

一种X射线聚焦光学及其在X射线通信中的应用

刘舵 强鹏飞 李林森 苏桐 盛立志 刘永安 赵宝升

X-ray focusing optics and its application in X-ray communication system

Liu Duo Qiang Peng-Fei Li Lin-Sen Su Tong Sheng Li-Zhi Liu Yong-An Zhao Bao-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 010703 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.010703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于太赫兹光非对称解复用器结构的低开关能量、高线性度全光采样门实验研究

Experimental study on a low switching energy and high-linearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer

物理学报.2015, 64(15): 154213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154213>

复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的设计研究与性能分析

Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication

物理学报.2015, 64(12): 124212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124212>

基于注入锁定法布里-珀罗激光器的光学双稳态及光存储研究

Optical bistability and optical storage based on injection locked Fabry-Perot semiconductor laser

物理学报.2015, 64(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044204>

结构参数对串联微环谐振腔编解码器性能的影响

Study of structure parameters effect on performance of optical en/decoder based on parallel-cascaded microring resonators

物理学报.2015, 64(3): 034218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034218>

基于谐波拟合产生周期性三角形光脉冲串的实验研究

Experimental demonstration on triangular-shaped pulse train generation based on harmonic fitting

物理学报.2014, 63(15): 154210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154210>

## 一种X射线聚焦光学及其在X射线通信中的应用\*

刘舵<sup>1)2)</sup> 强鹏飞<sup>1)</sup> 李林森<sup>1)2)</sup> 苏桐<sup>1)</sup> 盛立志<sup>1)</sup> 刘永安<sup>1)</sup> 赵宝升<sup>1)†</sup>

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)

(2015年7月29日收到; 2015年9月15日收到修改稿)

基于栅控脉冲发射X射线源与单光子探测技术的X射线通信已经实现了实验室语音通信验证, 并对通信系统的误码率性能进行了分析, 为探索未来X射线深空应用打下了坚实的基础. 针对目前X射线通信面临的信号发散角大、通信距离短、难以实现工程化应用的情况, 迫切需要对X射线通信天线系统进行深入研究. 为了提高信号增益、增大X射线通信的距离, 提出了多层嵌套式X射线聚焦光学作为X射线通信的“收发天线”, 理论分析了X射线聚焦光学用于X射线通信“收发天线”的可行性, 分析了X射线聚焦光学的理论基础与结构设计, 对“发射天线”发散角、“接收天线”有效面积与焦斑尺寸、信号增益等性能做了探讨. 结果表明: 在信号发射端, “天线”的发散角为3 mrad左右, 发射增益23 dB; 在信号接收端, “接收天线”的有效面积 $5700 \text{ mm}^2$ @1.5 keV, 焦斑直径为4.5 mm, 接收增益为25 dB, 通信系统总的增益可达48 dB.

关键词: X射线通信, X射线聚焦光学, 通信天线, 信号增益

PACS: 07.85.-m, 42.79.Sz, 84.40.Ba

DOI: 10.7498/aps.65.010703

## 1 引言

X射线是一种波长极短(0.01—10 nm)、频率极高(大于 $10^{18}$  Hz)的电磁波<sup>[1]</sup>, 近年来随着通信技术的发展, 各波段的频率资源日趋紧张, 因此, 将通信波段由无线电波扩展到波长更短的可见光甚至X射线波段成为新的选择.

X射线通信作为一种新型的通信方法, 是现有通信方法的重要补充, 具有重大的应用前景. 2007年, 美国国家航空航天局(NASA)戈达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center)的天体物理学专家Gendreau博士<sup>[2]</sup>首次提出了X射线空间通信的概念, 并计划于2017年开展空间试验. 中国科学院西安光学精密机械研究所赵宝升团队<sup>[3]</sup>在多年来X射线脉冲星导航研究的基础上, 于2011年针对深空通信及X射线的特点提出一种新型构架的X射线空间通信方法; 且在提出后不久就成功搭建起X射线通信实验室演示系统, 实现了实验室条

件下的优于20 kbit/s的X射线的语音通信系统<sup>[4]</sup>; 随后进行了在不同通信速率下误码率的测量, 研究了发射源功率、通信速率、误码率之间的关系, 得到了系统在开关键控调制方式下的误码率为 $10^{-4}$ 量级<sup>[5]</sup>.

目前, 国内外对X射线通信的研究面临着通信距离短, 无法达到工程化应用的共同难题. 由于X射线源发散角大, 信号的几何衰减严重, 通信距离受到限制, 严重制约着X射线通信的发展与应用, 因此, 研究增大X射线通信信号增益的“收发天线”至关重要. X射线聚焦与准直器件主要有X射线毛细管透镜与多层嵌套式X射线聚焦光学, X射线毛细管透镜主要应用于同步辐射等领域<sup>[6]</sup>, 多层嵌套式X射线聚焦光学由于有效面积大、聚焦能力强, 不仅应用于X射线天文观测, 同时具有在X射线通信领域应用的潜力. 本文经理论分析, 论证了X射线聚焦光学作为X射线通信“天线”的可行性, 对聚焦光学进行了初始参数设定与结构设计, 并对

\* 国家自然科学基金(批准号: 61471357)和中国科学院“西部之光”基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [open@opt.ac.cn](mailto:open@opt.ac.cn)

其发散角与增益性能进行了分析. 结果表明, 多层嵌套式 X 射线聚焦光学用于 X 射线通信的“收发天线”可以有效提高信号增益, 大大增加通信距离.

## 2 X 射线通信“天线”系统原理

与无线光通信系统类似, X 射线通信天线系统同样包括“发射天线”和“接收天线”, 其作用是对光束进行准直、扩束和汇聚、接收, 相当于一个望远镜系统<sup>[7]</sup>. 由于 X 射线特殊的物理性质, 无法采用传统的光学望远镜, 只能采用特殊方法进行准直与聚焦. 近年来, 在 X 射线天文学上应用较多的是 Wolter 型望远镜<sup>[8]</sup>, 该望远镜采用多层嵌套式结构, 入射 X 射线经过抛物面与双曲面两次反射后汇聚于焦点处. Wolter 透镜主要用于 X 射线望远镜成像领域, 对镜片的加工装配等工艺具有极高的要求<sup>[9]</sup>. 在 X 射线通信中, 对成像没有任何要求, 只对 X 射线进行聚能, 因此可以对 Wolter 透镜进行适当改进. 利用图 1 的结构, 与 Wolter 透镜相比, 采用单次反射不仅可以减少能量损失, 提高 X 射线聚焦效率, 还可以减少镜体长度、减轻重量, 有利于空间应用的轻量化与小量化<sup>[10]</sup>.

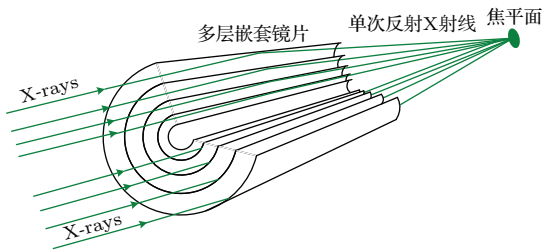


图 1 多层嵌套式 X 射线聚焦光学示意图

Fig. 1. Schematic of multilayer nested X-ray focusing optics.

由于 X 射线在介质中的折射率略小于 1, 因此, 当 X 射线以接近 90° 入射到表面足够光滑的反射面时, 就会发生全反射, 此时称入射角的余角  $\theta_c$  为临界掠射角. 多层嵌套式 X 射线聚焦光学就是一种利用 X 射线掠射原理使入射 X 射线聚焦在一定面积上的 X 射线光学器件. 为了增大反射率, 常在镜片表面镀一层金属膜, 金属材料的临界  $\theta_c$  为<sup>[11]</sup>

$$\theta_c = \sqrt{\frac{n_e r_e \lambda^2}{\pi}}, \quad (1)$$

式中,  $n_e$  为介质电子密度,

$$n_e = \frac{\rho}{A_r} N_A Z, \quad (2)$$

其中,  $\rho$  是物质密度,  $N_A$  是阿伏伽德罗常数,  $Z$  是原子序数,  $A_r$  为相对原子量;  $r_e$  为经典电子半径;  $\lambda$  为入射波长.

对于重金属元素,  $Z/A_r \sim 0.5$ , 因此, (1) 式可简化为

$$\theta_c(\text{rad}) = 3.26 \times 10^{-21} \frac{\sqrt{\rho}}{E}. \quad (3)$$

由此可知, X 射线的临界掠射角与材料密度正相关, 与光子能量成反比. 对于能量在几个 keV 的光子来说, 临界掠射角一般在 1° 左右, 由 (3) 式还可以看到, 高  $Z$  值的重金属元素如 Au, Ir 等具有更高的反射率, 因此常在镜片表面镀这些金属薄膜来增加反射率; 需要注意的是, X 射线在金属材料吸收边处的反射率迅速下降, 不同材料对应不同吸收边, 选择镀膜材料应在所需的能量范围内尽量避开材料的吸收边. 对于金属 Ir,  $\rho = 22.5 \text{ g/cm}^3$ , 5 keV 的 X 射线光子在 Ir 膜上的掠射临界角为 1.1°.

## 3 “天线”的设计

要想 X 射线在镜面上发生反射, 实现聚焦, 必须采用掠入射的方式. 由于掠入射角度小, 有效集光面积非常有限, 所以采用多层嵌套式结构以提高有效集光面积. 在进行设计之前先要确定聚焦光学的口径和焦距, 为了兼顾性能与轻量化, 我们将口径确定为 100 mm, 镜长 200 mm, 焦距定为 1050 mm.

镜片设计原理图如图 2 所示.

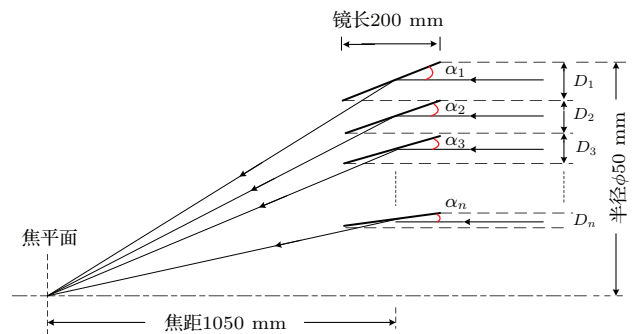


图 2 聚焦光学设计原理图

Fig. 2. Schematic of the design of X-ray optics.

镜片厚度为 0.3 mm, 角度逐层渐变, 由外层向内层角度  $\alpha$  逐渐减小, 从而保证各层镜片共焦点.

反射镜片由外层向内层分别编号 1— $n$ ; 两层反射镜片间距由外层向内层依次是  $D_1, D_2, \dots, D_n$ ; 每层镜片与轴线夹角分别是  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ ;

每层反射镜片反射一定宽度的光束, 光束中心经过焦点.

要求得  $D_1$  及  $\alpha_1$ , 需列方程组如下:

$$\begin{cases} \tan(2\alpha_1) = \frac{50 - D_1/2}{1050}, \\ \sin \alpha_1 = \frac{D_1}{200}. \end{cases} \quad (4)$$

求解方程组, 设  $x = \tan \alpha$ , 有

$$200\sqrt{\frac{1}{1+x^2}}x = 100 - \frac{4200x}{1-x^2}. \quad (5)$$

解得  $x$ , 又由  $x = \tan \alpha$ , 可得  $\alpha_1$ , 继而求得  $D_1$ .

同理, 求第  $n$  层时, 利用公式

$$\tan(2\alpha_n) = \frac{50 - \sum_{n=1}^{n-1} D_n - \frac{D_n}{2} - 0.3(n-1)}{1050}. \quad (6)$$

逐层计算掠射角  $\alpha$  及镜片间距  $D$ , 最后求出入射端掠射面与轴线的距离  $R$  和出射端掠射面与轴线的距离  $r$ .

根据以上设计的多层嵌套式 X 射线聚焦透镜, 由 15 层镜片嵌套, 掠射角范围  $0.27^\circ - 1.30^\circ$ , 由内到外逐层增大, 设计效果图如图 3.

总的几何收集面积为

$$A_n = \sum_{n=1}^{15} \pi(R_n^2 - r_n^2), \quad (7)$$

计算得到聚焦光学总的几何收集面积为  $6900 \text{ mm}^2$ .

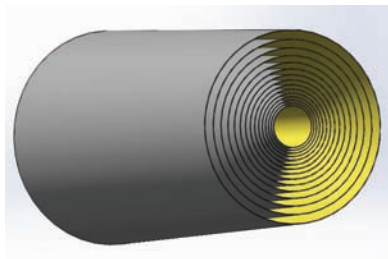


图3 聚焦透镜设计效果图

Fig. 3. Geometric model of multilayer nested X-ray focusing optics.

## 4 “天线”的性能

### 4.1 聚焦效率与有效面积

聚焦效率与有效面积是描述聚焦光学性能的指标, 两者之间具有关联, 聚焦效率即为聚焦光学出射光功率与入射光功率的比值, 有效面积 (effective area) 为几何收集面积与镜片反射率的乘积. 有效面积与几何面积的比值即为聚焦效率. 在信号

发射端, “发射天线”的性能可以用聚焦效率描述, 而在信号接收端则用有效面积描述“接收天线”的性能. 所设计的聚焦光学几何面积为  $7854 \text{ mm}^2$ , 几何收集面积为  $6900 \text{ mm}^2$ , 在聚焦光学口径一定时, 影响几何收集面积的主要因素是反射镜片的厚度, 几何收集面积随着反射镜片厚度增加而减小, 我们采用  $0.3 \text{ mm}$  厚的镜片, 各层镜片截面面积之和在几何面积中占据了  $750 \text{ mm}^2$ , 约为  $10\%$ , 减小镜片厚度可进一步提高几何收集面积, 但是镜片越薄机械强度越差, 因此需合理选择反射镜片厚度. 反射率可根据 (8) 式计算 [12]:

$$R = R_0 \exp \left[ - \left( \frac{4\pi\sigma \sin \theta}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (8)$$

其中,  $R$  为实际反射率,  $R_0$  为表面绝对光滑时的理想反射率,  $\sigma$  为粗糙度的均方根值. 聚焦光学的有效面积为各层几何收集面积与其反射率乘积的总和, 利用 (7) 和 (8) 式来计算聚焦透镜有效面积  $A_E$ . 给出聚焦光学在不同能量入射光下的理论有效面积, 由图 4 可见: 所设计聚焦光学在  $1.5 \text{ keV}$  能量的 X 射线下具有  $5700 \text{ mm}^2$  的有效面积; 在  $4.5 \text{ keV}$  能量的 X 射线下具有  $2500 \text{ mm}^2$  的有效面积. 事实上, 由于聚焦光学制作工程中装配误差等因素的影响, 实际应用中聚焦光学的有效面积将小于理论值.

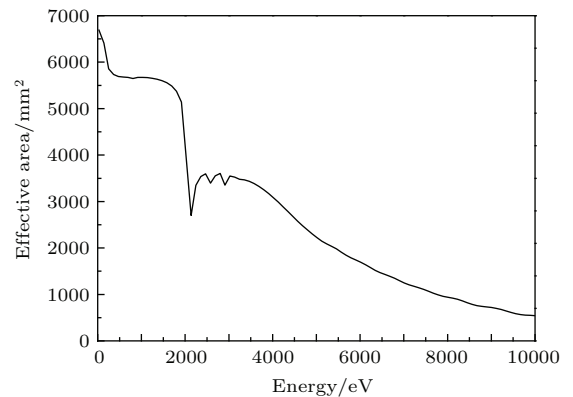


图4 X 射线聚焦光学理论有效面积

Fig. 4. Ideally effective area of X-ray focusing optics.

利用光线追迹软件对所设计的聚焦光学进行光线追迹, 由图 5 可以看到, 平行光束经过聚焦光学后汇聚在焦平面, 焦斑直径为  $4.5 \text{ mm}$ .

对于有效面积相同的聚焦光学, 较小的焦斑可以使用面积较小的半导体探测器, 从而大大降低成本.



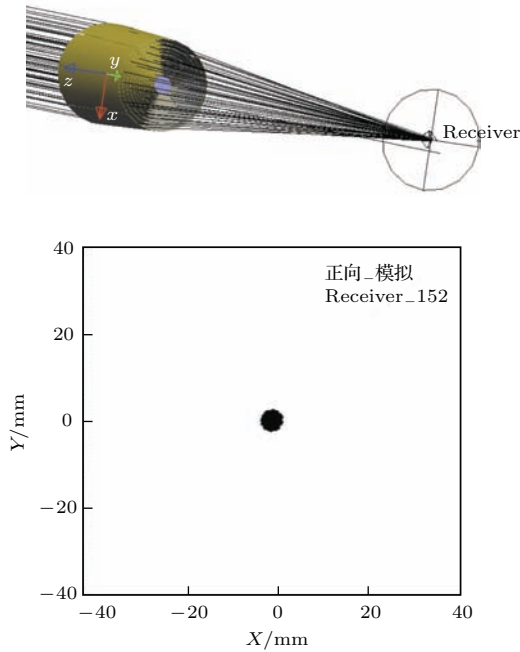


图5 聚焦光学光线追迹结果

Fig. 5. Ray tracing of X-ray focusing optics.

## 4.2 “天线”增益

X射线聚焦光学作为X射线通信的“接收天线”，反向使用即为准直光学，可作为“发射天线”。X射线信号源发射出的X射线脉冲信号经过“发射天线”后变成发散角很小的准平行光束，在真空信道中传播一段距离后再由“接收天线”将X射线光子聚焦到探测器上，经过光电转换与解调解码等过程还原出通信信号，从而实现远距离通信(如图6所示)。

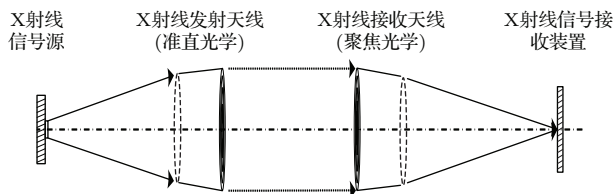


图6 X射线通信系统示意图

Fig. 6. Schematic of X-ray communication system.

### 4.2.1 “发射天线”

我们来具体分析X射线通信系统中“发射天线”的发散角。

当X射线聚焦光学镜片采用锥面型设计时发散角为 $\beta$ (图7)，焦平面上的三条实线为入射光线，表示经过锥面镜反射后，在焦平面上形成直径为 $D$ 的焦斑。若X射线信号发射源位于焦点 $F$ 处，虚线

表示此信号源发射的X射线，可见，经过锥形镜面出射的光线不是平行光，而是有一个发散角 $\beta$ ，此发散角可以由下式近似表示：

$$\beta = \arctan \frac{D/2}{1150}. \quad (9)$$

经过计算，发散角为2 mrad，实际应用中，X射线信号发射源电子束斑有一定大小，并不是一个理想的点光源，因而发散角可能进一步增大，若电子束斑直径为1 mm，则发散角增大至2.4 mrad，再考虑聚焦光学的装配误差等因素，锥面型聚焦光学的发散角一般为3—4 mrad。

理论上，“发射天线”增益为：在输入功率相等的条件下，实际天线与理想的点辐射光源在空间同一点处产生的功率密度之比，即

$$G_F = \frac{P_T \eta_f}{\pi(L \tan \omega)^2} / \frac{P_T}{\pi(kL)^2} = \frac{k^2 \eta_f}{(\tan \omega)^2}, \quad (10)$$

用dB可表示为

$$[G_F] = 10 \lg \left( \frac{k^2 \eta_f}{(\tan \omega)^2} \right), \quad (11)$$

其中， $P_T$ 是X射线聚焦光学入射功率， $\eta_f$ 是聚焦光学的聚焦效率， $k = 0.05$ 是与聚焦光学设计有关的参数， $L$ 是传输距离， $\omega$ 对应着聚焦光学发散角。

在1.5 keV时， $\eta_f$ 约为70%，将发散角 $\omega = 3$  mrad代入(11)式得 $G_F = 23$  dB。

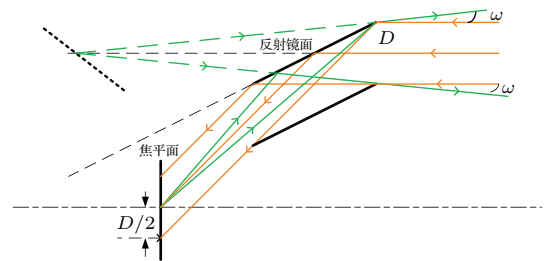


图7 锥面聚焦光学发散角分析

Fig. 7. Divergence angle of conical approximation focusing optics.

若镜片采用抛物面，如图8所示，则在焦点处的X射线源发射的X射线全部平行出射，理论上发散角为X射线的衍射极限角；同样考虑电子束斑大小，则准直后的发散角为0.4 mrad。

由此可见，抛物面型聚焦光学的发散角减小为原来的1/5，意味着通信距离将增大5倍，这无疑是非常有意义的，但是由于抛物面镜片的制作工艺难度非常高，这将作为下一步研究的重点。

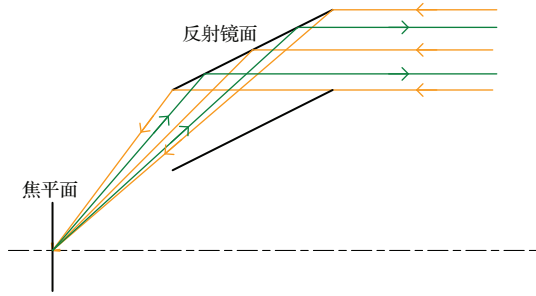


图8 抛物面型聚焦光学发散角分析

Fig. 8. Divergence angle of parabolic focusing optics.

#### 4.2.2 “接收天线”

X射线通信的接收端是要将接收到的X射线光子还原成信号,为了尽可能多地接收X射线光子,利用X射线聚焦光学作为信号“接收天线”,将在大面积收集到的光子聚集在小面积的半导体探测器上,这就实现了大面积、高量子效率、低成本。

对于接收增益,实质上就是X射线聚焦光学有效面积与焦斑面积的比值:

$$G_R = \frac{A_E}{A_D}. \quad (12)$$

聚焦光学的有效面积对于X射线通信的“接收天线”来说是一个重要的指标,有效面积越大,天线增益越高,这对于提高通信距离有着重要意义.锥面型聚焦光的理论有效面积 $5700 \text{ mm}^2 @ 1.5 \text{ keV}$ ,焦斑直径为 $4.5 \text{ mm}$ ,因此对于X射线通信“接收天线”来说,理论增益可达 $25 \text{ dB}$ .对于整个通信系统来说,总的增益为发射增益与接收增益相加即 $48 \text{ dB}$ .

## 5 结论与展望

在X射线通信中,发射与接收“天线”的使用有利于提高X射线光子的利用率,增大信号增益,提高信噪比,大大增加通信距离,为未来工程应用奠定基础,因此对其开展研究具有重要意义。

本文首先对X射线通信“收发天线”的理论基础和器件结构进行了分析,进而对X射线通信“天

线”的性能进行了理论分析,结果表明,采用单次反射嵌套式聚焦光学作为X射线通信的“收发天线”,可以有效提高通信增益,通信信号总增益达到 $48 \text{ dB}$ ,大大提高了通信距离,使得X射线空间通信的工程应用成为可能.未来可将“天线”进行阵列设计,从而进一步增大有效面积,增加通信距离。

## 参考文献

- [1] Bass M 2010 *Handbook of Optics* (3rd Ed.) (Columbus: The McGraw-Hill Companies) p791
- [2] Next-Generation Communications, Keith Gendreau [https://gsfctechnology.gsfc.nasa.gov/TechSheets/XRAY\\_Goddard\\_Final.pdf](https://gsfctechnology.gsfc.nasa.gov/TechSheets/XRAY_Goddard_Final.pdf) [2015-10-13]
- [3] 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]
- [4] 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]
- [5] Wang L Q, Su T, Zhao B S, Sheng L Z, Liu Y A, Liu D 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 120701 (in Chinese) [王律强, 苏桐, 赵宝升, 盛立志, 刘永安, 刘舵 2015 物理学报 **64** 120701]
- [6] Li Y D, Lin X Y, He J L, Guo F, Sun T X, Liu P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044103
- [7] Ke X Z, Xi X L 2004 *The Introduction of Wireless Laser Communication* (Beijing: Beijing University of Posts And Telecommunicaitons Press) (in Chinese) [柯熙政, 席晓莉 2004 无线激光通信概论 (北京: 北京邮电大学出版社)]
- [8] Wolter H 1952 *Annalen der Physik* **445** 115
- [9] Zhang W W 2009 *Proc. SPIE* **7437** 74370N
- [10] Balsamo E, Gendreau K, Arzoumanian Z, Okajima T, et al. 2013 *Proc. SPIE* **8861** 88611M
- [11] Sun K X, Yi R Q, Yang G H, Jiang S E, Cui Y L, Liu S Y, Ding Y K 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1099 (in Chinese) [孙可煦, 易荣清, 杨国洪, 江少恩, 崔延莉, 刘慎业, 丁永坤 2004 物理学报 **53** 1099]
- [12] Hu J S, Zhao L L, Li X 2005 *J. Optoelectron. Laser* **16** 534 (in Chinese) [胡家升, 赵玲玲, 李祥 2005 光电子·激光 **16** 534]

# X-ray focusing optics and its application in X-ray communication system\*

Liu Duo<sup>1)2)</sup> Qiang Peng-Fei<sup>1)</sup> Li Lin-Sen<sup>1)2)</sup> Su Tong<sup>1)</sup> Sheng Li-Zhi<sup>1)</sup>  
Liu Yong-An<sup>1)</sup> Zhao Bao-Sheng<sup>1)†</sup>

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

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

( Received 29 July 2015; revised manuscript received 15 September 2015 )

## Abstract

X-ray communication, which was first introduced by Keith Gendreau in 2007, is potential to compete with conventional communication methods, such as microwave and laser communication, against space surroundings. Researchers have spent much time and effort on the mission making the initial idea into reality in recent years. Eventually, the X-ray communication demonstration system based on the grid-controlled X-ray source and single-photon detection technique can deliver both audio and video information in a 6-meter vacuum tunnel, and the bit-error-rate performance of the communication system is analyzed. But it is difficult to implement applications in industries. The point is to find a way to reduce the signal divergence geometrical attenuation and increase the distance of the communication which can be regarded as an important foundation of future deep-space X-ray communication applications. Therefore, it is urgent to study the X-ray communication system. By using a nested X-ray focusing optics as transmitting and receiving antennas of the communication system, the signal gain and the distance of X-ray communication can be greatly improved. Specifically, the nested X-ray focusing optics is similar to the Wolter type I telescope, which is widely used in the field of X-ray astronomy. The difference between them is that the Wolter type I optics is originally proposed based on a paraboloid mirror and a hyperboloid mirror, but X-ray focusing optics, the simplified Wolter type I optics, provides a single reflection by a conical approximation mirror, and it is more suitable for X-ray communication. In this paper, aiming at the future demand of X-ray communication, the optimization and analysis of the nested X-ray focusing optics are carried out, and the recurrence relations between the layers of mirrors are derived. Reasonable initial structural parameters and structure of the optics are designed. In addition, the theoretical effective collection area is calculated. Feasibility of using the X-ray focusing optics as transmitting and receiving antennas is analyzed, and the theory and structural design of the X-ray focusing optical are discussed. Signal divergence of transmitting antenna, effective area of receiving antenna, the focal spot size, and the signal gain properties are preliminary studied. The results show that the signal divergence is about 3 mrad, and the transmit gain is 23 dB; the effective area of receiving antenna is 5700 mm<sup>2</sup> at 1.5 keV. Moreover, the focal spot diameter and the receive gain are 4.5 mm and 25 dB, respectively, and the total gain of this communication system can reach up to 48 dB.

**Keywords:** X-ray communication, X-ray focusing optics, communication antenna, signal gain

**PACS:** 07.85.-m, 42.79.Sz, 84.40.Ba

**DOI:** 10.7498/aps.65.010703

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61471357) and the West Light Foundation of the Chinese Academy Sciences.

† Corresponding author. E-mail: [open@opt.ac.cn](mailto:open@opt.ac.cn)