

文章编号: 0258-7025(2008)04-0519-05

空气中自导光纤超连续辐射后向散射增强特性

张立文^{1,2} 林 晨^{1,2} 辛 立^{1,2} 高军毅¹

(¹ 中国科学院武汉物理与数学研究所光电探测实验室, 湖北 武汉 430071; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 由自导成丝效应产生的超连续辐射具有超宽带光谱、后向散射增强等一系列新特征, 为激光雷达大气探测开辟了新的领域。通过测量飞秒激光脉冲自导光纤超连续辐射散射的角度分布, 对不同条件空气中自导光纤产生的超连续辐射后向散射特性进行了实验研究。结果表明, 在洁净空气和含气溶胶的空气中, 自导光纤的超连续辐射都呈现出明显的后向散射增强特性。同时对超连续辐射后向散射的测量值进行拟合, 拟合结果表明超连续辐射后向散射角分布满足洛伦兹(Lorentz)函数, 在洁净空气中其角宽度为 6.4° , 后向 180° 时归一化散射强度是瑞利散射的3.2倍。超连续辐射沿光纤前向呈锥形辐射, 其前向散射具有明显的波长依赖关系; 而后向散射无明显的波长依赖关系。

关键词 大气光学; 大气散射; 后向散射增强; 散射角分布测量; 超连续辐射; 飞秒激光

中图分类号 O 436. 2; TN 012 **文献标识码** A

Backscattering Enhanced Characteristics of Supercontinuum Emission from a Self-Guided Filament in Air

Zhang Liwen^{1,2} Lin Chen^{1,2} Xin Li^{1,2} Gao Junyi¹

(¹Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)
(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract New characteristics of supercontinuum emission generating along with ultrashort femtosecond laser self-guided propagating in air, such as ultra wide band spectrum and backscattering enhancement, produce a new study field for the development of atmosphere detection lidar. The backscattering properties of supercontinuum emission from a self-guided filament generated by femtosecond laser are researched by measuring the angular distribution of supercontinuum emission at different conditions of air. The results show the backscattering of supercontinuum emission from a filament is enhanced in clear air and dusty air with aerosol. And by fitting the experimental data of the backscattering of supercontinuum emission, it is found that the angular distribution of supercontinuum backscattering satisfy Lorentz function; in clear air the angle width is 6.4° , the normalized backscattering intensity increases 3.2 times as compared with Rayleigh scattering at 180° . Along the filament, the frontward supercontinuum emission exhibits the conical emission, so frontward scattering is obviously dependent on wavelengths; the backward scattering shows no obvious dependence on wavelengths.

Key words atmospheric optics; atmospheric scattering; backscattering enhanced; angular distribution of scattering measuring; supercontinuum emission; femtosecond laser

1 引 言

飞秒激光在空气中自导成丝传输现象是非线性克尔自聚焦效应和电离空气产生等离子体散焦效应

达到动态平衡的结果^[1]。自导光纤的直径只有几百至几十微米, 在传输过程中保持高能量和瞬态结构不变, 能够实现超过光束的瑞利长度很多倍的长距

收稿日期: 2007-10-18; 收到修改稿日期: 2007-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(10475110)资助项目。

作者简介: 张立文(1980—), 女, 河南人, 博士研究生, 主要从事超短飞秒激光脉冲在大气中传输、探测方面的研究。

E-mail: lwzhang@wipm. ac. cn

导师简介: 高军毅(1956—), 男, 安徽人, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气光学、激光光谱学方面的研究。

E-mail: gaojunyi@wipm. ac. cn

离自导传输;光丝中的能量达 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 如此高的能量引起的强自相位调制等非线性过程可以产生从紫外到红外的超连续光^[2~8]。超短飞秒激光在空气中的这种长距离传输和超连续光产生的特性使得一种新型遥感探测系统——超宽带激光雷达的发展成为新的研究热点^[6,9~13]。最近的研究成果表明^[9], 太瓦级飞秒激光脉冲能传输到十几千米的高空, 自聚焦产生的超连续辐射具有后向散射增强效应。所以对超连续辐射的散射特性研究不仅具有理论意义也具有很重要的应用价值。目前对微粒中超连续辐射的散射特性有较多的研究^[14~16], 而对空气中光丝超连续白光辐射的散射特性研究还较少^[17]。本文通过测量超短飞秒激光脉冲在空气中自导光丝产生超连续白光辐射的散射角度分布, 对自导光丝超连续辐射的散射特性进行了研究。在洁净空气和含气溶胶的空气中, 观察到自导光丝的超连续辐射相对于瑞利和米氏(Mie)散射都表现出明显的后向散射增强特性, 并对实验结果进行了分析和讨论, 采用函数模型拟合方式给出了 180° 超连续辐射后向散射增强的定量结果。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验所用的飞秒脉冲光源是美国相干公司生产的商用太瓦级飞秒激光系统, 中心波长为 800 nm, 单脉冲最大能量可达 120 mJ, 脉冲宽度 45 fs, 重复频率 10 Hz, 光束直径 3 cm, 实验中使用的激光能量为 12 mJ。从飞秒激光系统输出的激光光束经过焦距为 3 m 的透镜聚焦, 在透镜后大约 2.8 m 处开始自导成丝。光纤置于透镜后 3.55 m 处光丝附近探测, 在 xoz 平面绕光丝转动, 光丝产生的超连续辐射被芯径为 0.5 mm 的光纤(数值孔径小于 0.3)收集至光谱仪, 分光后由增强型 CCD(ICCD)探测及计算机采集处理; 探测系统采用的是美国 PI/Acton 公司生产的 SP2500i 型的光谱仪和 PI-Max 型增强型 CCD, 光谱仪的接收范围在 300~900 nm, 涵盖了可见光波段; 光谱仪采用

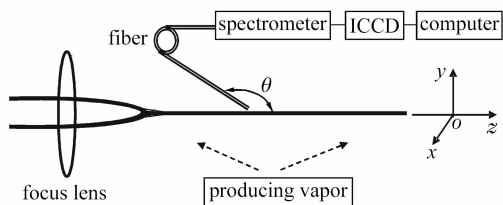


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental setup

300 line/mm 光栅, 光谱分辨率为 0.5 nm。为了测量沿光丝超连续辐射的角度分布, 定义沿光丝传输方向为前向散射方向, 即 $\theta = 0^\circ$, 光纤探测端绕光丝旋转, 受支架限制测量的角度范围从 $\theta = 5^\circ \sim 175^\circ$ 。实验分别对洁净空气、洁净空气加水雾和普通含气溶胶粒子三种情况下的空气中自导光丝产生的超连续辐射角度分布与瑞利和米氏散射进行了对比测量。对洁净空气中的测量是在超净室进行的。针对含气溶胶粒子的空气中光丝超连续辐射的角度分布测量在两种空气条件下进行: 一是室外的普通空气; 二是超净室内加水气的空气, 即在通过成丝通道下方放置喷雾气装置来增加水气溶胶粒子浓度。实验中对瑞利和米氏散射的角度分布的测量装置相同于以上实验装置, 不同的是采用 Nd:YAG 脉冲激光器输出的纳秒量级能量约 500 μJ 的 532 nm 绿光作光源。

3 实验结果与分析

光纤探测点绕光丝旋转过程中, 不同角度光纤探测系统的视场与线状光丝的叠加效应, 如图 2 所示; 测量数据应为采集的原始数据除以重叠因子 $1/\sin\theta$ 进行叠加效应修正。为了减少实验中入射光强度起伏影响测量结果, 散射强度数值相对于其 90° 的散射强度进行归一化处理。

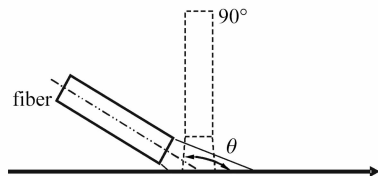


图 2 光纤探测视场和光丝辐射场的叠加图示

Fig. 2 Overlap between the viewing field of the fiber and the radiation field the filament

自导光丝超连续辐射散射与波长的关系如图 3 所示, 其中图 3(a) 是在 90° 时超连续辐射散射谱的测量结果。图 3(b) 是沿光丝前向不同角度下超连续辐射散射强度和波长的关系, 图 3(c) 是沿光丝后向不同角度下散射强度和波长的关系; 数据都用 90° 的散射强度进行归一化。可以看出, 光丝超连续辐射前向散射存在明显的波长依赖关系, 呈现出长波长散射最大角小, 短波长散射最大角大的特性。这与 Nibbering 等^[3] 实验中观察到的锥形辐射一致, 主要由超短飞秒激光脉冲自导光丝传输中发生的非线性自相位调制效应形成。由于自导光丝中强的克尔自聚焦和等离子体散焦不断的动态平衡, 使光丝传输过程中在时间上和空间上不断发生强烈的

非线性自相位调制,因此光丝中光谱展宽的同时也伴随着沿光丝径向的角谱展宽^[18],其共同的作用使超连续辐射沿光丝前向呈现出长波(红光)在内、短波(蓝光)在外的环状锥形辐射。超连续辐射的前向

锥形辐射效应使前向散射存在明显的波长依赖特性,而后向散射未见明显的波长依赖特性,后向散射增强与波长无关,其机制目前尚无明确的理论解释。

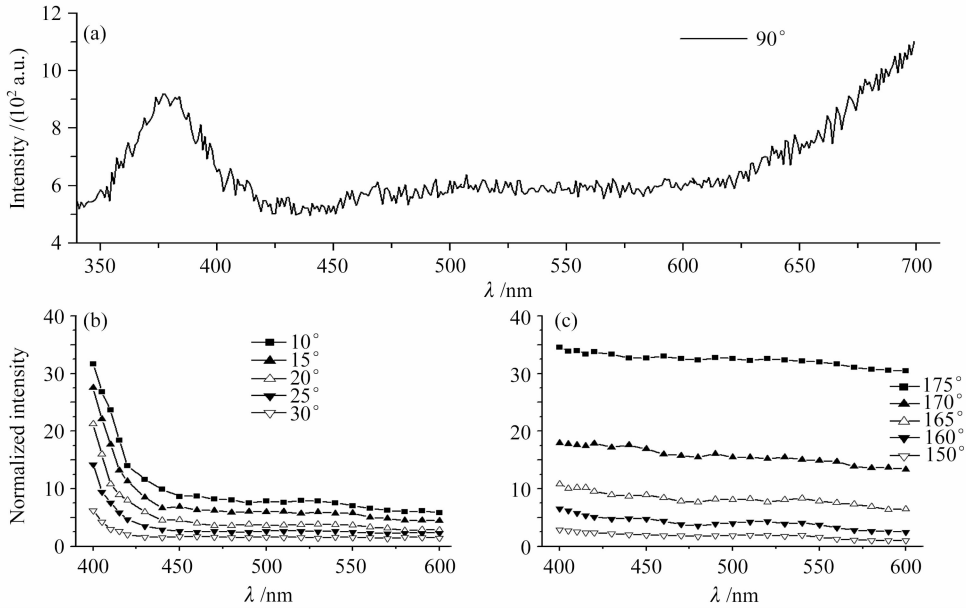


图 3 室外空气中自导光丝超连续辐射散射与波长的依赖关系。(a) 在 90° 的超连续谱;(b) 沿光丝前向;(c) 沿光丝后向
Fig. 3 Dependence of the supercontinuum emission scattering on spectral wavelengths along the filament in outdoor air (a) the spectra in 90°; (b) in the forward direction; (c) in the backward direction

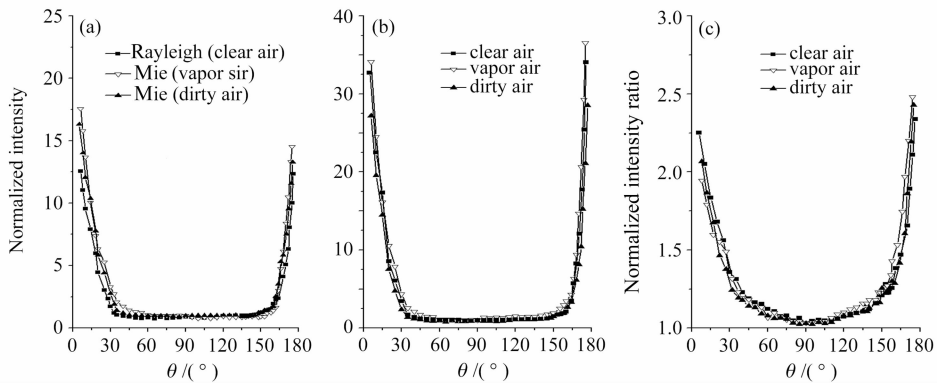


图 4 三种条件空气下自导光丝超连续辐射归一化散射强度角度分布与瑞利及米氏散射的比较
(a) 瑞利和米氏散射;(b) 超连续辐射;(c) 两者比值

Fig. 4 Angular distributions of the supercontinuum emission scattering normalized intensity from a filament in three air environments compared with Rayleigh and Mie scattering. (a) Rayleigh and Mie scattering; (b) supercontinuum emission scattering; (c) the ratio

基于自导光丝超连续辐射后向散射的波长不敏感性,可以将飞秒激光超连续辐射 350~700 nm 内光的积分和与 10 ns 脉宽的 532 nm 激光的散射特性进行对比,结果示于图 4。实验采用了洁净空气、含水雾空气以及普通室外空气三种介质条件,图 4(a) 为 10 ns 脉宽激光的瑞利和米氏散射的角度分布;图 4(b) 是飞秒激光自导光丝超连续辐射散射的角度

分布特性;图 4(c) 给出了超连续辐射与瑞利及米氏散射的散射强度比值随角度的变化。从两者的比值可以看出,在三种空气介质条件下超连续辐射后向散射在近后向位置都急剧增加,表现出相同的后向散射增强特性,与瑞利及米氏散射相比随后向散射角度改变呈现出非线性增大。这表明光丝超连续辐射的后向散射具有明显的散射增强特性。

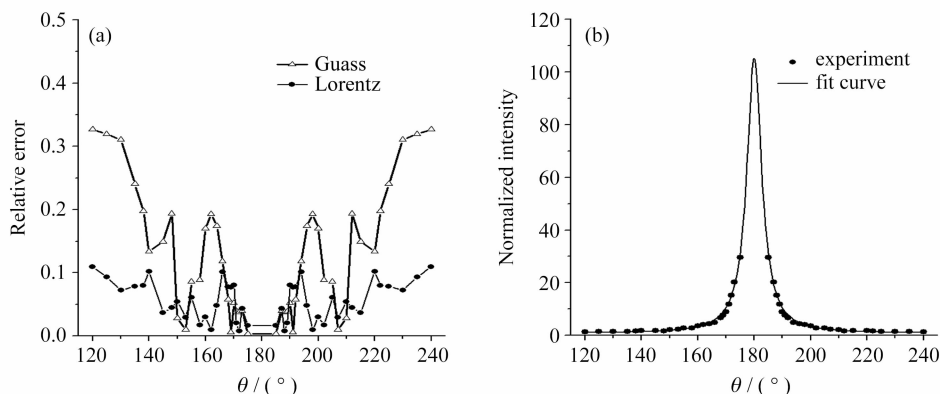


图 5 洁净空气中自导光丝超连续辐射近后向散射测量值拟合函数的误差及拟合结果

(a) 高斯函数和洛伦兹函数拟合的相对误差; (b) 实验值及拟合曲线

Fig. 5 Relative errors of fitting functions and fitting results of the near backward scattering of the supercontinuum emission in clear air. (a) relative errors of Gauss and Lorentz function; (b) experimental data and the fitting curve

表 1 三种空气条件下采用洛伦兹函数对超连续辐射与瑞利及米氏后向散射的拟合结果

Table 1 Fitting results of supercontinuum and Rayleigh, Mie scattering with Lorentz function in airs

| Fitting conditions | | a | b | c | x_0 | y_0 | RMSE |
|--------------------|----------------|------|--------|------|-------|-------|------|
| Clear air | Supercontinuum | 0.8 | 1029.2 | 6.4 | 180 | 103 | 0.96 |
| | Rayleigh | 0.58 | 366.2 | 7.36 | 180 | 32 | 1.22 |
| Dirty air | Supercontinuum | 0.31 | 1205.1 | 6.42 | 180 | 114 | 1.04 |
| | Mie | 0.53 | 433.4 | 7.71 | 180 | 36 | 1.27 |
| Vapor air | Supercontinuum | 0.16 | 1330 | 6.61 | 180 | 122 | 1.12 |
| | Mie | 0.18 | 488 | 8.13 | 180 | 38 | 1.31 |

实验上 180° 散射强度无法测量,为此在轴对称的假定下对实验数据进行了数值拟合,以获得后向 180° 时超连续辐射的散射强度值。图 5(a) 给出了洁净空气中高斯(Gauss)函数和洛伦兹(Lorentz)函数的拟合结果的相对误差;后者的相对误差更小,表明洛伦兹函数拟合结果与实测值更符合。图 5(b) 给出了洁净空气中 $120^\circ \sim 240^\circ$ 范围内测量值和洛伦兹函数拟合值的比较,均方差(RMSE)为 0.96,相关系数为 0.992。拟合采用的洛伦兹函数形式为

$$y = a + \frac{b}{2\pi} \cdot \frac{c}{(x - x_0)^2 + (c/2)^2},$$

式中 a, b, c 为参数, x_0 为峰值点。表 1 给出了实测数据的拟合结果。拟合结果表明,在洁净空气、含水雾空气、室外普通空气中光丝超连续辐射后向散射增强趋势基本一致,其后向 180° 的辐射强度 y_0 分别为 103, 114, 122, 角宽度分别为 $6.4^\circ, 6.42^\circ, 6.61^\circ$ 。在洁净空气中光丝后向 180° 超连续辐射强度是线性散射强度的 3.2 倍,角宽度为 6.4° ,瑞利后向散射的角宽度为 7.36° 。

4 结 论

研究了飞秒激光脉冲空气中自导光丝超连续辐

射的后向散射特性,并与纳秒激光散射进行了对比。相对于瑞利和米氏散射,在洁净空气和含气溶胶的空气中自导光丝的超连续辐射都具有明显的后向散射增强特性。数据拟合表明,超连续辐射后向散射满足洛伦兹函数,在洁净空气、含水气溶胶空气、室外空气中,在后向 180° 时超连续辐射归一化散射强度值分别为 103, 114, 122, 是纳秒激光散射强度的 3.2 倍。在光丝前向超连续辐射呈锥形辐射,具有明显波长依赖特性;在光丝后向超连续辐射表现出后向散射增强特性,无波长依赖关系。空气中自导光丝的这种超连续辐射后向散射增强特性使超宽带飞秒激光雷达在遥感探测领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 A. Braun, G. Korn, X. Liu *et al.*. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1):73~75
- 2 Hajime Nishioka, Wataru Odajima, Ken-ichi Ueda *et al.*. Ultrabroadband flat continuum generation in multichannel propagation of terawatt Ti:sapphire laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(24):2505~2509
- 3 E. T. J. Nibbering, P. F. Curley, G. Grillon *et al.*. Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1):62~64
- 4 Zhu Yi, Chen Xiaowei, Leng Yunxin *et al.*. Extracavity

- femtosecond high intensity laser pulse compression by bulk media [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12):1614~1618
- 朱毅,陈晓伟,冷雨欣等. 利用块状介质进行飞秒强激光脉冲的腔外压缩[J]. 中国激光, 2005, **32**(12):1614~1618
- 5 Zhang Jie, Hao Zuoqiang, Yun Xiaohui *et al.*. Propagation of intense femtosecond laser pulses in air [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2006, **23**(3):282~294
- 张杰,郝作强,远晓辉等. 超强飞秒激光脉冲在空气中的传输研究[J]. 量子电子学报, 2006, **23**(3):282~294
- 6 G. Mejean, J. Kasparian, E. Salmon *et al.*. Towards a supercontinuum-based infrared lidar [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**(2-3):357~359
- 7 Li Kun, Zhang Bin, Li Keyu *et al.*. Third harmonic generation of super intense femtosecond laser pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1506~1511
- 李琨,张彬,李恪宇等. 超高强度飞秒脉冲的三次谐波转换[J]. 中国激光, 2006, **33**(11):1506~1511
- 8 Wang Li, Han Xiyou. Ultra-short Gaussian pulse expansion and deformation by high-order group velocity dispersion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):138~142
- 王丽,韩秀友. 高阶群速度色散引起的高斯超短脉冲宽度的展宽和形变[J]. 光学学报, 2007, **27**(1):138~142
- 9 P. Rairoux, H. Schillinger, S. Niedermeier *et al.*. Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **71**(4):573~580
- 10 Mignel Rodriguez, Riad Bourayou, Guillaume Mejean *et al.*. Kilometer-range nonlinear propagation of femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **69**(3):036607
- 11 Kamil Stelmaszczyk, Philipp Rohwetter, Guillaume Mejean *et al.*. Long-distance remote laser-induced breakdown spectroscopy using filamentation in air [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(18):3977~3979
- 12 Qi Luo, Jin Yu, S. Abbas Hosseini *et al.*. Long-range detection and length estimation of light filaments using extra-attenuation of TW femtosecond laser pulses propagating in air [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(3):391~397
- 13 Zhu Jiabin, Ji Zhonggang, Deng Yunpei *et al.*. Study on life time of a plasma channel induced by femtosecond laser pulses and an external electric field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1059~1062
- 朱佳斌,季忠刚,邓蕴沛等. 外加高压电场下空气中激光等离子体通道寿命研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(6):1059~1062
- 14 Yong-Le Pan, Steven C. Hill, Jean-Pierre Wolf *et al.*. Backward-enhanced fluorescence from clusters of microspheres and particles of tryptophan [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15):2994~2999
- 15 Catherine Favre, Véronique Boutou, Steven C. Hill *et al.*. White-light nanosource with directional emission [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(3):035002
- 16 V. Boutou, C. Favre, S. C. Hill *et al.*. Backward enhanced emission from multiphoton processes in aerosols [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(2-3):145~152
- 17 J. Yu, D. Mondelain, G. Ange *et al.*. Backward supercontinuum emission from a filament generated by ultrashort laser pulses in air [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **21**(8):533~535
- 18 V. P. Kandidov, O. G. Kosareva, I. S. Golubtsov *et al.*. Self-transformation of a powerful femtosecond laser pulse into a white-light laser pulse in bulk optical media (or supercontinuum generation) [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**(1):149~165