

多狭缝条纹变相管的设计

陈 敏 赵宝升* 盛立志 田进寿

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 设计了一种有效面积大、体积小、重量轻的多狭缝条纹变相管。通过自行编程并进行 Monte-Carlo 模拟计算, 在离轴 10 mm 处, 静态空间分辨率可达 20 lp/mm, 静态物理时间分辨率达 100 ps。在电子光学设计的基础上, 完成了多狭缝条纹变相管的结构设计和机械加工, 通过工艺设计, 制作样管, 阴极有效面积达 $\phi 22$ mm。最后进行静态测试, 获得了具有一定分辨能力的静态图像。该像管可以用作变相管激光雷达的探测器, 实现非扫描激光三维成像。

关键词 条纹管; 时间分辨率; 空间分辨率; 激光三维成像雷达

中图分类号 TN143; TN28 **文献标识码** A

0 引言

单狭缝条纹变相管很多文章已有详细讨论^[1], 多狭缝条纹变相管除具有单狭缝扫描变像管的性能外, 其主要特点是阴极有效面积大, 从而可实现对探测目标的非扫描激光三维成像^[2], 同时便于装载; 体积小, 重量轻。

美国空军实验室和美国海洋管理局(NOAA)于 2000 年提出了利用多狭缝条纹变相管实现脉冲式非扫描三维成像激光雷达方案(MS-STIL), 并进行了大量的实验研究。这种成像系统除了能够提供三维单脉冲非扫描成像、三维多光谱成像、三维多光谱荧光成像外, 还具有易于与其它焦平面探测器数据合成、成像频率高和易于小型化等优点。2002 年, 美国亚利桑那州的 Areté Associates 公司研制了一种基于条纹变相管的新型三维成像雷达^[4], 它能实现 64×64 像素的高帧频非扫描式三维成像激光雷达系统, 成像的距离准确度优于 2.5%, 图像处理速度可达到每秒 100 帧, 并且已经在水下鱼雷探测、地貌勘察、海洋监测、精确制导等领域有了初步应用^[3,4]。这些新体制激光雷达虽然在实验室对其原理进行了可行性验证, 但大多由于器件水平或工程化水平的限制, 目前均处于研究阶段。国外相关实验室和研究机构都在努力进行这方面机理和关键器件的研究来改进和提高其性能。国内目前只开展了一些初步调研、设计和研究工作。

1 多狭缝条纹管电子光学系统设计

1.1 电子光学系统结构

本文通过 C++ 和 matlab 编程, 采用五点差分法, 求解电场分布, 然后采用龙格-库塔法求解电子

的运动方程^[5,6]。经过优化设计, 最终确定扫描变相管的电子光学结构如图 1。

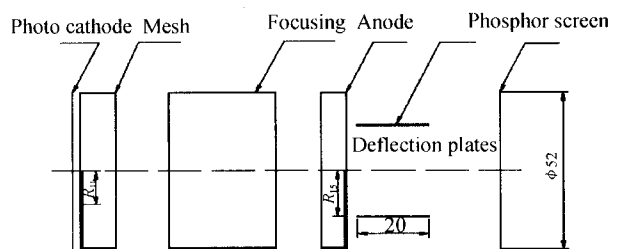


图 1 多狭缝扫描变相管电子光学结构

Fig. 1 Configuration of Ms-tube

表 1 多狭缝条纹变相管主要结构及电位参量

总长	132mm
外形直径	$\phi 70$ mm
阴极有效面积	$\phi 22$ mm
荧光屏有效直径	$\phi 50$ mm
阴栅距离	2 mm

阴极和加速极间的距离为 2 mm, 其间的电压差为 5.8 kV。此时场强为 3 kV/mm, 这样的场强在保证三维成像雷达所需要的时间分辨能力的前提下, 使电子不至于有 too 高的初速度, 从而容易聚焦, 可以使整个条纹管短小。通过调节变相管的各电极电压, 可以调节像面位置以及放大率。从阴极到荧光屏的距离仅 120 mm, 等位漂移区比通常的要短一些, 这样可以减少时间和空间弥散。

整个子午面的电位分布如图 2。

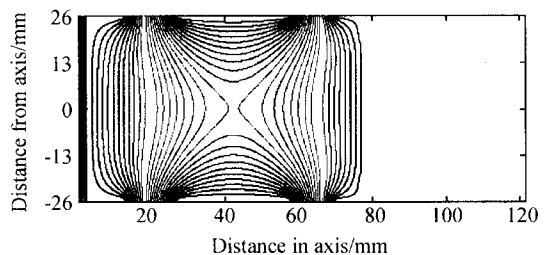


图 2 多狭缝条纹变相管子午面的电位分布

Fig. 2 The equalpotential lines on meridional plane

*Tel:029-88498712 Email:open@opt.ac.cn

收稿日期:2005-06-06

图 3 表示离轴不同距离的电子主轨迹图. 可以看出在近轴区放大率 M 为 1.5 左右. 这一类平面阴极型的像管畸变较大, 在离轴 10 mm 处, 其放大率畸变达 20%.

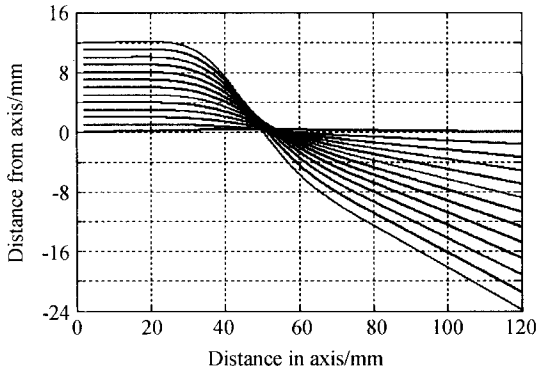


图 3 离轴不同距离的特征轨迹
Fig. 3 Special trajectories of different distance from axis

1.2 Monte Carlo 模拟

变相管阴极发射的电子其初始状态是满足特定分布的, 电子轨迹的跟踪计算是基于以下假设:

- 1) 光电子的初能量满足在 $(0 \sim 1 \text{ eV})$ 上的 $\beta(1, 4)$ 分布, 该分布的 M-C 抽样采用直接抽样法;
- 2) 光电子的初位置满足正态分布, 正态分布的 M-C 抽样采用乘抽样法. 方差可以在抽样过程中引入一个参量 σ_1 进行调整;
- 3) 光电子仰角服从 $(0 \sim 90^\circ)$ 的余弦分布, 方位角服从 $(0 \sim 2\pi)$ 范围内的均匀分布的电子, 余弦分布的 M-C 抽样采用积分抽样法.

图 4 表示 20000 个电子初能量分布的 M-C 抽样结果. Monte Carlo 抽样结果的正确性必须得到验证, 对每一分布的抽样结果都进行了验证. 图 5 是光电子初角度分布的 M-C 抽样结果和余弦函数的比较, 星点表示 M-C 抽样直方图分布的中点, 而曲线则表示根据 $y = \cos(x)$ 画出的余弦曲线, 可见二者符合较好. 图 6 为随机取样 1000 个电子的轨迹追踪图.

在设计一个像管时, 总是力图通过修改电极系统的结构、尺寸和电参量, 使之不但满足所要求的型

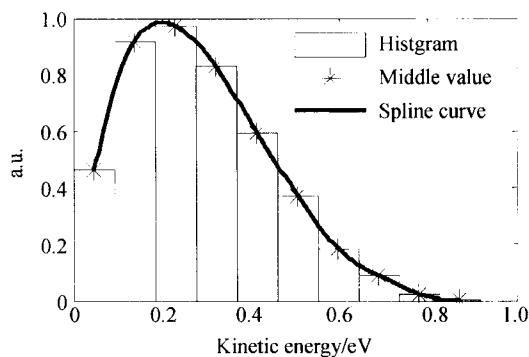


图 4 初能量的 Monte-Carlo 抽样结果
Fig. 4 Initial energy distribution of the photoelectrons

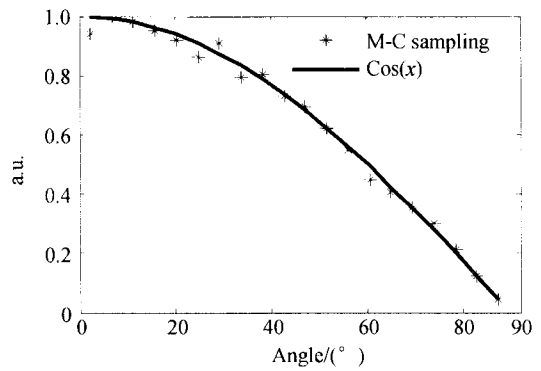


图 5 初角度分布的 M-C 抽样结果和余弦函数的比较
Fig. 5 Comparison between M-C sampling and cosine curve

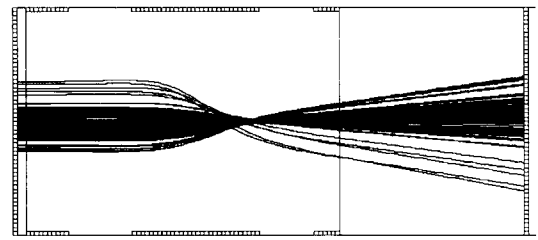


图 6 Monte-Carlo 模拟轨迹图
Fig. 6 The Monte-Carlo simulation of electron trajectories
式、外廓尺寸和基本电子光学参量(如像面位置和放大率), 还要尽力减小各种电子光学像差. 但是, 像差总是不可能完全消除, 甚至有时会出现这样的情况: 某一像差减少了, 又会引起别的像差反而增大. 因此有必要选用某种综合参量, 对系统的成像质量进行评定. 通常的评定方法有时间传递函数、空间传递函数等^[5].

1.2.1 时间展宽

通过对从阴极 $\phi 22 \text{ mm}$ 的面积上同时出发的 3000 个电子的 Monte-Carlo 模拟, 在荧光屏处统计其时间展宽, 如图 7. 在如此大的有效阴极范围内, 电子的物理时间分辨率仍可达 100 ps (半峰值全宽), 完全可以满足变相管激光雷达的需要.

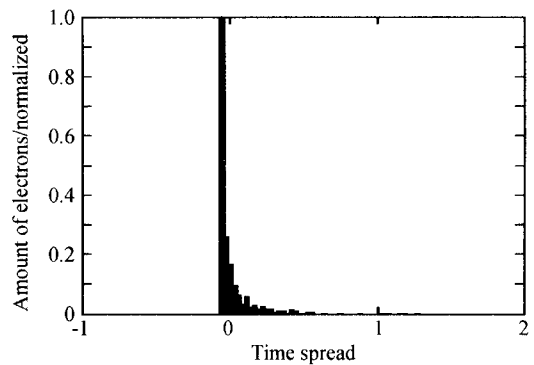


图 7 电子脉冲的时间分布
Fig. 7 Temporal distribution of electrons on the optimum plane

1.2.2 空间传递函数(MTF)

对于一个实际的电子光学系统, 由于像差的存在, 一个物点被电子光学系统所成的像不再是一个

理想的点,而是形成一个弥散的斑,在空间的分布可以用一个点扩展函数来表示. 点扩展函数的分布,反映了电子光学系统的成像性质. 如果把电子光学系统看成一个线性平移不变传输系统,则传输前后的电子束斑就相当于电子光学系统的物和像. 通常,由电子光学系统组成的显示器件所显示的图像,是二维的空间分布函数. 通过傅里叶变换,可以分解成无穷多个不同空间频率、不同振幅的正弦分布的线性组合,经过电子光学系统后将有不同的幅度下降和不同的相位滞后. 输出像的傅里叶变换与输入的傅里叶变换之比,称为电子光学空间传递函数. 而电子光学空间传递函数所描述的正是调制度的下降和相位改变程度,分别称为调制传递函数和相位传递函数. 电子光学空间传递函数反映了像的空间频谱,在空间频率域上更客观的反映了电子光学系统的质量^[6].

空间调制传递函数的计算,可以从计算点扩展函数开始,计算方法牛憨笨老师已经做过详细地介绍^[7],在此不再赘述. 通过对 3000 个电子运动轨迹的 Monte-Carlo 模拟,计算得到该变相管的空间调制传递函数如图 8,表明该设计在近轴区具有较好

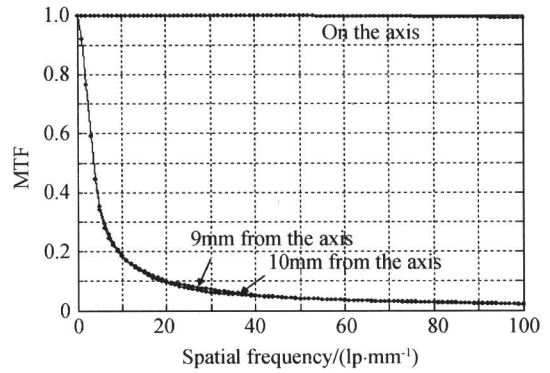


图 8 空间调制传递函数 MTF

Fig. 8 Spatial modulation transfer function

的空间响应特性,即使在远离轴线 10 mm 处空间分辨率也可达 20 lp/mm.

2 静态实验

扫描变相管主要由光电阴极、电子光学聚焦透镜、偏转系统、荧光屏及管壳构成. 设计的正误最终将由实验验证. 通过工艺设计、模具设计、机械加工、装架和阴极制作. 制成的整个样管不仅体积小、重量轻,其体积只有原来的皮秒变相管的一半,如图 9. 且多狭缝变相管的重量为 320 g,不到皮秒变相管重



图 9 多狭缝变相管实物图

Fig. 9 The image of Ms-streak tube

量的一半(680 g).

给各电极上加相应的电压后,进行测试实验. 对应的静态空间分辨率 7 lp/mm,静态图像如图 10.

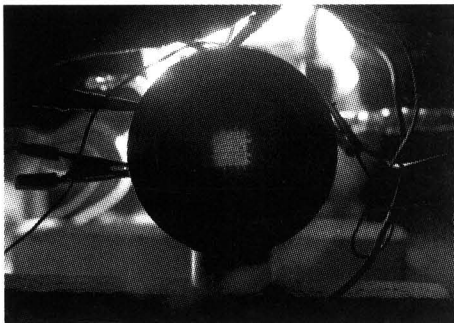


图 10 静态像

Fig. 10 Static image

3 结论

自行编制了一套电场分布和轨迹追踪计算程序,设计了轴对称超短静电聚焦电子光学系统,总长为 132 mm,大大减少了电子渡越时间和空间弥散. 阴极有效面积达 $\phi 22$ mm,可以有效增大视场. 设计的时间分辨率为 100 ps,边缘空间分辨能力 20 lp/mm,完全满足实用的需要. 在设计的基础上,完成了样管的工艺制作,组建了静态测试实验系统. 但是由于后期工艺上的原因,测试电压未达到设计值,静态空间分辨率也未达到设计值,仍得到了具有一定分辨能力的静态图像,说明理论计算是正确的.

致谢:感谢光电子学室邹远鑫研究员,张小秋研究员,

赛小锋副研究员,邹玮实验师等老师在整个工艺制作和静态实验中的支持和配合。

参考文献

- 1 Niu H. Theoretical and experimental study of femtosecond streak tube. *Proc of SPIE*, 1988, **1032**: 472~479
- 2 赵宝升,陈敏. 采用多狭缝条纹变相管实现激光三维成像. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1425~1427
Zhao B S, Chen M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1425~1427
- 3 Nevis A, Hilton R J, Taylor J S, *et al.* The advantages of three-dimensional electro-optic imaging sensors. *Proc of SPIE*, 2003, **5089**: 225~237
- 4 Gelbart A, Redman B, Robert S, *et al.* Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar. *Proc of SPIE*, 2002, **4723**: 9~18
- 5 华中一,顾昌鑫. 电子光学. 上海: 复旦大学出版社, 1990
Hua Z Y, Gu C X. *Electric Optics*. Shanghai: Fudan University Press, 1990
- 6 周立伟. 宽束电子光学. 北京: 北京理工大学出版社, 1993
Zhou L W. *Electron Optics with Wide Beam Focusing*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993
- 7 刘月平. 行波偏转系统的理论与应用研究[硕士学位论文]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1985
Liu Y P. *Theory and Application of Meander Type Deflection System*. Xi'an: Master degree thesis of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, 1985

Design of a Multi-slit Streak Tube

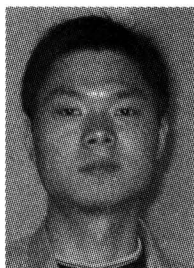
Chen Min, Zhao Baosheng, Sheng Lizhi, Tian Jinshou

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

Received date: 2005-06-06

Abstract A new type of multi-slit streak tube was designed with large efficient area, smaller bulk and lighter weight. By programming and Monte-Carlo simulation, even 10 mm off the axis, the spatial resolution can reach to 20 lp/mm, and the static physical temporal resolution can reach to 100 ps. On the basic of theoretical design, some processes were made such as the structural design, machining and assembly. A MS-Streak tube was manufactured. Its efficient photocathode area can reach $\phi 22$ mm. After testing with static experiment system set up, a static image with certain spatial resolution was obtained.

Keywords Streak tube; Spatial resolution; Temporal resolution; 3D imaging lidar



Chen Min was born in 1980. He graduated from Shaanxi University of Science and Technology in 2002. Now as a postgraduate he is studying in the photoelectronics Laboratory of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science.