

Numerical Simulation of Nonlinear Femtosecond Filamentation: Beam Wavelength Effect

Xixi Zhang, Xiexing Qi*

College of Physical & Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang Henan
Email: *597960332@qq.com

Received: Apr. 25th, 2018; accepted: May 10th, 2018; published: May 17th, 2018

Abstract

The propagation of the intense femtosecond laser in gas creates the filament. The argon is widely adopted in the intense femtosecond laser propagation experiments because of its special properties. Based on the nonlinear Schrodinger propagation equation and slit-step Fourier algorithm, the effects of beam wavelength (400 nm, 586 nm, 800 nm) on the femtosecond filamentation in argon are investigated. The simulation results show that the pulse with wavelength of 400 nm has the largest on-axis intensity, as well as the longest filament with the narrowest and the most stable beam radius, when the input power is given. These results indicate that the pulse with shorter wavelength is more suitable for the long-range propagation in argon, providing valuable data for the experimental research on the filamentation.

Keywords

Nonlinear Optics, Femtosecond Laser, Filament, Argon

激光波长对非线性光丝影响的数值研究

张茜茜, 亓协兴*

洛阳师范学院 物理与电子信息学院, 河南 洛阳
Email: *597960332@qq.com

收稿日期: 2018年4月25日; 录用日期: 2018年5月10日; 发布日期: 2018年5月17日

*通讯作者。

摘要

飞秒强激光脉冲在气体介质中传输会产生非线性光丝现象。氩气由于其特殊的气体属性被广泛应用于飞秒强激光气体传输实验。基于非线性薛定谔传输模型和分步傅里叶算法, 研究了现实应用中常用波长(400 nm, 586 nm, 800 nm)的飞秒强激光氩气介质中传输的非线性光丝属性。结果表明, 激光脉冲入射功率相同时波长为400 nm的激光脉冲轴上光强值最大、光丝最长、光丝半径最窄, 且光丝通道最稳定。该结果意味着氩气介质中短波长的飞秒强激光适合长距离传输, 为实验研究光丝现象提供有价值的参考数据。

关键词

非线性光学, 飞秒激光, 光丝, 氩气

Copyright © 2018 by authors 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

1995年 Braun 等人使用远红外飞秒强激光做的著名实验打破了超短强激光无法长距离传输的认知, 该实验证实超短强激光不但可以长距离传输, 还能形成稳定的光丝通道[1]。Braun 等人认为, 激光脉冲的入射功率大于自聚焦临界功率时, 自聚焦效应引起光束的峰值光强增加, 峰值光强高于介质的电离阈值后, 介质电离产生等离子体, 电离过程损耗光束能量且等离子体将聚焦的光束发散, 降低峰值功率。自聚焦——散焦过程不断地重复进行, 形成光丝通道。从此, 人们发现飞秒强激光气体传输有许多潜在应用, 如环境探测、引导闪电和高电压放电控制[2]。因此, 国内外许多学者进行了大量研究, 取得了诸多成果[3]-[11]。目前实验常用的飞秒强激光器波长为 400 nm, 586 nm 和 800 nm 三种[12]-[19], 普遍认为紫外波长激光束产生的光丝最大光强值在 10^{14} W/cm² 数量级, 而红外波长激光束产生的光丝最大光强为 10^{12} W/cm², 也就是说, 红外波长光丝的最大光强比紫外波长光丝的最大光强大约低两个数量级。但需要强调的是, 上述研究成果并不是基于同样的入射参数。

另外, 无论是实验研究还是数值仿真, 许多学者都会选取氩气为传输介质[20][21][22][23]。这是因为空气成分种类多, 易产生相当庞杂的非线性效应, 而且氩气非分子气体, 不存在缔合与碎裂等复杂效应, 研究环境相对纯正。

基于上述原因, 本文通过对比三种常用波长(400 nm, 586 nm, 800 nm)的入射激光脉冲在氩气介质中传输产生的非线性光丝现象来研究波长的影响, 为实验研究光丝现象提供有价值的参考数据。

2. 模型和算法

2.1. 模型

在群速度参考系中, 线性极化的入射激光电场 $E(r, t, z)$ 沿着传输方向 z 的传输方程可写为[24]:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{i}{2k_0} \Delta_{\perp} E - i \frac{k''}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + i \frac{k_0}{n_0} n_2 |E|^2 E - i \frac{k_0}{2n_0^2 \rho_c} \rho E - \frac{\beta^{(K)}}{2} |E|^{2K-2} E \quad (1)$$

方程右边的前两项为线性项, 包括空间散射和二阶色散; 后三项为非线性项, 包括克尔效应、等离子体散焦效应和多光子电离效应。\$k_0 = 2\pi/\lambda\$ 为相位常数, \$\lambda\$ 为激光脉冲的中心波长, \$k''\$ 为群速度色散系数, \$n_0\$ 为线性折射系数, \$n_2\$ 为克尔非线性折射系数, \$\rho_c = \epsilon_0 m_e \omega_0^2 / e^2\$ 为等离子体临界频率, \$\omega_0\$ 为激光脉冲频率, \$\rho\$ 为等离子体密度。\$\beta^{(K)}\$ 为多光子电离系数, \$K\$ 为电离每个气体粒子所需光子数量。

等离子体密度方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\beta^{(K)}}{K \hbar \omega_0} |E|^{2K} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{at}} \right) \quad (2)$$

式中, \$\hbar = h/2\pi\$ 且 \$h\$ 为普朗克常数, \$\rho_{at} = 2.4 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}\$ 为中性粒子密度。

入射强激光脉冲为高斯型:

$$E(r, t, z = 0) = \sqrt{\frac{2P_m}{\pi t_0^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{t_0^2}\right) \exp\left(-\frac{t^2}{t_0^2}\right) \quad (3)$$

式中, \$P_m\$ 为入射功率, \$r_0\$ 为光束半径, \$t_0\$ 为光束脉宽。

2.2. 算法

传输模型采用分步傅里叶算法进行仿真, 线性项在前半步的傅里叶空间内计算, 非线性项在后半步直接求解。对方程(1)中的线性项采用 Crank-Nicholson 差分算法, 方程(2)采用 4 阶 Runge-Kutta 算法。由于快速傅里叶变换方法自身的限制, 若计算范围取值太小, 计算边界对电场有较强反射, 仿真结果误差较大, 所以时间方向一般取 3 倍的光束脉冲, 半径方向取 6 倍的光束半径。另外, 使用约束性条件 \$\Delta z \leq k_0 (\Delta r)^2\$, 其中, \$\Delta z\$ 为传输方向的空间步长, \$\Delta r\$ 为横截面半径方向的步长, \$k_0\$ 为激光脉冲的波数[25]。

3. 结果分析

本文采用的入射激光参数为: \$P_m = 4.3 \text{ GW}\$, \$r_0 = 1 \text{ mm}\$, \$t_0 = 90 \text{ fs}\$。传输参数如表 1 所示。

图 1 所示为激光轴上光强、光束半径、等离子体密度和光束内能量与总能量之比随传输距离 \$z\$ 的变化。

从图 1(a)可以看出, 入射功率相同时波长越短, 轴上光强值就越大而且出现光强箝位的次数就越多。对于波长为 400 nm 的激光脉冲, 光强箝位首次出现在 1.4 m 左右的位置, 并且在 5.6 m 范围内多次出现。当入射激光波长为 800 nm 时, 轴上光强值低于前两种波长, 而且光强箝位只在 5.5 m 出现了一次。

光束半径的变化如图 1(b)所示。激光溃缩距离的半经验公式如下[26]:

$$L_c = \frac{0.367 k_0 r_0^2}{2 \sqrt{\left[(P_m / P_{cr})^{1/2} - 0.852 \right]^2 - 0.0219}} \quad (4)$$

其中, \$P_{cr} = 3.77 \lambda^2 / (8\pi n_0 n_2)\$ 为自聚焦临界功率。图中的垂线代表的是用半经验公式所得的溃缩位置, 可

Table 1. Propagating coefficients of laser pulse with three different wavelengths

表 1. 三种不同波长激光的传输参数

\$\lambda\$ (nm)	\$n_2\$ (m\$^2\$/W)	\$k''\$ (s\$^2\$/m)	\$K\$	\$\beta(K)\$ (W\$^{1-K} \cdot \text{m}^{2K-3}\$)
400	\$4.9 \times 10^{-23}\$	\$4.9 \times 10^{-29}\$	6	\$1.95 \times 10^{-88}\$
586	\$4.9 \times 10^{-23}\$	\$2.6 \times 10^{-29}\$	8	\$3.5 \times 10^{-123}\$
800	\$3.2 \times 10^{-23}\$	\$2.1 \times 10^{-29}\$	11	\$3.32 \times 10^{-176}\$

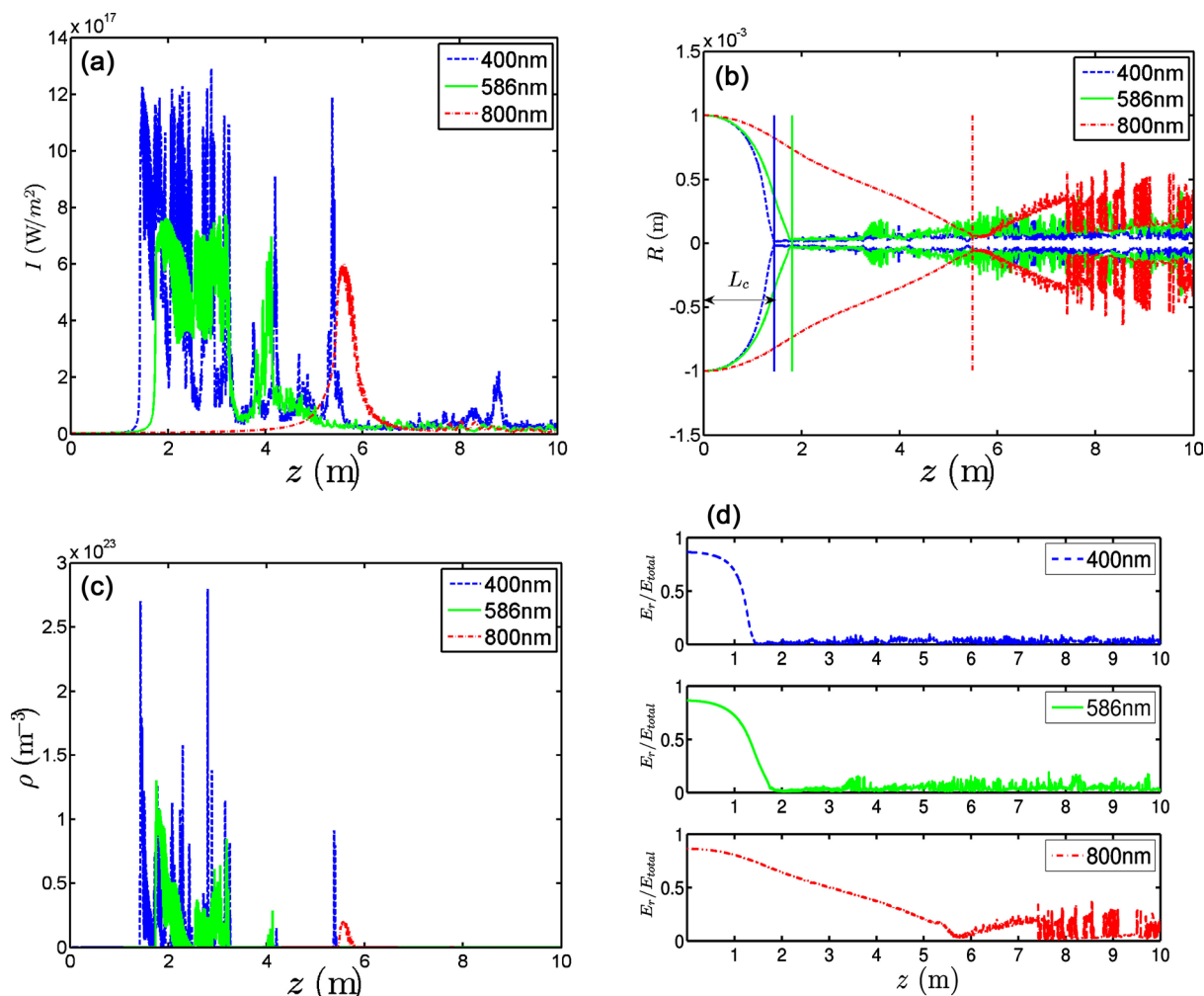


Figure 1. Evolution of the pulse and the on-axis electron density for different wavelengths with the propagation distance z . (a) the on-axis intensity of pulse; (b) beam radius; (c) the plasma density; (d) the ratio of energy within the beam radius to the total energy

图 1. 不同波长脉冲和等离子体密度随传输距离 z 的变化。(a) 轴上光强; (b) 光束半径; (c) 等离子体密度; (d) 光束半径内能量与总能量之比

可以看出, 数值模拟所得值与之相一致。波长为 400 nm 的入射激光与氩气介质相互作用之后, 其光丝半径最窄, 而且只有轻微的波动。相对而言, 586 nm 的激光入射后半径波动幅度较大, 尤其是经过 4 m 的传输之后波动更显著。800 nm 波长的入射激光产生的光束波动最剧烈, 尤其是在 7.5 m 之后处于动荡起伏的状态。

图 1(c) 为等离子体密度的变化。波长 400 nm 的入射激光产生的等离子体密度比波长 800 nm 的大约高一个数量级。对比图 1(a), 等离子体产生的位置与光强峰值的位置基本一致。这是因为, 入射激光经过氩气的自聚焦效应, 其强度足够将氩气原子电离, 进而由电离出的自由电子组成等离子体, 但等离子体却起散焦作用, 该散焦作用与克尔自聚焦作用相竞争, 达到动态平衡时就产生光丝通道。

图 1(d) 给出了沿传输方向, 光束内能量与总能量之比。入射波长为 400 nm 的激光脉冲在溃缩点后, 由于形成了较稳定的光丝通道, 光束半径内所含能量与总能量比值相对稳定, 起伏微小。对于 800 nm 波长的入射激光而言, 稳定的光丝通道较短, 该比值与前两种波长迥异, 起伏剧烈。由此可知, 较短波长的激光脉冲由于光束半径内能量比较稳定, 有利于氩气介质中传输。

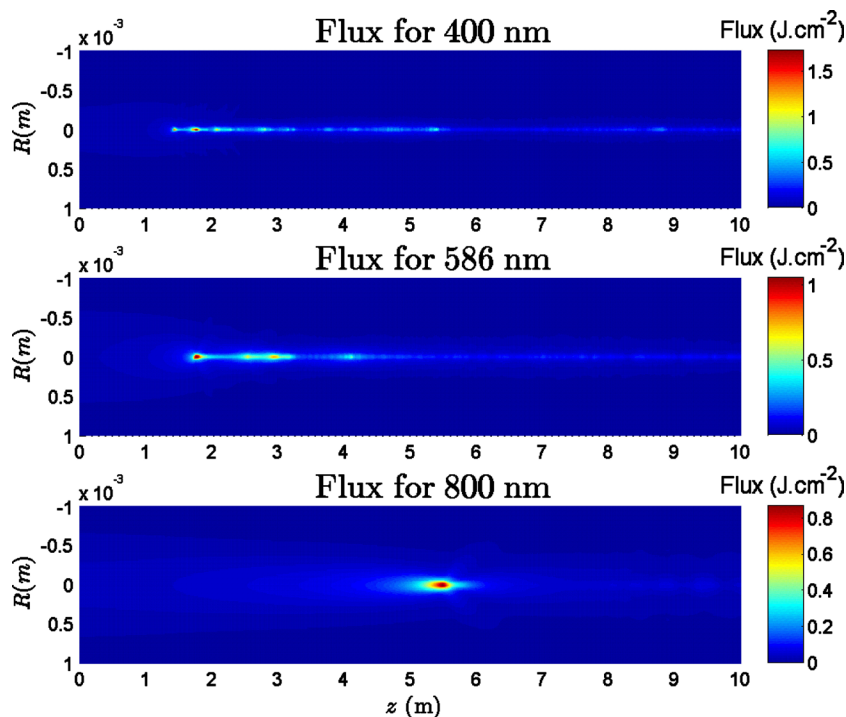


Figure 2. Flux with the propagating distance
图 2. 光通量随传输距离 z 的变化

为了更直观地了解光丝, 通过计算光通量, 作出图 2。从图中可以看出, 入射波长为 400 nm 时, 光丝较长较窄, 出现多处亮斑, 对应着多处自聚焦; 波长为 586 nm 时, 有三处亮斑; 波长为 800 nm 的入射激光只产生一处亮斑, 且尺寸较短。

4. 结论

为确定常用飞秒强激光器中何种波长的激光脉冲有利于长距离传输, 本文基于非线性薛定谔传输模型, 采用数值仿真研究了波长对飞秒强激光在氩气中传输所形成的非线性光丝属性的影响。结果表明: 相同入射功率下, 波长越短, 轴上光强值越大, 等离子体密度也越大, 形成的光丝通道窄且长; 在能量方面, 短波长的激光脉冲传输过程中, 其半径内所含能量比较稳定, 有利于激光长距离传输。

由于空气介质的复杂性, 本文采用物理属性较为纯正的氩气为传输介质。而飞秒强激光器现实应用环境绝大多数为空气介质, 因此, 有必要对能够在空气介质中有效长距离传输的激光波长作进一步研究。

基金项目

国家自然科学基金项目资助(11704174); 河南省高校国家级大学生创新创业训练计划项目(201710482008)。

参考文献

- [1] Braun, A., Korn, G., Liu, X., *et al.* (1995) Self-Channeling of High-Peak-Power Femtosecond Laser Pulses in Air. *Optics Letters*, **20**, 73-75. <https://doi.org/10.1364/OL.20.000073>
- [2] Kasparian, J., Rodriguez, M., Méjean, G., *et al.* (2003) White-Light Filaments for Atmospheric Analysis. *Science*, **301**, 61-64. <https://doi.org/10.1126/science.1085020>
- [3] Steinmeyer, G. and Brée, C. (2014) Optical Physics: Extending Filamentation. *Nature Photonics*, **8**, 271-273.

- <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.59>
- [4] Wang, L., Ma, C.L., Qi, X.X., *et al.* (2015) The Impact of the Retarded Kerr Effect on the Laser Pulses' Propagation in Air. *European Physical Journal D*, **69**, 1-5. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2015-50874-4>
- [5] Scheller, M., Mills, M.S., Miri, M.A., *et al.* (2014) Externally Refuelled Optical Filaments. *Nature Photonics*, **8**, 297-301. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.47>
- [6] Feng, Z.F., Li, W., Yu, C.X., *et al.* (2015) Extended Laser Filamentation in Air Generated by Femtosecond Annular Gaussian Beams. *Physical Review A*, **91**. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.91.033839>
- [7] Todorov, T.P., Todorova, M.E., Todorov, M.D., *et al.* (2014) On the Stable Propagation of High-Intensity Ultrashort Light Pulses. *Optics Communications*, **323**, 128-133.
- [8] Tarazkar, M., Romanov, D.A. and Levis, R.J. (2014) Higher-Order Nonlinearity of Refractive Index: The Case of Argon. *Journal of Chemical Physics*, **140**, 605. <https://doi.org/10.1063/1.4880716>
- [9] Wang, Z., Zhang, C., Liu, J., *et al.* (2011) Femtosecond Filamentation in Argon and Higher-Order Nonlinearities. *Optics Letters*, **36**, 2336-2338. <https://doi.org/10.1364/OL.36.002336>
- [10] Deng, Y., Jin, T., Zhao, X., *et al.* (2013) Simulation of Femtosecond Laser Pulse Propagation in Air. *Optics Laser Technology*, **45**, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.020>
- [11] Zhao, Sh.H., Shi, L., Li, U.J., *et al.* (2003) Filamentation of Femtosecond Laser Pulse in Atmosphere and Its Application. *Laser Technology*, **27**, 256-258 (in Chinese).
- [12] Tzortzakos, S., Bergé, L., Couairon, A., *et al.* (2001) Breakup and Fusion of Self-Guided Femtosecond Light Pulses in Air. *Physical Review Letters*, **86**, 5470-5473. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.5470>
- [13] Mlejnek, M., Kolesik, M., Moloney, J.V., *et al.* (1999) Optically Turbulent Femtosecond Light Guide in Air. *Physical Review Letters*, **83**, 2938-2941. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.2938>
- [14] Mlejnek, M., Wright, E.M. and Moloney, J.V. (1998) Dynamic Spatial Replenishment of Femtosecond Pulses Propagating in Air. *Optics Letters*, **23**, 382-384. <https://doi.org/10.1364/OL.23.000382>
- [15] Lange, H.R., Grillon, G., Ripoche, J.F., *et al.* (1998) Anomalous Long-Range Propagation of Femtosecond Laser Pulses through Air: Moving Focus or Pulse Self-Guiding. *Optics Letters*, **23**, 120-121. <https://doi.org/10.1364/OL.23.000120>
- [16] Bergel, C.A. (2001) Gas-Induced Solitons. *Physical Review Letters*, **86**, 1003-1006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.1003>
- [17] Schwarz, J., Rambo, P., Diels, J.C., *et al.* (2000) Ultraviolet Filamentation in Air. *Optics Communications*, **180**, 383-390.
- [18] Tzortzakos, S., Lamouroux, B., Chiron, A., *et al.* (2001) Femtosecond and Picosecond Ultraviolet Laser Filaments in Air: Experiments and Simulations. *Optics Communications*, **197**, 131-143. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(01\)01443-2](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(01)01443-2)
- [19] Couairon, A. and Berge, L. (2000) Modeling the Filamentation of Ultra-Short Pulses in Ionizing Media. *Physics of Plasmas*, **7**, 193-209. <https://doi.org/10.1063/1.873794>
- [20] Bejot, P., Bonnet, C., Boutou, V., *et al.* (2007) Laser Noise Compression by Filamentation at 400 nm in Argon. *Optics Express*, **15**, 13295-13309. <https://doi.org/10.1364/OE.15.013295>
- [21] Bejot, P., Kasparian, J. and Wolf, J.P. (2008) Dual-Color Co-Filamentation in Argon. *Optics Express*, **16**, 14115-14127. <https://doi.org/10.1364/OE.16.014115>
- [22] Stephanie, C. and Luc, B. (2003) Femtosecond Pulse Compression in Pressure-Gas Cells Filled with Argon. *Physics Review E*, **68**, 066603.
- [23] Maryam, T., Romanov, D.A. and Levis, R.J. (2014) Higher-Order Nonlinearity of Refractive Index: The Case of Argon. *Journal of Chemical Physics*, **140**, Article ID: 214316.
- [24] Xi, T.T., Lu, X. and Zhang, J. (2006) Interaction of Light Filaments Generated by Femtosecond Laser Pulses in Air. *Physical Review Letters*, **96**, Article ID: 025003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.025003>
- [25] Zhang, N. (2010) Propagation of Intense Ultrashort Laser Pulses in the Atmosphere. Zhejiang University, Hangzhou, 26-26.
- [26] Marburger, J.H. (1975) Self-Focusing: Theory. *Progress in Quantum Electronics*, **4**, 35-110. [https://doi.org/10.1016/0079-6727\(75\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0079-6727(75)90003-8)

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-0916，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：mp@hanspub.org