



一种高偏转灵敏度同步扫描条纹管

柳雪玲 田进寿 田丽萍 陈萍 张敏睿 薛彦华 李亚晖 方玉煜 徐向晏 刘百玉 缙永胜

A synchroscan streak tube with high deflection sensitivity

Liu Xue-Ling Tian Jin-Shou Tian Li-Ping Chen Ping Zhang Min-Rui Xue Yan-Hua Li Ya-Hui
Fang Yu-Man Xu Xiang-Yan Liu Bai-Yu Gou Yong-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 218502 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210814

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210814>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小型条纹管数值模拟及实验研究

Numerical calculation and experimental study on the small-size streak tube

物理学报. 2018, 67(18): 188501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180643>

一种高灵敏度复合环形腔结构的光纤激光拍频位移传感方案

High sensitivity fiber displacement sensor based compound ring laser cavity with linear variation of beat frequency signal

物理学报. 2020, 69(18): 184217 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200385>

高灵敏度的量子迈克耳孙干涉仪

High sensitivity quantum Michelson interferometer

物理学报. 2018, 67(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172563>

基于向日葵型圆形光子晶体的高灵敏度太赫兹折射率传感器

High sensitivity terahertz refractive index sensor based on sunflower-shaped circular photonic crystal

物理学报. 2019, 68(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191024>

双螺线圈射频共振结构增强硅空位自旋传感灵敏度方法

Methodology of improving sensitivity of silicon vacancy spin-based sensors based on double spiral coil RF resonance structure

物理学报. 2020, 69(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200765>

线极化Bell-Bloom测磁系统中抽运光对磁场灵敏度的影响

Influence of pump light on sensitivity of magnetometer based on linearly polarized Bell-Bloom structure

物理学报. 2019, 68(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190030>

一种高偏转灵敏度同步扫描条纹管

柳雪玲¹⁾²⁾ 田进寿^{1)4)†} 田丽萍³⁾ 陈萍¹⁾ 张敏睿¹⁾ 薛彦华¹⁾
 李亚晖¹⁾²⁾ 方玉熳¹⁾²⁾ 徐向晏¹⁾ 刘百玉¹⁾ 缙永胜¹⁾

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, 超快诊断技术重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (金陵科技学院, 网络与通信工程学院, 南京 211169)

4) (山西大学极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2021年4月27日收到; 2021年7月12日收到修改稿)

设计了一种高时空分辨率、高偏转灵敏度的同步扫描条纹管。采用降低阴极与阳极之间电压、增大等位区长度的方法提高了条纹管的偏转灵敏度。采用在阴极后引入超精细栅网、合理设计六电极静电聚焦系统上各个电极所加电压以及将电子束交叉点设计到偏转板入口处的方法, 降低了时间畸变和时间弥散, 提高了条纹管的时空分辨率。7000 V工作电压下的模拟结果显示: 在阴极有效尺寸 10 mm × 4 mm 内, 该条纹管的物理时间分辨率优于 1.83 ps @MTF = 10%, 阴极静态空间分辨率优于 38 lp/mm @MTF = 10%, 偏转灵敏度为 125 mm/kV; 在 250 MHz 同步扫描频率下的动态空间分辨率优于 16 lp/mm, 极限时间分辨率为 1.39 ps; 在 10 mm × 20 μm 阴极狭缝脉冲下得到的同步扫描时间分辨率优于 2.3 ps。此外, 实验测试结果显示: 该条纹管阴极中心的静态空间分辨率为 40 lp/mm, 在 75 MHz 同步扫描频率下测得的时间分辨率为 5.55 ps。

关键词: 同步扫描条纹管, 偏转灵敏度, 超快弱光诊断, 时空分辨率

PACS: 85.60.Bt, 85.60.Ha, 85.60.-q, 42.79.Ls

DOI: 10.7498/aps.70.20210814

1 引言

根据应用场景的不同, 条纹相机的扫描模式可以分为单次扫描、重复扫描、双扫描以及同步扫描^[1,2]。单次扫描条纹相机通常用于记录信号强度相对较强的超快过程, 但实际应用中有时待测光信号的强度非常微弱, 单次扫描结果已无法达到荧光屏的显示阈值^[3,4]。为了有效记录这类微弱超快发光现象, 人们发明了同步扫描条纹相机技术, 采用高频正弦扫描电压的部分准线性区代替了单次扫描条纹相机中加载在偏转电极上的线性斜坡扫描电压信号, 利用正弦扫描信号高达几十兆赫兹到几百兆赫兹(与待测光脉冲的重复频率相同或成倍数

关系)的周期特性将穿过偏转板的超快微弱信号精确地扫描叠加在荧光屏上的同一位置, 从而达到可被荧光屏记录的程度^[5]。

作为超短弱光现象的有力诊断工具, 同步扫描条纹相机具有高时空分辨率、高探测灵敏度、大动态范围以及直观实时等优点^[5,6], 在超快荧光寿命^[7,8]、超快荧光光谱^[9]、束缚激子发光光谱^[10]等光生物、光化学以及生物医学领域的研究中有着非常重要的作用。经过四十多年的发展, 同步扫描技术如今已取得了很大进展。就国外而言, 日本 Hamamatsu 公司研制的 C10910 通用条纹相机^[11], 其同步扫描频率在 38—165 MHz 范围可调, 最大同步扫描频率为 250 MHz, 时间分辨率小于 1 ps, 具有高探测灵敏度, 可以实现单光子探测, 但其

† 通信作者. E-mail: tianjs@opt.ac.cn

阴极有效长度为 4.42 mm. 德国 Optronis 公司研制的 SC-10 条纹相机 [12], 其同步扫描频率在 25—250 MHz 范围内可调, 时间分辨率小于等于 2 ps, 但是其静态空间分辨率在阴极有效尺寸 8 mm × 2 mm 内只有 5 lp/mm. 英国 Photek 公司生产的 Photochron 5 同步扫描条纹相机各方面的性能最为优良 [13,14], 其同步扫描频率高达 250 MHz, 时间分辨率为 2 ps, 空间分辨率为 50 lp/mm, 偏转灵敏度高达 133 mm/kV, 不过其阴极有效尺寸为 8 mm × 2 mm. 就国内而言, 中国科学院西安光学精密机械研究所研发出的 2200 同步扫描条纹相机是目前国内该领域的最高水平 [15,16], 其同步扫描频率高达 300 MHz, 时间分辨率优于 5 ps, 光阴极有效长度大于 10 mm, 静态空间分辨率为 25 lp/mm, 但其偏转灵敏度只有 60 mm/kV, 对同步扫描驱动模块输出功率要求很高. 为此设计新的同步扫描管, 在兼顾有效工作面积以及时空分辨能力的前提下, 尽可能提高其偏转灵敏度.

一般来说对单次扫描条纹管稍做修改就可以用于同步扫描相机中, 但是单次扫描条纹管的偏转灵敏度通常较低, 为了获得较大的扫描信号斜率以提高条纹管的技术时间分辨率, 就需要扫描电路提供较大的输出功率和较高的扫描频率, 这对扫描电路实际实现来说具有较大困难 [17]. 因此, 本文结合实际应用中对同步扫描技术的需求, 设计了一款高时空分辨率、高偏转灵敏度、阴极有效尺寸为 10 mm × 4 mm 的等径圆筒型同步扫描条纹管. 该条纹管电极结构单一, 易于加工, 利用电子光学系统的共轭性, 可以按比例缩放制作出不同阴极大小的条纹管, 而且这种条纹管的聚焦系统由多个电极共同组成, 调节电极电压就能满足实际使用中对待放大倍率和像面位置的多种应用需求.

2 电子光学设计的理论和方法

设计的条纹管的结构剖视图如图 1 所示, 可以看出整个系统由光电阴极、栅极、第一聚焦电极、第一阳极、第二聚焦电极、第二阳极、一对偏转板、一对消隐板以及荧光屏等部分构成. 条纹管总长 306.2 mm, 阴极与栅极的间距为 2 mm, 等位区长度为 170.2 mm. 为了方便后文描述, 定义 X 轴为狭缝方向 (弧矢方向), Y 轴为扫描方向 (子午方向), Z 轴为轴向.

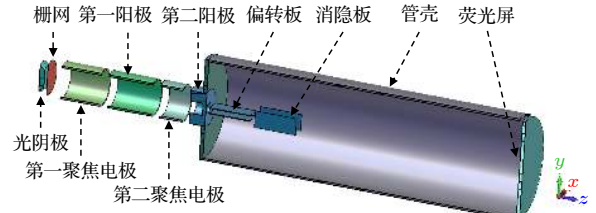


图 1 条纹管的结构剖视图

Fig. 1. Cross-sectional view of the streak tube.

在运用有限积分法 [18] 计算条纹管的电磁场之前, 采用六面体网格对结构进行了剖分, 为了保证计算精度的基础上尽可能缩短仿真时间, 本文在全局网格加密基础上对电子出射处以及电场梯度变化比较大的区域 (阴栅之间、阳极孔附近) 进行了局部网格加密. 每加密一次计算一次电场分布, 直至结果收敛 (加密前后两次的计算结果基本一致). 此外, 为了更加贴合实际工作时条纹管光电阴极出射的光电子状态, 采用 Monte Carlo (M-C) 方法 [19] 对光电子的初始能量、发射仰角、发射方位角以及发射位置进行了合理抽样. 在求得条纹管内真实的电磁场分布并设置好粒子源之后, 采用龙格库塔法 [20] 对电子运行轨迹进行了追踪, 通过对每一个网格上电子所满足的离散形式的洛伦兹力方程 ((1) 式) 和粒子动力学公式 ((2) 式和 (3) 式) 进行求解, 获得电子在每一个网格内的运行速度和位置, 并将当前网格中的计算结果作为电子进入下一个网格中的初始状态值, 以此类推, 直至所有电子运行至计算区域边界或荧光屏上, 便获得了完整的电子运行轨迹.

$$m^{n+1}\mathbf{v}^{n+1} = m^n\mathbf{v}^n + q\Delta t(\mathbf{E}^{n+1/2} + \mathbf{v}^{n+1} \times \mathbf{B}^{n+1/2}), \quad (1)$$

$$z^{n+3/2} = z^{n+1/2} + \Delta t v_z^{n+1}, \quad (2)$$

$$\mathbf{r}^{n+3/2} = \mathbf{r}^{n+1/2} + \Delta t \mathbf{v}_r^{n+1}, \quad (3)$$

其中 m 为电子质量, \mathbf{v} 为电子速度, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别为电子所受的电场和磁场, z 和 \mathbf{r} 分别为电子的轴向位置和径向位置, v_z 和 \mathbf{v}_r 分别对应电子的轴向速度和径向速度.

最后, 通过观察电子运行轨迹 (如放大倍率、交叉点位置), 并比较不同电参数下条纹管的最佳像面位置、时间分辨率、空间分辨率以及时间畸变等指标, 本文最终设计的条纹管阴极、栅极、第一聚焦电极、第一阳极、第二聚焦电极、第二阳极和其他的电压值分别为 -7000, -3470, -4470, -4625, -5357, 0 和 0 V.

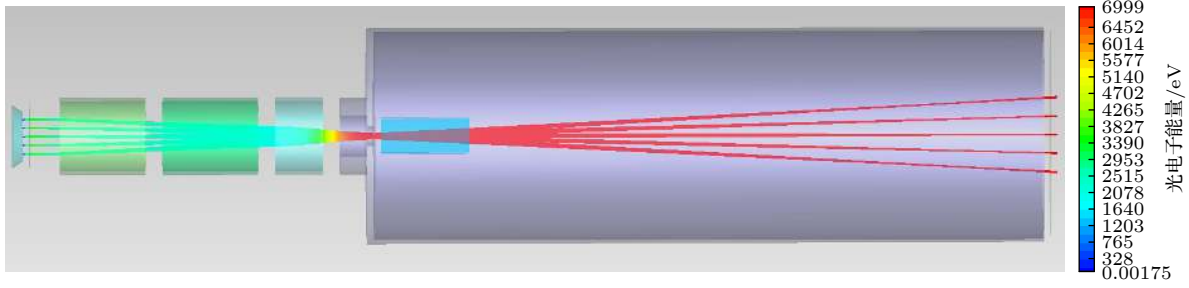


图 2 阴极发射电子的运行轨迹

Fig. 2. Trajectories of electrons emitted from the cathode.

该电压参数下条纹管内的电子运行轨迹如图 2 所示, 从图 2 可以看出, 电子束交叉点恰好位于偏转板入口附近, 这能有效降低电子在偏转板入口处的最大轨迹高度, 从而降低偏转板入口处非均匀横向场对光电子的弥散作用, 提高条纹管的时间分辨率^[17,21]. 图 3 为不同轴向位置处光电阴极中心的像斑大小, 可以看出, 在 $Z = 301.2$ mm 处电子像斑最小, 即 301.2 mm 为此参数下条纹管的最佳像面位置.

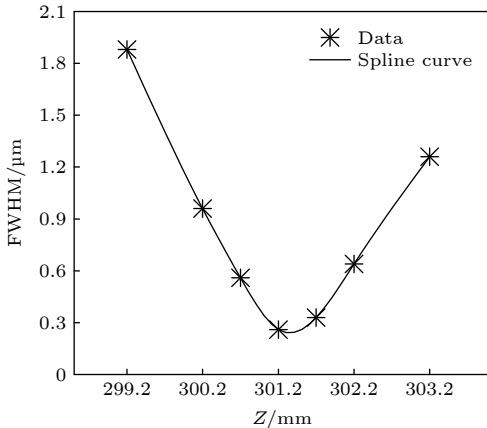


图 3 不同轴向位置处光电阴极中心的像斑大小

Fig. 3. Size of the image spot at the center of the photocathode at different axial positions.

3 结果与讨论

3.1 条纹管内的场分布特性分析

在轴对称静电聚焦系统中, 利用谢尔赤 (Scherzer) 公式^[22]展开式可以得到近轴区电子所受轴向电场力和径向电场力分别为

$$\mathbf{F}_z = eV'(z), \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_r = -\frac{e}{2}V''(z)\mathbf{r}, \quad (5)$$

其中 e 为电子电量, r 和 z 分别为电子的径向位置和轴向位置, \mathbf{F}_r 和 \mathbf{F}_z 分别为电子所受的径向电场力和轴向电场力, $V'(z)$ 和 $V''(z)$ 分别为轴上电位的一阶导数和二阶导数.

图 4 为上述设计电压下条纹管子午面内的电势分布、轴上电位分布以及轴上电位的一阶导数和二阶导数分布情况, 由于漂移区电势为 0 V, 图中主要展示了条纹管静电聚焦区域内的电场分布情况.

就电子在条纹管内所受的轴向力 \mathbf{F}_z 而言, 从图 4(a) 和图 4(b) 可以看出, 在阴极 ($Z = 0$ mm) 到栅极 ($Z = 2$ mm) 这个很短的区域内, 条纹管的轴上电位增大得非常迅速, 因而电子会在此区间获得很高的加速度, 这将很大程度上减小电子在阴极和栅极之间的时间弥散以及穿过整个条纹管的飞行时间, 从而大幅度改善条纹管的时间分辨率. 此外, 结合 (4) 式以及图 4(c) 中的蓝色曲线可以发现, 电子在条纹管聚焦区中受到加速-减速交替场作用. 在刚进入聚焦区时 $V'(z) > 0$, 电子沿轴向被加速; 在聚焦区中间部分 $V'(z) < 0$, 电子沿轴向被减速; 在聚焦区后半部分电子又受到 1 个很强的加速场. 这种交替场设计有助于抵消条纹管的部分时间畸变^[23,24]. 同时由于在聚焦区后半部分电子基本都靠近轴运动, 此时强的加速场有助于提高电子的轴向速度, 从而缩短电子渡越时间, 提高条纹管的时间分辨率. 从图 4(c) 中蓝色曲线还可以看出, 在穿过聚焦区后 $V'(z) = 0$, 电子沿轴向不再受电场力的作用, 因此理论上电子在条纹管后半部分做匀速漂移运动.

就电子在条纹管内所受的径向力 \mathbf{F}_r 而言, 从 (5) 式可以看出, 电子所受径向力 \mathbf{F}_r 的大小与 r 及 $V''(z)$ 都成正比, 方向由 $V''(z)$ 决定. 当 $V''(z) > 0$ 时, $\mathbf{F}_r < 0$, 电子受到指向轴的径向力, 即电子会

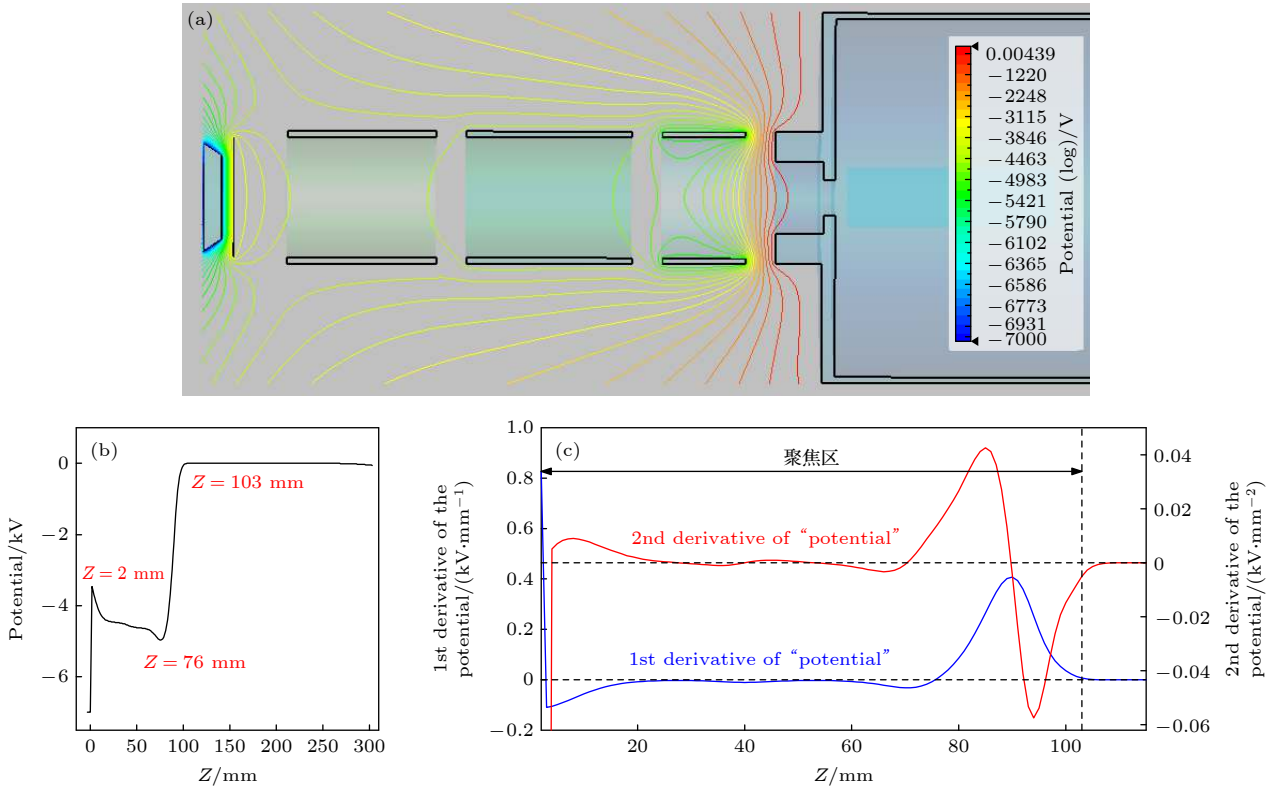


图 4 条纹管内电势分布情况 (a) 子午面内电势分布图; (b) 轴上电势分布; (c) 轴上电势的一阶导数和二阶导数分布
 Fig. 4. Potential distribution of the streak tube: (a) Potential distribution on the meridian plane; (b) potential along the z axis; (c) the first and second derivatives of the potential along the z -axis.

会聚; 当 $V''(z) < 0$ 时, $F_r > 0$, 电子受背离轴的径向力, 即电子会发散, 而且离轴距离越远电子受到的径向力越强. 结合图 4(c) 中红色曲线来看, 电子从栅极刚进入聚焦区时, $V''(z) < 0$, 电子呈发散趋势; 在之后很长一段区域中 $V''(z)$ 时正时负, 电子时而会聚时而发散; 在聚焦区后半部分, 即第二聚焦电极与第二阳极构成的这段区域内, $V''(z)$ 呈现出非常明显的正负交替变化, 电子先是在第二聚焦电极中受到逐渐增强的会聚力, 随着越靠近第二阳极, 会聚力迅速减弱, 电子转而受到逐渐增强的发散力, 增大到一定程度后发散力又逐渐减弱, 直至在阳极孔出口处 $V''(z)$ 变为零, 之后电子沿径向所受的力不再变化. 但总的来看电子在栅极到第二阳极这段区域内的 $V''(z)$ 大于零, 这也是电子束能够在该条纹管中实现聚焦的根本原因. 相比单个电极的静电聚焦系统, 这种多电极构成的静电聚焦系统能够产生 $V''(z)$ 沿轴正负交替的电场, 这种设计不仅可以使电子从栅极到阳极的渡越时间降低到最小^[17], 而且通过改变各个电极上所加电压能够灵活设计条纹管的放大倍率以及最佳像面位置, 有利于降低条纹管的再设计和再生产成本.

3.2 静态模式下时空分辨特性分析

本文采用时间调制传递函数 (time modulation transfer function, TMTF) 和空间调制传递函数 (spatial modulation transfer function, SMTF) 来表征条纹管时间分辨率和空间分辨率的好坏, 将 TMTF 曲线下落到 10% 时横坐标 (时间频率) 的倒数定义为条纹管的时间分辨率, 将 SMTF 曲线下落到 10% 时的横坐标 (空间频率) 定义为条纹管的空间分辨率^[25,26]. 为了讨论光电阴极的有效尺寸^[27], 分别定量计算了该条纹管沿狭缝方向和沿扫描方向从光电阴极离轴不同距离处出射的光电子的物理时间分辨率和静态空间分辨率.

首先, 研究了该条纹管沿狭缝方向的成像特性. 在光电阴极内表面离轴 6 mm 范围内每隔 1 mm 沿狭缝方向发射 3000 个满足 M-C 抽样分布的光电子. 通过追踪电子轨迹并分析电子在荧光屏上像斑的空间分布, 得到条纹管沿狭缝方向离轴不同距离的时间调制传递函数和时间畸变分别如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 弧矢方向和子午方向的空间调制传递函数分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示. 从图 5(a) 可以看出, 距离阴极中心越近, 条纹管的物理时间

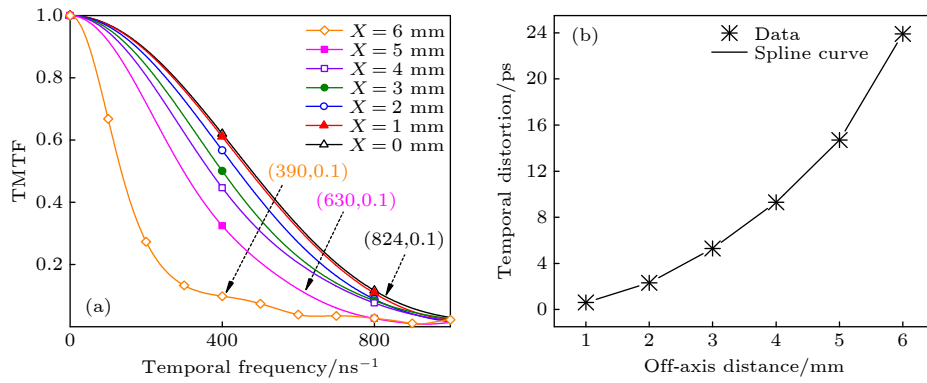


图 5 狭缝方向离轴不同距离处发射的电子束的时间分辨特性 (a) TMTF; (b) 时间畸变

Fig. 5. Time resolution properties of the electrons emitted from different distances on the cathode in the direction of the slit: (a) TMTF; (b) temporal distortion.

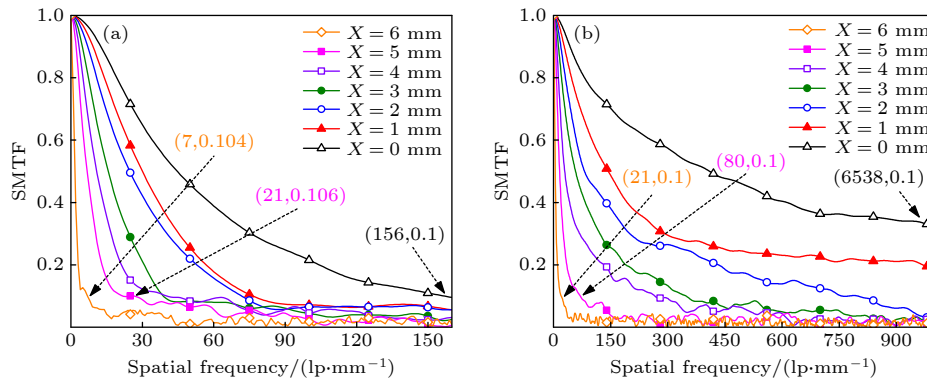


图 6 狭缝方向离轴不同距离处发射的电子束的空间调制传递函数 (a) 弧矢方向; (b) 子午方向

Fig. 6. SMTF of the electrons emitted from different place on the cathode in the direction of the slit: (a) SMTF in the sagittal direction; (b) SMTF in the meridian direction.

分辨率越高, 其中阴极中心的物理时间分辨率为 1.21 ps, 离轴 5 mm 和 6 mm 处的时间分辨率分别为 1.59 ps 和 2.56 ps. 此外, 从图 5(b) 不难发现, 该条纹管具有正的时间畸变, 即离轴距离越远的电子在条纹管中的渡越时间越长, 这也是为什么越往边缘时间分辨率会降低的原因. 从图 6 可看出, 无论是弧矢方向还是子午方向, 阴极中心的空间分辨率都最高, 越往边缘空间分辨率越低, 且同一电子束的子午方向空间分辨率均高于其弧矢方向空间分辨率. 显然, 沿狭缝方向距离阴极中心 6 mm 范围内, 该条纹管荧光屏上的弧矢方向空间分辨率优于 7 lp/mm, 子午方向空间分辨率优于 21 lp/mm. 而该电压参数下条纹管弧矢方向和子午方向的放大倍率均为 -2.13, 因此, 该条纹管光电阴极上的弧矢方向空间分辨率优于 14 lp/mm, 子午方向空间分辨率优于 44 lp/mm. 如果以物理时间分辨率优于 2 ps, 光电阴极上的静态空间分辨优于 25 lp/mm 的标准来判断, 则只有离轴 5 mm 内发射的电子能够满足要求, 因此该条纹管光电阴极沿狭缝方向的

有效尺寸为 10 mm.

考虑到实际工作中条纹管前端设有狭缝光阑, 而不是理想点成像, 因此在讨论该条纹管光电阴极沿扫描方向的有效尺寸时, 不能只依据阴极中心位置上沿扫描方向发射的几个理想点的成像结果来判断. 而是要根据光电阴极上沿扫描方向能够有效成像 (在此位置上沿狭缝方向 10 mm 范围内发射的光电子均能获得满足判断标准的时空分辨率) 的最大离轴距离来判断. 本文对光电阴极沿扫描方向离轴 2 mm 内电子束的成像情况进行了讨论, 在光电阴极内表面, 扫描方向离轴 1 mm 和 2 mm 的位置上, 分别从狭缝方向 0—5 mm 范围内每隔 1 mm 发射 3000 个满足 M-C 抽样分布的光电子. 表 1 为光电阴极 10 mm × 4 mm 范围内发射的光电子的物理时间分辨率、荧光屏上的弧矢方向空间分辨率以及子午方向空间分辨率.

从表 1 可看出, 无论是沿狭缝方向还是沿扫描方向, 条纹管的时间分辨率和空间分辨率都随着离轴距离的增大而减小. 如果仍以物理时间分辨率优

表 1 光电阴极 $10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 内发射的光电子的时空分辨率
Table 1. Temporal and spatial resolution of photoelectrons emitted within $10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ of the photocathode.

离轴距离		$X = 0\text{ mm}$	$X = 1\text{ mm}$	$X = 2\text{ mm}$	$X = 3\text{ mm}$	$X = 4\text{ mm}$	$X = 5\text{ mm}$
时间分辨率/ps	$Y = -1\text{ mm}$	1.22	1.24	1.26	1.34	1.42	1.63
	$Y = -2\text{ mm}$	1.24	1.27	1.37	1.40	1.40	1.83
弧矢方向空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	$Y = -1\text{ mm}$	177	88	61	39	44	21
	$Y = -2\text{ mm}$	66	122	77	40	36	18
子午方向空间分辨率/(lp·mm ⁻¹)	$Y = -1\text{ mm}$	605	2268	431	186	76	40
	$Y = -2\text{ mm}$	515	211	147	139	47	27

于 2 ps, 光电阴极上的静态空间分辨优于 25 lp/mm 的标准来判断, 显然沿扫描方向 2 mm 内狭缝方向不同距离处发射的电子的时空分辨率均优于判断标准. 其中时空分辨率最差的 ($Y = -2\text{ mm}$, $X = 5\text{ mm}$) 位置处发射的电子束的物理时间分辨率为 1.83 ps, 对应的光电阴极上的弧矢方向空间分辨率为 38 lp/mm, 子午方向空间分辨率为 57 lp/mm. 因此该条纹管光电阴极沿扫描方向的有效尺寸优于 4 mm. 综上, 本文设计的同步扫描条纹管的光电阴极的有效尺寸为 $10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$.

3.3 偏转特性分析

同步扫描模式下, 条纹相机的时间分辨率由电子在条纹管内飞行时的物理时间弥散、偏转区引起的技术时间弥散以及同步扫描模块引起的触发动抖三部分共同决定 [28]. 其中技术时间弥散与条纹管的偏转灵敏度、扫描电压的斜率以及阴极像宽有关, 扫描电压斜率一定时, 偏转灵敏度越大, 时间分辨率越高. 为了计算该条纹管的偏转灵敏度, 在其他电极电压保持不变的情况下, 本文从阴极中心发射了 3000 个满足 M-C 抽样分布的光电子, 采用正负对称接法依次在偏转板上极板上加了 15, 30, 45, 49 V 的电压. 图 7 为不同偏转电压下电子在荧光屏上的偏转距离变化, 可以看出, 偏转距离与偏转电压呈良好的线性关系, 偏转电压每增加 1 V, 电子在荧光屏上沿扫描方向移动 125 μm , 即该条纹管的偏转灵敏度为 125 mm/kV. 当所加电压为 49 V 时, 部分电子将被偏转板截获, 测得此时电子束在荧光屏上的偏转距离为 12.34 mm.

此外, 还研究了偏转电压对电子束空间分辨率的影响, 图 8 为不同偏转电压下离轴不同距离处发射的电子的弧矢方向静态空间分辨率 (图 8(a)) 和子午方向静态空间分辨率 (图 8(b)), 可以看出, 随

着偏转电压的增大, 即电子偏转距离的增大, 两个方向离轴不同距离发射的电子的空间分辨率均呈下降趋势, 但同一偏转电压下, 距离阴极中心越近的电子束的空间分辨率依然越高.

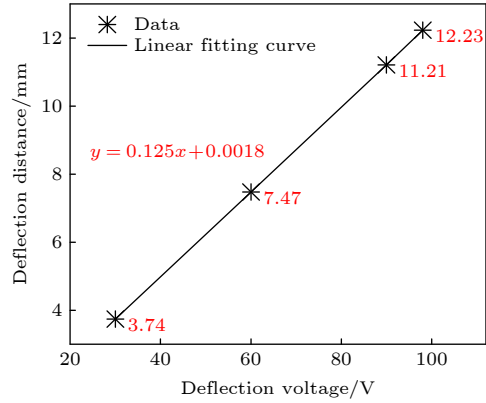


图 7 荧光屏上偏转距离随偏转电压的变化

Fig. 7. Deflection distance versus voltage applied on deflection plate.

3.4 同步扫描模式下时空分辨特性分析

数值计算了扫描频率为 250 MHz 时条纹管的同步扫描时空分辨率. 为了尽可能使电子束匹配在正弦波的零值附近, 使电子尽可能保持在偏转系统的轴附近运行, 从而获得较大的扫描斜率和较好的扫描线性, 降低偏转板入口处非均匀横向场以及偏转板中纵向场对电子弥散的影响 [17]. 本文通过追踪电子轨迹以及匹配阻抗上实际电压信号的时变情况完成了电子束与正弦波准线性区的匹配. 图 9 为匹配阻抗上的电压信号变化, 其中 4357 ps 为电子到达偏转板入口处的时间, 4892 ps 为电子到达偏转板出口处的时间, 显然电子束在偏转板中运行时对应的扫描电压变化区间恰好位于正弦扫描电压信号的零值左右, 对应的扫描电压斜率为 0.322 kV/ns.

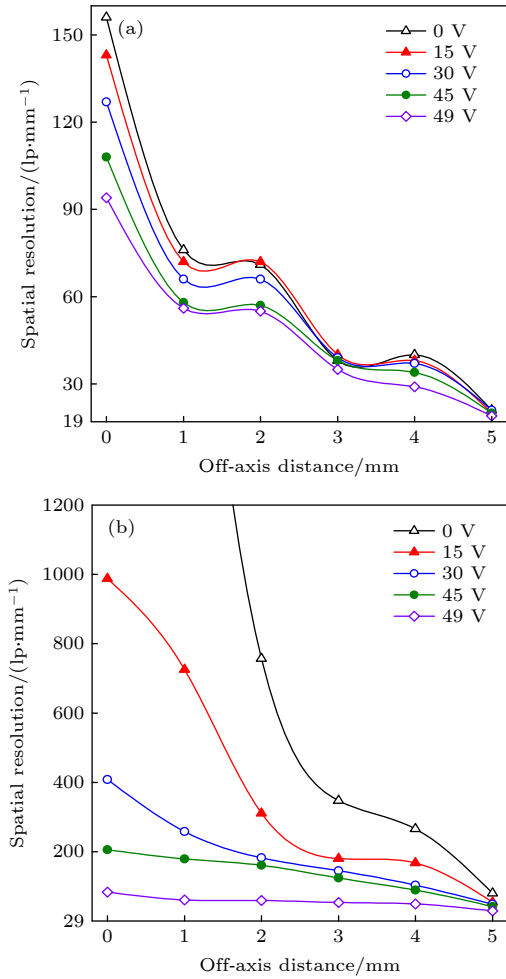


图 8 不同偏转电压下离轴不同距离处发射的电子的空间分辨率 (a) 弧矢方向; (b) 子午方向
 Fig. 8. Spatial resolution of the electrons emitted at different distances from the axis varies with the deflection voltage: (a) Sagittal direction; (b) meridian direction.

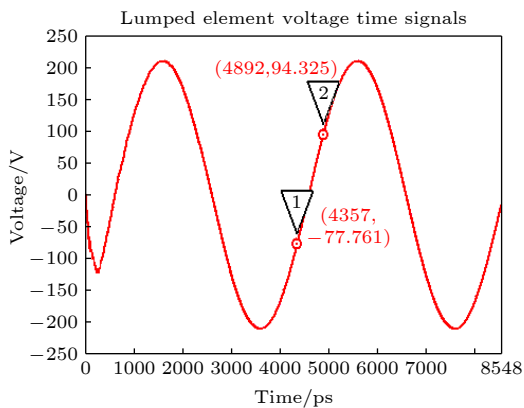


图 9 正弦扫描电压信号
 Fig. 9. Sine sweep voltage signal.

依据瑞利判据, 当入射光脉冲的时间弥散相比条纹管的时间分辨率可以忽略不计时, 条纹管的时间分辨率可以定义为入射光脉冲在荧光屏上所成

像的强度分布的半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 值. 为此, 本文从光阴极中心发射如图 10(a) 所示的 FWHM 为 50 fs, 时间间隔为 10 ps 的两束电子脉冲序列, 图 10(b) 中的黑色散斑为两束电子脉冲所成像在荧光屏上的分布, 图 10(b) 中红色曲线为光电子在荧光屏上沿扫描方向的概率分布曲线. 依据单个电子脉冲在荧光屏上的沿扫描方向的尺寸为 54 μm , 两束电子脉冲在荧光屏上被扫开的距离为 389 μm , 且两束电子脉冲的时间间隔为 10 ps, 可以计算出该条纹管在上述扫描信号下的极限时间分辨率为 1.39 ps.

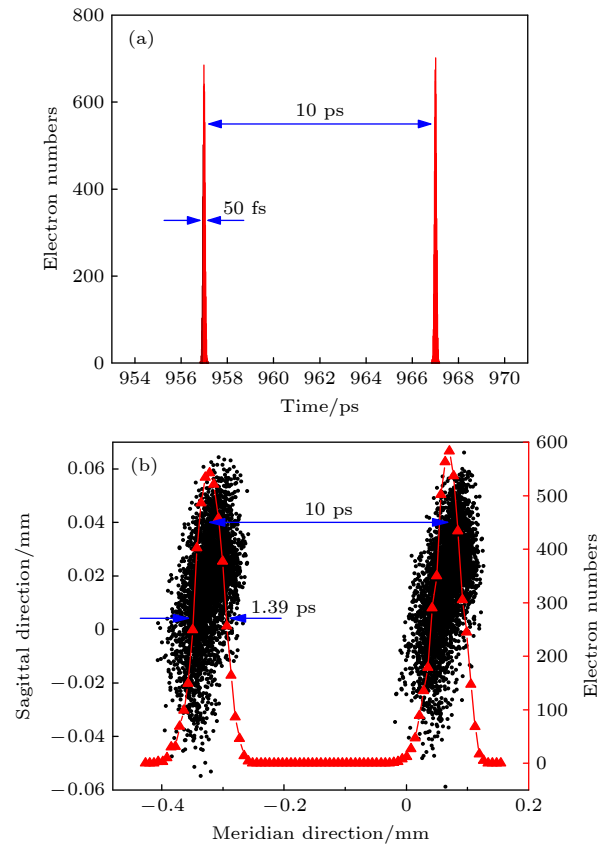


图 10 阴极发射的光电子脉冲序列及其扫描结果 (a) 蒙特卡罗抽样的电子脉冲序列; (b) 时间间隔为 10 ps 的电子脉冲序列的扫描图像
 Fig. 10. Emitted electron pulses from photocathode and its scanning image: (a) M-C sampling electron pulse sequences; (b) scanning image of the electron pulses with an interval of 10 ps.

采用计算荧光屏上电子像斑沿狭缝方向积分曲线的 FWHM 法给出了条纹管的动态空间分辨率. 动态扫描模式下, 条纹管的子午方向空间分辨率不仅包含了电子束的空间弥散, 还包含了时间弥散, 因此在表征条纹管的动态空间分辨率时要用

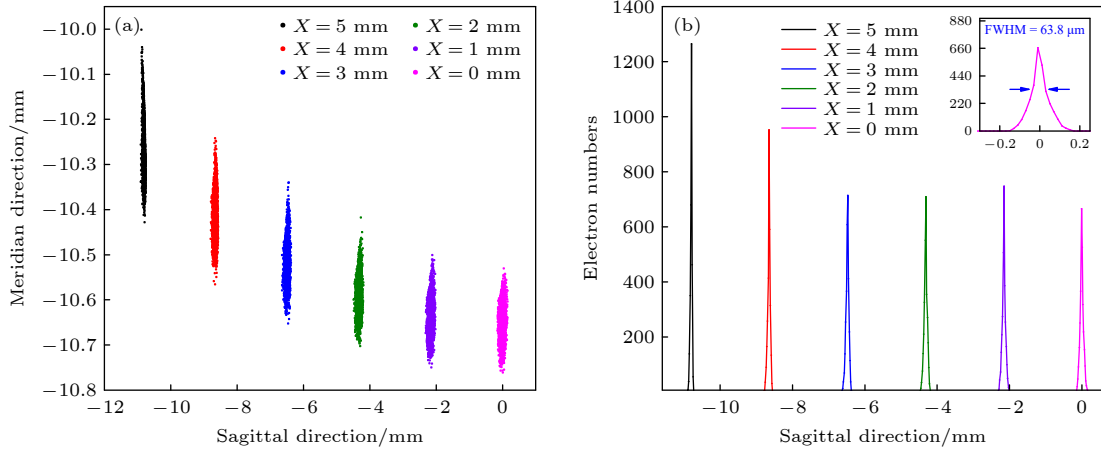


图 11 动态空间分辨率模拟结果 (a) 荧光屏上电子像斑分布; (b) 电子像斑沿弧矢方向的强度分布曲线

Fig. 11. Simulation results of dynamic spatial resolution: (a) Distribution of the scanning image on the phosphor screen; (b) intensity distribution of the scanning image along the sagittal direction.

仅反映电子束空间弥散的弧矢方向空间分辨率表示^[21]. 结合图 8 分析结果可以看出, 阴极有效区内离轴最远的位置发射的电子束被偏转至荧光屏有效区边缘时的空间分辨率最小, 因此条纹管的动态空间分辨率主要取决于这个最小的弧矢空间分辨率. 为了定量分析, 沿狭缝方向距离阴极中心 5 mm 范围内, 每隔 1 mm 发射一束电子束, 通过调整偏转板上所加直流电压大小, 选择合适的扫描工作点, 使得每个电子束都被偏转到荧光屏有效区的边缘附近. 图 11(a) 为电子束被偏转至离轴 10.7 mm 时荧光屏上的像斑分布, 图 11(b) 为像斑分布沿弧矢方向的强度积分曲线. 从图 11(a) 可以看出, 离轴越远的电子束在荧光屏上所成的像更偏向 y 轴正向, 这是由于该条纹管具有正的时间畸变, 结合定义的扫描电压信号来看, 越晚进入偏转板的电子受到的扫描偏转电压更大, 所以往 y 轴正向偏转得越厉害. 此外, 从图 11(b) 可以看出, 动态扫描模式下该条纹管的最佳像点移向了离轴距离较远的位置, 测得阴极中心电子像斑沿弧矢方向强度分布曲线的 FWHM 为 $63.8 \mu\text{m}$, 因此可以计算出条纹管在该同步扫描电压下光电阴极上的动态空间分辨率优于 16 lp/mm .

3.5 同步扫描狭缝像

上述动态时间分辨的计算是从阴极中心理想点发射具有一定时间间隔的电子脉冲得到的, 而实际工作中, 条纹管阴极前端设有狭缝光阑, 所以 1.39 ps 只是该扫描电压下条纹管的极限时间分辨率. 为此从阴极表面沿狭缝方向发射两个间隔为

2.3 ps , 尺寸为 $10 \text{ mm} \times 20 \mu\text{m}$ 的狭缝粒子源, 通过观察荧光屏上两条狭缝像的交叠情况进一步分析条纹管的动态时间分辨率大小. 图 12 为两束间隔 2.3 ps 的狭缝粒子源的动态扫描像, 由于条纹管电子光学系统存在正的时间畸变, 狭缝像两端都朝 y 轴正向有一定程度的弯曲, 因此不能直接依据整个狭缝像沿扫描方向的强度分布曲线 (看是否满足瑞利判据) 来判断两个狭缝是否能够分辨. 所以对条纹像边缘和中心这两个具有代表性的位置沿扫描方向进行了强度积分, 对应的强度积分曲线分别如图 12 中的左插图和右插图所示. 根据瑞利判据, 边缘位置和中心位置强度积分曲线的鞍峰比分别为 0.63 和 0.33 , 均低于瑞利判据要求的 0.8 ^[29], 所以无论是在狭缝方向的边缘位置还是中心位置, 两个狭缝像都可以被分辨开, 即该扫描电压下条纹管的时间分辨率优于 2.3 ps .

4 静态测试结果

实验室已成功研制出这款高偏转灵敏度的等径圆筒型同步扫描条纹管, 实物如图 13 所示. 通过 STR 测试平台对该条纹管的光阴极灵敏度 (photocathode luminance sensitivity, PLS)、光阴极光谱灵敏度 (photocathode radiance sensitivity, PRS) 以及静态空间分辨率进行了测试.

4.1 光阴极积分灵敏度和光谱灵敏度测试

实验采用 STR 测试平台的 LED 光源作为测试光源, 为了屏蔽杂散光并尽可能保证输入光的均匀

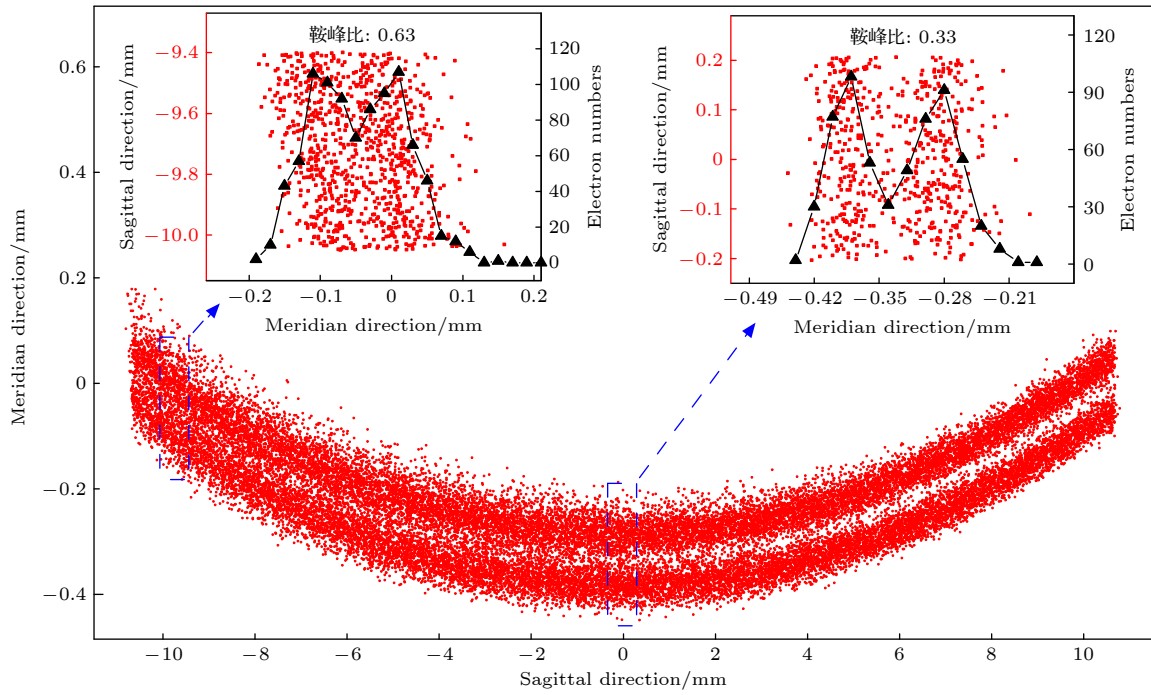


图 12 间隔为 2.3 ps 的 10 mm × 20 μm 狭缝脉冲的动态扫描像
 Fig. 12. Dynamic scanning image of a 10 mm × 20 μm slit pulses with an interval of 2.3 ps.

性, 测试时在条纹管阴极前端放置了一个 $\Phi 16$ mm 的遮光孔径光阑. 给条纹管的阴极和栅极之间加 +200 V 的直流电压, 测得入射光强为 10 lx (此时条纹管光电阴极产生的光电流几乎饱和) 时, 条纹管的 PLS 为 208 $\mu\text{A}/\text{lm}$. 通过改变 STR Control Program 软件中的辐射滤波片 (可调节范围为 400—950 nm) 控制辐照光电阴极的光波长, 测得光阴极的 PRS 曲线如图 14 所示, 可以看出, 该条纹管的光阴极在整个可见光波段都能响应, 波长越短光谱响应灵敏度越高, 在 400—550 nm 波长范围内的辐射灵敏度高于 30 mA/W.



图 13 等径圆筒型条纹管实物图

Fig. 13. Prototype of the equal-diameter cylindrical streak tube.

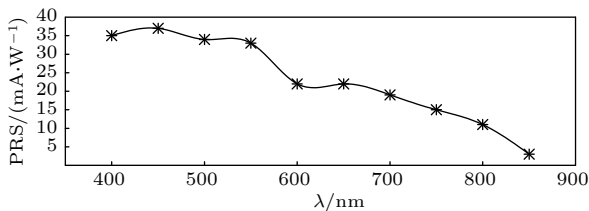


图 14 光阴极光谱灵敏度

Fig. 14. Photocathode radiation sensitivity results.

4.2 静态空间分辨率测试

本文采用 STR IM 测试模块内置的 USAF 1951 型分辨率靶标对该条纹管的静态空间分辨率进行了测试. 首先使用直流高压电源给各个电极加载合适的工作电压, 使得荧光屏上获得一定质量的像; 然后调节成像 CCD 的焦距, 使其恰好聚焦在荧光屏上; 最后一边观察一边调节各个电极电压, 直至荧光屏上获得质量最佳的像, 图 15 为测试平台实物图. 将 USAF 1951 分辨率靶标移动到光电阴极中心位置, 通过微调电压得到 USAF 1951 分



图 15 静态测试平台实物图

Fig. 15. Static test platform.

分辨率靶标在荧光屏上所成像,如图 16 所示. 图中竖向排列的线对元素(川)对应条纹管扫描方向空间分辨率,横向排列的线对元素(三)对应条纹管狭缝方向空间分辨率. 从图 16 可以看出,沿扫描方向和狭缝方向均能分辨清第 5 组的第 3 个线对元素(40.32 lp/mm),即光电阴极中心静态空间分辨率优于 40 lp/mm. 此外,通过测量 USAF 1951 分辨率靶标相应位置的像尺寸和靶标实际尺寸,测得条纹管狭缝方向放大倍率为 2.14,扫描方向放大倍率为 2.09,与模拟结果基本吻合.

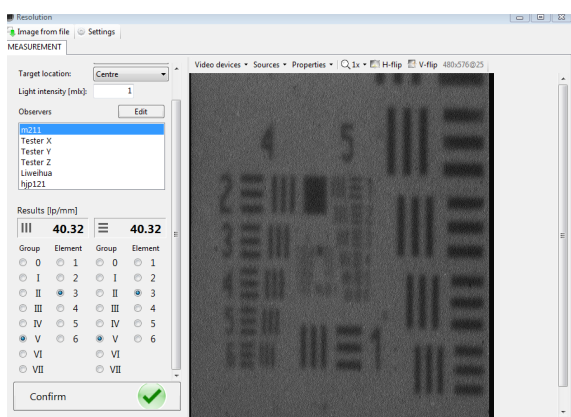


图 16 光电阴极中心静态空间分辨率测试结果

Fig. 16. Test result of static spatial resolution of photocathode center.

4.3 同步扫描时间分辨率测试

采用条纹像强度分布的 FWHM 大小标定条纹管的时间分辨率. 在频率为 75 MHz 的正弦扫描电压信号下,通过改变扫描电压相位的方法,利用像素为 2048×2048 的 CCD 在一次采集集中得到的条纹图像如图 17(a) 所示,图中上下两个条纹像对应的扫描信号相位分别为 -5° 和 $+5^\circ$,对应的扫描区间的电压斜率为 0.235 kV/ns . 图 17(b) 为两条条纹像沿扫描方向的强度积分曲线,横坐标对应 CCD 的像素数,测得两个狭缝像之间的距离为 1008 个像素,单个狭缝像的 FWHM 大小为 15 个像素. 而扫描电压信号相位从 -5° 变到 $+5^\circ$ 对应的时间间隔为 $13.3 \text{ ns}/36 = 370 \text{ ps}$,因此可计算出该扫描电压下条纹管的同步扫描时间分辨率为 $(370 \text{ ps}/1008) \times 15 = 5.55 \text{ ps}$.

考虑到模拟和实验测试时采用的扫描电压斜率不一样,在不考虑触发晃动的前提下,依据条纹管的时间分辨率计算公式以及 0.322 kV/ns 扫描

电压斜率下模拟得到的时间分辨率 (2.3 ps) 结果,可以计算出扫描电压斜率为 0.235 kV/ns 时条纹管时间分辨率的设计值为 2.94 ps . 实验测试结果之所以大于 2.94 ps ,一方面可能是实验中采用的激光器的实际脉冲宽度大于 1 ps ,而模拟中采用的脉冲宽度仅为 50 fs ;另一方面可能是受同步扫描驱动模块触发晃动的影响^[30],比如实验测试中激光器频率和相位的抖动,同步扫描电压信号相位和频率的抖动以及扫描信号与待测信号之间相位匹配的晃动等. 这两大因素都会使条纹像进一步展宽,是导致实验测试结果与设计结果差距比较大的主要原因.

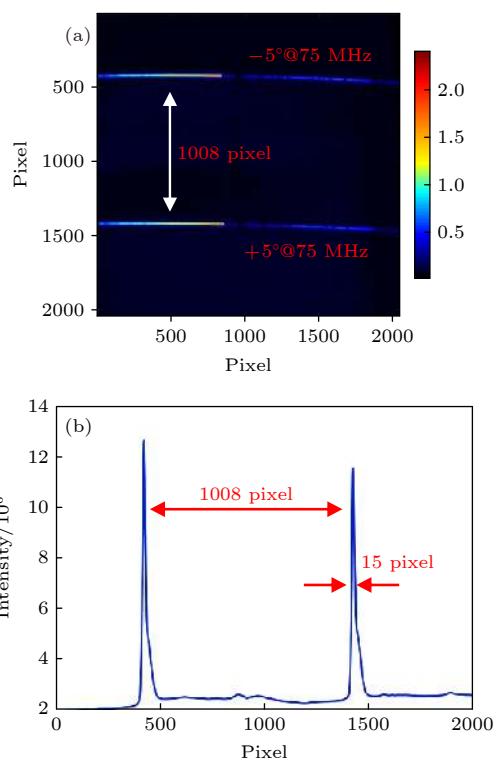


图 17 同步扫描时间分辨率测试结果 (a) CCD 采集到的扫描狭缝像; (b) 扫描狭缝像沿扫描方向的强度积分曲线
Fig. 17. Results of synchronous scanning temporal resolution test: (a) Scanning image collected by CCD; (b) intensity distribution of the scanned image along the scanning direction.

5 结论

本文通过尽可能降低阴极与阳极之间的工作电压以及在保证放大倍率不太大的情况下通过尽可能增大等位区长度的方法提高了条纹管的偏转灵敏度. 通过适当增大阴极与栅极之间的电场强度以及合理设计六电极等径圆筒静电聚焦系统上各

个电极所加电压以及将电子束交叉点设计到偏转板入口处的方法,降低了条纹管的时间畸变以及各个区域内的时间弥散,提高了时空分辨率. 模拟结果显示:该条纹管的偏转灵敏度为 125 mm/kV,在阴极有效尺寸 10 mm × 4 mm 内的物理时间分辨率优于 1.83 ps @MTF = 10%,光电阴极静态空间分辨率优于 38 lp/mm @MTF = 10%;在 250 MHz 正弦扫描电压(扫描斜率为 0.322 kV/ns)下的动态空间分辨率优于 16 lp/mm,极限时间分辨率为 1.39 ps,在 10 mm × 20 μm 的阴极狭缝脉冲下的同步扫描时间分辨率优于 2.3 ps. 此外,实验测试结果显示:该条纹管的光电阴极在整个可见光波段都具有响应,在 400—550 nm 波长范围内的辐射灵敏度高于 30 mA/W,阴极中心静态空间分辨为 40 lp/mm,同步扫描(扫描频率为 75 MHz,扫描斜率为 0.235 kV/ns)时间分辨率为 5.55 ps. 为了更加全面地定量描述该条纹管的成像性能,接下来将对条纹管的动态范围以及不同扫描斜率下的时空分辨率等性能进行测试,为条纹管的实际应用提供更加全面的研究支撑.

参考文献

- [1] Wang J G 2012 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [王季刚 2012 博士学位论文(合肥:中国科学技术大学)]
- [2] Guo B P, Cunin B, Niu H B 2005 *Acta Photonic Sin.* **34** 442 (in Chinese) [郭宝平, Cunin B, 牛憨笨 2005 光子学报 **34** 442]
- [3] Niu H B, Liu Y P, Yang Q L 1988 *Acta Photonic Sin.* **17** 12 (in Chinese) [牛憨笨, 刘月平, 杨勤劳 1988 光子学报 **17** 12]
- [4] Zhang H W 1986 *Acta Photonic Sin.* **15** 43 (in Chinese) [张焕文 1986 光子学报 **15** 43]
- [5] Adams M C, Sibbett W, Bradley D J 1980 *Adv. Electron. Electron Phys.* **52** 265
- [6] Finch A, Sleat W E, Sibbett W 1989 *Re. Sci. Instrum.* **60** 839
- [7] Sibbett W 1983 *15th Intl Congress on High Speed Photography and Photonics* San Diego, USA, March 1, 1983 p15
- [8] Qu J L, Niu H B, Li J, Zhao H J, Chen X Y 2000 *Acta Optica Sin.* **20** 1657 (in Chinese) [屈军乐, 牛憨笨, 李冀, 赵慧娟, 陈晓颖 2000 光学学报 **20** 1657]
- [9] Taylor J R, Adams M C, Sibbett W 1980 *Appl. Phys.* **21** 13
- [10] Fujimoto J G, Yee T K, Salour M M 1981 *Appl. Phys. Lett.* **39** 12
- [11] The Universal Streak Camera C10910 series <https://www.hamamatsu.com/jp/en/index.html> [2021-4-25]
- [12] OptoScope SC-10 Systems <https://optronis.com/en/> [2021-4-25]
- [13] Datasheets of Streak Tube Photochrom 5 <http://www.photek.co.uk/> [2021-4-25]
- [14] Howorth J R, Phillips I, Monastryski M 2003 *25th International Congress on High-Speed Photography and Photonics* Beaune, France, August 1, 2003 p311
- [15] Synchronous Scanning Streak Camera 2200 (同步扫描条纹相机 2200) http://opt.cas.cn/gb2019/kycg/cpzs/202008/t20200824_5670183.html [2021-4-25]
- [16] Tian L P, Shen L B, Chen L, Li L L, Chen P, Tian J S 2021 *Acta Photonic Sin.* **50** 143 (in Chinese) [田丽萍, 沈令斌, 陈琳, 李立立, 陈萍, 田进寿 2021 光子学报 **50** 143]
- [17] Liu Y P 1985 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [刘月平 1985 硕士学位论文(西安:中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [18] Weiland T 1977 *Electronics and Communication (AEü)* **31** pp116–120
- [19] Pei L C, Zhang X Z 1980 *Monte Carlo Method and the Application in the Transport of Particles* (Beijing: Science Press) pp100–114 (in Chinese) [裴鹿成, 张孝泽 1980 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用(北京:科学出版社)第100—114页]
- [20] Liu H L 2008 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [刘虎林 2008 硕士学位论文(西安:中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [21] Hui D D, Tian J S, Wang J F, Lu Y, Wen W L, Xu X Y 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 018502 (in Chinese) [惠丹丹, 田进寿, 王俊峰, 卢裕, 温文龙, 徐向晏 2016 物理学报 **65** 018502]
- [22] Du B C, Wang J R 2002 *Electron Optics* (Beijing: Tsinghua University Press) pp74, 75 (in Chinese) [杜秉初, 汪健如 2002 电子光学(北京:清华大学出版社)第74, 75页]
- [23] Sibbett W, Niu H, Baggs M R 1982 *Re. Sci. Instrum.* **53** 758
- [24] Niu H B, Yang Q L 1985 *Acta Photonic Sin.* **13** 67 (in Chinese) [牛憨笨, 杨勤劳 1985 光子学报 **13** 67]
- [25] Niu H, Sibbett W, Baggs M R 1982 *Re. Sci. Instrum.* **53** 563
- [26] Tian J S, Zhao B S, Wu J J, Zhao W, Liu Y Q, Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3368 (in Chinese) [田进寿, 赵宝升, 吴建军, 赵卫, 刘运全, 张杰 2006 物理学报 **55** 3368]
- [27] Wang Q Q 2014 *M. S. Thesis* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [王强强 2014 硕士学位论文(西安:中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [28] Liu R, Tian J S, Miao R C, Wang Q Q, Wen W L, Li Y, Wang J F, Xu X Y, Lu Y, Liu H L, Wang X 2016 *Acta Photonic Sin.* **45** 109 (in Chinese) [刘蓉, 田进寿, 苗润才, 王强强, 温文龙, 李岩, 王俊峰, 徐向晏, 卢裕, 刘虎林, 王兴 2016 光子学报 **45** 109]
- [29] Fleurot N 1985 *16th International Congress on High Speed Photography and Photonics* Strasbourg, France, August 27–31 1984, p374
- [30] Niu H B, Zhang H W, Wang X H, Yang Q L, Liu Y P, Wang Y C, Ren Y A, Zhou J L 1989 *Acta Photonic Sin.* **18** 11 (in Chinese) [牛憨笨, 张焕文, 王贤华, 杨勤劳, 刘月平, 王云程, 任永安, 周军兰 1989 光子学报 **18** 11]

A synchroscan streak tube with high deflection sensitivity

Liu Xue-Ling¹⁾²⁾ Tian Jin-Shou^{1)4)†} Tian Li-Ping³⁾ Chen Ping¹⁾
 Zhang Min-Rui¹⁾ Xue Yan-Hua¹⁾ Li Ya-Hui¹⁾²⁾ Fang Yu-Man¹⁾²⁾
 Xu Xiang-Yan¹⁾ Liu Bai-Yu¹⁾ Gou Yong-Sheng¹⁾

1) (*Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, 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) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*School of Network and Communication Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China*)

4) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 27 April 2021; revised manuscript received 12 July 2021)

Abstract

A synchroscan streak tube with high spatiotemporal resolution and high deflection sensitivity is proposed, which contains several innovation designs. Some measures are taken to improve the imaging performances of the streak tube. Firstly, in order to obtain a high deflection sensitivity, the difference in voltage between the photocathode and anode and the length of the equipotential region of the streak tube are reduced as much as possible. Secondly, by introducing a hyperfine grid behind the cathode, reasonably designing the voltages applied to the six-electrode electrostatic focusing system, and moving the electron beam crossing point to the entrance of the deflection plates, the temporal dispersion and the temporal distortion of the streak tube are reduced, and the spatiotemporal resolution of the streak tube is improved. Besides, the streak tube is technically analyzed by tracking the temporal and spatial distribution of electrons under an operating voltage of 7000 V with the aid of computer simulation technology (CST) software. The results show that the deflection sensitivity is 125 mm/kV, the physical temporal resolution is better than 1.83 ps @MTF = 10%, and the static spatial resolution on the photocathode is better than 38 lp/mm @MTF = 10% over the effective photocathode area with a size of 10 mm × 4 mm. By applying a synchronous scanning voltage with a repetition frequency of 250 MHz to the deflection electrode, the results show that the dynamic spatial resolution of the streak tube is better than 16 lp/mm, the limit of the dynamic temporal resolution is 1.39 ps, and two rectangular electron pulses with a size of 10 mm × 20 μm and an interval of 2.3 ps emitted from the photocathode can be well resolved by the streak tube. In addition, the experimental measurements are conducted with a streak tube developed in our laboratory. The results demonstrate that the photocathode of the streak tube can work in the entire visible light region, and the response in the short wavelength region is significantly better than that in the long wavelength region. The static spatial resolution of this streak tube is 40 lp/mm in the center of the photocathode. The temporal resolution of this streak tube is 5.55 ps measured under a synchronous scanning voltage with a repetition frequency of 75 MHz.

Keywords: synchroscan streak tube, deflection sensitivity, ultra-fast low light diagnosis, spatiotemporal resolution

PACS: 85.60.Bt, 85.60.Ha, 85.60.-q, 42.79.Ls

DOI: 10.7498/aps.70.20210814

† Corresponding author. E-mail: tianjs@opt.ac.cn