

# 空气中激光等离子体通道的荧光探测和声学诊断 两种方法的比较实验研究<sup>\*</sup>

郝作强<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)†</sup> 俞 进<sup>2)</sup> 张 一<sup>1)</sup> 仲佳勇<sup>1)‡</sup> 臧充之<sup>4)</sup> 金 展<sup>1)</sup> 王兆华<sup>1)</sup> 魏志义<sup>1)</sup>

1) (中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100080)

2) (Laboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire, UMR CNRS 5579, Université Claude Bernard-Lyon 1 #3,  
Bd. du 11 Novembre 1918, F-69622 Villeurbanne Cedex, France)

3) (中国科学院国家天文台, 北京 100012)

4) (北京大学物理学院, 北京 100871)

(2005 年 3 月 9 日收到, 2005 年 5 月 8 日收到修改稿)

使用荧光探测和声学诊断两种方法, 对超强飞秒激光脉冲在空气中传输形成的等离子体通道同时进行了测量. 两种方法都很好地反映了等离子体通道的演化过程. 对两种方法的比较研究发现, 声学诊断相对于荧光探测方法来说, 具有较高的灵敏度和空间分辨能力, 实验装置也更简单, 更适宜于等离子体通道的常规测量.

关键词: 强飞秒激光等离子体通道, 荧光探测, 声学诊断

PACC: 5240D, 5235

## 1. 引 言

强激光在非线性介质中的自聚焦成丝现象早在上个世纪六七十年代就已经被人们所熟知. 但是近十多年以来, 伴随着高强度飞秒激光的出现, 激光的传输问题又被赋予了许多新的内容. 如今, 在实验室里已经可以产生脉宽几个飞秒, 单脉冲能量达到焦耳量级的激光脉冲. 这种超短超强激光脉冲的峰值功率可以比自聚焦功率阈值高几个数量级, 自聚焦后的光强会导致介质发生场致电离(例如多光子电离, 隧道电离), 同时由于脉冲持续时间非常短, 不容易造成介质因雪崩电离而被击穿. 因此飞秒强激光脉冲在非线性介质中传输时会产生一系列新奇的物理现象, 其中飞秒激光在大气中产生稳定的电离通道的过程因其巨大的应用潜力而格外引人注目. 自从 1995 年人们观察到超强飞秒激光脉冲在空气中传输可以形成长达 20 m 的等离子体通道以来<sup>[1]</sup>, 超强飞秒激光在空气中的传输问题得到了世界各国科学家们的广泛重视. 对于超强飞秒激光在空气中传

输如何形成等离子体通道, 一个被大家普遍接受的物理解释是超强飞秒激光脉冲在空气中传输时, 由于非线性克尔自聚焦效应, 激光强度逐渐增大, 当达到空气的电离阈值时, 电离空气产生等离子体, 而产生的等离子体又会对激光束产生散焦作用, 当这两种作用达到动态平衡时, 激光脉冲在时间和空间的分布上都达到稳定, 激光束成丝传输, 形成很长的等离子体通道.

近几年的很多实验研究发现, 高强度的飞秒激光脉冲可以产生长达百米量级<sup>[2,3]</sup>甚至公里量级的等离子体通道<sup>[4,5]</sup>, 并且观察到了通道的一些十分有趣的现象, 比如超连续白光的产生<sup>[6,7]</sup>, 高转换效率三次谐波的产生<sup>[8,9]</sup>, 锥角辐射<sup>[10-13]</sup>等等. 这些现象和很多实际应用密切相关, 可以利用长通道产生的超连续白光对大气污染和大气层气溶胶成分进行分析<sup>[14]</sup>, 利用通道的导电特性进行激光诱导闪电<sup>[15]</sup>; 对等离子体通道中高次谐波的产生进行研究, 有助于发展波长为紫外和 X 射线波段的相干光源<sup>[16-18]</sup>.

在等离子体通道内, 激光强度可达  $6 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup><sup>[19]</sup>, 电子密度可达  $10^{18}$  cm<sup>-3</sup><sup>[20]</sup>, 在这样的条

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60478047, 10374116, 10390160), 国家重点基础研究项目特别基金(批准号: G1999075206)和国家高技术激光核聚变主题资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

件下,对通道内的物理状态直接测量是困难的,我们必须依据通道所表现出来的各种现象间接进行测量.近年来,人们发展了很多方法对等离子体通道进行探测,主要有成像法<sup>[21,22]</sup>、光学干涉法<sup>[20]</sup>、荧光法<sup>[2,23]</sup>、THz 探测法<sup>[24]</sup>和电磁脉冲探测法(EMP)<sup>[25]</sup>等等.我们实验室在过去的几年中分别利用声学测量方法<sup>[26,27]</sup>、横截面成像法、三次谐波测量<sup>[8,28,29]</sup>和电阻率测量法对等离子体通道进行了探测研究,都得到了较好的结果.但是,每种方法只反映通道不同侧面的特性,为了更好地精确反映通道的信息,最好同时使用不同的诊断方法对通道进行测量.然而,目前大部分探测技术都是对等离子体通道的破坏性测量,很难同时使用这些测量方法.本文在实验上得到了超过 80 倍激光瑞利距离的长等离子体通道的基础上,利用无损于通道的两种诊断方法——荧光探测法和声学诊断法,实现了对等离子体通道的同时探测研究.随后,文章对两种方法进行了较为详细的分析.

## 2. 实验装置

我们使用的激光装置是中科院物理研究所光物理实验室的极光 II 激光系统,该系统输出激光脉冲单脉冲能量最大为 640 mJ,脉宽为 30 fs,中心波长为 800 nm,工作频率为 10 Hz,初始激光束腰半径  $\omega_0$  为 1.5 cm.我们实验中所用的激光能量为 40 mJ.激光脉冲经焦距为 8 m 的聚焦透镜后在空气中产生了长约 6 m 的等离子体通道.我们利用了两种诊断方法对通道进行了探测:荧光探测法和声学诊断法.实验装置示意图见图 1,其中,①为光电倍增管,测量到的荧光信号接入示波器的通道 1;②为麦克风,收集到的声音信号经过一个音频放大器后,接入示波器的通道 2;③为光电二极管,作为触发信号接入示波器的触发通道.三部分的主要实验装置放置在一个平移台上,沿平行于等离子体通道方向移动来测量通道的荧光信号和声音信号,从而保证对通道的同时测量.麦克风距离通道 9 cm,光电倍增管距离通道 2 cm.另外,光电倍增管前放置玻璃滤光片(带宽约为  $350 \text{ nm} < \lambda < 550 \text{ nm}$ ),滤掉散射的基频激光,只让此波段的通道荧光透过<sup>[23]</sup>.我们还对麦克风用一个长 7 cm 的管状筒对其测量范围进行了进一步限制,使其主要可以测量长约 1 cm 通道范围的声音信号<sup>[30]</sup>.另外,在通道的垂直方向放置光谱仪测量等

离子体通道发出的荧光光谱.

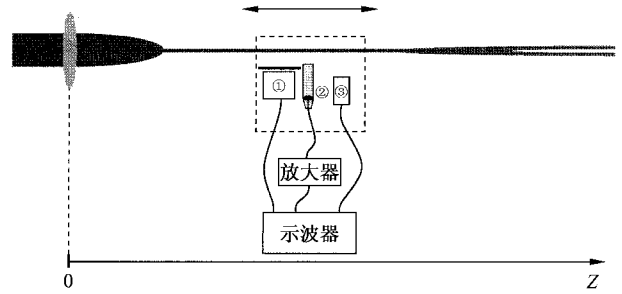


图 1 实验装置示意图.①为荧光测量装置;②为麦克风测量装置;③为触发信号装置

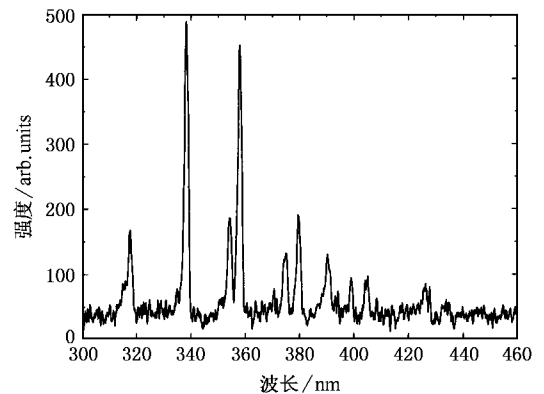


图 2 等离子体通道的荧光光谱

## 3. 探测方法基本原理

由于不同诊断方法可以反映通道的不同特性,所以使用不同方法对通道进行同时测量,能够更好地反映通道形成的情况,提供更为丰富和精确的通道信息.

等离子体通道的荧光探测方法的基本原理是超强飞秒激光脉冲在空气中传输时,由于空气分子的多光子电离过程,产生自由电子,同时,空气中也产生了大量的高激发态正离子和高激发态中性分子,例如  $\text{N}_2^+(B^2\Sigma_u^+ \text{态})$  和  $\text{N}_2(C^3\Pi_u \text{态})$ ,这些高能态粒子会向低能态跃迁,产生辐射光.研究表明,通道发出的荧光为线谱,主要集中在 300—460 nm 范围内,也就是我们实验观测到的通道荧光信号,测量结果见图 2.这些谱线主要是由  $\text{N}_2^+(B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+ \text{跃迁})$  和  $\text{N}_2(C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g \text{跃迁})$  的能级跃迁所产生的<sup>[23]</sup>.由于通道的这种光辐射是和通道内的高能态粒子数相联系的,所以光辐射的强弱也就反映了通

道内的电离程度,也就和通道内的激光强度密切相关,所以可以通过测量这些荧光谱线的总强度,来反映通道的演化过程<sup>[23]</sup>。

等离子体通道的声学诊断方法的基本原理是超强飞秒激光脉冲在空气中传输时,空气在很短的时间内被电离,激发起等离子体冲击波,并很快衰变成等离子体声波,也就是我们实验中观测到的声音信号。等离子体声波是和通道内的自由电子密度密切联系着的。研究证明,通过测量通道不同位置的声音信号,最终可以得到通道的长度、直径和通道内的电子密度及其随激光传输距离的演化等信息<sup>[26,27,30]</sup>。所以,声学诊断方法是基于等离子体通道内部的激光强度和电子密度分布信息的一种诊断方法。

可见,这两种方法都是反映的等离子体通道内光强和电子密度沿通道传输方向的分布情况,不同的是,这两种方法利用了通道所表现出来的不同方面的特征。因此,可以利用通道这个特点来进行多方法同时测量,一方面可以从不同侧面反映通道的特征,另一方面可以比较不同方法的优缺点及适用条件,从而在不同的情况下正确选择不同的探测方法。

#### 4. 实验结果及分析

图3是实验过程中同时采集到的荧光信号(图中1所示)和声音信号(图中2所示)。 $T_1$ 和 $T_2$ 表示触发位置,也就是横坐标的零点。两个信号相对触发位置的差异是由实验装置各自的电路和所用的同轴电缆线的长短造成的。此外,声音信号在 $400\ \mu\text{s}$ 及之后还有波形是由于放大电路造成的。为了更好地抑制背景噪声和激光不稳定造成的误差,采集数据时,示波器使用多次平均,实验中我们使用的是100—200次平均。

移动平移台,使麦克风和光电倍增管同时沿平行通道方向移动,测量通道不同传输距离处的信号,最后得到了荧光信号和声音信号随等离子体通道传输距离的变化曲线,如图4所示。

从图4中可以看到:

1)从整体上来看,荧光信号和声音信号具有相似的变化趋势。两种信号的强度都在大约5 m处开始快速上升,这说明了等离子体通道内部的细丝已经形成。值得注意的是,在大约6.5—10 m长达3.5 m的长度范围内,信号达到一个平台区,强度基本保持不变,这说明了通道内部的各种非线性过程达到

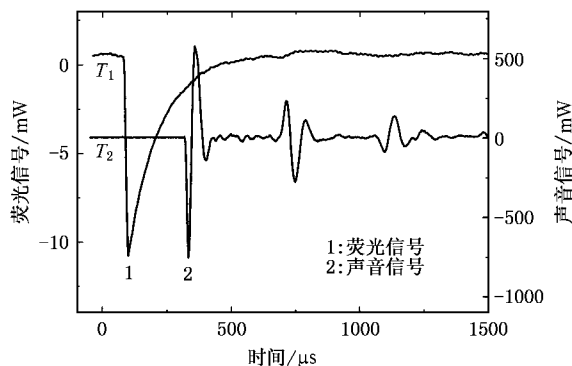


图3 实验中示波器采集到的信号(其中1为示波器通道1的荧光信号波形,2为通道2的声音信号波形, $T_1$ 和 $T_2$ 表示触发位置)

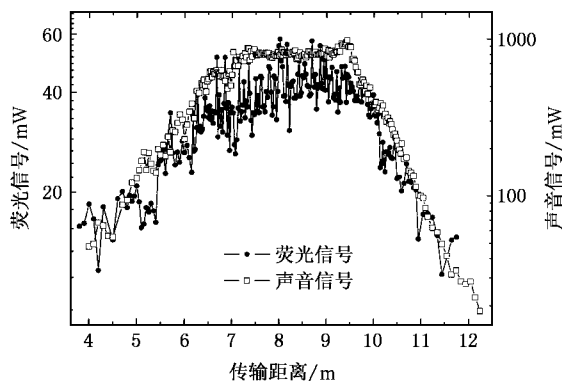


图4 荧光信号和声音信号随等离子体通道传输距离的变化

了相对平衡,激光稳定传输。在10—11 m范围内,信号强度快速下降。根据信号的强度和变化趋势,可以认为通道大致在11 m位置处结束。

2)从两种信号所反映的细节来看,声音信号表现出很好的稳定性,比较细致地反映出了通道随传输距离的演化过程,具有很高的空间分辨能力。而对于荧光信号,信号分布较为离散,只能大致反映出通道的变化趋势,不能分辨出更细节的部分,其空间分辨能力较差。这主要是由光电倍增管的灵敏度及其光子转换效率所决定,并且,周围背景光的影响和等离子体通道的各种不稳定性引起的通道内电离度的变化也引起了通道荧光信号较大的浮动。而声学测量信号的变化范围(约为10—1000 mV,见图4)要比荧光信号的宽得多,激光等离子体通道的不稳定引起的声音信号浮动不至于造成其强烈的震荡,又由于声音信号放大器本身具有声音频率范围的选择功能,声学测量受背景噪声的影响也就小得多。所以,在我们的实验条件下,荧光探测相对声学诊断方法来说具有较大的误差。

3) 实验中所用激光束的瑞利距离约为<sup>[31]</sup>  $z_f = z_0 f^2 / (z_0^2 + f^2) \approx 7.24 \text{ cm}$  其中  $z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda \approx 883.6 \text{ m}$  为不加聚焦透镜时的激光瑞利距离,  $f$  为透镜焦距. 而从图 4 中看到, 激光经聚焦镜在空气中形成了大约从 5—11 m, 长约 6 m 的等离子体通道. 所以, 我们实验中产生了长度为 80 多倍激光瑞利距离的等离子体通道.

此外, 为了进一步比较这两种探测方法, 我们对两种信号的上升阶段和下降阶段的变化趋势进行了对比分析. 图 5 为两种信号在这两个阶段的指数拟合比较, 其中短划线表示荧光信号的指数拟合曲线, 实线表示声音信号的指数拟合曲线. 拟合结果为

上升阶段 ( $z = 3.8\text{—}6.5 \text{ m}$ ): 荧光信号  $\sim \exp(0.0090z)$ , 声音信号  $\sim \exp(0.0121z)$ ;

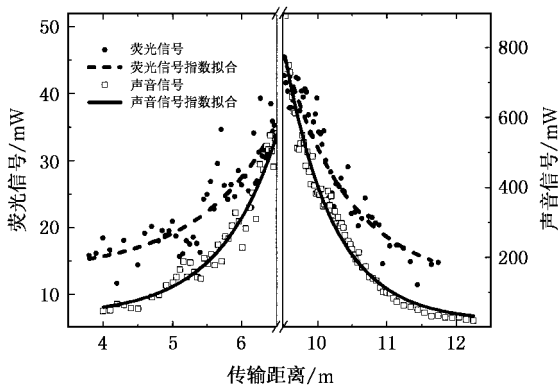


图 5 荧光信号和声音信号的上升和下降阶段的变化趋势比较

下降阶段 ( $z = 9.5\text{—}12 \text{ m}$ ): 荧光信号  $\sim \exp(-0.0106z)$ , 声音信号  $\sim \exp(-0.0141z)$ . 其中  $z$  为激光传输距离.

通过比较两种信号的变化趋势可见, 无论是在上升阶段还是在下降阶段, 声音信号都比荧光信号变化得快, 并且, 荧光信号相对来说分布得比较离散. 这从另一方面进一步证明了声学诊断比荧光探测具有更高的空间分辨能力和灵敏度<sup>[30]</sup>. 另外还表明, 光电倍增管的性能(灵敏度和光子转换效率等)在荧光探测中占十分重要的地位.

## 5. 结 论

我们在实验上得到了长度超过 80 倍激光瑞利距离的等离子体通道, 并利用荧光探测和声学诊断两种方法对通道进行了同时测量研究. 研究发现, 两种方法的实验结果十分相似, 都反映出了等离子通道的变化趋势, 比较细致地反映了通道的演化过程. 对两种方法的比较研究发现, 声学诊断方法相对荧光探测来说具有较高的灵敏度和空间分辨能力, 装置调节也更简单, 而荧光探测方法的可靠性则更多地依赖于光电倍增管的灵敏度和光子转换效率等参数以及形成的等离子体通道的稳定程度. 此外, 两种方法的共同优点就是, 它们无破坏性, 都是无损于等离子体通道的诊断方法, 并且都适合于通道的快速测量判断.

- [ 1 ] Braun A, Korn G, Liu X *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 73
- [ 2 ] Fontaine B La, Vidal F, Jiang Z *et al* 1999 *Phys. Plasmas* **6** 1615
- [ 3 ] Bergé L, Skupin S, Lederer F *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 225002
- [ 4 ] Méchain G, Couairon A, André Y B *et al* 2004 *Appl. Phys. B* **79** 379
- [ 5 ] Wöste L, Wedekind C, Wille H *et al* 1997 *Las. Optoelektr.* **29** 51
- [ 6 ] Kasparian J, Sauerbrey R, Mondelain D *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 1397
- [ 7 ] Nishioka H, Odajima W, Ueda K, Takuma H 1995 *Opt. Lett.* **20** 2505
- [ 8 ] Yang H, Zhang J, Zhang J *et al* 2003 *Phys. Rev. E* **67** R15401
- [ 9 ] Zhu C J, Qin Y D, Yang H *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 57
- [ 10 ] Nibbering E T J, Curley P F, Grillon G *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 62

- [ 11 ] Chin S L, AközbeK N, Proulx A *et al* 2001 *Opt. Commun.* **188** 181
- [ 12 ] Chin S L, Petit S, Liu W *et al* 2002 *Opt. Commun.* **210** 329
- [ 13 ] Golubtsov I S and Kosareva O G 2002 *J. Opt. Tech.* **69** 462
- [ 14 ] Kasparian J, Rodriguez M, Méjean G *et al* 2003 *Science* **301** 61
- [ 15 ] Zhao M X, Diels J C, Wang C Y, Elizondo J M 1995 *IEEE J. Quantum Electron* **31** 599
- [ 16 ] Macklin J J, Kmetec J D, Gordon C L 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 766
- [ 17 ] Spielmann C, Burnett N H, Sartania S *et al* 1997 *Science* **278** 661
- [ 18 ] Chang Z H, Rundquist A, Wang H W *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2967
- [ 19 ] Kasparian J, Sauerbrey R, Chin S L 2000 *Appl. Phys. B* **71** 877
- [ 20 ] Yang H, Zhang J, Li Y T *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **66** 016406
- [ 21 ] Talebpoor S, Prade B, Franco M, Mysyrowicz A 2000 *Opt. Commun.* **181** 123

- [ 22 ] Duan Z L , Chen J P , Fang J B *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 473  
( in Chinese )[ 段作梁、陈建平、方宗豹等 2004 物理学报 **53** 473 ]
- [ 23 ] Talebpour A , Petit S , Chin S L 1999 *Opt. Commun.* **171** 285
- [ 24 ] Tzortzakis S , Méchain G , Patalano G *et al* 2002 , *Opt. Lett.* **27** 1944
- [ 25 ] Hosseini S A , Ferland B , Chin S L 2003 *Appl. Phys. B* **76** 583
- [ 26 ] Hao Z Q , Yu J , Zhang J *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 636
- [ 27 ] Hao Z Q , Yu J , Zhang J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1290 ( in Chinese )[ 郝作强、俞 进、张 杰等 2005 物理学报 **54** 1290 ]
- [ 28 ] Hao Z Q , Zhang J , Zhang Z *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3173  
( in Chinese )[ 郝作强、张 杰、张 等 2005 物理学报 **54** 3173 ]
- [ 29 ] Aközbek N , Iwasaki A , Becker A *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 143901
- [ 30 ] Yu J , Mondelain D , Kasparian J *et al* 2003 *Appl. Opt.* **42** 7117
- [ 31 ] Couairon A , Tzortzakis S , Bergé L *et al* 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 1117

## Fluorescence measurement and acoustic diagnostics of plasma channels in air<sup>\*</sup>

Hao Zuo-Qiang<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)</sup> Yu Jin<sup>2)</sup> Zhang Zhe<sup>1)</sup> Zhong Jia-Yong<sup>1)B)</sup> Zang Chong-Zhi<sup>4)</sup> Jin Zhan<sup>1)</sup>  
Wang Zhao-Hua<sup>1)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>1)</sup>

1) ( Key Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

2) ( Laboratoire de Spectrométrie Ionique et Moléculaire , UMR CNRS 5579 , Université Claude Bernard-Lyon 1 A3 ,  
Bd. du 11 Novembre 1918 , F-69622 Villeurbanne Cedex , France )

3) ( National Astronomical Observatories , Chinese Academy of Science , Beijing 100012 , China )

4) ( School of Physics , Peking University , Beijing 100871 , China )

( Received 9 March 2005 ; revised manuscript received 8 May 2005 )

### Abstract

A plasma channel up to 80 Rayleigh lengths is formed when intense femtosecond laser pulses propagate in air. Two methods , fluorescence measurement and acoustic diagnostics , are used to probe the plasma channel simultaneously. Both methods reveal the evolution of the channel in detail. Compared with the fluorescence measurement , the acoustic method is a convenient approach having higher sensitivity and higher spatial resolution in detecting long plasma channels.

**Keywords** : intense femtosecond laser plasma channel , fluorescent measurement , acoustic diagnostics

**PACC** : 5240D , 5235

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60478047 , 10374116 , 10390160 ) , the National Key Basic Research Special Foundation of China ( Grant No. G1999075206 ) and National Hi-Tech ICF program.