

飞秒条纹变相管的设计

田进寿 白永林 刘百玉 欧阳娴 白晓红 杨文正 王琛

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要 设计了一种飞秒条纹变相管. 采用静电聚焦, 用 Monte Carlo 方法对光电子的初能量、初角度以及初位置进行抽样; 用有限差分法计算阴极和栅极之间以及偏转板之间的电场分布; 用四阶 Lunge-Kutta 法模拟跟踪大量(3000 个)光电子的运行轨迹; 统计分析了 3000 个电子在最佳像面上的时间分布、位置分布; 给出了变相管的空间调制传递函数、时间分辨能力等基本参量. 其时间分辨能力可望达到 290.4 fs.

关键词 飞秒; Monte Carlo 模拟; 有限差分法; 调制传递函数; 条纹变相管

中图分类号 O463; TN2 **文献标识码** A

0 引言

条纹相机时间分辨能力的理论极限是 10 fs, 多年以来人们一直在向这个方向奋斗. 国外在提高时间分辨方面有了显著的进展: 日本滨松公司和俄罗斯科学院普通物理研究所已经研制成时间分辨能力为 200 fs 的条纹相机^[1]. 美国堪萨斯大学常增虎课题组通过在阳极和偏转板之间放置一个宽度为 5 μm 的狭缝, 将静电聚焦条纹相机的时间分辨提高到 280 fs, 并且开展了时间分辨为 100 fs 的条纹相机的研究工作^[2]. 除了时间分辨能力以外, 条纹相机的其它性能指标也在不断提高. 日本条纹相机的动态范围高达 10000 : 1, 同步扫描的频率高达 175 MHz, 俄罗斯条纹相机空间分辨能力可以达到 40 lp/mm. 其次便是条纹相机光谱响应范围的扩展: 波长为 5~75 μm 的远红外条纹相机已经问世^[3]. 俄罗斯开展了离子(质子或 α 粒子)条纹相机的研究(光电阴极用 CsI), 时间分辨率为 7 ps, 空间分辨率为 70 μm ^[4], 同时也研制成功中子条纹相机探测器(聚乙烯膜上镀 CsI), 时间分辨率 30 ps^[5]; 条纹相机的超小型化也取得了很大的进展, 且可用于激光雷达成像技术上^[6,7]. 另外, 关于条纹相机的新技术、新方法不断涌现, 如阿秒条纹相机^[8]、各向异性聚焦条纹相机^[9]、大输入画面条纹相机^[10]、射频圆扫描条纹相机等^[11]. 1998 年, 常增虎^[12] 研究小组研制的短磁聚焦变相管在紫外波段时间分辨率已达 540 fs. 但短磁聚焦条纹相机对激磁电流以及栅极高压的稳定性要求很高: 要求漂移不能超过万分之一, 否则会造成像面的漂移. 因此, 本文采用静电聚焦系统, 考虑实际工艺水平, 尽可能增大阴极和栅极之间的电场强度, 同时对聚焦电极的结构进行优化设计, 使得光电

子脉冲在阴极、栅极以及聚焦电极之间的时间宽度尽量减小, 甚至出现电子脉冲“压缩”现象, 有利于提高变相管的物理时间分辨能力, 使整机总时间分辨能力达到飞秒量级.

1 计算模型及方法

从光电阴极上发射出的光电子, 其初始能量、方位角、仰角、初始位置都满足一定的统计分布. 光电子的初始位置分布可以是均匀分布(均匀光照射时)或近于高斯分布(激光近距离照射), 光电子的初始能量一般认为服从 β 分布. 当给定光电子的初能量、初位置、以及初始倾斜角分布后, 可以利用 Monte Carlo(M-C)方法进行抽样. 根据概率论中的大数定理, 只有当抽样次数达到无穷大的时候, 抽样分布才能接近实际分布, 而实际又很难做到抽样次数达到无穷大, 因此 M-C 抽样结果是否可靠, 必须得到验证. 图 1 是光电子的初能量满足在(0~0.6 eV)

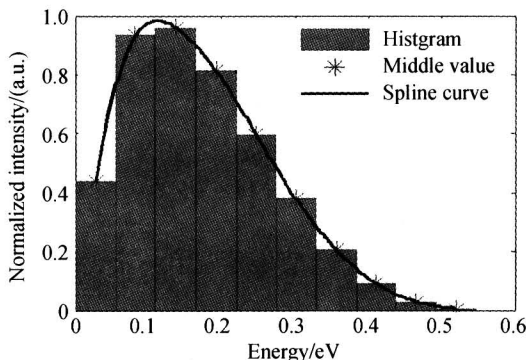


图 1 电子初能量的 Monte Carlo 抽样结果
Fig. 1 Initial energy distribution of the photoelectrons sampled with Monte Carlo method

上的 $\beta(1,4)$ 分布的 Monte Carlo 抽样结果. 跟踪电子轨迹的计算基于以下假设:

1) 光电子的初能量满足在(0~0.6 eV)上的 $\beta(1,4)$ 分布, 该分布的 M-C 抽样采用直接抽样

法^[13]; 2) 光电子的初位置满足均匀分布; 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, 余弦分布的 M-C 抽样采用积分抽样法。

有限差分法是应用最早的一种电磁场数值分析方法, 具有简单、直观等优点。有限差分法的基本原理是将连续区域内的点集用离散的点阵来代替, 从而将求解电场的泊松方程(Laplace 方程)中的偏微商用相邻点之间的差分代替, 经过这样的处理, 利用数值方法迭代求解由差分方程组建的方程组。

当不考虑空间电荷分布时, 旋转对称静电场中的 Laplace 方程为^[14]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{r \cdot \partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

在直角坐标系下, 三维空间的 Laplace 方程有如下形式

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

上述方程的求解如图 2。对于旋转对称场, 采用 5 点差分公式 $(P_{\text{new}}, P_1, P_2, P_3, P_4)$, 而三维空间场(偏转场)的计算, 采用 7 点差分公式 $(P_{\text{new}}, P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)$ 。

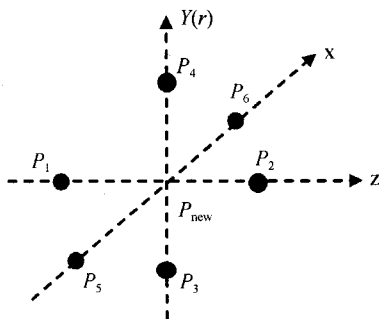


图 2 有限差分法网格点分布图

Fig. 2 The grid unit separation in Finite Difference method

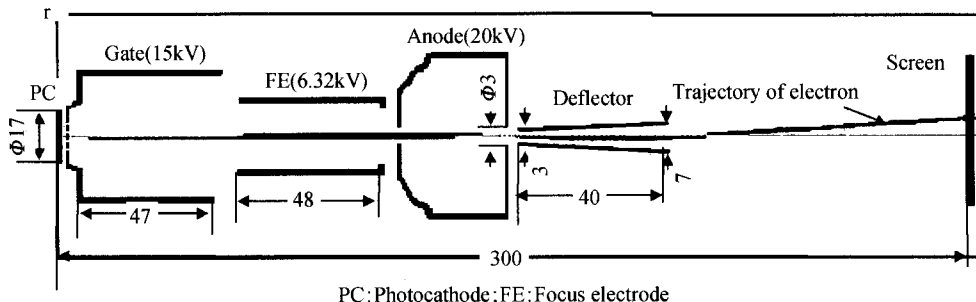


图 3 飞秒变相管的电极结构参量

Fig. 3 Diagram of the femto-second streak tube

表 1 是电子束在不同偏转电压下, 距离屏中央不同距离的空间分辨率。可以看出, 如果不考虑荧光屏的实际空间分辨率, 整个变相管具有很高的空间分辨能力, 即使在距离屏中央 18.8 mm 远处, 其空间分辨率也可以达到 35 lp/mm。图 6 是电子到达荧光

当用有限差分法计算得到空间电场分布以后, 就可以用四阶 Runge-Kutta 法^[14]求解电子运动方程、追踪电子束的运动轨迹。

2 设计计算结果

要提高条纹相机的时间分辨率, 首先要增强阴极附近的电场强度。但 Niu H B.^[15]等人的研究表明: 仅仅提高阴极附近的电场强度来提高条纹相机的时间分辨率是有限的。事实上, 透镜区域的时间弥散要大于栅极以前的时间弥散。而且空间电荷效应对动态范围的影响也大于栅极以前的区域。对条纹相机来说, 电子束交叉区域的空间电荷效应对时间弥散以及脉冲展宽的贡献并不大, 而是存在一个最优的扫描速度。在该速度下, 其技术时间分辨率达到最高。因此, 设计重点是聚焦电极以及阳极电极结构参量的优化设计以及最佳扫描速度的确定上, 并没有考虑空间电荷效应对变相管性能参量的影响。用 Monte Carlo 方法抽取 3000 个电子, 其初始状态满足上面给出的三个假设, 然后利用轨迹追踪法对变相管进行优化设计: 改变变相管的电极结构参量, 计算变相管的最佳像面、调制传递函数、像差、畸变等^[15], 直到得到比较满意的设计结果。图 3 是飞秒变相管电极结构参量图, 变相管的总长度为 300 mm, 放大倍率为 3, 阴极和栅极之间的间距为 2 mm, 阴极和栅极之间的电势差为 15 kV, 聚焦电极电压为 6.32 kV, 阳极电压为 20 kV, 电子束交叉点距离阴极的距离为 151 mm。图 4 是飞秒变相管等位线分布图。图 5 是从阴极上一个理想点上发出来的 3000 个初能量在 0~0.6 eV 范围内满足 $\beta(1, 4)$ 分布, 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, 到达荧光屏时的时间分布, 可见其峰值半高全宽(FWHM)只有 272.6 fs。

屏不同位置的空间调制传递函数(SMTF)。图 7 是阴极上宽度为 20 μm 的狭缝范围内的光电子达到荧光屏边缘(18.8 mm)时形成宽度为 90 μm 像, 而在靠近荧光屏中心位置处, 狭缝的像基本保持在 65~70 μm 左右, 表现出良好的偏转线性。这一结论可

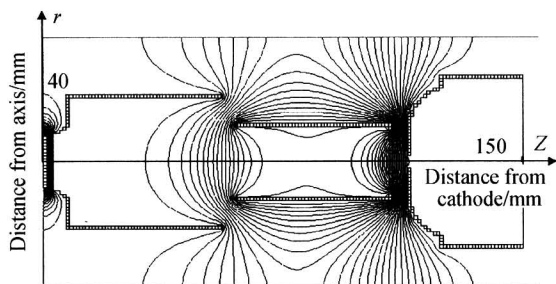


图4 飞秒变相管等位线分布
Fig. 4 Equal-potential lines in streak tube

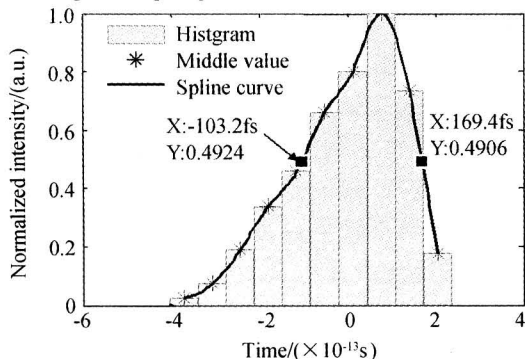


图5 电子到达最佳像面时的时间展宽
Fig. 5 Temporal duration of the electron pulse on the optimum plane

表1 空间分辨率与偏转距离的关系
(对比度降低到10%的空间频率)

偏转距离 y/mm	3.18	6.24	9.36	12.49	15.62	18.8
空间分辨率 (lp/mm)	>200	>200	104	52	45	35

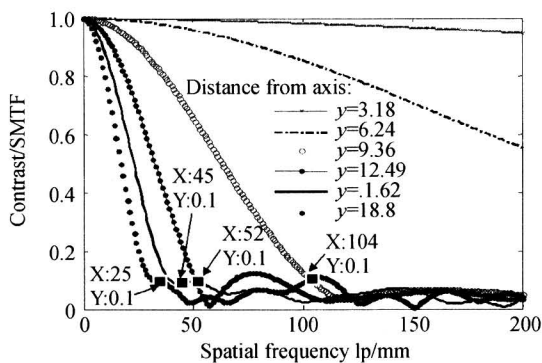


图6 不同偏转距离处的空间调制传递函数
Fig. 6 Spatial modulation transfer functions on screen

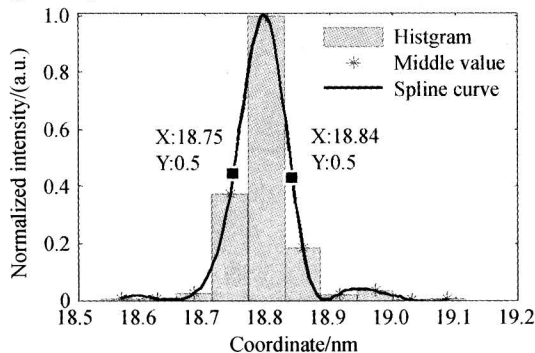


图7 阴极上宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 的狭缝范围内的光电子达到荧光屏边缘(18.8 mm)时形成宽度为 $90\ \mu\text{m}$ 的像
Fig. 7 A $20\ \mu\text{m}$ wide streak spread to a $90\ \mu\text{m}$ wide image on the edge of the screen

以从表2的结果中充分体现出来(表2为在阴极上宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 的狭缝范围内的光电子,在不同的偏转电压下达到荧光屏不同位置时的展宽效应). 在靠近屏中央位置附近,狭缝像的宽度基本等于阴极上狭缝宽度与变相管放大倍率3的乘积,而靠近荧光屏边缘处(电子在离开偏转板时距离偏转板很近),受到偏转板边缘场作用很大,导致狭缝像进一步展宽. 图8是偏转电压与偏转距离的关系,基本是一条理想的直线.

表2 狭缝像宽与偏转电压、离轴距离的关系

偏转电压/V	100	200	300	400	500	600
离轴距离/mm	3.126	6.26	9.38	12.51	15.65	18.8
狭缝像宽度/ μm	70	65	70	70	80	90

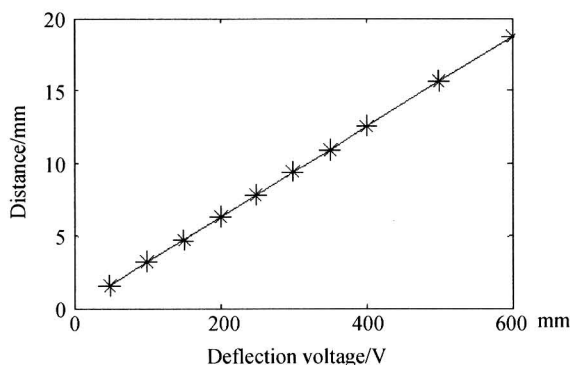


图8 偏转距离与偏转电压的关系
Fig. 8 Deflect distance versus deflect voltage

条纹相机时间分辨能力估算时,通过轨迹追踪法得到变相管的偏转灵敏度为 $P=3.12115 \times 10^{-5}\ \text{m/V}$, 如果要得到 $3 \times 10^8\ \text{m/s}$ 的扫描速度,则要求扫描电压的斜率 $K=9.612\ \text{kV/ns}$,是属于快扫描电压,这就要采用行波偏转系统,以改善频率响应. 采用倾斜放置的弯曲带型偏转板,长度为 $40\ \text{mm}$,两端间距分别为 $3\ \text{mm}$ 和 $7\ \text{mm}$,宽度为 $30\ \text{mm}$. 为了改善偏转像质,扫描电压采用正负对称接法. 电子束到达最佳像面的物理时间分辨为 $\tau_{\text{物理}}=272.6\ \text{fs}$,如果扫描速度可以达到 $3 \times 10^8\ \text{m/s}$,则在荧光屏上宽度为 $90\ \mu\text{m}$ 的条纹所对应的技术时间分辨率 $\tau_{\text{技术}}=300\ \text{fs}$, 则变相管的总的的时间分辨率: $\tau = \sqrt{\tau_{\text{物理}}^2 + \tau_{\text{技术}}^2} \approx 405\ \text{fs}$,这种估计是比较保守的一种估计方法. 如果狭缝的像能落在靠近荧光屏中心位置,偏转板的“散焦作用”相对弱一些,阴极上宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 的条纹在荧光屏上的条纹像越窄,对应的技术时间分辨率会更高一些. 表2说明了这一点:距离荧光屏中心越近,电子经过偏转板受到边缘场作用越弱,电子受到偏转场的作用几乎是一致的,狭缝像的宽度几乎保持在 $70\ \mu\text{m}$ 左右. 如果采用滨松公司的计算方法^[16],阴极上宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 的狭缝在荧光屏边缘的像宽为 $30\ \mu\text{m}$,对应的技术时间分辨能力为 $\tau_{\text{技术}} =$

100 fs, 总的时间分辨能力就是 290.4 fs. 另外, 为了提高荧光屏上图像的对比度, 必须在栅极后面放置一个二次电子陷阱, 使二次电子不能到达荧光屏, 以降低变相管的噪音, 也会提高变相管的空间分辨率. 二次电子陷阱可以由放置在栅网后面的另一个栅网构成, 电压比栅极电压低 100~200 V 就可以了.

3 结论

设计了一种高时间、空间分辨能力的飞秒条纹相机, 在没有考虑空间电荷效应的情况下, 变相管最保守的时间分辨能力的估算值为 405 fs, 考虑到空间电荷效应的不可避免性以及工艺过程中的对准误差, 可望研发出时间分辨能力在 500 fs 的条纹相机. 不过在工艺上采取一些切实可行的办法, 有望进一步提高该条纹相机的时间分辨能力, 比如改进工艺条件, 提高阴极和栅极之间的电场强度、在偏转板前设置狭缝以及让条纹像尽量落在荧光屏中心附近等, 都是提高变相管时间分辨能力的好办法.

参考文献

- 1 Losovoi V, Ushkov I, Prokhorenko E, *et al.* 200 femtosecond streak camera (development and dynamic measurements). *Proc of SPIE*, 2002, **4948**: 297~304
- 2 Shakya M M, Chang Z H. An accumulative x-ray streak camera with 280fs resolution. *Proc of SPIE*, 2004, **5534**: 125~131
- 3 Drabbels M, Lankhuijzen G M, Noordam L D. Demonstration of a far-infrared streak camera. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(11): 2138~2144
- 4 Kravchenko A G, Litvin D N, Lazarchuk V P, *et al.* An ion streak camera. *Pribory Tekhnika Eksperimenta*, 2004, (2): 25~31
- 5 Kravchenko A G, Litvin D N, Lazarchuk V P, *et al.* A streak-camera neutron monitor. *Pribory Tekhnika Eksperimenta*, 2004, (2): 11~14
- 6 Lebedev V B, Feldman G G, Krutik M I, *et al.* Development and testing of subpicosecond streak camera for soft X-ray measurements. *Proc of SPIE*, 1999, **3516** (1): 85~91
- 7 陈敏, 赵宝升, 盛立志, 等. 多狭缝条纹变相管的设计. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1309~1312
Chen M, Zhao B S, Sheng L Z, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1309~1312
- 8 Itatani J, Quere F, Yudin G L, *et al.* Attosecond streak camera. *Phy Rev Lett*, 2002, **88** (17): 173903/1~173903/4
- 9 Howorth J R, Phillips I, Monastyrski M, *et al.* Anisotropic focus streak tubes. *Proc of SPIE*, 2002, **4948**: 311~317
- 10 Kolomiysky A N, Feldman G G, Kryzhko V V. Testing of streak camera with large area photocathode. *Proc of SPIE*, 1999, **3516**: 9~15
- 11 Aleksandrov A V, Dikansky N S, Guidi V, *et al.* Performance of a radio-frequency-based streak camera, Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference, New York: IEEE, Piscataway, USA 1999, **4**: 2948~2950
- 12 Chang Z H, Rundquist A, Zhou J, *et al.* Demonstration of a sub-picosecond x-ray streak camera. *Applied Physics Letters*, 1996, **69**(1): 133~135
- 13 裴鹿成, 张孝泽. 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, 1980. 100~114
Pei L C, Zhang X Z. Monte Carlo Method and the application in the transport of particles. Beijing: Science Press, 1980. 100~114
- 14 郁宏生. 工程电磁场分析与计算方法. 北京: 人民交通出版社, 1997. 216~405
Yu H S. Analysis of Engineering Electronic-magnetic Field & Compute Method. Beijing: People's Traffic Press, 1997. 216~405
- 15 Niu H B, Sibbett W, Baggs M R. Theoretical evaluation of the temporal and spatial resolutions of Photochron streak image tubes. *Rev Sci Instrum*, 1982, **53**(5): 563~569
- 16 Katsuyuki K, Yoshinori I, Yoshitoshi I, *et al.* Femtosecond synchroscan streak tube. *Proc of SPIE*, 2001, **4183**: 187~192

Design of a Femto-second Streak Tube

Tian Jinshou, Bai Yonglin, Liu Baiyu, Ouyang Xian, Bai Xiaohong, Yang Wenzheng, Wang Chen
Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068

Received date: 2005-09-01

Abstract A femto-streak image tube has been designed, in which a static electrode was used as the focus lens. The distribution of the initial kinetic energy, the initial azimuth angle, elevation angle and position of the photoelectrons were sampled with Monte Carlo method. The spatial electric field strength was calculated with Finite Difference method, and the trajectories of 3000 photoelectrons were calculated with fourth Runge-Kutta method. After analysis the spatial and temporal distribution of the electrons on the optimum plane, the basic character parameters such as the spatial transfer function and temporal resolution et al of the image tube were provided, the total temporal resolution of the image tube was expected to reach to 290.4 fs.

Keywords Femto-second; Monte carlo simulation; Finite difference; Modulation transfer function; Streak image tube



Tian Jinshou was born in January of 1970. He got his B. S (Physics) degree from Northwest Normal University in 1993 and M. S and Dr. (Physical Electronics) degrees from Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics of CAS in 1999 and 2003 respectively. Now he is a vice researcher in the State Key Laboratory of Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics of CAS. His current research interests are emission display, nanoscience and ultra-fast diagnosis techniques.