

doi:10.3788/gzxb20174611.1106002

空间带电粒子对 X 射线通信信噪比的影响

李瑶^{1,2}, 苏桐^{1,2}, 盛立志¹, 强鹏飞^{1,2}, 徐能^{1,2,3}, 李林森^{1,2,4}, 赵宝升¹

(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 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049)

(4 西安交通大学 理学院, 西安 710049)

摘 要:针对空间粒子环境对 X 射线通信系统的影响, 分析了空间带电粒子, 尤其是高能电子与 X 射线通信的收发天线——多层嵌套式 X 射线聚焦光学相互作用产生荧光 X 射线的过程; 使用蒙特卡洛软件 MCNP 仿真了电子与聚焦光学相互作用, 产生荧光 X 射线光子的量子效率; 建立了电子枪与多层嵌套式 X 射线聚焦光学相互作用的数学模型并搭建相关实验平台, 使用具有高能量分辨率的硅漂移探测器实测了荧光 X 射线的数量和能量分布, 计算了荧光 X 射线光子对 X 射线通信系统信噪比的影响. 实验与计算结果表明: 在入射电子流量为 1×10^8 cps/cm²/s 量级, 能量 1~20 keV 时, X 射线通信系统的信噪比优于 15.1 dB. 多层嵌套式 X 聚焦光学可以有效地滤除空间电子对 X 射线通信的干扰, 提高信号增益.

关键词: X 射线通信; 聚焦光学; 信噪比; 电子枪; 荧光谱线

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1106002-7

Effects of Spatial Electrons on Signal-Noise-Ratio of a X-ray Communication System

LI Yao^{1,2}, SU Tong^{1,2}, SHENG Li-zhi¹, QIANG Peng-fei^{1,2}, XU Neng^{1,2,3},
LI Lin-sen^{1,2,4}, ZHAO Bao-sheng¹

(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 Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(4 School of Sciences, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A model of electron interacting with nested X-ray focusing optics was designed firstly. Then the process of electrons interacting with coating material of X-ray focusing optics and the quantum efficiency of X-ray source by using a Monte Carlo N Particle transport code was analyzed. Simulation results accord well with the analyze results. Finally, a silicon drift detector, which has an energy resolution of 125 eV was used to analysis the energy spectrum in the focal point. In the detecting part, X-ray photons are composed of two parts, signal photons generated by the X-ray source and noisy X-ray photons generated from nested X-ray focusing optics' coating material. According to different conditions of X-ray source and electron gun voltage, the number of signal photon, noisy photon and signal to noise ratio of the X-ray communication demonstration system then can be calculated. Experiment and calculate results show that nested X-ray focusing optics can effectively filter spatial particles, which will optimize the

基金项目: 国家自然科学基金(No.61471357), 中国科学院“西部之光”基金资助

第一作者: 李瑶(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 X 射线通信. Email: liyao@opt.cn

通讯作者: 强鹏飞(1987—), 男, 研究实习员, 博士研究生, 主要研究方向为 X 射线聚焦光学. Email: qiangpengfei@opt.ac.cn

导 师: 赵宝升(1959—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为单光子探测. Email: open@opt.ac.cn

收稿日期: 2017-05-10; 录用日期: 2017-07-27

<http://www.photon.ac.cn>

signal to noise ratio of X-ray communication system. When the number of incident electrons is about 1×10^8 counts per second with an energy distribution from 1~20 keV, signal to noise ratio of the X-ray communication demonstration system can reach at least 15.1 dB. These results will provide foundations for optimizing the core parameters of X-ray communication system in the future.

Key words: X-ray communication; Focusing optics; Signal to noise ratio; Electron gun; Fluorescence

OCIS Codes: 060.2605; 140.2600; 040.7480

0 引言

随着航天事业的发展,空间探测任务不断增加,如何准确无误地传递信号成为空间通信中所面临的主要难题.空间 X 射线通信是一种以 X 射线光子为载体传递信息的形式,可用于低真空近地轨道和高真空宇宙空间中数据传输.相对于无线电、微波、可见光、紫外通信而言,X 射线通信具有大信道容量、单光子能量高、频率高、粒子性强的特点,有望在在穿透空间等离子体区,电磁屏蔽干扰环境,黑障区通信等特殊场合的通信发挥重要作用,因此受到人们的极大的关注^[1-2].

空间 X 射线通信中,X 射线源发散角大,信号的几何衰减严重,通信距离严重受限,通过在 X 射线通信中引入“收发天线”——X 射线聚焦光学,能有效的提高通信核心参数.“发射天线”将 X 射线源发射的信号汇聚成发散角很小的准平行光束,由“接收天线”将 X 射线光子聚焦到探测器上,实现远距离的信号传输.常用的 X 射线聚焦光学包括:龙虾眼聚焦光学,X 射线毛细管透镜和 Wolter 型聚焦光学.龙虾眼聚焦光学视场大但聚焦效率低,加工难度大;X 射线毛细管透镜视场小,聚焦效率低;Wolter 型聚焦光学聚焦效率高,加工难度低.同时,在 X 射线通信中只考虑能量收集而不考虑成像,采用单次反射型 Wolter I 型聚焦光学可有效的提高信号增益,故基于 Wolter I 型聚焦光学原理的多层嵌套式聚焦光学(Nested X-ray Focusing Optics, NXFO)是空间 X 射线通信收发天线最佳的选择^[3-4].如美国 NASA 将于 2017 年发射的中子星探测计划中采用 56 个基于 Wolter I 透镜原理的 NXFO 阵列,计划 2018 年在国际空间站上使用 NavCube 计算平台调制 X 射线源,实现空间 X 射线通信演示实验^[5-6].

空间 X 射线通信系统工作在宇宙环境中,空间粒子不可避免的会对通信器件和通信指标产生影响.国外对空间辐射环境的探测持续了约 30 年,综合了 28 个卫星的探测结果,将辐射模型从最初的 AE1、AP1 发展到 AE8、AP8^[7-8].银河系宇宙射线来源于太阳系以外的带电粒子流,主要成分为 α 粒子,重核和高能质子,能量范围为 $10^5 \sim 10^{17}$ keV,粒子通量 $2 \sim 4$ cm²/s.这些粒子能量很高,难以屏蔽,但考虑到极低的粒子通量和具有高能量分辨率的硅漂移 X 射线探测器(Silicon Drift Detector, SDD)响应范围,对探测器端的噪声贡献影响不大^[9-10].空间环境中的电子大部分通量约 1×10^8 cps/cm²/s 量级,能量范围 1~20 keV^[11-12],空间高能电子与 X 射线聚焦光学相互作用时,会产生聚焦光学镀膜材料的荧光 X 射线,这部分荧光 X 射线做为噪声叠加到 X 射线通信的信号中,将影响 X 射线通信系统的信噪比,因此有必要标定其对 X 射线通信指标的影响.

本文分析了空间电子与 NXFO 镀膜材料的相互作用过程,使用蒙特卡洛软件仿真了产生荧光 X 射线光子的量子效率和数目,使用 SDD 探测器实测了不同能量的入射电子与 NXFO 相互作用的结果,计算了荧光 X 射线光子对通信系统信噪比的影响,为 X 射线通信的空间应用奠定了一定的理论与实验基础.

1 电子与聚焦光学的作用模型

1.1 电子与聚焦光学的作用机理

荧光 X 射线的产生原理与电子打靶式 X 射线源相同,即电子入射到金属阳极靶材,受阳极中原子核库伦场的作用而骤然减速,此时伴随产生的辐射称为韧致辐射^[13-14].由于电子速度连续变化,因此产生随机分布的连续谱,其最短波长 λ_0 与阳极材料无关,只与电子的加速电压 V_a 有关,如式(1)

$$\lambda_0 = [1.24/V_a(\text{kV})]\text{nm} \quad (1)$$

同时,韧致辐射的连续谱强度 I 与电子束的加速电压 V_a ,电子束电流 I_a 及阳极靶的原子序数 Z 之间可由式(2)表示

$$I \propto I_a Z V_a^m \quad (2)$$

式(2)中 m 为常数, $m \approx 2$, 韧致辐射产生连续谱的最大强度位于 $1.5\lambda_0$ 处. 当入射电子的能量高于某临界值时, 除连续谱外, 电子将靶物质的原子深层的电子击出原子外, 出现与金属阳极靶材料有关特定波长的谱线, 称为特征谱, 通常连续谱所占光子数远远大于特征谱^[15-16].

当空间中的高能电子与 NXFO 镜片上的金属膜作用后, 将会产生包含韧致谱和特征谱两部分的荧光 X 射线, 被聚焦光学聚焦后, 与 X 射线源所产生的光子叠加到聚焦光学的焦平面处, 共同使探测器产生响应^[17-18], 其原理如图 1.

此时, 荧光 X 射线对空间 X 射线通信系统信噪比的影响可以由式(3)表示为

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{noise}}} \right) \text{ (dB)} \quad (3)$$

式(3)中, N_{noise} 为噪声光子总数, 来源于空间高能电子与 NXFO 的镀膜材料作用后产生的荧光 X 射线, 包括连续谱和特征谱两部分; N_{signal} 表示信号光子数, 由 X 射线源出射的信号光子组成; 在空间应用中, 考虑到空间 X 射线通信系统的工作环境, 有必要标定空间电子对整个通信系统信噪比的影响程度.

1.2 电子与聚焦光学相互作用的仿真

为了确定空间环境中高能电子与聚焦光学镀膜材料相互作用, 产生的噪声 X 射线光子数目, 通过使用基于耦合中子、光子、电子输运问题的蒙特卡罗软件 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code)^[19-21], 建立电子与聚焦光学镀膜材料作用的蒙特卡罗模型, 仿真电子产生荧光 X 射线光子的量子效率, 从而计算荧光 X 射线光子数目, 如式(4)所示为

$$N_{\text{noise}} = N_e \cdot \eta_e \quad (4)$$

式(4)中, N_e 为与 NXFO 作用的总电子数目, 由进入 NXFO 视场范围内的高能电子数目所决定, N_{noise} 是空间高能电子与 NXFO 镀膜材料作用后的荧光 X 射线光子数, η_e 为电子与聚焦光学作用产生荧光 X 射线光子时的量子效率^[22-23], 与入射电子能量和 NXFO 的镀膜材料有关. 仿真条件为入射电子流量 1×10^8 cps/cm²/s, 电子能量为 5 keV、10 keV、15 keV 和 20 keV, 镀膜材料为 Ir, 电子源距离聚焦光学 20 cm, 探测器位于聚焦光学的焦平面处, 通过使用 MCNP 的 F1 计数卡可统计出不同入射电子能量下产生荧光 X 射线光子数目, 如表 1.

如图 2, 仿真表明, 不同能量的入射电子与 NXFO 的 Ir 膜材料相互作用, 产生荧光 X 射线光子的量子效率 η_e 在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级左右, 趋势为先增后减. 由于入射电子最高能量 20 keV, 无法打出 Ir 的特征谱线, 因此只有连续谱^[24]. MCNP 软件在计算电子光子耦合模型时, 其能量范围在 1 keV ~ 1 000 MeV 之间, 故产生的荧光 X 射线能量起始点在 1 keV 处.

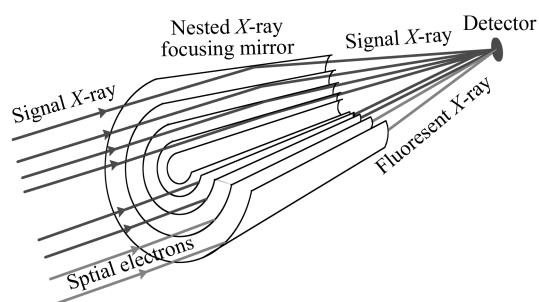


图 1 空间电子对 X 射线通信影响的原理图

Fig.1 The schematic of space electrons impact on XCOM

表 1 不同入射电子能量下 MCNP 仿真与理论计算的荧光 X 射线光子数目

Table 1 The number of fluorescent photons against MCNP simulation and mathematical calculation

Incident electron energy	MCNP Simulation
5 keV	441
10 keV	1 257
15 keV	2 039
20 keV	2 806

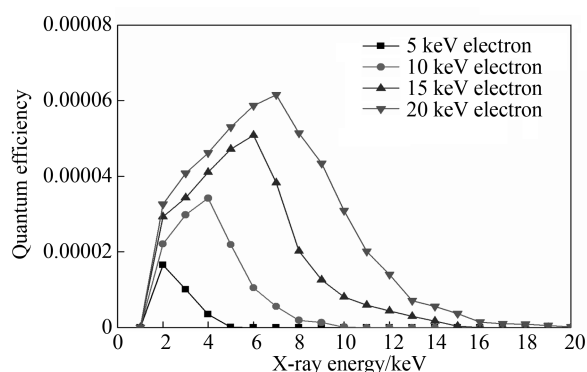


图 2 不同能量电子与 Ir 膜作用时产生 X 射线光子的量子效率

Fig.2 The quantum efficiency of various energy electron interact with Ir target

2 实验与计算

2.1 荧光 X 射线光子数的测试

在建立了空间电子与聚焦光学相互作用的 MCNP 仿真模型后,为了确定真实环境下,空间电子产生的荧光 X 射线光子数目,搭建电子枪与聚焦光学作用的实验系统.如图 3,X 射线源距离电子枪 $L_1=20\text{ cm}$,电子枪工作在肖特基模式下,距聚焦光学 $L_2=20\text{ cm}$,电子枪焦斑直径 80 mm ,电子枪出射口束流约 $1\times 10^8\text{ cps/cm}^2/\text{s}$ 量级,电子枪出瞳直径为 10 mm ,NXFO 的镀膜材料为 Ir,直径 $\phi 100\text{ mm}$.X 射线源阳极靶材为钨,阳极高压分别为 5 keV 、 10 keV 、 15 keV ,灯丝电流 2.1 A ,SDD 探测器的采集时间为 300 s ,NXFO 距 SDD 探测器为 $L_3=1\text{ 050 mm}$,SDD 探测器为 Amptek 公司的 XR-100 型,能量响应范围 $1\sim 30\text{ keV}$,能量分辨率为 125 eV ,在 $1\sim 20\text{ keV}$ 能段的探测效率接近 1.

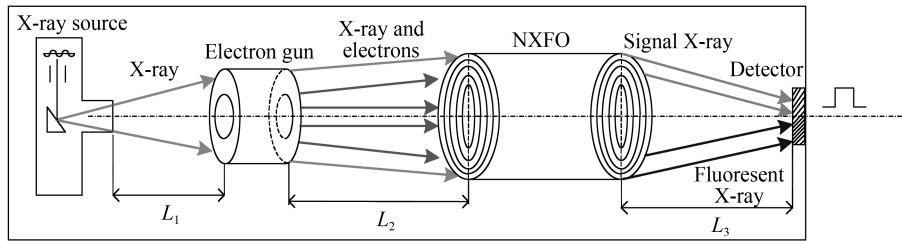


图 3 电子枪与聚焦光学作用实验图

Fig.3 The Schematic diagram of electron gun affect focusing optics

当真空系统中无聚焦光学且关闭 X 射线源,电子枪出射电子能量分别为 5 keV 、 10 keV 、 15 keV 、 20 keV 时,产生的能谱如图 4(a).在同样条件下,放置 NXFO,使用 SDD 探测器在 NXFO 的焦平面处探测,产生的能谱如图 4(b).

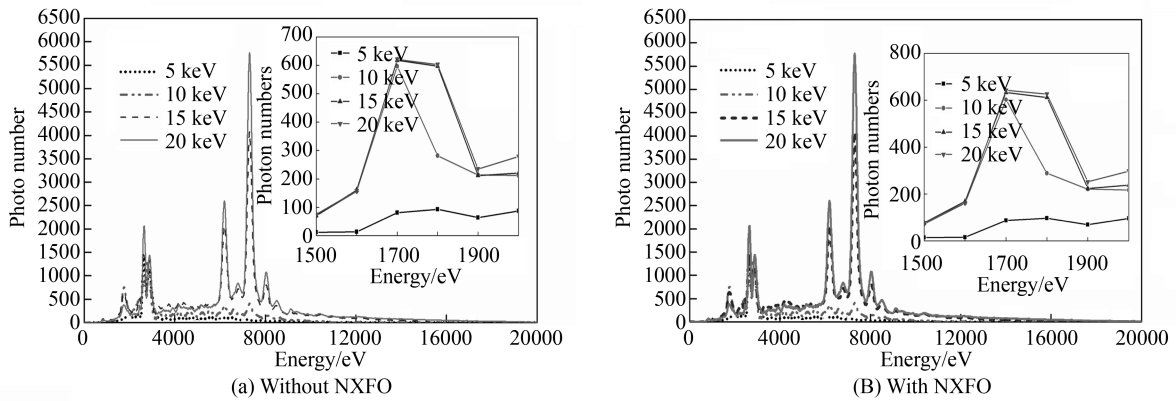


图 4 真空系统中电子枪与无和有聚焦光学作用能谱图

Fig.4 The energy distribution of electron source interact without and with NXFO

图 4(a)和(b)两者对比后,在相同入射电子能量下所探测的总光子数相减可滤除管壁所产生的背景噪声,求出在引入聚焦光学前后,不同能量的入射电子只与 NXFO 作用所产生的荧光 X 射线光子数,如表 2.

从表 2 中可以看出,实测出不同能量下,电子与 NXFO 的 Ir 膜相互作用,产生的荧光 X 射线光子数目与表 1 中的仿真结果在同一量级,且随着入射电子能量的增大而增加,这与 MCNP 的仿真结果基本一致,即空间带电粒子产生的荧光 X 射线光子约在 $10^2\sim 5\times 10^3$ 量级之间.

表 2 不同电子枪能量下聚焦光学产生的荧光 X 射线光子数目

Table 2 The number of spectrum X-ray photons versus different electron energy

Incident electron energy	The number of fluorescence X-ray
5 keV	356
10 keV	1 011
15 keV	3 463
20 keV	4 953

2.2 X 射线通信系统信噪比的测试计算

为了确定在 X 射线源高压不变时,不同能量的入射电子与聚焦光学作用,产生荧光 X 射线对通信系统信噪比的影响,设计如下实验:

1) 当 X 射线源阳极高压 5 kV,电子枪出射电子能量分别为 0 keV、5 keV、10 keV、15 keV、20 keV,电子枪出射的高能电子撞击在 NXFO 的金属 Ir 膜后所产生的荧光光子,被探测器所接收,将其看做空间带电粒子所引入的噪声光子;而将只开 X 射线源,无电子枪作用时,探测器所接收的 X 射线光子认为是信号光子.故整个通信系统的信噪比如表 3.

表 3 不同电子能量时产生的噪声光子数与信噪比(X 射线源高压 5 kV)

Table 3 The noise photons and SNR against different electron energy (5 kV X-ray anode voltage)

Electron gun voltage	Total photon numbers	Increase of the total photon numbers	SNR
0 kV	160 019	/	/
5 kV	165 397	5 378	26.5 dB
10 kV	277 509	112 132	22.0 dB
15 kV	547 666	270 157	16.6 dB
20 kV	551 619	3 953	15.1 dB

X 射线源阳极高压保持 5 kV 不变,随着电子枪高压增加,噪声光子数增加,通信系统信噪比降低.当电子枪高压从 10 kV 增加到 15 kV 时,总光子数增幅最大,其原因是产生了真空管道管壁材料的多种荧光谱线(如 Fe 的 $k\alpha$ 和 $k\beta$ 谱线, Ni 和 Cu 的 $k\alpha$ 谱线),电子枪高压从 15 kV 增加到 20 kV 时,总光子数增幅较小,其原因是此时电子能量无法产生新的谱线.

2) 当 X 射线源高压为 10 kV 保持不变,电子枪出射电子能量分别为 0 keV、5 keV、10 keV、15 keV、20 keV 时,不同能量的电子与 NXFO 相互作用,整个 X 射线通信系统的信噪比如表 4.

表 4 不同电子能量时产生的噪声光子数与信噪比(X 射线源高压 10 kV)

Table 4 The noise photons and SNR against different electron energy (10 kV X-ray anode voltage)

Electron gun voltage	Total photon numbers	Increase of the total photon numbers	SNR
0 kV	1 798 937	/	/
5 kV	1 804 334	5 397	37.0 dB
10 kV	1 915 367	111 033	32.5 dB
15 kV	2 190 039	274 672	27.1 dB
20 kV	2 194 091	4 052	25.6 dB

与表 3 相比,10 kV 的 X 射线源高压所产生的 X 射线光子数是 5 kV 的 11.25 倍,信号光子数总量较多,单独电子枪电压变化引入的荧光 X 射线光子所占比重相对较小,故此时整个 X 射线通信系统的信噪比高于 X 射线源阳极高压 5 kV 的情况.

3) 当 X 射线源阳极高压 15 kV 时,电子枪出射不同能量的电子与 NXFO 相互作用,整个 X 射线通信系统的信噪比如表 5.

表 5 不同电子能量时产生的噪声光子数与信噪比(X 射线源高压 15 kV)

Table 5 The noise photons and SNR against different electron energy (15 kV X-ray anode voltage)

Electron gun voltage	Total photon numbers	Increase of the total photon numbers	SNR
0 kV	4 767 833	/	/
5 kV	4 773 214	5 381	41.3 dB
10 kV	4 886 415	113 201	36.5 dB
15 kV	5 158 762	272 347	31.4 dB
20 kV	5 162 833	4 107	29.8 dB

对 15 kV 阳极高压的 X 射线源而言,信号光子数分别是 5 kV 的 29.8 倍和 10 kV 的 2.65 倍,X 射线通信系统信噪比最高可达 41.3 dB.同时,在不同 X 射线源阳极高压下,电子源的高压变化量相同量时,噪声光子数的增幅保持基本恒定,其原因是噪声光子与信号光子在整个系统中只是叠加的关系.因此,提高 X 射线源的阳极高压可以有效地提高 X 射线源出射光子的能力,减小荧光 X 射线对系统信噪比的影响.

同时,为了探究不同阳极高压和入射电子能量下,探测器所接收的 X 射线能谱分布,测试了不同能量电子与聚焦光学系统相互作用的能谱如图 5.

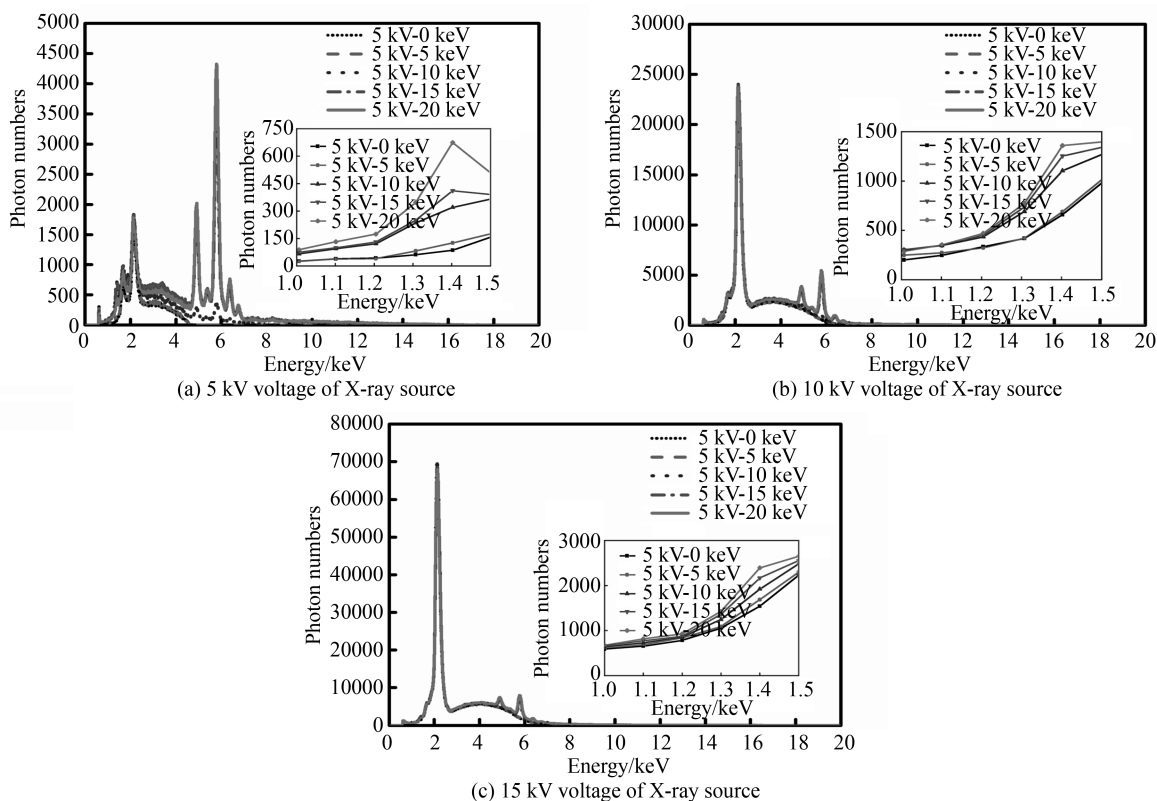


图5 不同电子枪电压与不同高压 X 射线源共同叠加产生光子数

Fig.5 The photons distribution of different electron interact various X-ray source

图 5(a)中,当 X 射线源的阳极高压为 5 kV,电子枪出射电子能量分别是 0 keV,5 keV,10 keV,15 keV,20 keV 时,能谱中 2.2 keV~2.6 keV 的峰值分别对应 Mo 靶的 L 系谱线,这是由 X 射线源本身的特性所决定的,6.44 keV 和 7.06 keV 处的峰值分别为 Fe 的 α 谱线和 β 谱线,7.4 keV 处峰值是 Ni 的 α 谱线,8.1 keV 处为 Cu 的 α 谱线,均为电子撞击到真空管道系统的管壁上(不锈钢材料)所产生的荧光谱线,而在真实空间应用中,无需使用真空管道模拟空间环境,因此均无管壁荧光谱线项的干扰.图 5(b)和(c)中,随着 X 射线源阳极高压的增加,信号光子数增幅较大,管壁材料的特征谱不在明显,表现为连续谱上的若干个小尖峰.因此,考虑到实际空间应用中,对整个通信系统而言,荧光 X 射线对信噪比的影响较小.

综合以上仿真与实验数据,可以看出,随着 X 射线源阳极高压增加,信号 X 射线光子数大幅度增加,15 keV 高压的 X 射线源出射能力是 5 kV 时的 29.8 倍,整个 X 射线通信系统的信噪比有较高的提升,最高可达 41.3 dB.当 X 射线源的阳极高压不变,入射电子能量增加时,噪声光子数有所增加,但系统信噪比始终优于 15.1 dB.此外,在不同 X 射线源阳极高压下,电子源的高压变化量相同量时,噪声光子数的增幅保持恒定.

3 结论

分析了电子与聚焦光学镀膜材料的作用机理,仿真了电子与聚焦光学作用产生 X 射线光子的量子效率,实测不同能量的电子与多层嵌套式 X 射线聚焦光学的相互作用过程,计算了聚焦光学镀膜材料 Ir 产生的荧光谱线对 X 射线通信信噪比的影响.理论仿真与实验表明,空间高能电子与 NXFO 的镀膜材料作用,产生荧光 X 射线的量子效率在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 量级,荧光 X 射线光子数在 $3.5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^3$ 之间.X 射线源的发射能力是影响通信信噪比的主要因素,而 NXFO 作为 X 射线通信的收发天线能有效的滤除空间带电粒子的干扰,使整个通信系统保持较高的信噪比;若通信速率 10 kbps 时,NXFO 镀膜材料所产生的噪声光子数将小于 0.5 cps;下一步拟从优化 X 射线源的光子发射能力,使用多层膜代替现有的单层膜两个部分入手,进一步提高 X 射线通信系统的通信指标,为空间 X 射线通信的应用奠定基础.

参考文献

- [1] DENG Ning-qin, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* A space audio communication system based on X-ray[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(06): 106-112.
邓宁勤,赵宝升,盛立志,等. 基于 X 射线的空间语音通信系统[J]. 物理学报,2013,**62**(6):106-112.
- [2] SONG Shi-bing, XU Lu-ping, ZHANG Hua, *et al.* Novel X-ray communication based XNAV augmentation method using X-ray detectors[J]. *Sensors* 2015, **15**(9): 22325-22342.
- [3] LIU Duo, QIANG Peng-fei, LI Lin-sen, *et al.* X-ray focusing optics and its application in X-ray communication system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(1): 63-68.
刘舵,强鹏飞,李林森,等. 一种 X 射线聚焦光学及其在 X 射线通信中的应用[J]. 物理学报,2016,**65**(1):63-68.
- [4] WOLTER H. Mirror systems with glancing incidence on image producing optics for X-rays[J]. *Annals of Physics*, 1952, **94**(10): 866-875.
- [5] NASA's goddard space flight center[EB/OL]. <https://phys.org/news/2016-11-nasa-navcube-x-ray-space.html>, 2016-11-4.
- [6] LI Huan, TANG Xiao-bin, HUANG Shuang, *et al.* Potential application of X-ray communication through a plasma sheath encountered during spacecraft reentry into earth's atmosphere[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**: 123101.
- [7] GUO Le-hui, TIAN Jin-shou, LU Yu, *et al.* Optimization of the 3-inch photomultiplier tube for the neutrino detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(22): 305-316.
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):305-316.
- [8] CUI Huai-yu, ZHAO Yong-peng, JIANG Shan, *et al.* Experiment of Si target ablation with soft X-ray laser operating at a wavelength of 46.9 nm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **46**(1): 20-24.
- [9] DEGTYAREVA, VALENTINA P, *et al.* Femtosecond streak tubes designing, manufacturing, and testing[J]. *SPIE*, **4948**(2002): 281-290.
- [10] FANG Mei-hua, WEI Zhi-yong, ZHANG Zi-xia, *et al.* Micro-track structure analysis for 100 MeV Si ions in CR-39 by using atomic force microscopy[J]. *Chinese Physics B*, 2013, **22**(11): 436-439.
- [11] CHEN Yi-feng, YANG Sheng-sheng, LI De-tian, *et al.* Influences of secondary Emission and back scattered electrons on spacecraft surface charge potential[J]. *Modern Applied Physics*, 2104, **5**(03): 223-226.
陈益峰,杨生胜,李得天,等. 二次电子和背散射电子发射对卫星表面电位的影响[J]. 现代应用物理,2014,**5**(03):223-226.
- [12] 马晓飞. 基于空间 X 射线通信的脉冲发射源研究[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2014.
- [13] ZSCHORNACK, *et al.* Handbook of X-Ray Data[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [14] TIAN Jin-shou, BAI Yong-lin, LIU Bai-yu, *et al.* Design of a femtosecond streak tube[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1832-1836.
田进寿,白永林,刘百玉,等. 飞秒条纹变像管的设计[J]. 光子学报,2006,**35**(12):1832-1836.
- [15] JABLONSKI, D. G. The information-theoretic limits for the performance of X-ray source based navigation (Xnav) and X-ray communication (Xcom) [J]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009: 1458-1466.
- [16] RINAURO S, S. COLONNESE G. SCARANO, *et al.* Fast near-maximum likelihood phase estimation of X-ray pulsars [J]. *Signal Processing*, 2013, **93**,1: 326-331.
- [17] 王凯歌. 微束斑 X 射线源的理论实验研究[D]. 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2002.
- [18] ZHAO Bao-sheng, SU Tong, LIU Duo, *et al.* Conspectus of space X-ray communication[M]. *Beijing: Science Press*, 2016.
赵宝升,苏桐,刘舵,等. 空间 X 射线通信概论[M]. 北京:科学出版社,2016.
- [19] QIANG Peng-fei, LI Lin-sen, LIU Duo, *et al.* Grid control electron gun with multiple focusing electrode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0423005.
强鹏飞,李林森,刘舵,等. 多聚焦极栅控电子模拟源的研究[J]. 光子学报,2016,**45**(4):0423005.
- [20] LIU Duo, QIANG Peng-fei, LI Lin-sen, *et al.* Multi layer nested X-ray focusing optical device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016(8): 318-325.
刘舵,强鹏飞,李林森,等. 多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件[J]. 光学学报,2016(8):318-325.
- [21] TALEEI R, SHAHRIARI M. Monte Carlo simulation of X-ray spectra and evaluation of filter effect using MCNP4C and FLUKA code.[J]. *Applied Radiation & Isotopes*, 2009, **67**(2): 266-271.
- [22] SU Zhe, XU Lu-ping, WANG Ting. X-ray pulsar-based navigation semi-physical simulation experiment system.[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(11): 819-826.
苏哲,许录平,王婷. X 射线脉冲星导航半物理仿真实验系统研究[J]. 物理学报,2011,**60**(11):819-826.
- [23] AY M R, SHAHRIARI M, SARKAR S, *et al.* Monte carlo simulation of X-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using MCNP4C[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2004, **49**(21): 4897-4917.
- [24] TROJEK T, CECHAK T. Use of MCNP code in energy dispersive X-ray fluorescence[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2007, **263**(1): 72-75.