

量子电子学报

Chinese Journal of
Quantum Electronics

第37卷 第5期 Vol.37 No.5



2020-09

中国光学学会基础光学专业委员会
中国科学院合肥物质科学研究院

主办

科学出版社

出版

ISSN 1007-5461



9 771007 546204

量子电子学报 (双月刊)

CHINESE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS

(LIANGZI DIANZI XUEBAO)

第 37 卷 第 5 期 (总第 196 期)

2020 年 9 月

期刊基本参数: CN 34-1163/TN * 1984 * b * A4 * 120 * zh+en * P * ¥ 80.00 * 1000 * 9 * 2020-09

目 次

“激光大气传输与探测”专辑 (续)

野外环境下太瓦飞秒激光等离子体通道特性研究 (特邀, 封面文章)

.....滕 浩, 鲁 欣, 沈忠伟, 陈式友, 陈荣毅, 魏文寿, 魏志义 (513)

高能激光大气传输评估的不确定性研究 (特邀)朱文越, 王辉华, 陈小威, 钱仙妹 (524)

激光经过湍流大气以及散射介质的传输 (特邀)王玉双, 陈子阳, 刘永欣, 蒲继雄 (534)

基于支持向量机的激光大气传输效能评估方法 (特邀) ...冷 坤, 杨云涛, 谭 哲, 龚艳春, 武文远 (547)

大气相干激光通信研究中的几个理论问题 (特邀)黄 健, 邓 科 (556)

高层大气探测激光雷达研究进展 (特邀)杨 勇, 程学武, 杨国韬, 薛向辉, 李发泉 (566)

多普勒测风激光雷达的基本原理与技术进展 (特邀)

.....储玉飞, 刘 东, 王珍珠, 吴德成, 邓 迁, 李 路, 庄 鹏, 王英俭 (580)

非球形粒子光散射计算、测量及其应用 (特邀)王 颖, 刘 东 (601)

特殊关联部分相干光研究进展 (特邀)周正兰, 周 源, 徐华锋, 屈 军 (615)

• 信 息

《量子电子学报》征稿简则 (封三) 版权声明 (封底)

本刊为物理学类核心期刊; 已被英国《科学文摘 (SA)》、美国《化学文摘 (CA)》、日本科学技术振兴机构数据库 (JST)、俄罗斯《文摘杂志 (AJ)》、中国科学引文数据库 (CSCD) 和中国知网等收录

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2020.05.001

野外环境下太瓦飞秒激光等离子体通道 特性研究

滕浩¹, 鲁欣¹, 沈忠伟¹, 陈式友¹,
陈荣毅², 魏文寿², 魏志义^{1*}

(1 中国科学院物理研究所, 北京 100190;

2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 对太瓦 (TW) 飞秒激光在自然大气中传输时产生的超长等离子体通道的物理性质进行了研究。试验结果证实 2 TW 飞秒激光在大气中自由传输时实现了 2 km 长的等离子体通道, 长距离传输后通道内的等离子体电子密度约为 10^{11} cm^{-3} , 仍然保持良好的导电性。高压放电试验也证实了有等离子体通道存在, 可以将放电电压降低 30%, 说明激光诱导高压放电的有效性。本次试验研究表明长度为公里量级、长寿命大气等离子体通道的实现是可行的, 将为激光引雷、大气监测、人工干预气候等实用化应用扫清技术上的障碍。

关键词: 激光技术; 超短脉冲激光; 等离子体通道; 大气成丝; 激光引雷; 飞秒激光

中图分类号: O437.5

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2020)05-0513-11

Properties of long plasma-channel generated by TW femtosecond laser in natural environmental air

TENG Hao¹, LU Xin¹, SHEN Zhongwei¹, CHEN Shiyu¹,
CHEN Rongyi², WEI Wenshou², WEI Zhiyi^{1*}

(1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: The properties of long plasma-channel generated by terawatt (TW) femtosecond laser propagating in natural environmental air are investigated. It shows that the plasma filamentation with length of 2 km can be achieved when 2 TW femtosecond laser propagates in natural environment, and the electron density is measured to be 10^{11} cm^{-3} at different location of filament, which shows the good conductivity of plasma channel even at the end of channel. Moreover, high voltage discharge test also confirms that, compared with the case without plasma channel, the high voltage of discharging can be reduced by 30% when plasma channel exists, which indicates the effectiveness of fs laser induced discharging. This work paves away for generation of several kilometer and long lifetime filamentation in air, laser induced lightning, environmental monitoring, and artificial intervention of climate.

Key words: laser technology; ultrashort pulse laser; plasma channel; filamentation; laser induced lightning; femtosecond laser

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 11674386, 11434016), National Key R & D Program of China (国家重点研发计划项目, 2018YFB1107201, 2012BAC23B03)

作者简介: 滕浩 (1972 -), 四川人, 研究生, 副研究员, 主要从事超短脉冲激光及超快物理方面的研究。E-mail: hteng@iphy.ac.cn

导师简介: 魏志义 (1963 -), 甘肃人, 研究生, 研究员, 主要从事超短脉冲激光与强场物理等方面的研究。E-mail: zywei@iphy.ac.cn

收稿日期: 2020-06-08; **修改日期:** 2020-07-17

*通信作者。

1 引言

飞秒激光脉冲由于具有很高的峰值功率,当其在大气中传输时,可以产生较强的非线性 Kerr 效应,这种非线性 Kerr 效应会在大气中产生类似透镜效应,从而使飞秒激光在传播过程中发生自聚焦;另一方面,由于自聚焦使激光的强度逐渐增大,当聚焦的激光强度超过空气的电离阈值时,会使大气电离产生等离子体,而等离子体具有散焦作用。当非线性自聚焦效应和等离子体的散焦效应达到动态平衡时,激光光束就能传播很远的距离,从而在飞秒激光传播路径上形成一条具有一定导电性能的等离子体通道,这就是常说的激光大气通道 (Laser filament)^[1~6]。由于在大气等离子体通道中大量高速运动的电子导致切连科夫辐射 (Cherenkov radiation) 以及其他非线性效应如自相位调制等效应,在形成大气等离子体通道的同时,可以产生覆盖从紫外到红外波段的超连续光谱^[7,8]。飞秒激光在大气中产生的等离子体通道在激光引雷^[9~12]、引导电磁辐射^[13,14]、大气质量监测^[15,16]、人工降雨^[17,18]、激光通信^[19] 等方面具有十分重要的应用前景。

对于实际的应用,大气等离子体通道的长度必须在公里量级以上。另外,还要求其寿命足够长来维持公里量级等离子体通道的导电性^[20]。然而由于实验场地的限制,多数的实验工作局限在实验室环境下,而在开放大气中的实验观测相对较少。尽管有多个研究小组研究了太瓦 (TW, $1\text{ TW}=10^{12}\text{ W}$) 级飞秒激光水平长距离传输成丝的过程,通过观察光束照射在白色屏幕上的光斑图像获得了多光丝的分布情况,也观察到了百米级的成丝传输^[21~27],如 Mechain 等和 Hao 等分别比较了经透镜聚焦后的等离子体通道和自由传输时形成的等离子体通道,指出自由传输形成的等离子体通道直径在毫米量级,等离子体通道的电子密度低至难以有效探测^[24,25]; Durand 等也采用电学诊断方法观测到了电离的存在,但至今仍然缺乏对自由传输的长距离等离子体通道电子密度的定量实测研究^[26]。

为此,本文将一台自建的 2 TW 飞秒激光器运输到新疆乌鲁木齐气象站,在空旷的自然大气环境中,实现了长达两公里的激光等离子体通道,研究了长距离成丝的过程,并采用电学方法对数十米长度的等离子体通道电子密度进行了测量,获得了长距离等离子体通道电子密度和诱导放电等定量数据,这些结果对激光引雷和人工降雨等实际应用具有重要的指导意义。

2 实验方案与装置

2.1 适用于大气传输的 2 TW 飞秒激光装置

掺钛蓝宝石晶体是一种宽带高增益固体介质,具有优异的光学特性,如同时具有宽带吸收光谱 (400~650 nm, 吸收峰在 490 nm) 和宽带的荧光光谱 (660~1200 nm, 发射峰在 800 nm 附近)。除了上述宽调谐光谱特性之外,钛宝石晶体还具有良好的物理特性如高热导率、化学性质稳定、结构坚固硬度大、熔点高等,所以它成为上世纪 90 年代以来最为主要的超快激光增益介质^[28]。正是由于它优良的光学和物理特性,钛宝石激光系统既可以输出宽光谱,又能实现高转换效率以输出大功率、大能量的超短脉冲激光,是当前大能量飞秒激光器的首选晶体。然而,要实现飞秒激光放大、获得大能量输出以至太瓦量级的飞秒激光并非易事。超强超短脉冲的激光装置是以啁啾脉冲放大技术 (Chirped-pulse amplification, CPA)^[29] 为基础的。其基本工作原理为:首先由振荡器产生稳定的锁模脉冲序列,随后通过脉冲展宽器,在尽可能维持光谱成分不变的情况下,使种子脉冲展宽到数百皮秒以使其峰值功率大幅度降低,这样当展宽后的脉冲进入放大器放大时,可以有效地降低种子脉冲的增益饱和效应,并避免因过高峰值功率而引起的非线性效应和对材料的损伤,从而保证了能量的稳定增长及高效率放大;最后采用具有与展宽器色散相反的再压缩系统,使脉冲复原到与种子相近的宽度,进而得到峰值功率高达 TW 量级的激光脉冲。

太瓦级飞秒激光装置的总体光路图如 Fig.1 所示,由飞秒振荡器、展宽器、再生放大器、主放大器和压缩器等部分组成。其中飞秒振荡器提供飞秒种子源,它输出重复频率为 80 MHz 的飞秒激光脉冲提

供给后续的放大器;展宽器是将从振荡器输出的飞秒脉冲在时域上展宽到 200 ps, 将脉冲展宽后再进入放大器中放大才能消除放大过程中的非线性效应以及可能对光学元件造成的损伤, 从而获得更多的能量放大;再生放大器是预放大器, 将种子脉冲能量从 nJ 放大到 mJ 量级, 放大倍数达到 10^6 ;主放大器将进一步放大, 这个阶段属于线性放大, 在现有抽运激光抽运下, 可以获得放大后的能量为 110 mJ, 压缩后的能量约 80 mJ, 脉冲宽度小于 50 fs, 对应峰值功率接近 2 TW, 重复频率为 10 Hz。

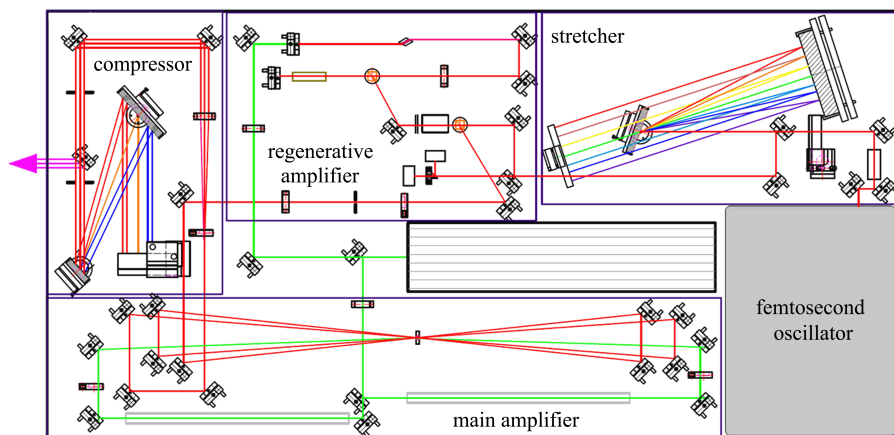


Fig. 1 Schematic of home-made 2 TW Ti: sapphire laser system

试验在中国新疆维吾尔自治区乌鲁木齐沙漠研究所的一个气象观测站进行, 当地海拔高度约 2000 m。为了适应新疆地区干燥、气压低的环境, 以及长距离运输和安装的便捷, 将整个系统分割为五个部分: 振荡器、展宽器、再生放大器、主放大器、压缩器, 每个部分设计为独立的结构, 由单独的底板和四周侧板以及盖板组成独立个体。搬运时将其分别打包装箱, 运输到目的地后, 将各部分按照光路组合在一起, 安装在一个 2.4 m 长、1 m 宽的光学平台上。为了保证稳定运行, 设计了一个简易洁净棚, 将整套激光器放置在洁净棚里, 如 Fig.2 所示。

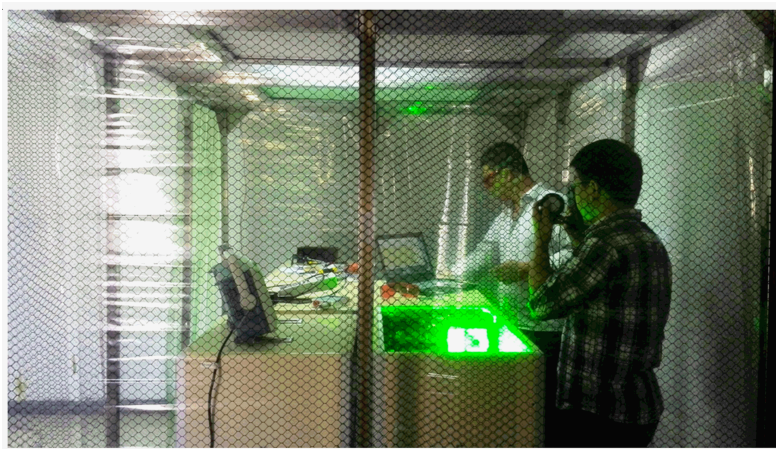


Fig. 2 Photograph of the whole TW laser system in a simple clean shed

经过优化后, 用商品化脉冲宽度测试仪 Wizzler-800 对压缩后的脉冲宽度进行了测量, 其最短的脉冲宽度为 46.6 fs, 如 Fig. 3(a) 所示。为了适应飞秒脉冲在大气中传输时色散预补偿的需求, 压缩器中的光栅安装在可远程控制的电动平移台上, 可以根据需要调整光栅对之间的距离。放大后脉冲的能量稳定性经过 4 h 测量为 1.77% (rms), 见 Fig. 3(b)。在没有任何温控情况下, 该激光器的稳定运行为野外环境下的应用提供了可靠的基础。将调试好的激光按照 Fig. 4 中箭头所指的方向传输到室外进行野外试验。

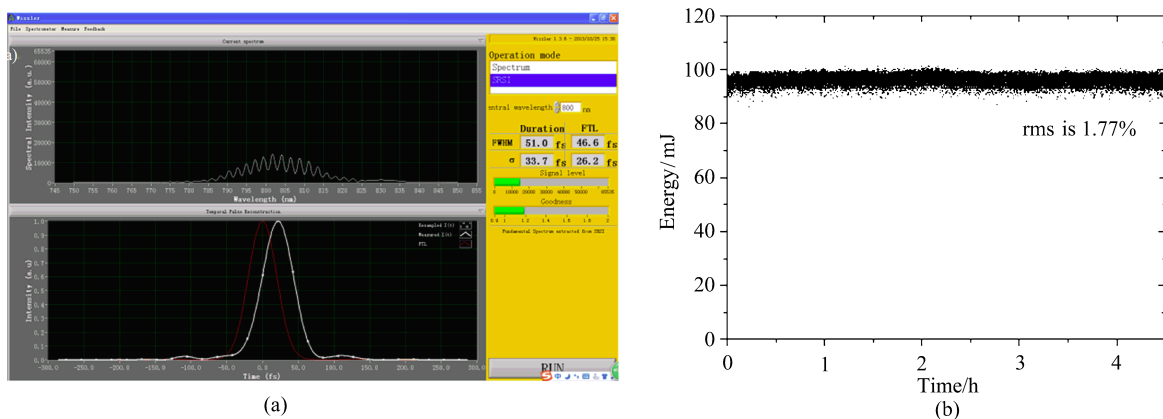


Fig. 3 Measurement of (a) pulse duration and (b) energy stability

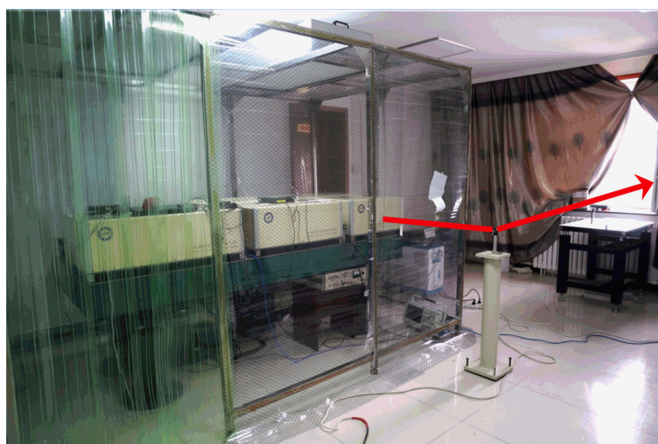


Fig. 4 Photograph of output TW laser. The red line arrow denotes propagation of laser to the window for the outdoor natural environmental experiment

2.2 野外长距离等离子体通道试验

将从窗口输出的飞秒激光直接入射到野外天空中, 不需要任何聚焦, 当传输 6 ~ 7 m 时, 飞秒激光就开始自聚焦成丝, 进一步发展成结构稳定且长距离的等离子体通道, 在天空中观察到如 Fig. 5(a) 所示的长距离等离子体通道。当激光水平传输时, 能够明显观察到超连续辐射的产生, 见图 Fig. 5(b)。Fig. 5(c) 为激光传输 50 m 远后照射在白纸上的光斑, 可以看到光斑中心是很亮的白光, 一圈圈的彩环是传输过程中产生的锥角辐射 [2,7,20,30]。尝试将光束射向远处的山坡, 利用激光测距仪测量了光束的传输距离, 大约为 2 km, 通过对电离通道内电子密度和激光诱导高压放电试验的测量也证实了上述距离。

3 实验结果与讨论

3.1 长距离等离子体通道的控制

通过调谐飞秒激光压缩器中光栅对之间的距离, 预先给飞秒激光一定量的负色散用于补偿激光传输的大气色散, 从而可以控制飞秒激光成丝的起始位置, 进而控制等离子体通道传播距离和长度。

当飞秒激光色散补偿在激光出口处时, 也就是飞秒激光传输到发射出口时就开始产生强烈的白光。在此种情况下, 产生的等离子体通道传输距离不会太远, 由于在出口处就产生严重的自聚焦, 随着距离增加光束发散越大, 光斑并不是准直地向前传输, 见 Fig. 6(a); 其光斑有明显的撕裂, 远处光斑分布没有规律, 如 Fig. 6(b) 所示。

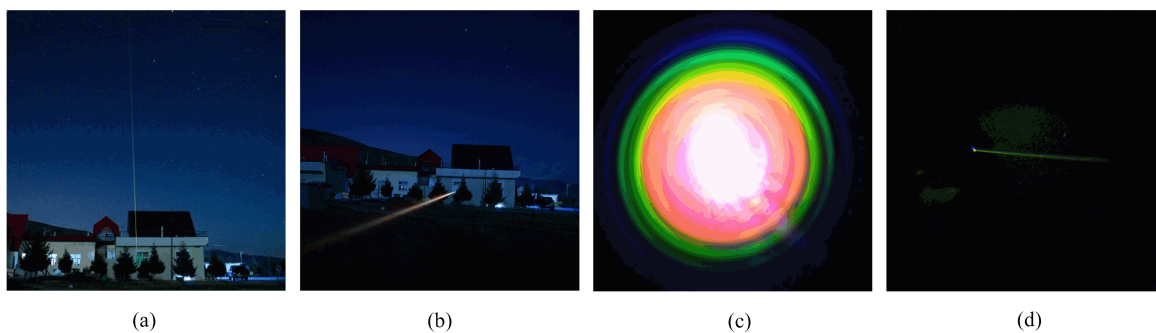


Fig. 5 (a) Photograph of laser filament to the sky; (b) Laser filament in horizontal transmission direction; (c) Continuum generation and cone radiation; (d) Beam point on the mountain at 2 km away

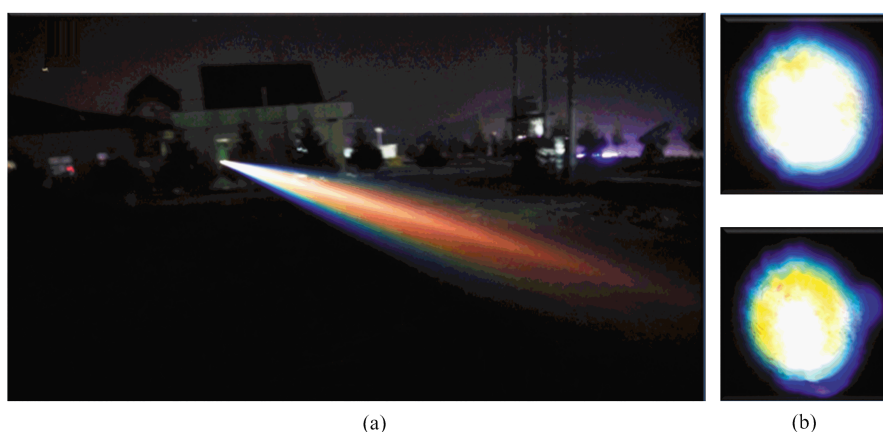


Fig. 6 Photography of laser filament when the dispersion is well-compensated at the exit of laser, where the length of filament is shorter (a), and transverse spot is also irregular distribution (b)

当飞秒激光色散的补偿控制在远处时, 比如距离激光出口约 20 m, 从此处开始形成等离子体丝, 可以观察到此时产生的等离子体通道保持准直, 且传播距离长, 见 Fig. 7(a); 在远距离处从中心到周围有规律地分布着从红到蓝的光环, 中心白色圆斑就是等离子体丝斑, 见 Fig. 7(b)。

上述试验表明, 可以通过改变压缩器中光栅对之间的距离给飞秒激光脉冲一定量的预色散来补偿飞秒激光在传输距离上的大气色散, 从而控制等离子体成丝的起始位置以及等离子体通道的准直性, 实现长距离等离子体通道的产生。通过改变激光的发射角以及色散量, 证实产生的等离子体通道可以传输到 2 km 以上。

3.2 长距离等离子体通道电子密度的测量

在上述产生的准直长距离等离子体通道基础上, 用光敏相纸记录了在不同传输距离上光斑强度分布, 并且用电学方法诊断了等离子体通道物理特性。

Fig. 8 是在不同传输距离上光束在光敏相纸上烧灼出的光斑图像, z 为传输距离。从图中可以看到激光在传输了 23 m 远后分裂成了 2 到 3 根的等离子体通道, 等离子体通道核心部位的能量使相纸上的光斑发生了饱和, 从少部分未饱和的图象上分析, 等离子体通道的直径大约为 1 mm。由于场地的限制, 观测距离最远只能到 53 m, 在 53 m 处的成丝光斑图像表明等离子体通道仍然具备继续延伸相当长距离, 但随着传输距离的增加, 等离子体通道的弥散范围也越来越大。

Fig. 9(a) 和 Fig. 9(b) 分别展示了在成丝起点位置 (23 m) 和最远测量距离 (53 m) 上让激光连续辐照相纸 10 s (累积 100 发) 后得到的图像。在成丝起点位置, 所有的等离子体通道分布在 6 mm 的范围内, 在

53 m 的传输距离后, 等离子体通道弥散区域扩大到 10 mm。已有的理论工作表明等离子体通道位置漂移的主要原因是大气湍流的影响^[31~33]。

进一步用电学方法诊断了不同位置处等离子体通道中的电子密度。电学诊断方法的原理如图 10 所示: 在两个间距为 13 mm 的铜板电极上, 其中一个电极上有直径 2 mm 的小孔, 等离子体通道可以穿过该小孔到达另一个电极。如果等离子体通道内部存在电离, 当给两个铜板电极施加 2000 V 直流电压时, 在回路中就会产生电流, 利用示波器测量 50 Ω 分压电阻上的电压时间信号可获得回路中的电流和总电阻, 进而求出等离子体通道的电子密度^[34~38]。该测试装置可以移动到不同位置处, 所以可以测量在不同距离上等离子体通道中的电子密度。

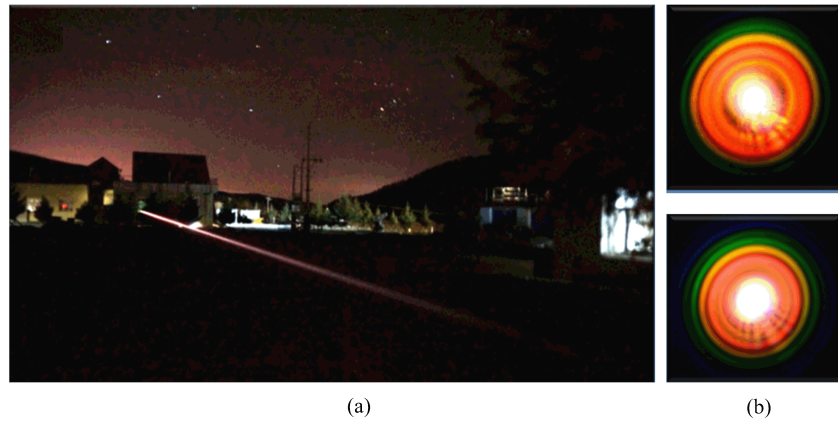


Fig. 7 Photography of collimated long distance laser filament, when pre-chirp is applied in the laser pulse through the compressor, the long distance and collimated filament is generated (a), and transverse spot is regular conical distribution (b)

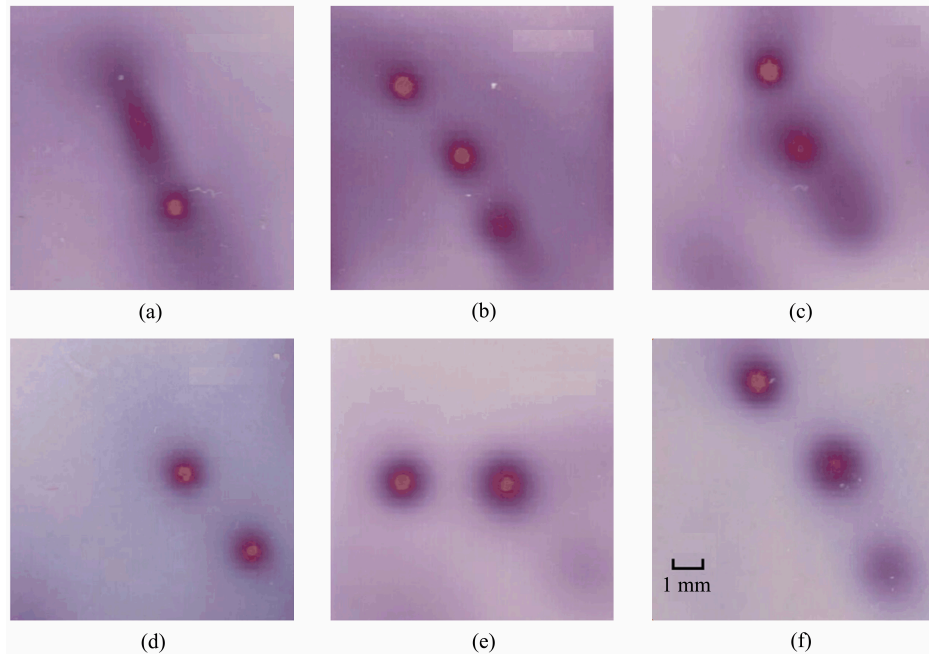


Fig. 8 Filament structure of laser beam at different position (a) $z=23$ m; (b) $z=29$ m; (c) $z=35$ m; (d) $z=41$ m; (e) $z=47$ m; (f) $z=53$ m along the propagation of laser filament

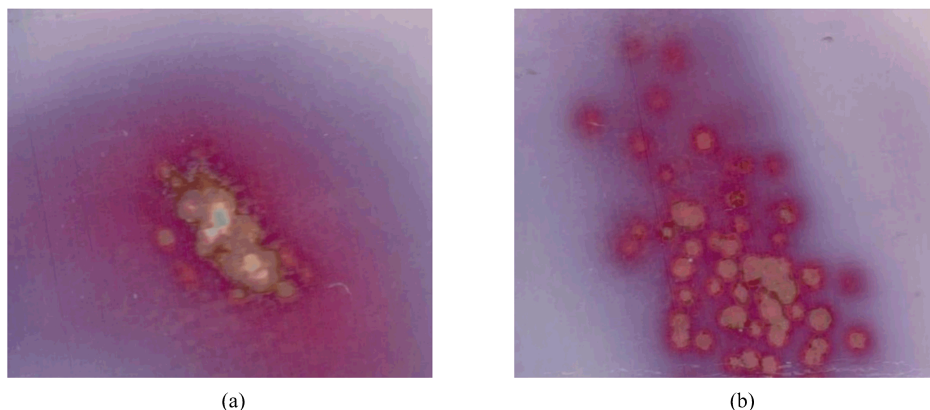


Fig. 9 Marks on photo-paper burned by laser pulse irradiation for 10 s (100 shots) at (a) 23 m and (b) 53 m distance

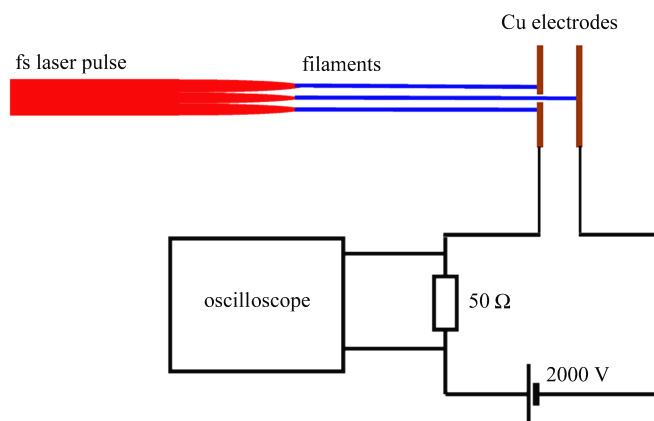


Fig. 10 Schematic diagram of electron density measurement

由于等离子体通道在不停地漂移, 因此在探测等离子体通道电学信号时, 只有当某一等离子体通道穿过电极板上的小孔时, 电路中才会有电流信号。Fig. 11 是在不同距离位置上获得的等离子体通道电学信号, 该信号是标准的振荡衰减型号, 持续时间约为 60 ns, 其峰值随传输距离在 35~90 mV 之间。

Fig. 12 为等离子体通道电信号峰值在不同传输距离的测量结果。该电压信号除以 50 Ω 的分压电阻即可得到回路中的电流。电源的电压除以电流可以得到电路的总电阻, 从中扣除分压电阻、等离子体通道和电路的接触电阻以及电源的内阻即可得到等离子体通道的电阻, 再结合等离子体通道的直径就可以计算出其电阻率。对于这类毫米量级直径的等离子体通道, 其电阻远大于分压电阻、接触电阻以及电源的内阻, 因此可以认为等离子体通道的电阻约等于电路的总电阻。等离子体通道内部粒子之间的碰撞主要为电子和中性粒子的碰撞, 考虑无磁、稳态情况下, 根据流体运动方程可得电流密度

$$J = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_0} E, \quad (1)$$

式中 ν_0 为电子和中性原子的碰撞频率, 电导率为

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m_e \nu_0} = \frac{l}{R \pi r^2}, \quad (2)$$

式中 l 是等离子体通道的长度, 等于电极的间距 13 mm, R 为等离子体通道的电阻, r 为等离子体通道的半径, 约 0.5 mm。在 1 个大气压环境下, 碰撞频率 ν_0 约为 10^{12} s^{-1} 。由此得出的等离子体通道电子密度在 $2.1 \sim 5.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 之间变化, 见 Fig. 12 右侧纵坐标。这个数值和已有理论工作中计算的数值吻合得较

好^[23]。测量获得的等离子体通道电子密度低于利用透镜聚焦产生的等离子体通道密度, 其主要原因可以从测量的等离子体通道电学信号的时间特性中反映出来, 该信号在 10 ns 就衰减了, 经过分析衰减的主要机制是电子和中性分子的吸附, 而不是复合, 所以要有飞秒激光序列不停地加热才能维持更长的寿命^[39]。

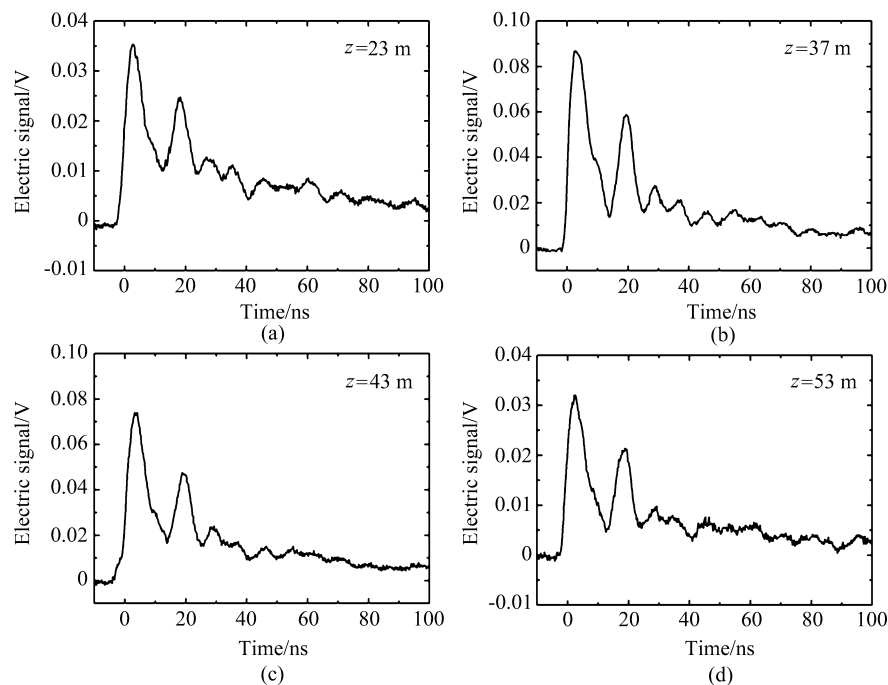


Fig. 11 Electric signals of filament at different propagation distances.

(a) $z=23$ m; (b) $z=37$ m; (c) $z=43$ m; (d) $z=53$ m

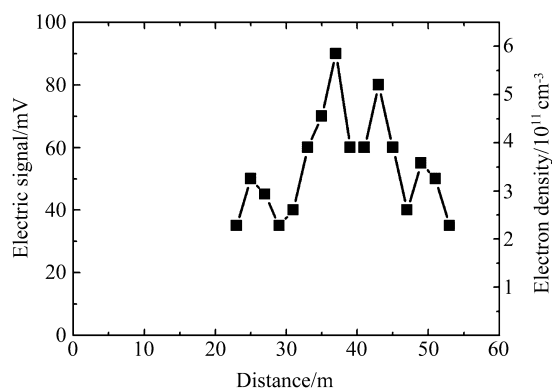


Fig. 12 Peak electric signal and electron density of filament versus propagation distance

3.3 激光诱导高压放电试验

为了进一步验证等离子体通道的导电性, 在上述等离子体通道电子密度测量的相同位置处, 布置了高压放电装置, 其原理见参考文献 [40]。Fig.13 为高压放电装置和测试照片。通过比较空气高压击穿和有等离子体通道时的诱导高压放电, 证实了有等离子体通道可以将放电电压降低 30%, 说明等离子体通道的导电性对诱导高压放电时的导电作用。



Fig. 13 Photography of high voltage discharge in plasma channel

4 结 论

研究了 2 TW 飞秒钛宝石激光在野外环境下产生长距离等离子体通道的特性。通过优化飞秒激光压缩光栅之间的距离, 预色散补偿飞秒激光在大气中的正色散, 不用透镜聚焦, 直接发射到野外大气中, 可以实现长达 2 km 以上的稳定等离子体通道。在产生的等离子体通道的不同距离上, 采用电学测量方法测量了通道内的电子密度, 约为 10^{11} cm^{-3} , 说明虽然经过长距离传输, 等离子体通道仍保持良好的导电性。同一位置的高压放电试验证实了有等离子体通道可以将放电电压降低 30%, 说明激光诱导高压放电的有效性。这些结果都证实了长距离等离子体通道的产生。本次试验研究表明长度为公里量级、长寿命大气等离子体通道的产生已经没有原则性的限制, 这对激光引雷、大气监测等实用化应用扫清了技术障碍。

参考文献:

- [1] Hao Zuoqiang, Zhang Jie. Propagation of intense femtosecond laser pulses in air [J]. *Physics (物理)*, 2004, 33(10): 741-747 (in Chinese).
- [2] 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.
- [3] Chin S L, Hosseini S A, Liu W, *et al.* The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: Physics, application, and new challenges [J]. *Canadian Journal of Physics*, 2005, 83(9): 863-905.
- [4] Berge 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.
- [5] Couairon A, Mysyrowicz A. Femtosecond filamentation in transparent media [J]. *Physics Reports*, 2007, 441(2): 47-189.
- [6] B  jot P, Kasparian J, Henin S, *et al.* Higher-order Kerr terms allow ionization-free filamentation in gases [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 103903.
- [7] Nibbering E T J, Curley P F, Grillon G, *et al.* Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(1): 62-64.
- [8] Alfano R R. *The Supercontinuum Laser Source* [M]. New York: Springer, 2016: 281-298.

- [9] Ball L M. The laser lightning rod system: Thunderstorm domestication [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(10): 2292-2296.
- [10] Zhao X M, Diels J C, Wang C Y, *et al.* Femtosecond ultraviolet-laser pulse induced lightning discharges in gases [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(3): 599-612.
- [11] Rodriguez M, Sauerbrey R, Wille H, *et al.* Triggering and guiding megavolt discharges by use of laser-induced ionized filaments [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 772-774.
- [12] Kasparian J, Ackermann R, André Y B, *et al.* Electric events synchronized with laser filaments in thunderclouds [J]. *Optics Express*, 2008, 16(8): 5757-5763.
- [13] Chateaneuf 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.
- [14] Bogatov N A, Kuznetsov A I, Smirnov A I, *et al.* Channeling of microwave radiation in a double line containing a plasma channel produced by intense femtosecond laser pulses in air [J]. *Quantum Electronics*, 2009, 39(10): 985-988.
- [15] 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(11): 759-762.
- [16] Mèjean G, Kasparian J, Yu J, *et al.* Remote detection and identification of biological aerosols using a femtosecond terawatt lidar system [J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(5): 535-537.
- [17] Rohwetter P, Kasparian J, Stelmaszczyk K, *et al.* Laser-induced water condensation in air [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(7): 451-456.
- [18] Ju J J, Liu J S, Wang C, *et al.* Laser-filamentation-induced condensation and snow formation in a cloud chamber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1214-1216.
- [19] Rosenthal E W, Jhajj N, Wahlstand J K, *et al.* Collection of remote optical signals by air waveguides [J]. *Optica*, 2014, 1(1): 5-9.
- [20] Kasparian J, Rodriguez M, Mèjean G, *et al.* White-light filaments for atmospheric analysis [J]. *Science*, 2003, 301(5629): 61-64.
- [21] Bergé L, Skupin S, Lederer F, *et al.* Multiple filamentation of terawatt laser pulses in air [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(22): 225002.
- [22] Rodriguez M, Bourayou R, Mejean G, *et al.* Kilometer-range nonlinear propagation of femtosecond laser pulses [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(3 Pt 2): 036607.
- [23] Mechain G, Couairon A, André Y B, *et al.* Long-range self-channeling of infrared laser pulses in air: A new propagation regime without ionization [J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(3): 379-382.
- [24] Mechain G, D'Amico C, André Y B, *et al.* Range of plasma filaments created in air by a multi-terawatt femtosecond laser [J]. *Optics Communications*, 2005, 247(1): 171-180.
- [25] 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 Pt 2): 066402.
- [26] Durand M, Houard A, Prade B, *et al.* Kilometer range filamentation [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26836-26845.
- [27] Apeksimov D V, Geints Y E, Zemlyanov A A, *et al.* Control of the domain of multiple filamentation of terawatt laser pulses along a hundred-meter air path [J]. *Quantum Electronics*, 2015, 45(5): 408-414.
- [28] Moulton P F. Spectroscopic and laser characteristics of Ti: Al₂O₃ [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1986, 3(1): 125-133.
- [29] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Optics Communications*, 1985, 55(3): 219-221.
- [30] Kosareva O G, Kandidov V P, Brodeur A, *et al.* Conical emission from laser-plasma interactions in the filamentation of powerful ultrashort laser pulses in air [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(17): 1332-1334.
- [31] Kandidov V P, Kosareva O G, Tamarov M P, *et al.* Nucleation and random movement of filaments in the propagation of high-power laser radiation in a turbulent atmosphere [J]. *Quantum Electronics*, 1999, 29(10): 911-915.

- [32] Chin S L, Talebpour A, Yang J, *et al.* Filamentation of femtosecond laser pulses in turbulent air [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2002, 74(1): 67-76.
- [33] Ma Y Y, Lu X, Xi T T, *et al.* Widening of long-range femtosecond laser filaments in turbulent air [J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8332-8341.
- [34] Tzortzakis S, Prade B, Franco M, *et al.* Time-evolution of the plasma channel at the trail of a self-guided IR femtosecond laser pulse in air [J]. *Optics Communications*, 2000, 181(1): 123-127.
- [35] Hao Z Q, Zhang J, Li Y T, *et al.* Prolongation of the fluorescence lifetime of plasma channels in air induced by femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(4): 627-630.
- [36] Liu X L, Lu X, Ma J L, *et al.* Long lifetime air plasma channel generated by femtosecond laser pulse sequence [J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 5968-5973.
- [37] Tzortzakis S, Franco M A, Andre Y B, *et al.* Formation of a conducting channel in air by self-guided femtosecond laser pulses [J]. *Physical Review E*, 1999, 60(4 Pt A): R3505-R3507.
- [38] Schillinger H, Sauerbrey R. Electrical conductivity of long plasma channels in air generated by self-guided femtosecond laser pulses [J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(4): 753-756.
- [39] Lu X, Chen S Y, Ma J L, *et al.* Quasi-steady-state air plasma channel produced by a femtosecond laser pulse sequence [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15515.
- [40] Clerici M, Hu Y, Lassonde P, *et al.* Laser-assisted guiding of electric discharges around objects [J]. *Science Advances*, 2015, 1(5): e1400111.