

doi: 10.3788/gzxb20134207.0792

## 条纹管行波偏转特性

李昊<sup>1,2</sup>, 田进寿<sup>2</sup>, 李岩<sup>3</sup>, 王超<sup>1</sup>, 温文龙<sup>1</sup>, 王俊锋<sup>1</sup>, 王兴超<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西安石油大学, 西安 710065)

**摘 要:** 为了获得有宽频带、小色散、高偏转灵敏度的偏转器件, 设计了一种行波偏转板. 用商业电磁模拟软件 CST 频域有限元法研究了条纹相机行波偏转板的通频带宽, 用时域有限积分法研究了行波偏转板色散曲线、特性阻抗随频率变化曲线以及对电子束的偏转特性. 对行波偏转板和传统平板偏转器的偏转灵敏度进行了对比. 模拟了正弦扫描电压信号下行波偏转板中的电场分布. 结果表明: 尖头形偏转板的通频带宽大于圆头形偏转板通频带, 且通频带宽随管脚长度增加会变窄, 最大通频带宽为 7 GHz; 行波偏转板的相速度和群速度会随频率的增大而减小, 且随着频率的增加, 特性阻抗会出现一个峰值; 相同尺寸行波偏转板比平行板结构偏转板对电子束的偏转灵敏度高两倍以上; 正弦扫描电压在板间产生的电场呈周期性, 行波偏转板有较宽的通频带, 在较宽的频带内色散小, 可以有效使电子束发生偏转.

**关键词:** 行波偏转板; 通频带宽; 特性阻抗; 慢波结构; 色散关系

中图分类号: O463; TN16

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)07-0792-5

## Travelling Wave Deflecting Characteristics of Streak-tube

LI Hao<sup>1,2</sup>, TIAN Jin-shou<sup>1</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, WEN Wen-long<sup>1</sup>,  
WANG Jun-feng<sup>1</sup>, WANG Xing-chao<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to obtain deflection device having wide bandwidth, small dispersion and high deflection sensitivity, a kind of traveling wave deflector is designed. Using commercial electromagnetic simulation software CST finite element method, bandwidth of traveling wave deflector in streak camera is studied, and the travelling wave deflector characteristics of dispersion curves, characteristic impedance changing with frequency and electron beam deflecting function are studied numerically using finite integration method. The comparison of deflecting sensitivity between traveling wave deflector and traditional plating deflector is made. Moreover, the electric field distribution in traveling wave deflector with sinewave scanning voltage signal is simulated. The results show that bandwidth of sharp top deflector is bigger than that of round top deflector and that bandwidth becomes smaller when legs of deflector become longer, with the biggest bandwidth of 7 GHz; phase velocity and group velocity decrease with the increasing of frequency; when frequency increases, a peak value exists for characteristic impedance; under the same dimensions, the deflecting sensitivity of travelling wave detector is two times higher than that of plating deflector; the electric field produced by sinewave scanning voltage appears

基金项目: 国家重大科研装备项目(高性能条纹相机的研制)和国家自然科学基金项目(No. 60901036)资助

第一作者: 李昊(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为慢波结构偏转系统. Email: lihao@opt. cn

导师(通讯作者): 田进寿(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超快诊断. Email: tianjs@opt. ac. cn

收稿日期: 2013-03-04; 录用日期: 2013-04-08

periodic; the designed traveling wave deflector has wide bandwidth, of which dispersion is small in wide frequency range, and it can effectively make electron beam deflect.

**Key words:** Travelling-wave deflector; Bandwidth; Characteristic impedance; Slow-wave structure; Dispersion characteristics

## 0 引言

条纹相机能够同时提供超快过程的一维空间(或光谱)、一维强度和一维时间超快信息. 进入 21 世纪,条纹相机的研究在世界范围内广泛开展. 2004 年,常增虎等人通过改进条纹管结构,将条纹相机在连续模式下工作的时间分辨率提高到了 280 fs<sup>[1]</sup>. 俄罗斯科学院研制的条纹相机时间分辨率达到 200 fs<sup>[2]</sup>,空间分辨率达到 40lp/mm. 日本滨松公司研制的产品其时间分辨率也达到 200 fs,动态范围达到 10 000 : 1<sup>[3]</sup>. 另外,中子和离子条纹相机也研制成功<sup>[4-6]</sup>. 超小型化条纹相机应用领域拓宽到了激光雷达成像系统上<sup>[7-10]</sup>. 条纹相机具有单次扫描<sup>[11]</sup>和同步扫描<sup>[1]</sup>两种工作模式. 同步工作模式是靠高频同步重复扫描把微弱讯号精确地叠加在荧光屏上,从而提高了其探测灵敏度和动态范围. 飞秒条纹相机也往往工作在同步扫描模式,其狭缝宽度只有 5~10 μm. 一方面,要求其偏转灵敏度高,扫描电压的斜率也较高,扫描电压有较宽的傅里叶频谱,要求条纹相机偏转板有较宽的通频带宽;另一方面还要求扫描电压的相速度和光电子飞行速度基本匹配,以达到高的扫描偏转灵敏度. 为此,设计了具有慢波特性的行波偏转器. 慢波结构是一种让电子束和电磁波能量相互交换的系统<sup>[12-17]</sup>. 行波偏转板主要原理是让加在两极板上的信号传播相速度与通过两板中间电子束行进速度相匹配,从而将信号波的能量传递给电子,使其产生更有效的偏转. 描述行波偏转系统的主要参量有:偏转灵敏度、通频带宽、特性阻抗、色散关系等. 行波偏转板要求在很宽的频率范围内迅速的改变频率,发挥微波通道的宽频带特性. 因而它的通频带宽十分重要.

目前,国内应用行波偏转板的单位非常少<sup>[13]</sup>. 所以对它的研究在国内还不多见. 美国劳伦斯-伯克利国家实验室用 MAFIA 软件模拟了行波偏转板的静电势分布及其 S 参量随频率的变化,得到了通频带宽为 5.5 GHz 的结果<sup>[11]</sup>.

本文利用 CST 软件,数值模拟研究了行波偏转板的偏转灵敏度、通频特性、特性阻抗及其色散曲线. 得到了具有 7 GHz 通频带宽的行波偏转板以及色散曲线和特性阻抗随频率变化的关系,对于高性能行波偏转器的理论设计和工程实现具有重要指导意义.

## 1 行波偏转板结构参量及激励源模型

传统的单次或低频扫描工作模式的条纹相机往往采用平行板偏转器. 这种偏转板往往通频带窄,且偏转灵敏度低. 为此在同步扫描和飞秒条纹相机中,本文利用 CST 软件的粒子工作室设计了慢波结构的行波偏转板,如图 1,结构参量如图 2. 行波偏转板采用周期性锯齿状排列结构,共有 8 个周期,行波偏转板长度 38.4 mm,板厚 1 mm,指宽 2.1 mm,指间距 0.32 mm,材料选用 1Cr18Ni9Ti. 行波偏转板所加扫描电压为正弦波信号,周期为 450 ps. 根据慢波理论<sup>[11]</sup>,行波偏转板的工作原理是在上下极板上分别加大小相等幅值相反的斜坡扫描电压或正弦波扫描电压. 当电子束从偏转板的前沿进入时,若脉冲电压信号在偏转板间激励的电磁波速度与电子束运动速度方向一致,且相互匹配,同时,在板间产生上下方向的电场分量,在两板中间轴线上的电场  $E_z$  尽可能强,就能将能量传递给电子,使其产生更大地偏转. 而为了减小电磁辐射,需要在两板间接与特性阻抗相匹配的负载.

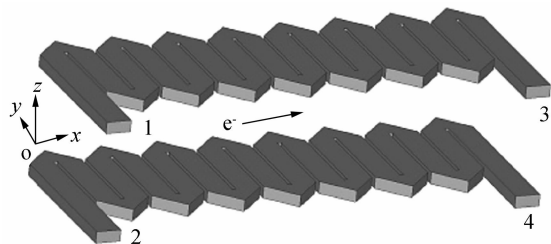


图 1 平行微带线结构的行波偏转器  
Fig. 1 Travelling wave deflector

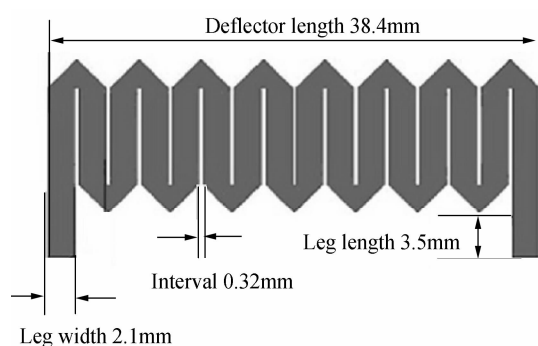


图 2 行波偏转板结构

Fig. 2 Structure of travelling wave deflector

在同步扫描相机中,一旦当条纹管的结构及电压(或激磁电流)参量确定后,光电子的轴向平均速度保持基本恒定,但根据输入探测信号的强弱不同,要求条纹相机工作在不同的扫描频率或不同斜率的

扫描电压下,这就要求行波偏转板具有尽可能宽的通频带宽,即要求扫描电脉冲所激励的电磁波相速度在很宽的频率范围内变化很小以实现跟电子的轴向速度匹配.通频带宽的定义是偏转系统散射参量随频率提高而降至 0.7 时所对应的频率.

当在图 1 所示行波偏转板的 1、2 管脚加上大小相等、相位相差  $\pi$  的扫描电压激励,且令图 1 中的 3、4 端口分别加 75 欧姆匹配负载,并共同接地时,两板间距为 5 mm. 利用 CST 微波工作室,研究了行波偏转板通频带宽、相速度色散、阻抗匹配以及对电子束的偏转特性等.

## 2 设计结果

### 2.1 散射参量及通频带宽

图 3 是散射参量随频率的变化曲线,横轴为频率轴,纵轴为散射参量的值.由图 3 中可以看出,在 2.2、4 及 5.5 GHz 处,散射参量达到极大值,此处电路发生谐振,散射参量值降低到 0.7 时对应的截止频率为 7 GHz,说明这种行波偏转板的截止频率为 7 GHz.

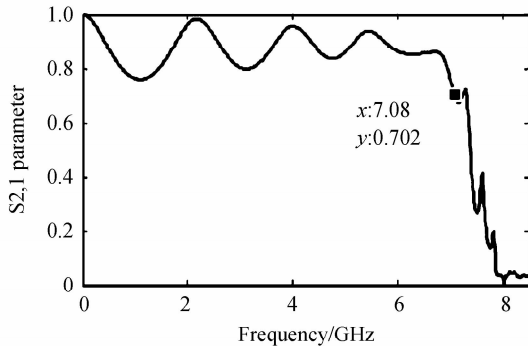


图 3 散射参量随频率变化曲线

Fig. 3 S Parameters on frequency changes curves

为了研究行波偏转板结构对其通频带宽的影响,分别模拟了当管脚长为 3.5、6.5、9.5 和 12.5 mm 的通频带,结果如图 4. 由图 4 不难发现,通频带宽

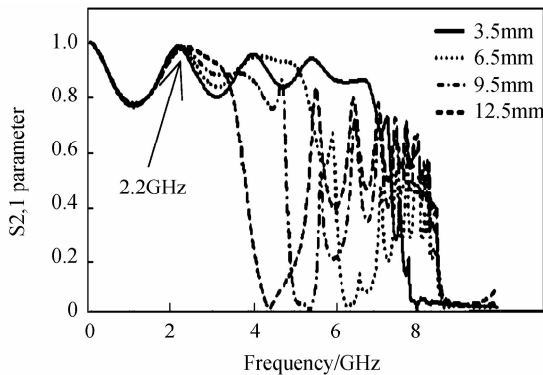


图 4 散射参量随管脚长变化曲线比较

Fig. 4 Comparison of S parameter changes on length of legs

会随指长的增加而变窄,且这几种管脚结构的偏转板在频率为 2.2 GHz 时均发生谐振,这说明 2.2 GHz 是这种行波偏转板的一个比较理想的工作频率,其偏转特性受管脚长度的影响将比较小,而且对条纹相机实际应用来讲,也是一个比较高的工作参量.目前国际上实用化同步扫描相机的最高工作频率为德国 Optronis 公司的 SSU11-10 扫描模块,其最高工作频率为 250 MHz.

图 5 是尖头和圆头两种结构行波偏转板的通频带宽对比图.可看出尖头结构行波偏转板的第一个谐振峰位于 1.8 GHz,而圆头行波偏转板的第一个谐振峰位于 1.4 GHz,尖头的截止频率为 2.3 GHz,而圆头的截止频率为 2.0 GHz.这表明两种结构的行波偏转板各有优势:圆头结构行波偏转板的通频带较窄,但是能够在较高的电压下工作.而尖头行波偏转板的通频带虽然比圆头的宽,但是容易产生尖端放电.

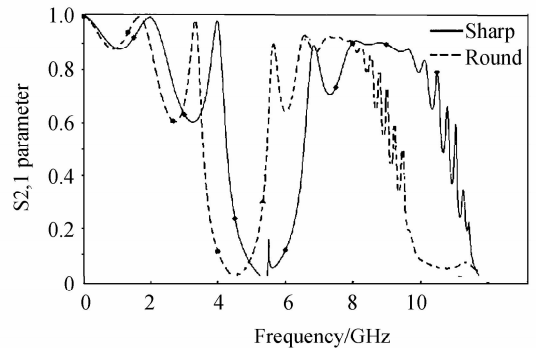


图 5 圆顶与尖顶散射参量比较

Fig. 5 S Parameter comparison of round top and sharp top

### 2.2 色散特性

为了使电子束发生更有效的偏转,让能量更多地从偏转板传递到电子束.需要使电子束沿轴向方向的速度分量与偏转板上行波的相速度基本同步(匹配).相速度的表达式为

$$v_p = \omega / \beta \quad (1)$$

群速度的表达式为

$$v_g = d\omega / d\beta \quad (2)$$

行波偏转板的  $v_p$  和  $v_g$  有以下关系

$$\frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{\omega}{v_p} \right) = \frac{1}{v_p} - \frac{\omega}{v_p^2} \cdot \frac{dv_p}{d\omega} \quad (3)$$

也可写成

$$\frac{v_p}{v_g} = 1 - \frac{\omega}{v_p} \cdot \frac{dv_p}{d\omega} \quad (4)$$

式中,  $\omega$  是角频率,  $\beta$  是行波的传播常量.  $|dv_p/d\omega|$  是色散的定量表示.

为了得到小的色散,使行波在很宽的频带范围

内与电子束速度保持一致,从式(4)中可知,  $v_p$  与  $v_g$  应尽量接近,甚至当  $v_p = v_g$  时,  $\frac{dv_p}{d\omega} = 0$  表明无色散.

为此,使用 CST 本征模求解器计算了尖头行波偏转板的色散关系.图 6 是归一化相速度(实线)和归一化群速度(虚线)随频率的变化关系.由图 6 可以看出,相速度和群速度随着频率增加而呈逐渐减小的趋势.当频率从 0 Hz 增加到 5.8 GHz 时,相速度由  $9 \times 10^7$  m/s 降至  $6 \times 10^7$  m/s,群速度从  $9 \times 10^7$  m/s 降至  $5.5 \times 10^7$  m/s.这 and 实际使用的行波偏转板前置短磁聚焦飞秒条纹相机以及四电极同步扫描管中电子束的速度 ( $7 \times 10^7$  m/s) 是匹配的,这说明尖头行波偏转板能够将信号的能量很好地传递给电子束并得到理想的偏转扫描效果.

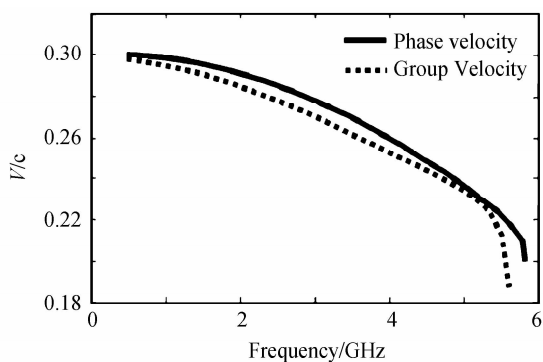


图 6 归一化相速度和群速度随频率变化曲线  
Fig. 6 Normalized phase velocity and group velocity via frequency curve

### 2.3 特性阻抗

如图 1,当电磁波在行波偏转板中从 1、2 端口传递到 3、4 端口时,该行波偏转系统相当于一个波导,会产生一定的反射,会抵消一部分入射波的能量,从而削弱电磁波对电子束的作用.而当在 3、4 端口加上匹配负载(匹配负载的大小由行波偏转板的特性阻抗决定)并接地后,就可以有效地降低反射波,从而在电子束通过的地方产生很强的有效电场  $E_z$ ,增强行波偏转板对电子束的偏转特性.图 7 是

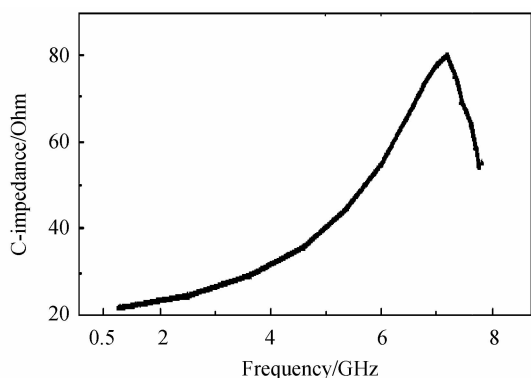
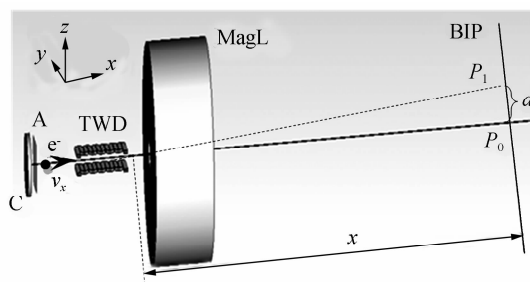


图 7 特性阻抗随频率变化曲线  
Fig. 7 Characteristic impedance via frequency curve

特性阻抗随频率的变化曲线.在 1.2 GHz 到 7.2 GHz 范围内,特性阻抗随频率的升高而增大,在 7.2 GHz 达到峰值时,特性阻抗大小为  $80 \Omega$ ,而 1.2 GHz 时特性阻抗最小,为  $22 \Omega$ .利用这一结果,在电路中联接相应的匹配阻抗,不但可以满足反射波比较小的要求,又能实现扫描电压的斜率以及扫描频率在较大范围内的变化,实现对电子束的有效偏转.

### 2.4 偏转特性

以行波偏转板前置短磁聚焦飞秒条纹变像管为例,利用 CST 粒子工作室研究行波偏转板的偏转特性.飞秒条纹变像管的原理如图 8.光电子从光电阴极激发,其初能量、发射角度、时间等都比较发散,且满足一定的统计分布<sup>[13]</sup>,在阳极高压以及阴极和阳极之间的强电场作用下,速度很快趋于一致,经行波偏转器偏转以及磁透镜聚焦,最后在最佳像面上成扫描像.  $x$  为行波偏转板出口离最佳像面的距离,  $d$  为电子束在像面上扫描后的落点  $P_0$  偏离原来落点  $P_1$  的距离.



C: Cathode; A: Anode; TWD: Travelling Wave Deflector; Mag L: Magnetic Lens; BIP: Best Image Plane  
图 8 行波偏转板前置短磁聚焦飞秒条纹变像管原理  
Fig. 8 Principle of putting forward travelling wave deflector in short length magnetic focus femto-second streak tube

图 9 是一个周期的扫描电压范围内,扫描电压

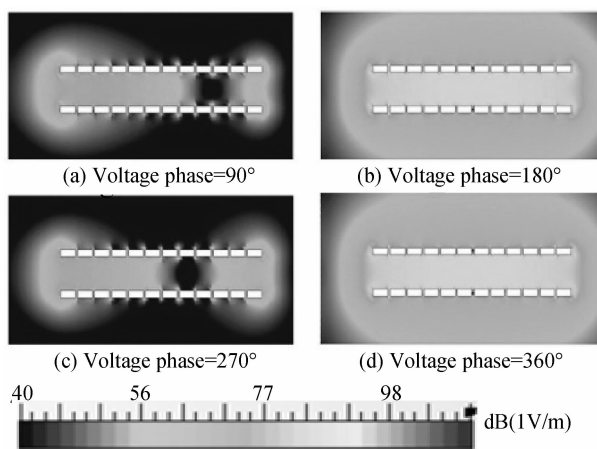


图 9 不同时刻偏转板纵切面电场  
Fig. 9 E-field on longitudinal section of deflector at different times

为正弦电压. 行波偏转板参量见图 3. 匹配阻抗采用 75 欧姆, 行波偏转板中  $y=0$  平面内电场强度分布随时间(相位)的变化情况, (a), (b), (c), (d) 分别是扫描电压的相位为  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  和  $360^\circ$  时, 行波偏转板中电场强度沿  $z$  方向的强度分布.

由图 9 可以发现, 电磁波随着时间的变化在从左向右的运动. 从图 9(b) 中可以看出, 在正弦电压相位到达  $180^\circ$  时, 板间电场强度达到峰值. 图 9(c) 相位为  $270^\circ$  时刻板间场强图. 从图中计算得到电场向前运动的速度为  $6 \times 10^7$  m/s, 与电子束运行速度  $7 \times 10^7$  m/s 匹配. 这说明随着电磁波的传输, 电磁场可以和电子束进行有效的作用, 从而使电子束产生有效偏转.

为了进一步说明行波偏转板的优势, 对比计算了行波偏转板和平板结构偏转板的偏转特性. 为了便于比较, 这两种偏转板的宽度、长度、板间距以及在条纹管中的放置位置等参量均完全一致, 模拟结果显示, 在加相同电压的情形下, 行波偏转板的偏移量约为 14 mm, 而平板偏转器只有 6 mm. 显然, 行波偏转板的偏转灵敏度要高于传统平板偏转器, 这也是目前采用行波偏转板的主要原因之一.

### 3 结论

模拟了一种行波偏转板, 其通频带宽可达 7 GHz. 并根据通频带随管脚长的变化规律得出结论: 管脚长度对通频带的影响很大, 随着管脚长的变长, 通频带宽逐渐变窄. 通过对尖头和圆头行波偏转板通频带宽的对比计算发现, 这两种结构的行波偏转板各有优势: 尖头行波偏转板的通频带宽大于圆头行波偏转板, 但圆头行波偏转板更利于高压使用. 计算了尖头行波偏转板的相速度、群速度和特性阻抗随频率的变化关系, 结果显示: 该偏转板的相速度与电子束运行速度匹配, 而且群速度与相速度大致相等, 说明这种行波偏转板的色散很小; 而这种行波偏转板的特性阻抗在很宽的频率范围内随着频率上升而增加, 在 7.2 GHz 处形成一个峰值, 然后减小. 在宽频范围内, 如果要想让所加负载和特性阻抗匹配, 需要取频带中心处的特性阻抗值作为匹配负载. 模拟了行波偏转板纵切面上的电场分布以及对电子束的偏转特性, 结果表明相同结构的行波偏转板比平行板结构的偏转板对电子束的偏转灵敏度要高两倍以上.

#### 参考文献

[1] SHAKYA M M, CHANG Zeng-hu. An accumulative x-ray

- streak camera with 280 fs resolution[C]. *SPIE*, 2004, **5534**: 125-131.
- [2] LOSOVOIL V, USHKOV I, PROKHORENKO E, *et al.* 200 femtosecond streak camera (development and dynamic measurements)[C]. *SPIE*, 2003, **4948**: 297-314.
- [3] TAKESHITA T, SUZUKI K, KINOSHITA K, *et al.* Development of a high dynamic range streak camera[C]. *SPIE*, 2001, **4183**: 255-262.
- [4] KRAVCHENKO G A. An ion streak camera[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2004, **47**(2): 157-162.
- [5] DRABELLS, MARCEL. Demonstrations of a far-infrared streak camera[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(11): 21384.
- [6] KRAVCHENKO G A. A streak-camera neutron monitor[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2004, **47**(2): 144-146.
- [7] MCLEAN J W. High resolution 3D underwater imaging[C]. *SPIE*, 1999, **3761**: 10-19.
- [8] LEBEDEV, VITALY B. Super small single streak and single frame image converter camera[C]. *SPIE*, 1999, **3516**(D): 85-91.
- [9] GLECHLER A D. Multiple-slit streak tube imaging lidar(MS-STIL) applications[C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 266-278.
- [10] GLECKLER D, GRIFFIS A, PLATH J, *et al.* Streak tube imaging lidar for electro-optic identification[C]. Proceedings of the 4th International Symposium on Technology and the Mine Problem, 2000.
- [11] LIAO Hua, HU Xin, YANG Qin-lao, *et al.* Soft X-ray streak camera with dynamic range of 2000 and picosecond temporal resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2190-2193.
- 廖华, 胡昕, 杨勤劳, 等. 动态范围 2000 的皮秒时间分辨软 X 射线扫描相机[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2190-2193.
- [12] WU Jie-xian. Design of slow-wave structure and study of its microwave characteristics[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 15-30.
- 吴节险. 慢波结构的设计及其微波特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 15-30.
- [13] LIU Yue-ping. Theory and application study of travelling wave system [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 1985.
- 刘月平. 行波偏转系统的理论与应用研究[D]. 西安: 西安光机所, 1985.
- [14] ZHANG Yong. Study of helical line slow-wave structure and its application and design[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 14-50.
- 张雍. 螺旋线慢波结构特性研究与应用设计[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 14-50.
- [15] LIU Yang, XU Jin, XU Xiong, *et al.* Research on the V-shape folded rectangular groove slow-wave structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(15): 154208-1-154208-7.
- 刘洋, 徐进, 许雄, 等. V 形曲折线矩形槽慢波结构的研究 [J]. *物理学报*, 2012, **61**(15): 154208-1-154208-7.
- [16] HUANG G, BYRD J M, FENG Jun, *et al.* Modeling of ultrafast streak cameras[C]. Proceedings of EPAC, 2006, **101**: 1250-1252.
- [17] FLETCHER R C. A broad-band interdigital circuit for use in traveling-wave type amplifiers[C]. Proceedings of the I R E, 1952, **35**: 951-957.