

超快激光诱导等离子体成丝光谱

李兆星¹, 周萍², 郝婷³, 宋海英¹, 廖传军²

- (1. 北京工业大学, 北京 100124;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;
3. 太原科技大学, 太原 030024)

摘要: 飞秒激光等离子体光丝大气中传输的独特物理过程在航天领域具有重要的应用前景。采用仿真与实验, 验证了飞秒等离子体成丝的光谱展宽特征, 获得了超快等离子体光丝在不同参数特征下, 覆盖从可见到红外探测系统的波谱范围, 及保持系统相对稳定的特征, 对于借助强激光等离子体光丝光谱进行红外特征探测具有重要的启发作用。

关键词: 超快激光成丝; 等离子体光谱; 红外探测

中图分类号: V11

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 03-0014-08

Ultrafast Laser Induced Plasma Filamentation Spectrum

LI Zhaoxing¹, ZHOU Ping², HAO Ting³, SONG Haiying¹, LIAO Chuanjun²

- (1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;
3. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The unique physical process of femtosecond laser plasma optical filament transmission in the atmosphere has important application prospects in the field of aerospace. The spectral broadening characteristics of femtosecond plasma filaments are verified by simulation and experiments, and the characteristics that ultrafast plasma filaments cover the spectrum range from visible to infrared detection system under different parameter characteristics and the system relative stability are obtained, which will have an important enlightening role for infrared detection with the spectra of intense laser plasma filaments.

Key words: Ultrafast laser filaments; Plasma spectrum; Infrared detection

0 引言

空间飞行器尾焰是部分电离的高温非均匀等离子体, 受等离子体中带电粒子运动碰撞影响, 电磁波穿越飞行器尾焰过程中被等离子吸收而衰减, 引起穿越火箭尾焰的测控信号被干扰, 影响测控数据的读取, 给飞行器测控带来不利影响。在空间飞行器飞行过程中, 尾焰等离子体高速碰

撞过程会产生光谱随时间的演变现象, 谱段覆盖可见光到中波红外, 时间灵敏度要达到微秒级。为了提升对目标表面材质的判别能力, 反演出尾焰闪光和等离子现象的演变过程, 需要实现对光谱变化的高精度测量。

近年来, 随着超短强飞秒激光脉冲技术的发展, 人们发现其在大气中传输时, 可以形成长达几十米的等离子体光丝, 传输距离可达几百米甚

收稿日期: 2023-10-01; 修订日期: 2024-03-01

基金项目: 火箭创新基金 (ZH2022005)

作者简介: 李兆星 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超快激光与物质相互作用

通信作者简介: 宋海英 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为强场物理、超快光学

至是上千米。这是飞秒激光非线性光学效应造成的一种非常奇特的光学现象，本质上是等离子体散焦效应和自聚焦效应两者之间的一种动态平衡关系，其在介质中能够形成稳定的等离子体通道。随着人们在飞秒激光成丝领域研究的不断深入，其成丝的模式、原理、机制以及各种光学效应也已经逐渐明晰。超快激光成丝过程中的自相位调制、光强钳制、自陡峭、克尔自聚焦效应与等离子体散焦的动态平衡、超连续光谱的产生等物理过程在太空探测、遥感探测、空间环境监测等领域有很大应用价值^[1-5]。例如，激光光丝与气体介质相互作用后，等离子体中的电子迅速与其母核发生复合，同时辐射出不同分子或原子特有的荧光光谱，即指纹光谱。这些指纹光谱携带了激光击穿区域大气成分（分子或原子）的信息，就可以通过辨析这些指纹光谱的特征获得气体成分的准确信息^[6-7]。本文的主要工作即以超快激光成丝产生的等离子体光谱来模拟光谱产生过程的变化，为空间应用飞行器尾焰特征识别建立一定的理论与实验基础。

1 等离子体光谱成像

1.1 基本内涵与原理

高功率密度的长光腰脉冲线聚焦光束可以利用超快强激光通过特定的光路后得到，其在空气传输过程中，如果激光光腰处的激光功率密度比空气分子/原子的电离阈值高，则分子/原子发生电离并产生等离子体。光腰处极强的功率密度产生的有质动力将排开电子等离子体，形成高密度内壁的等离子体通道（如图 1 所示，深色部分为等离子体通道壁），并对激光束的传输产生自引导作用（光导效应）。当通道等离子体中的电子与母离子发生复合时，等离子体将产生韧致辐射，发射的辐射光谱，即为等离子体光谱或等离子体丝，也称激光光丝^[8-10]。

图 1 中横坐标 X 为激光传输方向，传输位置为波长 λ_0 的倍数，纵坐标 Y 为通道宽度，颜色棒从上（红色）到下表示等离子体的密度从大到小。等离子体产生的是连续光谱，其光谱范围从极紫外一直延续至远红外。当等离子体云产生的散焦效应与等离子体通道对激光传输产生的自聚焦效应达到动态平衡时，则会出现相对稳定的激光自引导传输，即形成发光强度稳定且与激光脉冲同

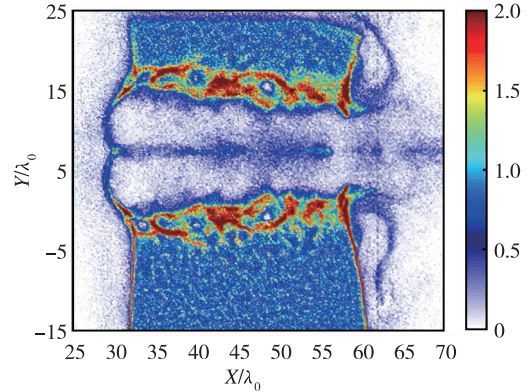


图 1 飞秒强激光产生等离子体通道的仿真计算图像

Fig. 1 Simulation of plasma channel generated by femtosecond intense laser

步的等离子体光丝或等离子体光谱。一个足够强的超短激光脉冲可以快速电离空气或气体介质，产生大量发光的等离子体光体（或点）。激光脉冲过后，会在其尾部留下稀薄弱电离的等离子体，在这个过程中，自由电子的动能会转移给空气分子，从而使得分子获得转动、振动以及平均动能。最终，这些能量会在纳秒尺度内转化成空气分子热能，并且大部分沉积在之前光丝所在区域。这种局域能量的迅速沉积会造成向外传播的压力波和中心低密度的等离子体通道，该通道具有与光丝一样的几何圆柱形状，此中心区域会在微秒尺度内回到压力平衡状态，密度孔将会在扩散的作用下衰减，最终形成持续的等离子体光体。

1.2 飞秒激光成丝超连续谱产生

飞秒激光脉冲在空气中传播时会产生各种非线性效应，如等离子体散焦效应、拉曼效应、克尔自聚焦效应等，这些效应都会导致介质折射率的变化，进而对激光场的相位进行调制，当激光光束在介质中传播一段距离后其光谱会出现明显的光谱展宽现象。由自相位调制和空气电离引起时域上的相位变化为^[11]

$$\Delta\phi = \frac{\omega_0}{c_0} z \left[n_2 I(r, t) - \frac{\rho(r, t)}{2\rho_c} \right] \quad (1)$$

引起的频率变化为

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= -\frac{\partial\phi}{\partial t} \\ &= -\frac{\omega_0}{c_0} z \left[n_2 \frac{\partial I(r, t)}{\partial t} - \frac{1}{2\rho_c} \frac{\partial\rho(r, t)}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\Delta\omega$ 为光脉冲中心频率变化， (r, t) 为脉冲传输的时空坐标， z 为传输距离， I 为激光强度， c

为光在真空中的传播速度, n_2 为中性气体的非线性折射率, ρ 为电子密度, ω 为光脉冲中心频率, $\Delta\phi$ 为相位变化。光谱展宽主要受两个因素影响:

1) 自相位调制对光谱展宽的影响。对于脉冲前沿, 光强随时间的增加而变大, $\partial I(r, t)/\partial t > 0$, 则引起脉冲频率变化, $\Delta\omega < 0$, 导致光谱向长波方向展宽; 对于脉冲后沿, $\partial I(r, t)/\partial t < 0$, 则光谱向短波方向展宽。

2) 空气电离对光谱展宽的影响。由于脉宽很小, 这里不考虑离子与电子的复合、电子与中性分子的吸附等因素。空气电离产生的电子密度是逐渐增大而后趋于饱和, 在这个过程中 $\partial\rho/\partial t > 0$, 由此产生的脉冲频率变化为 $\Delta\omega > 0$, 因此, 光谱主要向短波方向展宽。由于克尔效应引起折射率变化, $\Delta n = n_2 I$, 其中 I 为脉冲强度, 脉冲中心强度较高的相速度比其相速度要小, 这就会导致脉冲后沿向追赶中心偏移, 使得脉冲后沿更为陡峭, 从而导致光谱向短波方向的扩展更多一些。

飞秒激光成丝产生超连续谱的非线性传输模型为^[12]

$$-2ik_0 \frac{\partial A}{\partial z} = \left(1 - \frac{i}{\omega} \frac{\partial}{\partial t}\right) \Delta_{\perp} A - k_2 k_0 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + 2 \left(1 + \frac{i}{\omega} \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{k_0^2}{n_0} \Delta n_{\text{non}} A - ik_0 \alpha A \quad (3)$$

式中, A 表示光脉冲振幅, ω 表示光脉冲中心频率, Δn_{non} 表示介质非线性折射率, k_0 表示光脉冲波数, k_2 表示群速度色散系数, n_0 表示介质折射率, Δ_{\perp} 表示 xy 平面内的拉普拉斯算符, α 表示吸收系数。从中可以看出, 受光强钳制效应的影响,

等离子体等效折射率与光克尔非线性折射率之间达成动态平衡, 光丝内部峰值出现一个最大值, 频谱变化可以表示为^[13-14]

$$\Delta\omega(z, t) = -aI_0 \frac{\partial f(t)}{\partial t} + bI_0^{m'} f^{m'}(t) \quad (4)$$

式中, m' 表示电子跃迁需要的最少光子数目, $f(t)$ 表示脉冲包络函数, I_0 表示峰值光强, a 和 b 表示与时间无关的常数。

从以上公式可以分析出, 光强较高时, 光谱受到自陡峭效应影响向高频方向展宽; 光强较低时, 光谱受自相位调制的影响呈现为双向展宽。进一步分析得出, 峰值附近的激光脉冲能量最集中, 当光场强度发生变化时非线性折射率也会随之发生变化, 因此光脉冲后沿会更加陡峭, 频谱蓝移量增大, 这是由于脉冲前沿群速度明显比脉冲后沿群速度小, 脉冲峰值向后沿方向逐渐移动, 从而引起脉冲频谱不对称^[14-15]。

2 超连续光谱仿真过程

以下从不同角度对超快激光产生的连续光谱过程进行仿真计算。

2.1 20 m 仿真

本节首先模拟了强飞秒高斯光束经焦距 $f = 20$ m 的凸透镜聚焦后的传输情况。

1) 输入参数为: 束腰宽度 $R30$ mm, 脉宽 50 fs, 初始能量 3 mJ。

图 2 给出了在束腰宽度 30 mm、能量 3 mJ、脉宽 50 fs 的参数下, 一些在激光脉冲传输位置处的波

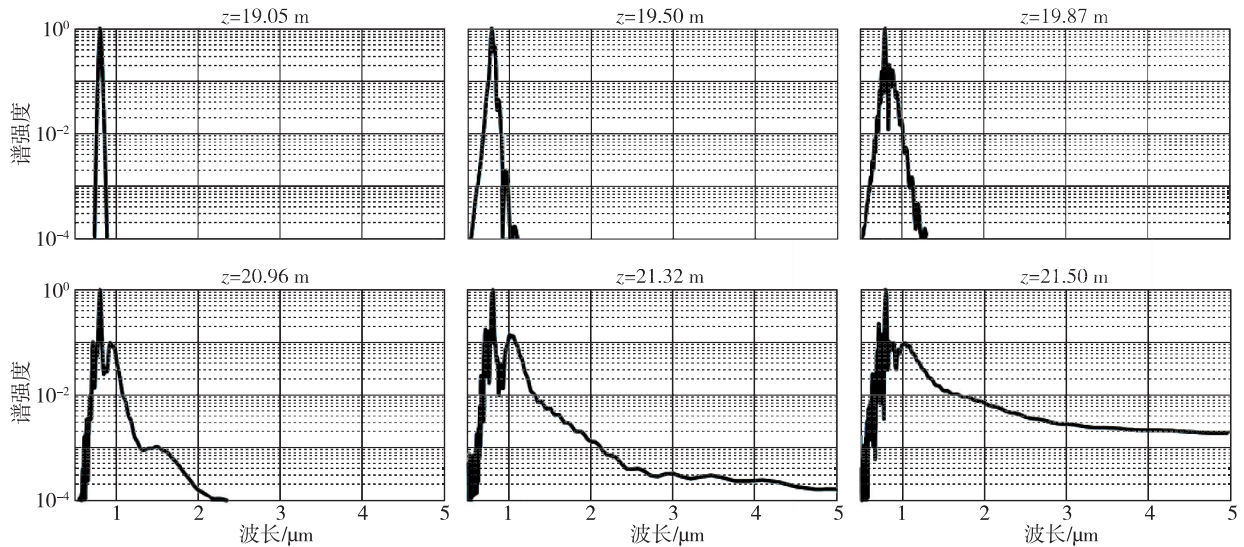


图 2 高斯光束在 20 m 附近成丝传输的波谱图

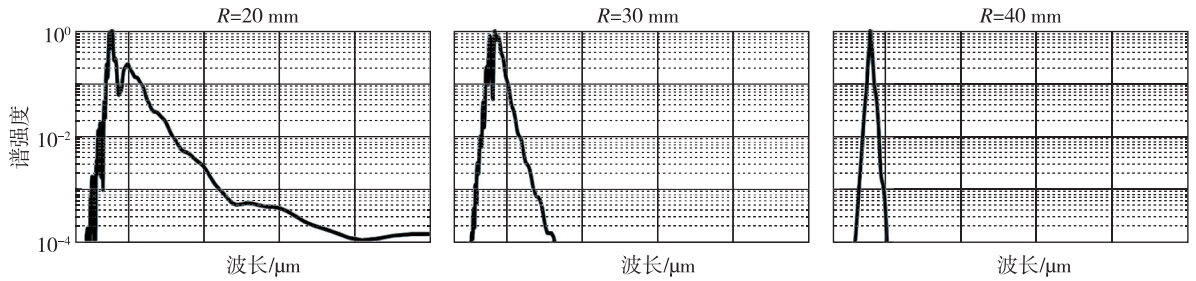
Fig. 2 Spectral diagram of Gaussian beam filament propagation at 20 m

谱强度 (本文所有的强度均作了归一化处理)。由此可以看出, 传播距离的增加会导致波谱向两边扩展。尤其是光纤在 $z > 20.96$ m 的位置形成之后, 波谱的宽度被明显扩展, 波谱强度则明显提高, 可以达到 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 数量级。

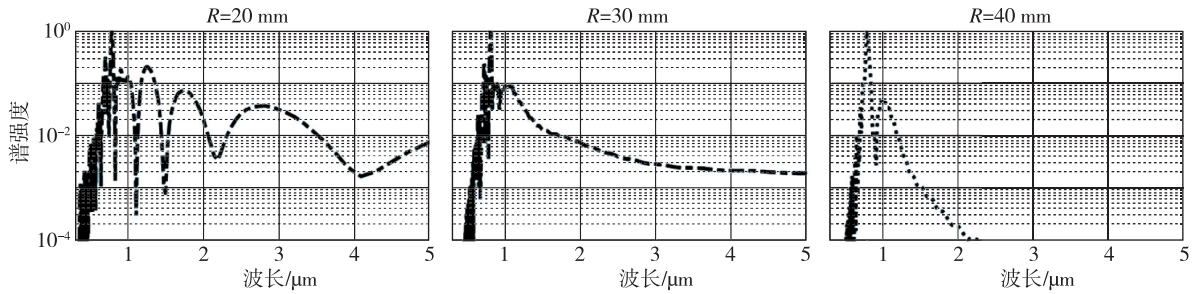
2) 输入参数为: 初始能量 1 mJ/3 mJ, 束腰宽度 20 mm/30 mm/40 mm, 脉宽 50 fs。

图 3 给出了不同束腰宽度下的波谱强度。图 4 为与图 3 相同参数下, 波段范围在 $2.7 \sim 2.9 \mu\text{m}$

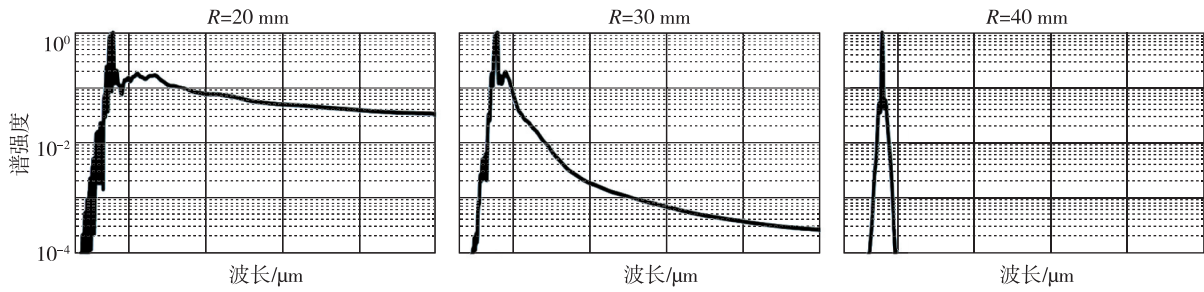
和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的波谱强度。可以看出, 随着束腰宽度从 20 mm 增加到 40 mm, 在同一成丝位置 22 m 处束腰宽度为 20 mm 的波谱展宽最早, 说明束腰宽度的增加会导致成丝的延后。当束腰宽度增加到 40 mm 时, 在能量为 1 mJ 时, 波谱展宽最大是 $1 \mu\text{m}$, 加大能量至 3 mJ, 波谱展宽可以达到 $5 \mu\text{m}$, 说明选择合适的能量, 可以很好地调整激光光谱展宽的范围。



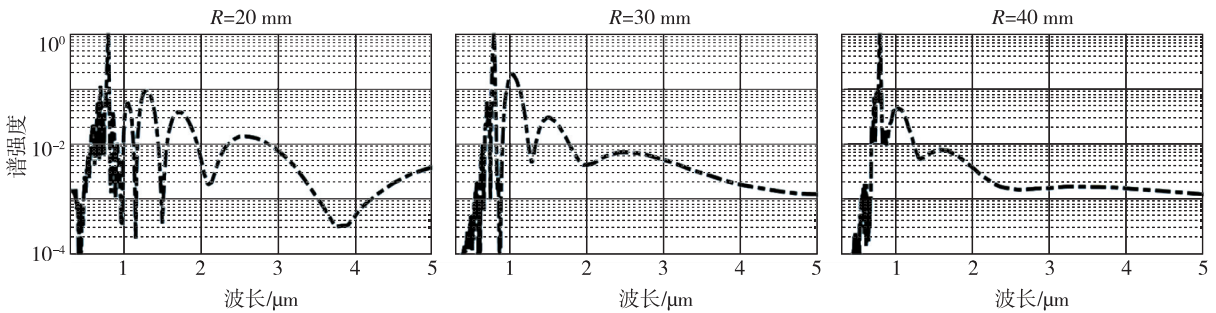
(a) 初始能量为 1 mJ 时, 传输距离在 21.5 m 的波谱图



(b) 初始能量为 3 mJ 时, 传输距离在 21.5 m 的波谱图



(c) 初始能量为 1 mJ 时, 传输距离在 22 m 的波谱图



(d) 初始能量为 3 mJ 时, 传输距离在 22 m 的波谱图

图 3 不同束腰宽度下高斯光束在不同位置处传输的波谱图

Fig. 3 Wave spectrogram of Gaussian beam transmission at different locations under different beam waist widths

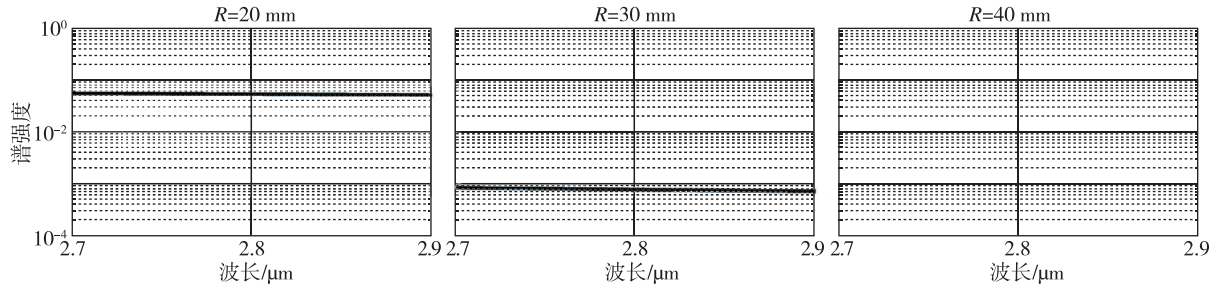
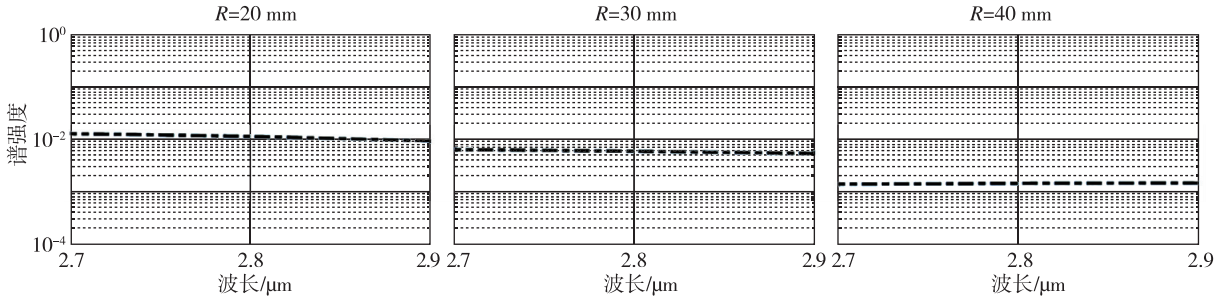
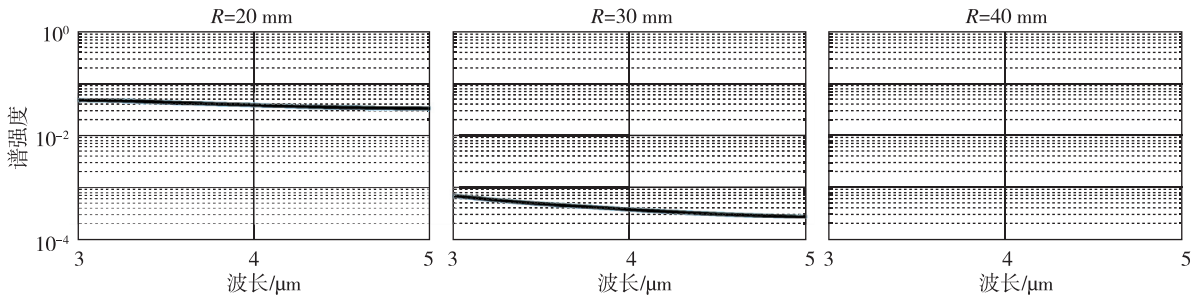
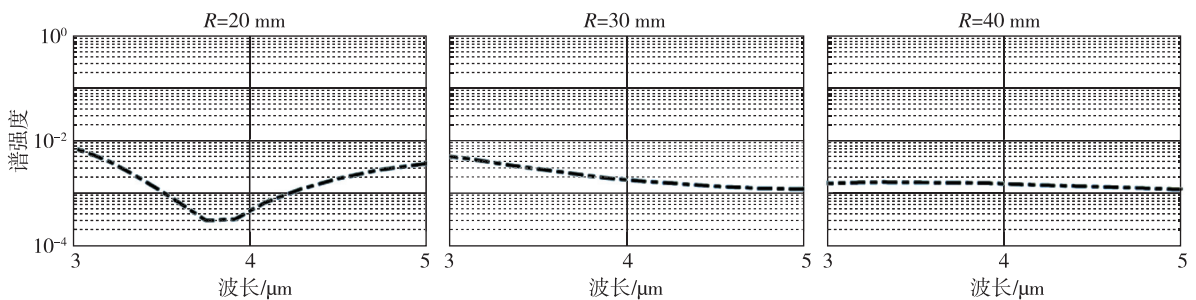
(a) 初始能量为 1 mJ 时, 2.7~2.9 μm 波段的波谱图(b) 初始能量为 3 mJ 时, 2.7~2.9 μm 波段的波谱图(c) 初始能量为 1 mJ 时, 3~5 μm 波段的波谱图(d) 初始能量为 3 mJ 时, 3~5 μm 波段的波谱图

图 4 不同束腰宽度下高斯光束在 22 m 处传输的波谱图

Fig. 4 Wave spectrogram of Gaussian beam transmission at 22 m under different beam waist widths

2.2 100 m 仿真

1) 初始能量 1.5 mJ, 束腰宽度 100 mm, 脉宽 50 fs。

图 5 给出了在能量 1.5 mJ、束腰宽度 100 mm、

脉宽 50 fs 的参数下, 一些不同成丝位置处的波谱强度。可以看出, 随着传播距离的增加, 在光纤形成之后 ($z > 100.51$ m) 的位置, 波谱向两边明显扩展。

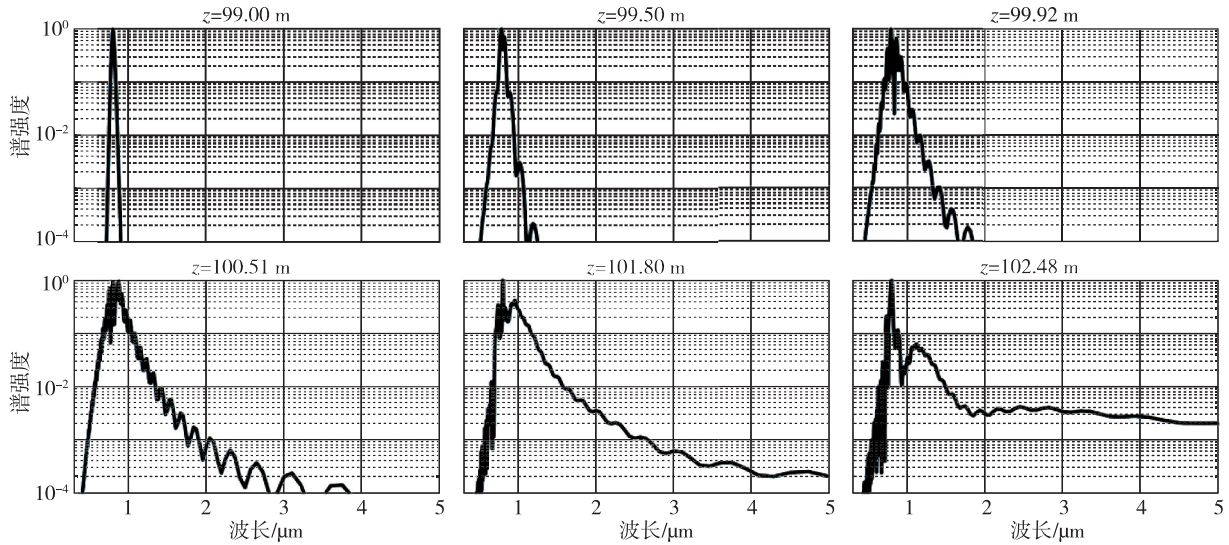
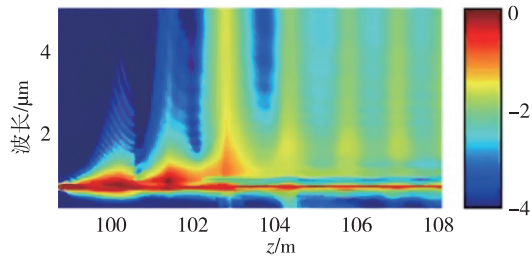


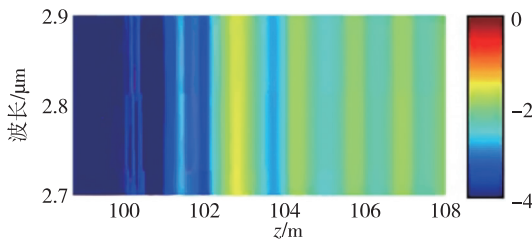
图 5 高斯光束在 100 m 处传输的波谱图

Fig. 5 Wave spectrogram of Gaussian beam transmission at 100 m

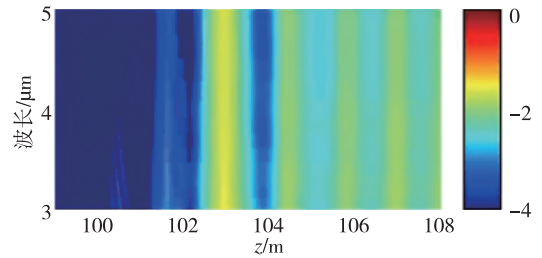
图 6 给出了与图 5 相同条件下的波谱演化图。可以看出，随着传播距离 z 的增加，平滑的超连续波谱可以覆盖到 $5 \mu\text{m}$ 的波长范围，这对等离子体光丝在空气中远程传播是非常有利的。



(a) 波段范围 $0.3 \sim 5 \mu\text{m}$



(b) 波段范围 $2.7 \sim 2.9 \mu\text{m}$



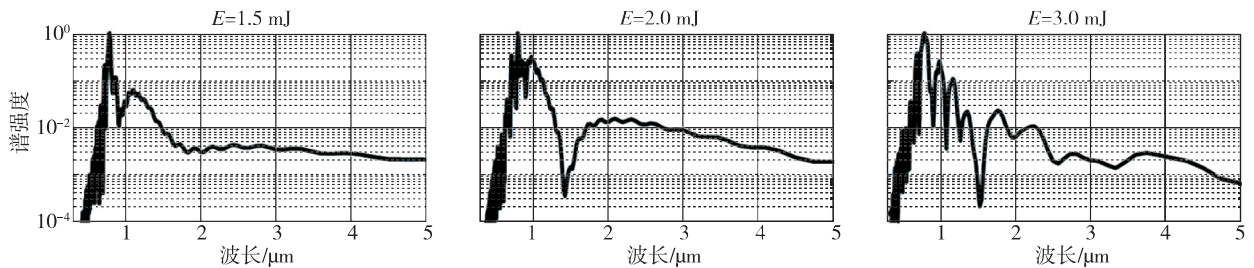
(c) 波段范围 $3 \sim 5 \mu\text{m}$

图 6 高斯光束在 100 m 处传输的波谱演化图

Fig. 6 Spectrum evolution diagrams of Gaussian beam propagation at 100 m

2) 初始能量 1.5 mJ/2 mJ/3 mJ, 束腰宽度 100 mm, 脉宽 50 fs。

图 7 给出了不同能量下, 激光脉冲传输位置在 102.48 m 处的波谱强度。可见, 随着能量从 1.5 mJ 增加到 3 mJ, 波谱强度仍旧保持在 10^{-2} 数量级左右, 没有明显的改变, 展宽范围均可达到 $5 \mu\text{m}$ 。



(a) 波段范围 $0.3 \sim 5 \mu\text{m}$

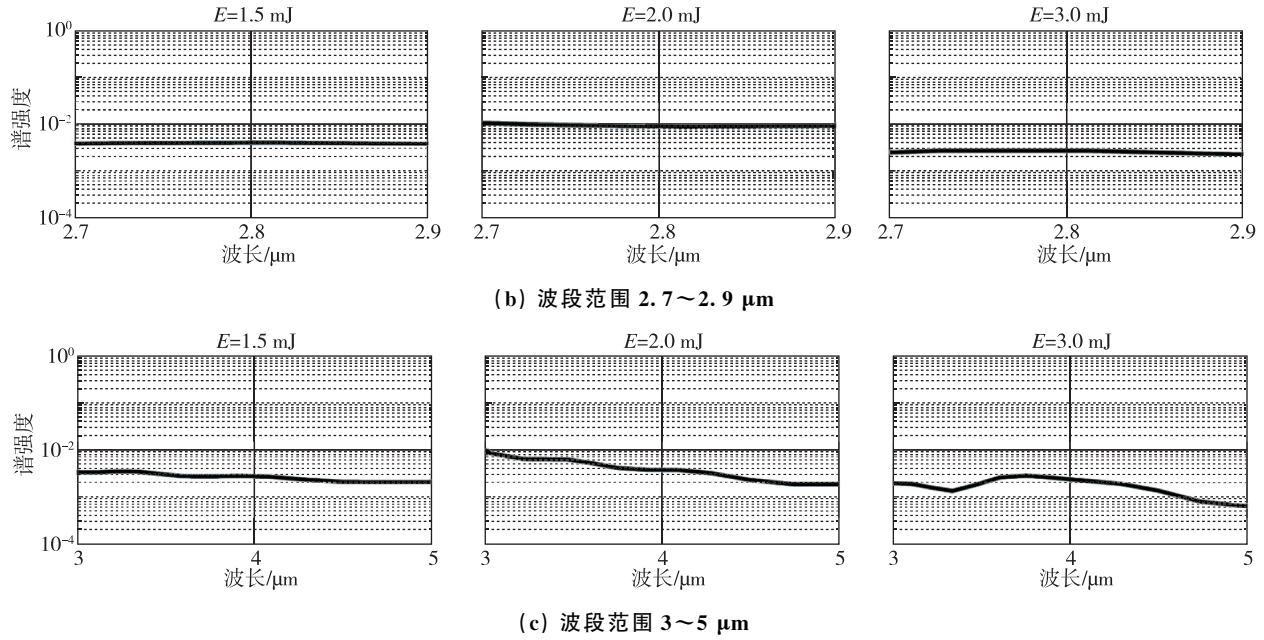


图7 不同能量下高斯光束在102.48 m处传输的波谱

Fig. 7 Wave spectrogram of Gaussian beam transmission at 102.48 m under different energies

3 超连续光谱形成过程

为具体展现飞秒等离子体成丝的光谱特征, 本文进行了部分验证, 所用的飞秒激光系统, 重复频率为1 kHz, 脉冲能量为3.5 mJ, 中心波长为800 nm, 脉宽为60 fs, 光斑直径为7.5 mm。依据上述飞秒激光成丝击穿等离子体的频谱为全谱段, 对等离子体产生的光谱进行侧向采集, 获得的飞秒成丝等离子体图谱的横向截面如图8所示, 图中清晰地显示了可见光的图谱样式。图9为获得的红外光谱图, 可以看到等离子体光谱在 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $4.3 \mu\text{m}$ 附近有明显的红外光谱强度分布, 这恰好覆盖了空间红外探测的波段, 说明其与空间红外探测到的谱段相匹配。

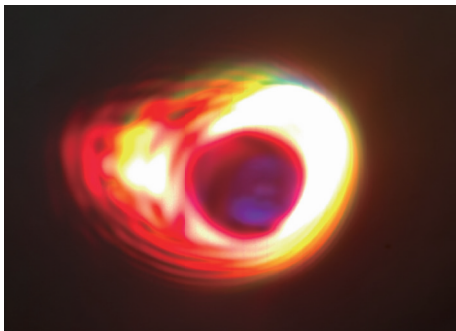


图8 实验室获得的飞秒激光成丝横截面图像

Fig. 8 Femtosecond laser filament cross section image

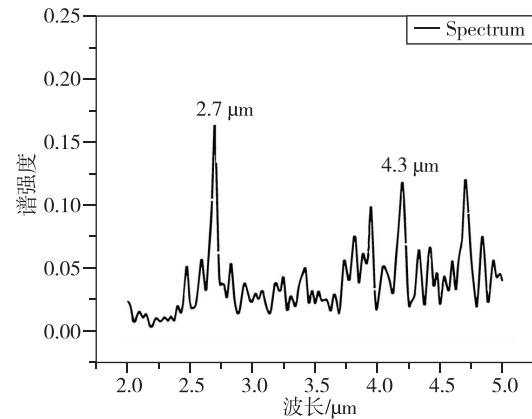


图9 激光光丝侧向红外光谱图

Fig. 9 Infrared spectrogram of laser filaments obtained laterally

4 结束语

空间飞行器飞行过程中的目标探测与定位至关重要。从上述计算和实验中可以看出, 传播距离的增加会导致波谱向两边扩展。尤其是光丝在 $z > 20.96 \text{ m}$ 的位置形成之后, 波谱的宽度被明显扩展, 波谱强度则明显提高, 且束腰宽度的增加会导致成丝的延后, 合适的能量可以很好地调整激光光谱展宽的范围。超快激光等离子体光丝在不同参数特征下, 可以覆盖可见光到红外光探测的波谱范围, 并保持很长时间的相对稳定。这对于将超快激光等离子体成丝光谱运用到空间飞行

器尾气的探测,且进行准确定位与目标识别,具有较强的应用潜力。

参考文献

- [1] 王玺. 美军定向红外对抗技术研究综述[J]. 飞航导弹, 2014(7): 57-60.
- [2] 刘晓林, 刘勋, 李维, 等. 天基光丝激光雷达光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2023, 50(7): 139-145.
- [3] 王宇, 马成, 彭博, 等. 天基红外预警卫星高精度协同目标跟踪方法[J]. 中国惯性技术学报, 2022, 30(2): 257-263.
- [4] 冯志芳, 刘勋, 郝婷, 等. 面向遥感应用的飞秒激光脉冲超长距离传输的研究进展[J]. 中国激光, 2023, 50(7): 49-66.
- [5] 李巧丽, 李云霞, 赵尚弘, 等. 基于激光等离子体的反导技术研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 392-395.
- [6] Zhang T T, Chen W Y, Fang D J. A method for calculating the discovery time of ballistic missiles detected by an infrared early warning satellite[J]. AIP Advances, 2023, 13(5): 055023.
- [7] 宋海英, 安汶源, 李瑶, 等. 面向在轨遥感应用的飞秒激光成丝调制延长方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(5): 70-77.
- [8] Klarskov P, Strikwerda A C, Iwaszczuk K, et al. Experimental three-dimensional beam profiling and modeling of a terahertz beam generated from a two-color air plasma[J]. New Journal of Physics, 2013, 15(7): 075012.
- [9] Mitryukovskiy S, Liu Y, Ding P J, et al. Backward stimulated radiation from filaments in nitrogen gas and air pumped by circularly polarized 800 nm femtosecond laser pulses[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 12750-12759.
- [10] Shu X F, Yu C X, Li W, et al. Kinetic-energy structure of a laser-produced-plasma channel in air[J]. Physical Review A, 2015, 92(6): 063844.
- [11] 李海宁. 气体介质中等离子体通道的三次谐波研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [12] 刘伟伟, 薛嘉云, 苏强, 等. 超快激光成丝现象研究综述[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 56-79.
- [13] 李子熙, 龚成, 华林强, 等. 强飞秒激光在氟化钙晶体中产生的超连续谱[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 253-258.
- [14] 张泽亮, 钱文启, 齐鹏飞, 等. 基于飞秒激光成丝的超连续光谱产生与调控研究进展[J]. 中国激光, 2023, 50(7): 67-84.
- [15] 兰俊平. 强飞秒环形高斯光在大气中传输的非线性特性研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2020.

引用格式: 李兆星, 周萍, 郝婷, 等. 超快激光诱导等离子体成丝光谱[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(3): 14-21.

Citation: Li Z X, Zhou P, Hao T, et al. Ultrafast laser induced plasma filamentation spectrum [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(3): 14-21.