

引用格式: SU Tong, SHENG Lizhi, LIU Yongan, et al. Theoretical and Technical Research of X-ray Communication in Plasma Sheath[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1134001

苏桐, 盛立志, 刘永安, 等. 等离子体鞘套中 X 射线通信传输理论与实验研究[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1134001

# 等离子体鞘套中 X 射线通信传输理论与实验研究

苏桐<sup>1</sup>, 盛立志<sup>1</sup>, 刘永安<sup>1,2</sup>, 张雪晗<sup>1,2</sup>, 刘一凡<sup>1,2</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)

**摘要:** 由于存在理论模型不完善、实验验证技术不充分等问题, 等离子体鞘套中的信息传递难题尚未获得可行的工程化解决方案。首先通过数值计算与理论建模研究了 X 射线光子与等离子体相互作用机理, 构建了 X 射线与等离子体相互作用理论模型, 与传统波动模型中 X 射线可无衰减地穿透等离子体的结论不同, 本文建立的修正理论模型指出 X 射线在等离子体中的透过率与等离子体电子密度及入射 X 射线流量密切相关。其次通过栅控 X 射线调制发射、单光子 X 射线探测、动态等离子体产生等核心技术攻关, 演示验证平台搭建, 实现了高动态范围(电子密度  $10^9 \sim 10^{14}/\text{cm}^3$ )、长持续时间(大于 20 min)等离子体环境下, 通信速率优于 1 Mbps, 误码率  $10^{-5}$  量级的 X 射线通信实验验证。实验结果表明, 所建立的修正理论模型可对实验现象进行良好的解释与预测, 全物理闭环式实验系统可为等离子体鞘套中的通信难题提供解决思路。

**关键词:** X 射线通信; 等离子体鞘套; 单光子探测; 等离子体产生; 传输链路方程

中图分类号: O434.14

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215011.1134001

## Theoretical and Technical Research of X-ray Communication in Plasma Sheath

SU Tong<sup>1</sup>, SHENG Lizhi<sup>1</sup>, LIU Yongan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuehan<sup>1,2</sup>, LIU Yifan<sup>1,2</sup>, ZHAO Baosheng<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** Because of the imperfect theoretical model and insufficient experimental verification technologies, the problem of information transmission in the plasma sheath has not yet been resolved. In this paper, the interaction mechanism between X-ray photons and plasma is studied firstly, and a modified theoretical model is provided through numerical calculation and theoretical modeling. Different from the conclusion that X-rays can penetrate plasma without attenuation in the traditional wave model, the modified theoretical model established in this paper points out that the transmittance of X-rays in plasma is closely related to plasma electron density and incident X-ray flux. Secondly, an experimental system was built using a grid-controlled X-ray modulation emission source, a single-photon X-ray detector, and a dynamic plasma generator. Using this system, the non-uniform plasma which electron density ranges from  $10^9/\text{cm}^3$  to  $10^{14}/\text{cm}^3$  is generated, and the X-ray communication with 1 Mbps communication rate and  $10^{-5}$

基金项目: 国家自然科学基金(No.61901470), 陕西省重点研发计划(No. 2020GY-032)

第一作者: 苏桐(1988-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为 X 射线通信与单光子探测。Email: sutong@opt.ac.cn

通讯作者: 盛立志(1980-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为脉冲调制 X 射线发射源与 X 射线成像探测器。Email: lizhi\_sheng@opt.ac.cn

收稿日期: 2021-03-11; 录用日期: 2021-06-09

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

bit error rate is also verified. The experimental results indicate that the modified theoretical model can explain and predict the experimental phenomena, and the experimental system can provide the solution for solving the communication problems in the plasma sheath.

**Key words:** X-ray communication; Plasma sheath; Single photon detection; Plasma generation; Transmission link equation

**OCIS Codes:** 340.7480; 350.1260; 060.4510; 230.0250

## 0 引言

航天器再入临近空间飞行时与大气高速摩擦,所产生的高温效应使航天器周围的耐热材料分解、并促使气体电离,从而在航天器四周出现致密的等离子体鞘套。等离子体鞘套的存在改变了航天器原有的空间散射特性<sup>[1]</sup>,会对进入该区域内的电磁波产生极强的吸收和反射效应<sup>[2]</sup>。在此区域内,航天器与地面之间的通信中断、测控信号丢失,极易造成船毁人亡。

自上世纪60年代,先后提出了多种缓解和克服等离子体鞘套的方法,如磁窗口法、喷射物质法、改变气动外形法等<sup>[3-6]</sup>。但因为体积、功耗、航天器载荷等方面的限制,以及理论模型不完善和可靠地面验证实施困难等难题,等离子体鞘套内的信息传输目前尚未得到普遍意义上的工程解决方案<sup>[7]</sup>。

X射线频率高、单光子能量大、穿透力强,按照经典电磁理论X射线可无衰减地穿过等离子体<sup>[8]</sup>。但当前X射线与等离子体作用方面的研究以基于麦克斯韦方程组的波动理论仿真为主,缺乏实验支撑。这种方法得到的理论结果指出X射线能以近乎100%的透过率穿过等离子体<sup>[9-10]</sup>。然而前期实验结果表明,X射线并不能无衰减地穿过等离子体<sup>[11]</sup>,这与波动模型给出的理论结果并不相符,同时考虑到等离子体鞘套的非均匀、动态时变特性,不能将微波波段成熟的理论与实验结果直接套用到X射线波段。

针对上述问题,本文面向特殊电磁环境下的通信需求,从X射线粒子性出发、通过对传统波动模型的修正与创新,研究了X射线与等离子体的相互作用过程,建立了X射线在等离子体鞘套中的传输理论模型,给出了穿过等离子体后X射线透过率与能谱分布的定性分析与数值表达方法。并针对等离子体鞘套特征,进行了X射线通信在动态等离子体中的传输实验。研究了不同X射线入射流量、不同等离子体电子密度对X射线在等离子体中透过率的影响,同时实现了模拟等离子体鞘套环境下X射线信号传输的全过程实验模拟,获得了速率优于1 Mbps、误码率 $10^{-5}$ 量级的X射线通信验证。

## 1 数值模型与理论计算

### 1.1 波动理论模型

电磁波与等离子体间的相互作用结果一般通过求解麦克斯韦方程组获得。对于一个线性极化、垂直于等离子体入射的均匀平面电磁波而言,传播系数的实部 $\alpha_p$ 代表了电磁波在等离子体中的衰减系数,虚部 $\beta_p$ 代表了电磁波在等离子体中的相位系数<sup>[12]</sup>。

$$\begin{cases} \alpha_p = k_0 \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2} - \epsilon_r'}{2}} \\ \beta_p = k_0 \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2} + \epsilon_r'}{2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\epsilon_r'$ 与 $\epsilon_r''$ 分别是等离子体介电常数的实部与虚部, $k_0$ 是入射电磁波的波数。求解式(1)即可得到不同入射频率的电磁波在等离子体中的透过率。航天器等离子体鞘套中,等离子体电子密度在 $10^{10} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 范围内,等离子体碰撞频率在 $10^8 \sim 10^{12}$ 之间,持续时间约4~10 min<sup>[13]</sup>。图1给出了基于波动模型,不同入射频率电磁波在不同等离子体电子密度与不同等离子体碰撞频率下的衰减系数仿真曲线。

由图1可知,在波动模型中,对能量大于0.4 keV(波长3 nm以下)的X射线,不论等离子体密度与等离子体碰撞频率如何变化,X射线在等离子体中的理论透过率总是接近100%,即波动模型指出X射线可以无衰减地穿透等离子体鞘套。这一理论与实验结果并不相符,故而首先需要对传统的波动模型进行修正,才能准确描述以X射线为代表的高能光子在等离子体中的传输过程。

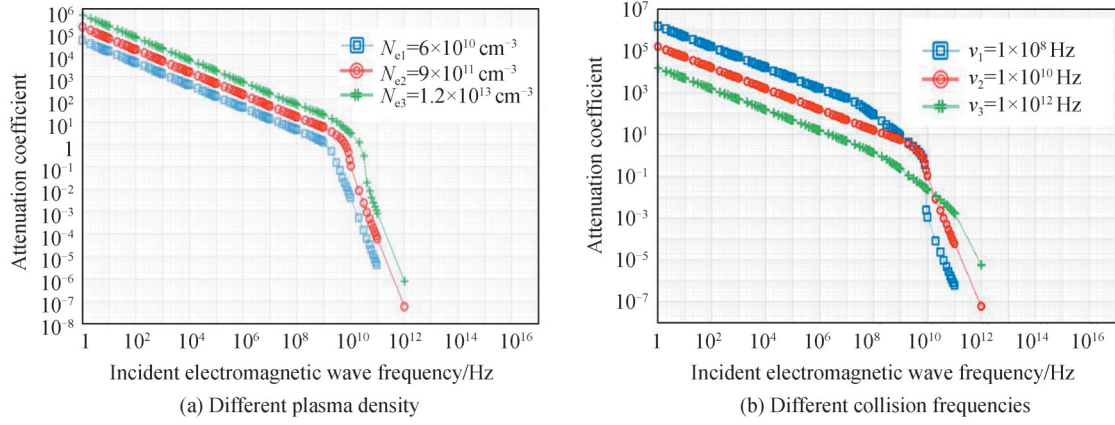


图1 波动模型中等离子体衰减系数随入射电磁波频率变化曲线  
Fig.1 Plasma attenuation based on different incident electromagnetic wave frequency

## 1.2 修正模型

从电磁学特性考虑,可以将等离子体鞘套看作是一种温度高、带电粒子活动剧烈、电磁学特征动态变化的高速流场介质<sup>[14]</sup>。X射线是一种高能光子,两者的作用机理实际上是研究高能光子在非均匀、动态时变等离子体流场中的传输特性问题。X射线空间通信应用中,考虑到发射源能量与系统体积功耗,载波X射线的能量不会高于100 keV,此时X射线与等离子体间的相互作用主要以光电效应和康普顿散射为主。同时,等离子体鞘套中自由电子的密度远高于其他粒子,此时发生康普顿散射的概率远大于发生光电效应的概率。因此当上述能量的X射线光子经过等离子体时,X射线光子与等离子体自由电子间的康普顿散射占据了主导地位。

X射线光子在等离子体中经历多次小的相互作用,每次相互作用都会引起光子能量的损失及方向的偏转,最终的能量损失和方向偏转是各次的统计叠加。定义衰减系数为 $\alpha_p$ ,进入到等离子体中的X射线光子数目为 $N$ ,同时认为 $N_0$ 是若干个X射线光子的集合,且 $N_0$ 小于电子数目 $N_e$ 。此时单个X射线光子与自由电子发生康普顿散射的概率是一个典型的随机事件,且其概率符合泊松分布,故 $N_0$ 个X射线光子与自由电子发生康普顿散射的概率可以表示为<sup>[15]</sup>

$$P_{(N_0)} = \frac{m^x}{x!} \cdot e^{-m} \quad (2)$$

式中, $x$ 是单位时间内随机事件的平均发生次数。在本模型中,X射线与电子发生康普顿散射的平均次数为 $1/2$ ;且当 $m=1$ 时,可认为式(2)给出了一个入射X射线光子与一个等离子体中的自由电子发生康普顿散射的概论。同时,引入微分散射截面<sup>[16]</sup>,当有 $N=k \cdot N_0$ 个光子入射,并与等离子体中的 $N_e$ 个电子发生康普顿散射时,一定辐射角度范围内的光子数可表示为<sup>[17]</sup>

$$N_{(\theta)} = \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \cdot \sqrt{\frac{N_e}{N \cdot N_0}} \Omega f = \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{\sqrt{N_e}}{N_0} \Omega f \quad (3)$$

式中, $\Omega$ 代表立体角, $f$ 是等离子体的自吸收常数, $N$ 与 $N_e$ 分别代表了等离子体中入射X射线与自由电子的个数。同时为了接近泊松分布,定义 $N_0$ 为若干个入射X射线光子的集合,且 $N_0 \leq N_e$ 。而 $k$ 为入射X射线相对于 $N_0$ 的倍数。此时, $N$ 个光子与 $N_e$ 个电子发生康普顿散射的概率就可表示为光子与自由电子的作用概率与作用系数之间的乘积,并具有以下形式

$$P_{(N)} = P_{(kN_0)} = P_{(N_0)} \cdot \frac{\sqrt{N_e}}{\sqrt{k} N_0} \quad (4)$$

最终,X射线在等离子体中的衰减系数可表示为

$$\alpha_p = P_{(N)} = P_{(kN_0)} = P_{(N_0)} \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} = \frac{0.5}{1!} \cdot e^{-0.5} \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{\sqrt{N_e}}{N_0} = 0.3037 \cdot \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \left( \frac{\sqrt{N_e}}{N_0} \right) \quad (5)$$

可以看出,X射线在等离子体中的衰减系数由入射X射线流量与等离子体自由电子密度两个参数共同



决定。通过式(5)可得如图2所示的在不同等离子体自由电子密度下,衰减系数随入射X射线光子流量的变化曲线。其中,横坐标是入射X射线光子流量增加的倍数 $k$ ,纵坐标是此时X射线在等离子体中的衰减系数。

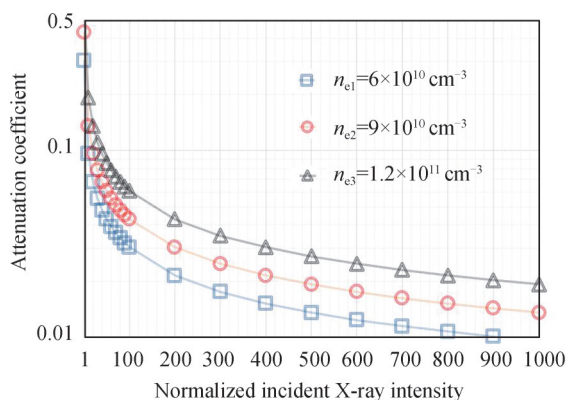


图2 X射线在等离子体中的衰减系数随X射线光子数目的变化曲线(修正模型)

Fig.2 Attenuation coefficient variation with different incident X-ray photon number (modified model)

修正理论模型指出,X射线在等离子体中的衰减系数随着入射光子数的增大而减小。当 $N_0 < \sqrt{N_e}$ 时,等离子体自由电子密度对透过率的影响占据主导作用,衰减系数 $\alpha_p$ 将会随着入射X射线光子数的增大而同比例减小。当 $N_0 \geq \sqrt{N_e}$ 时,入射光子数对X射线透过率的影响效果逐渐加大,衰减系数 $\alpha_p$ 将会随着入射光子流量的增大而以 $k^{-1/2}$ 的比率线性减小。同样从图2中可以看出衰减系数随着等离子体自由电子密度的增加而线性增大。

除了给出X射线经过等离子体后强度衰减的数值表达式外,修正理论模型对于X射线光子与等离子体间的相互作用还给出了另外一个预测:随着入射光子流量的增多,与等离子体中自由电子发生康普顿效应的X射线数量随之增大,康普顿效应会对穿过等离子体后X射线的能谱分布产生影响:随着光子流量的增多,穿过等离子体后部分X射线的波长变长,透射X射线的能谱分布曲线将会向能量小的方向移动。

## 2 实验系统

本部分结合西安电子科技大学动态可控等离子体产生装置,利用自研的栅控X射线调制发射源与高时间分辨闪烁体X射线探测器<sup>[18]</sup>,搭建了穿透模拟等离子体鞘套的X射线通信地面实验系统,演示实验系统原理如图3所示。

图4是西安电子科技大学研制的等离子体产生装置的原理与实物图。其中,等离子体产生区域是一个

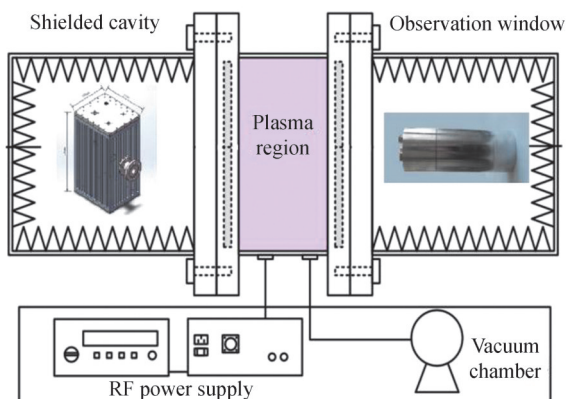


图3 模拟等离子体鞘套X射线通信演示验证实验系统原理  
Fig.3 The principle of X-ray communication experiment system

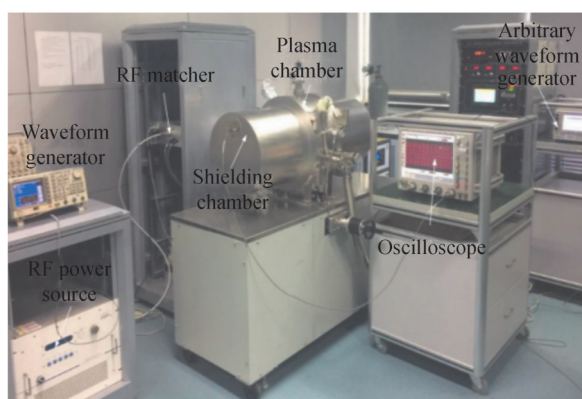


图4 等离子体产生装置原理实物图<sup>[19]</sup>  
Fig.4 The physical diagram of the plasma generation device<sup>[19]</sup>

直径为 400 mm,长度为 240 mm 的不锈钢圆柱体,腔室内部螺旋排列着直径为 8 mm,管壁厚度为 2 mm 的环形空心不锈钢电极。当射频电源加载激励时,环形电极与圆柱形腔室的内壁之间 100 mm 区域内的气体电离,产生等离子体充斥整个圆柱腔室<sup>[19]</sup>。

该装置通过调整射频电源输入功率改变等离子体的电子密度,电子密度  $n_e$  与射频电源电压  $U$  之间满足式(6)<sup>[20]</sup>。通过 10 GHz 微波源探针,对等离子体发生器中心位置的电子密度进行实施监测。

$$n_e = (2.673 \times U - 4.338) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad (6)$$

图 5 给出了封装后的栅控 X 射线调制发射源实物图。通过在传统的 X 光管中引入控制栅极改变了 X 射线管内电场的分布。通过对栅极所加电压的调节,实现对轰击阳极的电子数量的控制,从而实现数字化 X 射线出射控制。其中,出射 X 射线光子数由阳极高压、阳极电流共同决定。

图 6 给出了研制的 NaI(Tl) 闪烁体 X 射线探测器实物图,对于能量 30~100 keV 之间的 X 射线,能量沉积率大于 90%,荧光衰减时间为 230 ns。

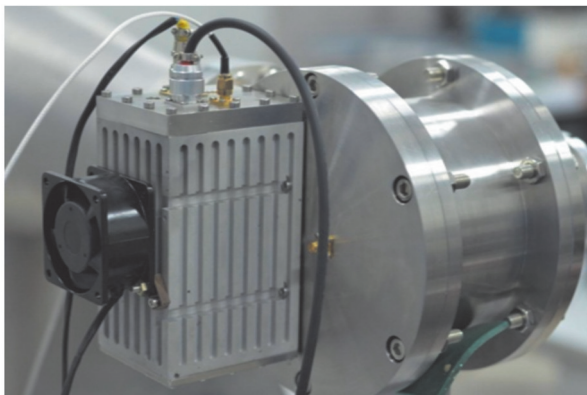


图 5 封装后的栅控 X 射线调制发射源  
Fig.5 GCMX emission source after packaging



图 6 封装后 NaI(Tl) 闪烁体探测器  
Fig.6 NaI (Tl) scintillator detector after packaging

实验中,栅控 X 射线调制发射源放置在屏蔽腔体内,通过栅极电压的有无调制 X 射线。调制发射源出射的 X 射线光子流量与阳极高压和阳极电流相关,当固定阳极靶材与阳极高压时,出射 X 射线光子流量与阳极电流成正比。等离子体产生区域内,通过控制射频电源功率,可实现电子密度范围  $10^{10} \sim 10^{12} / \text{cm}^3$ 、等离子体碰撞频率  $10^{10} \sim 10^{12} \text{ Hz}$  的动态等离子体产生<sup>[21]</sup>。当 X 射线光子通过等离子体区域后,被在观察腔内的闪烁体探测器端接收,探测器输出信号被送入后端电子学解调,从而完成整个通信实验测试过程。

### 3 实验结果

#### 3.1 X 射线在等离子体中的透过率测试实验

测试了在不同等离子体电子密度(不同射频功率)下,X 射线在等离子体中的透过率与入射 X 射线光子流量(阳极电流)之间的关系。实验结果如表 1。

表 1 不同阳极电流与不同射频功率下 X 射线透过率

Table 1 X-ray transmission rate under different anode current and different RF power

	3 $\mu\text{A}$	6 $\mu\text{A}$	12 $\mu\text{A}$	24 $\mu\text{A}$	48 $\mu\text{A}$	120 $\mu\text{A}$
300 W	67.84%	71.7%	74.82%	84.26%	87.24%	93.74%
500 W	57.41%	60.64%	73.34%	76.88%	86.83%	88.93%
700 W	54.21%	57.43%	70.72%	72.00%	82.88%	85.17%
1 000 W	47.78%	54.65%	65.04%	69.81%	78.32%	83.36%

图 7 给出了在 300 W(电子密度  $6.0 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ )、500 W(电子密度  $9.0 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ )、700 W(电子密度  $1.05 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ )和 1 000 W(电子密度  $1.2 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ )四种射频功率下,X 射线透过率随 X 射线光子流量之间的实验变化曲线。图中同时给出了依据波动模型与所提出的修正模型的理论透过率曲线。其中,横坐标是

入射 X 射线光子数增大的倍数  $k$ , 纵坐标是此时 X 射线在等离子体中的透过率。

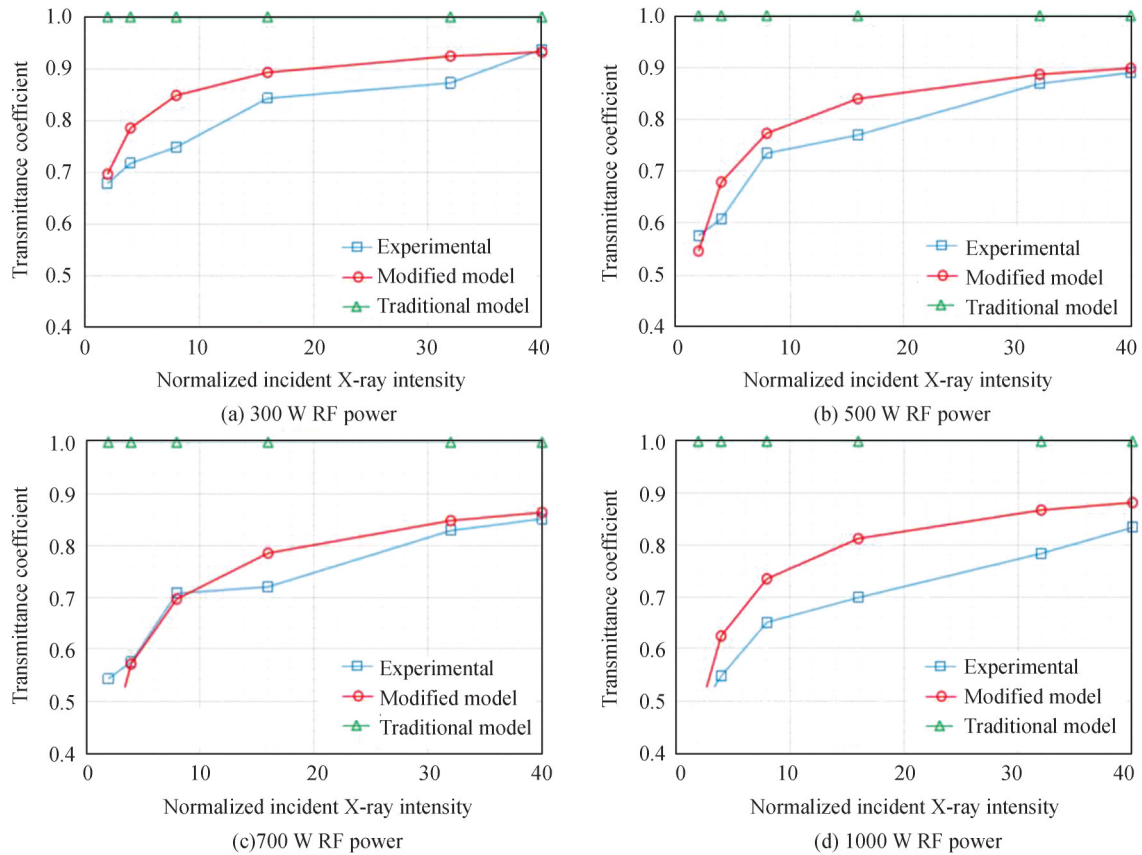


图7 不同等离子体电子密度下入射 X 光子流量与透过率关系  
Fig.7 The relationship between incident X-photon flux and transmittance

由实验结果可知,当等离子体电子密度一定时,随着入射 X 射线光子流量的增大, X 射线在等离子体中的透过率逐渐增大。但并不像波动方程所描述的那样,所有频率的 X 射线都能近乎无衰减地穿透等离子体,而是需要满足一定的流量条件。以 300 W 射频功率情况为例,此时, X 射线光子数目与等离子体自由电子数目接近满足  $N_0 = \sqrt{N_e}$  条件,此时实验透过率为 67.84% (本文修正模型理论值为 69.63%)。且随着入射光子数成倍地增加,整体透过率增加,但增加的幅度越来越小,直至透过率达到 93% 以上。

同时,式(5)指出在相同的入射 X 射线流量下,随着等离子体电子密度的增加,等离子体对 X 射线的衰减随之线性增加。图 8 描述了实验中,固定阳极高压,在不同的阳极电流(X 射线光子数)下, X 射线在等离

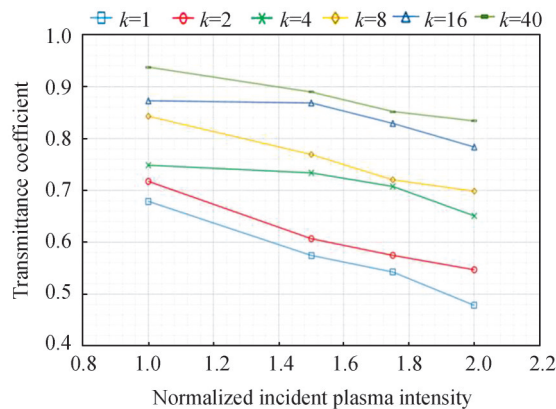


图8 X 射线透过率与自由电子密度关系  
Fig.8 The relationship between X-ray transmittance and free electron density



子体中透过率随等离子体电子密度的变化情况,其中 $k$ 是X射线光子数增加的倍数。

实验结果表明,在不同的入射X射线光子流量下,等离子体对X射线的衰减率都随着等离子体电子密度的增加而增加。这是因为随着自由电子密度的增加,固定数量的X射线光子与自由电子发生康普顿散射的几率增大,等离子体对X射线的衰减更强,这与修正理论模型的结果也是相符的。

### 3.2 能谱分布实验

修正理论模型对于可能出现的实验结果做出了两个预测。一是X射线在等离子体中的透过率与光子流量、等离子体电子密度有关,已经得到了很好的验证。第二个预测是,由于X射线光子与等离子体间的康普顿散射,随着入射X射线光子流量的增大,穿过等离子体后X射线损失部分能量、波长变长,整体能谱发生偏移现象。针对这一预测,同样利用实验进行了验证。

固定阳极电流与等离子体电子密度,选择三组阳极高压,分别为10 kV、20 kV、30 kV。相比于阳极电流的影响,这三组阳极高压对X射线光子流量的影响很小,可以认为在这三组所选的阳极高压范围内,X射线光子流量基本不变。

如图9(a)所示,横坐标是多通道分析仪的通道数,其与X射线能量一一对应。随着入射X射线阳极高压的变化,穿过等离子体前后,X射线的能谱分布趋势及能谱峰值所在位置不变,即当入射X射线光子流量变化不大时,透射X射线并未发生能谱偏移现象。

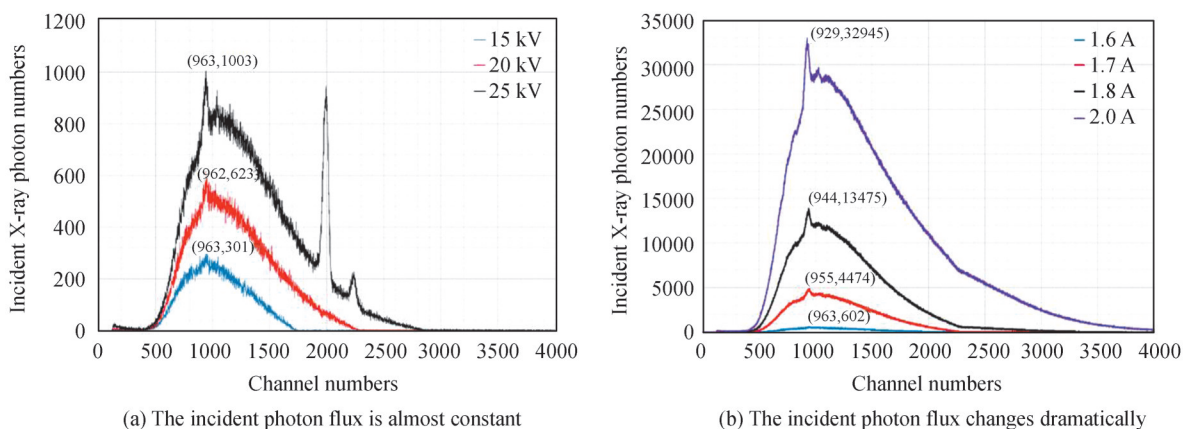


图9 入射光子流量对X射线穿过等离子体后的能谱影响  
Fig.9 Effect of different incident photon numbers on the energy spectrum of X-ray

如图9(b)所示,当调整阳极电流使入射X射线光子流量增多时,X射线的能谱分布向左偏移,即X射线的能谱峰值位置向低能量的方向移动。这是因为随着X射线光子流量的增加,康普顿效应使得部分X射线能量变低,X射线波长变长。所以随着入射光子流量的增多,虽然整体透过率增大、透过等离子体的X射线光子数也同时增多,但透射后能谱分布产生了变化。这与修正模型给出的理论推测完全相符。

### 3.3 X射线通信实验

通信速率与探测器端接收到的光子数成正比。当固定发射源阳极靶材与阳极电压时,出射的X射线光子数随阳极电流线性变化。首先测试了发射源阳极高压为30 kV、等离子体电子密度为 $1.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 时,不同阳极电流下穿透模拟等离子体鞘套后的X射线通信速率。图10分别给出了当阳极电流 $50 \mu\text{A}$ 及 $150 \mu\text{A}$ 时,等离子体环境下的X射线通信实验波形图。可以看到当阳极电流大于 $50 \mu\text{A}$ 时,通信速率大于200 kbps,继续增大阳极电流至 $150 \mu\text{A}$ 以上时,穿过模拟等离子体鞘套后X射线通信速率将大于1 Mbps。

实验结果表明,X射线通信速率随着发射源阳极电流,即入射X射线光子流量的增加而增大。当阳极电流大于 $150 \mu\text{A}$ 时,X射线将以高透过率穿过等离子体,并实现Mbps以上速率的通信传输验证。

同时,为了检测X射线通信系统误码率,设计并制作了基于FPGA的自检式误码检测器。检测器电路分为M序列码(伪随机码)产生、误码检测、同步与保护控制、数据显示四个部分,其系统构成及实物如图11伪随机码生成模块将输出重复周期1,048,575、速率1~4 960 kbps可调的M序列码。输出的M序列码分为两路,其中一路经过传输被探测器接收还原后,送回至误码检测电路的输入端与检测器中另一路留存的M

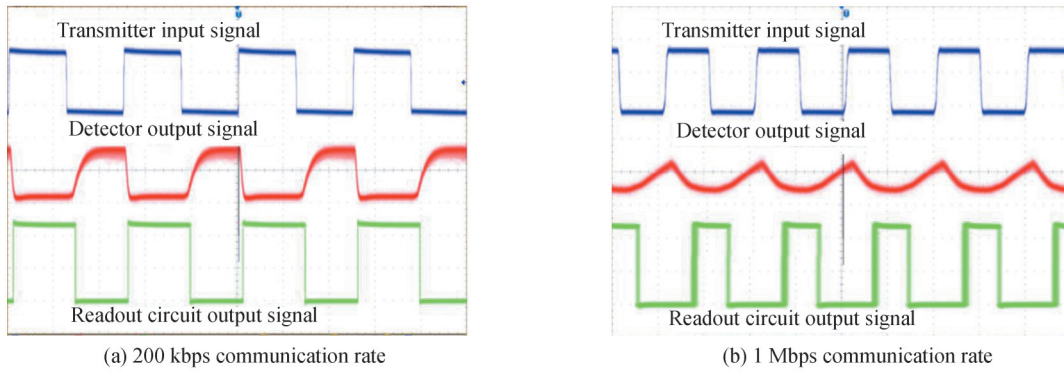


图10 等离子体环境X射线通信验证  
Fig.10 X-ray communication verification in plasma

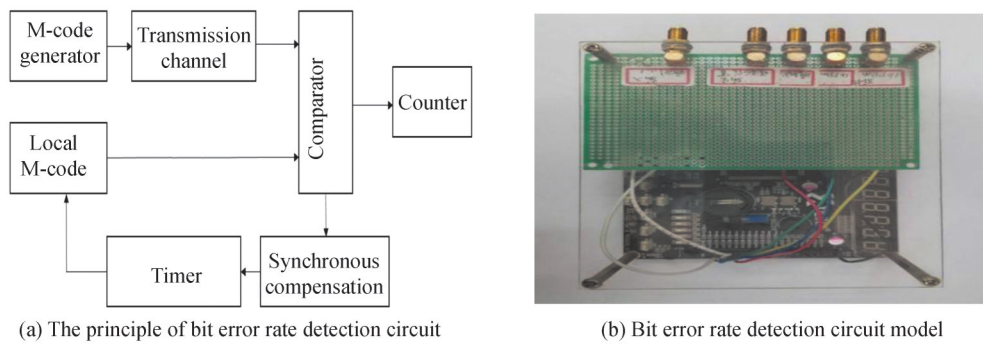


图11 基于FPGA的误码检测器系统  
Fig.11 FPGA based error detector system

序列码进行比较,从而获取误码率个数及位置信息。

利用示波器与误码率检测模块,固定发射源阳极电流 200  $\mu\text{A}$ ,进行了不同测试条件下,模拟等离子体鞘套环境的 X 射线通信地面测试实验,结果如表 2。

表 2 模拟等离子体鞘套 X 射线通信地面验证实验结果

Table 2 Experimental results of X-ray communication ground verification in the plasma sheath

Conditions	Communication rate/Mbps	BER
Plasma density: $7 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ Anode voltage: 15 kV	1	$8.0 \times 10^{-5}$
Plasma density: $1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ Anode voltage: 20 kV	1	$6.4 \times 10^{-5}$
Plasma density: $1.2 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ Anode voltage: 30 kV	1	$7.5 \times 10^{-5}$

实验结果表明,当阳极电流大于 200  $\mu\text{A}$ 时,在模拟等离子体鞘套环境下即可实现通信速率 1 Mbps、误码率  $10^{-5}$ 量级的 X 射线数字通信实验,通信速率与误码率指标完全满足再入黑障与超高速飞行器飞行时与地面站交换数据的需求。

## 4 结论

与传统波动理论模型结果不同,修正理论模型指出 X 射线在等离子体中的透过率与入射 X 射线光子流量和等离子体电子密度密切相关,且只有当 X 射线光子流量的算术平方值大于等离子体中的自由电子数,才能让 X 射线以较高的透过率(接近 70%)穿透等离子体。并指出当 X 射线穿过等离子体后,由于康普顿效应的影响,透射 X 射线的能谱将整体向能量小的方向偏移。演示验证实验表明,修正理论模型可以对实验



结果进行良好地解释与预测。本文研究为X射线与等离子体相互作用的理论验证、等离子体鞘套中的X射线通信方案实施提供了有力的理论与实验支撑。

### 参考文献

- [1] 仲维伟. 等离子体鞘套包覆目标电磁散射特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [2] GAN Liping, GUO Lixin, GUO Lijing, et al. Effects of nonuniform moving plasma on the polarization properties of obliquely incident em waves[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(4):867-875.
- [3] STARKEY R, LEWIS R, JONES C. Plasma telemetry in hypersonic flight[C]. International Telemetry Conference, San Diego, CA, 2003.
- [4] HARTUNIAN R, STEWART G, FERGASON S, et al. Cause and mitigations radio frequency (rf) blackout during re-entry of reusable launch vehicles[EB/OL]. American Technical Report, 2007: 53-64.
- [5] SUNGDUCK C, SUNGHOON J, SEUNGJUNE Y, et al. Method and apparatus for performing network connection in wireless communication system: WO, WO2013042913 [P]. 2014-09-18.
- [6] SA V, FOX W, JARA-ALMONTE J, et al. Electromagnetic fluctuations during guide field reconnection in a laboratory plasma[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(5):5-17.
- [7] YUAN Zhongcai, SHI Jiaming. Elimination method of communication black barrier for aircraft re-entry into the atmosphere [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012(5):504-507.  
袁忠才, 时家明. 飞行器再入大气层通信黑障的消除方法[J]. 航天器环境工程, 2012(5):504-507.
- [8] WANG Lvqiang, SU Tong, ZHAO Baosheng, et al. Analysis of bit error rate of X-ray communication system[J]. Acta Physica Sinica, 2015(12): 115-119.  
王律强, 苏桐, 赵宝升, 等. X射线通信系统的误码率分析[J]. 物理学报, 2015(12):115-119.
- [9] LI Huan, TANG Xiaobin, HANG Shuang. Potential application of X-ray communication through a plasma sheath encountered during spacecraft reentry into earth's atmosphere[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 106:213-220.
- [10] HANG Shuang, TANG Xiaobin, LI Huan, et al. Potential application of X-ray communication in martian dust storm[J]. Acta Astronautica, 2020, 166:277-289.
- [11] LI Yao, SU Tong, LEI Fan, et al. Analysis of X-ray transmittance in plasma and research on potential communication applications[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(4):27-34.  
李瑶, 苏桐, 雷凡, 等. 等离子体中X射线透过率分析及潜在通信应用研究[J]. 物理学报, 2019, 68(4):27-34.
- [13] STARKEY R, LEWIS M. Aerodynamic shaping effects on re-entry plasma sheath telemetry blackout[J]. AIAA Paper, 2002, 52-67.
- [14] WANG Jiasheng, YANG Xianqiang, JING Yaoxiang, et al. Research on black barriers and countermeasures for reentry communication of blunt-nosed spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2014(1):16-26.  
王家胜, 杨显强, 经姚翔, 等. 钝头型航天器再入通信黑障及对策研究[J]. 航天器工程, 2014(1):16-26.
- [15] LI Jiangting, YANG Shaofei, GUO Lixin, et al. Bit error rate performance of free-space optical link under effect of plasma sheath turbulence[J]. Optics Communications, 2017, 396:1-7.
- [16] HU Huijun, ZHAO Baosheng, SHENG Lizhi, et al. A method for improving the signal-to-noise ratio of x-ray pulsar pulse profile based on poisson distribution[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2011(8):15-20.  
胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 等. 一种基于泊松分布的提高X射线脉冲星脉冲轮廓信噪比的方法[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2011(8):15-20.
- [17] ARMAN M, BRUNO S, HAMMER H W, et al. Elastic compton scattering from  $^3\text{He}$  and the role of the delta[J]. European Physical Journal A, 2018, 54(7):125-131.
- [18] 赵宝升, 苏桐, 盛立志, 等. 空间X射线通信概论[M]. 科学出版社, 2016.
- [19] LIU Duo, QIANG Pengfei, LI Linsen, et al. An X-ray focusing optics and its application in X-ray communication[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1):71-76.  
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):71-76.
- [20] LEI Fan, LI Xiaoping, LIU Yanming, et al. An amplitude modulated radio frequency plasma generator[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(4):35-42.
- [21] LEI Fan, LI Xiaoping, LIU Yanming, et al. Simulation of a large size inductively coupled plasma generator and comparison with experimental data[J]. AIP Advances, 2018: 8-15.
- [22] YAO Bo, LI Xiaoping, SHI Lei, et al. Plasma sheath: an equivalent nonlinear mirror between electron density and transmitted electromagnetic signal[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(10):102-104.