

应用于高速条纹相机的行波偏转器设计

宗方轲^{1,2}, 雷保国¹, 顾礼¹, 张敬金¹, 郭宝平^{1,2}, 杨勤劳^{1*}

¹深圳大学教育部/广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060;

²深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060

摘要 为了满足飞秒变像管扫描相机对偏转器的特殊要求,设计了一种应用于高速扫描相机的行波偏转器。根据 Finch 的行波偏转器设计理论,简化设计流程并利用 HFSS 软件建立偏转器模型,模拟并求解了行波偏转器的高频信号传播特性和通频带宽,通过电磁波相速度与电子束飞行速度的匹配确定了行波偏转器基本结构参数,并优化设计了一种适合应用于具有 10 kV 电子能量高速扫描相机的行波偏转器。所设计行波偏转器长度为 44 mm,板间距为 4 mm,通频带宽为 4 GHz,偏转灵敏度为 119.8 mm/kV。结合现有的高速扫描相机对此行波偏转器进行了测试实验,测试结果表明,设计结果准确可靠,设计方法得当。该研究为变像管扫描相机的行波偏转器设计提供了有效途径,缩短了高时间分辨扫描相机的研发周期。

关键词 超快光学; 电子光学器件; 行波偏转器; 条纹相机; 变像管

中图分类号 TN143; O536 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.043201

Design of Traveling-Wave Deflector for High Speed Streak Camera

Zong Fangke^{1,2}, Lei Baoguo¹, Gu Li¹, Zhang Jingjin¹, Guo Baoping^{1,2}, Yang Qinlao¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract To meet the special demands on the deflector of femtosecond streak tube camera, a kind of traveling-wave deflector for the high speed streak camera is designed. According to the design theory of traveling-wave deflector proposed by Finch, the design process is simplified and a deflector model is built by using the HFSS software. The high frequency characteristics and the pass bandwidth of the traveling-wave deflector are simulated and solved. The basic structural parameters are determined by matching the electromagnetic wave phase velocity with the electron beam velocity. Through the above method, a traveling-wave deflector is optimally designed for the high speed streak camera with the electron energy of 10 kV. The traveling-wave deflector is designed with the length of 44 mm, the plate spacing of 4 mm, the pass bandwidth of 4 GHz, and the deflection sensitivity of 119.8 mm/kV. The traveling-wave deflector is tested with the existing high-speed streak camera. The test results show that the design results are accurate and reliable, and the design method is proper. The work provides an effective way to design the traveling-wave deflector for the tube camera, and it can shorten the development cycle of high resolution scanning camera.

Key words ultrafast optics; electronic optical devices; traveling-wave deflector; streak camera; image tube

OCIS codes 320.7080; 230.7020; 100.0118; 320.7100

1 引言

在超快激光技术、激光等离子物理和惯性约束核聚变(ICF)等超快现象研究领域,变像管条纹相机是不可或缺的诊断工具^[1-4],特别是在皮秒和亚皮秒量级的高精度激光脉冲时间特性的测试中,它是目前唯一

收稿日期: 2016-11-07; 收到修改稿日期: 2016-11-23

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ230659)

作者简介: 宗方轲(1983—),男,博士后,主要从事超快信息获取技术方面的研究。E-mail: zongfk168@163.com

* 通信联系人。E-mail: qlyang@szu.edu.cn

具有高时空分辨的超快时间线性诊断工具。经过半个多世纪的发展,变像管条纹相机的时间分辨能力已经达到了几百飞秒^[5-8]。条纹相机时间分辨能力的提升必然要求更高斜率的扫描信号作配合。目前条纹相机中多使用平板型偏转器,这种偏转器的通频带宽小、偏转灵敏度低,限制了条纹相机扫描速度的进一步提高,使得更短时间脉冲信息无法分离,这就制约了变像管相机更高时间分辨的实现。这时,性能更加优良的行波偏转系统能够克服平板型偏转器的缺点,从而成为了高时间分辨飞秒条纹相机技术的首选。

20世纪50年代,关于行波传输理论的研究已经相当成熟^[9],并在微波功率放大器上面得到了广泛的应用。1972年,Yamada等^[10]把行波传输理论引入到变像管偏转器的设计领域,并在前人基础上给出了直角弯曲线型行波偏转器各种特性的计算公式。1989年,Finch等^[7]在飞秒条纹变像管的设计中使用了行波偏转器,得到了300 fs的时间分辨,实验结果表明,其使用的行波偏转器具有2.5 GHz的通频带宽,偏转灵敏度为10 cm/kV。由于行波偏转器对于条纹管时间性能提升效果显著,其在飞秒条纹管设计中获得了广泛应用。

国内在超快诊断技术领域的研究单位较少,所以对于行波偏转器的研究还比较少见^[11-12],尤其在行波偏转器设计方面还没有系统的报道。本文针对飞秒变像管对高性能行波偏转器的特殊需求,提出了一套行波偏转器的设计原则和方法,简化了设计流程并通过实验检验了此种设计方法的可靠性,为条纹变像管中行波偏转器的设计提供了简单而有效的途径,缩短了高时间分辨条纹变像管的研发周期。

2 行波偏转器的结构模型

传统的单次扫描变像管相机中大多使用的是平板型偏转器,这种偏转器不但通频带宽小,而且偏转灵敏度低,在高速条纹相机中无法满足应用需求。为此,利用HFSS软件设计并模拟仿真了用于高速条纹相机的行波偏转器。行波偏转器最重要的特性是其具有慢波结构,能够降低电磁波信号在导体中的传播相速度,使之与电子束的飞行速度相匹配,有利于电子束在电磁场的作用下更有效地发生偏转。行波偏转器具有较宽的通频带宽和较高的偏转灵敏度,适合加载高斜率扫描信号,满足高速扫描相机对偏转系统的应用需求。

图1为行波偏转器的结构和原理示意图。行波偏转器由一对具有弯曲线慢波结构的偏转板组成,上下两块偏转板都具有高频信号传输功能,具有很高的通频带宽。两路上下对称的扫描信号分别从偏转器的上下两个输入端同时导入,进入弯曲线型偏转板,由于在上下两个偏转板传输的电磁场信号不同而产生纵向电场,当电子在两板之间飞行穿越时受到电场的作用而发生偏转。由于偏转板具有慢波结构,高频扫描信号在偏转板中传输时其传播相速度会有所降低,如果其相速度能够降低到与在两偏转板之间飞行的电子束飞行速度接近,则电子束就能得到更有效地偏转,因此克服了高斜率扫描信号在平板型偏转器中传输时变像管的扫描斜率下降以及偏转灵敏度降低的缺点。为避免高频信号在偏转板内反射回波,偏转器的输出端各连接了一个吸收端子,用于对输出信号进行衰减和吸收。

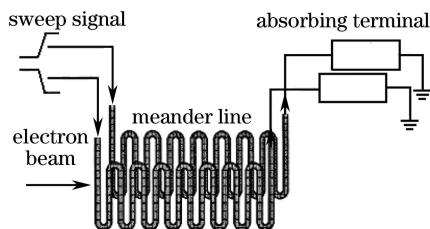


图1 行波偏转器结构和原理示意图

Fig. 1 Schematic of traveling-wave deflector

3 设计流程

行波偏转器最重要的特点就是电子束在偏转板里面飞行的速度与扫描信号在偏转板上的传输速度大小方向可以相互匹配,使得电子束在扫描信号产生的偏转电场的作用下能够更有效地发生偏转,因此具有很高的扫描偏转灵敏度。行波偏转器设计的基本要求之一是扫描信号的传播相速度与电子飞行速度相匹配。为更有效地偏转电子束,行波偏转器对于空间谐波的基模要有尽可能小的相速度,必要时还可以在传输线之间加载介质以减小相速度,这样更有利于提高偏转灵敏度。

行波偏转器慢波结构模型如图 2 所示,其为周期性弯曲线型传输线结构,指长为 $2X_0$,周期长度为 L ,线间隔为 l ,线厚度为 D ,材质为黄铜。在良导体和真空等无损耗介质中,电磁场的传播是不存在色散效应的,因此,电磁场的传播速度与频率无关,近似于光速。在行波偏转器中传输的电磁波的电场基模的相速度可以计算为

$$v_p = \frac{\omega}{\beta_0} = \left(\frac{\phi_0}{X_0 c} \right) / \left(\frac{\theta_0}{L} \right), \quad (1)$$

式中 ω 为传输波的角频率, β_0 为基波的传播常数, θ_0 为纵向传播每个周期长度 L 上的相移值, ϕ_0 为纵向指长 X_0 方向上的波数, c 为光速。由(1)式可知,在行波偏转系统中,电场基模传播的相速度与指长 X_0 和周期长度 L 有关,在无色散情况下,电磁波在良导体内的传输是以光速传播的,考虑到谐振频率下电磁波传输时 θ_0 与 ϕ_0 相当,通过周期长度与指长就能估算在行波偏转器中传输的电磁波的电场基模的相速度。在行波偏转器的设计中,针对不同应用的条纹变像管,其阳极电压的设计值也是有差别的,因此最终电子进入偏转电场时的飞行速度也是不一样的。为确保电场的传播速度与电子的运动速度相当,建立偏转器模型时需根据电子的飞行速度推算电场传播速度,从而根据(1)式确定合适的指长和周期长度比。确定之后,就可以构建行波偏转器的初步模型。



图 2 行波偏转器慢波结构模型图

Fig. 2 Schematic of slow-wave structure in the traveling-wave deflector

行波偏转器中的电场可以用满足边界条件的空间谐波的叠加进行表征,其纵向和横向电场的表达式^[10]分别为

$$E_y = -j \sum_{n=-\infty}^{+\infty} -j (-1)^n \frac{2A_0}{L} \sin\left(\Gamma_n \frac{l}{4} - \frac{\theta}{2}\right) \frac{\sin \Gamma_n (l/4)}{\Gamma_n (l/4)} \cdot \frac{\cosh \Gamma_n (y_2 - y)}{\Gamma_n y_2} \exp(-j\Gamma_n z), \quad (2)$$

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} -j (-1)^n \frac{2A_0}{L} \sin\left(\Gamma_n \frac{l}{4} - \frac{\theta}{2}\right) \frac{\sin \Gamma_n (l/4)}{\Gamma_n (l/4)} \cdot \frac{\sinh \Gamma_n (y_2 - y)}{\sinh \Gamma_n y_2} \exp(-j\Gamma_n z), \quad (3)$$

式中 A_0 为传输信号的幅值, y_2 为传输线与屏蔽接地板间的距离,

$$\Gamma_n = \frac{\theta + 2n\pi}{L}. \quad (4)$$

继而通过 Fletcher 法求得系统的导纳函数,即

$$Y(\theta) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left\{ \frac{4D}{l} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{2(L-l)}{L} \sin \frac{\theta}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \coth(\Gamma_n y_2) (-1)^n \frac{\sin [\Gamma_n (l/2)] \sin \{\Gamma_n [(L-l)/2]\}}{[\Gamma_n (l/2)] \{\Gamma_n [(L-l)/2]\}} \right\}. \quad (5)$$

在这种具有双周期结构的传输线中,电路中只应该存在相位常数为 θ 和 $\theta + \pi$ 的两种电磁波,因此依据导纳函数应用边界匹配条件可以得到这种行波偏转器的色散方程,即

$$\tan^2 \frac{\theta}{2} = \frac{Y(\theta_0)}{Y(\theta_0 + \pi)} = \tan kX_0 \sqrt{\epsilon}(\theta_0 + \pi) \cdot \tan kX_0 \sqrt{\epsilon}\theta_0. \quad (6)$$

根据色散方程求得相移与频率的关系,代入(1)式就可得到电场传播的相速度与频率的关系曲线。这对估量偏转器偏转性能非常重要,平坦的相速度曲线意味着更小的色散,意味着在更宽通频带宽内相速度与电子飞行速度的匹配,有利于电子在电场作用下更有效地发生偏转,使得偏转器拥有更高的偏转灵敏度。

最后根据模拟结果,计算出系统的传播系数 S 参量随频率变化趋势,绘制出行波偏转器的传播特性曲线。根据计算结果适当调整指长、像宽等参数重新进行计算,就可以得到各种参数下的偏转器模型的传播特性曲线,再根据计算结果研究各种参数变化对行波偏转器性能的影响,最后确定最佳参数值。综上所述,根据行波偏转器的设计理论就可以设计出满足所需要的偏转系统,其设计过程如下:

- 1) 由条纹变像管的设计值确定电子飞行速度,从而选定行波偏转器合适的指长和周期长度,并由此建立行波偏转器的数值模型;
- 2) 对所建立的模型用 Fletcher 法求得偏转系统的电磁场分布和导纳函数;
- 3) 在给定的边界条件下,利用导纳函数推出色散方程;
- 4) 根据色散方程求得相移与频率的关系,然后确定电场传播的相速度;
- 5) 利用求解结果,绘制出系统的传播系数 S 参量随频率变化的曲线,计算系统的频率传播特性,并由此确定偏转器的最优结构。

4 设计结果

以最新设计的高速条纹变像管作为行波偏转器的设计依据^[13],其阳极电压为 10 kV,偏转板的总长度为 44 mm,偏转电压为 360 V,由此计算出电子的飞行速度为 5.9×10^7 m/s,由(1)式估算出偏转器的周期指长比在 0.2 左右。根据电场均匀性的要求,设置指长初始值为 10 mm,周期为 2 mm,厚度为 0.5 mm,板间距为 4 mm。根据以上参数建立偏转器的数值模型,分别改变指长、周期长度、厚度和板间距等参数,依次求解,并计算行波偏转器的传播 S 参量随频率的变化关系,以确定偏转器的最优结构及其传播特性和通频带宽。

根据条纹相机的应用要求,行波偏转器的设计要点之一就是具有一定带宽,其指长与通频带宽的关系如图 3 所示。计算结果表明,行波偏转器的指长是影响其通频带宽的重要因素;指长越短,截止频率越高,其通频带宽越大,信号传输失真越小;指长越长,截止频率越低,即通频带宽越小,信号在其中传输时高频信息损耗越严重。当指长为 10 mm 时,偏转器的截止频率为 4.0 GHz;当指长为 12 mm 时,截止频率为 3.0 GHz。

行波偏转器的另外一个设计要点就是电磁场的传播相速度,要求其与光电子的飞行速度相匹配,以利于电子束发生更有效的偏转。由(1)式可知,行波偏转器中电场基模的传播相速度与指长 X_0 和周期长度 L 有关,在周期相同的情况下,指长越长,传播速度越小,因此选择合适的指长就可以控制电磁波在偏转器中的传输速度。根据色散方程求得相移与频率的关系,然后把计算出来的相移值及对应的谐振频率值代入(1)式就可得到电场传播的相速度与频率的关系曲线,如图 4 所示,图中纵坐标为归一化相速度(单位为 c)。计算结果表明,不同指长具有不同的相速度曲线,电场传播的相速度随着指长的增大而降低;相同指长情况下,相速度随频率的增大而减小,指长越短,相速度随频率的变化趋缓,曲线越平坦,色散越小。考虑到电磁波的传输速度与电子飞行速度($0.2c$)的匹配关系,确定行波偏转器的最佳指长为 10 mm,然后根据偏转板的频率特性计算结果确定其他参数的最佳值,最终确定偏转器的设计参数。

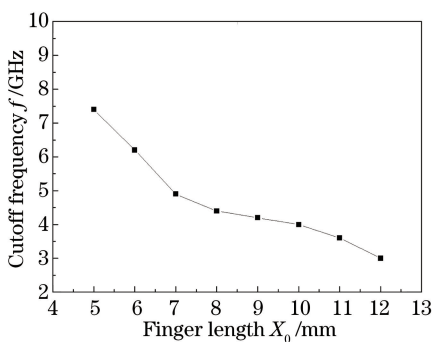


图 3 行波偏转器通频带宽与指长关系图

Fig. 3 Pass bandwidth versus finger length in the traveling-wave deflector

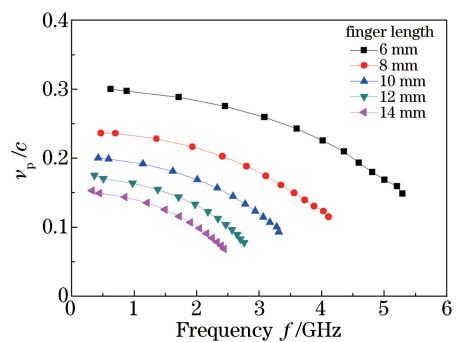


图 4 不同指长对相速度-频率关系曲线的影响

Fig. 4 Curves of phase velocity to frequency for different finger lengths

为了比较所设计的行波偏转器和平板型偏转器的频率特性差异,计算了相同尺寸的平板型偏转系统的频率特性,如图 5 所示。图中 $S(1,2)$ 为信号从偏转器输入端口 1 到输出端口 2 的传播系数,纵坐标为归一化的传输参量,其值为输出端口与输入端口的能量之比。由计算结果可知,平板型偏转器对高频信号损耗较大,0~2 GHz 的频率范围内信号传输的能量直线下降至 15% 左右;而行波偏转器在 0~4 GHz 的频率范围内对信号传输曲线较平坦且损耗较低,传输特性的优越性显著。

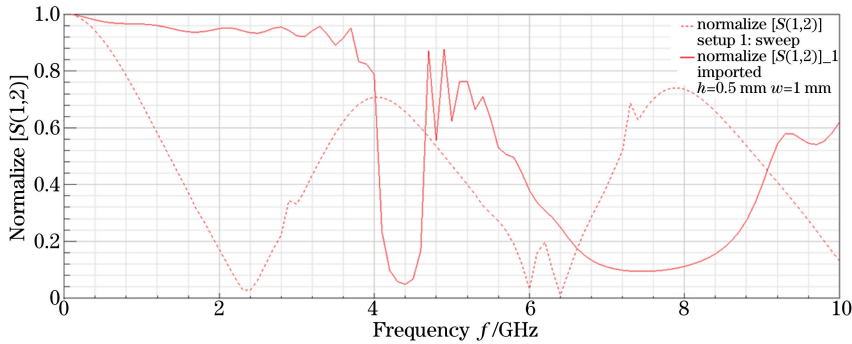


图5 行波偏转器与平板型偏转器的频率特性对比图

Fig. 5 Frequency characteristics of traveling-wave deflector and plate deflector

为了更直观地比较二者对快速扫描信号的传输效果,计算了理想情况下扫描信号加载偏转器后的输出波形。不考虑之前的信号耦合及传输的影响,假设扫描信号理想地从偏转板的输入端加载,在输出端的输出信号波形如图6所示,扫描信号为斜率为1 kV/ns的斜坡电压脉冲,其时域波形图如图6(a)所示,经傅里叶变换得到其频谱图如图6(b)所示,由频谱图可知,其频率成分占比呈指数衰减,由于10 GHz以上的高频成分占比很小,可以忽略不计,只计算了0~10 GHz频段。扫描信号经偏转器传输,相当于其各频率幅值按照偏转器的传输特性进行衰减,对衰减后的频谱进行傅里叶逆变换就可以得到偏转器输出波形的时域图,如图6(c)和(d)所示,其输出波形为离散化的散点图。对比平板型和行波偏转器的输出波形图,平板型偏转器的输出波形两端波动更为剧烈,这是高频信息被平板型偏转器吸收严重造成的。

扫描信号经偏转器输出后的线性度是条纹变像管性能评价的重要指标之一,因此,要求偏转器对扫描信号具有较小的线性失真。按照最小二乘法对散点图6(c)和(d)进行直线拟合,由二者偏差计算输出曲线的非线性误差,考虑到波形两端由于高频信息截断误差较大,计算线性度时不考虑两端误差较大的数值,只截取了中间80%的数值进行计算。计算结果表明,平板型偏转器输出波形的非线性误差为5.82%,行波偏转器的输出波形则为0.81%,相比平板型偏转器,行波偏转器的性能优越性明显,其对扫描信号的失真较小。根据对扫描信号频谱的计算(图6),4.0 GHz的频带宽度已经满足其应用需求,所以图3中只计算了指长在5~12 mm范围之内变化时其截止频率的变化趋势。

5 实验验证

为了验证上述理论计算结果,把所设计制作的行波偏转器安装到扫描变像管中并对其进行了动态测试实验。图7为实验原理图。实验中利用波长为266 nm的飞秒激光器作为辐射光源对扫描变像管进行了动态扫描特性测试。紫外飞秒激光器作为信号光源,一路通过反射镜组为扫描管提供等时间间隔、强度呈等比衰减的脉冲序列,另一路经分光镜取样作为扫描电路的触发信号。等时间间隔的光脉冲序列经光纤和透镜准直后照射在扫描变像管的光阴极激发出光电子图像,当这些光电子束团经扫描管的加速聚焦后到达偏转系统入口时,触发信号触发扫描电路产生扫描信号加载在偏转器输入端(图1),使偏转器处于正常工作状态,这样电子脉冲序列就按照时间顺序依次偏转并轰击荧光屏发光呈现出等间距的二维图像,这些图像最终由CCD相机读取和记录。

扫描信号以及扫描变像管的测试结果如图8所示,图8(a)为加载在行波偏转器上的斜坡电压脉冲波形,斜率为365 V/ns;图8(b)为扫描管的动态测试结果,条纹间隔时间为100 ps(由紫外标准具镜面距离确定),偏转灵敏度为119.8 mm/kV,由条纹距离和偏转灵敏度可以计算出偏转器的扫描速度为360 V/ns,与扫描电压斜率相当,这说明行波偏转器的信号传播速度与电子飞行速度匹配良好,扫描信号的高频信息经偏转器后失真程度小,衰减较少。实验中的扫描信号其频谱中的4 GHz成分占比为1%,其加载行波偏转器后失真较小,说明所设计行波偏转器的频率带宽优于4 GHz。

由于实验室中现有的扫描电路不能产生更高斜率的扫描脉冲,因此不具备在更高斜率情况下扫描脉冲在行波偏转器中传输时的测试条件,该文没能完成对行波偏转器加载更高斜率扫描脉冲信号时的动态测试

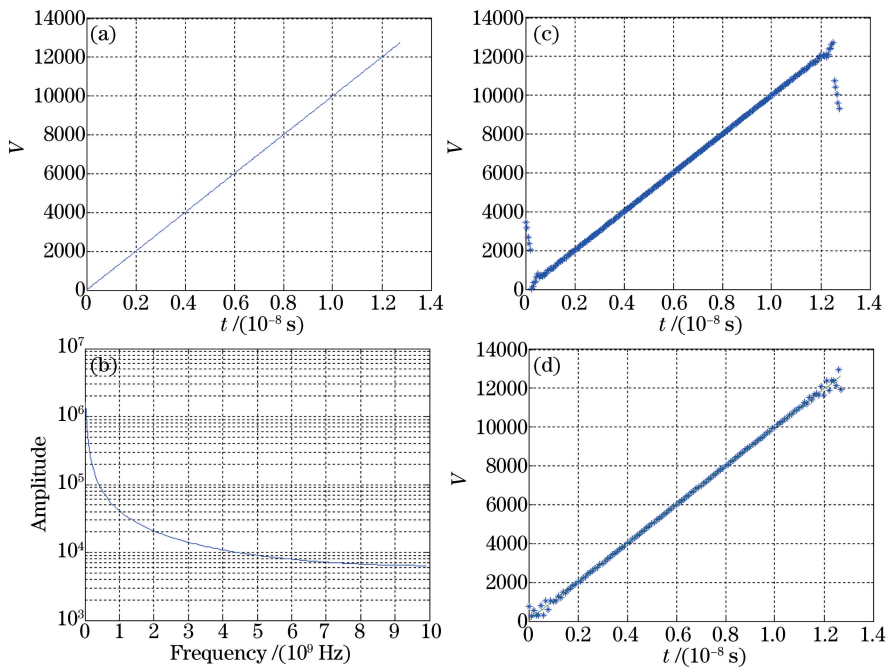


图 6 扫描信号经过偏转器前后的波形对比图

Fig. 6 Waveforms of the scanning signal before and after the deflector

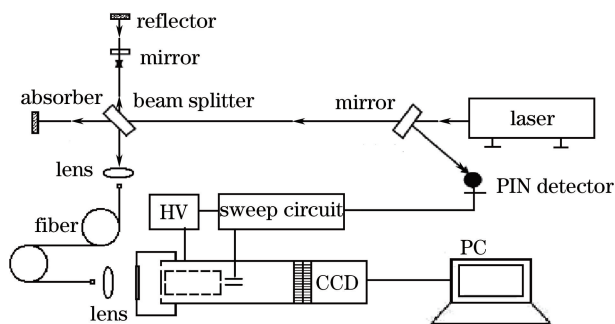


图 7 动态测试系统原理图

Fig. 7 Schematic of dynamic testing system

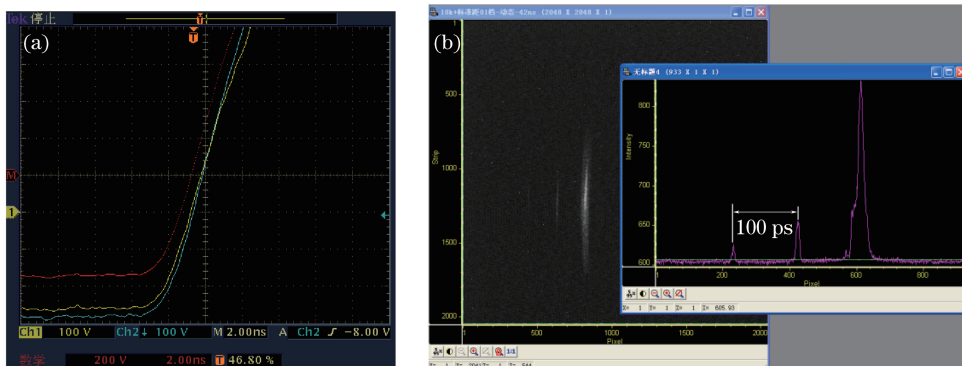


图 8 (a) 扫描信号波形; (b) 实验测试图像

Fig. 8 (a) Waveform of the scanning signal; (b) experimental test image

实验, 后续将研制更快的扫描脉冲产生电路, 为扫描管提供更高的扫描速度, 以实现变像管的更高时间分辨率。

6 结 论

按照飞秒变像管对偏转器的特殊要求,根据 Finch 的行波偏转器设计理论,简化设计流程并利用 HFSS 软件建立偏转器模型,模拟求解了行波偏转器的高频信号传播特性和通频带宽,通过电磁波相速度与电子飞行速度的匹配确定了行波偏转器的基本结构,并优化设计了一种适合应用于具有 10 kV 电子能量高速条纹相机的行波偏转器。结合现有的高速扫描相机和飞秒激光测试平台测试了所设计的行波偏转器。实验结果表明,其偏转灵敏度和扫描速度与理论计算值符合良好,偏转效果符合预期,证明了所提出的行波偏转器设计流程和设计方法是可行有效的。该研究为高速条纹相机行波偏转器的研发提供了简单的切实可行的有效途径,缩短了行波偏转器的研发周期,在高时间分辨条纹相机特别是飞秒条纹相机设计领域中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Gu Li, Zong Fangke, Li Xiang, *et al.* Designment of a femtosecond streak camera with a novel accelerating structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1134001.
顾 礼, 宗方轲, 李 翔, 等. 一种新型加速结构飞秒条纹相机的设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1134001.
- [2] Peng Xiaoshi, Wang Feng, Yang Dong, *et al.* Characteristics study of the backscattering light on Shenguang-III prototype[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314004.
彭晓世, 王 峰, 杨 冬, 等. 神光III原型背向散射光特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314004.
- [3] Li Tao, Xu Xiangyan, Cao Xibin, *et al.* Optimization design and calibration of a high dynamic range X-ray streak camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s112007.
李 涛, 徐向晏, 曹希斌, 等. X 光大动态条纹变像管优化设计与评价[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s112007.
- [4] Hu Xin, Liu Shenye, Ding Yongkun, *et al.* Design of SG-III X-ray streak camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2871-2875.
胡 昕, 刘慎业, 丁永坤, 等. 神光III主机 X 射线条纹相机设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2871-2875.
- [5] Liao Hua, Hu Xin, Yang Qinlao, *et al.* Streak image tube with wide sweep range and high temporal resolution[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(1): 79-82.
廖 华, 胡 昕, 杨勤劳, 等. 宽量程高时间分辨扫描变像管[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(1): 79-82.
- [6] Liu J Y, Wang J, Shan B, *et al.* An accumulative X-ray streak camera with sub-600-fs temporal resolution and 50-fs timing jitter[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(20): 3553-3555.
- [7] Finch A, Liu Y, Niu H, *et al.* Development and evaluation of a new femtosecond streak camera[C]. *Proceedings of SPIE*, 1989, 1032: 622-626.
- [8] Takahashi A, Nishizawa M, Inagaki Y, *et al.* New femtosecond streak camera with temporal resolution of 180 fs[C]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2116: 275-284.
- [9] Fletcher R C. A broad-band interdigital circuit for use in traveling-wave-type amplifiers[J]. *Proc IRE*, 1952, 40(8): 951-958.
- [10] Yamada I, Takagi T. A new type of traveling-wave deflection system [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1972, 19(2): 204-213.
- [11] Liu Rong, Tian Jinshou, Li Hao, *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.
- [12] Liao Hua, Hu Xin, Yang Qinlao, *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.
- [13] Zong F, Yang Q, Cai H, *et al.* Electron accelerating unit for streak image tubes[J]. *Sādhanā*, 2015, 40(8): 2333-2339.