

文章编号: 2095-4980(2021)03-0448-05

## 时间拉伸漂移管模拟技术

孙 江<sup>1,2</sup>, 翁秀峰<sup>2</sup>, 蔡 丹<sup>2</sup>, 张金海<sup>2</sup>, 胡 杨<sup>2</sup>, 张鹏飞<sup>2</sup>, 彭士香<sup>1</sup>

(1.北京大学物理学院 重离子物理研究所, 北京 100871; 2.强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:**通过粒子模拟(PIC)的方法研究了可用于全高半宽度 10 ps 量级快脉冲光信号脉宽测量的时间拉伸漂移管。分别模拟了光阴极半径、加速管长度、加速电压、漂移区长度、螺线管中心磁场强度、初始光电子能量和初始光电流对时间拉伸漂移管展宽系数的影响。分析了时间拉伸漂移管展宽系数的主要影响因素, 同时给出了漂移管展宽系数对初始电子能量和初始光电流的线性关系, 证明了所设计的时间拉伸漂移管能够满足逆康普顿散射源的束长测量。研究结果可为逆康普顿散射源电子束长测量提供技术手段。

**关键词:** 时间拉伸漂移管; 逆康普顿散射源; 粒子模拟; 束长度; 展宽系数

**中图分类号:** TL506; O441.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019351

## Simulation on time dilation drift tube

SUN Jiang<sup>1,2</sup>, WENG Xiufeng<sup>2</sup>, CAI Dan<sup>2</sup>, ZHANG Jinhai<sup>2</sup>, HU Yang<sup>2</sup>, ZHANG Pengfei<sup>2</sup>, PENG Shixiang<sup>1</sup>

(1.Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China; 2.State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an Shaanxi 710024)

**Abstract:** A time dilation drift tube is simulated by Particle-In-Cell(PIC) model, which can be used for measuring pulsed signal at least 10 ps for Full Width at Half Maximum(FWHM). The factors influencing the coefficient of spread are calculated including radius of photocathode, length of acceleration tube, acceleration voltage, length of drift tube, center magnetic field of solenoid, energy and current of photo electrons. Results show that a linear characteristic exists between the coefficient of spread and the energy and current of photo electrons, which means signal of time dilation drift tube is independent of initial pulsed electrons energy distribution and current waveform. The proposed time dilation drift tube offers a way to diagnose beam length parameter of inverse Compton scattering source instead of streak camera.

**Keywords:** time dilation drift tube; inverse Compton scattering source; particle-in-cell; beam length; coefficient of spread

电子束束长是基于光阴极电子枪直线加速器的重要指标之一<sup>[1]</sup>, 也是表征逆康普顿散射伽马射线束时间宽度的一种重要手段, 10 ps(FWHM)级电子束束长测量能力是装置指标测量和应用的必要条件<sup>[2]</sup>。国内外同类加速器装置束长测量按照研究方法划分主要包含有条纹相机<sup>[3-4]</sup>、单光子计数法<sup>[5]</sup>、频域法<sup>[6-7]</sup>、横向偏转腔测量法<sup>[8-9]</sup>和电光采样法<sup>[10]</sup>。频域法、横向偏转腔、电光采样法需要一定的技术或者经验的积累, 且系统均较复杂。单光子计数法效率太低, 且只能是平均束长测量。条纹相机法中, 辐射转换成契伦科夫辐射光或者渡越辐射光, 系统搭建相对简单, 但条纹相机成本昂贵。有必要研究替代条纹相机的光学接收系统, 满足束长测量需求。本文通过理论分析和 PIC 粒子模拟方法<sup>[11-12]</sup>设计了一种可用于 10 ps 级契伦科夫辐射光或渡越辐射光脉冲时间宽度测量的时间拉伸漂移管<sup>[13]</sup>, 通过对时间拉伸漂移管展宽系数的主要影响因素分析, 以及对漂移管测量的线性程度分析, 证明了时间拉伸漂移管能够替代条纹相机的光学接收系统, 满足逆康普顿散射源装置的束长度测量。

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2020-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11505142; 11705150; 11875224)

作者简介: 孙 江(1986-), 男, 博士, 主要研究方向为强流粒子束物理。email:sunjiang@pku.edu.cn

1 时间拉伸漂移管设计

时间拉伸漂移管的模拟结构如图 1 所示，主要包含加速区(加速电压  $U$  施加区)、减速区(减速电压  $U(t)$  施加区)和漂移区。光阴极采用双碱阴极，加速电压由直流高压电源提供，减速电压由脉冲高压电源提供，外加磁场由密绕的螺线管产生，同时后端测量部分采用微通道板探测器实现快脉冲信号测量，整个漂移管外壁设计成真空玻璃密封结构。设计原理大致为：电子束产生的契伦科夫辐射光脉冲到达光阴极上，光阴极发射光电子进入加速区，在加速电极的加速下，能量为几个 keV 的电子运动到地电极。加速区的作用是使光电子具有相对一致的纵向运动速度，减少光电子初始方向和能量的随机性对测量的影响。当电子到达地电极后，峰值为 -800 V，脉冲时间 150 ps 的减速高压  $U(t)$  加载到减速电极上，对电子束进行减速。在这个过程中，电子沿电势减小的方向运动，且  $dU(t)/dt < 0$ ，先到达的电子受电场力小，后到达的电子受电场力大，使束流在纵向展宽。在漂移区，无电场的作用，经过减速区的电子具有不同的速度，在漂移区做进一步的展宽，可以预见漂移区越长，展宽就越大。展宽后的电子束空间长度在几个 mm 量级，利用满足时间响应的探测器进行脉宽测量可得百 ps 量级的信号，通过展宽系数计算初始脉冲时间宽度，即可在较低成本条件下实现 10 ps 甚至 ps 量级信号的测量。为了约束光阴极产生的电子束在横向上的扩散，漂移管外增加了螺线管提供磁场。

时间拉伸漂移管结构设计需要考虑的主要因素包括光阴极半径  $r$ 、加速管长度  $L_a$ 、加速电压  $U$ 、漂移管长度  $L_d$ 、螺线管中心磁感应强度  $B_c$ 、初始光电子能量  $E$  和初始光电流  $I_c$  等。为了定标时间拉伸漂移管的传输效率和束流展宽能力，分别定义电流传输系数  $\alpha$  为探测器收集电流  $I_a$  的峰值  $I_{a-peak}$  和阴极发射电流  $I_c$  的峰值  $I_{c-peak}$  比值；展宽系数  $\Delta$  为探测器收集电流全高半宽  $t_{a-FWHM}$  和阴极发射电流全高半宽  $t_{c-FWHM}$  的比值，即：

$$\alpha = I_{a-peak} / I_{c-peak} \tag{1}$$

$$\Delta = t_{a-FWHM} / t_{c-FWHM} \tag{2}$$

$I_a$  和  $I_c$  的位置如图 1 所示。图中  $I_{at}$  和  $I_{dt}$  分别为加速区出口电流和漂移区入口电流。采用粒子模拟方法对时间拉伸漂移管进行模拟，考虑光阴极发射能力，假设阴极发射电流为峰值  $I_{c-peak} = 1 \text{ mA}$ ，上升沿和下降沿均为 1 ps，全高半宽  $t_{c-FWHM} = 9 \text{ ps}$  的梯形脉冲，光电子的初始能量为  $E = 3 \text{ eV}$ 。时间拉伸漂移管的结构参数如表 1 所示，减速间隙为 2 mm，减速电压波形如图 1 所示。

表 1 时间拉伸漂移管结构参数

Table1 Structure parameters of time dilation drift tube				
$r/\text{mm}$	$L_a/\text{mm}$	$U/\text{kV}$	$L_d/\text{mm}$	$B_c/\text{T}$
10	50	1	100	0.272

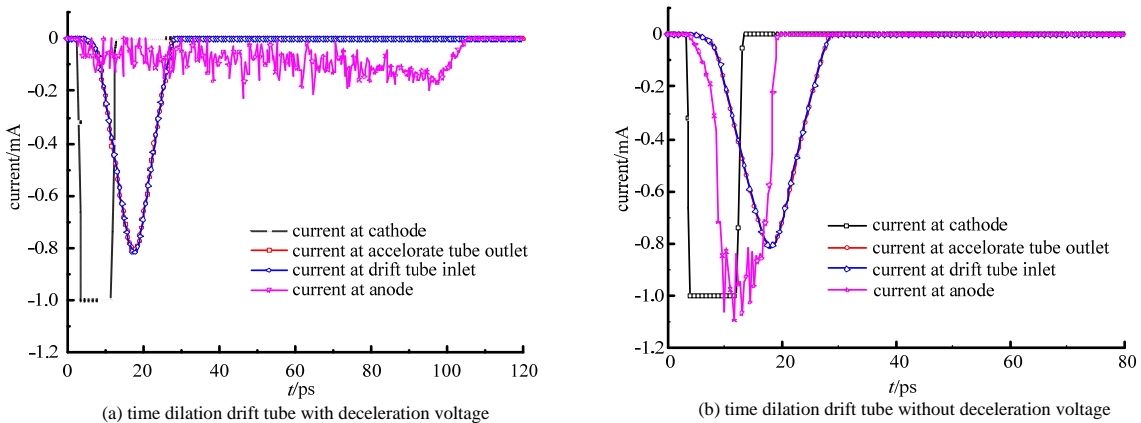


Fig.2 Waveforms of  $I_c, I_{at}, I_{dt}, I_a$   
图 2  $I_c, I_{at}, I_{dt}, I_a$  波形

图 2(a)是模拟得到的  $I_c, I_{at}, I_{dt}, I_a$  波形，阴极发射电流峰值  $I_{c-peak} = 1 \text{ mA}$ ，全高半宽  $t_{c-FWHM} = 9 \text{ ps}$ ；加速区出口处电流峰值 0.812 mA，全高半宽 10.99 ps；探测器接收电流峰值  $I_{a-peak} = 0.225 \text{ mA}$ ，全高半宽  $t_{a-FWHM} = 93.2 \text{ ps}$ 。电流传输系数  $\alpha = 0.225$ ，展宽系数  $\Delta = 10.36$ ，即探测器测到的流强是阴极发射电流的 22.5%，展宽了 10.36 倍，验证了时间拉伸漂移管的展宽作用，由于电流的损失，设计时也需要兼顾探测器的探测效率，因此本文在计算展宽系数

$\Delta$  的同时也计算了电流传输系数  $\alpha$ 。

时间拉伸漂移管加速区出口处展宽了 1.99 ps，而经过减速漂移后展宽了 82.21 ps，说明减速电压起了关键作用。图 2(b)是不加减速电压模拟得到的  $I_c, I_{at}, I_{dt}, I_a$  波形，阴极发射电流和加速管出口处的电流均与图 2(a)中相同，由于未加减速电压，阳极收集的电流并未明显展宽。

## 2 电流展宽系数的影响因素计算分析

电流展宽系数  $\Delta$  是时间拉伸漂移管的关键参数，其影响因素除减速电压外还包括漂移管结构参数和初始电子参数，对表 2 中所列的参数分别进行了控制变量模拟，计算电流传输系数  $\alpha$  和展宽系数  $\Delta$ ，表中基准参数为图 1 所示时间拉伸漂移管的参数。

表 2 时间拉伸漂移管参数变化范围  
Table 2 Parameters of time dilation drift tube

parameters	minimum value	maximum value	reference parameters
radius of photocathode $r/\text{mm}$	5	15	10
energy of photo electron $E/\text{eV}$	0.5	10	3
photo current $I_p/\text{mA}$	0.5	50	1
length of accelerate tube $L_a/\text{mm}$	10	60	50
accelerate voltage $U/\text{kV}$	0.2	3	1
length of drift tube $L_d/\text{mm}$	40	500	100
magnetic field $B_z/\text{T}$	0.004	0.543	0.272

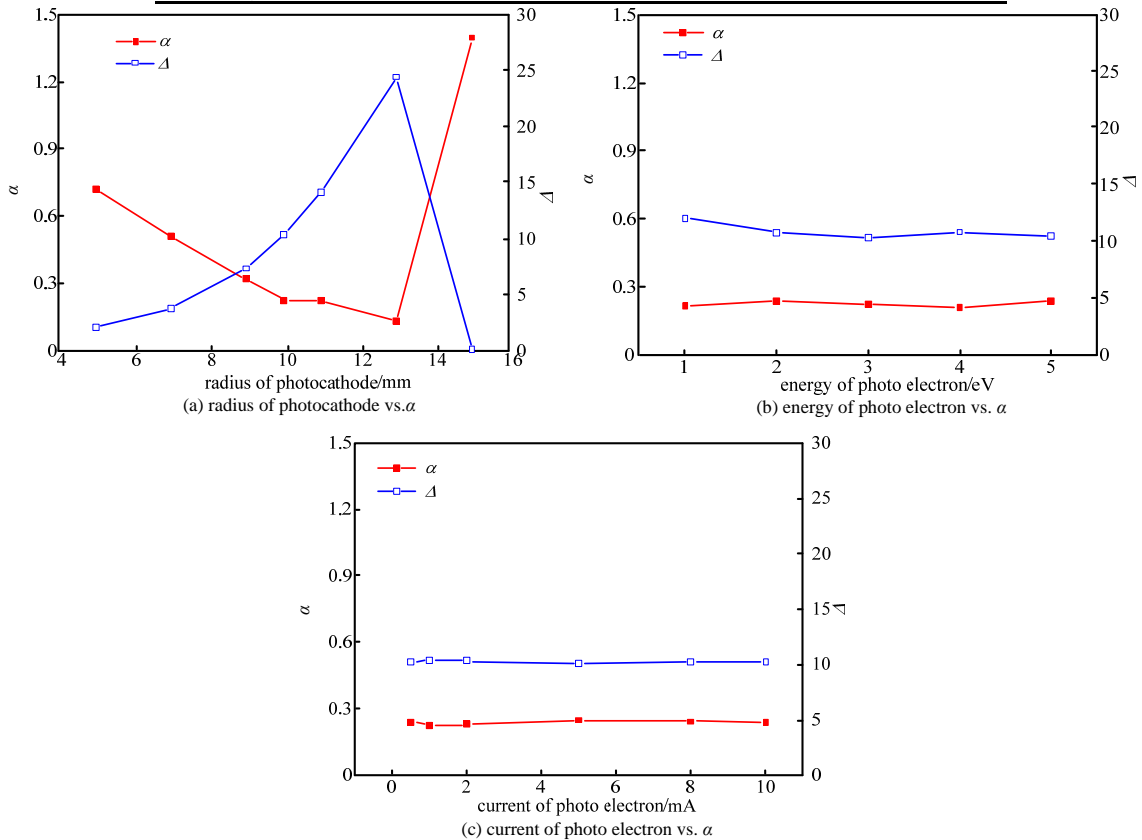


Fig.3 Effect of photocathode parameters on the coefficients of transmission and spread  
图 3 光阴极参数对电流传输系数和展宽系数影响

### 2.1 光阴极参数对展宽系数影响

与光阴极相关的参数主要有光阴极半径  $r$  和初始电子参数，包括初始光电子能量  $E$  和初始光电流  $I_c$ ，这 3 个参数变化对电流传输系数  $\alpha$  和展宽系数  $\Delta$  的影响如图 3 所示。在模拟过程中，仅有研究变量一个参数变化，其余参数均与表 2 中的基准参数相同。从图 3 可以看出，光阴极参数中对传输效率和展宽系数影响较大的是光阴极半径。随着光阴极半径的增加，电流传输系数在减小，电流展宽系数增加，这是因为电荷量一定的情况下，二者是成反比关系的。时间拉伸漂移管各电极的孔半径为 15 mm，阴极半径增大，电子束流受阴极孔的影响就越大，特别是减速电场的影响就越大，引起束流的展宽变大。但是当阴极半径为 15 mm 时，此时束流被电极吸收损失，

导致束流时间变窄，电流变大。因此束流的横向宽度应小于电极孔径。实际中，阴极初始电子的能量一般在 3 eV 左右，光电流在 1 mA 左右，参数范围内时间拉伸漂移管的电流传输系数和展宽系数基本是一致的，也就是说即使光阴极产生的电子能量具有一定分布或者光电流波形不是梯形波而是任意波形，计算的结果依然是可信的。

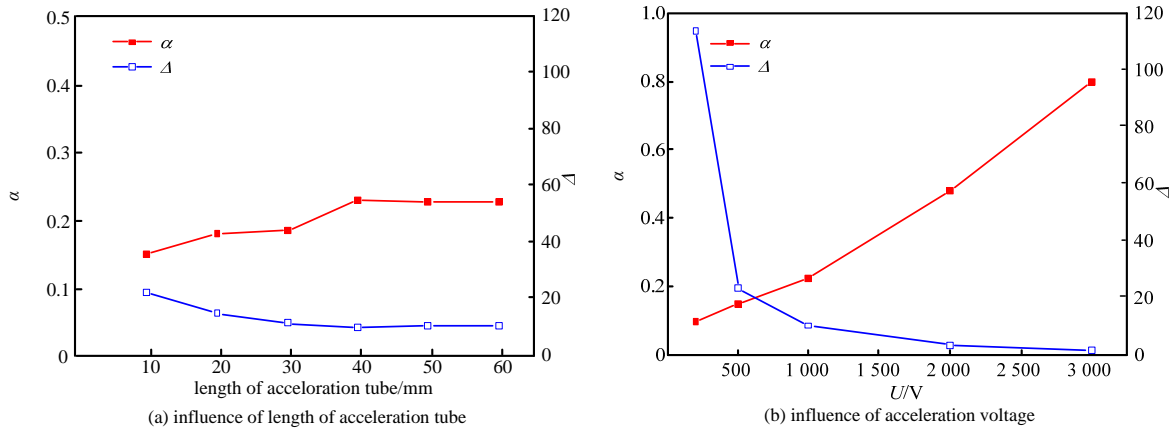


Fig.4 Effect of parameters of acceleration tube on coefficients of current transmission and spread  
图 4 加速区参数对电流传输系数和展宽系数影响

### 2.2 加速区参数对展宽系数影响

与加速区相关的参数主要有加速管长度  $L_a$ ，加速电压  $U$ ，这 2 个参数变化对电流传输系数  $\alpha$  和展宽系数  $\Delta$  的影响如图 4 所示。从图 4(a)可以看出，加速管长度增加到一定长度后，对传输系数和展宽系数影响就基本不变了，可能的原因如图 5 所示。加速电极和光阴极离得较近时会影响光阴极表面的电场，使电子束不能够均匀发射，在纵向具有一定的空间分布，即初始就发生展宽，当距离较远时(大于 40 mm)，场比较均匀，影响减弱。从图 4(b)可以看出随着加速电压的增加，展宽系数  $\Delta$  是减小的。加速电压的作用是使电子束在纵向上具有较为一致的速度渡越减速间隙，当加速电压较低时，电子束速度的分散性能引起展宽，同时能量小于减速间隙电势差的电子会反向运动，引起束流损失，因此，图中在低电压下电流传输系数  $\alpha$  比较小，实际应用中，为了保证展宽系数，加速电压不宜太高，同时又要高于减速电势差，即稍高于 800 V 为宜，本文基准参数选为 1 000 V。

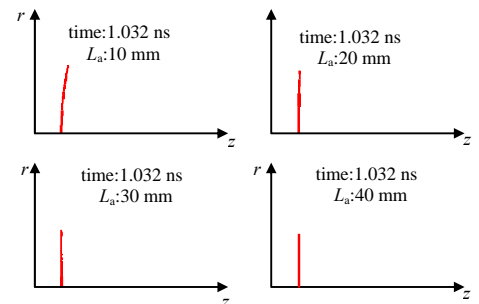


Fig.5 Dynamic distribution with different  $L_a$   
图 5 不同  $L_a$  对粒子分布影响

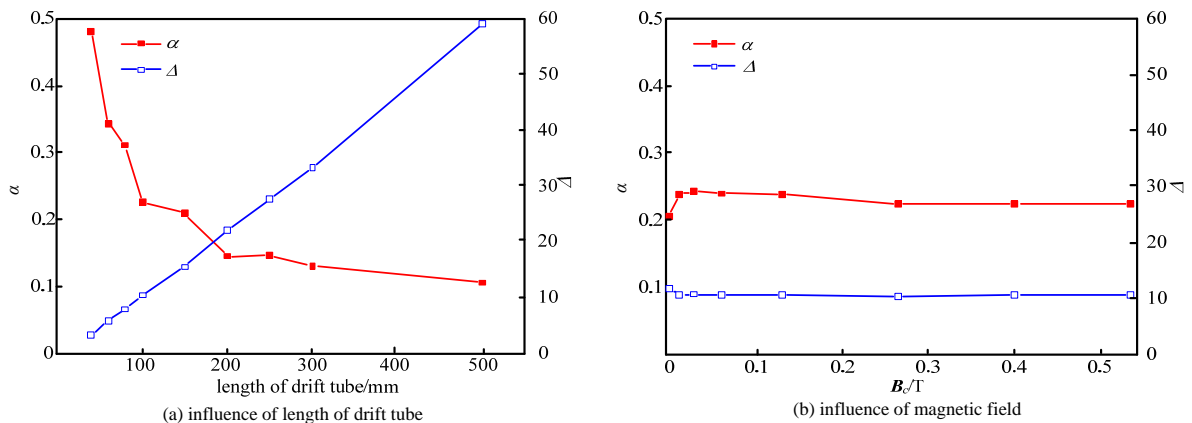


Fig.6 Effect of parameters of drift tube on coefficients of current transmission and spread  
图 6 漂移区参数对电流传输系数和展宽系数影响

### 2.3 漂移区参数对展宽系数影响

与漂移区相关的参数有漂移管长度  $L_d$ ，此外还包括整个时间拉伸漂移管所加载的螺线管中心磁感应强度  $B_c$ ，这 2 个参数变化对电流传输系数  $\alpha$  和展宽系数  $\Delta$  的影响如图 6 所示。漂移管中经过减速的电子束在无外场的条件下进行自由扩散，受电子的速度分散性和空间电荷效应影响，漂移管越长，扩散越大。从图 6(a)可以看出，电

流展宽系数和漂移管的长度基本是成正比的,但是漂移管越长,电流传输系数越小,因此,在考虑探测器灵敏度的范围内尽可能采用长的漂移管来提高展宽系数。图6(b)是螺线管磁场对2个系数的影响,磁场用于约束电子束在横向的扩散,从图上可以看出磁场对2个系数影响都不大,只是在较低的磁场时(约0.004 T)展宽系数稍有增大,原因是洛伦兹力较小,电子束发生图5所示的弯曲。

### 3 结论

第2节的计算分析表明,时间拉伸漂移管对光阴极产生的电子电流和能量基本保持线性,对外加螺线管磁场也不敏感,因此,在确定时间拉伸漂移管参数时可选定电子电流1 mA,电子能量3 eV,螺线管磁场0.016 T。表2中还有4个参数可以调节时间拉伸漂移管的电流传输系数 $\alpha$ 和展宽系数 $\Delta$ ,兼顾探测器的探测效率和信噪比,可取 $\alpha > 0.1$ , $\Delta > 40$ ,即电流衰减为不小于信号的10%,脉冲的全高半宽展宽大于40倍。对于1 mA脉宽9 ns的信号探测器上可获得大于0.1 mA,全高半宽大于360 ps的脉冲信号。

在电极半径范围内提高光阴极半径,取光阴极半径 $r=11$  mm;在保证不影响光阴极发射的条件下取最小的加速管长度,加速管长度 $L_a=40$  mm;取稍高于减速电势差的减速电压,加速电压 $U=1\ 000$  V;尽可能设计长的漂移管,但要兼顾电流传输系数,取漂移管长度 $L_d=300$  mm。利用选定的参数进行模拟计算后得到时间拉伸漂移管的电荷传输系数 $\alpha=0.117$ ,电流展宽系数 $\Delta=44.89$ ,可以满足逆康普顿散射源装置的束长测量。这一测量方法与其他束长测量方法相比具有结构简单,成本低,测量效率高的优势,但是测量精确度还依赖于脉冲高压电源的精确度和探测器的时间响应,后续将根据测量对象设计实验方法,将初步的测量结果与模拟结果对比,进一步优化时间拉伸漂移管的结构和参数。

#### 参考文献:

- [1] 黄国庆,叶恺容. 加速器束团长度测量[J]. 核技术, 2007,30(2):87-92. (HUANG Guoqing, YE Kairong. Accelerator bunch length measurements[J]. Nuclear Techniques, 2007,30(2):87-92.)
- [2] ALBERT F, ANDERSON S G, GIBSON D J, et al. Design of narrow-band Compton scattering source for nuclear resonance fluorescence[J]. Physical Review Special Topics Accelerators and Beams, 2001,14(5):050703. doi:10.1103/PhysRevSTAB.14.050703.
- [3] ZHAO Z, GUO Z Y, LIU D K, et al. The bunch length measurement of BEPC with a streak camera[C]// Proc. of Second Asian Particle Accelerator Conference. Beijing: Joint Accelerator Conferences Website(JACoW), 2001:598-600. doi:10.1023/A:1022970219502.
- [4] YANG J, KONDOH T, KAN K, et al. Femtosecond single electron bunch generation by rotating longitudinal bunch phase space in magnetic field[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006,556(1):52-56. doi:10.1016/j.nima.2005.10.115.
- [5] 孙葆根,罗箐,王晓辉. 加速器束流诊断技术的新进展[J]. 中国物理 C, 2008,32(1):145-147. (SUN Baogen, LUO Jing, WANG Xiaohui. Recent development of beam diagnostics[J]. China Physics C, 2008,32(1):145-147.)
- [6] SETTAKORN C. Nondestructive bunch length measurement with coherent diffraction radiation[C]// Proc. of Second Asian Particle Accelerator Conference. Beijing: Joint Accelerator Conferences Website(JACoW), 2001:514-516.
- [7] LUMPKIN A H, SERENO N S, RULE D W. First measurements of subpicosecond electron beam structure by autocorrelation of coherent diffraction radiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001,475(1-3):470-475. doi:10.1016/s0168-9002(01)01639-4.
- [8] KREJCIK P, SMITH G A, RUSSO T. Short bunch beam diagnostics[J]. AIP Conference Proceedings, 2002,648(1):162-174. doi:10.1063/1.1524398.
- [9] WANG D X, KRAFFT G A, SINCLAIR C K. Measurement of femtosecond electron bunches using a rf zero-phasing method[J]. Physical Review E, 1998,57(2):2283. doi:10.1103/physreve.57.2283.
- [10] BERDEN G, REDLICH B, VAN DER MEER A F G, et al. High temporal resolution, single-shot electron bunch-length measurements[C]// Proc of the Ninth European Particle Accelerator Conference. Lucerne: Laboratori Nazionali Di Frascati SIS-Pubblicazioni, 2004:2697.
- [11] WANG Jianguo, ZHANG Dianhui, LIU Chunliang, et al. UNIPIC code for simulation of high power microwave devices[J]. Physics of Plasmas, 2009,16(3):033108. doi:10.1063/1.3091931.
- [12] 胡杨,杨海亮,张鹏飞,等. 强流平板二极管阻抗特性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):338-342. (HU Yang, YANG Hailiang, ZHANG Pengfei, et al. Analysis of a high-current plain diode impedance characteristics[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2):338-342.) doi:10.11805/TKYDA201902.0338.
- [13] HILSABACK 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):57. doi:10.1063/1.3479111.