

# Influence of Femtosecond Filaments on Microwave Propagation

Jiaqi Chen, Junwei Chang, Lili Fu, Lanzhi Zhang, Zuoqiang Hao\*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin  
Email: \*zqhao@cust.edu.cn

Received: Nov. 4<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 26<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The effects of femtosecond filaments on microwave transmission are studied by experiments and numerical simulations, including the influences of incident angle of the microwave and separation distance of filaments on microwave reflection coefficient. The results indicate that when the plane of the incident microwave is perpendicular to the propagation direction of the filaments, the reflection coefficient increases with the increase of the incident angle of S-polarized microwave. When the plane of the P-polarized incident microwave is parallel to the filaments, the reflection coefficient decreases as the incident angle increases. Besides, the reflection will be enhanced by reducing the separation distance between the filaments.

## Keywords

Femtosecond Filament, Microwave, Reflectivity

---

# 飞秒激光成丝对微波传输的影响研究

陈佳琪, 常峻巍, 付丽丽, 张兰芝, 郝作强\*

长春理工大学理学院, 吉林 长春  
Email: \*zqhao@cust.edu.cn

收稿日期: 2019年11月4日; 录用日期: 2019年11月19日; 发布日期: 2019年11月26日

---

## 摘要

本文通过实验和数值模拟研究了等离子体丝对微波传输的影响, 研究了微波入射角度和等离子体丝间距对微波反射率的影响。结果表明, 当微波入射面与细丝传输方向垂直, S极化入射时, 微波的反射率随着

\*通讯作者。

入射角度的增加而迅速增大；当微波入射面与细丝平行，P极化入射时，反射率随入射角度增加而逐渐减小。此外，减小等离子体丝间距可以使微波的反射率增加。

## 关键词

飞秒激光成丝，微波，反射率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

飞秒激光在空气中传输时，主要由于非线性克尔自聚焦效应和等离子体散焦效应之间的动态平衡，能够形成一条长距离传输的等离子体通道，称为成丝现象。等离子体丝可以在空气中传输几百米甚至上千米[1]。等离子体丝内具有较高的电子密度，其电阻大约为  $10^{13}\sim 10^{15} \Omega/\text{m}$  [2]，具有较好的导电性能。等离子体丝还具有强度大、收放自由等特点，可以应用于电磁波防护、雷达信号探测等领域。近年来，国内外学者在等离子体丝与电磁波相互作用方面进行了大量研究[3] [4] [5] [6]。2007年，Musin等人利用多根细丝组成空心圆柱型波导通道研究了其对电磁波的引导作用，发现电磁波在该通道内的传输效率明显优于在自由空间中的传输效率[7]。Alshershby等人也对等离子体空心波导进行了研究，结果表明空心波导能够有效引导微波的传输[8]。最近，刘洋等人利用飞秒激光等离子体双丝进行了高功率微波传输的相关研究，结果显示，微波在等离子体传输线表面以接近光速传播[9]。Marian等人利用有限时域差分法，研究了35 GHz电磁波在不同电子密度、温度、层数的等离子体细丝阵列条件下的反射和透射率[10]。朱安石等人通过建立等离子体丝与电磁波相互作用模型，研究了不同参数等离子体丝对电磁波传输的影响[11]。刘洋等人研究了等离子体丝阵列对6 GHz微波的透射效果，结果表明，喇叭天线的偏振方向与等离子体丝阵列方向垂直时，透射效果要强于两者平行时的透射效果[12]。孙中浩等人仿真研究了飞秒等离子体丝阵列对不同极化10 GHz电磁波的吸收特性[13]。李志刚等人对等离子体与高功率微波相互作用的影响进行了研究，分析了入射电磁波频率在两者相互作用过程中对电子密度和透射电场的影响[14]。由上可以看出，研究人员在等离子体丝作为波导结构传输电磁波等方面已经进行了很多的研究，但是在激光等离子体细丝阵列与电磁波之间相互作用方面仍然比较欠缺，需要更深入的研究。

本文首先通过数值模拟计算了不同入射角度的微波入射到飞秒激光产生的等离子体双丝时的反射率。结合计算结果，实验研究了等离子体双丝对微波的反射。结果表明，当微波入射面与细丝传输方向垂直，S极化入射时，微波的反射率随着入射角度的增加而迅速增大；当微波入射面与细丝平行，P极化入射时，反射率随入射角度增加而逐渐减小。此外，随着等离子体丝间距的减小，反射率不断增加。

## 2. 数值仿真研究

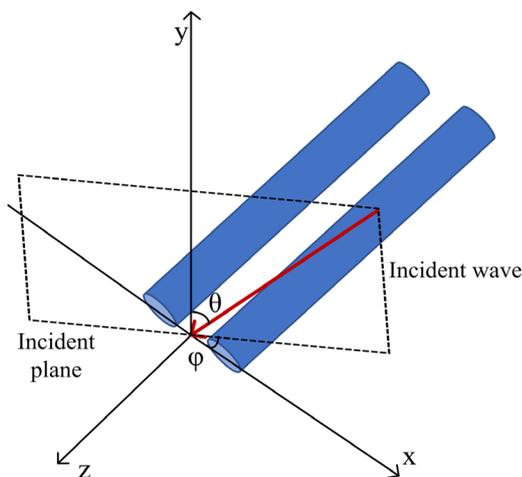
### 2.1. 模型设计

我们利用FDTD Solutions软件对等离子体细丝和微波的相互作用进行了数值仿真研究，首先建立了一个平行排列且电子密度和温度均匀分布的圆柱形等离子体丝，其中等离子体丝的有效折射率通过下式计算得到[10]：

$$\eta_f = \left( 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 (1 + i\nu_e/\omega)} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中，等离子体角频率  $\omega_{pe} = (n_e e^2 / m_e \epsilon_0)^{1/2}$ ， $n_e$  为电子密度， $e$ 、 $m_e$  分别为电子电量和质量， $e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ， $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  为真空中的介电常数。 $\nu_e = \nu_{ei} + \nu_{en}$  为电子的碰撞频率，其中  $\nu_{ei} = 3 \times 10^{-6} \ln \Lambda Z_{eff} n_e T_e^{-3/2}$  为电子离子碰撞频率[15]， $\nu_{en} = \sigma \nu_{th} n_n$  为电子与中性粒子碰撞频率。 $T_e$  为等离子体电子温度， $\ln \Lambda$  为库伦对数， $n_n$  为中性粒子密度， $Z_{eff} = 1$ 。碰撞散射截面  $\sigma = 5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ ，电子热运动速度  $\nu_{th} = 4.19 \times 10^7 T_e^{1/2} \text{ cm/s}$  [16] [17]。

等离子体双丝与微波相互作用的几何模型如图 1 所示，等离子体丝平行于  $z$  轴，入射微波平面与  $x$  轴的夹角为  $\varphi$ ，入射方向与  $y$  轴夹角为  $\theta$ 。



**Figure 1.** Geometry used to study the interaction of the incident microwave with the femtosecond filaments  
**图 1.** 等离子体双丝与微波相互作用的几何构型

依照图 1 所示的等离子体双丝与微波相互作用的几何模型，可分为四种情况，如图 2 所示：(a)  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化；(b)  $\varphi = 0^\circ$ ，P 极化；(c)  $\varphi = 90^\circ$ ，S 极化；(d)  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化。研究已经表明，当  $\varphi = 0^\circ$ ，P 极化和  $\varphi = 90^\circ$ ，S 极化时，微波的极化方向始终与等离子体丝轴线垂直，透射率接近于 1，几乎不存在反射[10]。因此，在本文中只考虑(a)  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化和(d)  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化这两种情况。

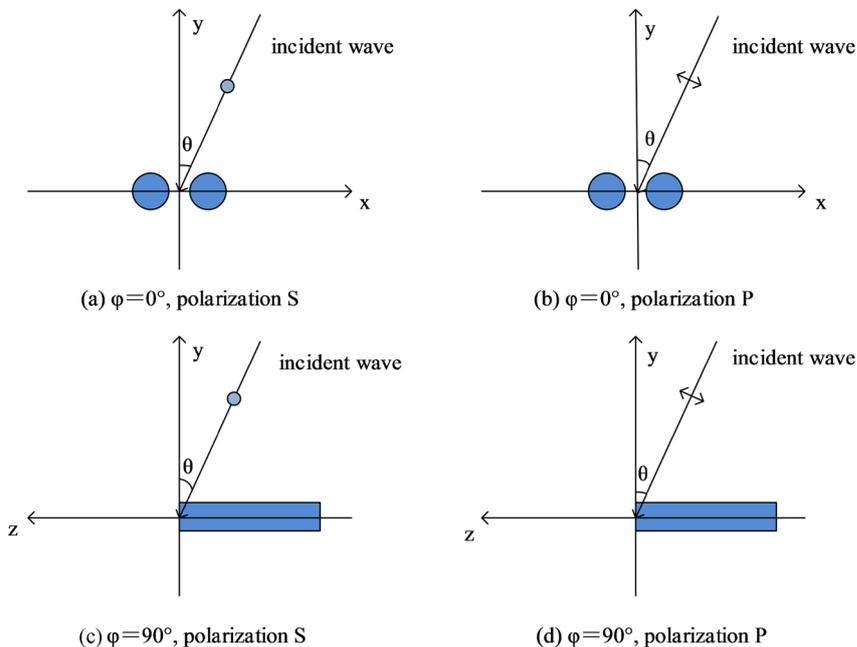
## 2.2. 数值仿真结果与分析

利用 FDTD Solutions 软件模拟了微波不同入射角度以及等离子体丝间距等条件下激光等离子体细丝对微波的反射。在数值模拟中设定等离子体丝的直径为  $150 \mu\text{m}$ 、电子密度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、电子温度为  $1 \text{ eV}$ 。

### 2.2.1. 微波入射角度对反射率的影响

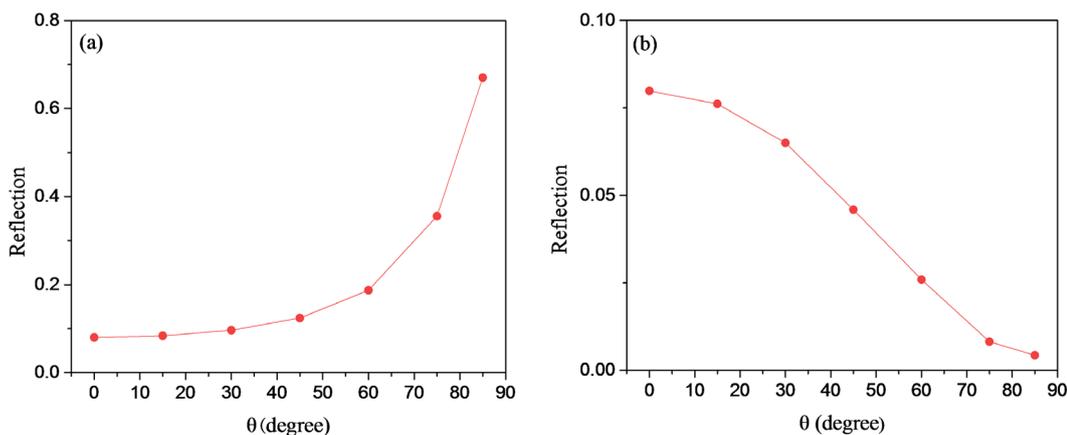
首先模拟了微波入射角度对反射率的影响。图 3 所示为等离子体双丝(间距为  $3 \text{ mm}$ )情况下微波反射率随微波入射角度的变化，其中(a)为  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化，(b)为  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化，微波频率为  $12 \text{ GHz}$ 。从图中可以看出，当  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化时，反射率随着微波入射角度的增加而逐渐增大；当入射角超过大约  $45^\circ$  时，反射率随角度增加而迅速增加，并在接近  $90^\circ$  时达到最大值。相反，在  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化的情况下，随着微波入射角的增大，反射率逐渐减小，在接近  $90^\circ$  时趋于零。产生这种结果的原因主要是由于，在  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化时，随着微波入射角的增加，细丝间距在入射微波波前的投影越来越小，即细丝的有效间距变

小了，因而反射率会随着入射角度变大而迅速变大。对于  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化的情况，从图 2(d)中可以看出，随着入射角度的增加，微波的极化方向与等离子体双丝平面的角度越来越大，其在细丝平面上的分量越来越小，细丝对微波的影响也就越来越小[18]，从而会造成微波反射率逐渐减小。



**Figure 2.** Geometry of the polarization direction of microwave in numerical calculation: (a)  $\varphi = 0^\circ$ , Polarization S, (b)  $\varphi = 0^\circ$ , Polarization P and (c)  $\varphi = 90^\circ$ , Polarization S, and (d)  $\varphi = 90^\circ$ , Polarization P

**图 2.** 激光细丝与微波相互作用不同极化情况: (a)  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化; (b)  $\varphi = 0^\circ$ ，P 极化、(c)  $\varphi = 90^\circ$ ，S 极化; (d)  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化



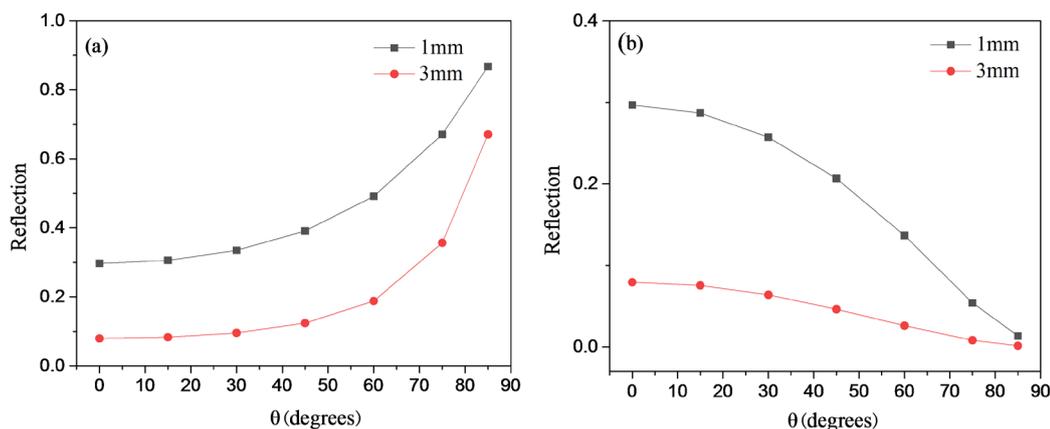
**Figure 3.** Influence of the incident angle of microwave on the reflection coefficient under the conditions of (a)  $\varphi = 0^\circ$ , polarization S and (b)  $\varphi = 90^\circ$ , polarization P, respectively

**图 3.** 微波入射角度对(a)  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化和(b)  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化时等离子体双丝微波反射率的影响

### 2.2.2. 等离子体丝间距对反射率的影响

图 4 给出了等离子体丝间距对反射率的影响，其中图(a)为  $\varphi = 0^\circ$ ，S 极化的情况，图(b)为  $\varphi = 90^\circ$ ，P 极化的情况。模拟中使用了间距为 1 mm 和 3 mm 的等离子体双丝，微波频率为 10 GHz。从图中可以看

出, 无论入射角度如何变化, 间距 1 mm 的等离子体双丝的反射率始终大于间距 3 mm 的, 这与董超等人研究的结果一致[18]。



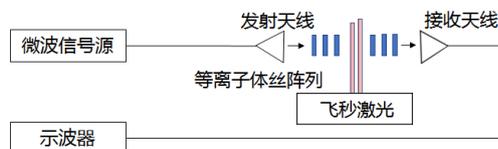
**Figure 4.** Influence of the spacing of the filaments on the reflection coefficient for (a)  $\varphi = 0^\circ$ , polarization S and (b)  $\varphi = 90^\circ$ , polarization P incident microwave respectively

**图 4.** 等离子体丝间距对(a)  $\varphi = 0^\circ$ , S 极化和(b)  $\varphi = 90^\circ$ , P 极化微波的反射率的影响

### 3. 实验部分

#### 3.1. 实验装置

在模拟研究的基础上, 我们进一步实验研究了等离子体丝对微波传输的影响。图 5 为飞秒激光等离子体丝与微波相互作用的实验装置示意图, 实验中采用重复频率 1 kHz、中心波长 800 nm、脉冲宽度 45 fs 的掺钛蓝宝石飞秒激光放大器作为光源。首先, 激光经过一个分束镜分为两个光束, 利用焦距  $f = 1$  m 的平凸透镜聚焦, 在空气中产生等离子体丝, 细丝之间的间距可控。然后, 将等离子体丝布置到待测区域, 微波信号源 (TH1427H) 发出微波信号经同轴电缆线传输由喇叭天线 (WR-90) 发射出去, 经过等离子体细丝区域之后再由相同型号的喇叭天线 (WR-90) 接收, 通过示波器 (TDS7254B) 记录信号, 进而分析透射微波信号数据研究等离子体丝对微波的影响规律。需要指出的是, 由于我们实验所用的信号源功率有限, 发射和接收的喇叭天线不能拉开足够的距离, 并且喇叭天线又具有较大的尺寸, 如果直接测量反射信号会存在很大的误差, 因此采用了测量微波的透射信号, 如图 5 所示。



**Figure 5.** Experimental setup

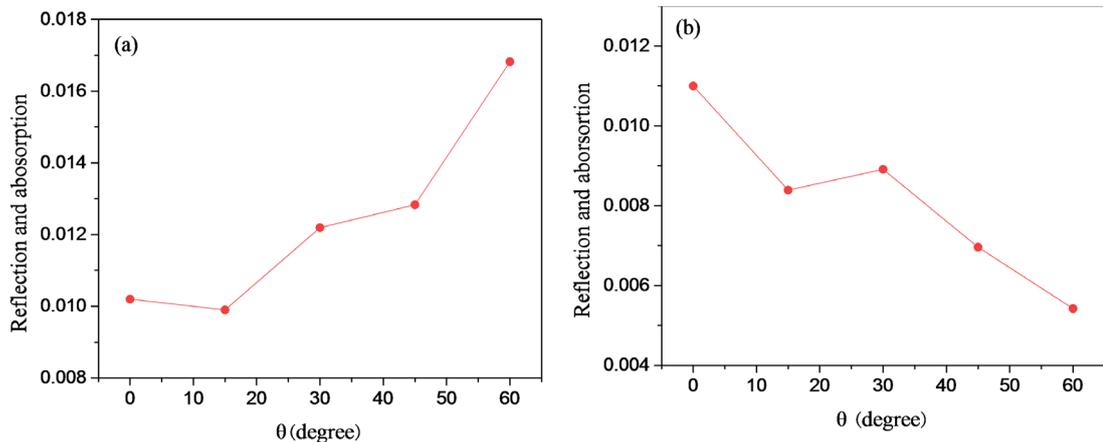
**图 5.** 实验装置示意图

#### 3.2. 结果与讨论

##### 3.2.1. 微波入射角度对反射率和吸收率的影响

首先, 研究了微波入射角度对微波反射和吸收的影响。图 6 为等离子体双丝条件下反射率和吸收率之和随微波入射角度的变化趋势, 其中图(a)为  $\varphi = 0^\circ$ , S 极化, 图(b)为  $\varphi = 90^\circ$ , P 极化的情况。实验中采用的微波频率为 12 GHz; 等离子体丝长为 80 mm, 双丝间距为 8 mm; 发射和接收喇叭天线之间的间

距为 80 mm。从图 6 中可以看出, 当  $\varphi = 0^\circ$ , S 极化时, 反射率和吸收率之和随着微波入射角度的增加而增大; 当  $\varphi = 90^\circ$ , P 极化时, 反射率和吸收率之和随着微波入射角度增加而逐渐减小, 这与数值模拟的结论一致(图 3)。但是, 由于数值模拟中的激光等离子体丝采用了简化的参数设定, 所以, 在具体数值上, 得到的结果不能和实验结果完全相符。



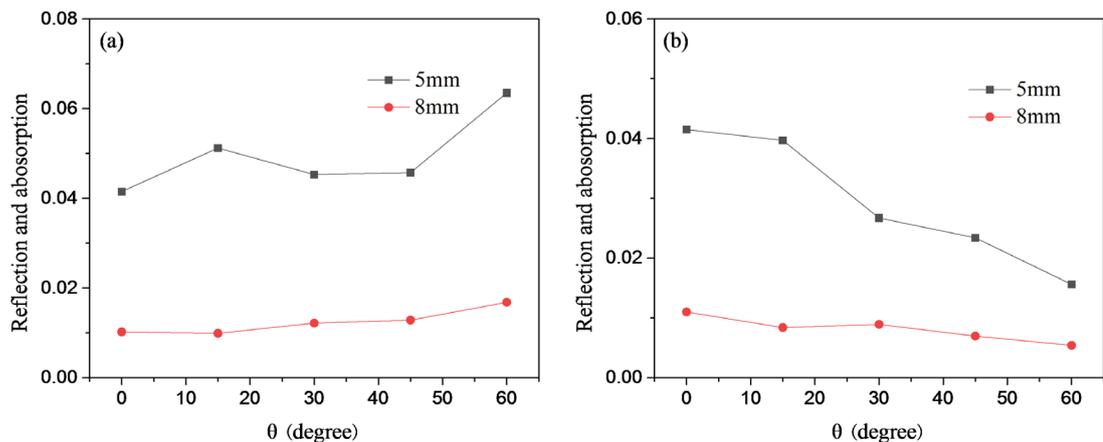
**Figure 6.** Influence of the incident angle of microwave on the sum of reflection and absorption coefficients under the conditions of (a)  $\varphi = 0^\circ$ , polarization S and (b)  $\varphi = 90^\circ$ , polarization P, respectively

**图 6.** (a)  $\varphi = 0^\circ$ , S 极化和(b)  $\varphi = 90^\circ$ , P 极化微波入射角度对其反射率和吸收率之和的影响

### 3.2.2. 等离子体丝间距对反射率和吸收率的影响

进一步研究了等离子体丝间距对微波反射率和吸收率之和的影响, 结果见图 7, 其中图(a)为  $\varphi = 0^\circ$ , S 极化, 图(b)为  $\varphi = 90^\circ$ , P 极化的情况。发射天线和接收天线的距离为 80 mm, 等离子体丝长度为 80 mm, 丝间距分别为 5 mm 和 8 mm。由于实验条件限制, 入射微波的角度范围从  $0^\circ$  变化到  $60^\circ$ 。从图中可以看出, 实验上得到了与数值模拟结论相符的结果, 即随着等离子体丝间距的增加, 反射率和吸收率之和减小。

结合实验和模拟, 我们可以得到这样的结论: 通过优化等离子丝间距以及微波入射角度, 可以控制等离子体丝对微波的反射和吸收效率。



**Figure 7.** Influence of the spacing of the filaments on the sum of reflection and absorption coefficients for (a)  $\varphi = 0^\circ$ , polarization S and (b)  $\varphi = 90^\circ$ , polarization P microwave, respectively

**图 7.** 等离子体丝间距对(a)  $\varphi = 0^\circ$ , S 极化和(b)  $\varphi = 90^\circ$ , P 极化微波反射率和吸收率之和的影响

## 4. 结论

数值模拟和实验研究了飞秒激光等离子体细丝对不同极化和不同入射角度的微波传输的影响, 结果表明, 当  $\varphi = 0^\circ$ , S 极化时, 微波反射率随着微波入射角度的增加而迅速增加; 当  $\varphi = 90^\circ$ , P 极化时, 微波反射率随着微波入射角度的增加而逐渐减小; 等离子体细丝间距越小越有利于提高微波的反射率。

## 参考文献

- [1] Wöste, L., Wedekind, C., Wille, H., Rairoux, P., Stein, B., Nikolov, S., Werner, C., Niedermeier, S., Ronnenberger, F., Schillinger, H. and Sauerbrey, R. (1997) Femtosecond Atmospheric Lamp. *Laser and Optoelektron*, **29**, 51-53.
- [2] Hao, Z.Q., Zhang, J., Yu, J., Zheng, Z.Y., Yuan, X.H., Zhang, Z., Li, Y.T., Wang, Z.H., Ling, W.J. and Wei, Z.Y. (2006) The Comparison Study of Diagnostics of Light Filaments in Air. *Science in China: G*, **49**, 228-235. <https://doi.org/10.1007/s11433-006-0228-7>
- [3] Bogatskaya, A.V., Popov, A.M. and Smetanin, I.V. (2014) Amplification and Guiding of Microwave Radiation in a Plasma Channel Created by an Ultrashort High-Intensity Laser Pulse in Noble Gases. *Journal of Russian Laser Research*, **35**, 437-446. <https://doi.org/10.1007/s10946-014-9445-0>
- [4] 赵朋程, 郭立新, 李慧敏. 110 GHz 高功率微波在大气击穿等离子体中的传输、反射和吸收[J]. 电波科学学报, 2016, 31(3): 512-515.
- [5] Alshershby, M., Lin, J.Q. and Hao, Z.Q. (2012) Numerical Analysis of Guiding a Microwave Radiation Using a Set of Plasma Filaments: Dielectric Waveguide Concept. *Applied Physics B*, **45**, 065102. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/6/065102>
- [6] Naidis, G.V. (2001) On Propagation Characteristics of Electromagnetic Waves along a Plasma Filament. *Journal of Physics D*, **34**, L103-L104. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/18/101>
- [7] Musin, R.R., Shneider, M.N., Zheltikov, A.M. and Miles, R.B. (2007) Guiding Radar Signals by Arrays of Laser-Induced Filaments: Finite-Difference Analysis. *Applied Optics*, **46**, 5593-5597. <https://doi.org/10.1364/AO.46.005593>
- [8] Alshershby, M., Hao, Z.Q. and Lin, J.Q. (2012) Guiding Microwave Radiation Using Laser-induced Filaments: The Hollow Conducting Waveguide Concept. *Journal of Physics D*, **45**, 265401. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/26/265401>
- [9] Liu, Y., Chen, Z.S. and Shi, J.M. (2019) Simulation of HPM Propagation in a Double-Line Containing Plasma Filaments Produced by Intense Femto Second Laser Pulses. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **47**, 1394-1398. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2887231>
- [10] Marian, A., Morsli, M.E., Vidal, F. and Payeur, S. (2013) The Interaction of Polarized Microwaves with Planar Arrays of Femto Second Laser-produced Plasma Filaments in Air. *Physics of Plasmas*, **20**, 023301. <https://doi.org/10.1063/1.4792160>
- [11] 朱安石, 陈自力, 杨勇, 刘晓倩, 甄云卉. 等离子体与电磁波相互作用 FDTD 数值模拟[J]. 现代雷达, 2015, 37(8): 72-80.
- [12] 刘洋, 程立, 汪家春, 王启超, 袁忠才, 时家明. 发光等离子体对 6 GHz 高功率微波的防护性能研究[J]. 发光学报, 2016, 37(10): 1292-1298.
- [13] 孙中浩, 董超, 张亚春, 何湘, 倪晓武, 骆晓森. 飞秒光丝阵列对 10 GHz 电磁波的吸收特性[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(5): 053201.
- [14] 李志刚, 程立, 马志伟, 汪家春, 时家明. 入射频率对高功率微波与等离子体相互作用的影响分析[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(4): 47-52.
- [15] Huba, J.D. (2011) NRL Plasma Formulary. Naval Research Laboratory, Washington DC.
- [16] 吴莹. 激光等离子体的微波干扰和诊断研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [17] FF·陈. 等离子体物理学导论[M]. 林光海, 译. 北京: 科学出版社, 2016.
- [18] 董超, 孙中浩, 张亚春, 何湘, 倪晓武, 骆晓森. 激光等离子体丝阵列对 10GHz 微波传输特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 160-167.