

超小型条纹管的动态特性研究

惠丹丹 田进寿 王俊锋 卢裕 温文龙 徐向晏

Dynamic properties of a small-size streak tube

Hui Dan-Dan Tian Jin-Shou Wang Jun-Feng Lu Yu Wen Wen-Long Xu Xiang-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 018502 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.018502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.018502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光声内窥镜系统在人体直肠癌离体组织中的实验研究

The human colorectal cancer tissue in vitro experimental study based on photoacoustic endoscopic system

物理学报.2014, 63(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084204>

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

Design and evaluation of a pre-traveling wave deflector magnetic solenoid lens focused streak image tube

物理学报.2014, 63(5): 058501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.058501>

基于石墨烯的半导体光电器件研究进展

The progress of semiconductor photoelectric devices based on graphene

物理学报.2012, 61(24): 248502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.248502>

微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析

Influence analysis of saturation effect of microchannel plate on dynamic range of streak cameras

物理学报.2012, 61(19): 194211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.194211>

超小型条纹管的动态特性研究

惠丹丹¹⁾²⁾ 田进寿^{1)†} 王俊锋¹⁾ 卢裕¹⁾ 温文龙¹⁾ 徐向晏¹⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 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)

(2015年8月17日收到; 2015年9月18日收到修改稿)

基于条纹相机的非推扫式激光雷达可以实现三维多光谱荧光及偏振成像, 克服了传统雷达技术中由于目标和搭载平台之间相对移动形成的图像畸变, 图像刷新率高, 也便于小型化. 本文针对这一新技术发展的需求设计了一款大面积 (阴极有效面积 $> \phi 25$)、超小型 (阴极到荧光屏净尺寸为 100 mm)、无栅网、球面阴极、球面荧光屏的条纹管, 利用电子轨迹追踪法理论分析了偏转板位置对偏转灵敏度和空间分辨率的影响. 动态分析演示了从阴极面狭缝上同时出发的光电子在条纹管内部不同飞行阶段的时间畸变过程, 给出了条纹管在扫描工作模式下狭缝像弯曲所对应的定量时间畸变值. 该条纹管极限时间分辨率优于 30 ps, 在其阴极狭缝长 28 mm 的范围内, 边缘动态空间分辨率大于 10 lp/mm, 阴极狭缝为 30 mm $\times$ 50 μ m 时条纹管的动态时间分辨率优于 50 ps, 放大倍率为 1.2.

关键词: 非推扫式激光雷达, 无栅网, 电子轨迹, 时间畸变**PACS:** 85.60.-q, 85.60.Bt, 42.79.Pw**DOI:** 10.7498/aps.65.018502

1 引言

以条纹变像管为核心的条纹相机具有超高时间分辨率和高空间分辨率, 可应用于各个领域的超快现象和微观过程的探测. 为满足不同领域的应用需求, 研究人员设计了具有不同性能的条纹变像管, 如具有飞秒时间分辨率的短磁聚焦条纹管、具有大动态范围的各向异性聚焦条纹管等^[1,2]. 基于条纹相机的激光雷达采用的是非扫描式 (或闪烁成像) 工作模式, 可以克服传统推扫雷达由于目标和探测器之间的相对运动而造成的成像畸变, 适合对水下海床及沼泽开展海洋矿产探测, 也适用于海军先进两栖登陆舰对障碍物的规避等^[3-7]; 多狭缝条纹相机激光雷达可实现三维 (3D) 多光谱荧光成像、3D 偏振成像, 融合高的灰度等级 (大于 12 位) 和高的采样率于一体 (1 MHz—100 GHz), 图像数据刷新率高且与其他共焦面传感器获得的图像数据融合简单^[8-11], 由于不需要扫描光学系统, 更有利于

雷达系统的小型化^[12]. 应用于海洋探测的非扫描式激光雷达要求具有较大的探测范围, 即激光雷达具有较大的成像视角 (field of view); 应用于航天和空间探测的激光雷达要求体积小、可靠性高. 所以设计一款适用于航天、空间探测以及海洋执法等领域非扫描式激光雷达的超小型、大探测面积以及高可靠性的条纹管具有重要意义. 目前, 俄罗斯 Bifo 公司研制的小型条纹变像管长度仅为 78 mm, 阴极工作面积为 15 mm $\times$ 20 mm^[13], 法国 Photonis 研制的 P500 系列的条纹管阴极工作面积为 35 mm $\times$ 4 mm, 但其长度为 250 mm^[14].

本文针对目前条纹变像管存在的体积较大、较为笨重且阴极有效工作面积小等不足, 设计了一款超小型条纹变像管. 为了增大条纹管的探测面积, 采用球面阴极、球面荧光屏来减小条纹管像差, 提高阴极边缘空间分辨率; 另外, 球面阴极有助于减小条纹管的时间畸变^[15]; 如果条纹管采用栅网结构, 阴栅场强一般比较大, 容易发生打火现象, 从而导致条纹管的稳定性和可靠性降低, 所以该设计采

† 通信作者. E-mail: tianjs@opt.ac.cn

用无栅网结构,但在聚焦极前加一筒状电极(栅极),作为辅助聚焦电极,以提高条纹管时间分辨率. 本文的主要内容是对该超小型条纹管的动态特性进行分析.

2 计算模型及方法

本文利用三维电磁仿真软件 CST 的粒子工作室计算超小型条纹管的电场分布,并追踪电子的运行轨迹,从而分析条纹管的动态特性. 电磁场分布的数值计算方法有:有限差分法、有限元法、有限积分法等. 与其他数值方法不同,有限积分法是将积分形式的麦克斯韦方程离散化^[16],而不是离散化微分形式的麦氏方程. 相比于有限差分法、有限元法等数值算法,有限积分技术的空间离散不会导致迭代不稳定,因为其离散方程自身能够保持能量和电荷的守恒,且有限积分法计算精度高、计算效率高. 本文采用有限积分法计算条纹管的电场分布.

图 1 是所设计的超小型条纹管的结构剖视图,其主要结构包括阴极、栅极、聚焦极、阳极、偏转板和荧光屏. 该条纹管结构紧密,长度仅为 100 mm,管外围直径为 50 mm. 模型建立后采用六面体网格剖分计算模型,对麦克斯韦方程进行空间离散化,

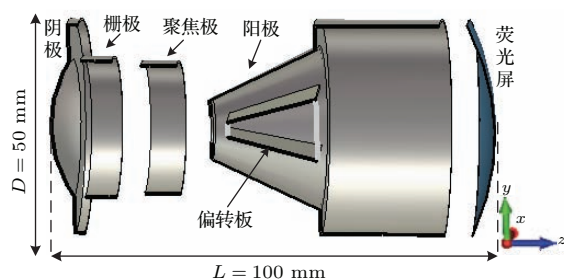


图 1 超小型条纹管结构剖视图

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

求解系统的电场分布. 网格越密,场值结果越精确,但网格太密会导致计算效率降低. 为此,在栅极和聚焦极及其间隙等对电场分布影响较大的部位进行局部网格加密. 为保证计算精度,逐渐加密网格并运行计算,当两次计算结果基本相同时,即可认为计算精度满足要求. 图 2 所示为所求得的条纹管子午面上的电势分布图.

获得电场分布之后,根据洛伦兹力定律计算电子运行轨迹. 由于电磁场是基于离散的网格计算的,所以需要将其解析式离散化,在该小型条纹管中,磁场对电子运行轨迹的影响可以忽略,只需将电场值插入离散形式的洛伦兹力定律((1)和(2)式),计算电子运行轨迹,图 3 所示为从阴极狭缝发射的电子的运行轨迹.

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

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

其中, m 和 v 分别为电子质量和运行速度; $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别为条纹管内部的电场和磁场; $\mathbf{r}$ 为电子离轴距离.

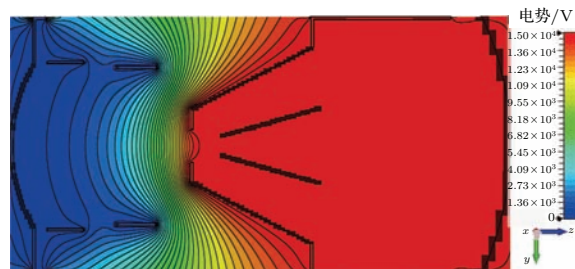


图 2 (网刊彩色) 条纹管子午面上的电势分布

Fig. 2. (color online) Potential distribution on the meridian plane of the small-size streak tube.

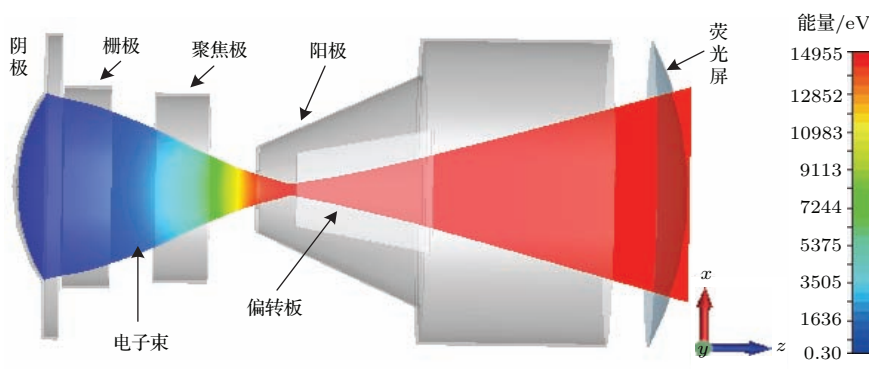


图 3 (网刊彩色) 阴极狭缝发射电子的运行轨迹

Fig. 3. (color online) Trajectories of electrons emitted from the cathode.

3 条纹管动态特性的研究

3.1 偏转板位置与偏转灵敏度和空间分辨率的关系

为研究偏转板置于距离阳极孔不同位置时对偏转灵敏度(单位偏转电压下电子束在荧光屏上的偏转量)及空间分辨率的影响,给偏转板施加500 V电压,从阴极中心发射3000个电子(初能量服从0—0.6 eV的 β 分布,发射仰角服从 0° — 90° 上的余弦分布,方位角服从0— 2π 上的均匀分布),计算偏

转板与阳极孔距离(设为 S)为2, 4, 6 mm三种情况下,条纹管的偏转灵敏度和空间分辨率.需要说明的是所分析条纹管的荧光屏是曲面形式,而计算其动态特性时,CST的PIC工作室只能统计到二维平面情况下的粒子束分布,所以在计算偏转模式以及扫描模式下的条纹管特性时使用是平面形式的荧光屏,而在静态特性的计算中已证明曲面形式的荧光屏所得的结果比平面形式的好,即实际的结果比本文给出的结果好.表1为偏转板距阳极孔不同位置时条纹管的偏转灵敏度和空间分辨率的计算结果.

表1 偏转板在不同位置时条纹管的偏转灵敏度和空间分辨率

Table 1. Deflection sensitivity and spatial resolution when deflection plates are situated on different locations.

偏转板距阳极 孔距离 S/mm	电子在荧光屏 上的偏转量/ mm	偏转灵敏度 $P/\text{mm}\cdot\text{kV}^{-1}$	弧矢方向空间 分辨率/ $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$	子午方向空间 分辨率/ $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$
2	3.178	6.36	22	25
4	3.131	6.26	47	62
6	3.064	6.13	89	88

表1结果显示,随着偏转板距阳极孔的距离增大,偏转灵敏度略微降低,而空间分辨率提高.偏转灵敏度降低的原因可以通过偏转灵敏度计算公式解释.(3)式为倾斜形偏转板灵敏度的粗略估计公式^[17],式中的各个参数如图4所示.其中, V_A 为阳极供电电压, V_D 为偏转电压, L 为漂移区距离.当偏转板距阳极孔距离增大时,漂移区长度减小,从(3)式可以看出, L 减小,偏转灵敏度将降低,所以偏转灵敏度随着偏转板到阳极孔距离的增大而降低.空间分辨率提高的原因分析如下:图5为阴极中心发射的一束电子的运行轨迹,从阴极中心发射的电子束因初能量、初角度的不同具有一定的弥散,所以电子束在运行的过程中先散开,后经加速、聚集到达荧光屏时又会聚成一点.由此可以看出电子束运行到偏转板入口时,逐渐变窄,即直径逐渐减小,如图5中局部放大图所示, $d_1 > d_2$.理论研究表明缩小偏转板入口处的电子束斑直径可以减小偏转散焦^[17,18],所以对于偏转板距阳极孔为2, 4, 6 mm的三种情况下, $S = 6$ mm时电子束斑直径最小,即偏转散焦最小.这解释了随着偏转板到阳极孔的距离增大空间分辨率提高的原因.考虑到偏转灵敏度会随着偏转板到阳极孔距离的增大而降低,所以不能一味地为了提高空间分辨率而增大偏转板到阳极孔的距离,选择偏转板距阳极孔的距

离为6 mm.

$$P = \frac{l}{2V_A(d_2 - d_1)} \left[\left(\frac{ld_2}{d_2 - d_1} + L \right) \ln \frac{d_2}{d_1} - l \right]. \quad (3)$$

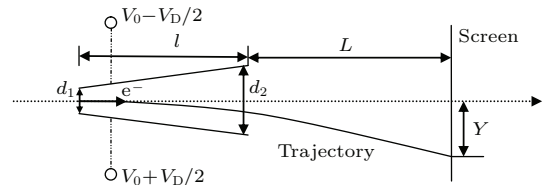


图4 倾斜形偏转板示意图

Fig. 4. Schematic diagram of deflection plates.

偏转线性指电子束通过偏转板后在荧光屏上的偏转距离与偏转电压的关系.若电子束偏转距离与偏转电压不能满足良好的线性关系,则会产生偏转畸变,导致电子图像失真.图6是在不同偏转电压下利用轨迹追踪法得到的偏转线性,可以看出条纹管具有良好的偏转线性.通过多项式拟合得到偏转距离与偏转电压的关系为

$$y = 6.13x - 0.005, \quad (4)$$

其中 y 为偏转距离, x 为偏转电压.由此也可以看到偏转板的偏转灵敏度为6.13 mm/kV.

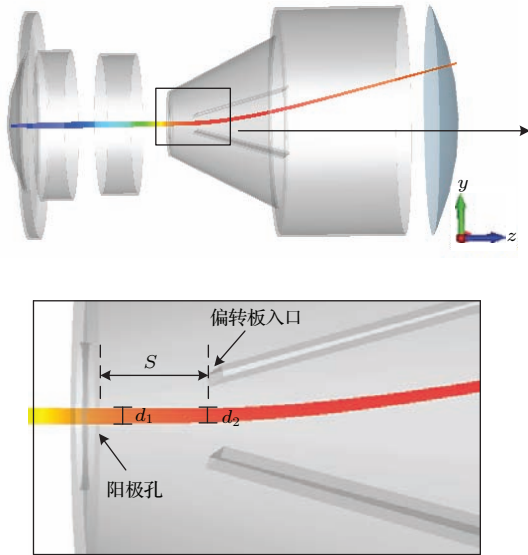


图5 (网刊彩色) 阴极中心发射的电子束的运行轨迹及局部放大图

Fig. 5. (color online) Trajectories of electrons emitted from the center of the cathode and partial enlarged detail.

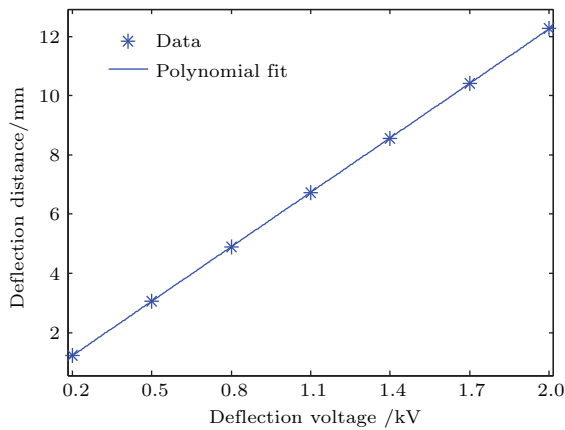


图6 偏转距离与偏转电压的关系

Fig. 6. Relation between deflection distance and deflection voltage.

3.2 动态时间分辨率和空间分辨率

时间分辨率较完善的定义是能够分辨两个事件的最小时间间隔, 对两个事件的分辨程度可以利用瑞利判据来判断^[19]. 通过从阴极表面发射具有一定时间间隔的窄电子脉冲序列来计算条纹管的动态时间分辨率. 图7所示是间隔为30 ps的电子脉冲, 脉冲半高宽为5 ps, δ_1 , δ_2 , δ_3 表示按时间顺序依次发射的三束电子. 给偏转板施加时变扫描电压, 扫描速度 $v = 0.3 \times 10^8$ m/s, 选择合适的扫描工作点, 使得当电子束进入偏转板的时刻, 扫描电压处在线性部分. 为了降低偏转散焦和像差等对成像质量的影响, 给偏转板加预偏电压, 使电子束落

在荧光屏中心区域. 图8(a)和图8(b)所示分别为相邻电子脉冲经过偏转板扫描后在荧光屏上的束斑分布和子午方向(即扫描方向)上电子分布曲线. 从图8(a)可以看出, 间隔为30 ps的相邻电子束到达荧光屏时有部分交叠, 不过图8(b)显示电子在子午方向上的概率分布曲线的谷底位置对应的分布概率小于瑞利判据所要求的0.7, 所以, 条纹管可以区分间隔为30 ps的电子脉冲, 即条纹管动态时间分辨率优于30 ps. 由于上述数据是电子束从阴极中心发射的, 因此该分辨率是极限时间分辨率. 另外, 扫描电压的扫速不同时对应的动态时间分辨率不同, 本文采用的扫描电压的扫速为0.1c (c为光速), 对应的动态时间分辨率优于30 ps. 实际使用中, 可根据对时间分辨率的不同要求, 选择不同的扫描速度.

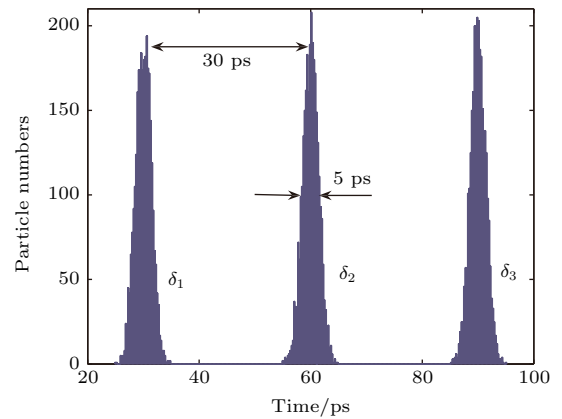


图7 间隔为30 ps的电子脉冲

Fig. 7. Electron pulses with the duration of 30 ps.

条纹管在动态工作模式下弧矢方向的空间分辨率反映了条纹管的空间弥散, 子午方向的空间分辨率同时反映了条纹管的时间弥散和空间弥散. 所以我们采用弧矢方向的动态空间分辨率来表征条纹管动态工作模式下的空间弥散情况. 电子束在扫描电压下到达荧光屏时的偏转量越大空间分辨率就越低, 所以, 为了考察条纹管离轴不同距离处动态空间分辨率, 在阴极表面离轴不同距离处取点发射电子束, 并选择合适的扫描工作点使得每束电子在平面荧光屏上的偏转量都在7—8 mm的范围内(多次模拟结果表明当粒子束偏转距离增大到10 mm左右时动态空间分辨率急剧下降, 阴极中心发射的电子束的动态空间分辨率约为10 lp/mm). 通过追踪电子轨迹得到电子空间点扩展函数, 进而计算动态空间调制传递函数. 图9为偏转板所加扫描电压的扫速 $v = 0.3 \times 10^8$ m/s时, 阴极表面离轴

不同距离的物点处发射的电子的弧矢方向动态空间调制传递函数. 可以看出阴极表面离轴越远的物点空间分辨率越低, 但即使在离轴 14 mm 处, 动态空间分辨率仍然大于 10 lp/mm.

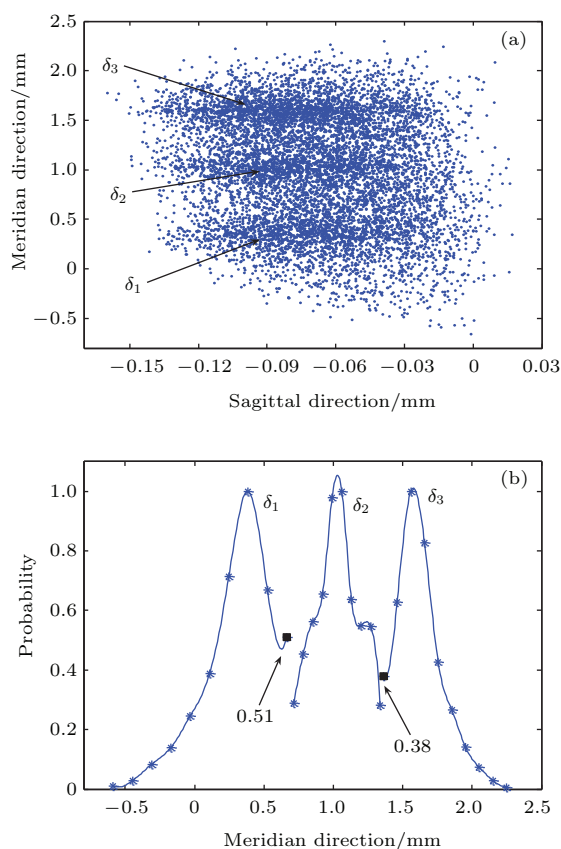


图8 间隔为 30 ps 的电子脉冲扫描结果 (a) 荧光屏上电子脉冲的束斑分布; (b) 子午方向电子概率分布曲线

Fig. 8. Sweeping results of electron pulses with the duration of 30 ps: (a) Beam spot of electron pulses on the screen; (b) probability distribution of electrons in the meridian direction.

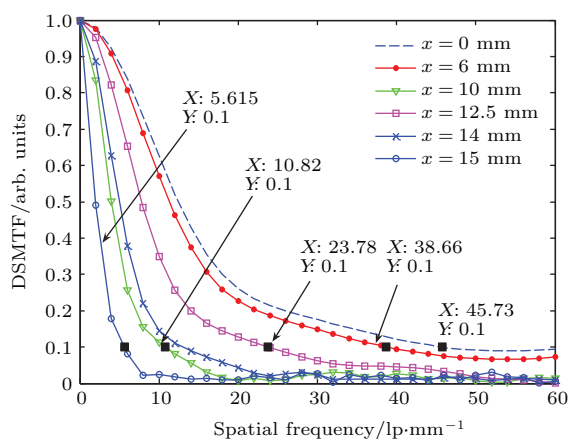


图9 (网刊彩色) 离轴不同距离处发射的电子束的动态空间调制传递函数 (DSMTF)

Fig. 9. (color online) DSMTF of the electrons emitted from different place on the cathode.

4 条纹管时间畸变的分析

从光电阴极不同初始高度发射的光电子, 即使其轴向能量相同, 经过电子光学系统后也会产生渡越时间之差. 时间畸变定义为阴极面上不同初始高度发出的光电子的主轨迹与轴上光电子的主轨迹的渡越时间之差. 若轴外光电子的渡越时间大于轴上光电子的渡越时间, 则电子光学系统具有正时间畸变, 反之则为负时间畸变. 平面阴极往往使系统产生正的时间畸变, 曲面阴极可以减小正时间畸变, 在一定范围内阴极曲率半径越小, 正时间畸变越小. 但当阴极曲率半径减小到一定程度, 时间畸变由正变负, 且随着阴极曲率半径的减小, 负时间畸变增大. 本文所分析的超小型条纹管的阴极曲率半径为 30 mm, 统计计算从阴极不同初始高度出发的光电子分别到达偏转板入口处、平面荧光屏和曲面荧光屏上的时间畸变, 结果列于表 2. 表 2 数据显示, 该超小型条纹管具有负时间畸变, 随着电子初始高度的增大, 时间畸变增大. 所以, 对于探测面积较大的条纹变像管, 时间畸变必然比较大. 另外, 电子到达曲面荧光屏上的时间畸变与到达偏转板入口处的时间畸变差别很小, 可见时间畸变主要存在于电子进入偏转板之前的电子光学系统中, 在等位区造成的时间畸变很小. 由于条纹管狭缝像是在平面形式的荧光屏上统计所得, 所以计算了电子到达平面荧光屏上的时间畸变, 其小于电子到达曲面荧光屏上的时间畸变. 这是由于曲率半径为 30 mm 的球面阴极使该条纹管产生了负的时间畸变, 即轴外光电子的渡越时间小于轴上光电子的渡越时间, 而从光电阴极同一时刻发射的电子, 离轴越远的电子运行到曲面荧光屏的渡越时间必然比运行到平面荧光屏的渡越时间少, 所以此时平面荧光屏补偿了部分负时间畸变. 但考虑到曲面荧光屏下条纹管边缘空间分辨率更高, 而应用于激光雷达的条纹变像管更注重其探测面积和边缘空间分辨率, 所以本文所设计的条纹管采用的是曲面荧光屏.

选取长 30 mm、宽 50 μm 的狭缝对超小型条纹管的狭缝成像进行动态模拟, 从狭缝表面发射时间分布服从高斯分布且具有一定时间间隔的两束电子, 电子发射位置服从阴极球面上的均匀分布. 偏转板所加扫描电压的斜率为 5 kV/ns. 图 10 是间隔为 50 ps 的两束狭缝电子脉冲的动态扫描结果. 狭缝像的长度约为 36 mm, 则对应的条纹管放大倍率为 1.2. 从图 10 可以看出, 条纹管能够区分间隔为

50 ps 的两个电子脉冲. 但狭缝像出现弯曲现象, 且中心部分都向上会聚, 导致中间没有分开. 下面分别解释上述两种现象的原因.

表 2 阴极不同初始高度的电子到不同位置处的时间畸变
Table 2. Temporal distortion of the electrons on the different places.

	初始高度/mm			
	5	10	12.5	15
偏转板入口处				
时间畸变 Δt_d /ps	-19	-57	-90.1	-214
曲面荧光屏				
时间畸变 Δt /ps	-12	-52	-88	-210
平面荧光屏				
时间畸变 Δt_1 /ps	-10.9	-39.3	-63.8	-171
$\Delta t_1 - \Delta t_d$	8.07	17.7	26.3	43.3

从阴极表面同一时刻发射的狭缝电子, 由于时间畸变的存在, 不同初始高度的电子进入偏转板的时间不同. 图 11 为 4 个不同时刻时的狭缝电子运行轨迹, 图 12 为偏转板所加扫描电压. 条纹管具有负时间畸变, 所以狭缝边缘的电子最先到

达偏转板入口, 中心部分的电子最后进入偏转板. 图 11(c) 为 $t_1 = 2150$ ps 时狭缝电子轨迹, 此时狭缝边缘的电子已经进入偏转板, 受到的偏转电压为 V_1 , 图 11(d) 为狭缝中心的电子进入偏转板的时刻, 此时 $t_2 = 2450$ ps, 电子受到的偏转电压为 V_2 . 设电子在偏转板内的运行时间为 Δt , 则狭缝边缘与中心的电子在偏转板区域内受到的偏转电压分别为 $V_1 - V_1 + \Delta V$, $V_2 - V_2 + \Delta V$, 如图 12 所示. 显然狭缝边缘电子受到的偏转电压小于狭缝中心电子受到的偏转电压, 因此狭缝边缘的电子相比于中心的电子在荧光屏上的偏转量小, 导致狭缝像弯曲. 狭缝像弯曲的根本原因是条纹管存在时间畸变.

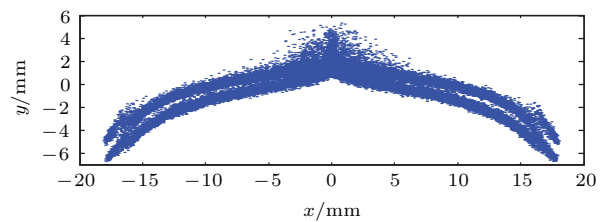


图 10 间隔 50 ps 的狭缝电子脉冲动态扫描图像
Fig. 10. Swept image of the slit electron pulses with the duration of 50 ps.

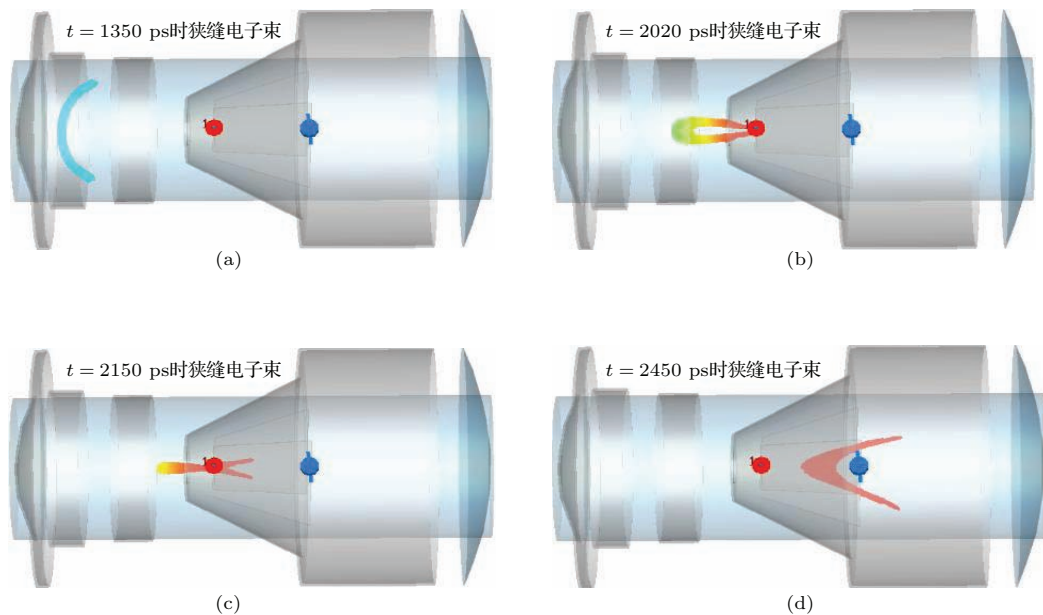


图 11 (网刊彩色) 不同时刻的狭缝电子运行轨迹 (a) $t = 1350$ ps; (b) $t = 2020$ ps; (c) $t = 2150$ ps; (d) $t = 2450$ ps
Fig. 11. (color online) Trajectories of slit electrons at the different instant time: (a) $t = 1350$ ps; (b) $t = 2020$ ps; (c) $t = 2150$ ps; (d) $t = 2450$ ps.

图 10 显示间隔 50 ps 的狭缝像在大于 5 mm 的区域可以完全区分开, 但在小于 5 mm 尤其是中心区域的电子束都向上聚拢. 观察狭缝电子运行动态

发现, 中心电子向上聚拢主要出现在狭缝电子离开偏转板的很小时段内. 为分析其原因, 统计从阴极狭缝发射 30000 个电子在离开偏转板时的动量方向

及大小. 统计结果显示, 在快要离开偏转板时, 阴极狭缝所发射的 30000 个电子中有 5300 个电子沿 y 轴方向的动量分量大于零, 即 y 方向的动量分量指向 y 轴正方向, 且这 5300 个电子分布在 $(-5 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ 的区域内, 而其他电子沿 y 轴方向的动量分量都小于零. 图 13 是狭缝电子离开偏转板时的分布情况, 图 14 为条纹管内的电场分布. 可以看出在电子所在范围内, 电场沿 y 轴方向的分量为正. 即所有电子在离开偏转板的时刻受到的电场力都指向 y 轴负方向, 而相比于在 $(-5 \text{ mm}, 5 \text{ mm})$ 区域以外的电子, 处在该区域的电子有 5300 个电子的 y 轴方向的动量分量指向 y 轴正方向, 即有向上的运动趋势, 这就导致了中心部分的电子向上聚拢.

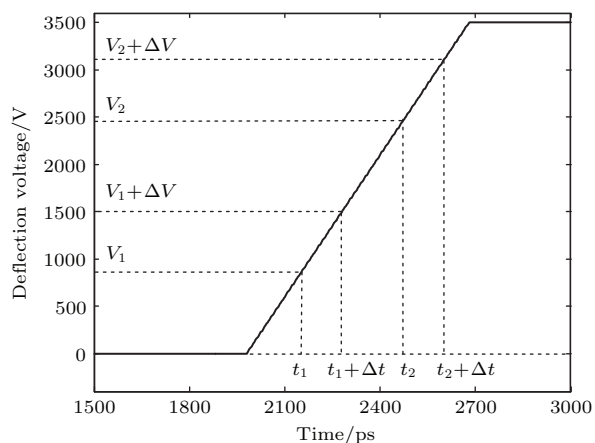


图 12 偏转板扫描电压

Fig. 12. Swept voltage on the deflection plates.

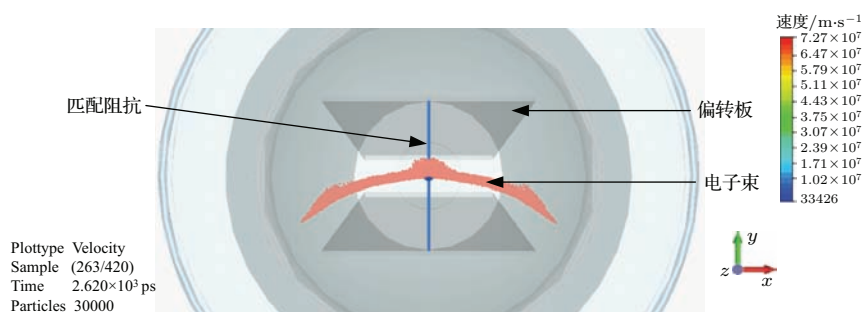


图 13 (网刊彩色) 狭缝电子在偏转板末端的分布

Fig. 13. (color online) The distribution of slit electrons on the end of the deflection plates.

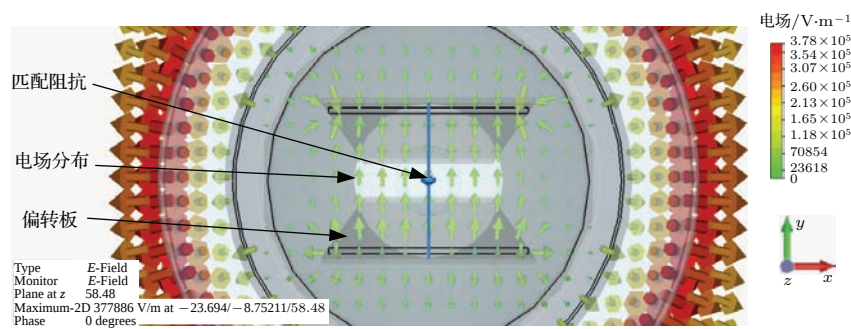


图 14 (网刊彩色) 条纹管电场分布

Fig. 14. (color online) Electric field distribution of the streak tube.

5 结 论

本文借助于三维电磁仿真软件 CST 的粒子工作室, 采用电子轨迹追踪法对一款超小型条纹管的动态特性进行了研究. 分析了偏转板与阳极孔的距离增大后, 偏转灵敏度降低、空间分辨率提高的原因. 计算了偏转板置于距阳极孔 6 mm 处时条纹管的偏转线性与动态时、空分辨率. 条纹管具有良好

的偏转线性, 其极限时间分辨率优于 30 ps, 边缘动态空间分辨率大于 10 lp/mm. 同时, 动态分析演示了从阴极面上同时发出的光电子在条纹管内部不同飞行阶段的时间畸变过程, 解释了由于时间畸变造成的狭缝像弯曲的现象. 本文所设计的超小型、大面积的条纹管用于非推扫式激光雷达, 便于雷达系统的小型化, 可增大雷达成像视角, 适用于航天、空间探测、海洋执法以及紫外预警等领域.

参考文献

- [1] Liu R, Tian J S, Li H, Wang Q Q, Wang C, Wen W L, Lu Y, Liu H L, Cao X B, Wang J F, Xu X Y, Wang X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 058501 (in Chinese) [刘蓉, 田进寿, 李昊, 王强强, 王超, 温文龙, 卢裕, 刘虎林, 曹希斌, 王俊锋, 徐向晏, 王兴 2014 物理学报 **63** 058501]
- [2] Zhu M, Tian J S, Wen W L, Wang J F, Cao X B, Lu Y, Xu X Y, Sai X F, Liu H L, Wang X, Li W H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 098501 (in Chinese) [朱敏, 田进寿, 温文龙, 王俊锋, 曹希斌, 卢裕, 徐向晏, 赛小锋, 刘虎林, 王兴, 李伟华 2015 物理学报 **64** 098501]
- [3] Gelbart A, Redman B C, Light R S, Schwartzlow C A, Griffis A J 2002 *Proceedings of SPIE on Laser Radar Technology and Applications* Orlando, USA, July 29, 2002 p9
- [4] Mclean J W 1999 *Proceedings of SPIE on Airborne and In-Water Underwater Imaging* Denver, Colorado, USA, October 28, 1999 p10
- [5] Gao J, Sun J F, Wang Q 2014 *Optik* **125** 5199
- [6] Sun J F, Wang T J, Wang X F, Wei J S, Wang Q 2013 *Optik* **124** 2674
- [7] Yang H R, Wu L, Wang X P, Chen C, Yu B, Yang B, Yuan L, Wu L P, Xue Z L, Li G P, Wu B N 2012 *Appl. Opt.* **51** 8825
- [8] Gleckler A D 2000 *Proceedings of SPIE on Laser Radar Technology and Applications* Orlando, USA, September 5, 2000 p266
- [9] Gleckler A D, Gelbart A 2001 *Proceedings of SPIE on Laser Radar Technology and Applications* Orlando, USA, September 19, 2001 p175
- [10] Liu J, Wang Q, Li S, Cheng Y, Wei J 2009 *Laser Phys.* **19** 115
- [11] Sun J F, Liu J B, Wang Q 2013 *Optik* **124** 204
- [12] Tian Z S, Cui Z H, Zhang L T, Xu T C, Zhang Y C, Fu S Y 2014 *Chin. Opt. Lett.* **12** 060015
- [13] Streak tube and frame tubes, Bifo <http://bifocompany.com/eng/p-tubes.php.htm/> [2015-9-15]
- [14] Photonis streak tube at a glance, Photonis <http://www.photonis.com/> [2015-9-15]
- [15] Niu H 1983 *Proceedings of SPIE on High Speed Photography and Photonics* San Diego, March 1, 1983 p231
- [16] Weiland T 1996 *Int. J. Numer. Model. Electron. Network. Dev. Field.* **9** 295
- [17] Hua Z Y, Gu C X 1993 *Electron Optics* (Shanghai: Fudan University Press) p241 (in Chinese) [华中一, 顾昌鑫 1993 电子光学 (上海: 复旦大学出版社) 第 241 页]
- [18] Liu H B 2004 *M. S. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS) (in Chinese) [刘宏波 2004 硕士学位论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [19] 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]

Dynamic properties of a small-size streak tube

Hui Dan-Dan¹⁾²⁾ Tian Jin-Shou^{1)†} Wang Jun-Feng¹⁾ Lu Yu¹⁾

Wen Wen-Long¹⁾ Xu Xiang-Yan¹⁾

1) (*Key Laboratory of Ultra-fast Photoelectric Diagnostics Technology, 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*)

(Received 17 August 2015; revised manuscript received 18 September 2015)

Abstract

Scannerless (flash) lidar system based on streak camera is able to realize three-dimensional (3D) multi-spectral fluorescence imaging and 3D imaging polarimetry. Compared with conventional lidar system, the flash lidar system overcomes image distortions caused by the motion between the target and the sensor platform. Other advantages of the flash lidar system are higher image update rates and the potential for creating a miniaturized lidar system. To meet the requirements for developing this new technology, a super small-sized, large photocathode area and meshless streak tube with spherical cathode and screen is designed with the aid of computer simulation technology (CST) software. The tube with nearly 28 mm wide photocathode work area contains two electrostatic focusing lens, a pair of deflection plates, and a 50 mm diameter output screen. The external dimension of the tube is merely 50 mm × 100 mm. And its electromagnetic fields are calculated in the CST Particle Studio based on the finite integration theory. Some dynamic properties of the tube are analyzed via observing different electron trajectories launched from a number of different points on the cathode. The influences of the deflector position on deflection sensitivity and spatial resolution are analyzed. Increasing the distance between the deflector and the anode pin hole leads to a worse deflection sensitivity but a better spatial resolution. As for the temporal resolution, three electron pulses separated by 30 ps can be well resolved by the streak tube in the dynamic mode. Thus, the dynamic temporal resolution of the streak tube is better than 30 ps. And a 10 lp/mm spatial resolution across the 28 mm long slit on the photocathode can be obtained by estimating modulation transfer functions of the electron trajectories. Temporal distortions at the entire photocathode working area are evaluated, and the data reveal that the larger the photocathode working area, the bigger the temporal distortions are. Also, the temporal distortion is present mainly in the photocathode-to-deflection plates region. In addition, the slit image of the streak tube working in the dynamic mode is simulated and presented. The phenomenon that the slit image is curved due to the temporal distortion is analyzed. Two rectangular electron pulses separated by 50 ps are well resolved by the streak tube. Therefore, the temporal resolution of this small-size steak tube is better than 50 ps with a rectangular slit dimension of 30 mm × 50 μm on the photocathode, and its electron-optic magnification is 1.2.

Keywords: scannerless lidar system, meshless, electron trajectories, temporal distortion

PACS: 85.60.-q, 85.60.Bt, 42.79.Pw

DOI: 10.7498/aps.65.018502

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