text{m}$ 。采用相同方法,飞秒光电子传输成像的空间弥散对比如图 6(d) 所示。根据光电子加速电压与磁聚焦作用力的正比关系特性,飞秒光电子传输成像的空间弥散随阴极电压提高和磁聚焦作用力增大而逐渐降低。

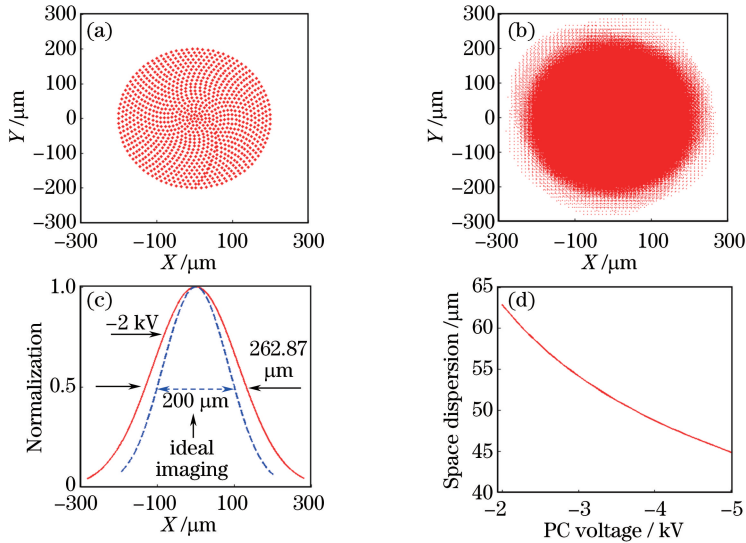


图6 飞秒光电子成像特性。(a)理想成像分布;(b)阴极电压  $-2$  kV 的成像分布;  
(c) 两种成像分布的高斯拟合曲线;(d)不同阴极电压下的空间弥散

Fig. 6 Imaging characteristics of fs photoelectrons. (a) Ideal imaging distribution; (b) imaging distribution at PC voltage of  $-2$  kV; (c) Gaussian fitting curves of two kinds of imaging distributions; (d) spatial dispersions at different PC voltages

### 3.6 讨 论

飞秒光电子在脉冲展宽系统中的时间特性包括传输时间弥散和光电子时间展宽,两者分别影响相机物理和技术时间分辨率,相机时间分辨率  $T_u$  和成像对比度  $M_d$  可表示为

$$T_u = \sqrt{T_p^2 + T_c^2}, \quad (19)$$

$$T_p = \sqrt{\Delta T_c^2 + \Delta T_a^2 + \Delta T_d^2}, \quad (20)$$

$$T_c = T_M / M_u, \quad (21)$$

$$Z_p = (T_p^2 / T_u^2) \times 100\%, \quad (22)$$

$$Z_c = (T_c^2 / T_u^2) \times 100\%, \quad (23)$$

$$M_d = [(r_m - r_o)/(r_m + r_o)] \times 100\%, \quad (24)$$

式中: $\Delta T_e$ 和 $\Delta T_a$ 分别为阴栅间电子初始能量和空间电荷效应时间弥散; $\Delta T_d$ 为漂移区内空间电荷时间弥散; $T_p$ 为物理时间分辨率; $T_c$ 为技术时间分辨率; $T_M$ 为MCP分幅相机时间分辨率; $M_u$ 为光电子时间展宽倍率; $Z_p$ 和 $Z_c$ 分别为物理和技术时间分辨率占比; $r_o$ 和 $r_m$ 分别为理想成像和传输成像半径。

当阴极电压为-2 kV时,在时间分辨性能方面,根据传输时间弥散模拟和(19)~(21)式, $T_u$ 为1.936 ps,其中 $T_p$ 为1.62 ps( $\Delta T_e$ 为0.93 ps, $\Delta T_a$ 为10.33 fs, $\Delta T_d$ 为1.33 ps), $T_c$ 为1.06 ps,光电子时间展宽倍率约为66倍(即130 fs展宽至8.61 ps)。假设 $T_M$ 为70 ps,根据(22)~(23)式,物理时间分辨率在相机时间分辨中的占比 $Z_p$ 约为70%,而技术时间分辨率占比 $Z_c$ 约为30%,因此光电子传输过程的时间弥散严重影响相机时间分辨提升。而在空间性能方面,根据(24)式,传输空间弥散降低成像对比度 $M_d$ 约为13.58%。此外,在模拟中通过提高阴极电压(加速电压)可以降低飞秒光电子传输时空弥散对相机物理时间分辨率和成像质量的影响。

## 4 结 论

设计磁聚焦脉冲展宽分幅相机模型,以脉冲展宽和光电子运动理论为基础,采用经典时间弥散公式、平均场模型和光电子成像分布等方法,研究飞秒光电子在脉冲展宽系统中的加速、传输和成像过程,分析其时空弥散特性及降低方法。研究结果显示,飞秒光电子在脉冲展宽系统中的传输时间弥散引起物理时间分辨增大,是阻碍相机时间分辨性能提升的主要因素,而空间弥散也严重影响相机成像质量,两者随阴极电压提高呈非线性下降趋势。由于脉冲展宽系统的加速带、漂移区和磁聚焦等物理特性存在,因此飞秒光电子在系统中的传输成像时空弥散无法完全消除。基于惯性约束聚变实验对更短时间分辨二维超快现象的研究需求,脉冲展宽分幅相机必将向更高量级时空分辨发展,在相机时空分辨性能提升的过程中,飞秒光电子的传输时间弥散将产生更明显的影响。因此在今后更高时间量级脉冲展宽分幅相机的建模和研制中,应着重研究在固定加速电场下,如何进一步提升光电子时间展宽倍率,以此降低光电子在脉冲展宽系统中的传输时间弥散。

## 参 考 文 献

- [1] Diels J C, Fontaine J J, Rudolph W. Ultrafast diagnostics[J]. *Revue de Physique Appliquée*, 1987, 22(12): 1605-1611.
- [2] 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.
- [3] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [4] 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.
- [5] Cai H Z, Zhao X, Liu J Y, *et al.* Dilation framing camera with 4 ps resolution [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(1): 016101.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Nagel S R, Benedetti L R, Bradley D K, *et al.* Comparison of implosion core metrics: a 10 ps dilation X-ray imager vs a 100 ps gated microchannel plate[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E311.
- [9] Nagel S R, Chen H, Park J, *et al.* Two-dimensional time-resolved ultra-high speed imaging of K-alpha emission from short-pulse-laser interactions to observe electron recirculation [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(14): 144102.
- [10] Cai H Z, Fu W Y, Bai Y L, *et al.* Simulation of a dilation X-ray framing camera [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26(4): 043003.
- [11] Bai Y L, Long J H, Liu J Y, *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.
- [12] Bai Y L, Long J H, Cai H Z, *et al.* Research on temporal resolution of pulse-dilation framing tube[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 63-

67.  
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.
- [13] Bai Y L, Yao R B, Gao H Y, *et al.* Influence of space charge effect on temporal-spatial performance of pulse-dilation framing tube [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 261-267.  
白雁力, 姚荣彬, 高海英, 等. 空间电荷效应对时间展宽分幅变像管时空性能的影响[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 261-267.
- [14] Bai Y L, Yao R B, Gao H Y, *et al.* Analysis of imaging performance and aberration of pulse-dilation framing converter using short magnetic focusing [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0332001.  
白雁力, 姚荣彬, 高海英, 等. 短磁聚焦时间展宽分幅变像管成像性能及像差分析[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0332001.
- [15] Tian J S, Zhao B S, Wu J J, *et al.* Transfer property of electron pulse in a femto-second electron diffraction system [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 123-128.  
田进寿, 赵宝升, 吴建军, 等. 电子脉冲在飞秒电子衍射系统中的传输特性 [J]. 物理学报, 2007, 56(1): 123-128.
- [16] Liu R, Tian J S, Li H, *et al.* Design and evaluation of a pre-traveling wave deflector magnetic solenoid lens focused streak image tube [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5):058501.  
刘蓉, 田进寿, 李昊, 等. 行波偏转器前置短磁聚焦条纹变像管理论设计与实验研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(5):058501
- [17] Hui D D, Tian J S, Lu Y, *et al.* Streak tube with large work area and small size used in lidar detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1232001.  
惠丹丹, 田进寿, 卢裕, 等. 用于激光雷达的大探测面积超小型条纹管 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1232001.
- [18] 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.
- [19] Chen J Y, Cai H Z, Bai Y L, *et al.* Imaging distortion analysis and testing of short magnetic focusing image converter tube [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031101.  
陈家埝, 蔡厚智, 白雁力, 等. 短磁聚焦变像管的成像畸变分析与测试 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031101.
- [20] Qian B L, Elsayed-Ali H E. Electron pulse broadening due to space charge effects in a photoelectron gun for electron diffraction and streak camera systems [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(1): 462-468.