

激光等离子体丝阵列对 10 GHz 微波传输特性的影响

董超¹, 孙中浩¹, 张亚春¹, 何湘², 倪晓武¹, 骆晓森¹

(1. 南京理工大学理学院, 江苏南京 210094; 2. 河海大学理学院, 江苏南京 210098)

摘要: 为了研究飞秒激光等离子体丝阵列对 10 GHz 微波传输特性的影响, 利用 COMSOL 软件构建了飞秒激光等离子体丝阵列与微波相互作用的数值仿真模型, 研究了等离子体丝阵列参数、等离子体特征参数、阵列层数对微波反射率和透射率的影响。数值结果表明: 当微波的电场方向垂直于等离子体丝轴向时, 无论微波相对于丝阵列的入射角如何变化, 丝阵列对微波完全没有影响。增加丝的直径或者电子数密度、减少阵列间距或者电子温度都可以使反射率增加, 透射率减小。光丝直径为 500 μm , 阵列间距为 1 mm 的等离子体丝阵列对 10 GHz 微波反射率最大可达到 0.88, 此时等离子体的特征参数为 $n_e=1\times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $T_e=0.3 \text{ eV}$ 。当增加丝阵列的层数时, 透射率减小, 最终趋近于 0, 而反射率则保持不变。该研究结果对飞秒激光等离子体丝阵列屏蔽干扰微波具有重要意义。

关键词: 飞秒激光等离子体丝; 阵列; 反射率; 透射率

中图分类号: TN973; TN011; O53 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1006001

Influence of laser-produced plasma filaments array on transmission characteristics of 10 GHz microwave

Dong Chao¹, Sun Zhonghao¹, Zhang Yachun¹, He Xiang², Ni Xiaowu¹, Luo Xiaosen¹

(1. College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. College of Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the influence of femtosecond laser-produced plasma filaments array on the transmission characteristics of 10 GHz microwave, the numerical simulation model of the interaction between femtosecond laser-produced plasma filaments array and microwave was established by COMSOL. The effects of plasma filaments array parameters, plasma characteristic parameters and array layer number on the reflectance and transmittance of microwave were studied. The numerical results show that the plasma filaments array becomes transparent when the direction of the microwave electric field is perpendicular to the filaments axis, regardless of the incidence angle of the microwave with respect to the filaments. Increasing the filaments diameter or electron number density, or decreasing the filaments spacing or electron temperature will lead to the reflectance increasing and the transmittance decreasing. The maximum reflectance of 10 GHz microwave with plasma filaments array is up to 0.88 while the

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(51107033); 江苏省青年基金(BK20130751)

作者简介: 董超(1991-), 男, 硕士生, 主要从事等离子体与电磁波相互作用方面的研究。Email: 18762556775@163.com

导师简介: 骆晓森(1959-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光物理方面的研究。Email: nlgxs@163.com

filaments diameter is 500 μm , the filaments spacing is 1 mm, and at this time the electron number density is $1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ and the electron temperature is 0.3 eV. When the number of filaments array layer number is increased, the transmittance decreases, eventually approaches zero, and the reflectance remains constant. The results of this study are helpful for the femtosecond laser-produced filaments array to interfere with microwave.

Key words: femtosecond laser-produced plasma filaments; array; reflectance; transmittance

0 引言

随着激光技术的发展, 超强飞秒激光脉冲在空气中传输会形成一条长度达到几百米甚至是几十千米的等离子体光丝^[1-3], 这是非线性克尔自聚焦效应和等离子体散焦作用达到动态平衡导致的。光丝的横截面具有复杂的分布^[4], 电子数密度为 $10^{21} \sim 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 量级, 并且光丝像金属导线一样具有很强的导电性, 可以与微波发生相互作用, 引起了国内外学者的广泛关注^[5-7]。1991 年, Shen H M^[8]对利用空心的圆柱形激光等离子体波导传输微波的可行性进行了理论研究, 从理论上证明了微波可以在理想的激光等离子体波导中以近似光速的速度进行传输, 并且在传输过程中微波波形保持不变。2007 年, 俄罗斯莫斯科州立大学 Zheltikov A M^[9]等人利用差分分析法对电磁波信号在激光等离子体细丝组成的空心圆柱形波导中的传输特性进行了研究。2008 年, 加拿大的 Chateauneuf M^[10]等人利用飞秒激光系统首次在空气中实现了飞秒激光等离子体波导, 并且成功利用这种等离子体波导传输了频率为 10 GHz 的微波。实验结果表明这种等离子体波导传输微波的强度是自由空间传输强度的 6 倍。2009 年, 俄罗斯 Bogatov N A^[11]等人基于传统的双导体传输线传导微波机理设计了平行“双丝”的传输线结构, 并开展了传导微波的实验研究。2014 年, 美国马里兰大学^[12]利用相位板在空气中形成多个等离子体丝, 并利用光丝阵列之间的空气波导, 实现了微波定向传播。当前的研究方向主要是利用等离子体丝传输微波, 而将飞秒激光等离子体丝组成“栅栏”状阵列对微波进行屏蔽干扰的研究则很少见。

将飞秒激光等离子体丝阵列灵活地布置于数十千米外, 通过消减或抵消探测信号来实现隐身; 或者增强目标的可探测信号, 使得对方雷达出现大面积

虚假信号而达到隐身目的。同时等离子体丝还具有隐蔽性和不可破坏性等特点, 通过开关激光器可以迅速实现等离子体丝阵列的布置与撤销。文中利用 COMSOL 软件构建了等离子体丝阵列与微波相互作用的物理模型, 采用有限元方法求解微波的亥姆霍兹方程, 研究等离子体丝阵列的电子数密度、电子温度和阵列层数对 10 GHz 微波反射率和透射率的影响。

1 数值模型

1.1 理论模型

等离子体中有大量的自由电子, 因为电子质量较小, 会对微波的传播产生很大影响。等离子体的性质可以用一个与频率有关的介电常数来描述, 考虑等离子体的碰撞频率, 则等离子体的相对介电常数 ϵ_r 可以表示为^[13]:

$$\epsilon_r = n^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - j\nu)} \quad (1)$$

式中: ν 为电子碰撞频率; ω 为入射微波的角频率; ω_{pe} 为等离子体频率; n 为等离子体的折射率; j 为虚数单位, $j = \sqrt{-1}$ 。

电子碰撞频率 ν 可以表示为^[14]:

$$\nu = \nu_{ei} + \nu_{en} \quad (2)$$

式中: ν_{ei} 为电子与离子碰撞频率, 可表示为:

$$\nu_{ei} = \frac{4\sqrt{2}\pi e^4 Z n_i \ln \Delta}{3\sqrt{m_e} (kT_e)^{3/2}} \cong 2.9 \times 10^{-9} \ln \Delta \frac{n_e}{T_e^{3/2}} \quad (3)$$

式中: $\ln \Delta$ 为库仑对数; e 为电子电量; m_e 、 T_e 分别为电子质量和电子温度; n_e 为电子数密度; Z 为离子的电荷数。

ν_{en} 为电子与中性粒子的碰撞频率, 可表示为:

$$\nu_{en} = 2.6 \times 10^4 \sigma^2 n_n T_e^{1/2} \quad (4)$$

式中: n_n 为中性粒子数密度; σ 为粒子的碰撞截面半径。

微波在等离子体中的传播常数可以写为实部和虚部之和^[13]：

$$k = k_0 \sqrt{\epsilon_r} = k_r + jk_i \quad (5)$$

式中： $k_0 = \omega/c$ 为真空中的波数， c 为真空中的光速； k_r, k_i 分别为传播常数的实部和虚部。传播常数 k 出现虚部意味着微波在等离子体中传播时将被衰减。

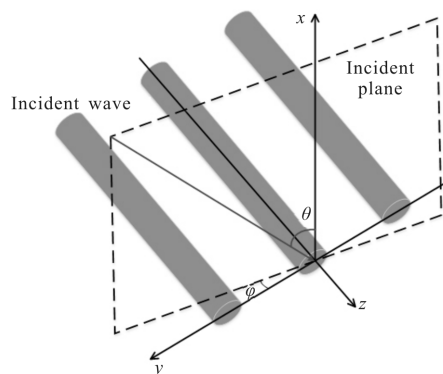
电磁场的亥姆霍兹方程为：

$$\nabla \times \nabla \times E - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_r \cdot E = 0 \quad (6)$$

式中： E 为电场； ω 为微波的角频率； ϵ_r 为等离子体的相对介电常数。利用 COMSOL 软件中 RF 模块建立几何模型，并在几何模型的单元左右两边施加 Floquet 周期性边界条件来模拟周期性光丝阵列。“端口”边界条件应用于单元的上下两边，可依据 S 参数自动确定反射和传输特性。对模型进行有限元网格划分，等离子体丝域采用细化的网格处理，空气域则可采用相对较为粗大的网格处理。最后通过数值稳定的边单元结合迭代算法进行求解。

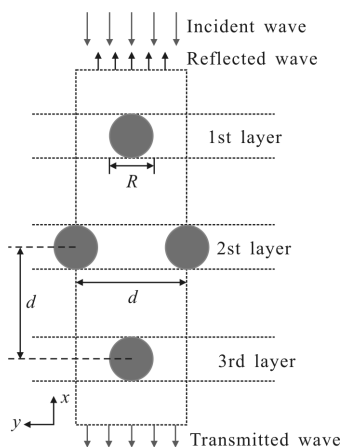
1.2 仿真模型

为了简化计算，将飞秒激光等离子体丝简化为圆柱形结构，等离子体频率和电子碰撞频率在空间上是均匀的，并且假设等离子体丝内的电子密度和温度分布也是均匀的。单层飞秒激光等离子体丝阵列与微波相互作用的示意图如图 1(a) 所示。飞秒激光等离子体丝的直径为 R ，并且丝的轴向平行于 z 轴，等离子体丝沿着 y 轴方向周期性排列，组成间距为 d 的等离子体丝阵列。角度 θ 表示微波传播方向与 x 轴之间的夹角，而角度 φ 则表示入射平面与 $x-y$ 平面之间的夹角。模拟计算时仅考虑 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 这两种情况（ φ 为其他任意角度均可以表示为这两种情况的线性组合）。多层飞秒激光等离子体丝阵列与微波相互作用的仿真模型如图 1(b) 所示，层与层之间的距离和丝阵列间距均为 d ，每层光丝阵列相对于上一层阵列整体沿 y 轴平移 $d/2$ 。微波从阵列上侧入射，传播到阵列处时，部分微波被反射，部分微波被丝阵列吸收，还有部分微波发生透射。为了直观形象地描述丝阵列的排布情况，示意图中的等离子体丝直径与阵列间距差不多大，但实际上等离子体丝直径为百微米量级是远远小于量级为厘米的阵列间距。



(a) 单层

(a) Single layer



(b) 多层

(b) Multiple layers

图 1 飞秒激光等离子体丝阵列与微波相互作用的仿真模型
Fig.1 Model used to describe the interaction of the microwave with the array of femtosecond laser-produced plasma filaments

当微波以角度 θ 入射到单层丝阵列时，需要考虑两种不同的极化状态：入射微波的电场垂直于入射平面时定义为 S 极化，入射微波的电场平行于入射平面时定义为 P 极化。因此，针对特定的 φ 值（ $\varphi=0^\circ$ 或 $\varphi=90^\circ$ ）和极化状态（S 极化或 P 极化），两两组合共有四种情况，如图 2 所示。

对于图 2(b) $\varphi=0^\circ$ 、P 极化和图 2(c) $\varphi=90^\circ$ 、S 极化，无论极化微波以什么角度入射到等离子体丝阵列平面，微波的电场方向始终垂直于等离子体丝轴向，丝阵列对微波完全没有影响，透射率恒定为 1。这是因为当微波的电场方向垂直于等离子体丝轴向时，电子沿着电场方向没有足够的运动空间，不能响应电场振荡，也就不能反射或吸收微波能量，使得微波通过丝阵列而几乎不发生任何改变。当微波的电

场方向平行于等离子体丝时, 电场会驱动等离子体丝中的电子沿着丝的长度方向振荡, 电子与光丝中的中性粒子发生碰撞, 使得微波发生衰减。因此文中只对图 2(a) $\varphi=0^\circ$ 、S 极化和图 2(d) $\varphi=90^\circ$ 、P 极化这两种情况展开研究, 而当微波垂直入射到等离子体丝阵列平面即 $\theta=0^\circ$ 时, $\varphi=0^\circ$ 、S 极化和 $\varphi=90^\circ$ 、P 极化为同一情况。

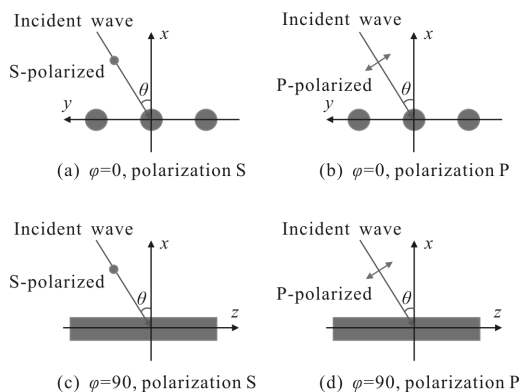


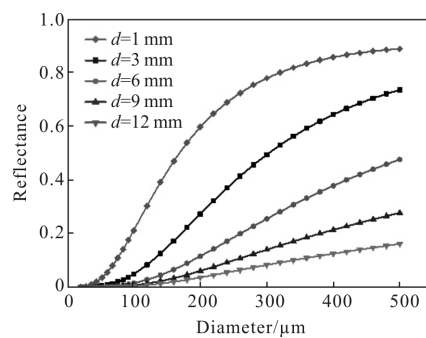
图 2 特定 φ 值($\varphi=0^\circ$ 或 $\varphi=90^\circ$)和极化状态(S 极化或 P 极化) 两两组合后的四种情况

Fig.2 Four possible configurations given by the combination of φ values($\varphi=0^\circ$ or $\varphi=90^\circ$)and polarization states(S or P)

2 数值模拟结果与分析

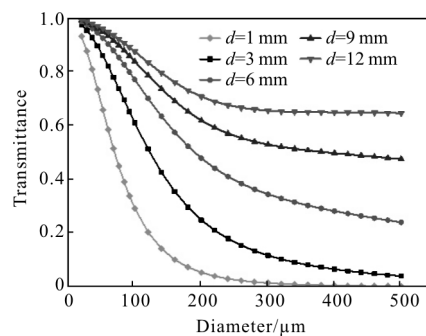
2.1 阵列参数对微波反射率和透射率的影响

采用上述仿真模型, 模拟计算 $\theta=0^\circ$, $\varphi=0^\circ$ 、S 极化($\theta=0^\circ$, $\varphi=90^\circ$ 、P 极化)下等离子体丝阵列对微波反射率和透射率的影响, 此时入射微波频率 $f=10$ GHz。等离子体特征参数: 电子数密度 $n_e=1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, 电子温度 $T_e=0.3 \text{ eV}$ 。等离子体丝阵列参数: 丝直径 R 为 $0 \sim 500 \mu\text{m}$, 阵列间距 d 分别为 $1, 3, 6, 9, 12 \text{ mm}$ 。图 3 描述了在不同等离子体丝阵列间距下, 微波反射率和透射率随等离子体丝直径变化关系。从图 3(a) 中可以看出, 随着丝直径的增加, 阵列对微波的反射率增大。当 $R=500 \mu\text{m}$, $d=1 \text{ mm}$ 时, 其反射率达到 0.88 。这是因为随着丝直径的增加, 每根光丝对微波影响范围逐渐扩大, 导致整个阵列对微波的反射率增大, 透射率减小。从图 3(b) 中可以看出, 随着丝半径的增加, 阵列对微波的透射率减小。但在实际情况中, 丝的半径并不容易扩大而调整等离子体丝阵列间距更为容易可行, 因此在后面计算中, 光丝直径都取 $300 \mu\text{m}$ 。



(a) 反射率

(a) Reflectance



(b) 透射率

(b) Transmittance

图 3 在不同等离子体丝阵列间距下, 微波反射率和透射率随等离子体丝直径变化关系

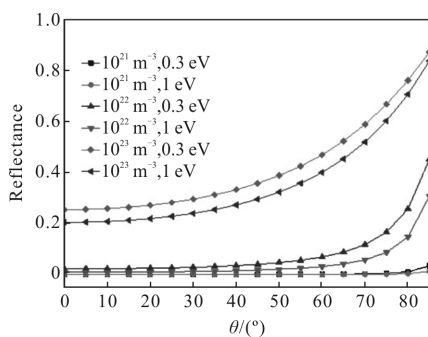
Fig.3 Transmittance and reflectance of microwave as a function of plasma filament diameter under different filament spacing

当反射率大于 0.1 时, 认为等离子体丝阵列对微波才有反射作用。从图 3(a) 中可以看出, 随着阵列间距的增加, 阵列对微波的反射率减少。当光丝直径为 $300 \mu\text{m}$, 丝间距小于 9 mm 时, 丝阵列对微波的反射率才会大于 0.1 。即丝阵列间距与微波波长比值 d/λ 小于 0.3 时 (一个波长范围内至少有三根光丝), 阵列对微波才会有反射效果。从图 3(b) 中可以看出, 随着阵列间距的增加, 阵列对微波的透射率增大。当光丝间距与微波波长比 d/λ 小于 0.1 时, 其反射率会急剧上升, 透射率急剧下降。这是因为高占空比的等离子体丝阵列可被看作是一个具有高密度的等离子体薄板层, 使微波不能进入等离子体层内部且发生强反射。

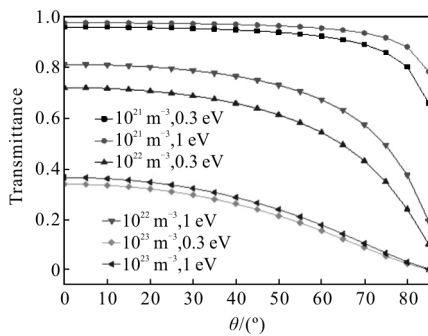
2.2 等离子体特征参数对微波反射率和透射率的影响

当改变飞秒激光参数时, 等离子体特征参数也会发生改变, 此时微波的传播特性也会发生改变。微

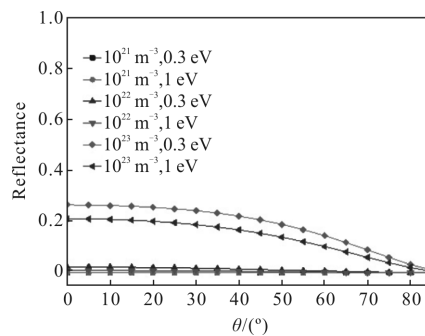
波以角度 θ 入射到单层等离子体丝阵列, 在不同电子数密度和电子温度下, 微波反射率和透射率随入射角 θ 变化关系如图 4 所示。仿真参数为: $f=10\text{ GHz}$ 、 $R=300\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d=6\text{ mm}$ 、电子数密度 n_e 分别为 1×10^{21} 、 1×10^{22} 、 $1\times 10^{23}\text{ m}^{-3}$ 。电子温度 T_e 分别为 0.3、1 eV。从图 4(a)、(b)中可以看出, 当 $\varphi=0^\circ$ 、S 极化时, 随着电子数密度的增加, 阵列对微波的反射率增大而透射率减小; 随着电子温度的增加, 阵列对微波的反射率减小而透射率增大。对于图 4(c)、(d) $\varphi=90^\circ$ 、P 极化情况可以得到相同的结论。微波以 $\theta=0^\circ$ 正入射到等离子体丝阵列时, 电子温度为 0.3 eV, 电子数密度从 10^{21} m^{-3} 增加到 10^{23} m^{-3} , 其反射率从 0 增加到约 0.26, 透射率由 1 减少到约 0.35。当电子数密度低于 10^{21} m^{-3} 时, 丝阵列对微波的反射率几乎为 0, 透射率为 1。这是因为随着电子数密度上升, 使得等离子体的电导率也上升, 等离子体的“金属性”也就更强, 它们就能更有效地屏蔽入射微波。因此反射率会随着电子数密度增加而增加, 透射率随着电子数密度增加而减少。



(a) $\varphi=0^\circ$, S 极化, 反射率
(a) $\varphi=0^\circ$, polarization S, reflectance

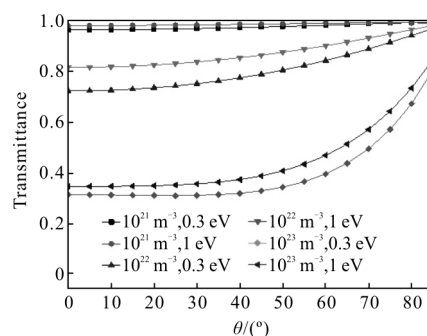


(b) $\varphi=0^\circ$, S 极化, 透射率
(b) $\varphi=0^\circ$, polarization S, transmittance



(c) $\varphi=90^\circ$, P 极化, 反射率

(c) $\varphi=90^\circ$, polarization P, reflectance



(d) $\varphi=90^\circ$, P 极化, 透射率

(d) $\varphi=90^\circ$, polarization P, transmittance

图 4 在不同电子数密度、电子温度下, 微波反射率和透射率随微波入射角 θ 变化关系

Fig.4 Transmittance and reflectance of microwave as a function of incidence angle θ under different electron density and electron temperature

由电子碰撞频率关系式可知: 电子温度越高, 碰撞频率越高。碰撞频率是表征微波与等离子体之间能量转化速率的物理量。碰撞频率较低时, 大部分微波在等离子体丝表面被反射, 进入等离子体丝内部的微波极少。随着电子温度增加, 等离子体丝内的电子与离子、中性粒子碰撞更加频繁, 电子在电场中还来不及被充分加速就受到了碰撞, 电子在单位时间内从电场获得的动能减少, 微波的能量还来不及传递便已穿过等离子体丝, 导致透射率增大反射率减小。因此, 高密度、低碰撞频率的等离子体是非常好的电磁反射体, 可以用来研制等离子体隐身天线^[15]。

从图 4(a)、(b)中可以看出, 当 $\varphi=0^\circ$ 、S 极化时, 随着微波入射角的增加, 阵列对微波的反射率增大而透射率减小; 图 4(c)、(d) $\varphi=90^\circ$ 、P 极化时, 随着微波入射角的增加, 阵列对微波的反射率却在减小而

透射率增大。对于 $\varphi=0^\circ$ 、S 极化情况,无论极化微波入射角如何改变,微波的电场方向始终平行于等离子体丝轴向,等离子体丝对微波的作用强度不变。随着入射角的增大,光纤阵列对于微波作用的有效间距(微波可以直接透过的宽度)逐渐减小。阵列间距减小会导致反射率增大,透射率减小。对于 $\varphi=90^\circ$ 、P 极化情况,微波的电场方向与等离子体丝轴向有夹角,只有平行于光纤轴向的电场分量才会对阵列的反射率和透射率有影响,而垂直于光纤轴向的电场分量对阵列的反射率和透射率并没有影响。随着入射角的增大,微波的电场方向与光纤轴向夹角越来越大,平行于光纤轴向的电场分量越来越小。因此随着微波入射角的增加,阵列对微波的反射率却在减小而透射率增大。

等离子体的特征参数电子数密度和电子温度对微波的传播特性影响可以通过趋肤深度这一概念进一步理解。在 $\omega \cdot \omega_{pe}$ 和 $\omega \cdot \nu$ 的条件下,趋肤深度 δ 可表示为^[14]:

$$\delta \approx \frac{c}{\omega_{pe}} \left(\frac{2\nu}{\omega} \right)^{1/2} \quad (7)$$

式中: ν 为电子碰撞频率; ω 为入射微波的角频率; ω_{pe} 为等离子体频率; c 为真空中的光速。计算出电子数密度 n_e 分别取 1×10^{21} 、 1×10^{22} 、 $1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, 电子温度 T_e 分别取 0.3、1 eV 时的趋肤深度如表 1 所示。

在同一电子数密度下,趋肤深度 δ 随着电子温度增加而增加。电子温度越高,电子的碰撞频率越大,电子就越难组织起有效的屏蔽。趋肤深度的增加导致等离子体丝阵列透过性增强。从表 1 中给出的趋

表 1 不同电子数密度和电子温度下等离子体的趋肤深度

Tab.1 Plasma skin depth with different electron densities and temperatures

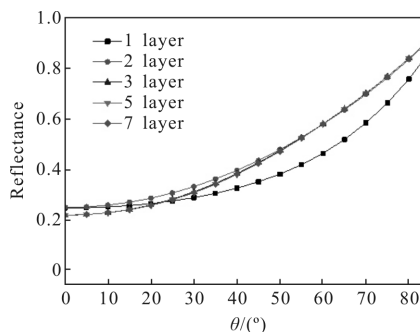
n_e/m^{-3}	T_e/eV	$\delta/\mu\text{m}$
10^{21}	0.3	1 681.3
10^{21}	1.0	2 253.0
10^{22}	0.3	558.9
10^{22}	1.0	718.9
10^{23}	0.3	209.5
10^{23}	1.0	241.1

肤深度值可以看出,对于电子数密度 $n_e=1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$,两个不同电子温度下的趋肤深度相差约为 13% 而 $\delta/R \approx 0.8$ 。对于电子数密度 $n_e=1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$,两个不同电子温度下的趋肤深度相差约为 22% 而 $\delta/R \approx 2$,这意味着电子数密度相较于电子温度更能有效影响等离子体丝阵列对微波的反射和透射。

2.3 阵列层数对微波反射率和透射率的影响

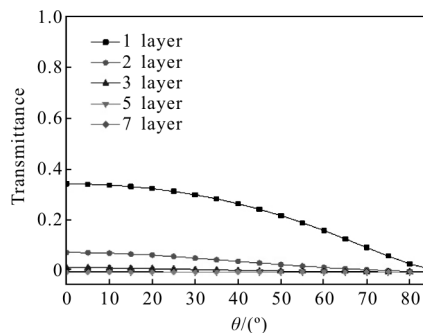
多层飞秒激光等离子体丝阵列与微波相互作用的仿真模型结构,如图 1(b)所示。这种排布可以更好地将入射微波限制在等离子体丝阵列内。

当微波以角度 θ 入射到多层光纤阵列时,微波反射率和透射率随入射角 θ 变化关系如图 5 所示。入射微波频率 $f=10 \text{ GHz}$,丝阵列参数: $R=300 \mu\text{m}$ 、 $d=6 \text{ mm}$,等离子体特征参数: $n_e=1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、 $T_e=0.3 \text{ eV}$ 。和单层丝阵列的情况一样,当微波的电场方向垂直于丝轴向时,多层丝阵列对微波没有影响。从图 5(a)、(b)中可以看出,当 $\varphi=0^\circ$ 、S 极化时,随着微波入射角的增加,阵列对微波的反射率增大而透射率减小;图 5(c)、(d)示出,当 $\varphi=90^\circ$ 、P 极化时,随着微波入射角度的增加,阵列对微波的反射率减小而透射率增



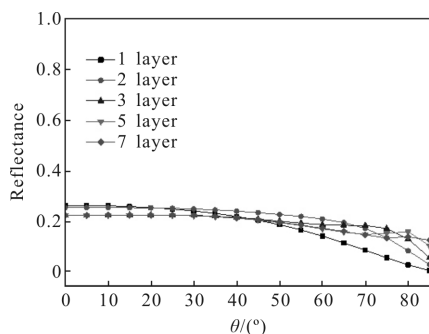
(a) $\varphi=0^\circ$, S 极化, 反射率

(a) $\varphi=0^\circ$, polarization S, reflectance



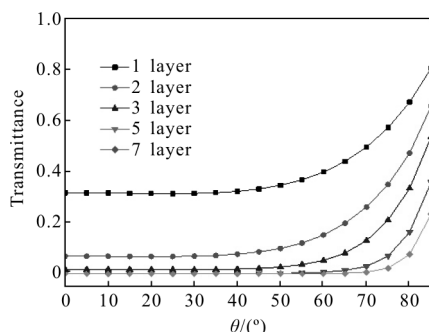
(b) $\varphi=0^\circ$, S 极化, 透射率

(b) $\varphi=0^\circ$, polarization S, transmittance



(c) $\varphi=90^\circ$, P 极化, 反射率

(c) $\varphi=90^\circ$, polarization P, reflectance



(d) $\varphi=90^\circ$, P 极化, 透射率

(d) $\varphi=90^\circ$, polarization P, transmittance

图 5 多层等离子体丝阵列对微波反射率和透射率随入射角 θ 变化关系

Fig.5 Transmittance and reflectance as a function of incidence angle θ for multiple layers of plasma filaments array

大。无论是 $\varphi=0^\circ$ 、S 极化还是 $\varphi=90^\circ$ 、P 极化,反射率并没有随着层数的增加而增加,反射率曲线基本保持一致的趋势。而透射率随着层数的增加而减小,最终趋于 0。当微波在传播到阵列第一层时,部分微波被反射,部分微波被丝阵列吸收,还有部分微波发生透射。透射波传播到第二层时再产生部分反射和部分透射,即在多层等离子体丝阵列内就有一系列的内反射和透射,经第二层反射回来的微波传播到第一层时会再次被吸收衰减。多层等离子体丝阵列对微波反射的总效果主要由第一层反射波和后续系列的微弱反射波的叠加,故多层丝阵列对微波的反射率和单层丝阵列的反射率基本保持一致。入射的微波在层之间发生多重反射和透射,并被多层结构的等离子体丝阵列反复吸收衰减,因此透射率会随着层数的增加而减少,最终趋于 0。

3 结论

利用 COMSOL 软件通过有限元方法构建了飞秒等离子体丝阵列与微波相互作用的物理模型,研究了光丝直径为 $300\ \mu\text{m}$, 阵列间距为 $6\ \text{mm}$ 的等离子体丝阵列对 $10\ \text{GHz}$ 微波反射率和透射率,还讨论了等离子体丝阵列的电子数密度、电子温度、阵列层数对 $10\ \text{GHz}$ 微波反射率和透射率的影响;当电子数密度增加时,其“金属性”也就越强,丝阵列对微波的反射率也就越高;当电子温度升高时,碰撞频率越频繁,微波的能量还来不及传递便已穿过等离子体丝阵列,丝阵列对微波的透射率也就越高。而电子数密度相较于电子温度更能有效影响等离子体丝阵列对微波的反射和透射;阵列层数的增加并不影响丝阵列对微波的反射率。将飞秒激光等离子体丝阵列灵活地布置于数十千米外,通过消减探测信号来实现隐身;或者作为假目标来反射探测信号,使得雷达出现大面积虚假目标来迷惑对方侦查;将多层飞秒激光等离子体丝交叉排布组成金属网状阵列可以对不同极化方向的微波进行屏蔽干扰。文中的研究结果为飞秒激光等离子体丝阵列实现等离子体隐身技术提供新的思路。

参考文献:

- [1] Chin S L, Chen Y, Kosareva O, et al. What is a filament [J]. *Laser Physics*, 2008, 18(8): 962-964.
- [2] Qiao Ziwen, Gao Bingrong, Chen Qidai, et al. Ultrafast spectroscopy techniques and their complementary usages [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 588-599. (in Chinese)
乔自文, 高炳荣, 陈岐岱, 等. 飞秒超快光谱技术及其互补使用 [J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 588-599.
- [3] Qiang Xiwen. Nonlinear effects on propagation of ultrashort intense laser pulses in the atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 49-54.
- [4] Liu Weiwei, Zhao Jiayu, Zhang Yizhu, et al. Research on superluminal propagation of terahertz wave during femtosecond laser filamentation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0402001. (in Chinese)
刘伟伟, 赵佳宇, 张逸竹, 等. 飞秒激光成丝过程中的太赫兹波超光速传输现象研究 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0402001.

- [5] Yu Junli, Meng Qinglong, Ye Rong, et al. Analysis on damage thresholds of optical rectification crystals under femtosecond lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0106004. (in Chinese)
于军立, 孟庆龙, 叶荣, 等. 飞秒激光作用下光整流晶体的损伤阈值分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0106004.
- [6] Sun Yi, Gao Yunguo, Shao Shuai. Influence of high power laser thermal effect on beam combination system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (11): 3097–3106. (in Chinese)
孙毅, 高云国, 邵帅. 高功率激光热效应对合束系统的影响 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3097–3106.
- [7] Mao Xiaojie. New progress in high-power picosecond ultraviolet laser[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 182–190. (in Chinese)
毛小洁. 高功率皮秒紫外激光器新进展 [J]. 中国光学, 2015, 8(2): 182–190.
- [8] Shen H M. Plasma waveguide: A concept to transfer electromagnetic energy in space [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(10): 6827–6835.
- [9] Zheltikov A M, Shneider M N, Miles R B, et al. Guiding radar signals by arrays of laser-induced filaments: finite-difference analysis[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 5593–5597.
- [10] Chateaneuf M, Payeur S, Dubois J, et al. Microwave guiding in air by a cylindrical filament array waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(9): 873–879.
- [11] Bogatov N A, Kuznetsov A I, Smirnov A I, et al. Channeling of microwave radiation in a double line containing a plasma filament produced by intense femtosecond laser pulses in air [J]. *Quantum Electronics*, 2009, 39(39): 985–988.
- [12] Jhajj N, Rosentha E W, Birnbaum R, et al. Demonstration of long-lived high power optical waveguides in air[J]. *Physical Review X*, 2014, 4(1): 1–2.
- [13] Wu Ying. Studies on microwave interference and microwave measure of laser-induced plasma [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009: 7–13. (in Chinese)
吴莹. 激光等离子体的微波干扰和诊断研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009: 7–13.
- [14] Marian A, Morsli M E, Vidal F, et al. The interaction of polarized microwaves with planar arrays of femtosecond laser-produced plasma filaments in air [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(2): 495–508.
- [15] Sun Jian, Xu Yuemin, Sun Hailong, et al. Military application of plasma antenna [J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(S1): 102–105. (in Chinese)
孙简, 徐跃民, 孙海龙, 等. 等离子体天线的军事应用价值 [J]. 微波学报, 2016, 32(S1): 102–105.