

电磁波在高密度等离子体微柱腔体结构中的新传输模式

焦蛟 童继生 马春光 郭信琦 薄勇 赵青

New transmission mode of electromagnetic wave in high-density rod cavity structure

Jiao Jiao Tong Ji-Sheng Ma Chun-Guang Guo Ji-Yu Bo Yong Zhao Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 015202 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171728

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171728>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[俘获电子对低杂波与电子回旋波的协同效应的影响](#)

Effects of trapping electrons on synergy of LH and EC wave

物理学报.2017, 66(24): 245202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.245202>

[高功率微波作用下O-离子解吸附产生种子电子过程](#)

Seed electron production from O detachment in high power microwave air breakdown

物理学报.2016, 65(5): 055202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.055202>

[电磁波在非均匀磁化的等离子体鞘套中传输特性研究](#)

Study on transmission characteristics of electromagnetic waves in inhomogeneously magnetized plasma sheath

物理学报.2016, 65(3): 035201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.035201>

[电磁波在非磁化等离子体中衰减效应的实验研究](#)

Experimental investigation on attenuation effects of electromagnetic waves in an unmagnetized plasma

物理学报.2015, 64(5): 055201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.055201>

[微波阶梯阻抗变换器低气压电晕放电粒子模拟](#)

Particle-in-cell simulation of corona discharge in low pressure in stepped impedance transformer

物理学报.2013, 62(2): 025201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.025201>

电磁波在高密度等离子体微柱腔体结构中的 新传输模式*

焦蛟 童继生 马春光 郭佳琦 薄勇 赵青†

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2017年7月26日收到; 2017年9月25日收到修改稿)

超高声速飞行器再入过程中会因为等离子体鞘层而产生通信中断, 俗称“黑障”。近些年人们针对黑障通信的研究虽取得了一些成果, 但仍然没能从根本上解决问题. 本文从电磁波在等离子体柱中的传输机理研究出发, 借鉴二维光子晶体和表面波局域耦合相关理论, 设计出了一种新型的等离子体微柱腔体结构, 在这种特殊结构下L和S波段的电磁波在某些频段内出现了不同寻常的传输现象, 即从高密度等离子体柱的内部穿过. 这种新结构下的传输模式将为黑障通讯研究提供新的技术途径和方法.

关键词: 高密度等离子体微柱, 光子晶体, 表面波局域耦合, 传输模式

PACS: 52.40.Db, 41.20.Jb, 52.25.Os

DOI: 10.7498/aps.67.20171728

1 引言

通常情况下, 对于高密度等离子体而言, L和S波段的电磁波是很难穿过去, 它们要么被快速衰减, 要么被反射, 这也是为什么飞行器再入大气层时会出现“黑障”现象的原因^[1-4]. 近些年随着空间高速飞行器的发展, 解决“黑障”这一传统难题势在必行. 研究者们主要通过一些主动式技术手段来减弱黑障的影响, 如设计理想的再入飞行器外形、在飞行器表面喷洒特殊物质、提高电磁波工作频率、采用外加磁场、记忆重发等. 不过这些方法都不能从根本上解决黑障问题, 并且大多会带来新的附加问题^[5-9]. 所以要彻底解决黑障问题仍要从电磁波在等离子体内部的传输机理来着手研究^[10-18].

本文基于二维光子晶体及表面波局域耦合相关理论^[19,20], 利用时域有限元差分法(FDTD)数值计算方法设计出了一种基于等离子体微柱的新

型表面波局域耦合模型, 这种新的结构不同以往的等离子体微柱阵列模型. 对于普通的等离子体微柱阵列而言, 电磁波是从这些微柱的表面以类似于光学衍射的方式传播过去的, 而本文所设计的新型结构能够使电磁波从高密度等离子体微柱的内部穿过去. 这种新的传输现象及传输机理可为实现黑障通讯提供新的技术途径和方法.

2 等离子体中电磁波传输理论

目前, 研究等离子体中电磁波传输特性的理论方法主要有解析法、WKB法和FDTD方法. 本文主要基于FDTD方法, 采用平面波垂直入射到不同结构的等离子体模型中来研究几种常见微波电磁波在等离子体中的新型传输机制.

对于微波电磁波而言, 有亥姆霍兹方程 $\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0$, 其中 $k^2 = k_0^2 \epsilon_r$, 可以得到平面波的传播因子 $e^{j(kr - \omega t)}$. 其中 $k = nk_0$ 为微波在等离子体中的波数, k_0 为真空中的波数, ϵ_r 是等离子

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA7022016)、国家自然科学基金 (批准号: 11275045) 和四川省科技支撑计划 (批准号: 2013GZ01333) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaq@uestc.edu.cn

体的相对介电常数, 并且是一个复数, 其表达式^[21]为

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} - j \frac{v}{\omega} \cdot \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2},$$

其中 ω 为电磁波的角频率, ω_p 为等离子体的角频率, v 为电子与中性粒子的碰撞频率. 则等离子体的复折射率 n 的表达式^[22]为

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \beta + j\alpha.$$

用平面传播模式导出微波在非磁化等离子体内传播的相位系数 β 和衰减系数 α 为

$$\begin{aligned} \beta &= \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} \right) + \left(\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} \right)^2 + \left(\frac{v}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2} \alpha \\ &= \left\{ \frac{1}{2} \left[- \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} \right) + \left(\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} \right)^2 + \left(\frac{v}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + v^2} \right)^2 \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/2}, \end{aligned}$$

则平面波的传播因子 $e^{j(kr - \omega t)} = e^{-\alpha k_0 r} e^{j(\beta k_0 r - \omega t)}$. 微波在等离子体中传播距离 r 时, 等离子体吸收造成的能量衰减 S 可表示为

$$S = -20 \lg e^{-\alpha k_0 r} \approx 8.7 \alpha k_0 r = 8.7 \frac{\alpha \omega r}{c}.$$

微波在等离子体中传输造成的功率衰减可表示为

$$S = 10 \lg \left(\frac{P_t}{P_i - P_r} \right) = G_t - 10 \lg(1 - 10^{G_r/10})$$

其中, P_t , P_i , P_r 分别为透射波功率, 入射波功率, 反射波功率; G_t , G_r 分别为透射衰减增益和反射增益.

所以, 通常情况下, 电磁波在非磁化、碰撞高密度等离子体环境下损耗非常大, 而且电磁波在等离子体中传播时会受到等离子体的密度、碰撞频率、厚度、分布等一系列复杂因素的影响. 因此, 研究新的电磁波在等离子体中的传输机制有利于解决黑障通信问题.

3 建立数值模型

首先基于FDTD法建立一个新的等离子体微柱结构, 这种结构与其他单一的等离子体微柱结构阵列不同. 如图1所示, 这种新的结构为基于等离子体微柱的表面波局域耦合结构, 它是由呈一定周期排列的等离子体微柱及两个铜金属板组成

的腔体结构, 在这个腔体结构内部填充有电介质, 电介质的介电常数取10. 等离子体微柱的直径为 w , 两个相邻等离子体微柱周期间距为 g . 等离子体柱的形状为圆柱或者方柱. 等离子体密度可根据具体情况来设定, 考虑到再入飞行器真实的等离子体鞘套密度, 本研究工作均是基于等离子体密度为 $n_p 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 来计算的, 其中等离子体的角频率设为 $\omega_p 2\pi \times 8.98 \times 10^9 \text{ rad/s}$, 碰撞频率设为 $v_p = 3.2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$.

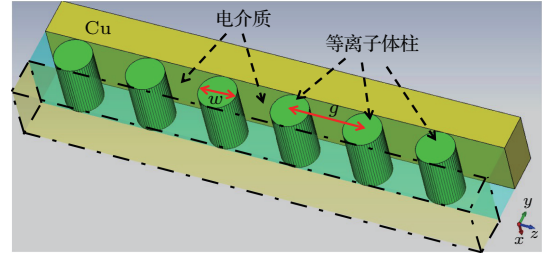


图1 基于等离子体微柱的新型表面波局域耦合结构
Fig. 1. New type of surface wave local coupling structure based on plasma micro-rod.

几何模型建立后, L, S波段的电磁波由结构的一端输入, 使电磁波在腔体结构内部传输, 并在另一个端口接收信号. 通过FDTD法可以得到电磁波在等离子体微柱腔体结构中的电场分布情况, 并可以计算出其反射系数(S_{11})及透射系数(S_{21}), 分析得到电磁波在这种结构下的传输特性.

4 仿真计算

考虑到再入飞行器表面的等离子体鞘套的密度约为 $n_p = 10^{12}$ 到 10^{14} cm^{-3} , 所以采用密度为 $n_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体作为研究对象, 基于FDTD法对电磁波在传统二维等离子体柱内与等离子体柱腔体模型中的传输特性进行对比仿真与分析.

4.1 电磁波在传统二维等离子体柱内的传输

近期对等离子体微柱结构下的电磁传输特性的研究发现, 等离子体微柱可以实现电磁波的传输, 这是由于这种微柱实际上是一种类似于二维光子晶体的结构, 通过调节这种结构的尺寸可以在某个频段范围内找出传输通带. 但是深究这种结构下的电磁传播模式可以发现, 这种传输机制是很难被

应用到黑障通讯中. 基于此, 我们建立了如图 2 所示的密度为 $n_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体微柱阵列模型, 等离子体柱的直径为 6 mm, 间距为 12 mm, 阵列周围填充物为空气, 一束频率为 2 GHz 的电磁波由等离子体柱阵列的左方辐射.

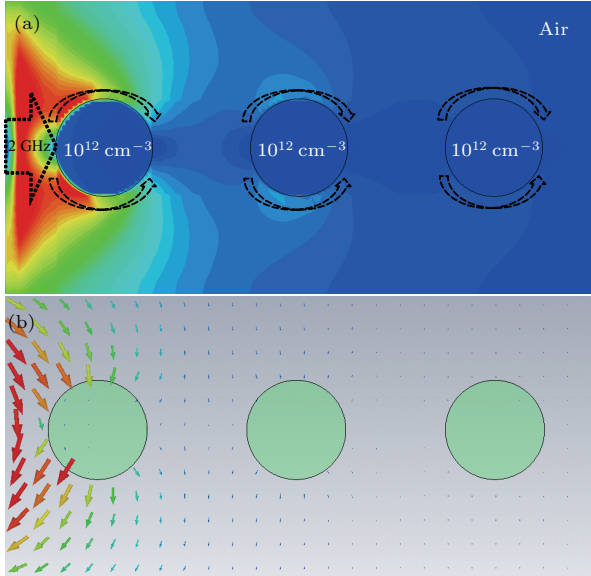


图 2 普通等离子体微柱电磁传播模式 (a) 频率为 2 GHz 的电磁波在密度为 $n_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体微柱阵列内传输的电场分布图; (b) 对应的瞬时电力线分布图

Fig. 2. The electromagnetic transmission mode of ordinary plasma micro-rod: (a) Electric field distribution of electromagnetic wave at a frequency of 2 GHz in the plasma rod array with the density $n_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$; (b) the distribution of corresponding instantaneous power line.

通过计算可以看到, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 电磁波入射后并不是由等离子体柱内部“透射”过去, 而是由等离子体柱的外部“绕射”过去. 这是由于等离子体微柱及周期的尺寸为亚波长尺寸, 从而出现了类似于光学中的“衍射”现象. 因此这种传输方式仅仅是在特定条件下实现的电磁波传输, 可以将其看作是光学/微纳光学的相关理论向微波通讯领域的一个拓展, 而这种模型难以应用于解决实际再入飞行中所出现的黑障通讯中断问题.

4.2 电磁波在新型等离子体柱腔体结构内的传输

本文提出的新的等离子体柱腔体结构如图 3(a) 所示, 等离子体微柱为直径 6 mm 的圆柱体, 相邻两个微柱间距为 12 mm, 等离子体微柱

密度为 $n_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 电磁波由腔体的左端入射, 再在右端设置接收端口.

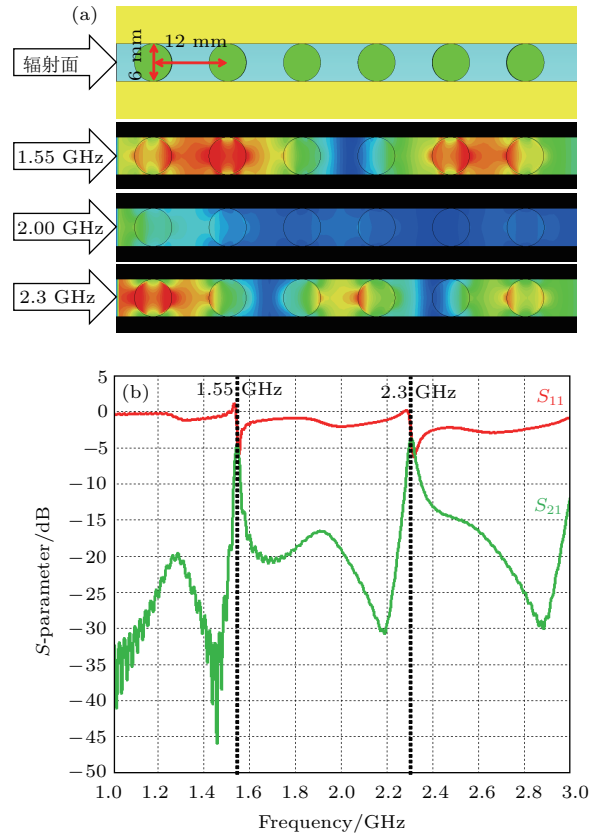


图 3 电磁波在新型等离子体柱腔体结构内的传输仿真结果 (a) 等离子体柱腔体结构模型及不同频率电磁波入射后的电场分布; (b) 1—3 GHz 频域范围内的电磁传输 S 参数曲线

Fig. 3. The simulation results of the transmission electromagnetic wave in new plasma cavity structure: (a) Plasma cavity structure model and field distribution of electromagnetic wave with different frequencies after incidence; (b) electromagnetic wave transmission S parameter within the frequency range of 1 GHz to 3 GHz.

经过计算得到了不同入射波长下电磁传输情况, 如图 3(a) 所示, 分别为模型结构图和频率为 1.55, 2, 2.3 GHz 的入射电磁波在结构内部的电场传输分布. 由此可以看出, 未通过入射频率的电磁波所对应的场分布是不同的, 这是因为这种等离子体微柱阵列是一种二维光子晶体结构, 而光子晶体结构具有波选择特性, 即存在禁带和通带两种情况, 禁带区域电磁波不能通过或低效通过, 而在通带区域电磁波可以通过. 图 3(b) 所示为 1—3 GHz 频域范围内的电磁传输 S 参数曲线, 可以看到, 在 1.55 与 2.3 GHz 时电磁传输曲线有明显的波峰, 此时即为光子晶体的通带区域, 而其他区域即为禁带

区域. 除了光子晶体结构本身的波段选择特性外, 新型等离子体柱腔体结构能够使电磁波局域耦合在亚波长等离子体柱内, 从而由表面波衍射传输模式转变为局域耦合增强穿透模式, 这种新的传输模式的产生与入射波长、结构、尺寸有密切的关系.

由图 3(a) 中的电磁波传输场分布可以看出, 在新的腔体结构下电磁波并不是以均匀线性的场分布传输的, 而是呈现出一定的周期性, 这是因为入射波长及等离子体微柱间距、尺寸之间存在一定的耦合条件. 通过调节等离子体微柱的间距及数量, 优化结构参数, 得到了基于 2.5 GHz 入射电磁波时的最佳结构模型, 即由两个铜金属板与两个直径为 6 mm、间距为 15 mm 的等离子体微柱组成的腔体结构, 腔体结构内部填充电介质.

通过仿真计算, 得到了如图 4(b) 所示的 1—3 GHz 频域范围内的电磁传输透射系数 S_{21} 曲线, 当入射波为 2.5 GHz 时, 其透射系数为 6 dB 左右, 也就是说出射端的电磁波比入射时增强. 图 4(c) 为电磁波由结构右方输入后通过腔体结构时的电场分布图. 与传统的表面波“绕”过等离子体柱不同, 这种新型腔体结构可以产生表面电磁波局域耦合增强新模式. 这种模式的形成主要分为

亚波长腔体结构本身对电磁波的整体耦合作用、等离子体柱内部对电磁波的耦合 (黑色虚线区域) 以及两个柱子之间与亚波长腔体结构对电磁波的振荡耦合增强 (蓝色虚线区域). 这种传输模式是真正“穿”过高密度等离子体的新模式. 产生这种新型传播模式的因素除了新型亚波长腔体结构外, 还与电磁波频率、等离子体微柱尺寸及密度、填充材料有关.

同时, 对方形等离子体微柱阵列也进行了仿真计算, 其仿真结果与圆柱形等离子体微柱结果相仿.

方形等离子体微柱腔体结构如图 5(a) 所示, 等离子体微柱边长为 6 mm, 周期 12 mm, 等离子体密度依然为 $n_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. 图 5(b) 为 2.44 GHz 电磁波由结构左侧输入后电磁传输电场分布图, 可以看出, 其分布状况与圆形等离子体柱相差不大, 均是呈现一定周期变化, 且电磁波是从方形等离子体柱内部穿过. 图 5(c) 为 1—3 GHz 频域范围内的电磁传输 S 参数曲线, 这种结构能够在 1.64 和 2.44 GHz 得到电磁波传输通带, 透过系数可以达到约 -5 dB.

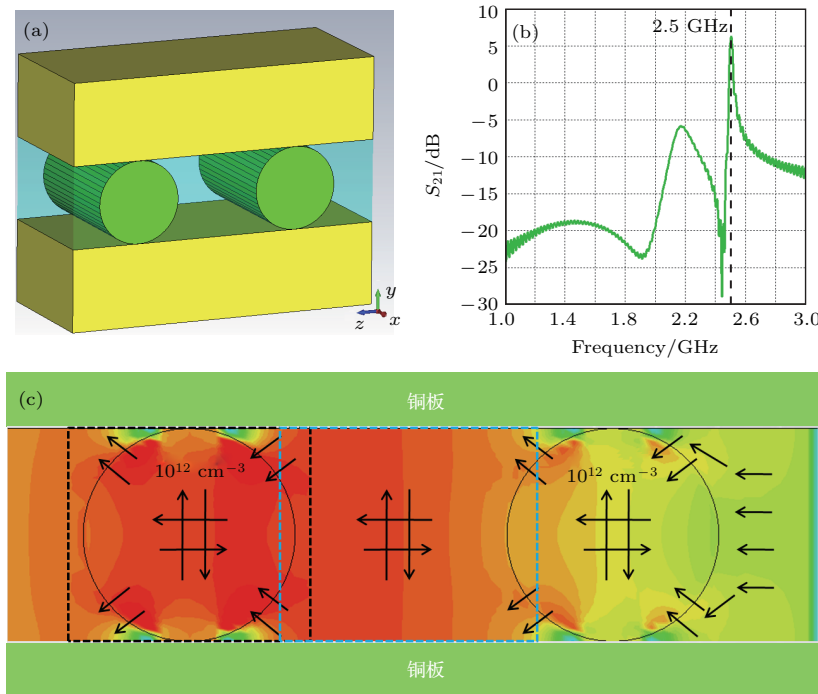


图 4 电磁波在等离子体微柱腔体结构中的传输模式 (a) 优化后的等离子体微柱腔体结构图; (b) 1—3 GHz 频域范围内的电磁传输透射系数 S_{21} 曲线; (c) 电磁波在优化后的等离子体微柱腔体结构中的电场分布图

Fig. 4. The transmission mode of electromagnetic wave in plasma micro-rod cavity structure: (a) The optimized structure of plasma micro-rod cavity; (b) the coefficient S_{21} curve of electromagnetic transmission within the range of 1 GHz to 3 GHz; (c) electric field distribution of plasma micro-rod cavity structure after the optimization of electromagnetic.

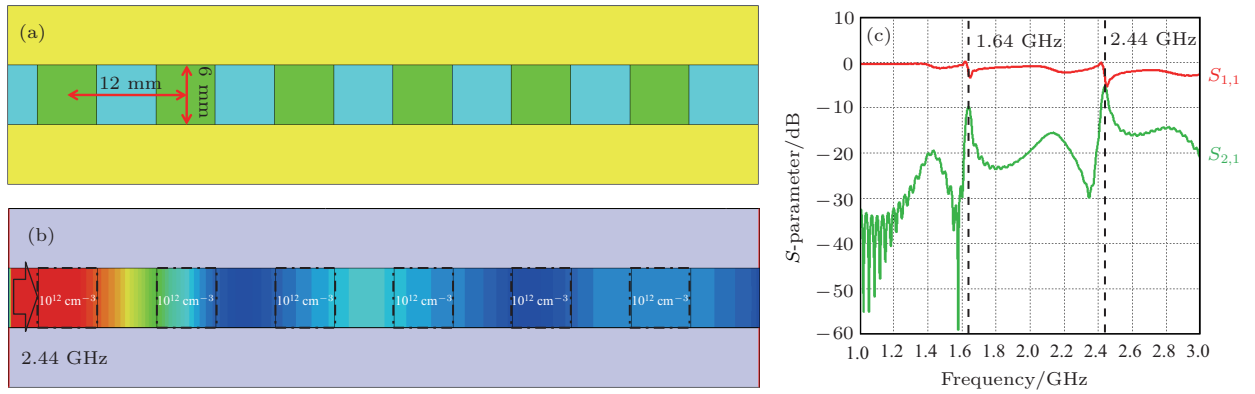


图5 电磁波在方形等离子体柱腔体结构内的传输仿真结果 (a) 方形等离子体柱腔体结构模型; (b) 2.44 GHz 电磁波入射后的传输电场分布; (c) 1—3 GHz 频域范围内的电磁传输 S 参数曲线

Fig. 5. The transmission simulation results of electromagnetic wave in the structure of a square plasma rod cavity structure: (a) Square plasma cavity structure model; (b) transmission electric field distribution of 2.44 GHz electromagnetic wave after incidence; (c) electromagnetic wave transmission S parameter within the frequency range of 1 GHz to 3 GHz.

通过上述计算可以看出, 这种新的传输模式对解决黑障通讯问题提供了一种全新的方法. 虽然现实中的黑障现象是由于超高速飞行器外面产生的具有复杂的动态非均匀流场等离子鞘套引起的, 但人们同样可以通过提高电磁波频率、引入磁场等方式减弱等离子体鞘套的影响. 而本文所阐述的研究则是根据设计一种局域耦合等离子体结构来实现电磁波在密度环境下的“穿透”传播. 而这种结构可以通过在飞行器表面安装一个可伸缩的柱状排列电极来实现, 当飞行器进入黑障区时将一系列排列电极打开, 用电极间的电场来调节等离子体分布, 从而获得一个电磁波传输通道.

5 结 论

本文通过时域有限元差分法仿真设计出了一种新型的基于高密度等离子体柱阵列的腔体结构. 这种特殊结构不同于传统二维亚波长尺寸等离子体柱阵列, 它是由金属腔体、高密度等离子体柱及填充在腔体中的电介质组成. 这种设计是利用腔体结构将电磁波在特定条件下局域耦合在亚波长等离子体柱内, 从而使电磁波由表面波衍射传输模式转变为局域耦合增强穿透模式. 这种新的传输模式对解决黑障通讯问题提供了一种全新的方法与途径.

参考文献

[1] Sakai O, Sakaguchi T, Tachibana K 2007 *Contrib. Plasma Phys.* **47** 96

[2] Sakai O, Sakaguchi T, Tachibana K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 241505
 [3] Keidar M, Kim M, Boyd I D 2008 *J. Spacecraft Rockets* **45** 445
 [4] Savino R 2010 *Open Aerospace Engineer. J.* **3** 76
 [5] Thoma C, Rose D V, Miller C L, Clark R E, Hughes T P 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 043301
 [6] Sakai O, Sakaguchi T, Tachibana K 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 0733041
 [7] Sakaguchi T, Sakai O, Tachibana K 2007 *Appl. Phys.* **101** 0733051
 [8] Sakai O, Sakaguchi T, Ito Y, Tachibana K 2005 *Plasma Phys.* **47** B617
 [9] Zhong S Y, Liu S 2009 *Chin. J. Comput. Phys.* **26** 3 (in Chinese) [钟双英, 刘崧 2009 计算物理 **26** 3]
 [10] Xia X R, Huang Y, Yin C Y 2009 *Aerospace Shanghai* **1** 12 (in Chinese) [夏新仁, 黄冶, 尹成友 2009 上海航天 112]
 [11] Zheng L, Zhao Q, Luo X G, Ma P, Liu S Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章 2012 物理学报 **61** 155203]
 [12] Yang M, Li X P, Liu Y M, Shi L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 085201 (in Chinese) [杨敏, 李小平, 刘彦明, 石磊 2014 物理学报 **63** 085201]
 [13] Zheng L 2013 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [郑灵 2013 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
 [14] Toader O, John S 2004 *Phys. Rev. E.* **70** 0466051
 [15] Chern R L, Chang C C, Chang C C 2006 *Phys. Rev. E.* **73** 0366051
 [16] Luo X, Ishihara T 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4780
 [17] Li X, Yang L, Hu C, Luo X, Hong M 2011 *Opt. Express* **19** 5283
 [18] Pu M, Li X, Ma X, Wang Y, Zhao Z, Wang C, Hu C, Gao P, Huang C, Ren H, Li X, Qin F, Yang J, Gu M, Hong M, Luo X 2015 *Sci. Adv.* **1** e1500396
 [19] Luo X 2015 *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* **58** 594201
 [20] Zhao Y, Huang C, Qing A, Luo X 2015 *IEEE Photonics J.* **99** 1

[21] Yang Y C 2010 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [杨永常 2010 硕士学位论文 (南京: 南京航空航天大学

大学)]

[22] Schexnayder C J, Evans J S, Huber P W 1970 *NASA SP-252* 277

New transmission mode of electromagnetic wave in high-density rod cavity structure*

Jiao Jiao Tong Ji-Sheng Ma Chun-Guang Guo Ji-Yu Bo Yong Zhao Qing†

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 26 July 2017; revised manuscript received 25 September 2017)

Abstract

During reentry of hypersonic spacecraft into the atmosphere, a break in the radio communication due to the presence of a plasma sheath on the spacecraft can occur. The break is commonly known as reentry communication blackout. Normally, for high density plasma, it is difficult for the electromagnetic waves of L and S bands to penetrate through. They may be decayed rapidly or reflected. That is why reentry communication blackout happens. In recent years, initiative methods are used to reduce the effects of reentry communication blackout such as by designing ideal shape for reentry vehicle, sprinkling special substances on the surface of the vehicle to improve efficiency of electromagnetic wave, adding magnetic field within the blackout area, etc. However, these methods not only fail to fully resolve the problems caused by blackout but also bring some new ones. Therefore, to resolve the problems, transmission mechanism of electromagnetic waves in plasmons should be analyzed.

In this paper, we use the finite difference time domain, consider the mechanism of electromagnetic waves in a structure consisting of high-density plasma rods, and refer to the two-dimensional (2D) photonic crystal and surface wave local coupling theory. A new type of high-density plasma micro-rod cavity structure is designed. The special structure, consisting of metal cavity, high-density plasma rod, and dielectric medium filled within the cavity, is quite different from traditional 2D sub-wavelength plasma rod arrays. This kind of design takes advantage of cavity structure to couple electromagnetic wave within the plasma rod so that the surface wave diffraction transmission mode can be changed into a local coupling enhancement penetrating mode. In this paper, we investigate the plasma micro-rod cavity structures with two shapes: cylinder and square, respectively. It is found that electromagnetic waves of L and S bands can have unusual transmission properties in certain frequency ranges, such that electromagnetic waves can pass through the interior of the high-density plasma rod.

Keywords: high-density plasma rod, photonic crystal, surface wave local coupling, transmission mode

PACS: 52.40.Db, 41.20.Jb, 52.25.Os

DOI: 10.7498/aps.67.20171728

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA7022016), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11275045), and the Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China (Grant No. 2013GZ01333).

† Corresponding author. E-mail: zhaoq@uestc.edu.cn