

基于空间应用的透射式微型微束调制X射线源

牟欢 李保权 曹阳

Transmission-type miniature micro-beam modulated X-ray source based on space application

Mou Huan Li Bao-Quan Cao Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 140703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.140703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.140703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

X射线通信系统的误码率分析

Bit error rate analysis of X-ray communication system

物理学报.2015, 64(12): 120701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120701>

一种设计环形汇聚光栅反射镜的新方法

A new approach to designing circular grating focusing reflector

物理学报.2014, 63(24): 240702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240702>

用于空间X射线通信的栅极控制脉冲发射源研究

Grid-controlled emission source for space X-ray communication

物理学报.2014, 63(16): 160701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.160701>

锥束CT平板探测器成像的余晖建模与校正方法

Image lag modeling and correction method for flat panel detector in cone-beam CT

物理学报.2013, 62(21): 210702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210702>

基于X射线的空间语音通信系统

A space audio communication system based on X-ray

物理学报.2013, 62(6): 060705 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.060705>

基于空间应用的透射式微型微束调制X射线源*

牟欢^{1)2)†} 李保权¹⁾²⁾ 曹阳¹⁾²⁾

1)(中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2016年4月12日收到; 2016年5月4日收到修改稿)

针对空间应用对X射线源的需求, 提出了一种透射式微型微束调制X射线源的设计方案, 建立了调制X射线源的理论模型. 相较传统的X射线源, 增加了栅极电压控制和多个聚焦极微束聚焦功能, 通过改变栅极电压实现X射线的幅度调制和脉冲调制. 利用带电粒子光学仿真软件SIMION, 模拟计算了不同管电压下透射式阳极靶的最佳靶厚, 仿真分析了不同栅极电压对电子束运动轨迹的影响, 最终得到了150 μm 的微束焦斑直径. 完成了原理样机的加工镀膜和真空密封, 搭建了调制X射线源的测试装置, 实验报道了阳极钨靶的谱线特性, 分析了栅极电压影响出射X射线强度的原因, 讨论了栅极幅度调制的可能性, 完成了调制X射线源栅极脉冲调制的验证.

关键词: 微型微束, 透射式, 调制X射线源

PACS: 07.85.Fy, 52.38.Ph, 42.79.Sz, 41.50.+h

DOI: 10.7498/aps.65.140703

1 引言

自1895年德国物理学家伦琴发现X射线, X射线不仅广泛应用于医学诊断和无损检测, 而且在空间中的应用也越来越多, 如黑障通信、星间X射线通信、脉冲星导航、能谱标定、响应时间标定、在轨标定等.

阴极作为产生X射线的关键部件, 主要包括金属热阴极和碳纳米管(carbon nanotube, CNT)阴极. 目前, CNT阴极因其高电子发射率而被广泛应用于X射线管^[1]. 这些X射线管大多采用半真空密封工艺, 即在实际应用中需添加真空泵等真空设备, 较难实现X射线源的小型化. 这是因为CNT阴极在真空度 10^{-5} Pa以上的环境中才能稳定地发射电子^[2-4], 现阶段真空密封工艺较难实现^[5,6]. 而传统的热阴极发射可工作在低于 10^{-3} Pa的真空度条件, 大大降低了真空密封难度. 为实现调制X射线源的微型化, 本设计采用金属热阴极作为阴极. 另外采用热阴极还与所设计的调制X射线源的原

理、尺寸结构、调制频率及功耗等因素有关.

同时, X射线源的焦斑尺寸直接关系到能谱标定、响应时间标定的精度和黑障通信、星间X射线通信的距离. 不管是美国NASA戈达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center)的Jablonski^[7]通过调制发光二极管的方法间接调制X射线信号, 还是文献^[8-10]利用控制栅极控制X射线信号, 均未实现调制X射线管的真空密封和很好的微束聚焦. 为提高标定精度和通信距离, 满足空间应用的多功能需求, 本文详细介绍了一种透射式微型微束调制X射线源的结构和工作原理, 对各个电极的结构尺寸、电压幅值及其间距进行了仿真模拟, 实验验证了栅极幅度调制和栅极脉冲调制的可行性.

2 结构建模与仿真

2.1 理论模型

图1为透射式微型微束调制X射线源的结构示意图, 主要由热阴极、调制栅极、聚焦极1、聚焦极

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项“空间科学背景型号项目”(批准号: XDA04060900)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mouhuan@nssc.ac.cn

2、聚焦极3和透射式阳极靶组成。热阴极产生电子的效率及稳定性将直接影响调制X射线源产生X射线的强度和稳定性,需选取高稳定性、高效能的阴极丝。栅极作为调制X射线源的关键部件,不仅可以充当“开关键”控制热阴极产生的电子束通断,还可以控制流过栅极的电子束强度,实现对X射线的调制。三个聚焦极的主要功能是实现对电子的微束聚焦,在阳极靶上形成微米级焦斑。透射式阳极靶用于产生X射线,其靶材厚度直接影响得到的X射线强度,故阳极靶厚至关重要。

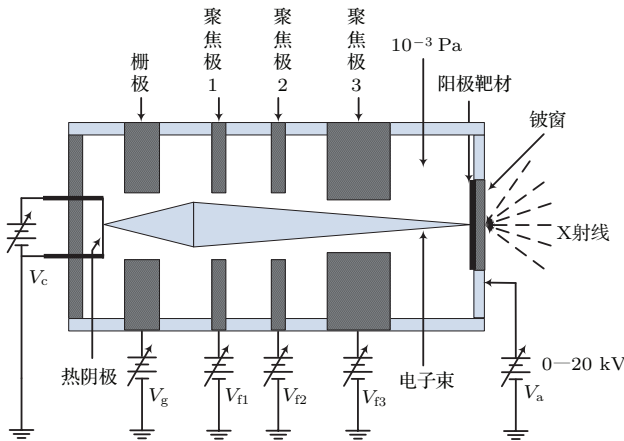


图1 调制X射线源的结构示意图

Fig. 1. The structure diagram of the modulated X-ray source.

调制X射线源的工作原理如下:当栅极电压 V_g 恒定时,金属阴极丝在 V_c 电压下加热到一定温度后发射电子,产生的电子束在栅极电压和阳极高压电场作用下加速运动到阳极,轰击阳极靶发生韧致辐射和特征标识辐射产生恒定强度的X射线。此

过程中,三个聚焦极电压产生的静电场将经过的电子束聚焦。当栅极电压 V_g 变化时,通过栅极的电子束强度和产生的X射线强度相应改变,实现X射线的幅度调制。当栅极作为“开关键”时,通过控制栅极电压 V_g 来调制X射线的通断,实现X射线的脉冲调制:栅极电压 V_g 为高电平时,阴极丝产生的电子束经过三个聚焦极聚焦和阳极电场加速后轰击阳极靶产生X射线;栅极电压 V_g 为低电平时,电子束在栅极被截止,无X射线产生。

2.2 透射式阳极靶厚计算

透射式调制X射线源的阳极由阳极靶材和基底材料构成。基底材料通常采用对X射线吸收率低的金属铍(beryllium),阳极靶材则被镀膜于铍窗上。选择合适的靶材厚度至关重要,它直接影响出射的X射线强度。因为靶材太薄,只有部分入射电子发生韧致辐射或特征标识辐射,产生X射线效率降低;靶材太厚,尽管产生的X射线增多,但由于靶材对X射线的吸收导致透射出阳极靶材的X射线强度变弱。

当靶材很薄时,可利用维丁顿公式计算电子在靶材中运行的厚度 x ^[11,12]。电子穿过靶厚 x 时,有

$$v_x^4 = v_0^4 - bx, \tag{1}$$

式中, v_x 为电子在靶厚 x 处的速度; v_0 为电子的初始速度; b 为常数,由下式获得

$$b = 1.2 \times 10^{43} \frac{Z}{A} \rho,$$

其中, Z 为原子序数; A 为原子量; ρ 为材料密度。

表1 不同靶材在不同阳极电压下的最佳靶厚(单位为 μm)

Table 1. Optimum target thickness of electron beam for different voltages & target materials (in μm).

元素名	电压/kV									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Cr	0.30	1.13	2.30	3.54	4.83	6.52	8.15	10.19	12.22	13.78
Ni	0.25	0.83	1.70	2.75	3.99	5.08	6.54	8.00	9.18	11.01
Cu	0.26	0.82	1.71	2.74	4.16	5.46	6.80	8.20	9.31	11.13
Mo	0.28	0.67	1.32	1.98	2.95	4.20	5.57	6.88	7.89	9.08
Rh	0.21	0.53	0.99	1.63	2.51	3.32	4.02	5.14	6.40	7.57
Pd	0.21	0.60	1.11	1.70	2.41	3.30	4.37	5.31	6.42	7.72
Ag	0.24	0.67	1.23	1.94	2.80	3.70	4.70	6.00	7.20	8.48
Cd	0.30	0.75	1.50	2.37	3.60	4.73	5.80	7.30	8.51	10.39
W	0.15	0.42	0.70	0.99	1.60	2.00	2.52	3.00	3.55	4.31
Au	0.14	0.36	0.72	1.01	1.59	2.00	2.40	2.99	3.64	4.28

电子速度相应的电势差为 $U = \frac{1}{2} \frac{m}{e} v^2$, 因此可得

$$U_x^2 = U_0^2 - \frac{b}{4} \left(\frac{m}{e}\right)^2 x, \quad (2)$$

其中电子的初始势能 U_0 由调制 X 射线源所加高压 V_a 决定. 则势能 U_0 的电子在靶材中的最厚度 x_m 由高压和阳极靶材材料共同决定. 根据计算可求出不同靶材、不同高压下的电子能达到的最厚度 x_m . 由于阳极靶材对产生的 X 射线有吸收作用, 故 x_m 并非阳极靶材的最佳靶厚. 采用 Monto Carlo (MC) 方法模拟仿真得到不同靶材、不同高压下的最佳靶厚, 如表 1 所示.

表 1 有如下规律: 1) 同一靶材, 最佳靶厚随调制 X 射线源的阳极电压的增大而增大; 2) 低密度、低原子序数靶材的最佳靶厚随阳极电压增大的幅度比高密度、高原子序数的靶材增大的幅度大; 3) 密度对最佳靶厚的影响比原子序数对靶厚的影响大.

2.3 微束聚焦仿真

为了达到更好的聚焦效果, 采用了三个不同尺寸、不同静电电场的聚焦极, 利用带电粒子光学仿真软件 SIMION 对设计的调制 X 射线源进行了光学仿真. 图 2(a) 为所设计的调制 X 射线源的仿真示意图. 在金属阴极形状尺寸确定的条件下, 微束聚焦直径与栅极电压 V_g 、聚焦极电压 V_{f1} , V_{f2} , V_{f3}

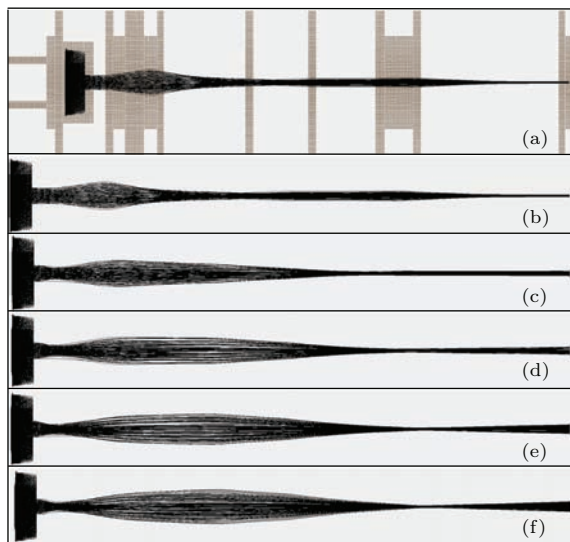


图 2 微束聚焦仿真结果 (a) 调制 X 射线源仿真结构图; (b)–(f) 不同栅极电压下, 电子束的运动轨迹

Fig. 2. The simulation result of micro-beam focusing spot: (a) The optical photograph of simulation diagram; (b)–(f) electron beam trajectories in different grid electrode voltages.

和阳极电压 V_a [13], 栅极、聚焦极、阳极结构尺寸及其间距都有密切关系. 经过不断的仿真优化, 最终确定了聚焦极、阳极的电压、结构尺寸及其之间的间距.

在此基础上, 研究了栅极电压对焦斑尺寸的影响, 图 2(b)–图 2(f) 分别给出了栅极电压为 1, 3, 5, 7 和 9 V 时电子束运动的轨迹图, 可观测到栅极的电压变化导致电子束运动轨迹的改变, 其微束聚焦尺寸参见图 3(a). 图 3(a) 中曲线为不同栅极电压下的聚焦尺寸图, 4 条曲线分别表示聚焦尺寸内电子数占总打靶电子数 70%, 80%, 90%, 100% 的聚焦尺寸.

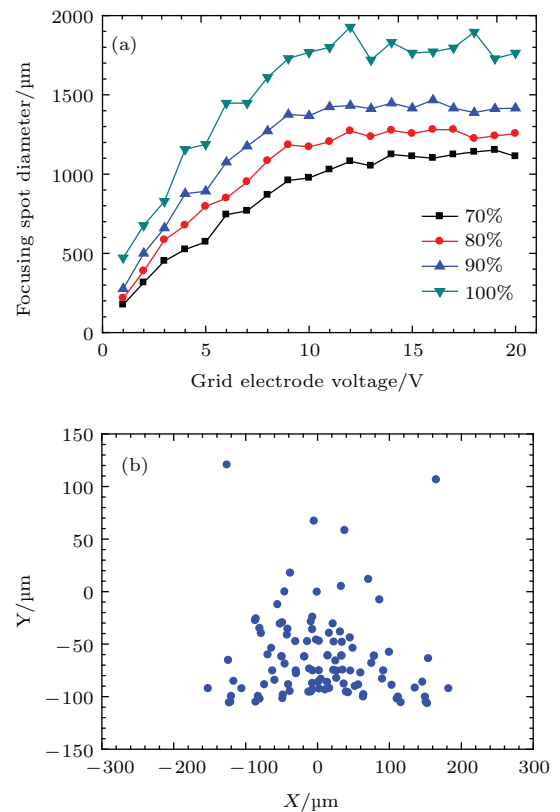


图 3 聚焦尺寸仿真结果 (a) 栅极电压与聚焦尺寸的关系图; (b) 实际聚焦二维位置坐标

Fig. 3. The simulation result of focusing spot: (a) Grid electrode voltage versus focusing spot diameter of the modulated X-ray source; (b) the two-dimensional coordinate of focusing spot.

从图 2(b)–图 2(f) 和图 3(a) 可得如下结论: 1) 栅极电压对电子束的运动轨迹和聚焦尺寸有显著影响; 2) 聚焦尺寸随栅极电压的增大而增大; 3) 聚焦尺寸的增大幅度随着栅极电压的增大而减小. 图 3(b) 为电子打靶实际聚焦的二维位置坐标图. 栅极电压 1 V 下的仿真结果, 聚焦直径小于 150 μm , 较文献 [8–10] 中 0.4 mm \times 4 mm 的聚焦尺寸指标有显著改善.

3 实验装置与结果讨论

3.1 实验装置搭建

根据仿真优化得到的阴极丝、栅极、聚焦极、阳极靶的结构尺寸参数, 加工完成调制X射线源, 尺寸为 $\Phi 20\text{ mm} \times 75\text{ mm}$, 如图4(a)所示. 阴极选用高性能钨丝, $\Phi 50\text{ }\mu\text{m}$, 阳极靶选用钨膜, 膜厚 $0.3\text{ }\mu\text{m}$, 阴极电极、栅极、聚焦极、阳极罩选用 kovar 钢、连同五个不同尺寸的 Al_2O_3 陶瓷一起在真空炉中烘烤 10 h 后, 采用一次封排工艺完成调制X射线源的真空密封.

为测试所研制调制X射线源的性能, 搭建了测试平台, 包括: SDD(silicon drift detector) X射线探测器、调制X射线管、三个聚焦极高压电源、阳极可调高压电源和高聚合物保护罩, 如图4(b)所示.

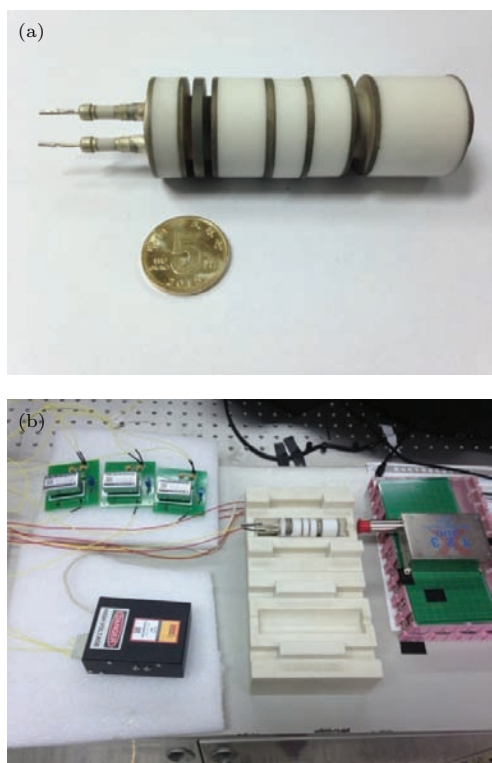


图4 调制X射线源及其测试平台 (a) 调制X射线源照片; (b) 测试平台照片

Fig. 4. Photographs of the modulated X-ray source and the test platform: (a) Photograph of the modulated X-ray source; (b) photograph of the test platform.

3.2 钨靶谱线

测试实验中各电极的参数如下: 钨丝电流为 200 mA, 聚焦极电压依次为 48, 200 和 1000 V, 阳

极电压为 15 kV. 此时栅极电压为 1 V, 调制X射线源相当于具有微束焦斑的便携式X射线源, 利用 SDD X射线探测器对其出射X谱线进行监测, 结果如图5所示. 能量谱由韧致辐射产生的连续谱和特征标识辐射产生的特征谱叠加而成. 韧致辐射产生X射线的最大能量由阳极电压决定, 为 15 keV. 而特征谱线由阳极靶的材料决定, 图5为钨的特征谱, 依次是 $L\tau$, $L\alpha_1$, $L\alpha_2$, $L\beta_1$, $L\beta_2$ 和 $L\gamma_1$. 因其良好的谱线特性和微束焦斑可提高能谱标定等空间应用的精度.

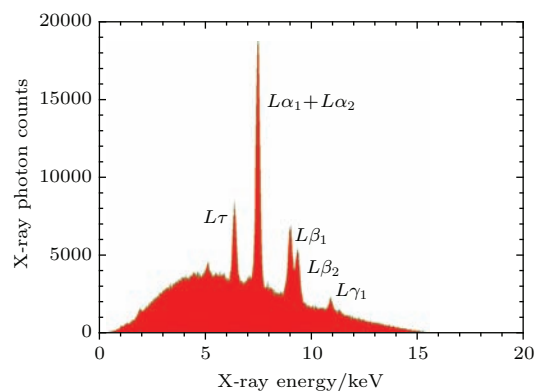


图5 钨靶特征谱

Fig. 5. The characteristic spectrum of tungsten target.

3.3 栅极幅值调制

钨丝功耗、栅极电压、阳极电压直接影响调制X射线源产生X射线的强度. 保持阳极电压不变, 钨丝功耗越大, 出射的电子数越多; 栅极电压越高, 经过栅极的电子数越多. 被阳极电场加速打靶的电子数就越多, 故产生的X射线强度就越强. 图6(a)为栅极电压一定时, 钨丝功耗与出射X射线强度的关系图, 图中X射线强度与钨丝功耗为指数关系, 不同的栅极电压只影响乘积系数, 并不改变指数关系. 图6(b)则表示钨丝功耗一定时, 栅极电压与出射X射线强度的关系图. 可观测到X射线强度与栅极电压近似成线性关系, 不同的钨丝功耗只影响线性系数, 使得调制X射线源的栅极幅度调制成为可能, 可应用于目前国际上新兴的星间X射线通信中.

3.4 栅极脉冲调制

为测试调制X射线源栅极脉冲调制的可行性, 在栅极加载调制信号, 正电压代表逻辑“1”, 负电压表示逻辑“0”, 结果如图7所示. 图中黄色波形信号a为加载到栅极的调制信号, 紫色波形b为SDD

探测器的输出波形. 其中每个紫色尖峰代表一个 X 光子, 尖峰电压的大小由 X 光子的能量决定. 由图 7 可知: 当栅极加载逻辑“1”时, 有 X 射线产生; 当栅极加载逻辑“0”时, 无 X 射线产生, 此时栅极阻断了电子通过栅极. 实验验证了栅极脉冲调制的可行性, 未来可广泛应用于黑障通信, X 射线通信和脉冲星模拟等领域.

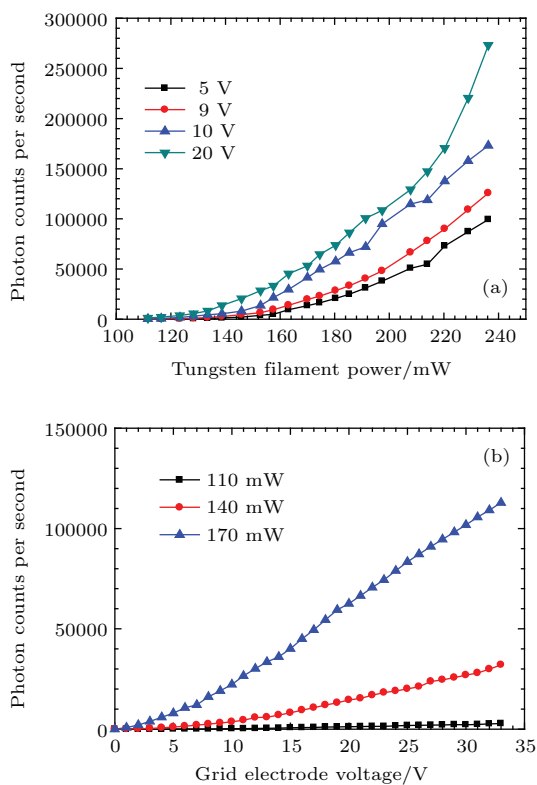


图 6 验证栅极幅度调制的可行性 (a) X 射线强度与钨丝功耗的关系图; (b) X 射线强度与栅极电压的关系图
Fig. 6. Feasibility of grid amplitude modulation: (a) Photon counts versus cathode power consumption characteristics of the modulated X-ray source; (b) photon counts versus grid voltage characteristics of the modulated X-ray source.

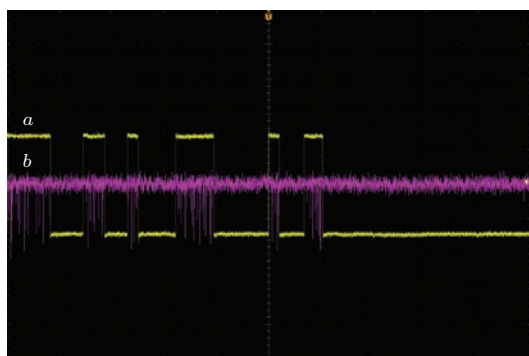


图 7 (网刊彩色) 栅极脉冲调制的输入输出
Fig. 7. (color online) The pulsed width modulation of x-ray is controlled by modulating the grid electrode.

4 结 论

研制了多功能的透射式微型微束调制 X 射线源, 搭建了基于调制 X 射线源的测试装置, 分析了阳极钨靶的谱线特性, 验证了栅极幅度调制和栅极脉冲调制的可行性. 所研制的调制 X 射线源集多功能于一体, 既能产生 μm 级焦斑的稳定 X 射线, 同时还能实现 X 射线的幅度调制和脉冲调制, 可广泛应用于能谱标定、黑障通信、星间 X 射线通信、脉冲星模拟.

参考文献

- [1] Liu Z, Yang G, Lee Y Z, Bordelon D, Lu J, Zhou O 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 103111
- [2] Haga A, Senda S, Sakai Y, Mizuta Y, Kita S, Okuyama F 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2208
- [3] Senda S, Sakai Y, Mizuta Y, Kita S, Okuyama F 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5679
- [4] Sugie H, Tanemura M, Filip V, Iwata K, Takahashi K, Okuyama F 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2578
- [5] Song Y H, Kin J W, Jeong J W, et al. 2012 *IEEE 25th International Vacuum Nanoelectronics Conference Jeju, Korea* 2012 p102
- [6] Jeong J W, Kin J W, Kang J T, Choi S, Ahn S, Song Y H 2013 *Nanotechnology* **24** 085201
- [7] Jablonski D G 2009 *22nd International Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation Savannah, the United States, September 22–25, 2009* p1458
- [8] Deng N Q, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R, Yang H, Liu D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060705 (in Chinese) [邓宁勤, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣, 杨颢, 刘舵 2013 物理学报 **62** 060705]
- [9] Ma X F, Zhao B S, Sheng L Z, Liu Y A, Liu D, Deng N Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 106701 (in Chinese) [马晓飞, 赵宝升, 盛立志, 刘永安, 刘舵, 邓宁勤 2014 物理学报 **63** 106701]
- [10] Sheng L Z, Zhao B S, Liu Y A 2015 *Proc. SPIE* **9207** 920716
- [11] Yang Q, Ge L Q, Gu Y, Hua Y T, Luo Y Y 2013 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **33** 1130 (in Chinese) [杨强, 葛良全, 谷懿, 花永涛, 罗耀耀 2013 光谱学与光谱分析 **33** 1130]
- [12] Pinieste(translated by He L) 1963 *Fine-Focus X-Ray Tube and Its Application in Structural Analysis* (Beijing: Science Press) pp30–32 (in Chinese) [皮涅斯 著 (何萃 译) 1963 细聚焦 X 射线管及其在结构分析中的应用 (北京: 科学出版社) 第 30—32 页]
- [13] Liu Z J, Zhang J, Yang G, Cheng Y, Zhou O, Lu J P 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 054302

Transmission-type miniature micro-beam modulated X-ray source based on space application*

Mou Huan^{1)2)†} Li Bao-Quan¹⁾²⁾ Cao Yang¹⁾²⁾

1) (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

(Received 12 April 2016; revised manuscript received 4 May 2016)

Abstract

X-ray sources have been extensively penetrated into all aspects in daily life, such as pharmaceutical analysis, X-ray diagnostics, and radioactive static elimination. Along with the burgeoning field of deep exploration, all kinds of X-ray sources are fabricated to meet the needs of space applications. Therefore a design proposal of a transmission-type miniature micro-beam modulated X-ray source, in allusion to the space application of X-ray sources, is proposed and its theoretical model is constructed. In contrast with the traditional X-ray sources, a grid electrode is added and three focusing electrodes are chosen and used. Amplitude modulation and pulse modulation of X-rays, by controlling the voltage value of the grid electrode, are realized. Electrons are restrained to pass when the grid electrode is loaded with a negative voltage and no X-ray photons are produced. When loaded with a positive voltage, the grid electrode lets electrons get through and finally reaches up to the anode electrode. Three focusing electrodes, meanwhile, are used to make the electron beam converge and finally focus on the anode target. The thickness of the transmission-type target material is considerable, considering it to be a key parameter influencing the conversion efficiency of X-rays. If the target thickness is too thin, only a part of electrons can convert into X-ray. On the contrary, when the target thickness is too thick, the produced X-ray intensity is low too. That is because some X-ray photons are absorbed by the anode target material even though all of the electrons convert into X-ray. And the optimum target thickness, in different anode voltage values and different target materials, is simulated using charged particle optical simulation software, and the results are presented in a table. In addition, the influence of grid voltage value on electron beam trajectory is also taken into account and finally a 150- μm -diameter focusing spot is obtained. The prototype model is fabricated via coating film on the anode and the single-step brazing process in a vacuum furnace. After the test platform is set up, the spectrum feature of tungsten target is attained. And it is analyzed that the X-ray intensity is related to the grid electrode voltage value. The feasibility of grid amplitude modulation and grid pulse modulation are verified in the end. As a multifunctional modulated X-ray source, it will have more important scientific significance and space application prospects, and be used in inter-satellite X-ray communication, ionization blackout area communication, planetary science, pulsar simulation and single event effect simulation of space radiation environment.

Keywords: miniature micro-beam, transmission-type, modulated X-ray source

PACS: 07.85.Fv, 52.38.Ph, 42.79.Sz, 41.50.+h

DOI: 10.7498/aps.65.140703

* Project supported by the Strategic Pilot Projects in Space Science of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA04060900).

† Corresponding author. E-mail: mouhuan@nssc.ac.cn