

X 射线脉冲星导航系统模拟光源的研究*

盛立志^{1)2)†} 赵宝升¹⁾ 吴建军³⁾ 周峰¹⁾ 宋娟¹⁾²⁾ 刘永安¹⁾
申景诗⁴⁾ 鄢秋荣¹⁾ 邓宁勤¹⁾²⁾ 胡慧君⁴⁾

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, 西安 710119)

2) (中国科学院大学, 北京 100039)

3) (无锡商业职业技术学院, 无锡 214153)

4) (山东航天电子技术研究所, 烟台 264670)

(2012年11月22日收到; 2013年2月25日收到修改稿)

介绍了 X 射线脉冲星导航地面模拟光源研究的必要性及非伺服的机械调制方法所存在的问题和缺陷, 提出了基于栅控 X 射线球管的 X 射线脉冲星辐射脉冲模拟方法, 通过电子光学设计计算, 对栅控 X 射线管的电极结构进行设计优化, 研制了栅控 X 射线管和脉冲星模拟光源装置. 实验测试了栅控球管的性能, 测试结果与理论计算结果基本相符, 实现了对 X 射线的调制; 通过基于 FPGA 的直接数字频率合成方法, 产生脉冲星的任意形状脉冲轮廓电压信号, 加载至球管控制栅极, 并对其出射脉冲轮廓进行测试, 结果表明产生的 X 射线脉冲轮廓逼真程度在 95% 以上, 模拟源频率稳定度约为 2×10^{-11} .

关键词: 脉冲星导航, X 射线球管, 栅极控制

PACS: 97.60.Gb, 07.85.Fv, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.62.129702

1 引言

X 射线脉冲星导航利用毫秒脉冲星极其稳定的辐射周期特性, 能够为近地轨道、深空和星际空间飞行器提供位置、速度、时间和姿态等丰富的导航信息, 是一种完全自主的导航系统, 具有广阔的应用前景: 可作为独立的导航系统为航天器提供导航服务; 可作为现有卫星导航系统的备份, 提高导航的安全性和可靠性等. 目前, 美国、俄罗斯和欧洲空间局正在大力研究利用脉冲星实现空间飞行器自主导航定位的新技术和新方法^[1-4].

在进行 X 射线脉冲星导航空间搭载试验和未来脉冲星导航系统应用之前, 为了研究 X 射线脉冲星导航的相关关键技术, 如空间 X 射线探测器的标定、脉冲相位的测量、脉冲到达时间 TOA (timing of arrival) 的确定、导航算法的验证等, 必须构建 X 射线脉冲星地面模拟光源, 在实验室模拟真实脉冲

星所辐射的 X 射线特征. 中国科学院西安光学精密机械研究所、国防科技大学等单位采用非伺服的机械调制方法进行了相关的实验研究^[5,6]. X 射线管产生的连续 X 射线辐射, 经刻制脉冲轮廓图案的调制盘使其转变为脉冲射线. 非伺服的机械调制方法缺点是难以保证输出脉冲频率稳定度, 如斩波器频率精度为 ± 25 ppm ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$), 相位抖动为 0.1%. 而且这种方法无法实现由于星际传输、航天器轨道姿态等变化而引起的脉冲周期变化或者轮廓畸变等特殊情况的实时模拟. 因此, 需要进一步研究可以实时控制产生任意形状脉冲轮廓的 X 射线产生方法和装置.

本文提出一种栅控 X 射线球管的 X 射线脉冲产生方法, 研究基于栅控 X 射线球管的任意脉冲轮廓的 X 射线产生, 报道了该系统的实验结果. 该系统可以为 X 射线探测器的测试和脉冲星导航地面模拟实验提供光源.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11103069) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: Lizhi.sheng@opt.ac.cn

2 X 射线脉冲星模拟源组成及其工作原理

本文提出一种新的 X 射线内调制方案: 即栅控 X 射线管调制. 该方法是通过改变 X 射线管内轰击到金属靶的电子数来改变出射 X 射线强度. 在传统的阴极、阳极 X 射线管的基础上, 增加调制栅极和电子聚焦极, 使得从阴极发出的电子在调制栅极和聚焦极的作用下运行轨迹发生变化, 部分电子被截获, 从而改变轰击金属靶的电子数目. 将脉冲星轮

廓数据转换成电控制信号加载到控制栅极上, 通过栅极电压的改变来实现对轰击金属靶电子数目的脉冲调制, 从而实现 X 射线强度随时间的控制.

本系统采用栅控 X 射线管作为 X 射线脉冲星模拟光源的发生装置, 包括任意信号发生器、栅控 X 射线球管电源系统和栅控 X 射线球管, 如图 1 所示. 其中, 任意信号发生器包括时钟系统、存储系统和控制系统; 栅控 X 射线球管电源系统由灯丝电源、栅极电源和聚焦极、阳极高压电源组成.

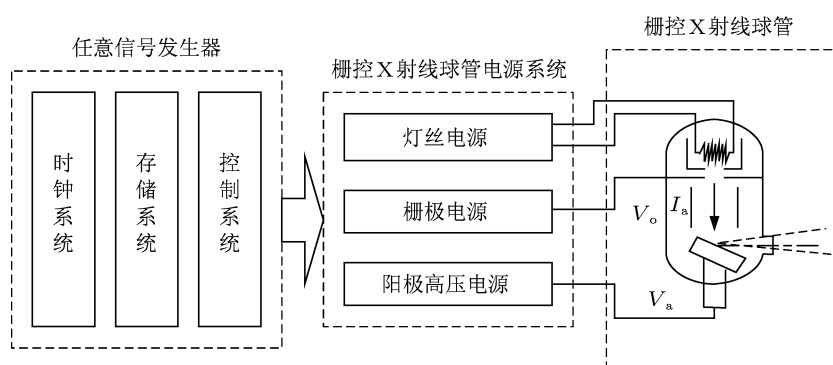


图 1 栅控 X 射线球管脉冲星模拟源系统组成

3 栅控 X 射线球管设计及实验

栅控 X 射线球管如图 2 所示, 调制栅极正对着阴极电子出口. 聚焦极位于栅极和阳极靶之间, 实现电子聚焦作用, 控制电子束斑的尺寸, 使电子的时间弥散减小, 以提高出射射线的稳定性. 在栅极加上调制电压后, 栅极可以对电子的数目进行控制, 调制后的电子束在阳极高压 V_a 的加速下, 轰击阳极从而产生与栅极调制电压 V_g 时间特性一致的脉冲 X 射线, X 射线功率和栅极电压 V_g 遵守 Child-Langmuir 定律 [7,8]:

$$P = V_a \cdot I_a = k \cdot V_a \cdot V_g^{3/2}, \quad (1)$$

式中比例系数 k 是与各电极设计参数相关的系数, 阳极电压 V_a 决定 X 射线光子的能量.

通过对栅控 X 射线管的电子光学设计和电子轨迹的模拟, 包括电子发射过程的抽样, 电子枪内电场的计算, 电子轨迹的追踪, 电子束飞行时间、空间位置以及角度等的分布计算, 优化栅控 X 射线管的电极结构和尺寸, 减小电子在阴极到阳极靶的时间弥散, 提高栅控 X 射线管的时间稳定性. 采用同轴的圆柱型电容器电极结构, 求解拉普拉斯方程, 如 (2) 式, 用有限个网格节点的电位值的变化来代

替拉普拉斯方程中电位的连续变化, 用超松弛迭代求解各节点的电场, 任意一点的电场由周围的电场插值获得 [9].

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\beta \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0, \quad (2)$$

其中, $\beta = r$ 为旋转对称场, $\beta = 1$ 为平面场, 本系统中采用旋转对称场; $V(r, z)$ 表示子午面上任意点的电位分布.

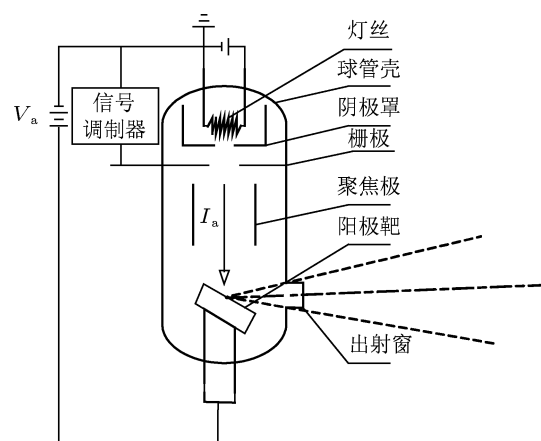


图 2 栅控 X 射线球管结构示意图

在旋转对称的静电场中电子运动方程为^[9]

$$\begin{cases} \frac{d^2z}{dt^2} = \eta \frac{\partial V}{\partial z} = f[z(t), r(t)] \\ \frac{d^2r}{dt^2} = \eta \frac{\partial V}{\partial r} = g[z(t), r(t)] \end{cases}, \quad (3)$$

初始条件为

$$\begin{cases} z|_{t=0} = z_0, & r|_{t=0} = r_0, \\ \frac{dz}{dt}|_{t=0} = \dot{z}_0, & \frac{dr}{dt}|_{t=0} = \dot{r}_0, \end{cases} \quad (4)$$

其中, $z(t), r(t)$ 为电子运动位置的解析表达式, η 为电子的荷质比. 采用同步长的龙格-库塔法解电子轨迹方程, 求出整条电子运动轨迹.

依据上述公式, 求解电子光学系统电场分布和电子束轨迹的边界条件如图 3 所示球管电极尺寸, 其中阴极灯丝 2.8 V, 阳极 10 kV, 栅极 (0, -10 V), 聚焦极 300 V. 计算初始条件为电子的初速度服从麦克斯韦-玻尔兹曼分布, 初始位置为平面发射源 $z_0 = 0$. 图 3 所示为栅极电压为 0 V, 阳极电压 10 kV 时的电子束轨迹, 共 9 个特征电子, 电子发射角度从 -20° — $+20^\circ$, 每次递增 5° . 计算得到, 电子在阳极面上的束斑直径为 0.23 mm, 栅极电压为 0 V 时所有电子都可以通过栅极到达阳极金属靶.

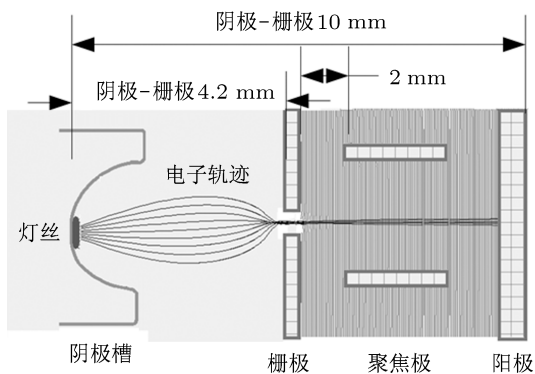


图 3 栅极零电位时的电子束轨迹

当栅极电压为 -1 V, 阳极电压仍为 10 kV 时, 由于栅极电场的影响, 部分电子开始被截获, 截获的电子返回阴极槽零电位处, 电子在阳极面上的束斑直径为 0.27 mm, 其电子束轨迹如图 4 所示.

当栅极电压为 -3 V, 阳极仍为 10 kV 时, 计算了 10000 个电子, 电子初角度采用 β 分布. 从图 5 可以看出, 所有电子均被栅极电场截获, 没有电子从栅极出射到达阳极靶面.

利用电子光学模拟计算了栅极电压 V_g 和阳极收集电子数的关系, V_g 在 (0, -10 V) 范围, 阳极高压

V_a 为 10 kV. 模拟了 3000 个电子, 电子的初动能采用 β 分布, 位置服从 Gaussian 分布. 由图 6 可见当 V_g 在 (-10 V, 0) 变化时阳极收集电子数的变化. 计算结果表明了栅极电压 V_g 对阳极电流 I_a 的可控性, 对测试数据点进行拟合可得通过栅极的电子数与栅极电压 V_g 成 1.808 次方关系, 原因是通过栅极的电子数与电子光学计算时发射面的面积有关, 计算时采用的是平面发射源, 如图 3.

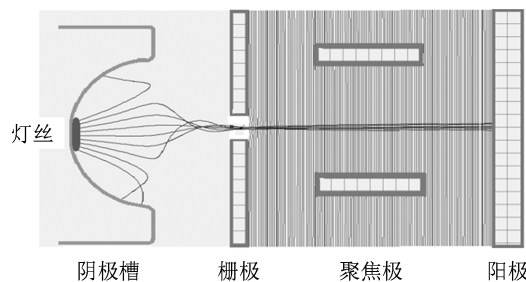


图 4 栅极 -1 V, 部分电子被截获时的电子轨迹

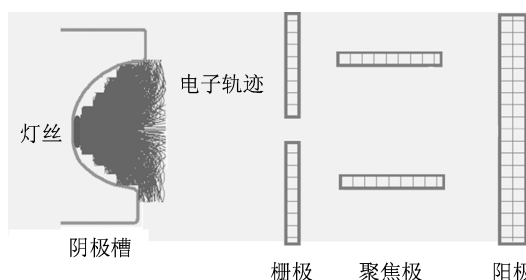


图 5 栅极 -3 V, 所有电子均被截获的电子轨迹

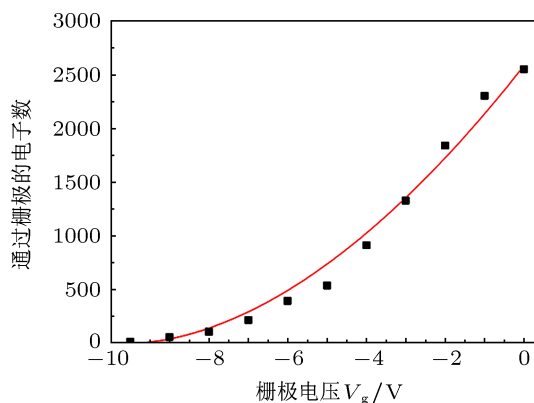


图 6 通过栅极的电子数与栅极电压 V_g 的关系 ($V_a = 10$ kV)

依据电子光学设计计算的各电极结构参数, 将热阴极、栅极、聚焦极和阳极通过电极装配、高频封接、烘烤排气等工艺后制作成玻璃输出窗的栅控 X 射线球管. 对所研制的球管性能进行了测试, 使用基于微通道板 MCP (micro-channel plate) 的

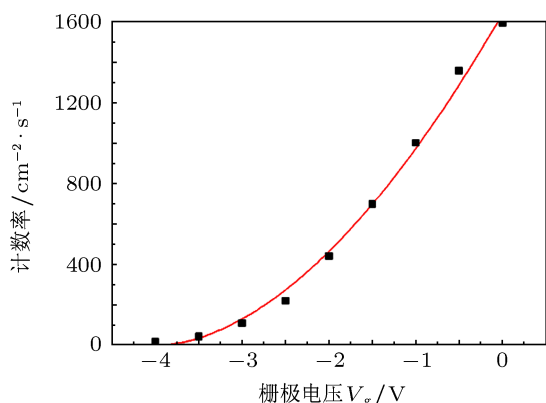


图7 探测器测试的 X 射线光子计数率与栅极电压 V_g 的关系

X 射线探测器进行光子计数测量, MCP 探测器的详细介绍参见文献 [10—12], 测试结果如图 7. 随着栅极电压的反向增大, 探测到的 X 射线光子计数率减小. 通过对比测试实验结果图 7 和理论计算结果图 6 可以看出, 测试计数率与栅极电压 V_g 成 1.818 次

方关系, 所研制的栅控 X 射线球管实验结果与理论计算结果趋势基本相符, 表明利用该球管可以通过改变栅极电压实现 X 射线强度的调制, 在栅极电压 -4 V 时可以将 X 射线截止. 理论计算的 -10 V 截止电压与实验测试的 -4 V 截止电压差距产生的原因是: 理论计算是轰击阳极的电子的截止, 而电子束轰击阳极产生 X 射线光子的效率非常低, 通常只有 1% 左右, 因此在 $(-10\text{ V}, -4\text{ V})$ 区间内尽管仍有电子轰击阳极, 但其功率已经无法产生 X 射线.

4 X 射线脉冲星模拟源实验

依据如图 1 所示的 X 射线脉冲星模拟源系统, 采用上述栅控 X 射线球管, 任意脉冲星轮廓信号调制模块采用直接数字频率合成技术并基于 FPGA 进行设计, 模块总体框图如图 8 所示.

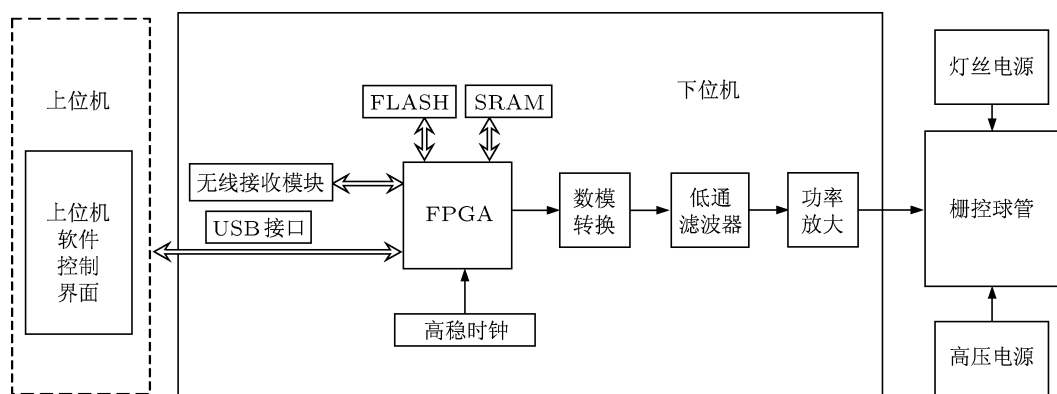


图8 任意脉冲星轮廓产生模块框图

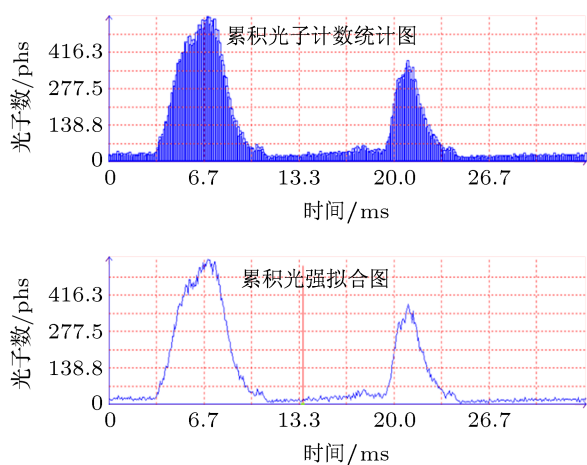


图9 Crab 脉冲星模拟光源采集实验结果

选择 Crab 脉冲星的轮廓数据, 将任意脉冲星轮廓产生模块产生的电信号作为栅控 X 射线球管

的栅极电压, 利用 MCP 探测器及其读出电子学对 X 射线管发出的 X 射线光子进行探测, 实验时栅极电压范围为 $(-3\text{ V}, -1\text{ V})$, 阳极高压 10 kV , 观测时间 600 s , 累积探测光子总数 46267 . 依据文献 [5] 中所描述的周期折叠方法, 累积得到的脉冲轮廓如图 9. 图 10 是将 Crab 脉冲星的轮廓数据和图 9 所示探测器测试的累积轮廓数据进行对比, 依据 (5) 式所示相关系数定义, 两个轮廓曲线相关系数为 0.95 , 相关系数绝对值越大, 表明两者相关度越高, 即两轮廓相似度在 95% 以上. 图中原始数据轮廓和累积脉冲轮廓仍有差异, 分析其原因与栅控球管出射射线的强度随栅极电压变化曲线图 7 相关. 脉冲星模拟实验时栅极加载的电压是将原始轮廓的数据按照图 7 所示的拟合曲线进行相应转换, 而从图上可

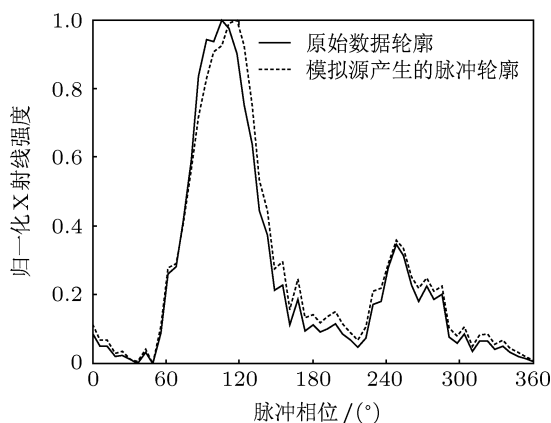


图 10 采集实验结果与 Crab 脉冲星的轮廓数据对比

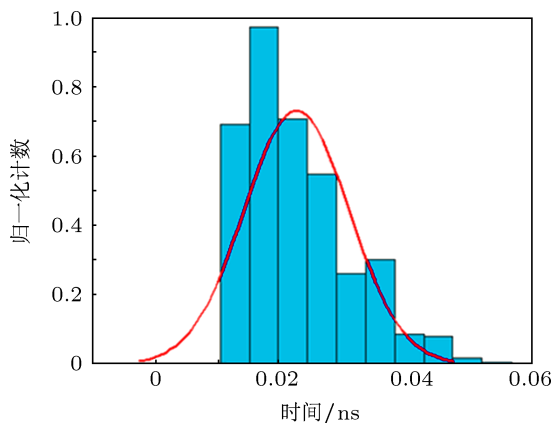


图 11 脉冲星模拟源的频率稳定度测试结果

以看出部分实测数据与拟合曲线存在差异, 导致轮廓加载后的累积脉冲测试结果与原始数据有差异. 使用 XHTF3316 型 GPS 铷原子频标的 10 MHz 时钟基准, 其输出频率稳定度优于 $8 \times 10^{-13}/100 \text{ s}$, 利用该时钟基准作为参考频标, 对所研制的 X 射线脉冲星模拟源的频率稳定度进行测试, 测试时间 600 s, 结果如图 11 所示, 频率稳定度约为 2×10^{-11} .

$$\begin{aligned} \rho_{XY} &= \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}} \\ &= \frac{E((X - EX)(Y - EY))}{\sqrt{D(X)}\sqrt{D(Y)}}. \end{aligned} \quad (5)$$

5 结论

提出了栅极控制 X 射线球管的 X 射线脉冲星模拟光源系统, 对栅控 X 射线球管进行电子光学设计, 通过追踪电子的运行轨迹优化设计了栅控 X 射线球管电极结构, 对研制的栅控 X 射线管进行了实验测试, 测试结果与理论计算结果基本相符, 表明栅极电压的改变可以控制 X 射线的强度. 搭建了 X 射线脉冲星模拟光源系统, 并对其出射脉冲轮廓进行测试, 结果表明产生的 X 射线脉冲轮廓逼真程度在 95% 以上, 模拟源频率稳定度约为 2×10^{-11} . 该脉冲星模拟光源的研制对开展 X 射线脉冲星导航地面模拟验证和探测器关键技术攻关具有重要意义.

- [1] Sheikh S I 2005 *Ph. D. Dissertation* (Maryland USA: University of Maryland)
- [2] Shuai P, Li M, Chen S L, Huang Z 2009 *Principle and Method of X ray Pulsar Navigation System* (Beijing: China Astronautic Publishing House) (in Chinese) [帅平, 李明, 陈绍龙, 黄震 2009 X 射线脉冲星导航系统原理与方法 (北京: 中国宇航出版社)]
- [3] Li J X, Ke X Z 2009 *Sci. Sin. G: Physica, Mechanica & Astronomica* **39** 311 (in Chinese) [李建勋, 柯熙政 2009 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学 **39** 311]
- [4] Sheikh S I, Pines D J, Ray P S, Wood K S, Lovellette M N, Wolff M T 2004 *Proceedings of 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference Maui, HI, February 8–12, 2004* p105
- [5] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣 2011 物理学报 **60** 029701]
- [6] Zheng W, Sun S M, Tang G J 2010 *1st China Satellite Navigation Conference Beijing, China, May 18–22, 2010* (in Chinese) [郑伟, 孙守明, 汤国建 2010 第一届中国卫星导航学术年会北京, 2010 5.18—22]
- [7] Langmuir I 1913 *Phys. Rev.* **2** 450
- [8] Langmuir I 1923 *Phys. Rev.* **21** 419
- [9] Hua Z Y, Gu C X 1991 *Electron Optics* (Shanghai: Press of Fudan University) (in Chinese) [华中一, 顾昌芯 1991 电子光学 (上海: 复旦大学出版社)]
- [10] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Sai X F, Yan Q R, Chen B M, Wang P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 019701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 赛小锋, 鄢秋荣, 陈宝梅, 王朋 2012 物理学报 **61** 019701]
- [11] Chen B M, Zhao B S, Hu H J, Yan Q R, Sheng L Z 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 060401
- [12] Sheng L Z, Zhao B S, Hu H J, Wang P, Yan Q R, Chen B M 2011 *Proc. of SPIE* **8196** 81961C

Research of X-ray pulsar navigation simulation source*

Sheng Li-Zhi^{1)2)†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Wu Jian-Jun³⁾ Zhou Feng¹⁾ Song Juan¹⁾²⁾
Liu Yong-An¹⁾ Shen Jing-Shi⁴⁾ Yan Qiu-Rong¹⁾ Deng Ning-Qin¹⁾²⁾
Hu Hui-Jun⁴⁾

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

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

3) (Wuxi Institute of Commerce, Wuxi 214153, China)

4) (Shandong Aerospace Electro-Technology Institute, Yantai 264670, China)

(Received 22 November 2012; revised manuscript received 25 February 2013)

Abstract

As an autonomous navigation method, X-ray pulsar navigation can provide position, timing and attitude information for various spacecrafts. Since the X-rays (1–20 keV) from the pulsar can not penetrate the earth atmosphere, an X-ray source in laboratory needs to be set up to test and calibrate the detector. In this paper an arbitrary X-ray pulse source to simulate the neutron pulsar signal is proposed. The main components of the simulation source are a grid controlled X-ray tube and arbitrary pulse generation electronics. With the arbitrary pulse voltage applied to the tube grid, the X-ray intensity is controlled. Through electron optics design, the tube electrode parameters are optimized. A grid controlled X-ray tube is fabricated and tested. Using a micro-channel plate detector to detect and reconstruct the generated X-ray pulses, the similarity between the accumulated profile and the original pulsar profile is better than 95%. The frequency stability of the pulsar source emulator is about 2×10^{-11} .

Keywords: X-ray pulsar navigation, X-ray tube, grid control

PACS: 97.60.Gb, 07.85.Fv, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.62.129702

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11103069).

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