

用于空间X射线通信的栅极控制脉冲发射源研究*

马晓飞^{1)2)†} 赵宝升¹⁾ 盛立志¹⁾ 刘永安¹⁾ 刘舵¹⁾²⁾ 邓宁勤³⁾

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 100049)

3)(清华大学信息科学技术学院, 北京 100084)

(2014年1月23日收到; 2014年4月22日收到修改稿)

利用X射线作为载波实现空间远距离、高速率的信息传输已引起研究者的关注, 这项技术的发展将对拓宽电磁波频谱的使用范围具有积极意义. 针对X射线通信地面模拟真空实验系统对信号发射源的需求, 设计了一种栅极控制X射线源. 该X射线源是在传统X射线管的基础上, 增加了电压控制栅极, 通过改变栅极电压实现X射线的脉冲发射. 利用三维电磁场仿真软件CST粒子工作室设计了实验样管, 模拟计算了管内的电位分布、电子运动轨迹、实际焦斑大小和打靶电子数. 仿真结果表明, 实际焦斑大小约为 $0.4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 栅极开启电压和截止电压分别为0和 -10 V . 实验测试了样管特性, 测试结果与仿真结果符合得很好, 并且在X射线真空实验系统中实现了数字信号传输.

关键词: 栅极控制X射线源, 焦斑大小, 调制电位, 数字信号传输**PACS:** 07.85.Fv, 42.79.Sz**DOI:** 10.7498/aps.63.160701

1 引言

美国Henke等^[1]通过对X射线多年的研究发现, 当X射线光子能量大于 10 keV (波长 $\lambda < 0.1\text{ nm}$)且大气压强低于 10^{-1} Pa 时, X射线的透过率约为100%, 这一研究成果意味着在太空环境(高真空)中X射线的传输几乎无衰减. 同时, X射线频率远高于微波和激光的频率, 其波长短、粒子特征明显、方向性和穿透性好, 受空间环境电磁干扰小. 因此, 利用X射线作为载波实现深空远距离通信对未来空间通信技术的发展具有重要意义.

2007年, 美国戈达德飞行中心的Gendreau首次提出X射线通信的概念, 并在实验室成功实现了短距离的X射线信号传输. 2012年, 中国科学院西安光学精密机械研究所赵宝升等^[2]在国内率先开展下一代空间通信新技术——X射线通信的研究, 搭建了实验系统, 包括X射线发射装置、真空室、X

射线探测器、信号处理电路、高/低压直流电源等, 并且实现了基于X射线的语音通信. 未来有望在太空中实现基于X射线的数据和图像传输. 这种通信方式具有传输距离远、速率高、保密性强等优点^[3]. 2013年, 上海卫星工程研究所的Zhang等^[4]提出一种直接利用太阳X射线的空间通信系统, 这种通信方式是通过X射线汇聚透镜阵列汇集太阳光中的X射线作为射线源, 利用X射线的穿透性强和方向性强的特点解决了低功耗远距离空间通信的射线源问题, 避免了航天器携带用于通信的频率基准和X射线源, 降低了航天器热控、能源、通信等分系统设计难度. 由此可知, 国内外学者都开始对这种新型的空间通信技术展开了研究.

现阶段, 研究空间X射线通信的关键技术之一是设计一种能够有效控制的X射线发射源. 目前, 国外学者采用的方法是通过调制紫外发光二极管发射紫外光脉冲, 产生的紫外光脉冲经过光电阴极转换为光电子, 光电子通过电子倍增器倍增后形成

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11103069, 61007017)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: cxdmf@126.com

电子云团, 在高压电场作用下电子云团加速轰击阳极靶材后发生韧致辐射, 从而发射出 X 射线脉冲.

本文设计的 X 射线发射装置采用开关键控的调制方式, 考虑到实验对 X 射线源调制特性、工作电压、工作电流以及结构尺寸的要求, 选择了栅极控制 X 射线源. 这种栅极控制方式对阴极电子束具有一定的聚焦作用, 实际焦斑大小满足探测器的探测要求, 能够有效地发射 X 射线脉冲. 利用三维电磁仿真软件 CST 粒子工作室对其建模, 计算了栅极控制 X 射线源内部的电位分布、电子运动轨迹、实际焦斑大小和打靶电子数, 得到了栅极有效的开启电压和截止电压, 完成实验样管的制作和参数测试, 在真空中实现了基于 X 射线的数字信号传输实验.

2 结构建模和仿真计算

2.1 核心部件和工作原理

图 1 (a) 所示为栅极控制 X 射线源的结构示意图, 主要包括热电子发射系统、栅极控制系统和金属靶材系统^[5]3 个核心部件. 这里, L_{ac} 为 X 射线源的长度, D_a 为阳极直径, θ 为阳极靶面斜角, L_1 为阳极与栅极间的最小距离, d_f 为栅极窗口长度, T_f 为栅极厚度, T_c 为阴极罩厚度. 热电子发射系统将直接影响出射 X 射线的稳定性, 因此要求阴极具有足够高的电子照射量和较高的稳定性. 栅极作用是通过加载不同的电压来控制阴极电子的出射和截止, 并且对阴极发射的电子束产生聚焦作用. 阳极靶材应满足对 X 射线的吸收少、热传导性好等要求^[6].

根据上述讨论并参考现阶段工艺的要求, 在设计和制作样管时选取螺旋状钨丝作为热电子发射源, 阳极材料为金属钨, 控制栅极的开孔大小为 $2\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 呈长方形, 且长边与螺旋钨丝母线平行.

栅极控制 X 射线源的工作原理如下: 热阴极螺旋钨丝加热至 2000 K 左右时发射出热电子, 在阳极高压电场作用下热电子透过控制栅极并向阳极加速运动, 在阳极靶面形成实际焦斑并产生 X 射线, 此过程中出射的热电子在栅极窗口静电场的作用下聚焦. 通过调节栅极电压 V_g 来控制阴极热电子出射的通与断, 从而控制 X 射线的辐射和截止. 当 V_g 为高电平时, 阴极热电子经过聚焦和加速过程后轰击阳极产生 X 射线, X 射线探测器输出负脉冲信号, 再经过信号处理电路滤波和整形后输出高电平信号“1”; 当 V_g 为低电平时, 栅极负电压阻碍了阴极热电子的出射, 电子束截止, 没有 X 射线产生, 从而达到控制 X 射线脉冲辐射的目的, 此时 X 射线探测器输出低电平信号“0”^[7].

2.2 结构建模和参量设置

CST 粒子工作室是一款专门用于计算和分析带电粒子束在电场中运动情况的三维电磁仿真软件, 利用软件自带的建模工具简化设计得到的栅极控制 X 射线源的三维结构仿真图如图 1 (b) 所示. 要求仿真参数近似于实际工作环境, 因此整个建模背景材料定义为真空, 电子发射源的热电子发射类型属于空间电荷限制型, 螺旋钨丝温度设置为 2000 K, 出射电子数为 2677, 阳极电压为 20 kV, V_g 和栅极罩初始电压均为 0 V.

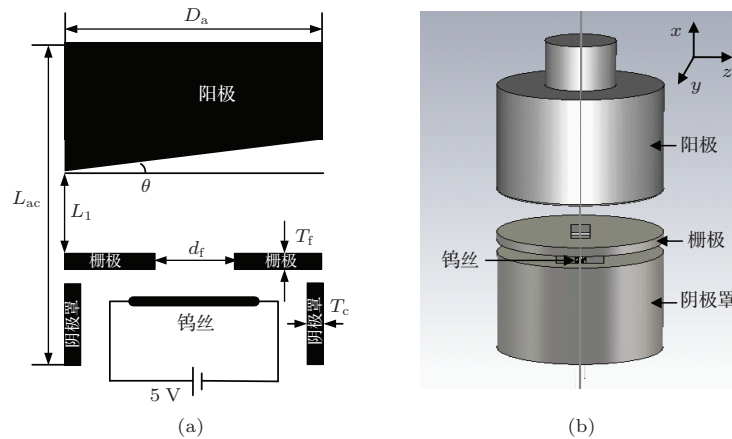


图 1 栅极控制 X 射线源的结构 (a) 结构示意图; (b) 结构仿真图

2.3 仿真计算和结果分析

栅极控制 X 射线源输出射线的有效焦斑大小和产生的 X 射线剂量是两项重要性能指标,但它们难以直接精确测量^[8]. 本文通过在 CST 软件中设置粒子监视器来记录阳极表面上打靶电子数和实际焦斑大小, 以此间接反映这两项指标. 打靶电子数越多表明辐射 X 射线越强, 打靶电子数越少表明辐射 X 射线越弱, 甚至没有 X 射线产生, 电子束高速轰击阳极靶的区域为实际焦斑, 它与出射 X 射线的有效焦斑正相关.

为了简化求解过程, 假设建模区域不存在磁场, 只有静电场的作用, 在 x, y 和 z 方向上定义电边界, 这样就可以使边界平面上的切向电场分量为零. 软件自带的专家系统经过结构分析后会自动剖分网格, 但由于阴极电子发射表面附近的网格密度对仿真结果精度的影响很大, 而且自动生成网格时

系统无法自动检测哪个表面是电子发射面, 因此必须对阴极建模结构进行手动加密以提高仿真计算精度, 定义当求解精度达到 -30 dB 时计算结束^[9]. 在阳极靶面处设置粒子监视器来记录阳极电子打靶的二维位置坐标, 利用 CST 粒子工作室中的静电求解器和粒子轨迹求解器进行仿真计算, 计算结果如图 2 所示.

如图 2(a) 所示, 从内部电位分布可以看出, 栅极窗口附近电位线向栅极一侧弯曲渗透, 而靠近阳极一侧电位线近似均匀. 为了便于分析, 图 3 给出了栅极窗口附近的电力线分布. 这里, $\mathbf{E}_0, \mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 为 $x-z$ 平面内三条不同方向的电力线, 且由高电位指向低电位, \mathbf{E}_0 位于栅极窗口几何中心处, $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 关于 x 轴对称; $\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ 分别为阴极出射电子在电力线方向所受到的电场力, $\mathbf{F}_{1x}, \mathbf{F}_{1z}$ 和 $\mathbf{F}_{2x}, \mathbf{F}_{2z}$ 分别为 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 的 x 分量、 z 分量.

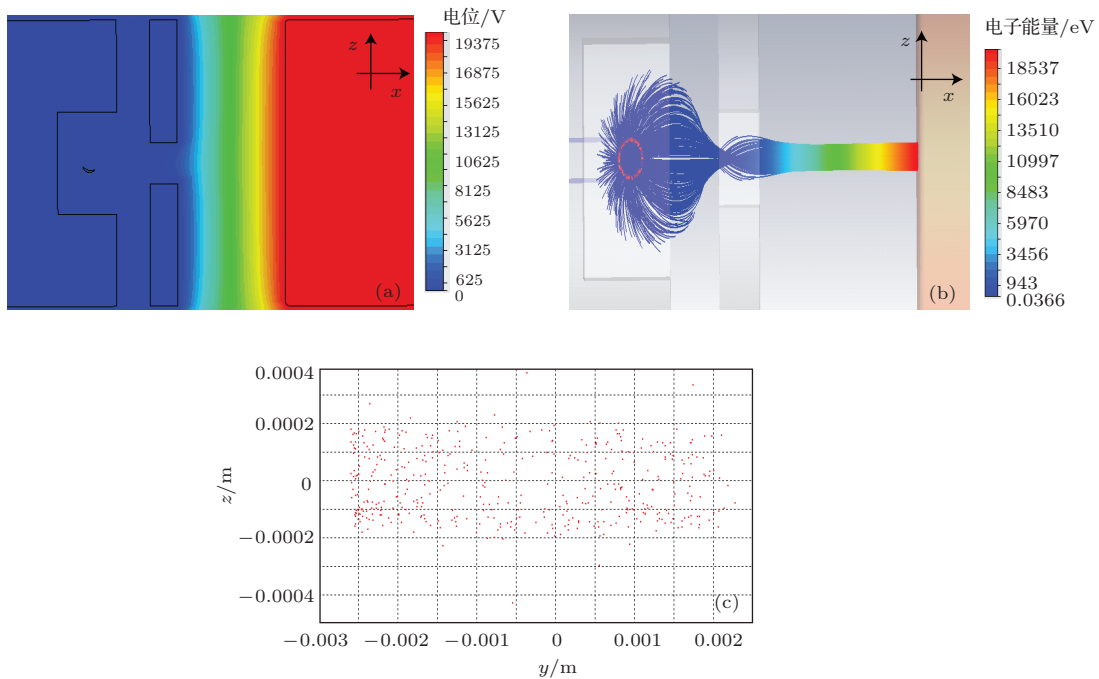


图 2 (网刊彩色) 利用 CST 软件模拟得到的仿真结果 (a) 电位分布; (b) 电子运动轨迹; (c) 实际焦斑二维位置坐标

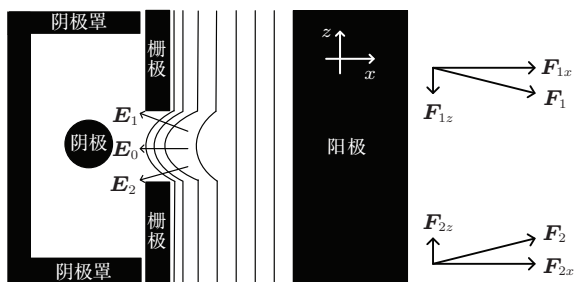


图 3 电力线分布示意图

在只有静电场的环境中, 当栅极控制 X 射线源工作在稳定状态时, 在空间中任一点的电位分布和电子运动状态都不随时间 t 变化, 各物理量只是空间坐标 x, y, z 的函数, 设空间内任一点的电场强度矢量为 $\mathbf{E}(x, y, z)$, 在空间坐标轴上的分量分别为 $\mathbf{E}(x), \mathbf{E}(y), \mathbf{E}(z)$. 由于聚焦系统内不存在磁场, 因此空间中任一点的电子受到的电场力为

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{E}(x, y, z),$$

式中 e 为电子的电荷量. 由于电子带负电荷, 所以电子受力方向与电场 \mathbf{E} 方向相反. 根据牛顿第二运动定律得到

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = -e\mathbf{E},$$

式中, m 为电子质量, \mathbf{v} 为空间中任一点的电子运动速度. $\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = -e\mathbf{E}$ 在三维坐标轴上的投影为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(mv_x) &= -eE_x, \\ \frac{d}{dt}(mv_y) &= -eE_y, \\ \frac{d}{dt}(mv_z) &= -eE_z, \end{aligned}$$

式中 v_x, v_y, v_z 分别为 \mathbf{v} 在 x, y, z 方向上的分量.

由上述分析可知, 由阴极发射的电子在高压电场作用下向阳极加速运动, 同时电子所受电场力的径向分量使电子束在栅极窗口附近聚焦, 这一现象的本质是场分布的不均匀和电子束运动过程中速度的变化. 在靠近阳极一侧的电位线近似

平行, 电子束在近似匀强电场作用下做加速运动撞击阳极靶, 电子运动轨迹如图 2(b) 所示. 图 2(c) 是粒子监视器记录的电子轰击阳极靶面的实际焦斑的二维位置坐标. 从图 2(c) 可知, 电子撞击阳极靶的实际焦斑大小约为 $0.4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$. 实际焦斑和有效焦斑之间的关系为 $S = ab \sin \theta$, 其中, S 为有效焦斑面积, a 和 b 分别为实际焦斑的宽度和长度, $\theta = 12^\circ$. 计算得到有效焦斑大小为 $0.4 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$, 而真空中 X 射线探测器的有效探测面积为 20 cm^2 ($\phi 50 \text{ mm}$), 所以计算得到的有效焦斑值完全能满足探测要求. 保持其他参数不变, 调节 V_g ($-12 \text{ V} \sim 2 \text{ V}$), 统计打靶电子数与 V_g 的关系, 结果列于表 1. 由表 1 可知, 当 $V_g = 0 \text{ V}$ 时, 打到阳极靶上的电子数最多, 为 746, 同时热阴极发射的电子有一部分打到阴极罩或栅极面板上而不能透过栅极窗; 当 $V_g = -12 \text{ V}$ 时, 在栅极负电压作用下, 阴极发射的电子全部被限制在阴极槽里, 没有电子打到阳极靶上. 图 4 给出了对仿真计算数据进行处理得到的 V_g 与打靶电子数之间的关系.

表 1 不同栅极电压下的打靶电子数 n

V_g/V	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12
n	671	716	746	724	656	589	351	164	97	75	52	30	15	6	0

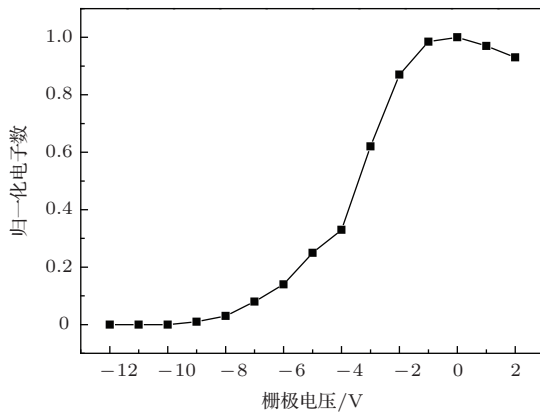


图 4 栅极电压与打靶电子数的关系曲线

20 kV, 栅极电压 V_g 的变化范围为 $-12 \sim 2 \text{ V}$. 利用 X 射线剂量仪在距离出射窗口 10 cm 处 (若距离太近, 剂量仪的示数将超出量程) 对辐射剂量进行监测, 测试数据列于表 2. 对所得数据进行处理得到栅极电压 V_g 与射线辐射剂量之间的关系, 结果如图 5 所示.

表 2 不同栅极电压下的 X 射线辐射剂量

V_g/V	辐射剂量/ μSv	V_g/V	辐射剂量/ μSv
2	966	-6	145
1	1008	-7	83
0	1039	-8	31
-1	1023	-9	11
-2	904	-10	3
-3	644	-11	0
-4	343	-12	0
-5	260		

3 实验结果及讨论

3.1 栅极控制特性测试

根据仿真模型参数制作一只栅极控制 X 射线源, X 射线出射窗口材料为铍. 测试实验中设置各电极的电参数如下: 灯丝电流为 2.0 A, 阳极高压为

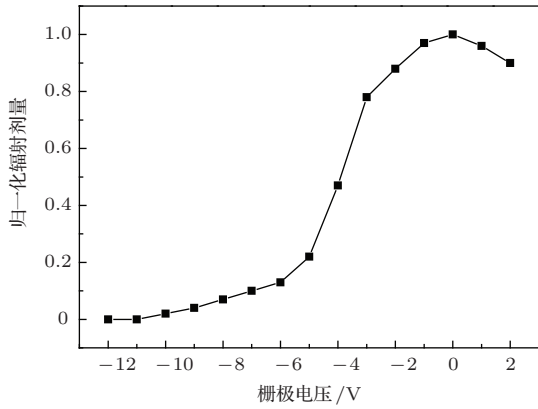


图5 栅极电压与X射线辐射剂量的关系曲线

对比图4和图5可知,打靶电子数和X射线辐射剂量随栅极电压 V_g 的变化趋势基本一致.仿真结果和测试结果都是在 $V_g = 0\text{ V}$ 时达到峰值,在 $V_g = -10\text{ V}$ 时为零.如上所述,我们的核心关注点只有两个状态,即射线的出射和截止,这两个输出状态分别对应信息位“1”和“0”,为了实现栅极控制X射线源的有效调制,选取 $V_g = 0, -10\text{ V}$ 作为栅极的两个控制电位是最恰当的.

3.2 真空数字信号传输系统及实验结果

基于X射线的真空数字信号传输系统如图6所示,系统主要由数字信号发生器、栅极控制X射线源、真空室、X射线探测器、信号处理电路五部分组成.

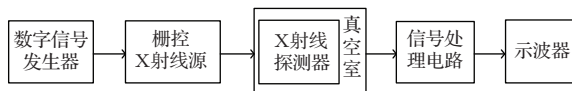


图6 基于X射线的真空数字信号传输系统框图

该系统的工作原理如下:数字信号发生器输出的信号加载到栅极控制X射线源的栅极,通过栅极

电压的变化控制X射线的出射和截止.调制后的X射线透过厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜进入真空度为 10^{-5} Pa 的腔室中,被具有单光子探测能力的微通道板(MCP) X射线探测器接收,出射的X射线光子首先被探测器中的碘化铯光电阴极转换为电子,产生的电子经过MCP倍增后形成电子云,一个入射X射线光子产生的一团电子云在电场作用下被微带线阳极接收,输出一个负脉冲信号^[10].由于探测器输出的微弱负脉冲信号幅值比较小,不易被直接处理,需要经过信号处理电路的放大、滤波和整形,最后输出信号与加载到栅极上的数字信号波形相同,进而实现了基于X射线的数字信号传输^[11].

实验中设置栅极控制X射线源的阳极电压为 20 kV ,灯丝电流为 2.0 A ,栅极加载数字信号的高电平为 0 V ,低电平为 -10 V ,频率为 10 kHz ,占空比为 50% .信号放大倍数、阈值设置和整形时间是影响信号处理电路整体性能的主要因素,电路中所用芯片和参数设置如表3所列,信号处理电路如图7所示.探测器输出的微弱负脉冲信号经过运算放大电路后幅值被反向放大10倍,再经过电压比较器的运算,幅值高于设置阈值(48 mV)的脉冲信号输出为高电平“1”,低于设置阈值的脉冲信号输出为低电平“0”.此过程的作用是滤除探测器的本底暗噪声和高斯白噪声,改善输出波形质量.滤波后的“0”,“1”信号再经过整形电路的处理,输出与输入波形相同的数字信号.图8(a)给出了X射线

表3 信号处理电路中的芯片参数

名称	型号	参数	参数值
放大器芯片	OPA695	放大倍数	10
比较器芯片	LT1719	阈值	48 mV
可重触发器芯片	74VHC123	整形时间	800 ns

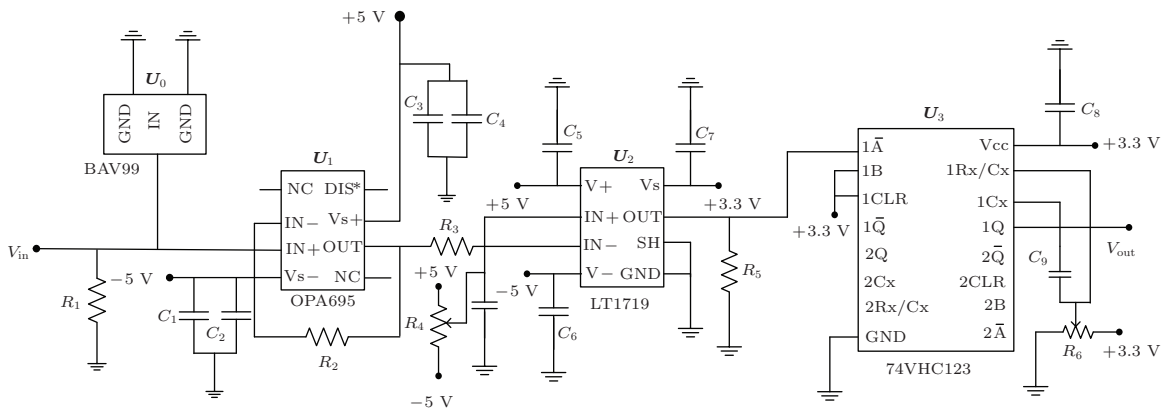


图7 信号处理电路图

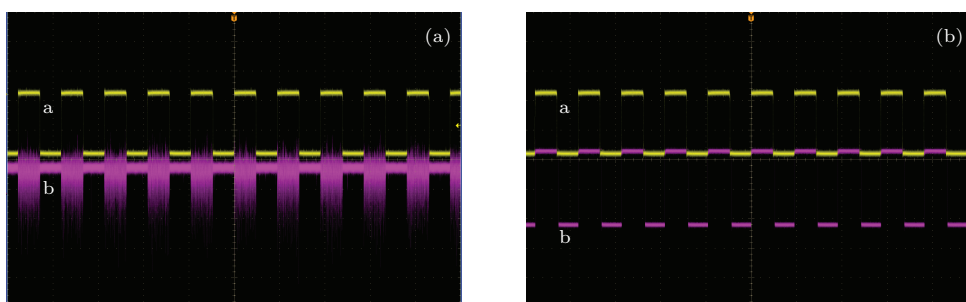


图8 信号输入输出波形 (a) X射线探测器输出波形, 波形a为栅极输入波形, 波形b为X射线探测器输出波形; (b) 信号处理电路输出波形, 波形a为栅极输入波形, 波形b为信号处理电路输出波形

探测器输出脉冲波形. 从图8(a)可以看出, 当栅极输入信号为高电平时, 探测器输出负脉冲信号, 当栅极输入信号为低电平时, 探测器无信号输出, 并且在探测器输出波形中夹杂些白噪声. 由此可知, 通过调制栅极电压能够有效控制X射线的出射和截止. 信号处理电路输出波形如图8(b)所示, 图中栅极输入波形a与信号处理电路输出波形b符合得很好. 这说明在真空系统中成功实现了基于X射线的数字信号传输实验, 同时也验证了本文设计的栅极控制X射线源满足实验要求.

4 结 论

本文采用计算机仿真软件CST粒子工作室计算了栅极控制X射线源的电位分布、电子运动轨迹、实际焦斑大小和打靶电子数, 得到的有效焦斑大小为 $0.4\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$, 满足X射线探测器的探测要求, 并给出了最佳导通电压和截止电压. 在基于X射线的数字信号传输实验系统对栅极的控制能力进行了测试. 探测器输出波形和信号处理电路的输出结果均表明, 本文设计的栅极控制X射线源能够有效控制X射线的出射和截止, 实际测试结果与仿真计算结果一致, 满足实验系统的要求. 该项研究对空间X射线通信的后续发展具有重要的意义. 下一步将开展栅极控制X射线源的热分析和X射线准直技术的研究.

感谢西安理工大学自动化学院李得全同学的讨论和帮助.

参考文献

- [1] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C 1993 *Atom. Data Nucl. Data* **54** 181
- [2] Zhao B S, Wu C X, Sheng L Z, Liu Y A 2013 *Acta Photon. Sin.* **42** 801 (in Chinese) [赵宝升, 吴川行, 盛立志, 刘永安 2013 光子学报 **42** 801]
- [3] Nikulin V V, Bouzoubaa M, Skormin V A, Busch T E 2001 *Opt. Eng.* **40** 2208
- [4] Zhang W, Yu H H, Ye H, Wang T L, Zhao Y B, Lu T S 2013 *Chinese Patent* 201310105127.5 (in Chinese) [张伟, 俞航华, 叶晖, 王天亮, 赵艳彬, 路同山 2013 中国发明专利 201310105127.5]
- [5] Wang K G, Wang L, Niu H B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1807
- [6] Fang H, Li Y Z, Huang Y 2005 *Vacuum* **42** 36 (in Chinese) [房鸿, 李耀宗, 黄悦 2005 真空 **42** 36]
- [7] 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, 杨灏, 刘舵 2013 物理学报 **62** 060705]
- [8] Shi J J, Liu J, Li B Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 266
- [9] Yang Q 2012 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: Chengdu University of Technology) (in Chinese) [杨强 2012 博士学位论文 (成都: 成都理工大学)]
- [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, 赛小峰, 鄢秋荣, 陈宝梅, 王朋 2012 物理学报 **61** 019701]
- [11] Wang P, Zhao B S, Sheng L Z, Hu H J, Yan Q R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 209702 (in Chinese) [王朋, 赵宝升, 盛立志, 胡慧君, 鄢秋荣 2012 物理学报 **61** 209702]

Grid-controlled emission source for space X-ray communication*

Ma Xiao-Fei^{1)2)†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Sheng Li-Zhi¹⁾ Liu Yong-An¹⁾
Liu Duo¹⁾²⁾ Deng Ning-Qin³⁾

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 100049, China*)

3) (*School of Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 23 January 2014; revised manuscript received 22 April 2014)

Abstract

Using X-ray as carrier signal to realize the high rate information transmission in a distant space is attracting the attention of researchers. The development of this technology has a positive significance for broadening the scope of use of the electromagnetic spectrum. In this paper, the novel grid control X-ray source, which consists of a traditional X-ray tube and a signal control grid, is designed to meet the requirements of X-ray communication in the simulation vacuum experimental system by means of three-dimensional electromagnetic simulation software CST particle studio. The tube potential distribution, electron trajectory, actual focal spot and the number of electrons at the anode are simulated by the computer simulation software. It works by changing the grid voltage to control the X-ray pulse emission. The data of the simulation are as follows. The actual focal spot size is $0.4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, the effective gate-on voltage is 0 V , and the gate-off voltage is -10 V . X-ray tube grid-controlled characteristics are tested in experiment. The test results are well consistent with the simulation results. Finally, the digital signal transmission is successfully implemented in the X-ray vacuum experiment system.

Keywords: grid control X-ray source, focal spot size, modulation potential, digital signal transmission

PACS: 07.85.Fv, 42.79.Sz

DOI: [10.7498/aps.63.160701](https://doi.org/10.7498/aps.63.160701)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11103069, 61007017).

† Corresponding author. E-mail: cxdmf@126.com