

激光与光电子学进展

飞秒强激光大气遥感新技术的原理和研究进展

王铁军^{1,2*}, 陈娜^{1,2}, 郭豪^{1,2}, 刘尧香^{1,2}, 冷雨欣^{1,2}, 李儒新^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室及超强激光科学卓越中心, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 飞秒强激光脉冲在大气中传输时, 会形成狭长的、具有高激光强度、高等离子体密度、可远程产生和操控的通道, 即光丝。光丝与物质相互作用时, 高激光强度可激发物质辐射具有指纹特征的荧光谱线, 成丝过程可产生覆盖整个大气光学传输窗口的超连续谱激光, 通过光学差分吸收实现多组分大气成分的检测分析。飞秒强激光非线性成丝为多相态、多组分大气遥感提供了新的技术途径。主要围绕飞秒激光大气成丝远程诱导击穿光谱技术和光丝超连续谱激光雷达技术两种基于飞秒激光的大气遥感新技术, 综述了两种技术的原理、光谱测量和分析方法及其相关研究进展, 分析了飞秒强激光大气遥感应用存在的关键科学和技术问题并对未来发展进行了展望。

关键词 大气光学; 大气环境监测; 飞秒激光成丝; 光丝诱导击穿光谱; 白光激光雷达; 超连续谱

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0700001

Principle and Research Progress of Atmospheric Remote Sensing by Intense Femtosecond Lasers

Wang Tiejun^{1,2*}, Chen Na^{1,2}, Guo Hao^{1,2}, Liu Yaoxiang^{1,2}, Leng Yuxin^{1,2}, Li Ruxin^{1,2}

¹State Key Laboratory of High Field Laser Physics and Chinese Academy of Sciences, Center for Excellence in Ultra-Intense Laser Science, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract The propagation of intense femtosecond laser pulses in atmospheric air can lead to a channel with high laser intensity, high plasma density, and capability for remote generation and control, namely filament. When the filaments interact with the materials, high laser intensity can excite the materials and induce the finger-print fluorescence of the materials. Supercontinuum can also be generated during filamentation which can cover the entire atmospheric optical transmission windows. The supercontinuum provides an idea source for sensing multiple atmospheric components through differential optical absorption spectroscopy. Intense femtosecond laser filamentation provides a new approach for atmospheric sensing of multiple phases and multiple components. In this paper, we focus on the new atmospheric sensing techniques based on intense femtosecond lasers, namely, remote femtosecond laser filament induced breakdown spectroscopy and filament induced supercontinuum Lidar. The working principles, the methods for spectral measurement and analysis as well as the recent research progress are briefly reviewed. Finally, the scientific and technique problems and future development of intense femtosecond laser

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-09-12; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院NSAF联合基金(U2130123)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB160104)、中国科学院国际合作重点项目(181231KY5B20200033)、上海市科技计划项目(21511105000)

通信作者: *tiejunwang@siom.ac.cn

remote atmospheric sensing are discussed.

Key words atmospheric optics; atmospheric remote sensing; femtosecond laser filamentation; filament induced breakdown spectroscopy; white light Lidar; supercontinuum

1 引言

激光与大气介质的相互作用包括瑞利散射、米散射、拉曼散射、共振散射、荧光散射、吸收效应和多普勒效应等过程。基于这些过程,大气环境探测激光雷达技术已经被用来探测大气密度、温度、风场、水汽、臭氧、温室气体、云、能见度和气溶胶等大气环境要素。激光雷达大气遥感技术具有超高的时间和空间分辨率、大尺度的垂直探测能力、较高的探测精度以及实时探测能力等优势。激光雷达的工作平台用于地基、车载、船(舰)载、机载乃至星载。通过已经形成的激光雷达网络和星载激光雷达,可以获得大空间尺度持续的四维大气环境信息,以应对全球气象、气候和环境的变化^[1-2]。在大气环境成分识别探测方面,受限于激光雷达体制,通常一种激发光只能针对单一物质进行检测,长距离探测方法主要受限于激光光源。另外,传统雷达技术还不能对气溶胶成分进行识别分析。大气环境遥感应用迫切需求一种激光雷达技术可以同时实现多相态、多组分大气成分的识别和定量测量,这就要求激光雷达要在体制上有所创新。在这样的背景下,随着超短脉冲激光放大技术的发展^[3],飞秒强激光大气遥感新技术有望弥补现有激光雷达技术的不足^[4-6]。

高强度飞秒激光在大气介质传输过程中,当激光峰值功率高于临界峰值功率 $P_{cr} = \lambda^2 / (8\pi n_0 n_2)$ (λ 为入射激光波长, n_0 为空气线性折射率, n_2 为二阶非线性折射率系数)时,非线性克尔效应不可忽略,这与长脉宽激光的线性传输显著不同。高激光强度会引起空气折射率变大 $n = n_0 + n_2 I(r, t)$, 由光强的梯度空间分布[图 1(a)]可知,传输过程中产生了聚焦透镜效应,导致飞秒强激光光束在大气中传输时发生自聚焦效应,使得激光强度变大,甚至可以达到大气介质的电离阈值,进而产生激光等离子体。激光大气等离子体对折射率的贡献与克尔效应正好相反,会形成负透镜效应,使得光束散焦[图 1(b)]。

当自聚焦效应与等离子体的散焦效应达到一种动态平衡时,就会形成很长的等离子体通道,即飞秒激光光丝^[8-11]。不同激光条件下,产生的光丝长

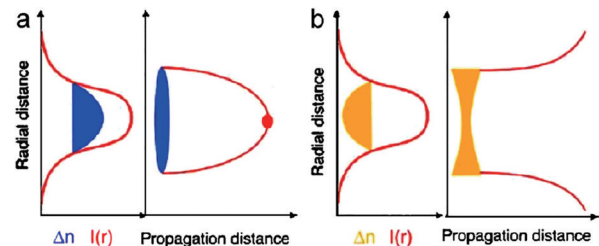


图 1 飞秒强激光非线性成丝的主要物理过程。(a) 光学克尔效应引起的光束自聚焦;(b) 激光电离等离子体引起的光束自散焦^[7]

Fig. 1 Dominant physical processes during intense femtosecond laser nonlinear filamentation. (a) Beam self-focusing induced by optical Kerr effect; (b) beam self-defocusing induced by laser ionized plasma^[7]

度可达到几厘米到几百米^[12]甚至上千米^[13],光丝内部的光强钳制在 $10^{13} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 电子密度约为 $10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。光丝形成的过程中会伴随超连续谱产生、荧光和太赫兹辐射等丰富的非线性光学现象^[7-11]。光丝及其伴随的非线性光学现象使得其在超短脉冲激光产生^[14]、材料加工^[15]、人工干预天气^[5,16]、物质成分探测^[17]、大气环境监测^[4,6]等方面具有重要应用前景。基于飞秒强激光的大气遥感新技术从测量原理可以分为飞秒强激光成丝诱导荧光光谱测量和超连续谱差分吸收测量两类。通过改变光丝的初始啁啾及利用望远镜聚焦系统等方法可以在远距离处产生光丝^[12-13],成丝过程中产生的较高的激光强度可以远距离电离物质,辐射具有指纹特征的荧光光谱,进而发展出了飞秒激光光丝远程诱导击穿光谱(R-FIBS)技术^[5,17-19]。R-FIBS就是利用光丝的远距离传输的特点,使光丝与远处的样品相互作用激发出物质的特征荧光信号,进而实现对危险化学品、有机物、金属等物质的远程探测。此外,飞秒强激光在大气中发生非线性传输成丝的过程中会产生超连续谱(SC),其光谱可覆盖紫外(UV)、可见光到红外,因此又被称为白光激光^[4,20-21]。超连续光谱的产生主要基于由克尔效应和激光诱导等离子体引起的自相位调制(SPM)^[22-24]、自陡峭效应^[25]以及四波混频^[26]等非线性效应机制。超连续谱因其具有超宽的波长范围以及超短的脉冲时间,可作为理想光源应用于多个

领域。超连续谱(又称白光)激光雷达就是利用光丝的远距离传输及其后向辐射增强特性和超连续谱的宽光谱特性,对大气组分及浓度、空气相对湿度等信息进行远程探测。作为飞秒强激光大气非线性光学领域的一个前沿研究方向,在空气中寻找具有增益特性荧光辐射近年来引起国内外研究人员的关注。以空气主要物质成分或其衍生物为增益介质,通过飞秒强激光激发,能够以无腔放大的方式产生具有空间指向性、相干性和高强度的受激辐射,即空气激光。目前,空气激光的物理机制尚未完全清楚,在大气环境监测领域的应用有待深入探索。鉴于在空气激光前沿方向上,近期已经有多篇相关的综述论文和著作^[27-31],相关内容在本文中不做介绍。本文主要介绍了飞秒激光光丝远程诱导击穿光谱探测技术的研究进展,以及飞秒激光光丝超连续谱白光激光的形成及超连续谱白光激光雷达的原理和研究现状,并简要讨论了这两种基于飞秒强激光的大气遥感新技术面临的问题及未来的发展方向。

2 飞秒激光光丝远程诱导击穿光谱技术

2.1 基本原理和测量方法

飞秒激光光丝远程诱导击穿光谱技术^[5,17-19]是将高强度飞秒激光脉冲在空气中产生的等离子体光丝,作用到被检测物表面或内部,高强度光丝与物质相互作用,通过强场电离、解离、碰撞、激发、复合等过程向外辐射荧光,通过该荧光光谱可以获知

被探测物质的指纹特征。根据荧光光谱产生位置、谱线特征及强度可以确定物质的距离、成分及含量,其原理装置如图 2 所示。飞秒强激光在大气中自由传输时,通过预补偿空气引入色散,基于自聚焦效应在远程就可以形成具有高激光强度的光丝。在具体应用中,为了提高光丝激光强度,通常采用具有长焦距且距离可调的光束控制系统,如望远镜远程聚焦系统,在远距离处产生高强度的光丝,以获得较高的荧光辐射强度,可以解决长脉冲激光或者连续波激光远距离无法获得高激光强度的瓶颈问题,使得光丝在远程探测方面拥有巨大的优势。此外,由于光丝内部存在激光强度钳制效应^[32],使得光丝内的激光功率密度近似恒定不变,可以在空气中产生稳定的、长距离的高激光强度区域,进而很好地降低或避免光强浮动、外部聚焦等对探测精度的影响^[33-35]。R-FIBS 遥感探测适用的对象可以是气体、气溶胶、固体等多相态、多物种,因此,可以基于单一飞秒强激光光源实现多相态、多物种的同时检测分析^[6]。飞秒强激光远距离成丝的过程中由于 SPM 会形成超连续谱,减小荧光光谱探测信噪比,对物质成分的定性和定量分析都有不利影响。该影响可以通过偏振门开关技术消除^[36],偏振门开关技术利用了荧光各向同性、超连续谱激光背景具有和成丝激光相同的偏振特性,在荧光接收端插入偏振选择器件滤掉超连续谱激光背景,可以有效地提高荧光光谱探测的信噪比^[36]。

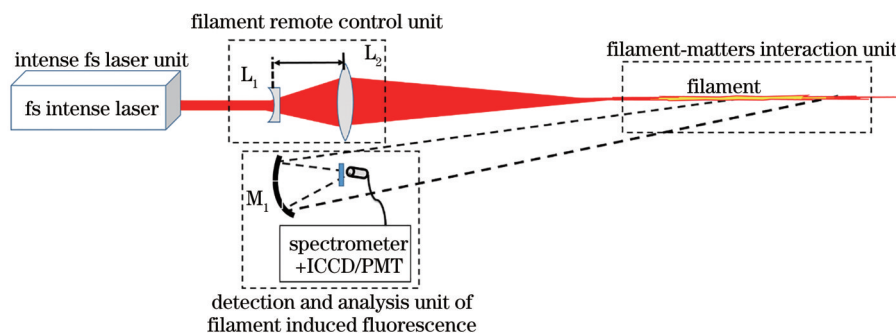


图 2 飞秒激光光丝远程诱导击穿光谱技术原理装置示意图

Fig. 2 Schematic setup for remote femtosecond laser filament induced breakdown spectroscopy

2.2 R-FIBS 研究进展

欧洲 Teramobile 研究计划^[37]团队最早开展 R-FIBS 研究并取得了一系列研究成果。该团队于 2003 年在第二届欧洲-地中海激光诱导击穿光谱研讨会率先报道了 R-FIBS 研究相关成果^[38]。他们利用 Teramobile 的激光装置^[39],输出中心波长在 800 nm

的 Ti:sapphire 激光,通过飞秒和皮秒激光脉冲激发,在 25 m 处演示了光丝激发和遥感探测铜和铝等金属样品,结果表明飞秒激光激发可以产生更干净的待测样品荧光光谱。2004 年,该小组 Stelmazczyk 等^[33]利用 250 mJ 的飞秒激光,通过调节啁啾使其在空气中自由传输,形成长约 7 m,包含约 30 条光丝的等离子

体细丝,并在距离样品 90 m 处探测到金属样品的特征荧光光谱信号,其实验装置图及测量结果见图 3。2005 年,该团队 Rohwetter 等^[40]通过飞秒成丝,在 180 m 处探测到金属样品的荧光光谱信号,并推测通过改进探测系统可以使探测距离扩展到千米量级。除了利用中心波长为 800 nm 的飞秒激光,2006 年, Tzortzakis 等^[41]利用中心波长在紫外 248 nm 的 450 fs 激光大气成丝,在距离样品 4.5 m 处收集光纤诱导

的荧光信号,实验结果证明了紫外飞秒激光 FIBS 可明显区分不同材质的样品及不同种类的石头。2008 年, Mirell 等^[42]进一步对比了飞秒激光波长在紫外光(中心波长为 266 nm)和近红外(IR,中心波长为 795 nm)条件下, R-FIBS 探测二硝基甲苯 DNT 和铵盐的差异,实验结果表明,在紫外光条件下测得的分子特征谱线更多。表 1 总结了适用紫外和红外波长飞秒激光 FIBS 的优点以及应用场景。

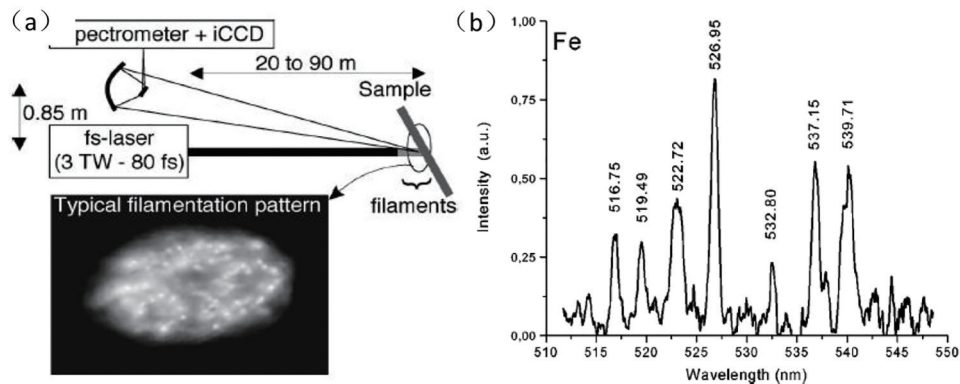


图 3 Teramobile 小组 90 m R-FIBS 实验。(a) R-FIBS 实验装置示意图及包含约 30 条光丝的光束截面;(b) 探测距离为 90 m 时,遥感探测金属铁的荧光信号^[33]

Fig. 3 R-FIBS experiments by Teramobile at a distance up to 90 m. (a) Experimental schematic setup for R-FIBS and beam cross section containing 30 filaments; (b) fluorescence signal of metallic target of Fe at the remote distance of 90 m^[33]

表 1 基于不同波长光丝的 FIBS 优势以及应用场景对照

Table 1 Comparison of the advantages and application scenario of FIBS at different central wavelengths

Central wavelength of pump laser pulse	Photon energy of pump laser	Advantages	Application scenarios
UV	High	High photon energy, better resolution spectroscopy, better ablation efficiency	Cultural heritage items: different metal and stones types ^[41] Explosives: DNT and ammonium perchlorate ^[42]
IR	Low	Mature technology to reach high laser energy, higher clamped intensity, reach longer atmospheric distance	Widely investigated in many applications: atmospheric remote sensing with sample phases from gas, liquid to aerosol and solid ^[6,18-19,37]

飞秒强激光在不成丝的情况下与固体样品作用,也可以击穿辐射荧光光谱,这就是传统的激光诱导击穿光谱,即 fs-LIBS。2009 年, Judge 等^[43]对 R-FIBS 和 fs-LIBS 进行了对比研究。他们在距离样品 6 m 处分别利用 R-FIBS 和 fs-LIBS 来探测不同硬度的铅笔芯,测量结果显示 R-FIBS 相比 fs-LIBS 有更高的准确度和信噪比,产生该现象的原因是光丝内部的强度钳制效应,为激光烧蚀提供了强度更为稳定的光源。

在 R-FIBS 研究领域,加拿大拉瓦尔大学 Chin 教授的研究小组是国际上开展相关研究工作比较早的团队之一。该团队在 FIBS 远程探测方面开展

了一系列的实验研究,成功探测了乙醇^[44]、蚊香的烟尘^[45]、有机物^[46]、金属^[47]及气溶胶^[48]等物质,测量结果演示了 FIBS 技术在化学、生物、金属等物质远程探测方面的可行性^[6]。2009 年 Chin 教授团队与加拿大国防研究与发展部 T&T 实验室合作,利用移动的 TW 级飞秒激光系统进行了 R-FIBS 外场实验,在距离样品 20 m 处探测了体积分数为 2% 的甲烷气体的特征光谱,并与实验室内结果进行比较,发现室内实验得到的光谱信号比外场实验的大 3~4 倍,可以认为阳光和大气湍流是造成这一结果的原因^[49]。瞄准大气环境中水蒸气浓度监测的应用需求,该团体利用飞秒激光在云雾环境下成丝,发

现可以产生和水蒸气浓度相关 OH^[50] 和 NH 荧光^[51]。通过对光丝诱导水蒸气 OH 和 NH 荧光光谱监测分析,Chin 教授团队从原理上演示了空气湿度远程探测的可能性^[52]。光强钳制是飞秒激光成丝过程的一个重要特征,一方面,利用光强钳制现象,光丝可以提供强度稳定的激发源;另外一方面,荧光的激发过程是多光子过程,辐射荧光强度与激发

光强非线性相关,可近似为 $I_{\text{fluo}} \propto I_{\text{laser}}^n$, 因此提高光丝的钳制光强,可以显著提高荧光强度。2012 年,Chin 教授团队和中国科学院上海光学精密机械研究所团队等合作,利用时空啁啾技术来提高飞秒激光成丝的光强^[图 4(a)],把该技术应用到 R-FIBS 中^[图 4(b)],发现利用时空啁啾技术获得的 R-FIBS 荧光信号得到了数倍的增强^{(图 5)^[53]}。

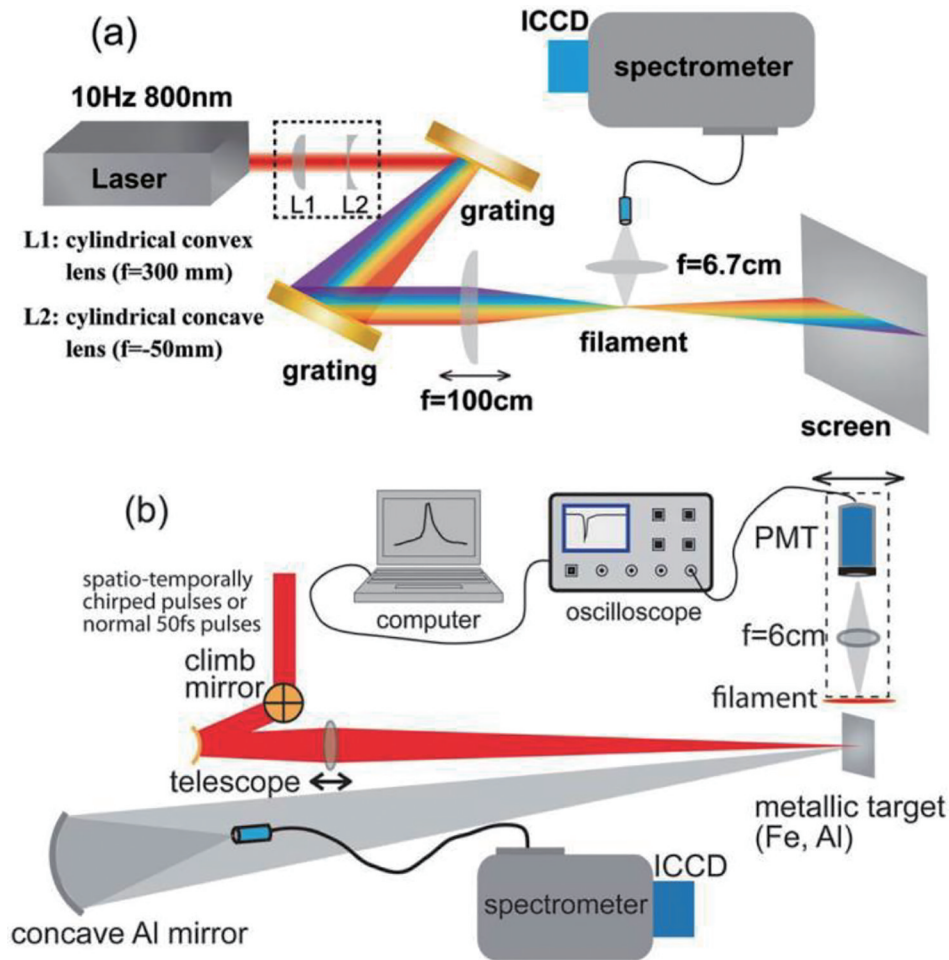


图 4 时空啁啾飞秒脉冲激光实验装置。(a)成丝原理;(b) R-FIBS 应用^[53]

Fig. 4 Experimental setups for spatio-temporally chirped femtosecond laser filamentation. (a) Principal demonstration; (b) application on R-FIBS^[53]

爆炸物和放射性物质等危险物质的检测,特别是远程检测具有重要的意义。R-FIBS 为爆炸物和放射性物质远程检测提供了新的机遇^[54]。2018 年 Shaik 等^[55]利用焦距为 10 cm 的透镜,聚焦能量为 2 mJ,脉宽约为 50 fs 的飞秒激光近场激发爆炸物和金属,利用施密特-卡塞格林望远镜系统在 8.5 m 远处探测激光诱导的荧光光谱,实验演示了 R-FIBS 技术可以遥测爆炸物和金属等的原理和规律。2019 年,Finney 等^[56]实验演示了通过单发(790 nm, 50 fs, 10 mJ)激发,可以在 10 m 探测距离条件下精

确探测到铀金属靶中铀原子谱线和铀分子谱带,当激光的重复频率为 80 Hz 时,在小于 1 s 条件下只有 1% 的误报率,并且验证了利用 UO 分子谱带也可以作为特征光谱实现铀类物质的远程探测。2020 年,该课题组 Burger 等^[57]在自由传输成丝条件下,通过改变入射激光(35 fs, 12 mJ, 80 Hz)的啁啾来优化探测到的铀的原子光谱与 UO 分子光谱,在距离铀样品 10 m 的距离处探测到了特征谱线,发现特征荧光信号在啁啾条件为 -900 fs^2 时最强,且在该啁啾条件下多丝聚集在一起,实验结果如图 6 所示。

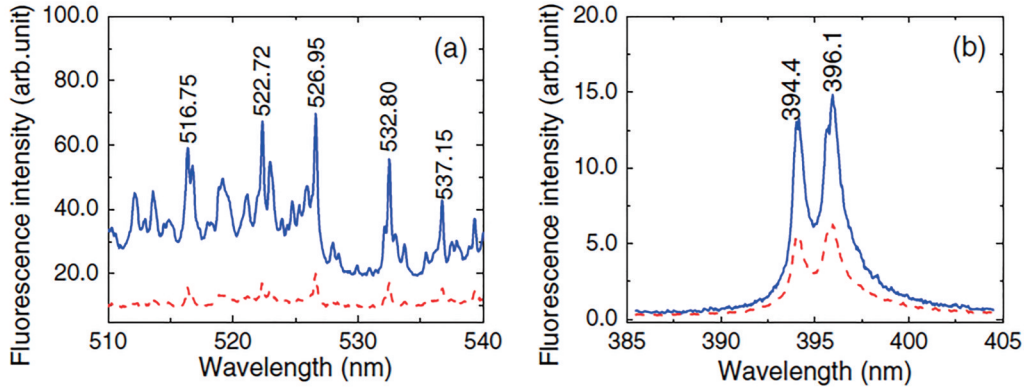


图 5 利用飞秒时空啁啾激光成丝技术在 22 m 远处诱导 (a) 铁和 (b) 铝金属荧光的遥感探测光谱 (实线), 以及相同聚焦条件下正常 50 fs 激光成丝激发的荧光光谱 (虚线)^[53]

Fig. 5 Fluorescence spectra of neutral (a) Fe and (b) Al induced by spatio-temporally chirped femtosecond laser filamentation at a distance of 22 m (solid lines), and fluorescence spectra excited by normal 50 fs laser filamentation under same focusing condition (dashed lines)^[53]

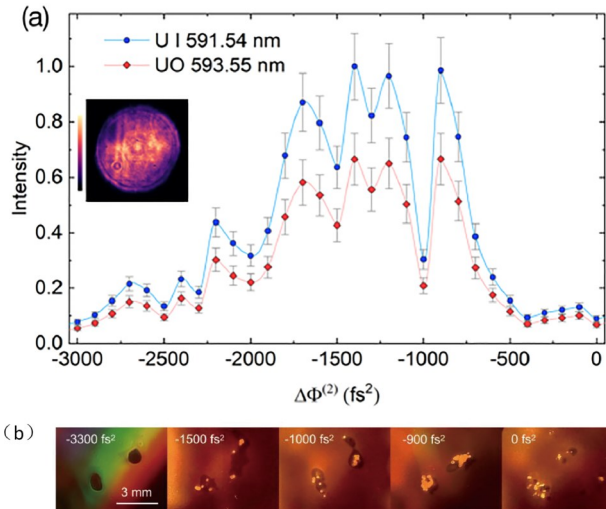


图 6 放射性元素铀的 R-FIBS 检测。(a) 放射性元素铀原子谱线 (U I 591.54 nm) 和分子谱带 (UO 593.55 nm) 的强度随入射激光脉冲二阶色散的变化 (插图为入射激光光斑); (b) 利用光束与光盘相互作用记录的不同二阶色散脉宽条件下的光束截面 (累计 40 个激光脉冲)^[57]

Fig. 6 R-FIBS measurements of radioactive uranium. (a) Intensity of atomic line (U I 591.54 nm) and molecular spectral band (UO 593.55 nm) as a function of second-order dispersion of incident laser pulse (inset is the initial laser beam profile); (b) beam cross-sections under different second-order dispersion pulse widths recorded by interaction between beam and optical disc (accumulated 40 laser pulses)^[57]

3 光丝超连续谱激光雷达

3.1 超连续谱的产生和调控

超连续谱的产生是光丝形成过程中的重要非线性现象之一, 主要来源于光丝内部基于空气三阶

非线性的自相位调制和基于激光等离子体的自相位调制等过程^[8, 22-24], 其中空气三阶非线性自相位调制作用对频率的影响可以表示为 $\Delta\omega_n = -\frac{\omega_0 n_2}{c} z \frac{\partial I(t)}{\partial t}$, 在空气中 ($n_2 > 0$), 脉冲前沿会产生新的低频成分 (光谱红移), 在脉冲后沿会产生高频成分 (光谱蓝移)。等离子体诱导的频率变化表示为 $\Delta\omega_p = -(\omega_0/c) \int_0^z (\partial n_p/\partial t)(l) dl$ ^[41-42], $n_p = (1 - N_e/N_c)^{1/2}$ 是等离子体折射率, N_c 为等离子体自由电子密度, $N_c = \omega_0^2 m n_0^2 / 4\pi e^2$ 是等离子体临界密度。在飞秒激光脉冲持续时间内, 由于电子与正离子的复合, 等离子体密度不断减小, 即在整个脉冲持续时间内, $\partial n_p/\partial t$ 始终小于零, 即 $\Delta\omega_p > 0$, 产生高频成分 (光谱蓝移)。2000 年, Kasparian 等^[58] 通过聚焦 2 TW 飞秒激光空气成丝, 产生了 0.3~4.5 μm 的超连续谱。2008 年, 加拿大 Théberge 等^[26] 借助于覆盖多谱段的多种高灵敏光谱探测手段, 通过焦距为 4 m 的透镜直接在空气中聚焦 60 mJ/42 fs、中心波长在 800 nm 激光脉冲, 得到了光谱范围覆盖 200 nm 到 14 μm 的超连续谱 (图 7), 实现了大气传输窗口的全覆盖, 并认为超连续谱中波长超过 1.4 μm 的光谱部分主要来自泵浦光与其产生的蓝移光的四波混频过程。

光丝超连续谱的产生源于飞秒强激光大气成丝过程, 原则上通过调控飞秒激光大气成丝过程, 可以实现对光丝超连续谱的调控。近期, 中国科学院上海光学精密机械研究所团队通过调节四分之一波片来改变入射激光的偏振态, 精确测量了不同

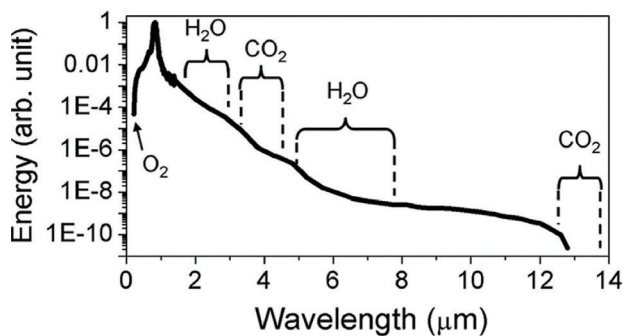


图 7 太瓦级飞秒激光空气成丝产生的 200 nm~14 μm 超连续谱^[26]

Fig. 7 Supercontinuum spectrum of 200 nm–14 μm produced by terawatt femtosecond laser filamentation in air^[26]

偏振态下空气中飞秒激光成丝产生的超连续谱的

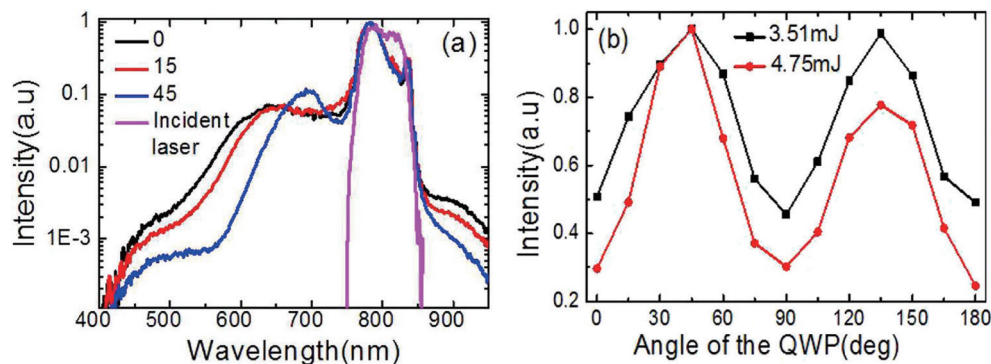


图 8 偏振依赖的光丝超连续谱。(a)不同激光偏振大气成丝产生的超连续谱(激光脉冲能量为 4.75 mJ);(b)光丝超连续谱的光谱强度随之四分之一波片角度的变化关系^[24]

Fig. 8 Polarization dependent supercontinuum generation by filamentation. (a) Supercontinuum spectra from air filamentation under different laser polarizations (laser pulse energy is 4.75 mJ); (b) laser filament induced supercontinuum spectral intensity as a function of angle of quarter wave plate^[24]

3.2 光丝超连续谱激光雷达的工作原理

光丝超连续谱激光雷达的工作原理是高峰值功率的飞秒激光脉冲发射到空气中,利用啁啾控制技术和望远镜远程聚焦系统等光丝调控技术,在高空中产生光丝及超连续谱激光,通过雷达系统收集被大气散射的超连续谱信号,进而获得高空处的大气组分及浓度、空气相对湿度等环境要素信息。以 Ti:sapphire 为激光增益介质的飞秒强激光中心波长在 800 nm 左右,其在空气中产生的超连续谱范围比较广,覆盖整个可见光到中红外部分,因此又被称为白光激光雷达^[4]。相比于传统激光雷达受窄带激光波长的限制,光丝超连续谱激光雷达利用其超宽带光谱特性可以同时探测多种物质。此外,基于长距离光丝的累加特性,光丝产生的超连续谱有很强的后向辐射增强特性,使其具有很好的距离和时

强度和展宽程度^[24]。研究发现,由于圆偏光空气成丝内部激光强度高于线偏光成丝的光强^[59],使得激光偏振态从线偏振经椭圆偏振到圆偏振的调节过程中,超连续谱辐射的强度逐渐增强[图 8(b)]。同时,由于空气中线偏振激光的三阶非线性系数及产生的等离子体密度要高于圆偏振激光,使得线偏光同时具有更强的三阶非线性自相位调制作用和等离子体诱导的相位调制作用,因此,实验上观察到了超连续谱的展宽程度随椭圆偏率的增加而逐渐减小[图 8(a)]。除了对成丝激光偏振态的调控之外,还可以通过调控光场的波前、相位、外部聚焦条件等来调控超连续谱辐射的产生及其强度等。图 9 为通过调控入射激光与聚焦成丝透镜的夹角可以调控白光激光的产生^[60]。

间分辨特性。光丝超连续谱激光雷达系统与 R-FIBS 雷达系统类似,主要由三部分构成:高峰值功率飞秒激光系统、发射/接收系统以及数据采集和处理系统。

光丝超连续谱激光雷达本质是基于差分吸收光谱原理的雷达信号分析技术。吸收光谱法就是利用激光通过待测气体时与气体分子相互作用,不同种类、不同浓度的待测气体对激光的吸收也不相同。由于存在吸收,光强度减弱,利用吸收峰附近出射光强的变化,间接地实现气体浓度的检测。差分吸收光谱技术(DOAS),是由德国 Heidelberg 大学环境物理研究所 Platt 等^[61]于 2008 年首先提出,目前该技术已经广泛应用于大气环境监测。DOAS 技术的基础为 Lambert-Beer 定律,接收到的光强 $I(\lambda)$ 和原始光强 $I_0(\lambda)$ 满足如下关系式

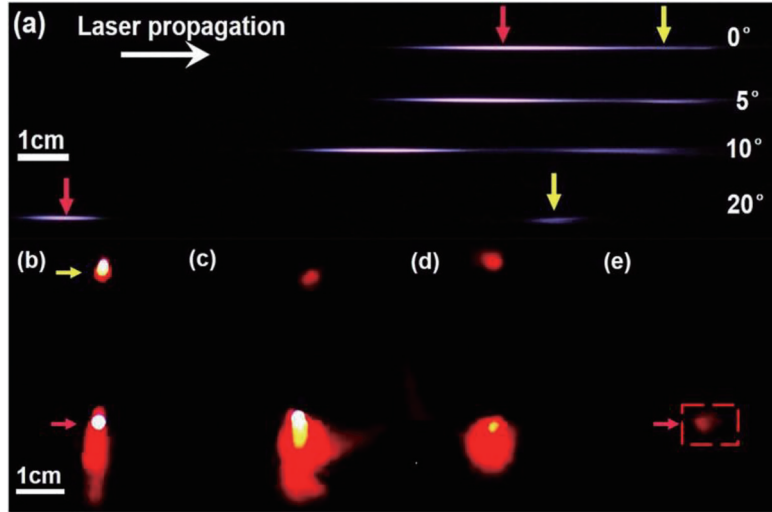


图9 不同激光入射方向与聚焦成丝透镜法线方向的夹角调控产生白光激光。(a)飞秒激光大气成丝侧向荧光;(b)~(e)对应的前向白光激光的真彩色图片^[60]

Fig. 9 White light laser generation by tuning the incident angle between different laser incident directions and normal direction of focusing filament lens. (a) Side fluorescence images of femtosecond laser filaments in air; (b)~(e) corresponding real color images of forward white light lasers^[60]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp\left[-L \sum (\delta'_i) c_i\right] \cdot \exp\left\{-L \left[\sum (\delta_{i0}) c_i + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda)\right]\right\} \cdot T(\lambda), \quad (1)$$

式中: L 为光程; c_i 和 δ'_i 分别为第 i 种气体的浓度和吸收截面; $\epsilon_R(\lambda)$ 为瑞利散射的消光系数; $\epsilon_M(\lambda)$ 为米散射的消光系数; $T(\lambda)$ 表示光学系统对波长 λ 的依赖性。(1)式中等号右侧第一个指数项表示气体分子的光学密度随波长作快速变化的部分(差分吸收

部分),第二个指数项表示大气痕量气体、瑞利散射和米散射慢变化吸收部分。DOAS技术的基本思想是将快变化部分提取出来,以消除瑞利散射和米散射等其他因素对测量结果的影响。 $I'_0(\lambda)$ 代表慢变化部分光强,可表示为

$$I'_0(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left\{-L \left[\sum (\delta_{i0}) c_i + \epsilon_R(\lambda) + \epsilon_M(\lambda)\right]\right\} \cdot T(\lambda). \quad (2)$$

进而得到气体的差分光学密度为

$$D' = \ln\left[I'_0(\lambda)/I(\lambda)\right] = L \left[\sum (\delta_{i0}) c_i\right]. \quad (3)$$

因此,可以通过实际测量得到差分光学密度,差分吸收截面可由实验室测量或查找数据得到,再通过(3)式计算得到气体的浓度。

针对光丝超连续谱激光雷达,实验中雷达信号的采集与分析主要通过时间分辨光谱测量方法^[62]得到。时间分辨光谱测量是指光谱测量系统记录和积分不同延时时间 t_d 的回波信号,其对应距离为 z_d ,积分时间间隔 t_g 决定了空间距离分辨率,则在 $(z_d, z_d + z_g)$ 范围内波长 λ 的回波信号表示为

$$\begin{cases} N(z_d, \lambda) = N_{sc}(z_{sc}, \lambda) \eta(\lambda) A_0 \cdot \int_{z_d}^{z_d+z_g} \frac{\beta(\lambda, z)}{z^2} \exp\left[-\int_{z_{sc}}^z \alpha(\lambda, z^*) dz^* - \int_0^z \alpha(\lambda, z^*) dz^*\right] dz, \\ z_d = ct_d/2, z_g = ct_g/2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: c 为光速; $N_{sc}(z_{sc}, \lambda)$ 表示与发射系统的距离为 z_{sc} 处产生的超连续谱激光回波光子数; $\eta(\lambda)$ 为光谱探测系统的传输效率; A_0 为望远镜系统的接收面积; $\beta(\lambda, z)$ 为 z 处的体后向散射系数; z_g 为延时 t_d 对应的距离; z_d 为延时 t_g 对应的距离;指数项表示的是

大气透光率,其遵守 Lambert-Beer 定律; $\alpha(\lambda, z^*)$ 为距离 z^* 处的消光系数,其中包括分子的瑞利散射和气溶胶的米散射及其空气中物质对波长为 λ 的光的吸收。该方程适用于假设光丝产生超连续谱辐射后不再发生其他的非弹性散射过程。

3.3 光纤超连续谱激光雷达的研究进展

飞秒强激光大气非线性成丝诱导超连续谱激光雷达最早由德国柏林自由大学 Wöste 等^[63]最先提出。2000 年, Rairoux 等^[62]对 TW 级超短激光光束在大气中的传输特性进行了实验和理论研究。通过改变初始光的群速度色散可以控制超连续谱激光产生的位置, 利用产生的超连续谱激光并结合雷达技术及时间分辨吸收光谱技术, 他们探测到了不同距离处氧气和水蒸气的吸收光谱, 该研究证明了成丝过程产生的超连续谱激光可以作为大气中远距离多痕量气体分析的有效手段。2003 年,

Kasparian 等^[4]报道了利用光纤产生的超连续谱激光在数千米到数十千米大气环境探测方面的应用, 其实验装置及测量结果见图 10。不同波段超连续谱散射回波测量的实验结果[图 10(b)]表明该技术可以探测到超过 5 km 高度处的 600 nm 波段的散射回波, 但是三次谐波 270 nm 波段散射回波的探测距离低于 2 km, 这是因为短波的瑞利散射更剧烈。图 10(c)中水的吸收光谱与 Hitran 数据的拟合结果相一致。该研究工作基于地基飞秒强激光系统, 首次将光纤超连续谱激光雷达技术应用到高层大气成分、温度、湿度甚至风速等大气环境要素探测方

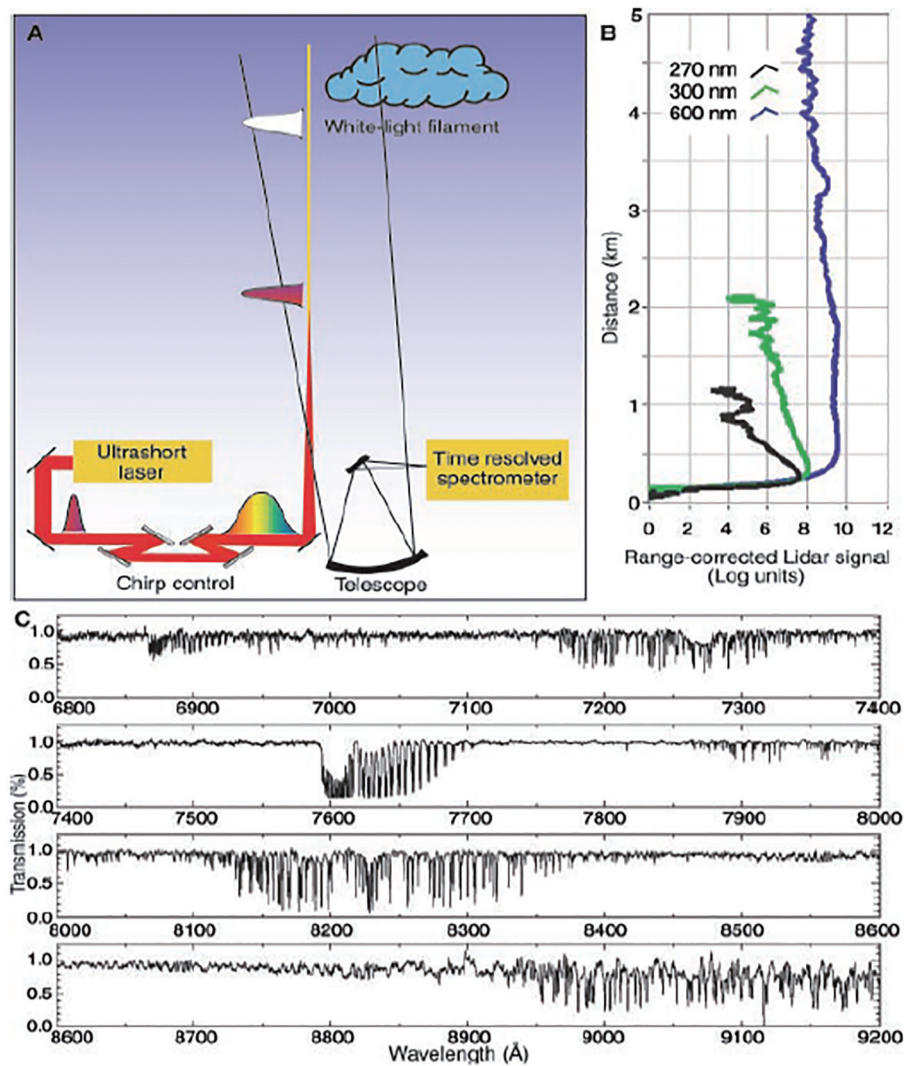


图 10 光纤超连续谱激光雷达大气环境检测应用。(a) 光纤超连续谱激光雷达实验装置示意图; (b) 270 nm、300 nm、600 nm 波长回波信号的强度随垂直距离的改变; (c) 光纤超连续谱激光雷达测得的垂直高度为 4.5 km 时的高分辨率大气吸收光谱^[4]

Fig. 10 Atmospheric sensing of filament induced supercontinuum Lidar. (a) Schematically experimental setup of femtosecond laser filament based supercontinuum Lidar; (b) range-corrected Lidar signals at 270 nm, 300 nm, and 600 nm as a function of vertical distance to the ground; (c) high resolution atmospheric absorption spectra at the vertical distance of 4.5 km to the ground recorded by filament induced supercontinuum Lidar^[4]

面。2005年,该小组利用该套系统对云雾进行了系统研究,包括云雾内部的粒径及密度、温度和相对湿度等,进一步演示了基于光丝的超连续谱激光雷达在大气环境监测方面的应用^[64]。

面向大气环境监测应用,真实大气环境下光丝超连续谱的宽度和强度在雷达探测应用中至关重要。2007年,Béjot等^[65]将脉冲能量为26 J,峰值功率为32 TW的激光脉冲垂直射入到高空,观察到光束在传输过程中形成了400余条光丝。利用望远镜系统来收集超连续谱激光的背向散射信号,并利用倍频的Nd:YAG纳秒激光作为参考光来探测超连续谱的转化率,他们测量到的信号强度随高度变化趋势的结果证明光丝产生的超连续谱激光可以传输到平流层,垂直距离可以超过20 km(图11)。当激光脉冲峰值功率为31 TW时,在高度为200~300 m的范围内产生的超连续谱激光在波长650 nm处的转换率约为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ 。在欧洲Teramobile计划的带动下,2008年,中国科学院武汉物理与数学研究所设计了一台类似的白光激光雷达系统,利用时间分辨光谱探测技术对大气中氧气成分在685~694 nm和759~769 nm范围内的吸收光谱进行了探测,实验结果与Hitran数据库一致^[66-67]。

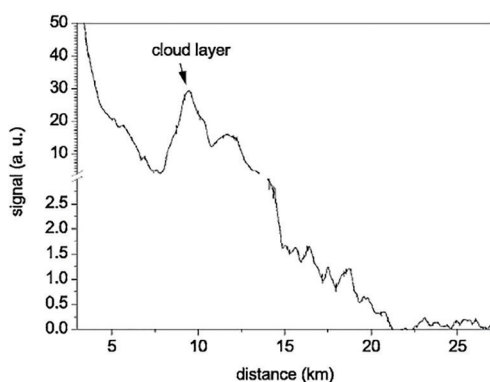


图 11 光丝超连续谱激光雷达在 300~470 nm 光谱范围内单脉冲回波信号^[65]

Fig. 11 Single pulse signal of filament induced supercontinuum Lidar in the spectral range of 300–470 nm^[65]

2010年, Teramobile小组利用该课题组的太瓦飞秒激光器,将光斑直径为10 cm,重复频率为5 Hz的飞秒激光垂直射入高空。他们通过调节啁啾和聚焦等条件,在60 m处产生的光丝强度最高。同时利用YAG激光器产生的波长为532 nm激光作为探测光,通过望远镜系统来探测光丝诱导的水凝结对532 nm光的瑞利散射信号,观察到了光丝诱导空

气水凝结过程^[68]。2011年,该小组利用3 J、30 fs的激光脉冲水平射入到空气中,光束传输距离超过42 m,并产生能量为1 J的超连续光谱辐射。他们的实验结果表明在大能量的激光脉冲产生超连续谱的过程中,能量池相比于光丝对超连续谱的展宽贡献更大,并使得光束在正啁啾条件下产生的光谱展宽更宽^[69]。2014年, Petrarca等^[70]利用峰值功率为亚PW(1 PW=10¹⁵ W)的FLAME飞秒激光系统在大气中进行白光激光雷达探测实验,在海拔低于100 m时,产生了能量为1 J的超连续光谱,转化效率达到30%。他们认为在该能量条件下,产生的光丝数已达饱和,能量池对白光激光的产生有很强的促进作用,并通过雷达方程进行模拟,得到的模拟结果与实验结果相吻合。

上述光丝超连续谱激光雷达及其大气环境监测初步研究都是以地基方式展开的,随着空间光电技术和飞秒强激光技术的飞速发展,空基飞秒强激光技术在不久的将来必将得到发展。空基光丝超连续谱激光雷达大气环境监测技术作为现有星载激光大气环境监测雷达技术的前瞻发展方向,欧洲航天局率先启动了相关新概念研究。2016年, Dicaire等^[71]提出了星载光丝超连续谱激光雷达大气环境监测概念,通过理论模拟证明了星载激光光丝大气远程探测的可行性,概念图如图12所示。他们的理论结果表明通过改变入射激光的特性,可以在海拔45 km至地面范围内产生光丝,并且在海拔7.3 km可以产生250 nm~1.1 μm的超连续光谱,相关研究成果为星载光丝超连续谱激光雷达大气环境监测提供了基础理论依据。

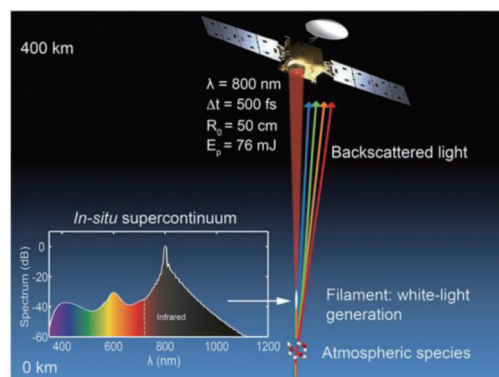


图 12 星载光丝超连续谱激光雷达大气环境监测模型示意图^[71]

Fig. 12 Schematic model of atmospheric sensing based on spaceborne filament induced supercontinuum Lidar^[71]

4 结束语

飞秒强激光大气遥感技术作为新技术,有望通过单一激光雷达技术实现多相态、多组分大气环境成分和要素的同时识别和定量测量。本文主要围绕飞秒激光大气成丝远程诱导击穿光谱技术和光丝超连续谱激光雷达技术,综述了两种技术的原理、光谱测量和分析方法及其相关研究进展。

目前基于飞秒激光的大气遥感技术尚处于新原理和新技术的探索阶段,面向大气环境监测应用,面临很多挑战,其中的一些关键科学和技术问题仍有待澄清和突破。

首先,面向大气环境监测外场应用,从飞秒激光光源的角度,提高回波信号的信噪比需要发展高峰值功率(大于太瓦)、高重复频率的飞秒激光技术,同时需要高度集成化、环境适应性强,以适当地基乃至空基应用的要求。

其次,飞秒强激光脉冲在空气中远距离传输成丝时,面临光丝强度钳制、多丝、大气湍流等问题,导致光丝强度有限、光丝及其超连续谱激光的不稳定等,其中的关键科学问题有待澄清,同时需要发展有利于环境监测应用的远程光丝调控技术。

最后,光丝超连续谱激光雷达大气遥感的可行性已经在千米乃至数十千米距离范围内得到初步验证。R-FIBS 仅在 180 m 距离实现了金属的遥感探测,尽管该技术基于雷达等效性外推原理从数值分析上可实现千米量级的光丝诱导荧光光谱的遥感探测,但仍然需要在实验上演示千米乃至更远距离多相态物质的遥感探测。面向大气环境要素的多组分物质指纹识别光谱及其分析方法有限,定性和定量的准确度需要进一步提高。

尽管飞秒强激光在大气环境遥感探测应用方面仍存在一些有待解决的问题,但是,作为新技术,飞秒强激光大气环境监测雷达技术已经在多物种、多相态成分检测方面显示出其自身的独特优势和巨大潜力。随着超强超短激光技术、飞秒激光大气成丝科学、空间科学与技术等领域的迅猛发展,飞秒强激光大气遥感新技术必将在不久的将来逐步成熟、走向应用。

参 考 文 献

[1] Tian X M, Liu D, Xu J W, et al. Review on atmospheric detection Lidar network and spaceborne Lidar technology[J]. *Journal of Atmospheric and*

Environmental Optics, 2018, 13(6): 401-416.

田晓敏, 刘东, 徐继伟, 等. 大气探测激光雷达网络和星载激光雷达技术综述[J]. *大气与环境光学学报*, 2018, 13(6): 401-416.

[2] Wang Y Z, Zheng Y C. Technology and application of space-borne atmospheric detection Lidar[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2020, 37(5): 125-134.

王玉诏, 郑永超. 星载大气探测激光雷达技术与应用[J]. *上海航天(中英文)*, 2020, 37(5): 125-134.

[3] Fattahi H, Barros H G, Gorjan M, et al. Third-generation femtosecond technology[J]. *Optica*, 2014, 1(1): 45-63.

[4] Kasparian J, Rodriguez M, Méjean G, et al. White-light filaments for atmospheric analysis[J]. *Science*, 2003, 301(5629): 61-64.

[5] Wolf J P. Short-pulse lasers for weather control[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2018, 81(2): 026001.

[6] Chin S L, Xu H L, Luo Q, et al. Filamentation "remote" sensing of chemical and biological agents/pollutants using only one femtosecond laser source[J]. *Applied Physics B*, 2009, 95(1): 1-12.

[7] Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media[J]. *Physics Reports*, 2007, 441(2/3/4): 47-189.

[8] Chin S L, Hosseini S A, Liu W, et al. The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics, applications, and new challenges[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2005, 83(9): 863-905.

[9] Bergé L, Skupin S, Nuter R, et al. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007, 70(10): 1633-1713.

[10] Chin S L. Femtosecond laser filamentation[M]. New York: Springer, 2010.

[11] Chin S L, Wang T J, Marceau C, et al. Advances in intense femtosecond laser filamentation in air[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(1): 1-53.

[12] Durand M, Houard A, Prade B, et al. Kilometer range filamentation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26836-26845.

[13] Rodriguez M, Bourayou R, Méjean G, et al. Kilometer-range nonlinear propagation of femtosecond laser pulses[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(3): 036607.

[14] Chen X W, Li X F, Liu J, et al. Generation of 5 fs,

- 0.7 mJ pulses at 1 kHz through cascade filamentation [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2402-2404.
- [15] Kiselev D, Woeste L, Wolf J P. Filament-induced laser machining (FILM) [J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(3): 515-520.
- [16] Wang T J, Wei Y X, Liu Y X, et al. Direct observation of laser guided corona discharges[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18681.
- [17] Labutin T A, Lednev V N, Ilyin A A, et al. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2016, 31(1): 90-118.
- [18] Xu H L, Cheng Y, Chin S L, et al. Femtosecond laser ionization and fragmentation of molecules for environmental sensing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(3): 275-293.
- [19] Chen N, Liu Y X, Du S Z, et al. Research progress in applications of nanosecond and femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050003.
陈娜, 刘尧香, 杜盛喆, 等. 纳秒、飞秒激光诱导击穿光谱技术的应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050003.
- [20] Bergé L, Skupin S, Méjean G, et al. Supercontinuum emission and enhanced self-guiding of infrared femtosecond filaments sustained by third-harmonic generation in air[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(1): 016602.
- [21] Dharmadhikari A K, Edward S, Dharmadhikari J A, et al. On the generation of polarization-dependent supercontinuum and third harmonic in air[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2015, 48(9): 094012.
- [22] 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.
- [23] Dharmadhikari A K, Rajgara F A, Mathur D. Plasma effects and the modulation of white light spectra in the propagation of ultrashort, high-power laser pulses in Barium fluoride[J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(4): 575-583.
- [24] Chen N, Wang T J, Zhu Z B, et al. Laser ellipticity-dependent supercontinuum generation by femtosecond laser filamentation in air[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(16): 4444-4447.
- [25] Aközbek N, Scalora M, Bowden C M, et al. White-light continuum generation and filamentation during the propagation of ultra-short laser pulses in air[J]. *Optics Communications*, 2001, 191(3/4/5/6): 353-362.
- [26] Théberge F, Châteauneuf M, Ross V, et al. Ultrabroadband conical emission generated from the ultraviolet up to the far-infrared during the optical filamentation in air[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(21): 2515-2517.
- [27] Yao J P, Cheng Y. Air lasing: novel effects in strong laser fields and new technology in remote sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500005.
姚金平, 程亚. 空气激光: 强场新效应和远程探测新技术[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500005.
- [28] Li H L, Wang S Q, Fu Y, et al. Air lasing: principle, generation, and applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500017.
李贺龙, 王思琪, 付尧, 等. 空气激光的原理、产生及应用[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500017.
- [29] Polynkin P, Cheng Y. *Air lasing*[M]. Cham: Springer, 2018.
- [30] Yuan L Q, Liu Y, Yao J P, et al. Recent advances in air lasing: a perspective from quantum coherence [J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2019, 2(11): 1900080.
- [31] Li H L, Yao D W, Wang S Q, et al. Air lasing: phenomena and mechanisms[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(11): 114204.
- [32] Kasparian J, Sauerbrey R, Chin S L. The critical laser intensity of self-guided light filaments in air[J]. *Applied Physics B*, 2000, 71(6): 877-879.
- [33] Stelmaszczyk K, Rohwetter P, Méjean G, et al. Long-distance remote laser-induced breakdown spectroscopy using filamentation in air[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(18): 3977-3979.
- [34] Weidman M, Lim K, Ramme M, et al. Stand-off filament-induced ablation of gallium arsenide[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 034101.
- [35] Gao X, Du C, Li C, et al. Detection of heavy metal Cr in soil by the femtosecond filament induced breakdown spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(9): 095203.
高勋, 杜闯, 李丞, 等. 基于飞秒激光等离子体丝诱导击穿光谱探测土壤重金属 Cr 元素含量[J]. *物理学报*, 2014, 63(9): 095203.
- [36] Guo H, Zhu Z B, Wang T J, et al. Polarization-gated filament-induced remote breakdown spectroscopy [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(3): 033201.
- [37] Teramobile project website[EB/OL]. [2021-01-06]. <http://www.teramobile.org>.
- [38] Rohwetter P, Yu J, Méjean G, et al. Remote LIBS

- with ultrashort pulses: characteristics in picosecond and femtosecond regimes[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2004, 19(4): 437-444.
- [39] Wille H, Rodriguez M, Kasparian J, et al. Teramobile: a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2002, 20(3): 183-190.
- [40] Rohwetter P, Stelmaszczyk K, Wöste L, et al. Filament-induced remote surface ablation for long range laser-induced breakdown spectroscopy operation [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2005, 60(7/8): 1025-1033.
- [41] Tzortzakis S, Anglos D, Gray D. Ultraviolet laser filaments for remote laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) analysis: applications in cultural heritage monitoring[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1139-1141.
- [42] Mirell D, Chalus O, Peterson K, et al. Remote sensing of explosives using infrared and ultraviolet filaments[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(7): B108-B111.
- [43] Judge E J, Heck G, Cerkez E B, et al. Discrimination of composite graphite samples using remote filament-induced breakdown spectroscopy[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(7): 2658-2663.
- [44] Xu H L, Kamali Y, Marceau C, et al. Simultaneous detection and identification of multigas pollutants using filament-induced nonlinear spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(10): 101106.
- [45] Daigle J F, Kamali Y, Roy G, et al. Remote filament-induced fluorescence spectroscopy from thin clouds of smoke[J]. *Applied Physics B*, 2008, 93(4): 759-762.
- [46] Xu H L, Liu W, Chin S L. Remote time-resolved filament-induced breakdown spectroscopy of biological materials[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1540-1542.
- [47] Liu W, Xu H L, Méjean G, et al. Efficient non-gated remote filament-induced breakdown spectroscopy of metallic sample[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2007, 62(1): 76-81.
- [48] Daigle J F, Méjean G, Liu W, et al. Long range trace detection in aqueous aerosol using remote filament-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(4): 749-754.
- [49] Kamali Y, Daigle J F, Théberge F, et al. Remote sensing of trace methane using mobile femtosecond laser system of T&T Lab[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(10): 2062-2065.
- [50] Wang T J, Xu H, Daigle J F, et al. Water vapor concentration measurement in air using filament-induced fluorescence spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1706-1708.
- [51] Yuan S, Wang T J, Lu P F, et al. Humidity measurement in air using filament-induced nitrogen monohydride fluorescence spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(9): 091113.
- [52] Yuan S, Wang T J, Teranishi Y, et al. Lasing action in water vapor induced by ultrashort laser filamentation[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(22): 224102.
- [53] Zeng B, Wang T J, Hosseini S, et al. Enhanced remote filament-induced breakdown spectroscopy with spatio-temporally chirped pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(12): 3226-3230.
- [54] Burger M, Finney L A, Garrett L, et al. Laser ablation spectrometry for studies of uranium plasmas, reactor monitoring, and spent fuel safety[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2021, 179: 106095.
- [55] Shaik A K, Epuru N R, Syed H, et al. Femtosecond laser induced breakdown spectroscopy based standoff detection of explosives and discrimination using principal component analysis[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8069-8083.
- [56] Finney L A, Skrodzki P J, Burger M, et al. Single-shot, multi-signature remote detection of uranium by filament-induced breakdown spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(11): 2783-2786.
- [57] Burger M, Skrodzki P J, Finney L A, et al. Remote detection of uranium using self-focusing intense femtosecond laser pulses[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1281.
- [58] Kasparian J, Sauerbrey R, Mondelain D, et al. Infrared extension of the super continuum generated by femtosecond terawatt laser pulses propagating in the atmosphere[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(18): 1397-1399.
- [59] Guo H, Dong X, Wang T J, et al. Polarization dependent clamping intensity inside a femtosecond filament in air[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(10): 103201.
- [60] Liu Y X, Wang T J, Chen N, et al. Simultaneous generation of controllable double white light lasers by focusing an intense femtosecond laser pulse in air[J].

- Chinese Optics Letters, 2020, 18(12): 121402.
- [61] Platt U, Stutz J. Differential absorption spectroscopy [M]//Physics of earth and space environments. Heidelberg: Springer, 2008: 135-174.
- [62] Rairoux P, Schillinger H, Niedermeier S, et al. Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses[J]. Applied Physics B, 2000, 71(4): 573-580.
- [63] Wöste L, Wedekind C, Wille H, et al. Femtosecond atmospheric lamp[J]. Laser Optoelektron, 1997, 29: 51.
- [64] Bourayou R, Méjean G, Kasparian J, et al. White-light filaments for multiparameter analysis of cloud microphysics[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 22(2): 369-377.
- [65] Béjot P, Bonacina L, Extermann J, et al. 32 TW atmospheric white-light laser[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(15): 151106.
- [66] Zhang L W, Lin C, Xin L, et al. New remote sensing system: white-light Lidar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1603-1607.
- 张立文, 林晨, 辛立, 等. 新型遥感探测系统: 白光激光雷达[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1603-1607.
- [67] Yue S Y, Lin C, Gao J Y. Development and application of white-light Lidar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2010, 5(1): 1-13.
- 岳帅英, 林晨, 高军毅. 白光激光雷达的发展与应用[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(1): 1-13.
- [68] Rohwetter P, Kasparian J, Stelmaszczyk K, et al. Laser-induced water condensation in air[J]. Nature Photonics, 2010, 4(7): 451-456.
- [69] Petit Y, Henin S, Nakaema W M, et al. 1-J white-light continuum from 100-TW laser pulses[J]. Physical Review A, 2011, 83: 013805.
- [70] Petrarca M, Henin S, Berti N, et al. White-light femtosecond Lidar at 100 TW power level[J]. Applied Physics B, 2014, 114(3): 319-325.
- [71] Dicaire I, Jukna V, Praz C, et al. Spaceborne laser filamentation for atmospheric remote sensing[J]. Laser & Photonics Reviews, 2016, 10(3): 481-493.