

# 飞秒激光等离子体通道电磁波传输研究进展

刘洋<sup>1,2\*</sup>, 陈宗胜<sup>1,2</sup>, 时家明<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

<sup>2</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 主要讨论了飞秒激光等离子体通道的形成机制, 综述了飞秒激光等离子体通道电磁波传输的研究现状, 并将等离子体通道归结为三种, 即单通道传输线、双通道传输线和圆柱形空芯波导。最后, 对飞秒激光等离子体通道传输电磁能的发展趋势进行了展望。

**关键词** 激光光学; 飞秒激光; 等离子体通道; 传输; 电磁波

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.090002

## Research Progress on Electromagnetic Wave Transmission via Femtosecond-Laser Plasma Channel

Liu Yang<sup>1,2\*</sup>, Chen Zongsheng<sup>1,2</sup>, Shi Jiaming<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China;

<sup>2</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** The formation mechanism of a femtosecond-laser plasma channel is mainly discussed. The research progress on electromagnetic wave transmission in a femtosecond-laser plasma channel is reviewed. The plasma channels are classified into three types: single-channel transmission line, double-channel transmission line, and cylindrical hollow waveguide. Finally, the development trend of electromagnetic energy transmission via femtosecond laser plasma channels is prospected.

**Key words** laser optics; femtosecond laser; plasma channel; transmission; electromagnetic wave

**OCIS codes** 140.3440; 350.4010; 060.5625

## 1 引言

微波定向能武器不同于普通武器, 它既可以对敌实现软杀伤也可以实现硬杀伤, 是电子对抗发展的更高阶段。众所周知, 电磁波在自由空间传输时难以实现定向辐射, 导致传输时扩散衰减过大(传输的电磁能量密度按距离平方反比规律衰减), 这对于以电磁能为杀伤手段的武器来说是一种致命的缺陷, 对电磁武器的作战运用和作战效能发挥都会产生极为不利的影 响。当前, 高功率微波脉冲通常采用抛物形天线来提高方向性, 但由于该天线存在瞬态效应, 口面无

法得到充分利用。同时, 它的集中馈电具有非常高的场强, 容易造成击穿。因此寻找一种能够满足战术要求且有效导行电磁波的通道, 实现电磁脉冲武器的有效定向辐射成为目前的研究热点。

研究发现, 高峰值功率飞秒激光束可以在大气中产生飞秒光丝, 又称为激光等离子体通道。当高功率飞秒激光在空气中传播时, 飞秒激光可以聚焦到极小的空间区域内, 使电磁场的强度比原子核对其周围电子的作用力还要高出数倍, 所以飞秒激光脉冲能够轻易使电子脱离原子的束缚而形成等离子体。克尔效应造成的激光光束自聚焦和等离子体造

收稿日期: 2018-09-29; 修回日期: 2018-11-18; 录用日期: 2018-11-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA8016029A)、安徽省自然科学基金(1908085MF205)、安徽省科技重大专项(18030901095)

\* E-mail: liuyang\_eei@163.com

成的光束散焦之间的动态平衡,使激光在空气中形成一定距离的等离子体通道。电磁脉冲可以借助该通道向远距离定向传输,大大减小传输过程的扩散衰减<sup>[1-3]</sup>。值得注意的是,在大气中传输时,激光等离子体通道的传输距离并没有被限定在瑞利长度之内,这打破了人们对传统光束大气传输的认识。此时,飞秒激光电离通道像一根无形、可控、灵活的拉杆天线,通过控制激光束的指向决定天线的指向,控制激光束的强度、光斑半径就可以控制天线的其他相关特性,最终实现强脉冲的远距离、低损耗传输,提高微波武器的作战效能。

飞秒激光产生的等离子体细丝具有与金属类似的导电性,同时又具有隐蔽性好、易于布置和撤收、工作频带宽等独特的优点。此外,由于具有脉冲短、能量高、峰值功率大等特点,飞秒激光技术已经广泛地应用于天文、气象、国防、信息、医疗、工业等各个领域,例如远距离探测、激光引雷、激光遥感、人工降雨降雪、激光诱导闪电和空气波导等。这些应用使得近年来飞秒光丝研究得到了快速发展,也为激光等离子体通道电磁能传输研究提供了重要理论依据。

本文首先讨论了飞秒激光等离子体通道应用于高功率电磁能传输的可行性和独特优势,分析了飞秒激光等离子体通道的形成机制。然后,综述了近年来飞秒激光等离子体通道电磁波传输的研究现状。最后,对飞秒激光等离子体通道传输电磁能的发展趋势进行了展望。

## 2 飞秒激光等离子体通道的形成

近年来快速发展的飞秒激光技术受到各国的高度重视。飞秒激光是一种以脉冲形式工作的激光,它的持续时间非常短,仅为几到几十飞秒,是迄今为止研究较为成熟、应用较为广泛的超短激光脉冲。并且,飞秒激光脉冲瞬时功率极大,最高可达百万亿瓦,远大于全世界总的发电功率。更重要的是,通过聚焦可以将飞秒激光束限制在微米量级的范围内,使得该范围内的电场强度远大于原子核周围电子所受到的作用力。根据相关文献可知,当飞秒激光的强度大于 $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>时,大气就会被电离产生等离子通道,电子密度达到 $10^{15} \sim 10^{17}$ /cm<sup>3</sup>。此时,等离子通道的电导率为水的 $5 \times 10^4$ 倍,更易实现微波传输<sup>[4-8]</sup>。目前,采用飞秒锁模激光器已经可以使电离后的通道维持时间在 $10 \text{ ns} \sim 1 \text{ } \mu\text{s}$ 之间,而且能量的利用效率很高。

一般来说,气体激光电离原理上可以分为多

光子电离和电子级联电离(亦称为雪崩电离)。多光子电离通常应用在激光脉冲较短或者气体压力较低的场合,而电子级联电离通常应用在激光脉冲较长或者气体压力较高的场合。因此,飞秒激光等离子体通道的产生属于多光子电离过程。具体过程为,由于存在克尔效应,飞秒激光在传输过程中的初始高斯光场不断向中心区域自聚焦;当光强达到一定值时,空气中的氧分子和氮气分子会由于多光子电离而产生一定浓度的等离子体,对光束产生自散焦;如此不断循环往复,飞秒光丝在自散焦和自聚焦的动态平衡中保持长距离的稳定传输。图1为飞秒激光光丝形成原理图,其中,激光光强为 $10 \text{ TW/cm}^2$ 量级,尺寸为 $40 \sim 200 \text{ } \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>。

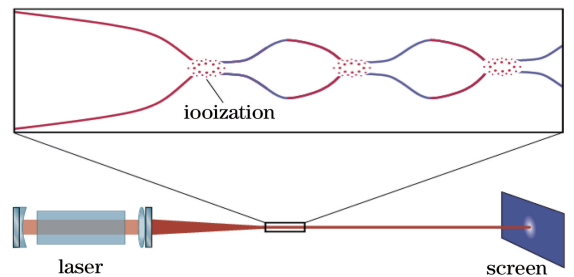


图1 飞秒激光光丝形成原理图<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Schematic of formation of femtosecond laser filament<sup>[9]</sup>

Brodeur等<sup>[10]</sup>在1997年提出移动焦点模型解释了这一传播过程。将飞秒激光脉冲分为多个切片并且对应相应的功率值,当超过自聚焦阈值功率时,各个切片自聚焦的焦点位置可由Marburger公式得到<sup>[11]</sup>

$$z_f = \frac{0.367ka^2}{\{[(P/P_{cr})^{0.5} - 0.852]^2 - 0.0219\}^{0.5}}, \quad (1)$$

式中: $P$ 为激光脉冲功率; $P_{cr}$ 是激光自聚焦阈值功率; $k$ 为波数; $a$ 为激光光束半径。由于飞秒激光的脉宽只有几到几十飞秒,在电离过程中可以忽略逆韧致辐射和碰撞电离,所以在空气中电离产生的等离子体浓度不会太高,也不会对激光传输产生屏蔽作用。因此,飞秒激光大气成丝过程中物理效应主要考虑衍射、群速度色散、自陡峭效应、多光子电离、克尔效应和等离子体自散焦等。

## 3 飞秒激光等离子体通道电磁波传输研究现状

多年来,研究人员对飞秒激光成丝开展了相当多的理论和实验研究,现已观测到长度达数千米的

激光电离通道。1995年,美国密歇根大学超快科学中心的 Braun 等<sup>[12]</sup>发现,当一束 1 GW 量级的近红外飞秒激光脉冲在大气中传输时,这束光会聚成具有长寿命的、自导的光通道,并且持续了几十米远的距离。国内最早开展飞秒光纤研究的是中国科学院物理研究所张杰课题组<sup>[13-16]</sup>。Xi 等<sup>[13]</sup>研究了两飞秒光纤在空气中传播时的相互作用,发现相对相移和夹角使得两光纤在相互作用过程中表现出吸引、融合、排斥和螺旋传播等有趣的特征。Hao 等<sup>[14-16]</sup>对比分析了在预聚焦和自由传播情况下飞秒激光成丝的不同特点,实验研究了飞秒激光脉冲诱导形成的多丝的空间演化,观察到了细丝分裂、融合、扩散等复杂的作用过程,并巧妙地利用能量库,实现光纤的数量、模式、传输距离和空间稳定性的控制。

随着飞秒光纤特性的不断揭示,飞秒光纤的应用变得越来越广泛。北京工业大学激光工程研究院张艳杰等<sup>[17]</sup>利用飞秒激光成丝效应对 2 mm 厚的聚甲基丙烯酸甲酯材料在空气环境下进行了打孔实验。研究表明,随着飞秒激光平均功率的增大,孔径大小和锥度均有着明显的增大趋势。随着加工时间的增加,孔径变大,锥度先增大后减小再增大。中国科学院上海光学精密机械研究所杜盛喆等<sup>[18]</sup>针对飞秒激光诱导电晕放电实验,提出了一种新的电极优化设计方案。理论和实验结果表明,新设计的球形电极可显著提高飞秒光纤与外加电场的耦合效率,进而提高飞秒光纤诱导电晕放电的效率。长春理工大学理学院姚爽等<sup>[19]</sup>研究了脉冲能量对飞秒激光等离子体丝形成的影响。实验结果表明,飞秒激光在大气中传输时随着脉冲能量的增大,等离子体丝的成丝起点位置向聚焦透镜位置移动,同时等离子体丝的长度增加。Alshershby 等<sup>[20]</sup>介绍了一种简单、快速、无干扰的获得飞秒激光等离子体丝基本参数的实验方法,得到了等离子体电子密度的纵向分布。该课题组还利用飞秒激光等离子体通道进行了短距离射频信号传输研究。西南交通大学 Qi 等<sup>[21]</sup>通过数值仿真研究了不同压力下波长为 800 nm 的激光脉冲的传播特性,分析了其对等离子体丝轴上强度、半径、能量及等离子体密度的影响。吉林大学杨大鹏等<sup>[22]</sup>研究了飞秒激光成丝诱导铜击穿光谱,对铜等离子体光谱强度进行了测量,还计算了铜等离子体温度和电子密度。李苏宇等<sup>[23]</sup>综述了国内外在飞秒激光成丝的应用及控制方法等方面的研究现状和进展。南京理工大学理学院孙中浩等<sup>[24]</sup>研究了飞秒光纤阵列对 10 GHz 电磁波的吸收

特性,分析了光纤内电子温度、电子数密度、光纤直径和电磁波的极化等参数对吸收系数的影响。

近年来,国外学者在飞秒光纤的研究方面依然保持很高的热度,尤其是在如何延长光纤方面。2014年,以色列希伯来大学 Papeer 等<sup>[25]</sup>研究发现,通过纳秒激光伴随飞秒激光传输可以延长光纤。同年,Camino 等<sup>[26]</sup>利用微透镜阵列产生多丝,发现由于入射功率的提高光纤长度得以延长。随后,法国巴黎综合理工大学 Point 等<sup>[27]</sup>利用弱聚焦产生多束较长光纤,其在密度上高出短光纤一个数量级。2015年,Camino 等<sup>[28]</sup>又进一步实验探究了微透镜阵列产生多丝的过程,发现当入射功率为 68 GW 时可以产生稳定的长丝阵列。为了克服微透镜阵列数值孔径不可变、加工难度大、价格昂贵等缺点,脉冲功率激光技术国家重点实验室 Hu 等<sup>[29]</sup>数值仿真了利用二维声光调制的方式产生多丝。2016年,美国密歇根大学 Englesbe 等<sup>[30]</sup>采用遗传算法控制可变形反射镜,发现此方法可以产生更长光纤。此外,国内外研究还发现飞秒光纤可用于超快光学加工和人工降雨等方面<sup>[31-34]</sup>。

值得注意的是,飞秒激光等离子体通道的强电磁脉冲和高功率微波传输方面各国均未见报道,但不排除有可能正在进行秘密研究,由于保密原因未公开发表。目前,传导电磁波的等离子体通道主要包括单通道传输线、双通道传输线及圆柱形空芯波导<sup>[3]</sup>。

### 3.1 飞秒激光等离子体单通道传输线

早在 2009 年,史蒂文斯理工学院的研究人员 Friedman<sup>[35]</sup>通过实验初步探究了飞秒激光等离子体单通道传输线引导电磁波的可能性。实验中,利用单通道传输线分别向外引导矩形波导中的 2.6 GHz 微波信号和柱形共振腔中的 900 MHz 微波信号。研究发现,当一定密度的飞秒激光等离子体通道穿过谐振腔时,腔内电磁场强度明显降低,可以认为是等离子体通道将部分电磁能携带出去。2010年,电子工程学院夏新仁等<sup>[1-2]</sup>认为现有高功率微波武器(HPM)天线存在一定缺陷,同时提出采用飞秒激光等离子体通道对高功率微波进行引导,进而建立了飞秒激光等离子体通道高功率微波传输模型,并通过结合边界条件对其进行求解。理论研究表明,飞秒激光等离子体通道高功率微波传输性能受到等离子体参数的影响,这也说明可以通过调整等离子体参数获得较好的传输性能。2012年,长春理工大学李付锦<sup>[36]</sup>研究了高功率飞秒激光在大气中的传输特点,以及其在大气中电离产生的等离



子体通道的特点,理论分析了射频(RF)波与等离子体通道的相互作用,然后进行了初步的实验验证。董旭<sup>[37]</sup>分析了飞秒激光等离子体通道自身的电磁辐射特性,并且对等离子体通道与 RF 波的耦合过程进行了研究。研究发现等离子体通道自身会产生频率低于等离子体频率的电磁辐射波,并且该电磁波在传输过程中以表面波的形式传播。此外,他还实验研究了飞秒激光等离子体通道与 RF 波的相互作用,实验研究发现飞秒激光的脉冲强度、用于聚焦

形成等离子体丝的透镜焦距,以及 RF 波的功率等参数对两者耦合及传输会产生一定影响。

2013年,长春理工大学 Ren 等<sup>[38]</sup>对空气中飞秒激光等离子体单丝通道电磁波传输性能开展了实验研究,实验系统如图 2 所示。等离子体通道长度为 6.5 cm,实验发现与自由空间相比传输信号强度增强 3 倍,并且认为单丝飞秒激光等离子体与环状等离子体丝波导相比,同样微波传输效果下只需较低的激光能量。

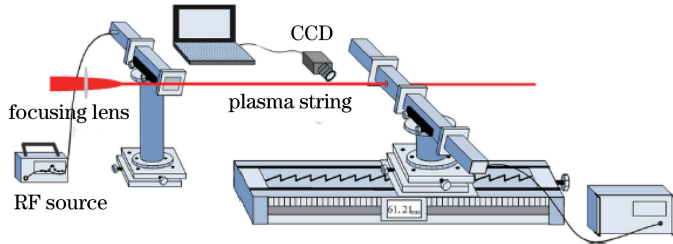


图 2 单通道电磁波传输原理图<sup>[38]</sup>

Fig. 2 Schematic of electromagnetic wave transmission via single channel<sup>[38]</sup>

2017年,加拿大 Théberge 等<sup>[39]</sup>搭建了激光诱导产生等离子体实验系统,研究了在空气中激光诱导放电等离子体对射频信号传输的能力,如图 3 所示。所产生的激光等离子体丝长度约为 100 cm,可持续时间约为 2 ms,与之前的等离子体天线的寿命相比增加了 4 个数量级。实验结果表明,在空中产生的大直径等离子体天线可以有效地发射 10 MHz~10 GHz 的射频信号。

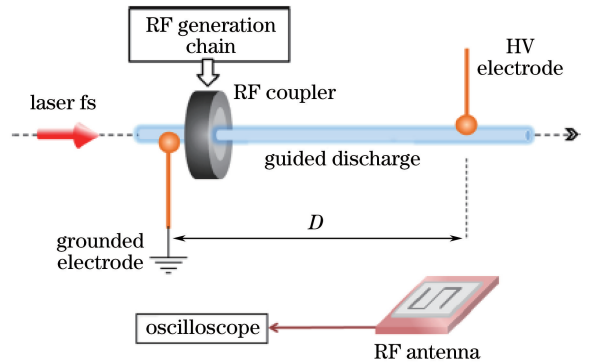


图 4 单丝微波耦合实验示意图<sup>[40]</sup>

Fig. 4 Schematic of experimental setup for single filament microwave coupling<sup>[40]</sup>

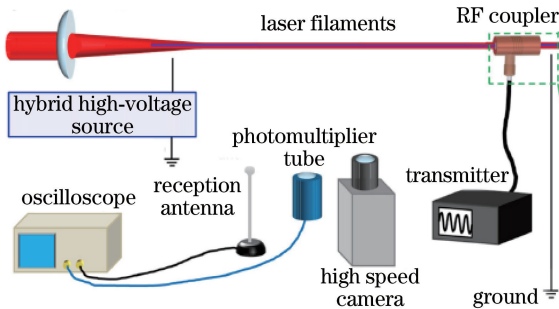


图 3 激光引导高压放电等离子体测试原理图<sup>[39]</sup>

Fig. 3 Schematic of monitoring plasma produced by laser guiding of high-voltage discharge<sup>[39]</sup>

2012年巴黎国立高等先进技术学院 Brelet 等<sup>[40]</sup>通过实验研究发现,在等离子体柱两端电极上施加高电压(HV)可以延长飞秒激光等离子体柱的寿命,并分析了 100 MHz~1 GHz 微波信号耦合到等离子体柱上时信号传输和发射的特性,实验装置如图 4 所示。

成多丝等离子体柱(长度为 30 cm)进行微波能量传输的实验研究,如图 5 所示。其中,微波源频率为 2.45 GHz,最大功率可达 500 W,微波信号通过 40 mm 长的环装铜制电容耦合器将横磁(TM)模式的微波耦合进入等离子体。实验证实了微波辐射耦合到等离子体上会导致等离子体纵向振荡放大两个数量级,达 10 cm。实验结果与沿空气和等离子体表面传播的 TM 波的理论模型完全一致,并且所预估电磁脉冲的注入可以使得多丝等离子体维持更长的距离。

### 3.2 飞秒激光等离子体双通道传输线

飞秒激光等离子体双通道传输线的研究最早也出现在 2009 年,Bogatov 等<sup>[42]</sup>构造了平行双通道传输线,并且实验研究了其对微波信号(34 GHz)的传

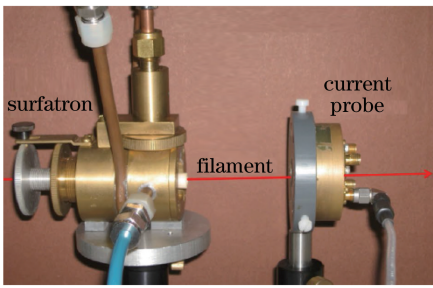


图 5 多丝等离子体微波能量传输实验系统<sup>[41]</sup>  
 Fig. 5 Experimental setup for multi-filament plasma microwave energy transmission<sup>[41]</sup>

输性能。但是由于实验条件限制,其中一根通道由铜丝来代替(其直径为 0.5 mm),另一通道由中心波长为 800 nm、单脉冲能量约为 3 mJ、脉宽约为 100 fs 的高功率钛蓝宝石飞秒激光系统电离空气产生(直径约为 100 μm)。实验中微波信号首先通过矩形波导的“三角结构”耦合到双通道传输线,然后通过另一矩形波导接收并在示波器中显示,实验系统原理图如图 6 所示。实验发现双通道传输线可以较好地传导微波信号,且随着两矩形波导间距的增加信号强度减小。

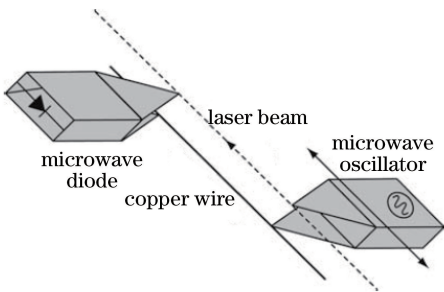


图 6 双通道飞秒激光等离子体电磁波传输原理图<sup>[42]</sup>  
 Fig. 6 Schematic of electromagnetic wave transmission via double-channel femtosecond laser plasma<sup>[42]</sup>

2013 年, Ren 等<sup>[43]</sup>利用上述原理实验研究了飞秒激光等离子体双丝的传输性能。他们在传导距离为 40 mm 处观测示波器输出信号,证实了等离子体丝可以作为双线传输线对电磁波进行有效传导,并且相对于自由空间,等离子体双丝传输线对电磁波的信号强度具有 6 倍的增益作用,传输距离可达 8 cm。

### 3.3 飞秒激光等离子体圆柱形空芯波导

飞秒激光等离子体圆柱形空芯波导最早由哈佛大学的 Shen<sup>[44]</sup>于 1991 年提出,当时通过理论证实发现空芯等离子体波导可以传输电磁能,并且发现了电磁波的传输速度接近光速。1997 年, Gurevicha 等<sup>[45]</sup>也对这一发现进行了相关研究,但

由于激光系统功率等的限制,均未能实现长距离空芯等离子体波导。

理论研究方面,2007 年 Dormidonov 等<sup>[46]</sup>讨论了飞秒激光脉冲在大气中电离产生等离子体通道作为微波波导的可行性。经过分析认为,只要飞秒激光光束的初始强度足够大,可以将其调制产生如图 7 所示的多个高斯光束,当单个高斯光束的功率均大于激光自聚焦的阈值功率时,将会在空气中电离形成多条等离子体丝,进而构成圆柱形空芯等离子体波导。通过构建等离子体波导模型,理论分析了均匀排列的单层等离子体丝通道和三层等离子体丝通道中各参数对电磁波传输性能的影响。图中  $I/I_0$  表示  $(x, y)$  位置处实际光强与最大光强的比值。

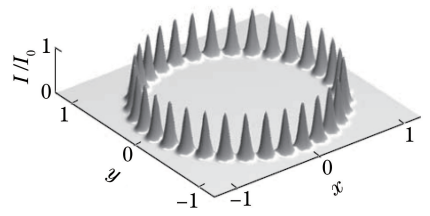


图 7 环形调制的激光束的初始强度分布<sup>[46]</sup>  
 Fig. 7 Initial intensity distribution of ring laser beam with modulation<sup>[46]</sup>

研究发现,等离子体波导对于低频率电磁波的传输效果优于高频率电磁波。主要原因是电磁波频率越低,其在等离子体内的趋肤深度越小,所以电磁波的传输衰减越小。同时,他们还发现等离子体波导半径的增大有助于远距离传输,此时波导对电磁波的损耗较小,这与 Musin 等<sup>[47]</sup>利用有限差分方法研究的飞秒激光等离子体空芯波导传输电磁能的结果一致。

2010 年, Valuev 等<sup>[48]</sup>对空气中飞秒激光等离子体通道微波传输性能进行了研究。首先计算了微波频带激光等离子体丝的有效电导率和等离子体的趋肤深度,然后建立了等离子体通道最佳参数配置下的空芯圆柱形波导模型,如图 8 所示,最后得出了不同参数等离子体波导中微波辐射能量损失。

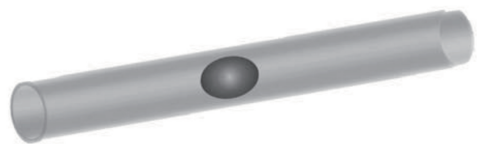


图 8 空芯等离子体波导模型<sup>[48]</sup>  
 Fig. 8 Model of hollow core plasma waveguide<sup>[48]</sup>

2013 年,长春理工大学 Alshershby 等<sup>[49]</sup>以不连续有限厚度的空芯柱状等离子体丝波导为研究

对象,理论分析了等离子体丝间隔、空间频率、等离子体丝半径等结构因素对波导传输损耗的影响,波导模型如图9所示。图中 $R$ 、 $h$ 、 $\Lambda$ 、 $d$ 和 $b$ 分别表示波导内径、波导厚度、丝间距、单丝直径和单丝有效半径。结果表明在一定的等离子体参数

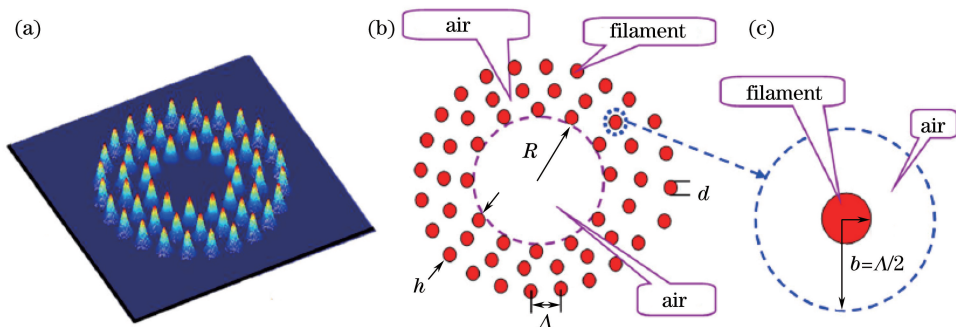


图9 等离子体丝波导模型。(a)飞秒激光光束初始强度分布;(b)三环波导结构的横截面;(c)波导结构中单丝横截面<sup>[49]</sup>

Fig. 9 Model of plasma filament waveguide. (a) Initial intensity distribution of femtosecond laser beam; (b) cross section of three-ring waveguide structure; (c) cross section of single filament<sup>[49]</sup>

2015年,Bogatskaya等<sup>[51]</sup>研究了基于大功率紫外激光脉冲的气体介质中非平衡等离子体波导对短微波脉冲的传输和放大特性,证明了等离子体通道波导可以进行太赫兹频段的信号传输和放大。然后,比较了稀有气体(氙气)和空气中的飞秒激光成丝情况,得出氙气等离子体通道对微波的放大性能要优于空气条件下,尤其是通道的维持时间较长。最后,讨论了通道半径、强度和微波频率等对微波传输衰减的影响。

实验研究方面,空芯圆柱形等离子体波导的相关报道主要集中在加拿大、法国和俄罗斯等。2008年,Chateaneuf等<sup>[52]</sup>实验研究了飞秒激光空芯等离子体波导对电磁波的传输性能。他们利用100 TW钛蓝宝石飞秒激光系统产生激光脉冲(其中脉冲宽度为27 fs,脉冲能量为1.5 J),然后通过变形镜(DM)在空间上对其调制,最终设计出大直径(45 mm)圆柱形多丝(1030根丝)均匀空芯等离子体波导,波导长度可达30 cm。实验结果表明,空芯等离子体波导可以显著增强电磁波的定向传输能力,与单线和双线激光等离子体通道相比具有明显优势。

俄罗斯在这方面的研究和报道较多,研究单位主要是俄罗斯科学院和莫斯科国立大学,主要内容包括飞秒激光器在稀有气体和空气中产生等离子体进行微波的耦合传输实验研究。其中,空气中激光等离子体通道的微波传输性能研究主要有文献<sup>[53-55]</sup>。2010年,俄罗斯科学院Zvorykin等<sup>[53]</sup>实验和

下,即使只有一层等离子体丝的波导也可以传输高频微波,这表明等离子体丝波导在长距离稳定传输方面具有较好的特性。此外,还研究了由一束等离子体细丝紧密排列形成的等离子体对微波传输的损耗机制<sup>[50]</sup>。

理论研究了大气中等离子体波导的微波辐射传播机制。他们利用KrF激光器电离产生半径远大于辐射波长的等离子体波导,依靠等离子体波导内光学密度较小的壁对波的内全反射,将35.3 GHz的微波信号传输了60 m。随后在2012年,他们还研究了等离子体通道微波传输性能与微波波长的关系,预估利用KrF激光器在数皮秒脉冲内产生400 J能量时,可以将微波辐射定向传输1 km<sup>[54]</sup>。2014年,又在KrF掺钛蓝宝石激光设备GARPUN-MTW上进行了实验,并且开发出空芯滑动模式等离子体丝波导,用于定向转移微波辐射,最后采用基于共振增强电离的成丝理论解释了实验结果<sup>[55]</sup>。但是上述研究均未考虑信号传输时电场强度随空间距离的变化,更未研究高功率微波与等离子体通道的耦合及传输特性,这在以后是值得探索的。

近期本课题组开展了飞秒激光等离子体引导电磁波的相关理论研究。对于单通道传输线,通过数值计算研究了其引导电磁表面波的传播常数,如图10所示,为不同等离子体碰撞频率时表面波波数实部(离散)大小与等离子体电子密度的关系。其中电磁波频率为1 GHz,通道半径为1 mm,等离子体碰撞频率 $\nu$ 分别为 $10^9$ 、 $10^{10}$ 、 $10^{11}$ 、 $10^{12}$  Hz,电子密度约为 $10^{22}$  m<sup>-3</sup>。图中 $k_0$ 为电磁波在真空中传播时的波数,Re( $k$ )为沿等离子体通道传播的表面波波数实部。

研究发现,表面波在沿等离子体通道传输时,其波数实部Re( $k$ )大于电磁波在真空中传播时的波



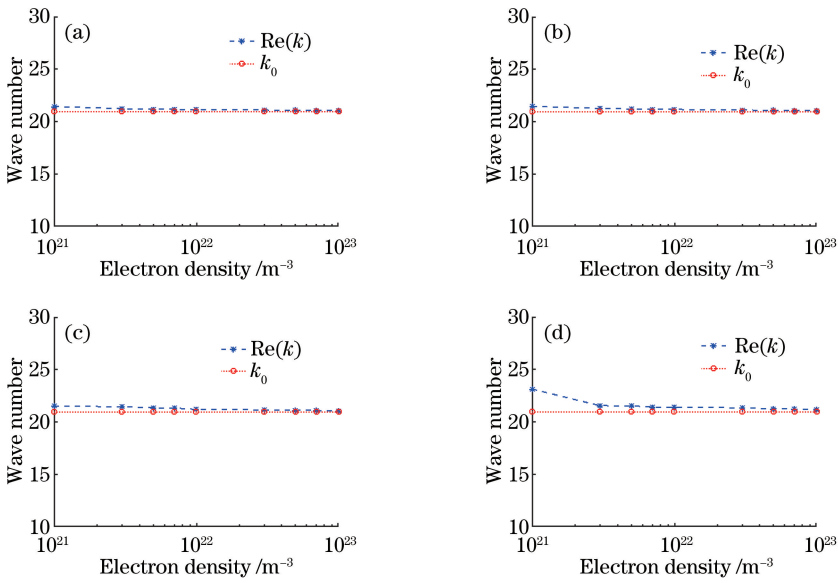


图 10 表面波波数实部与电子密度的关系。(a)  $\nu=10^9$  Hz; (b)  $\nu=10^{10}$  Hz; (c)  $\nu=10^{11}$  Hz; (d)  $\nu=10^{12}$  Hz  
 Fig. 10 Relationship between real part of wave number of surface wave and electron density. (a)  $\nu=10^9$  Hz; (b)  $\nu=10^{10}$  Hz; (c)  $\nu=10^{11}$  Hz; (d)  $\nu=10^{12}$  Hz

数,也就是其传播速度(相速度)小于光速。可以看出,当碰撞频率一定时,电子密度越大,表面波波数越小且越接近真空中的波数。当电子密度一定时,随着碰撞频率增大,表面波波数逐渐变大。通过上述分析可以看出,高等离子体电子密度和低碰撞频率使得表面波波数更接近于真空中的波数,这意味着表面波传播速度更接近光速。

另外,还计算了不同碰撞频率时波数虚部(离散)随等离子体电子密度的变化关系,如图 11 所示。可以看出,在碰撞频率一定时,随着电子密度增加衰减系数(波数虚部)逐渐减小。通过计算可以发现,对于其他频率的表面波也有同样的规律。在电子密度一定时,碰撞频率越大,衰减系数越大。与前述分析一致,同样可以得知高等离子体电子密度和低碰撞频率有利于表面波的传播。

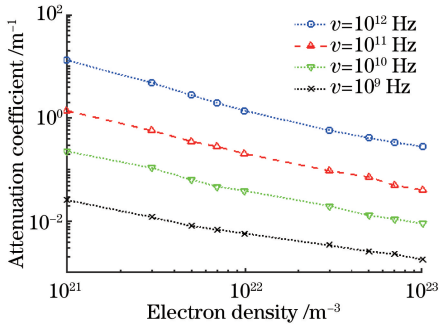


图 11 表面波波数虚部与电子密度的关系  
 Fig. 11 Relationship between imaginary part of wave number of surface wave and electron density

对于双通道传输线,基于传输线理论和三维电磁仿真理论,通过 Computer Simulation Technology 软件仿真研究了其引导电磁波的电场分布,图 12 为不同时刻传输线周围的电场分布。其中入射电磁波频率为 1 GHz,通道半径为 1 mm,长度为 10 m,两通道间距为 10 cm,等离子体碰撞频率为  $10^9$  Hz,电子密度为  $10^{22}$   $\text{m}^{-3}$ 。

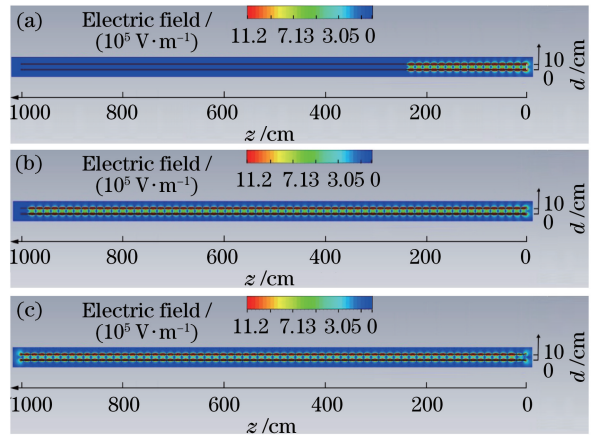


图 12 不同时刻传输线电场分布。(a)  $t=8$  ns; (b)  $t=33$  ns; (c)  $t=68$  ns  
 Fig. 12 Electric field distributions at different times. (a)  $t=8$  ns; (b)  $t=33$  ns; (c)  $t=68$  ns

由图 12 可以看出,当表面波耦合进入双通道等离子体传输线时,电场将以接近光速的速度向前传播。当  $t=8$  ns 时,微波传输至 2.4 m 左右,此时大约有 8 个信号周期。当  $t=33$  ns 时,微波传输至终

点位置,之后电磁波将会向外扩散,同时出现由于终端阻抗不匹配造成的部分反射信号。研究发现,对于双通道传输线电场分布主要存在两个特点:1)随着微波向前传输,电场幅值由于扩散衰减逐渐减小;2)靠近传输线的位置电场强度明显大于远离传输线的位置,即使是双线之间电场强度也小于传输线附近场强。

为了计算传输线对微波信号的衰减,测量了不

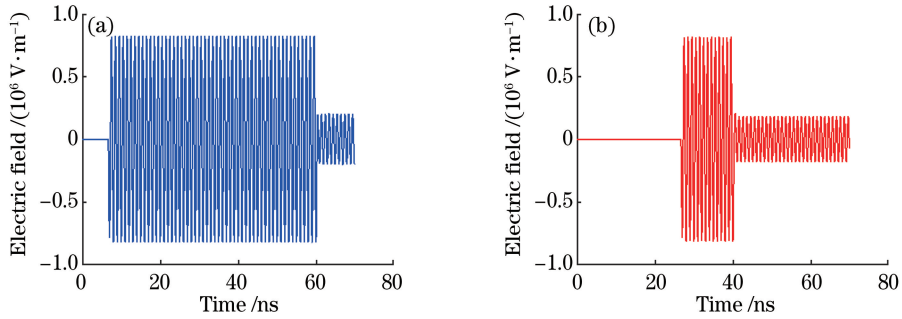


图 13 不同位置处的电场信号。(a)  $z=2$  m;(b)  $z=8$  m

Fig. 13 Electric field signals at different positions. (a)  $z=2$  m; (b)  $z=8$  m

## 4 结束语

飞秒激光在空气中电离产生等离子体通道具有较大的研究价值和广阔的应用前景,已经成为各国的研究热点。总的来说,无论是单通道传输线、双通道传输线,还是等离子体圆柱形空芯波导,目前都还有很多问题值得科研人员的进一步探索,比如它们对电磁波的传输能力与电磁波模式、频率,等离子体电子密度、碰撞频率,以及等离子体通道结构参数的关系等。相信在未来几年,随着研究的不断深入,飞秒激光等离子体电磁波传输技术将逐步成熟,可以实现强脉冲的远距离低损耗传输,提高电磁脉冲武器的作战效能。

### 参 考 文 献

- [1] Xia X R, Yin C Y. Analysis on propagation properties of plasma channel antenna[J]. Journal of Microwaves, 2009, 25(2): 19-24.  
夏新仁,尹成友.等离子体通道天线的传播特性分析[J].微波学报,2009,25(2):19-24.
- [2] Xia X R, Yin C Y. Propagation properties of laser plasma channel antenna in finite magnetic field[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12): 1833-1838.  
夏新仁,尹成友.有限磁场中激光等离子体通道天线的传播特性[J].强激光与粒子束,2009,21(12):

同位置处( $z=2,8$  m, $z$ 为与微波源的距离)电场信号随时间的变化,如图13所示。可以看出,从2 m到8 m处电场强度峰值从 $8.23 \times 10^5$  V/m降到 $8.14 \times 10^5$  V/m,根据坡印廷定理可得微波功率密度从 $8.98 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>降到 $8.19 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>。通过计算可得,双通道传输线的衰减系数约为0.39 dB/m,可见,在相同条件下其传输性能明显优于单通道传输线。

1833-1838.

- [3] Ren Y, Li F J, Dong X, *et al.* Research of guiding energy with plasma channel induced by femtosecond laser in air[J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 133-142.  
任玉,李付锦,董旭,等.飞秒激光等离子体通道传导能量特性的研究进展[J].中国光学,2012,5(2):133-142.
- [4] Bogatskaya A V, Bin H, Popov A M, *et al.* Nonequilibrium laser plasma of noble gases: prospects for amplification and guiding of the microwave radiation[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(9): 093510.
- [5] Vinoth Kumar L, Manikanta E, Leela C, *et al.* Effect of laser intensity on radio frequency emissions from laser induced breakdown of atmospheric air[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(21): 214904.
- [6] Dai Y J, Song X W, Gao X, *et al.* Characteristics of radio-frequency emission from nanosecond laser-induced breakdown plasma of air [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(18): 185201.  
戴宇佳,宋晓伟,高勋,等.纳秒激光诱导空气等离子体射频频辐射特性研究[J].物理学报,2017,66(18):185201.
- [7] Li X H, Yu X. Application of laser plasma ignition in aerospace propulsion systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1136001.  
李晓晖,于欣.激光等离子体点火在航空航天动力系



- 统的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1136001.
- [8] Wang B Y, Chen Y N. Research on technology of air plasma channel discharging induced by femtosecond laser [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(3): 24-27.  
王毕艺, 陈亚楠. 飞秒激光大气等离子体通道诱导放电技术研究[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(3): 24-27.
- [9] Nie J S, Hu Y Z. Research progress in controlling femtosecond laser filamentation in atmosphere [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(4): 1-8.  
聂劲松, 胡瑜泽. 飞秒激光脉冲在空气中成丝调控研究进展[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(4): 1-8.
- [10] Brodeur A, Chien C Y, Ilkov F A, *et al.* Moving focus in the propagation of ultrashort laser pulses in air[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(5): 304-306.
- [11] Marburger J H. Self-focusing: theory [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1975, 4(1): 35-110.
- [12] Braun A, Korn G, Liu X, *et al.* Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(1): 73-75.
- [13] Xi T T, Lu X, Zhang J. Interaction of light filaments generated by femtosecond laser pulses in air [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(2): 025003.
- [14] Hao Z Q, Zhang J, Zhang Z, *et al.* Characteristics of multiple filaments generated by femtosecond laser pulses in air: prefocused versus free propagation [J]. *Physical Review E*, 2006, 74(6): 066402.
- [15] Hao Z Q, Zhang J, Lu X, *et al.* Characteristics of multiple filaments generated by femtosecond laser pulses in air: spatial evolution of multiple filaments in air induced by femtosecond laser pulses [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 773-778.
- [16] Hao Z Q, Zhang J, Xi T T, *et al.* Optimization of multiple filamentation of femtosecond laser pulses in air using a pinhole [J]. *Optics Express*, 2007, 15(24): 16102-16109.
- [17] Zhang Y J, Song H Y, Liu H Y, *et al.* Fabrication of millimeter-scaled holes by femtosecond laser filamentation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402012.  
张艳杰, 宋海英, 刘海云, 等. 飞秒激光成丝制备毫米级深孔[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402012.
- [18] Du S Z, Zhu Z B, Liu Y X, *et al.* Optimization design scheme of femtosecond laser induced corona discharge [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0601009.  
杜盛喆, 朱忠彬, 刘尧香, 等. 飞秒激光诱导电晕放电的优化设计方案 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0601009.
- [19] Yao S, Song C, Gao X, *et al.* Effect of pulse energy on formation of femtosecond laser plasma filament [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121901.  
姚爽, 宋超, 高勋, 等. 脉冲能量对飞秒激光等离子体丝形成的影响 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121901.
- [20] Alshershby M, Ren Y, Qin J, *et al.* Diagnosis of femtosecond plasma filament by channeling microwaves along the filament [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(20): 204101.
- [21] Qi X X, Ma C L, Lin W B. Pressure effects on the femtosecond laser filamentation [J]. *Optics Communications*, 2016, 358: 126-131.
- [22] Yang D P, Li S Y, Jiang Y F, *et al.* Temperature and electron density in femtosecond filament-induced Cu plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(11): 115201.  
杨大鹏, 李苏宇, 姜远飞, 等. 飞秒激光成丝诱导 Cu 等离子体的温度和电子密度 [J]. *物理学报*, 2017, 66(11): 115201.
- [23] Li S Y, Jin M X. Advances in femtosecond laser filamentation in air [J]. *China Sciencepaper*, 2016, 11(17): 1934-1941.  
李苏宇, 金明星. 飞秒激光在空气中成丝的研究进展 [J]. *中国科技论文*, 2016, 11(17): 1934-1941.
- [24] Sun Z H, Dong C, Zhang Y C, *et al.* Absorption of 10 GHz electromagnetic waves by femtosecond filaments array [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(5): 053201.  
孙中浩, 董超, 张亚春, 等. 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.
- [25] Papeer J, Botton M, Gordon D, *et al.* Extended lifetime of high density plasma filament generated by a dual femtosecond - nanosecond laser pulse in air [J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(12): 123046.
- [26] Camino A, Hao Z Q, Liu X, *et al.* High spectral power femtosecond supercontinuum source by use of microlens array [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 747-750.
- [27] Point G, Brelet Y, Houard A, *et al.* Superfilamentation in air [J]. *Physical Review*

- Letters, 2014, 112(22): 223902.
- [28] Camino A, Xi T T, Hao Z Q, *et al.* Femtosecond filament array generated in air[J]. Applied Physics B, 2015, 121(3): 363-368.
- [29] Hu Y Z, Nie J S, Sun K, *et al.* Generation of periodic filament arrays in air through two-dimensional acousto-optic modulation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(10): 2144-2148.
- [30] Englesbe A C, He Z H, Nees J A, *et al.* Control of the configuration of multiple femtosecond filaments in air by adaptive wavefront manipulation[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6071-6082.
- [31] Götte N, Winkler T, Meinel T, *et al.* Temporal Airy pulses for controlled high aspect ratio nanomachining of dielectrics[J]. Optica, 2016, 3(4): 389-395.
- [32] Butkus S, Alesnikov A, Paipulas D, *et al.* Micromachining of transparent, semiconducting and metallic substrates using femtosecond laser beams[J]. Journal of Laser Micro, 2016, 11(1): 81-86.
- [33] Liu Y H, Sun H Y, Liu J S, *et al.* Laser-filamentation-induced water condensation and snow formation in a cloud chamber filled with different ambient gases[J]. Optics Express, 2016, 24(7): 7364-7373.
- [34] Liang H, Sun H Y, Liu Y H, *et al.* Chirp control of femtosecond laser-filamentation-induced snow formation in a cloud chamber[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(3): 033201.
- [35] Friedman D C. Electromagnetic (EM) wave attachment to laser plasma filaments, UMI: 335196 [R]. Hoboken: Stevens Institute of Technology, 2009.
- [36] Li F J. Transmission of RF electromagnetic energy by femtosecond laser plasma channels [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.  
李付锦. 飞秒激光等离子体通道传输射频电磁能机理研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [37] Dong X. EM radiation from femtosecond laser plasma filaments and attachment of RF EM wave to the filaments[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.  
董旭. 飞秒激光等离子体通道的电磁辐射及通道与射频电磁波的耦合研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [38] Ren Y, Alshershby M, Qin J, *et al.* Microwave guiding in air along single femtosecond laser filament[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(9): 094904.
- [39] Théberge F, Gravel J F, Kieffer J C, *et al.* Broadband and long lifetime plasma-antenna in air initiated by laser-guided discharge [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(7): 073501.
- [40] Brelet Y, Houard A, Point G, *et al.* Radiofrequency plasma antenna generated by femtosecond laser filaments in air[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(26): 264106.
- [41] Prade B, Houard A, Larour J, *et al.* Transfer of microwave energy along a filament plasma column in air[J]. Applied Physics B, 2017, 123(1): 40.
- [42] 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(10): 985-988.
- [43] Ren Y, Alshershby M, Hao Z Q, *et al.* Microwave guiding along double femtosecond filaments in air[J]. Physical Review E, 2013, 88(18): 013104.
- [44] Shen H M. Plasma waveguide: a concept to transfer electromagnetic energy in space [J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(10): 6827-6835.
- [45] Gurevicha A V, Borisov N D, Milikh G M. Physics of microwave discharge: artificially ionized regions in the atmosphere[M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1997.
- [46] Dormidonov A E, Valuev V V, Dmitriev V L, *et al.* Laser filament induced microwave waveguide in air [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6733: 67332S.
- [47] Musin R R, Shneider M N, Zheltikov A M, *et al.* Guiding radar signals by arrays of laser-induced filaments: finite-difference analysis [J]. Applied Optics, 2007, 46(23): 5593-5597.
- [48] Valuev V V, Dormidonov A E, Kandidov V P, *et al.* Plasma channels formed by a set of filaments as a guiding system for microwave radiation[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2010, 55(2): 208-214.
- [49] Alshershby M, Hao Z Q, Lin J Q. Hollow cylindrical plasma filament waveguide with discontinuous finite thickness cladding[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(1): 013501.
- [50] Alshershby M, Hao Z Q, Lin J Q. Analysis of microwave leaky modes propagating through laser plasma filaments column waveguide[J]. Physics of Plasmas, 2012, 19(12): 123504.

- [51] Bogatskaya A V, Volkova E A, Popov A M. Nonequilibrium plasma channel in gaseous media formed by powerful UV laser as a waveguide for transportation and amplification of short microwave pulses [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12 (3): 035301.
- [52] Châteauneuf M, Payeur S, Dubois J, *et al.* Microwave guiding in air by a cylindrical filament array waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(9): 091104.
- [53] Zvorykin V D, Levchenko A O, Ustinovskii N N, *et al.* Transfer of microwave radiation in sliding mode plasma waveguides[J]. *JETP Letters*, 2010, 91(5): 226-230.
- [54] Zvorykin V D, Levchenko A O, Shutov A V, *et al.* Long-distance directed transfer of microwaves in tubular sliding-mode plasma waveguides produced by KrF laser in atmospheric air[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19(3): 033509.
- [55] Zvorykin V D, Ionin A A, Levchenko A O, *et al.* Directed transfer of microwave radiation in sliding-mode plasma waveguides produced by ultraviolet laser in atmospheric air [J]. *Applied Optics*, 2014, 53 (31): I31-I40.