

用于激光雷达的大探测面积超小型条纹管

惠丹丹^{1,2} 田进寿¹ 卢 裕¹ 王俊锋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, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用三维电磁仿真软件 CST 模拟设计了一款小型电聚焦条纹管, 在模拟中采用了正交实验法来确定条纹管各电极间距离及各电极电压。同时, 根据条纹管像差定义对其像质进行了全面的理论分析和评价。优化设计的条纹管阴极有效工作面积直径大于 28 mm, 物理时间分辨率优于 30 ps, 边缘静态空间分辨率大于 20 lp/mm, 条纹管放大倍率为 1.07, 总管长仅为 100 mm, 管外围直径为 50 mm。满足航天、空间探测以及海洋执法等应用领域非扫描式激光雷达技术对大探测面积、超小型条纹变像管的应用需求。

关键字 超快光学; 条纹管; 正交实验法; 时间分辨率; 空间分辨率; 激光雷达

中图分类号 0463

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1232001

Streak Tube with Large Work Area and Small Size Used in Lidar Detection System

Hui Dandan^{1,2} Tian Jinshou¹ Lu Yu¹ Wang Junfeng¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A small-size streak tube with electrostatic focusing lens is designed with the aid of three-dimensional electromagnetic simulation software, CST. Distances between electrodes of the streak tube and their voltages are determined by orthogonal experiments. Also, according to the aberration theory of the streak tube, its imaging qualities are analyzed and evaluated systematically. The optimal streak tube possesses predominant performances. The diameter of work area of the photocathode is larger than 28 mm; physical temporal resolution is better than 30 ps; static spatial resolution at the margin of the photocathode is greater than 20 lp/mm; electron-optical magnification of the tube is 1.07; overall length of the streak tube is only 100 mm; outer diameter of streak tube is 50 mm. The designed streak tube with large work area and small size meets the requirements of scannerless lidar systems in the applications of military imaging scenarios, space exploration and marine detection.

Key words ultrafast optics; streak tube; orthogonal experiments; temporal resolution; spatial resolution; lidar

OCIS codes 320.7080; 250.0040; 230.2090

1 引 言

激光三维成像雷达技术,特别是能够进行高帧频三维成像的非扫描式激光成像雷达,广泛应用于航天、空间对抗与攻防、外星球探测和 underwater 探测等领域^[1]。传统的激光成像技术采用扫描形式,其帧频较低,成像视角也较小,且扫描器的应用,不仅增大系统的体积,还降低了系统的可靠性和工作稳定性,限制了扫描式的激光成像技术的应用,因此,近年来都在探索非扫描闪烁式激光成像技术^[2-3]。非扫描闪烁式激光成像技术具有成像帧频高、视场宽、体积小和可靠性高等优点。非扫描式成像激光雷达主要有基于条纹变像管成像的激光雷

收稿日期: 2015-06-15; 收到修改稿日期: 2015-08-19

作者简介: 惠丹丹(1989—),女,博士研究生,主要从事电子光学理论、电子光学系统设计等方面的研究。

E-mail: cmffly@163.com

导师简介: 田进寿(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事超快诊断技术、光电成像技术等方面的研究。

E-mail: tianjs@opt.ac.cn(通信联系人)

达和基于半导体焦平面阵列成像的激光雷达。

1989年 Gelbart 等^[1]利用单狭缝条纹变像管实现了 $16 \text{ pixel} \times 16 \text{ pixel}$ 的非扫描式激光雷达系统 (FLS)。随后 Mclean 等^[4]基于这一思想,研制了基于多狭缝条纹变像管的 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的高帧频非扫描式新型三维成像雷达,并且进一步研究了条纹管成像激光雷达 (STIL) 技术,证明了 STIL 不仅能够提供传统探测技术所出的目标强度信息,还可提供目标距离信息^[4]。由于距离信息是由条纹管时间分辨率决定的,不易受到散射等效应的影响,所以在水下探测时,STIL 所提供的距离信息比传统探测器提供的强度信息有更好的识别目标能力^[5]。STIL 可以用来探测、分类和识别水下物质,是水下矿物探测项目首选的探测技术。近些年,国内在 STIL 的应用方面也作了相关研究,赵文等^[6]分析表明提高信噪比和条纹管扫描速度可以有效提高 STIL 距离分辨率。孙剑锋等^[7]利用 STIL 技术完成了水下目标探测及海表面波成像实验,实验显示 STIL 在水下探测等方面有较好的应用前景。

应用于 STIL 中的条纹管应满足阴极有效工作面积尽量大、可靠性高等要求。应用于空间激光成像雷达的条纹管应满足体积小、重量轻、可靠性高和抗干扰能力强等要求。目前,条纹变像管大都存在体积较大、且阴极有效工作面积较小等缺点。针对这些问题,本文设计了一款长度仅为 100 mm 的超小型电聚焦条纹变像管,采用球面阴极、球面荧光屏减小像差,使阴极有效工作面积直径大于 28 mm ;采用无栅网结构,提高条纹管可靠性;在聚焦极前加一栅极,辅助聚焦,提高条纹管时间分辨率。设计中利用正交实验法优化条纹管结构参数和电压参数,该条纹管时间分辨率优于 30 ps ,边缘静态空间分辨率大于 20 lp/mm 。

2 结构设计及分析方法

在电磁仿真软件 CST 中对条纹管进行模拟设计,所设计的条纹管系统包括阴极、栅极、聚焦极、偏转板、阳极和荧光屏。阴极和荧光屏采用球面形式,可以减小小像散和畸变等像差,从而增大条纹管的阴极有效工作面积。一般在条纹管阴极附近引入超精细结构的加速栅网,且在阴栅之间加有很强的均匀加速电场,加速电场可以显著提高电子的能量一致性,从而减小电子的渡越时间弥散,提高条纹管的时间分辨率。在一定的范围内 (10 kV 左右) 加速电场越大,条纹管的时间分辨率越高^[8]。然而,当栅网所加电压较高时,阴栅场强较大,可能会因空气击穿而发生打火现象,导致条纹管的可靠性降低。对于应用于激光成像雷达的条纹管,其时间分辨率要求不高,一般在纳秒或纳秒量级,而对其工作可靠性要求较高,所以设计的条纹管采用无栅网结构以提高其工作可靠性。条纹管的聚焦系统有静电聚焦透镜和磁聚焦透镜,相比于磁聚焦透镜,静电透镜的最佳像面随电压的漂移比较小,图像稳定,所以设计中采用圆筒形电极作为静电透镜。在聚焦透镜前面加一栅极对电子束起到预聚焦的作用,这样不仅使得聚焦效果更好,且有利于增大聚焦极与阳极的距离,提高条纹管的电耐性。偏转器采用倾斜形偏转板,置于阳极孔后。整个条纹管结构紧密,总长仅为 100 mm ,属超小型化条纹变像管。图 1(a) 和图 1(b) 分别为 CST 软件中建立的结构模型图及其剖视图,建模中各电极材料采用电导体 (PEC) 代替。

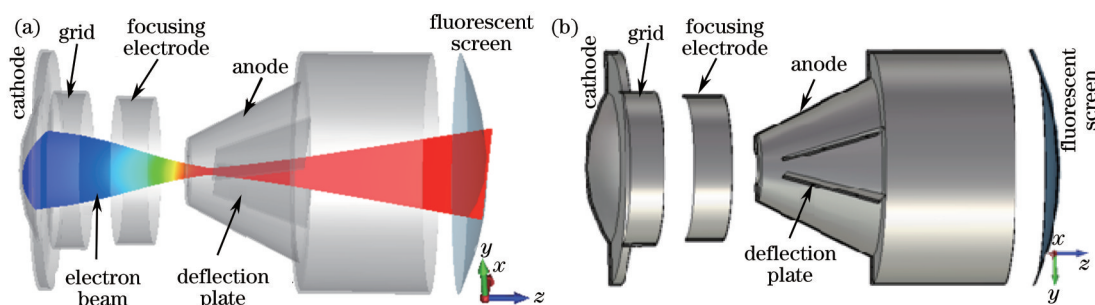


图 1 (a) 小型条纹管结构; (b) 小型条纹管结构剖视图

Fig.1 (a) Structure of the small-size streak tube; (b) section view of the small-size streak tube

评价条纹变像管静态性能的主要技术指标有时间分辨率、空间分辨率、放大倍率等。追踪阴极表面发射的电子束的运行轨迹,统计其到达荧光屏上的时间和空间分布,可以得到系统的时间点扩展函数和空间点扩展函数,从而根据定义编程计算其对应的调制传递函数 (MTF)。调制传递函数可用来评价成像系统整

体性能的好坏^[9]。瑞利极限所对应的调制传递函数值约为9%,所以通过调制传递函数曲线的调制度下降到0.1左右时的空间频率和时间频率来确定空间分辨率和时间分辨率。

光电阴极发射的光电子,初始参量(初能量、方位角、仰角、初位置等)有一定的弥散,所以在设计中需对电子初始参量进行合理抽样。一般认为光电子的初能量服从0~0.6 eV上的 β 分布;发射仰角服从0~90°的余弦分布;方位角服从0~2 π 范围内的均匀分布;初始位置服从均匀分布(均匀光照射)或近似于高斯分布(激光近距离照射)^[10]。本文采用Monte Carlo法对阴极表面发射的电子束的初始参量进行随机抽样,每个点源抽取3000个电子,进行条纹管静态性能的仿真计算。另外,计算条纹管静态性能时,偏转板置于阳极等位区,与阳极电压相等,不会在等位区产生额外电、磁场改变电子运行轨迹,所以偏转板对条纹管的静态特性没有影响,计算条纹管静态特性时省去了偏转板。

3 条纹管静态特性

3.1 正交实验法确定各电极间距及电压参数

在优化条纹管结构的仿真实验中,需要不断改变各电极间的距离和各电极电压,从而选择最优的参数组合,如果将每个影响因素的可能参数都进行实验,则需要大量的仿真实验。为了提高仿真效率,引入正交实验法来选择最佳方案。正交实验法是利用正交表来安排多因素实验的一种高效率设计方法。它是从实验因素的全部水平组合中,挑选部分有代表性的水平组合进行实验,通过对部分实验结果的分析了解全面实验的情况,找出最优的水平组合^[11]。

正交实验中以极限物理时间分辨率、弧矢和子午方向极限空间分辨率为实验指标。通过前期仿真实验知道影响条纹管时、空分辨率的主要因素有栅极电压、聚焦电极电压、阴极与栅极的间距以及栅极与聚焦极的间距,每个因素设置3个水平,正交实验的各因素及因素水平如表1所示。另外,栅极与聚焦极的电压对条纹管性能的影响可能有交互作用,所以在正交实验设计中需要考虑二者的交互作用,交互作用在实验设计中当作因素看待,仅考查栅极电压 V_g 和聚焦极电压 V_f 的一级交互作用。

表1 正交实验因素水平表

Table 1 Orthogonal factors level table

Project		Factor		
Level	Grid voltage V_g/V	Focusing electrode voltage V_f/V	Distance between cathode and grid d_{cg}/mm	Distance between grid and focusing electrode d_{gf}/mm
1	315	740	1.4	5.5
2	325	750	2.4	6.5
3	335	760	3.4	7.5

所设计的正交实验表以及实验结果的极差分析^[12]如表2所示。根据各因素各水平所对应的各项实验指标和的平均值大小 K 来确定各因素的优化水平组合,根据极差大小确定各因素对实验结果影响的主次顺序如下:

在时间分辨率指标下,优化水平组合为 $V_{g1}V_{f2}d_{cg3}d_{gf2}$,因素主次顺序为 $d_{cg}>V_g>d_{gf}>V_f>V_g \times V_f$;

在弧矢空间分辨率指标下,优化水平组合为 $V_{g2}V_{f3}d_{cg2}d_{gf3}$,因素主次顺序为 $d_{cg}>d_{gf}>V_g \times V_f > V_g > V_f$;

在子午空间分辨率指标下,优化水平组合为 $V_{g1}V_{f1}d_{cg2}d_{gf2}$,因素主次顺序为 $d_{cg}>d_{gf}>V_g > V_f > V_g \times V_f$ 。

以上3项指标单独分析出的优化条件不一致,此时需根据因素的影响主次综合考虑,确定最佳工艺条件。从因素主次顺序可以看出交互作用 $V_g \times V_f$ 对实验结果影响较小,所以主要通过 V_g 、 V_f 、 d_{cg} 、 d_{gf} 4个因素来确定最优水平组合。对于因素 V_g ,可取 V_{g1} 或 V_{g2} ;对于因素 V_f ,其对时间分辨率和子午方向空间分辨率影响大小相同,比对弧矢空间分辨率影响大,可取 V_{f2} 或 V_{f1} ;对于因素 d_{cg} ,其对3项指标影响大小都排第一位,且弧矢和空间分辨率指标下都选 d_{cg2} ,所以 d_{cg} 取 d_{cg2} 。类似地,对于因素 d_{gf} 取 d_{gf2} 。可以选择的优组合有 $(V_{g1}V_{f1}d_{cg2}d_{gf2})$ 、 $(V_{g1}V_{f2}d_{cg2}d_{gf2})$ 、 $(V_{g2}V_{f1}d_{cg2}d_{gf2})$ 或 $(V_{g2}V_{f2}d_{cg2}d_{gf2})$ 。对以上4种组合方案再进行仿真实验,选择各参数组合下的时、空分辨率最优的方案,得到最优的水平组合为 $V_{g2}V_{f2}d_{cg2}d_{gf2}$ 。

表2 正交实验表及极差分析结果

Table 2 Orthogonal experiments with its range analysis

Column number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Factors	V_g/V	V_f/V	V_g*V_f	V_g*V_f	d_{eg}/cm	d_{gf}/cm	Vacant column	Temporal resolution /ps	Sagittal spatial resolution /(lp/mm)	Meridian spatial resolution /(lp/mm)
Exp.1	1	1	1	1	1	1	1	27.25	62.26	52.88
Exp.2	1	2	2	2	2	2	2	29.41	838.6	1908
Exp.3	1	3	3	3	3	3	3	30.49	66.12	64.34
Exp.4	2	1	1	2	2	3	3	28.74	1413	1585
Exp.5	2	2	2	3	3	1	1	30.59	71	66
Exp.6	2	3	3	1	1	2	2	27.14	67.31	54.89
Exp.7	3	1	2	1	3	2	3	30.47	66.51	63.32
Exp.8	3	2	3	2	1	3	1	26.98	71.5	56.5
Exp.9	3	3	1	3	2	1	2	28.53	294.6	205.3
Exp.10	1	1	3	3	2	2	1	29.15	451.7	1742
Exp.11	1	2	1	1	3	3	2	30.54	64.07	61.53
Exp.12	1	3	2	2	1	1	3	27.03	56.61	48.62
Exp.13	2	1	2	3	1	3	2	27.18	81.57	63.02
Exp.14	2	2	3	1	2	1	3	28.79	1087	275.7
Exp.15	2	3	1	2	3	2	1	30.53	66.78	63.26
Exp.16	3	1	3	2	3	1	2	30.49	74.41	68.99
Exp.17	3	2	1	3	1	2	3	27.05	65.7	53.88
Exp.18	3	3	2	1	2	3	1	28.47	1976	272.6
Temporal resolution	K1	28.978	28.88	28.773	28.777	27.105	28.78	28.828		
	K2	28.828	28.893	28.858	28.863	28.848	28.958	28.882		
	K3	28.665	28.698	28.84	28.832	30.518	28.733	28.762		
	Range R	0.313	0.195	0.085	0.086	3.413	0.225	0.12		
Sagittal spatial resolution	K1	256.56	358.242	327.735	553.858	67.492	274.313	449.87		
	K2	464.443	366.312	515.048	420.15	1010.151	259.433	236.76		
	K3	424.787	421.237	303.007	171.782	68.148	612.043	459.16		
	Range R	207.883	62.995	212.041	382.076	942.658	352.61	222.40		
Meridian spatial resolution	K1	646.228	595.868	336.975	130.153	54.965	119.582	375.54		
	K2	351.312	403.602	403.593	621.728	998.1	647.558	393.62		
	K3	120.098	118.168	377.07	365.757	64.573	350.498	348.48		
	Range R	526.13	477.7	66.618	491.575	943.135	527.976	45.145		

3.2 静态特性计算结果

为了评估所设计的条纹管在整个阴极范围内的静态特性,在阴极表面选取离轴距离不同的点,各发射3000个电子,追踪电子轨迹,计算其调制传递函数。图2所示为阴极中心发射的无初时间弥散的光电子束到达荧光屏上的时间点扩展函数,从图中可以看出,静态情况下从阴极发出的无初时间弥散的光电子,由于初始方位角、初能量以及初始位置的不同,经过条纹管系统到达荧光屏时产生了时间展宽效应。图3(a)所示为阴极表面上离轴不同距离的点处发射的电子束的时间调制传递函数曲线(TMTF),图3(b)为条纹管物理时间分辨率随离轴距离的变化曲线。从图中可以看出,物理时间分辨率的范围为16~30 ps,且随着离轴距离的增大,物理时间分辨率反而提高。

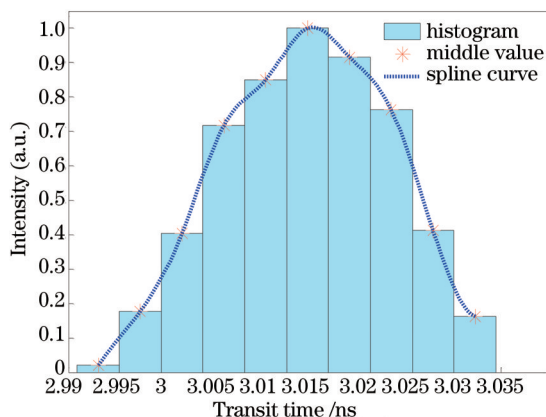


图2 阴极中心电子束到达荧光屏上的时间点扩展函数

Fig.2 Point spread function of the electrons transit time from the center of the photocathode to the screen

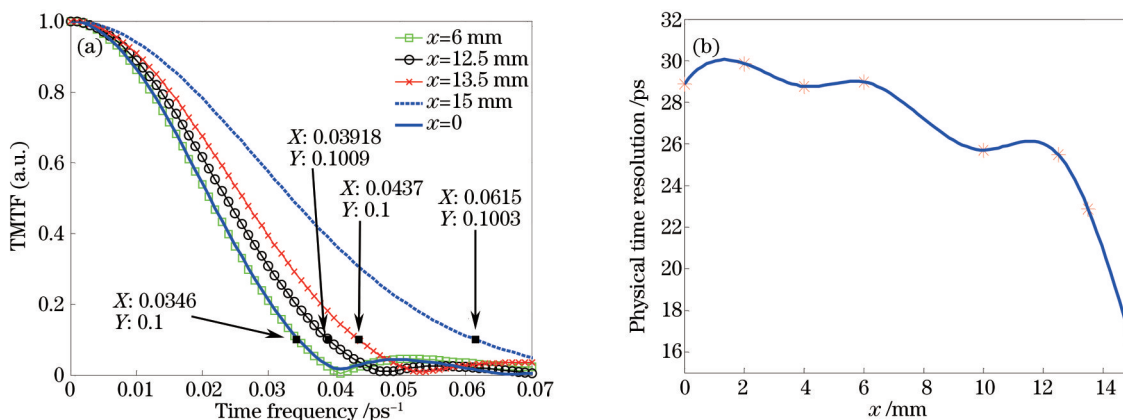


图3 (a) 离轴不同距离的点处发射的电子束的时间调制传递函数;
(b) 条纹管物理时间分辨率随离轴距离的变化曲线

Fig.3 (a) TMTF of electrons emitted from the different positions on the photocathode in slit direction;
(b) variation of physical time resolution with distance to the axis in slit direction

图4为狭缝上离轴不同距离的点处发射的电子束的狭缝方向和扫描方向静态空间调制传递函数曲线。从图中可以看出,随着物点离轴距离的增大,狭缝方向的静态空间分辨率逐渐减小,而子午方向的静态空间分辨率变化幅度较小。在离轴距离为14 mm的物点处,狭缝方向的静态空间分辨率为22 lp/mm,子午方向的静态空间分辨率大于500 lp/mm,即在保证静态空间分辨率大于20 lp/mm的情况下,阴极有效工作面积可以达到28 mm。

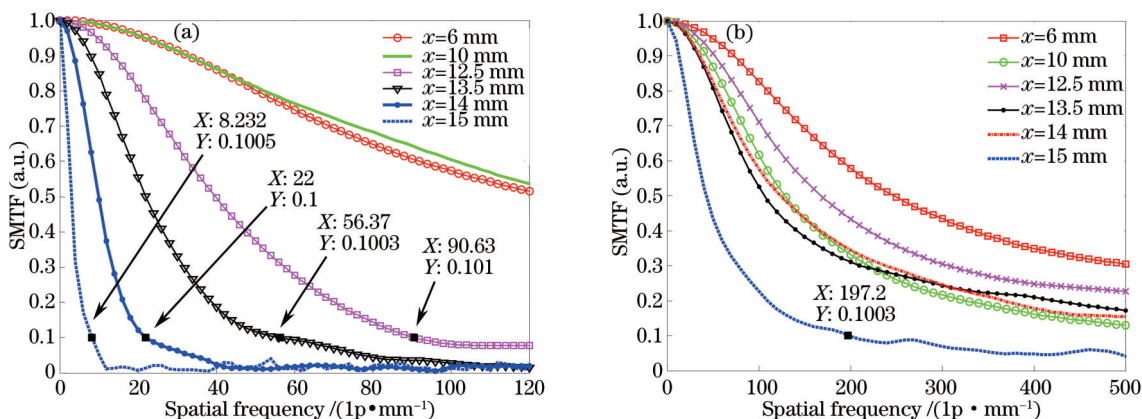


图4 离轴不同距离的点处发射的电子束的(a)狭缝方向和(b)扫描方向空间调制传递函数

Fig.4 SMTF of electrons emitted from different positions (a) in slit and (b) scanning directions

图 5 所示为在阴极上离轴 10 mm 和 14 mm 的点处分别发射 3000 个电子所得的电子运行轨迹图,从图中可得电子束到达荧光屏时离轴距离分别为 10.7 mm 和 15 mm,则条纹管放大倍率分别为 $M=10.7/10=1.07$, $M=15/14=1.07$,可见条纹管的放大倍率约为 1.07。

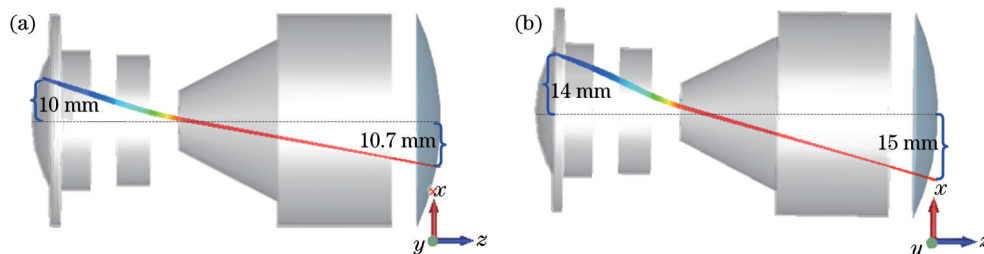


图 5 阴极上离轴(a)10 mm 和(b)14 mm 的点处发射的电子束运行轨迹

Fig.5 Trajectory of electrons emitted from the points (a) 10 mm and (b) 14 mm away from the axis on the photocathode

3.3 像差计算

电子光学系统的实际成像与理想高斯像之间总会有一定的偏差(像差)。由于旁轴条件得不到满足而造成的像差(称为几何像差),是影响电子光学系统成像质量的主要原因之一。几何像差主要有球差、慧差、像散与场曲、畸变等。下面通过轨迹追踪法,根据定义求解条纹管弧矢轨迹的几何像差^[13],进一步了解其成像性能。

球差产生的原因是旋转对称场对离轴远的电子射线比离轴近的电子射线有更大的会聚力,像点为一弥散圆斑。球差为

$$\Delta = Y_{90^\circ} - Y_{10^\circ}, \quad (1)$$

式中 Y_{90° 和 Y_{10° 分别为初始角度为 90° 和 10° 的电子轨迹在最佳像面处的高度。

慧差产生的原因是非轴上的点发出向不同方向散开的射线,通过透镜边缘的射线被折射得多,致使散射圆心偏离高斯像点,其像点有彗星拖尾。慧差计算方法为

$$W = \left| \frac{1}{2}(Y_{90^\circ} + Y_{-90^\circ}) - Y_0 \right|, \quad (2)$$

式中 Y_{90° 和 Y_{-90° 分别为初始角度为 90° 和 -90° 的电子轨迹在最佳像面上的高度, Y_0 为主轨迹在最佳像面上的高度。

像散是由于透镜对轴外物点发射的不同方向的电子束聚焦作用不同,使得弧矢射线和子午射线的焦距不同,导致物点在观察面上的像呈椭圆状。为了消除像散可采用弯曲视场,这便产生了场曲,横向场曲的计算方法为

$$\Delta y = Y_{10^\circ} - Y_0, \quad (3)$$

式中 Y_{10° 为初始角度为 10° 的电子轨迹在最佳像面处的高度, Y_0 为主轨迹在最佳像面上的高度。

畸变产生的原因是透镜系统的放大倍率具有各向异性,造成图像几何形状的失真。畸变的计算方法为

$$D = \frac{Y_i - iY_1}{iY_1} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 Y_i 为初始高度为 i mm 的电子轨迹在最佳像面处的高度, Y_1 为初始高度为 1 mm 的电子轨迹在最佳像面处的高度。

表 3 所示为条纹管系统在阴极不同点处的各种几何像差的大小,从表中数据分析可得,球差在整个阴极范围内占总像差的最大比重,畸变、慧差和场曲在离轴较远的物点处有所增大。在离轴 15 mm 的物点处,各类像差都比较大,这一点在前面的静态计算结果中也有所体现,即在距阴极中心 15 mm 处条纹管的静态空间分辨率急剧下降。

4 结 论

在设计条纹管时采用了正交实验法,避免了盲目实验,提高了仿真效率,且有助于了解系统各个部分对总体性能的影响情况。所设计的条纹管阴极采用球面形式,有助于减小相差,从而使其有效工作面积大于 28 mm。条纹管整个阴极范围内物理时间分辨率优于 30 ps,边缘静态空间分辨率大于 20 lp/mm,放大倍率为

表3 条纹管弧矢轨迹的像差计算结果

Table 3 Aberration in sagittal surface of the streak tube

Distance to axis/mm	Distortion /%		Spherical aberration / μm		Coma / μm		Field curvature / μm	
	Sagittal direction	Meridian direction	Sagittal direction	Meridian direction	Sagittal direction	Meridian direction	Sagittal direction	Meridian direction
2	-0.0049	-0.0013	10.9	4.3	0.05	1.55	-0.3	-1.3
4	-0.0134	-0.0068	14.1	9.5	2.0	2.35	-1.8	-3.6
6	-0.095	-0.0009	14.5	11	3.3	4.5	0.4	-0.5
8	-0.0069	0.0044	14.1	10.9	3.5	5.2	0.5	-0.4
10	-0.0030	0.0080	14	11.1	5.5	2.25	1.0	-0.3
12	-0.0019	0.0079	16	12.9	4.4	5.9	2.0	0.9
15	0.0155	0.03	95	106	48	49.5	34.0	36.7

1.07。聚焦极前加一栅极不仅对电子束起到预聚焦的作用,且可以适当增大聚焦极与阳极的距离,使得条纹管电耐性提高,可靠性也相应提高。相比于同类型的条纹管,所设计的条纹管结构紧密,整管大小仅为 $50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,实现了条纹管的小型化。满足非扫描式激光成像雷达对大探测面积、高可靠性、超小型条纹变像管的应用需求。不过所设计的条纹管仅考虑了静态特性,而在实际使用中条纹管需要工作在动态模式下,为了使该设计具有较为广泛的应用,需要进一步计算该小型条纹管在加上扫描电压后的动态特性。

参 考 文 献

- 1 Asher Gelbart, Brian C Redman, Robert S Light, *et al.*. Laser radar technology and applications[C]. SPIE, 2002, 4723:9-18.
- 2 Zhao Wen, Han Shaokun, Kang Yanyan, *et al.*. Three dimensional flash imaging lidar range estimation via parameterized blind deconvolution[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0711002.
赵 文, 韩绍坤, 康艳艳, 等. 基于参数化盲反卷积的三维非扫描激光雷达距离估计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 07110021.
- 3 Sun Jianfeng, Liu Di, Ge Mingda, *et al.*. Image pre-processing algorithm of underwater target for streak tube imaging lidar[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0714002.
孙剑峰, 刘 迪, 葛明达, 等. 条纹管激光雷达水下目标图像预处理算法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0714002.
- 4 John W Mclean, Arete Associates. Airborne and in-water underwater imaging[C]. SPIE, 1999, 3761: 10-19.
- 5 Andrew Nevis, Russell J Hilton, Sam J Taylor, *et al.*. Detection and remediation technologies for mines and minelike targets[C]. SPIE, 2003, 5089: 225-237.
- 6 Zhao Wen, Han Shaokun. Range resolution of a streak tube imaging lidar system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0714004.
赵 文, 韩绍坤. 条纹管成像激光雷达距离分辨率[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0714004.
- 7 Sun Jianfeng, Gao Jian, Wei Jingsong, *et al.*. Research development of under-water detection imaging based on streak tube imaging lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 811-814.
孙剑峰, 郜 键, 魏靖松, 等. 条纹管激光成像雷达水下探测成像研究进展[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 811-814.
- 8 Xin Bai, Hua Liao, Hanben Niu. Study on the critica cathode-mesh electric field for designing a streak image tube[C]. Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011, 3502-3504.
- 9 Tian Jinshou, Zhao Baosheng, Wu Jianjun, *et al.*. Theoretical caculation of the modulation transfer function in a femto-second electron diffraction system[J]. Acta Phys Sin, 2006, 55(7): 3368-3374.
田进寿, 赵宝升, 吴建军, 等. 飞秒电子衍射系统中调制传递函数的理论计算[J]. 物理学报, 2006, 55(7): 3368-3374.
- 10 Tian Jinshou, Zhao Baosheng, Wu Jianjun, *et al.*. Transfer property of electron pulse in femto-second electron diffraction system[J]. Acta Phys Sin, 2007, 56(1): 123-128.
田进寿, 赵宝升, 吴建军, 等. 电子脉冲在飞秒电子衍射系统中的传输特性[J]. 物理学报, 2007, 56(1): 123-128.
- 11 Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, *et al.*. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management. 2010, 27(9): 52-55.
刘瑞江, 张业旺, 闻崇伟, 等. 正交实验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
- 12 Xu Zhongan, Wang Tianbao, Li Changying, *et al.*. Brief introduction to the orthogonality test design[J]. SCI/Tech Information Development & Economy, 2002, 12(5):148-150.
徐仲安, 王天保, 李常英, 等. 正交实验设计法简介[J]. 科技情报开发与经济, 2002, 12(5): 148-150.
- 13 Liu Yueping. Study on Theory and Applications of Travalng Wave Deflection System[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1985: 56-57.
刘月平. 行波偏转系统的理论与应用研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1985: 56-57.

栏目编辑: 张 雁