

文章编号: 0258-7025(2008)03-0388-03

# 纳秒激光大气等离子体通道的实验研究

宋述燕 林兆祥 孙奉娄

(中南民族大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 为研究激光击穿大气等离子体通道的长度、寿命及导电特性,应用光束整形的方法将 Nd:YAG 脉冲激光 2.1 J 的能量均匀分布到长度约为 1 m 的直线上,均匀击穿大气,形成等离子体通道。从空间和时间的角度,分别研究了该等离子体通道的长度、寿命,并使用电学探测手段研究通道的连续导电性。实验结果表明,纳秒激光大气等离子体通道连续导电的空间长度可达 80 cm 左右,存活寿命在 500 ns 以上,通道的电阻主要由耦合电阻构成。这些实验结果是飞秒激光大气等离子体通道研究的有益补充,并为大气等离子体通道的应用技术开发提供了实验依据。

**关键词** 超快光学;等离子体;导电特性;激光击穿大气;通道长度;通道寿命

**中图分类号** O 53;TN 012 **文献标识码** A

## Experimental Study on the Plasma Channel Produced by Nanosecond Laser in Air

Song Shuyan Lin Zhaoxiang Sun Fenglou

(College of Electrics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** The length and lifetime of the plasma channel induced by nanosecond laser in air is investigated. The energy of Nd:YAG laser (pulse energy about 2.1 J) was averaged to a straight line through beam shaping and a 1 m long plasma channel was formed by laser breakdown. The lifetime of this channel was detected with intensified charge coupled device (ICCD) and the electric continuity was studied by electrical detecting method. The experimental results indicate that the continual electric conduction spatial length of nanosecond laser-induced air plasma channel can reach near 80 cm, with the survival life above 500 ns. The channel total resistance is mainly constituted of the coupling resistance. These results are helpful for researching the femtosecond laser induced plasma channel, and also provide experimental evidences for prolonging the decay time and length of laser-induced air plasma channel in technical applications.

**Key words** ultrafast optics; plasma; electrical conductivity; laser-induced breakdown air; channel length; channel lifetime

## 1 引言

近年来,高强度激光在空气中的传输问题引起了许多科研人员的兴趣,大气激光等离子体涉及到许多物理过程和实际应用,有关的研究成果也时有报道<sup>[1~4]</sup>。中国科学院物理研究所光物理开放实验室的张喆等对飞秒激光器作用下的大气等离子体通道做过系统研究<sup>[5~7]</sup>,最近中国科学院武汉数学与物理研究所的林晨等<sup>[8]</sup>、中国科学院上海光学精密机械研究所的朱佳斌等<sup>[9]</sup>也报道了类似的飞秒激光等离子体通道的工作,但对于纳秒脉冲强激光形成的较长等离子体通道的存活时间和导电特性的研究却开展得不多。本文介绍了利用光束整形的方法产

生的一段长 80 cm 的纳秒激光大气等离子体通道,并应用多种探测手段,对该等离子体通道进行了电阻值、通道长度和寿命的测量。

## 2 实验原理及装置

对纳秒脉冲强激光在大气中传输时聚焦形成的等离子体通道进行了电阻值、长度和寿命的测量。实验中使用的是 Spectra-Physics 公司的 PRO-290 Nd:YAG 激光器,单脉冲能量 2.1 J,脉宽 10 ns,重复频率 10 Hz,出射激光直径约 10 mm,实验中只用了部分激光能量,使用我们特制的透镜。实验装置如图 1 所示:将两根钨材料做的探针放在光路中,调

收稿日期:2007-08-30;收到修改稿日期:2007-11-06

基金项目:全军重大通信装备预研项目(BZY06001)和国家自然科学基金(50646037)资助课题。

作者简介:宋述燕(1976—),女,湖北人,讲师,主要从事激光技术应用方面的研究。E-mail:lin\_zhaox@scuec.edu.cn

整光路使得等离子体通道刚好接触到探针的尖端, 这样等离子体通道自身的电阻  $R_p$  及该通道与探针间的耦合电阻  $R_c$  共同构成了两探针间的导电通道总电阻  $R_T$ 。在两探针所在的回路中加直流电压  $U$ , 并串联  $100\text{ k}\Omega$  的限流电阻和  $10\text{ k}\Omega$  的取样电阻。示波器从取样电阻上获得电压信号  $U_1$ 。根据  $U_1$  值, 可计算出回路中的电流, 继而计算出两探针间的导电通道的总电阻  $R_T$ , 即有  $R_T = R_p + R_c = (U/U_1) 10\text{ k}\Omega - 10\text{ k}\Omega - 100\text{ k}\Omega$ 。

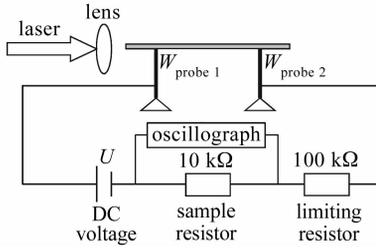


图 1 实验装置示意图  
Fig. 1 Experimental setup

### 3 实验结果及分析

利用光学设计方法, 使激光束的能量平均分布到空间的直线上(而不是一点上), 为此加工了一批特制的透镜, 激光束经过这些透镜的聚焦作用后, 可以形成长度从  $1\sim 100\text{ cm}$  的稳定而且连续的通道, 如图 2 所示的照片显示的是实验获得的长度约  $80\text{ cm}$  的等离子体通道(其背景是长度为  $100\text{ cm}$  的直尺)。从图中可看出, 该通道的能量仍然分布不均匀, 为此, 我们将继续开展光学设计研究, 尽可能地将激光束的能量铺散得更加均匀, 从而得到更长的等离子体通道。



图 2 大气等离子体通道的照片  
Fig. 2 Image of air plasma channel

电子和离子复合时所发射的光的寿命, 反应了等离子体存活的时间。用 ICCD(iStar DH734-18u-03, Andor) 采集激光脉冲发生后等离子体通道的光信号, 发现在激光脉冲后  $500\text{ ns}$  仍然有明显的信号, 如图 3 所示。如果采用加大 ICCD 的增益、增加曝光时间和门宽等措施, 可发现在  $500\text{ ns}$  以后, 该等离

子体通道仍旧能够延续较可观的时间, 这表明: 仅从光信号可采集的角度看, 如果忽略 ICCD 系统自身的时间响应(约  $40\text{ ns}$ ), 该等离子体通道的寿命应在  $500\text{ ns}$  以上。实验还发现, 激光脉冲能量或强度的提高, 将会在一定程度上延长等离子体的寿命。此结果与此前报道的激光击穿大气等离子体复合机制和光谱特性的研究结果基本吻合<sup>[10, 11]</sup>。

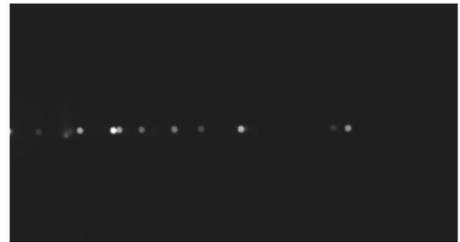


图 3 ICCD 在激光脉冲  $500\text{ ns}$  以后采集到的等离子体图像信号  
Fig. 3 Plasma image gathered by ICCD after laser pulse  $500\text{ ns}$

利用图 1 所示的实验装置, 对等离子体通道的导电特性进行了测量。若以通道起点为坐标轴的原点, 以激光束传播的方向为坐标轴的正方向, 在保持两探针间距  $3\text{ cm}$  和电路连接不变的情况下, 从原点开始, 将两探针沿正方向平行移动, 步长  $1\text{ cm}$ , 连续移动  $80$  余次, 测得  $3\text{ cm}$  长度的等离子体通道总电阻  $R_{T(3\text{ cm})}$  随通道传输距离的变化关系如图 4。可以看出, 通道至少在  $80\text{ cm}$  范围内连续导电, 通道中每  $3\text{ cm}$  的测量电阻的大小波动较大, 在起点后  $2\sim 6\text{ cm}$  内  $R_{T(3\text{ cm})}$  有最小值, 且比较恒定, 说明此部分通道内自由电子密度较大, 该处导电性能最好; 在  $10\sim 64\text{ cm}$  的区间内  $R_{T(3\text{ cm})}$  相对变化不剧烈, 浮动在平均值  $494\text{ k}\Omega/3\text{ cm}$  附近, 这是一段导电性相对稳定的区域; 在焦点后  $65\text{ cm}$  以外,  $R_{T(3\text{ cm})}$  出现大幅跃升, 导电性能快速下降。

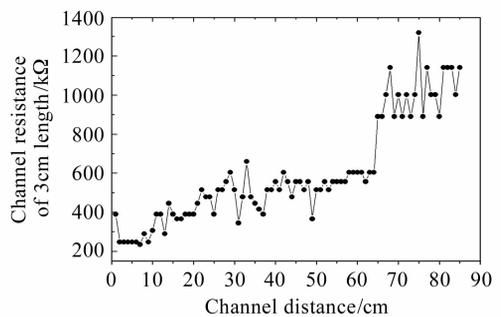


图 4  $3\text{ cm}$  长度的等离子体通道总电阻  $R_{T(3\text{ cm})}$  随通道位置的变化  
Fig. 4 Variation of plasma channel resistance of  $3\text{ cm}$  length with position changes

本文还研究了不同耦合方式对等离子体通道电阻的影响,实验中采用的耦合电极除了上述的两根钨探针以外,还尝试过:一根钨探针与一块铜极板的组合、两块铜极板的组合、直径约5 mm的金属圆孔与一块铜极板的组合。在保持同样的电源加载方式、电路连接方式以及极间距离的情况下,采用不同的电极进行实验,结果表明,不同的耦合方式下耦合电阻  $R_c$  值差异很大,而尤以两根钨探针做电极的耦合方式所产生的  $R_c$  值为最小,多次测量结果也相对稳定。

由于激光对大气等离子体的作用涉及到许多复杂的微观机制,特别是在通道电阻测量的过程中,耦合电阻的不确定性,使多次重复实验所得结果存在较大的波动,但如果去除测量时耦合电阻的影响,通道的实际电阻将远小于飞秒激光产生的激光大气等离子体通道。

## 4 结 论

实验中测得纳秒激光大气等离子体通道可连续导电的空间长度为80 cm左右,存活寿命在500 ns以上,通道测量电阻主要由耦合电阻构成。众所周知,由于飞秒激光的自聚焦作用产生的大气等离子体通道的长度远远大于纳秒激光束通过光束整形而产生的等离子体通道长度,目前国际上已经有长达几百米甚至几千米的等离子体通道的研究报道<sup>[12]</sup>,但其连续导电的性能及其寿命小于纳秒激光等离子体通道,所以我们的工作将是飞秒激光通道研究的有益补充,为某些激光大气等离子体通道的应用技术研究提供了实验依据。

## 参 考 文 献

- 1 S. Yalcin, Y. Y. Tsui, R. Fedosejevs. Images of femtosecond laser plasma plume expansion into background air [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, **33**(1):482~483
- 2 M. Mathuthu, R. M. Raseleka, A. Forbes *et al.*. Radial variation of refractive index, plasma frequency and phase velocity in laser induced air plasma [J]. *IEEE Transactions on*

- Plasma Science*, 2006, **34**(6):2554~2560
- 3 Nick Glumac, Greg Elliott. The effect of ambient pressure on laser-induced plasmas in air [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, **45**(1):27~35
- 4 Fang Zhiheng, Wang Chen, Wang Wei *et al.*. An experimental design of the laser plasma channeling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):39~42
- 方智恒,王琛,王伟等.一种进行激光等离子体通道实验的设计[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):39~42
- 5 Zhang Zhe, Zhang Jie, Li Yutong *et al.*. Measurements of electric resistivity of plasma channels in air [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1):357~361
- 张喆,张杰,李玉同等.空气中激光等离子体通道导电性能的研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1):357~361
- 6 Hao Zuoqiang, Yu Jin, Zhang Jie *et al.*. Acoustic diagnostics of plasma channels in air induced by intense femtosecond laser pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(3):1290~1294
- 郝作强,俞进,张杰等.用声学诊断方法测量激光等离子体通道的长度与电子密度[J]. *物理学报*, 2005, **54**(3):1290~1294
- 7 Hao Zuoqiang, Zhang Jie, Yu Jin *et al.*. The comparison study of diagnostics of light filaments in air [J]. *Science in China (Series G)*, 2006, **36**(1):38~45
- 郝作强,张杰,俞进等.空气中激光等离子体通道诊断方法比较研究[J]. *中国科学(G辑)*, 2006, **36**(1):38~45
- 8 Lin Chen, Zhang Liwen, Qin Xiao *et al.*. Conductivity of self-guided laser plasma channel produced by femtosecond laser pulses in air [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **19**(5):733~736
- 林晨,张立文,覃晓等.空气中飞秒激光自聚焦等离子体通道的电导特性[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **19**(5):733~736
- 9 Zhu Jiabin, Ji Zhonggang, Deng Yunpei *et al.*. Study on lifetime 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
- 10 Lin Zhaoxiang, Li Xiaoyin, Cheng Xuewu *et al.*. Spectroscopic study on the time evolution behaviors of the laser-induced air plasma [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, **23**(3):421~425
- 林兆祥,李小银,程学武等.激光大气等离子体时间演化特性的光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, **23**(3):421~425
- 11 Li Xiaoyin, Lin Zhaoxiang, Liu Yuyan *et al.*. Spectroscopic study on the behaviors of the laser-induced air plasma [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8):1051~1056
- 李小银,林兆祥,刘煜炎等.激光大气等离子体光谱特性实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8):1051~1056
- 12 B. La Fontaine, F. Vidal, D. Comtois *et al.*. The influence of electron density on the formation of streamers in electrical discharges triggered with ultrashort laser pulses [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27**(3):688~700