

# 类同心球大物面 X 射线条纹管设计

张敬金, 杨勤劳

深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

**摘要** 等离子体诊断由于其持续时间为皮秒量级,故要求在 X 射线条纹相机单次测量过程中尽可能多地获取信息,其中一个有效的途径是增大其成像面积。为了解决大物面成像质量问题,基于二电极同心球静电聚焦系统,设计了一种大物面 X 射线条纹管。通过蒙特卡罗法仿真电子发射和龙格-库塔法追踪电子轨迹,计算得到该管型阴极有效工作面积直径为 50 mm,中心静态极限空间分辨率可达 50 lp/mm,边沿静态极限空间分辨率 31 lp/mm,放大倍率为 1.1,整管长度 600 mm,管径 100 mm。结果显示,该条纹管满足大物面成像的要求,可用于超快事件过程中大量信息的获取。

**关键词** 成像系统; X 射线光学; 条纹管; 静电聚焦; 空间分辨率; 同心球; 大物面

**中图分类号** TN143 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.051101

## Design of Approximate Concentric Sphere Large Format X-Ray Streak Tube

Zhang Jingjin, Yang Qinlao

*Key Laboratory of Optoelectronics Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China*

**Abstract** X-ray streak camera is requested to obtain as much information as possible in single measurement because of the picoseconds duration in plasmas diagnosis. An effective method is to enlarge the imaging area. An X-ray streak tube is designed based on the electrostatic focusing system of bi-electrode concentric sphere to solve the problem of imaging quality for large format. Through simulation of the electrons emission by Monte Carol methods and tracing the electron trajectories by Runge-Kutta, the calculation shows that the effective working area of photocathode is 50 mm, central static limit spatial resolution is 50 lp/mm, edge static limit spatial resolution is 31 lp/mm, the magnification is 1.1, the length is 600 mm, and the diameter is 100 mm. The results show that it can satisfy the requirement of large format imaging and can be applied in the process of ultrafast event to obtain lots of information.

**Key words** imaging systems; X-ray optics; streak tube; electrostatic focusing; spatial resolution; concentric sphere; large format

**OCIS codes** 110.7440; 340.7440; 350.5730; 040.1490

## 1 引言

条纹相机是一种高灵敏度、高时空分辨的诊断工具,作为 X 射线超快诊断中不可或缺的重要组成部分,在过去几十年里得到飞速发展<sup>[1-10]</sup>。由于其不仅能提供被测对象空间分辨的图像,同时还可以提供其随时间运动变化的信息,故主要应用于事件持续时间极短的领域内<sup>[11-13]</sup>,如等离子体的诊断测量中。在这些事件的测量过程中,由于其持续时间的限制,需要条纹相机在单次测量中尽可能多地获取空间信息。解决这个问题的途径主要有两种,一种是在现有条纹相机的核心部件变像管电子光学结构上进行优化,提高整个阴极面

**收稿日期:** 2016-12-06; **收到修改稿日期:** 2017-01-24

**基金项目:** 国家重大仪器设备开发专项(2014YQ230659)

**作者简介:** 张敬金(1986—),男,博士研究生,主要从事变像管电子光学设计方面的研究。E-mail: guangdongzjj@163.com

**导师简介:** 杨勤劳(1953—),男,研究员,博士生导师,主要从事超快诊断方面的研究。

E-mail: qlyang@szu.edu.cn(通信联系人)

所能测量的整体分辨率<sup>[14]</sup>;另外一种则是采用大阴极面<sup>[15]</sup>,此种方法涉及到新管型结构的设计。

谢曼<sup>[16]</sup>曾经证明在非相对论情况下,按照同一比例将电场强度、电极的参数(包括间距或者尺寸)以及电压三者分别(或者同时)放大  $K$  倍,同时使单位电荷的初动能也进行同样的改变,则电子轨迹是保持不变的,也就是说可以将现有管型结构放大  $K$  倍来实现大物面成像。然而,应用此种方法得到的管型结构并没有改善成像质量,原有管型所存在的问题(像差)也跟着遗传下来。一般情况下,在获得大物面的信息时亦同样要保证成像质量。因此,有必要重新设计一种适用于大物面成像的条纹管。两电极同心球静电聚焦系统<sup>[17]</sup>由于其结构的特殊性,使得电子光学系统只存在色球差,被广泛应用于像增强器、夜视仪中。本文基于二电极同心球静电聚焦系统,设计了一种适用于大物面成像的条纹管。

## 2 设计原理

周立伟院士在其论著<sup>[17]</sup>中曾给出两电极同心球静电聚焦系统的解析表达式:

$$\phi_{\rho c} = \frac{\phi_{ac}}{(n-1)} \left( \frac{R_c}{\rho} - 1 \right), \quad (1)$$

式中  $\phi_{\rho c}$  为极坐标下  $\rho$  处与阴极之间的电势差,  $\phi_{ac}$  为阳极和阴极的电势差,  $R_c$  为阴极的曲率半径。  $R_a$  为阳极曲率半径,并且满足  $n = R_c/R_a$ 。

转换到圆柱坐标系,并且只考虑子午面上的情况( $\theta=0$ ), (1)式可变换为:

$$\phi(z) = \frac{\phi_{ac}}{(n-1)} \frac{z}{R_c - z}. \quad (2)$$

由谢尔赤级数<sup>[18]</sup>展开式可知,电子在静电场中所受的作用力为:

$$F_r = -e \frac{\phi_{ac}}{(n-1)} \frac{R_c}{(R_c - z)^3} r, \quad (3)$$

$$F_z = e \frac{\phi_{ac}}{(n-1)} \frac{R_c}{(R_c - z)^2}, \quad (4)$$

式中  $e$  为电子电量,由于  $0 \leq z \leq R_c - R_a$  可知  $(R_c - z)$  恒大于 0,表明两电极同心球静电聚焦系统中电子是全程会聚和加速的,因此可根据此性质来设计一种满足大物面成像的类同心球静电聚焦系统。

## 3 电子光学模型

尽管由于 X 射线的超强穿透性使得条纹管的阴极必须为平面,只要其电位的等势线分布与理想同心球系统类似,仍可通过调整电极构造来实现类同心球结构。图 1 所示为大物面 X 射线条纹管模型。

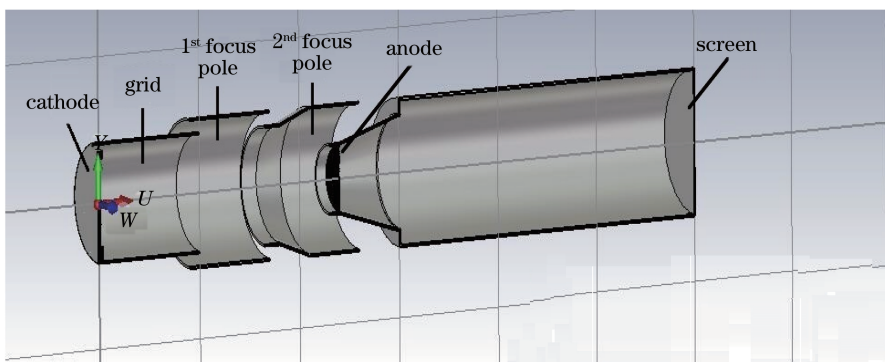


图 1 大物面 X 射线条纹管模型

Fig. 1 Model of large format X-ray streak tube

表 1 给出了此模型结构的参数。图 2 所示的是此模型轴上电位分布、一阶导数及二阶导数。由图 2 可知,一阶导数满足(4)式。尽管在阳极光阑附近的二阶导数小于 0,使得电子束发散,但由于电子束在此位置附近已经被加速到总压(25 kV)大小,所以发散作用对电子束的影响不是很大。因此可认为此管型的场分

布与同心球系统类似,这也可由图 3 的等势线分布得到验证。

表 1 条纹管结构参数

Table 1 Structural parameters of streak tube

Tube length	Diameter	Cathode length	Anode voltage	Magnify
600 mm	100 mm	50 mm	25 kV	-1.1

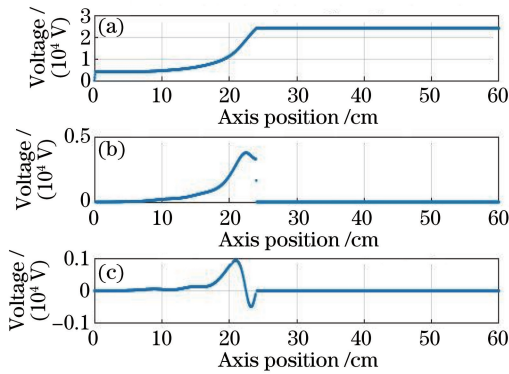


图 2 (a)轴上电位分布;(b)一阶导数;(c)二阶导数

Fig. 2 (a) Axis-voltage distribution; (b) first derivative;  
(c) second derivate

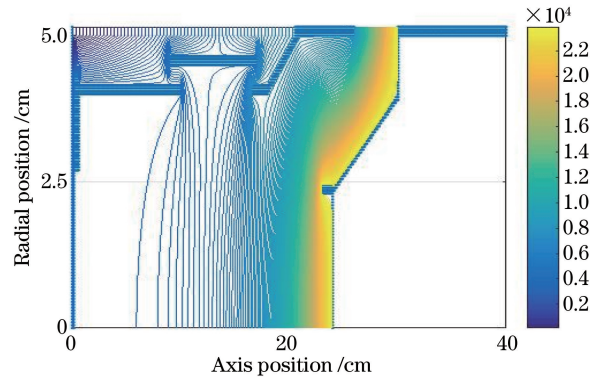


图 3 电位等势线分布

Fig. 3 Contour of voltage distribution

## 4 电子轨迹

管型内部空间电位分布的计算采用的是有限差分法(FDM),电子发射的初始参数采用蒙特卡罗(MC)方法进行抽样,生成的角度服从朗伯余弦分布,能量服从麦克斯韦分布(采用的是金阴极,因此最可能能量取 0.5 eV);电子轨迹的计算采用经典四阶龙格-库塔法。图 4 为蒙特卡罗方法抽样的角度分布和能量分布结果。

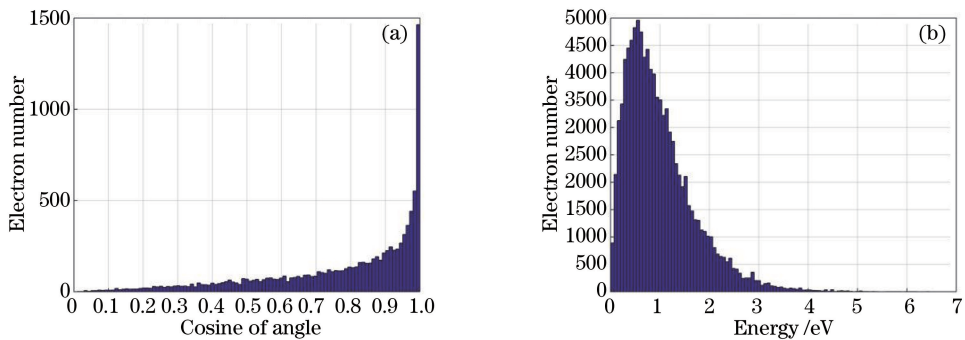


图 4 蒙特卡罗抽样结果。(a)角度分布;(b)能量分布

Fig. 4 MC sampling results. (a) Angle distribution; (b) energy distribution

图 5 为离轴 0.1 mm 和离轴 25 mm 发射的电子轨迹(取 0.1 mm 是为了查看离轴附近的放大倍率)。通过追踪电子轨迹后发现此模型的最佳像面位于离阴极 598 mm 处,其放大倍率为 -1.1。表 2 是不同离轴高度发射的电子束在 598 mm 像面上弥散斑的半峰全宽(FWHM),每个高度发射条件设置均为:离轴高度附近空间分布 FWHM 为 20  $\mu\text{m}$ ,初始脉冲 FWHM 为 15 ps,总共 1500 个电子(对应电流密度为 0.637 A/cm<sup>2</sup>)。

表 2 在 598 mm 像面上电子束弥散斑 FWHM

Table 2 FWHM of electron dispersion spot on image plane at 598 mm

Off-axis distance /mm	0.1	5	10	15	20	25
FWHM / $\mu\text{m}$	22	28	30	34	35	36

图 6 为不同离轴高度电子束于 598 mm 像面上弥散斑的分布情况。Csorba<sup>[19-20]</sup>曾提出可用一个简化的指数函数公式来描述成像系统的调制传递函数(MTF)曲线;周立伟院士课题组<sup>[21-23]</sup>也曾证明该公式的有效性:

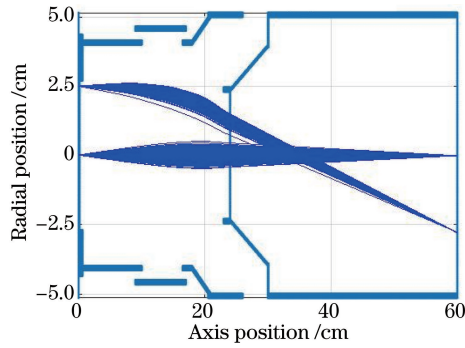


图 5 离轴 0.1 mm 和离轴 25 mm 发射电子轨迹

Fig. 5 Electron trajectory of off-axis 0.1 mm and off-axis 25 mm

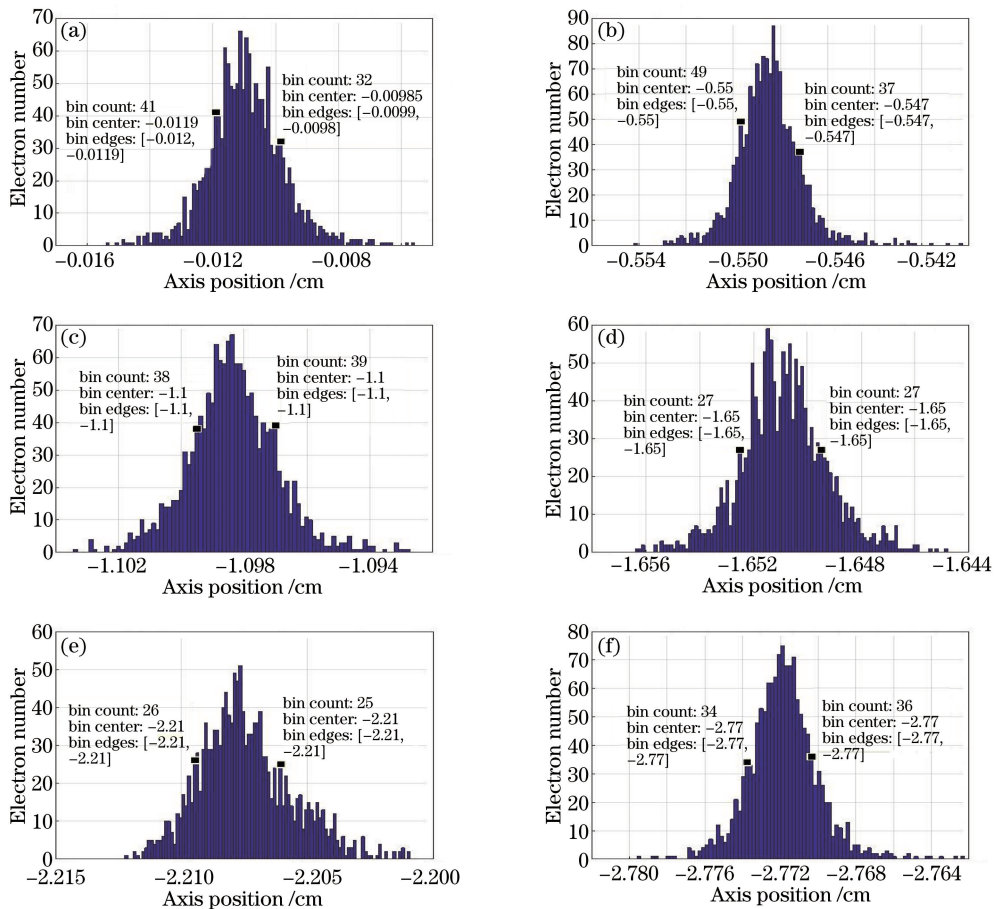


图 6 不同离轴高度电子束于 598 mm 像面上的弥散斑分布。

(a) 0.1 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) 15 mm; (e) 20 mm; (f) 25 mm

Fig. 6 Distribution of electron dispersion spots on image plane at 598 mm of different off-axis distances.

(a) 0.1 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm; (d) 15 mm; (e) 20 mm; (f) 25 mm

$$M(f) = \exp[-(\pi r f)^2], \quad (5)$$

式中  $r$  为图 6 中电子轨迹弥散斑 FWHM 大小的二分之一, 单位为 mm;  $f$  为不同对比度情况下对应的空间分辨率, 单位为 lp/mm。

由表 2 和图 6 可得到不同离轴高度发射电子束在像面处的弥散斑 FWHM, 再根据(5)式可计算出其在各自不同调制度下对应的分辨率, 也就是 MTF, 如图 7 所示。在实际测试空间分辨率时, 通常采用的方法是在阴极上不同离轴高度处制作具有不同间距的分辨线对数(对应一定空间分辨率), 然后通过条纹管对其成像, 一旦在像面处测得在该分辨率的图像调制度, 则从图 7 的 MTF 曲线图即可查出其最高分辨率(极限分辨率)。

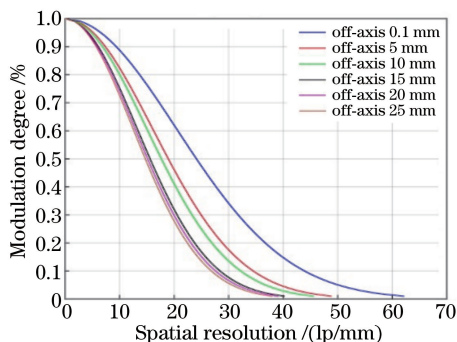


图 7 大物面 X 射线条纹管 MTF 曲线图

Fig. 7 MTF curves of large format X-ray streak tube

考察成像系统的成像特性,可取调制度为 5% 时对应的分辨率为极限分辨率。为此从图 7 中可得到不同离轴高度(0.1~25 mm)电子束对应的极限分辨率分别为:50 lp/mm,39 lp/mm,37 lp/mm,32 lp/mm,31 lp/mm,31 lp/mm。

## 5 结 论

以两电极同心球静电聚焦系统为基础,根据其电位分布特性,设计了一种大物面 X 射线条纹管结构,此模型从结构上与理想同心球系统类似。通过模拟计算可知其有效阴极长度可达 50 mm,中心静态极限空间分辨率可达 50 lp/mm,边沿静态极限空间分辨率可达 31 lp/mm,放大倍率为 1.1,电子束在聚焦区的渡越时间约为 5.4 ns,渡越时间弥散约为 17.2 ps。但是只从成像质量评估设计模型,未详细考究其时间特性,在后续的工作中将从理论上分析其时间分辨情况,同时亦将进行实验验证。

## 参 考 文 献

- [1] Zhu Min, Tian Jinshou, Wen Wenlong, *et al.* Research on large dynamic range streak camera based on electron-bombarded CCD[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(9): 098501.  
朱 敏, 田进寿, 温文龙, 等. 基于电子轰击式 CCD 的大动态条纹相机研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(9): 098501.
- [2] Liao Hua, Yang Qinlao. Novel X-ray streak camera with large dynamic range dedicated to initial confinement fusion facility[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(2): 250-254.  
廖 华, 杨勤劳. 神光 III 主机大动态范围 X 射线扫描相机研制[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, 35(2): 250-254.
- [3] Liao Hua, Yang Qinlao. Development of a self targeting X-ray streak camera of Shenguang-III prototype facility[J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2014, 31(6): 614-617.  
廖 华, 杨勤劳. 神光 III 原型装置自瞄准 X 射线扫描相机研制[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2014, 31(6): 614-617.
- [4] Pan Jingsheng, Qi Lu, Xiao Hongliang, *et al.* Influence analysis of saturation effect of micro channel plate on dynamic range of streak cameras[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(19): 194211.  
潘京生, 亓 鲁, 肖洪亮, 等. 微通道板的饱和效应对条纹相机动态范围的影响分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(19): 194211.
- [5] Zeng Peng, Yuan Zheng, Deng Bo, *et al.* Spectral response calibration of Au and CsI transmission photocathodes of X-ray streak camera in a 60-5500 eV photon energy region[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 155209.  
曾 鹏, 袁 铮, 邓 博, 等. 软 X 射线条纹相机透射式 Au 与 CsI 阴极谱响应灵敏度标定[J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 155209.
- [6] Bai Xin, Niu Hanben, Yang Qinlao, *et al.* Large dynamic range femtosecond soft X-ray streak image tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(10): 2683-2686.  
柏 鑫, 牛憨笨, 杨勤劳, 等. 大动态范围软 X 射线飞秒变像管[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(10): 2683-2686.
- [7] Millecchia M, Regan S P, Bahr R E, *et al.* Streaked X-ray spectrometer having a discrete selection of Bragg geometries for Omega[J]. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83(10): 10E107.
- [8] Kimbrough J R, Bell P M, Bradley D K, *et al.* Standard design for National Ignition Facility X-ray streak and framing

- cameras[J]. Rev Sci Instrum, 2010, 81(10): 10E530.
- [9] Opachich Y P, Kalantar D H, MacPhee A G, *et al.* High performance imaging streak camera for the National Ignition Facility[J]. Rev Sci Instrum, 2012, 83(12): 125105.
- [10] Guo Lehui, Tian Jinshou, Lu Yu. Optimization of the 3-inch photomultiplier tube for the neutrino detection[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(22): 228501.  
郭乐慧, 田进寿, 卢裕, 等. 一种用于中微子探测的 3-inch 光电倍增管的优化设计[J]. 物理学报, 2016, 65(22): 228501.
- [11] Dong Zhiwei, Zhang Ruihuan, Zhang Weibin, *et al.* Noise features in streak tube lidar echo signal[J]. Acta Optical Sinica, 2016, 36(9): 098001.  
董志伟, 张瑞环, 张伟斌, 等. 条纹管激光雷达回波噪声特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 098001.
- [12] Hui Dandan, Tian Jinshou, Lu Yu, *et al.* Streak tube with large work area and small size used in lidar detection system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1232001.  
惠丹丹, 田进寿, 卢裕, 等. 用于激光雷达的大探测面积超小型条纹管[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1232001.
- [13] Bai Yanli, Long Jinghua, Cai Houzhi, *et al.* Influence of double magnetic lenses on performance of pulse-dilation framing tube[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 248-252.  
白雁力, 龙井华, 蔡厚智, 等. 双磁透镜对时间展宽分幅变像管性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 248-252.
- [14] Hui Dandan, Tian Jinshou, Wang Junfeng, *et al.* Dynamic properties of a small-size streak tube[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1): 018502.  
惠丹丹, 田进寿, 王俊锋, 等. 超小型条纹管的动态特性研究[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 018502.
- [15] Sun K X, William N, Perry T, *et al.* A second-generation X-ray streak camera with true large format, high dynamic range, and high reliability[C]. SPIE, 2005, 5920: 592008.
- [16] 谢曼. 电子光学理论基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1958: 69-75.
- [17] Zhou Liwei. Electron optics with wide beam focusing[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 105-157.  
周立伟. 宽束电子光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 105-157.
- [18] Du Bingchu, Wang Jianru. Electron optics[M]. Beijing: TsingHua University Press, 2002: 73-75.  
杜秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 73-75.
- [19] Csorba I P. Image tubes[M]. New York: MacMillan Publishers, 1985.
- [20] Csorba I P. Modulation transfer function of image tube lenses[J]. Appl Opt, 1977, 16(10): 2647-2650.
- [21] Ai Kecon, Ximen Jiye, Zhou Liwei. Relativistic aberration theory for a combined electromagnetic focusing-deflection system possessing a spherical cathode lens[J]. Acta Physica Sinica, 1986, 35(9): 1210-1222.  
艾克聪, 西门纪业, 周立伟. 电磁复合聚焦-偏转球面阴极透镜的相对论象差理论[J]. 物理学报, 1986, 35(9): 1210-1222.
- [22] Ai K C, Ximen J Y, Zhou L W, *et al.* Aberration theory for angularly and transversely large beams in electromagnetic focusing system with curved axes[J]. Chinese Journal of Electronics, 1991, 1(1): 1-7.
- [23] Ai K C, Zhou L W, Ximen J Y. On the aberration theory for wide and narrow electron beams in a combined electromagnetic focusing system possessing a spherical cathode[J]. Optik, 1987, 75(3): 101-108.