

空气中单个激光等离子体通道的形成条件^{*}

仲佳勇^{1,2)} 李玉同¹⁾ 鲁 欣¹⁾ 张 翼¹⁾ Bernhardt Jens^{1,3)} 刘 峰¹⁾ 郝作强¹⁾
张 1) 于全芝¹⁾ 陈 民¹⁾ 远晓辉¹⁾ 梁文锡¹⁾ 赵 刚²⁾ 张 杰¹⁾

1) 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080)

2) 中国科学院国家天文台, 北京 100021)

3) Institute for Optics and Quantum Electronics, Friedrich-Schiller-University Jena, Jena 07743, Germany)

(2007 年 3 月 12 日收到, 2007 年 6 月 27 日收到修改稿)

利用皮秒和飞秒激光研究了激光在空气中聚焦产生单个等离子体通道的条件. 研究发现, 能量为 8—12 mJ 皮秒激光被焦距为 15 cm 的透镜聚焦后, 可以产生较为稳定的单个通道. 通过横向纵向阴影成像分析发现, 通道的管壁对聚焦产生的自发光具有箍缩作用, 而通道内部却有利于光的传输. 同时还发现, 当采用短焦距透镜时, 能量低于 10 mJ 的飞秒激光在空气中较易形成单个等离子体通道.

关键词: 等离子体通道, 皮秒激光, 飞秒激光, 阴影成像

PACC: 5240D

1. 引言

近年来, 短脉冲激光在空气中的传输过程引起了人们的广泛关注^[1-3]. 短脉冲强激光在空气中传输存在克尔聚焦、电离散焦的非线性光学效应, 这两种效应的动态平衡结果可以使激光在空气中形成长而稳定的等离子体通道. 对超短脉冲激光在空气中形成的等离子体通道的研究发现, 通道内部由许多细丝组成, 这些丝可以形成稳定的均匀电子密度通道. 这些通道由于具有导电性, 可以作为激光雷达以及用来引雷放电, 因此具有许多潜在的应用价值^[4-8]. 最近 Liu 等^[9]利用低能量飞秒激光产生了弱的等离子体通道, 并测量了通道密度. 另外, 在实验中也发现单个通道非常有利于物质波(例如爆炸波)的传输^[10]. 然而这种单一的通道并不容易稳定地形成, 其内部状态也不是很清楚.

本文利用飞秒和皮秒激光在空气中聚焦, 对形成稳定的等离子体通道的条件进行了研究. 在实验中采用阴影成像的方法, 分别从横向和纵向两个方向对空气中产生的等离子体通道进行了观测. 对于皮秒激光, 不仅观测到了典型的非线性效应(如克尔

聚焦、电离散焦), 而且还形成了稳定的通道. 根据通道内自发光的演化, 提出了通道内部有利于光传输的看法. 对于飞秒激光, 同样观测到了典型的非线性效应, 同时发现短焦距透镜比较容易形成单个的通道.

2. 实验布置

实验采用中国科学院物理研究所自行研制的脉冲宽度为 30 fs、最大输出能量为 640 mJ、峰值功率为 20 TW 的“极光 II 号”装置. 激光工作波长为 800 nm, 压缩前脉冲宽度为 200 ps, 重复频率为 10 Hz. 实验布局如图 1 所示, 激光脉冲经过分束镜 BS 后, 70% 的能量通过聚焦镜 L_1 聚焦到空气中, 剩余 30% 能量的激光作为探针光经 BBO 晶体倍频后分为横向和纵向(图 1 虚线所示)两部分对聚焦后产生的等离子体通道进行阴影成像. 聚焦透镜 L_1 采用了 $f = 5, 12, 15, 30$ cm 平凸透镜, 成像透镜 L_2, L_3 采用 $f = 10$ cm 双凸透镜, 放大倍数为 8 倍. 测量中我们首先进行了横向观测, 通过改变探针光与主激光的延迟时间 t_d 观测了通道随时间的演化过程. 然后通过纵向观测, 测量了通道截面及通道直径随时间的演化. 通过对横向阴影图的分析, 我们发现通道在激光聚焦方向

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60478047, 10390161, 10675164, 60621063, 10634020, 10574161), 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2007CB815100)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KZCX1-YW-01, KZCX2-YW-T01)资助的课题.

是闭合的,所以在纵向测量时,为了尽可能将探针光注入管中,探针光迎着通道聚焦激光的方向,然后在靠近聚焦透镜的位置用一个透 800 nm 反 400 nm 激光的反射镜 M8 将探针光反射到成像透镜 L3 上.

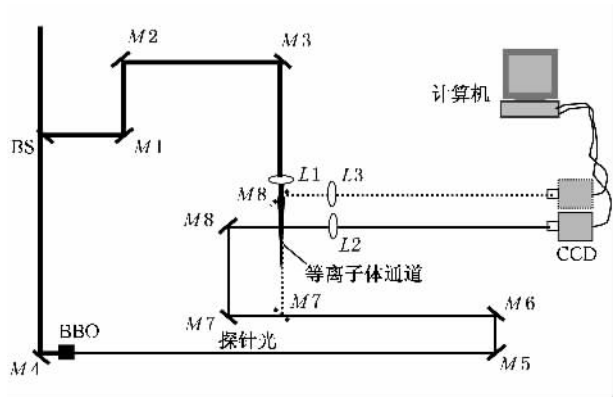


图 1 实验光路图 BS 是分束镜, L1 是聚焦透镜, L2—L3 是成像透镜, M1—M4 是 800 nm 反射镜, M5—M8 是 400 nm 反射镜, 实线是横向阴影成像光路, 虚线为纵向阴影成像光路

3. 实验结果及讨论

3.1. 皮秒激光产生的等离子体通道

图 2 是脉冲宽度为 200 ps、聚焦能量为 8.5 mJ 的激光脉冲,通过焦距为 15 cm 的聚焦透镜后产生的通道阴影图.从图 2 可以看到,随着时间的演化,通道的宽度逐渐变宽,长度也在增加.在演化初期 ($t_d = 0$ ns 附近),观测到了很强的电离空气的自发光,并且不规则地排布在激光传输方向上,这时通道还没有形成,自发光可能由激光脉冲前沿造成.演化到 $t_d = 1.1$ ns 附近时通道逐渐成形,这时自发光的强度减弱,可以看到微弱的通道迹象,在 $t_d = 1—1.9$ ns 时刻,通道开始膨胀,这时看到的通道很模糊.直到 $t_d = 6.1$ ns 时,通道开始比较稳定,自发光位于通道内,这种现象一直到演化后期 ($t_d = 55$ ns) 也可以看到.需要说明的是,在实验过程中我们仅在 200 ps 激光聚焦中观测到了自发光.

当演化到 $t_d = 8—10$ ns 时,可以看到更加清晰的通道.图 3 是当我们将激光能量增加到 12 mJ 时横向观测到的通道阴影.当焦距为 12 cm 时,可以明显看到非线性效应,当焦距变为 15 cm 时,可以看到 200 ps 的激光在大气中形成了一个非常均匀的通道,这个通道大概可以维持 10 ns 左右.仔细观察通道发现,通道的一端开口,另外一端闭合,闭合方向

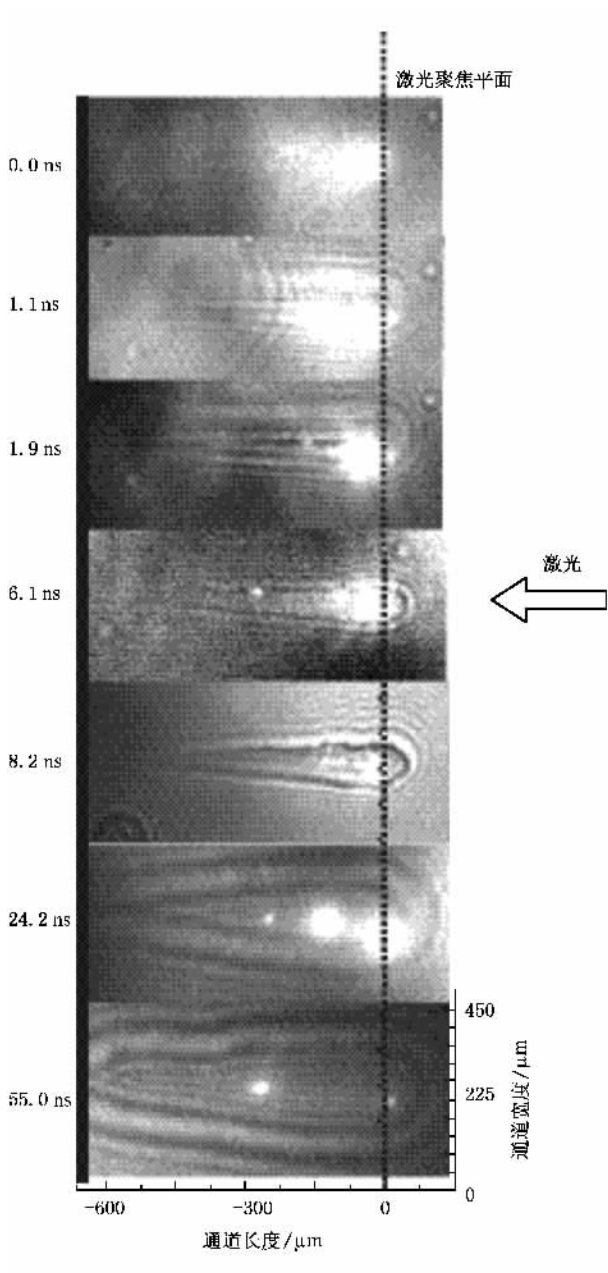


图 2 当聚焦能量为 8.5 mJ、聚焦透镜焦距为 15 cm 时,采用脉冲宽度为 200 ps 激光产生的通道在不同延迟时间下的横向阴影

为靠近聚焦透镜.所以在纵向测量时,我们将探针光迎着通道开口方向.图 4 就是当通道演化到 9.8 ns 时得到的横向和纵向阴影图.从图 4 可以看到,产生的通道非常的准直而且均匀,通道直径约为 $160\text{ }\mu\text{m}$,长度为 1.5 mm.另外,从纵向阴影图也可以看到清晰的圆形通道.

为了观测通道截面随时间的演化,我们从纵向观测了通道阴影.图 5 给出了不同延迟时刻观测到的通道截面.在 $t_d = 3.5—15$ ns 可以看到,通道截面非常稳定,中间的亮点就是自发光,其亮度在 $t_d =$

10 ns 附近达到了最亮,而这个时刻也是通道最为稳定的时刻.从 $t_d = 20$ ns 以后通道开始膨胀变粗,到

50 ns 之后已经扩散到直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 左右大圈,这与以上横向阴影测量得到的结果一致.

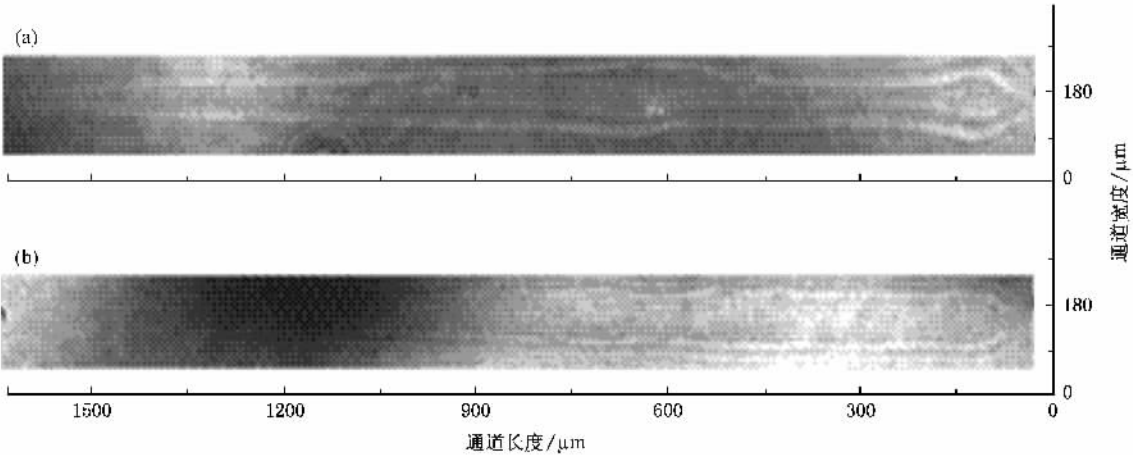


图 3 当聚焦能量为 12 mJ、聚焦透镜焦距为 12 和 15 cm、探针光延迟时间 $t_d = 9$ ns 时,采用脉冲宽度为 200 ps 激光产生通道的横向阴影 (a) 透镜焦距 12 cm (b) 透镜焦距 15 cm

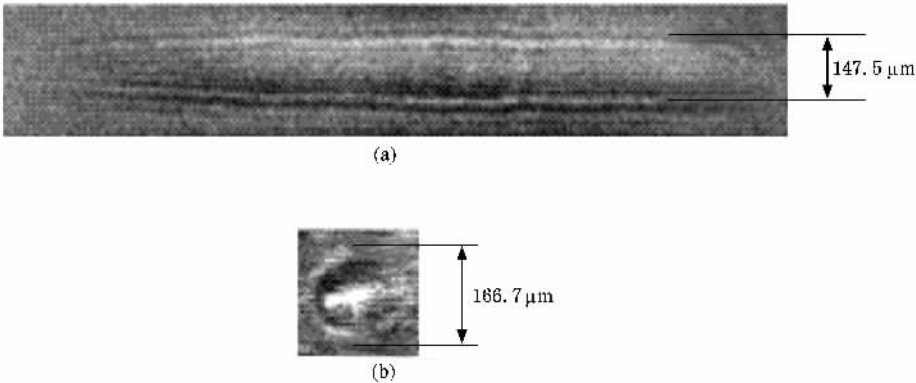


图 4 当聚焦能量为 12 mJ、聚焦透镜焦距为 15 cm、探针光延迟时间 $t_d = 9.8$ ns 时,采用脉冲宽度为 200 ps 激光产生通道的横向和纵向阴影 (a) 横向,成像宽度为 $147.5\text{ }\mu\text{m}$ (b) 纵向,成像宽度为 $166.7\text{ }\mu\text{m}$

3.2. 飞秒激光产生的等离子体通道

改用飞秒激光后,我们发现短焦距透镜更有利于单通道的形成,但是形成的通道不是很稳定.图 6 是在探针光延迟 $t_d = 9$ ns 的情况下得到的通道横向阴影图.图 6(a)是利用 3 mJ,150 fs 激光,在焦距为 5 cm 透镜聚焦下产生单个的等离子体通道,但是通道粗细不够均匀.图 6(b)为利用 9 mJ,50 fs 激光,在焦距为 12 cm 透镜聚焦下产生的等离子体通道,同样可以看到单个通道,但是通道内部已经开始出现细丝,存在明显的非线性效应.保持激光条件不变,改变焦距(图 6(c))时发现,细丝数目增加,难以形成

单个通道.另外,从纵向观察时,我们没有得到很好的截面,而是很多丝混合的投影,显得异常杂乱.对于短焦距、低能量情况,发现丝的数目明显减少,单通道很容易形成.但是这种通道的直径大概只有 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右,而且不是非常直,非线性效应更加明显.在聚焦能量为 9 mJ、脉冲宽度为 50 fs、聚焦透镜焦距为 12 cm 情况下,从得到的横向阴影图可以明显看到通道聚焦、散焦以及再聚焦过程.在低密度等离子体中利用飞秒激光形成的等离子体通道比较稳定,这是由于稳定的低密度等离子体的均匀性造成的,一般情况下这种低密度等离子体是由长脉冲激光产生的.而在空气中飞秒激光要首先电离空气,然后再形成通道,所以在控

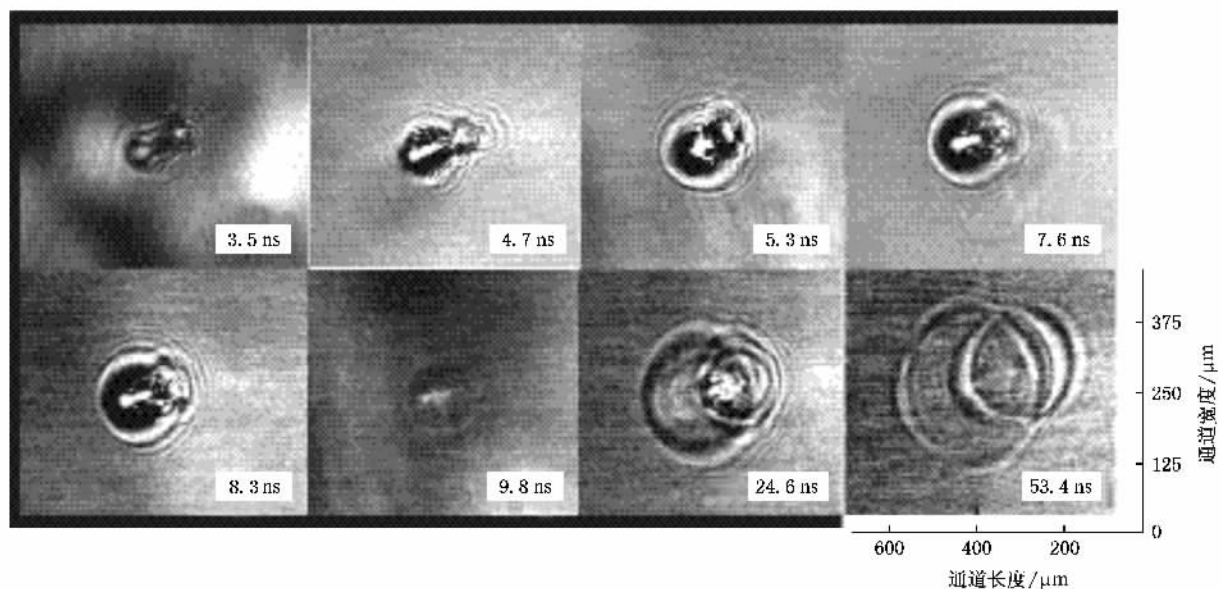


图5 当聚焦能量为 12 mJ、聚焦透镜焦距为 15 cm 时,采用脉冲宽度为 200 ps 激光产生的通道在不同延迟时间下的纵向阴影

制形成等离子体通道上有一定的难度.

3.3. 讨 论

对于皮秒激光,为了观察单个通道内部的状态,我们在实验中尝试将探针光注入通道内进行观测.然而在实验过程中发现,当激光能量比较大的时候,聚焦激光可以电离空气而随机产生自发光,而且产生的自发光正好处在通道内部,这种自发光本身就是一个很好的光源.通过观察自发光的传播,我们就

可以对通道内部状态做出定性的判断.从图 2 可以看出,如果自发光产生的时间是在激光到达焦点位置开始,那么从 0 到 9 ns 光的传播距离是 270 cm,由于光能够被多次反射、箍缩在冲击波内部,因此在 0—9 ns 的所有过程中,通道内部都应该是亮的,类似地,后面时刻也应该是亮的.然而我们没有观察到这种现象,这说明在图 2 条件下产生的自发光演化到后期与通道没有形成联系.图 7 是能量为 8 mJ、透镜焦距为 15 cm、在 9 ns 延迟情况下观测到的横向

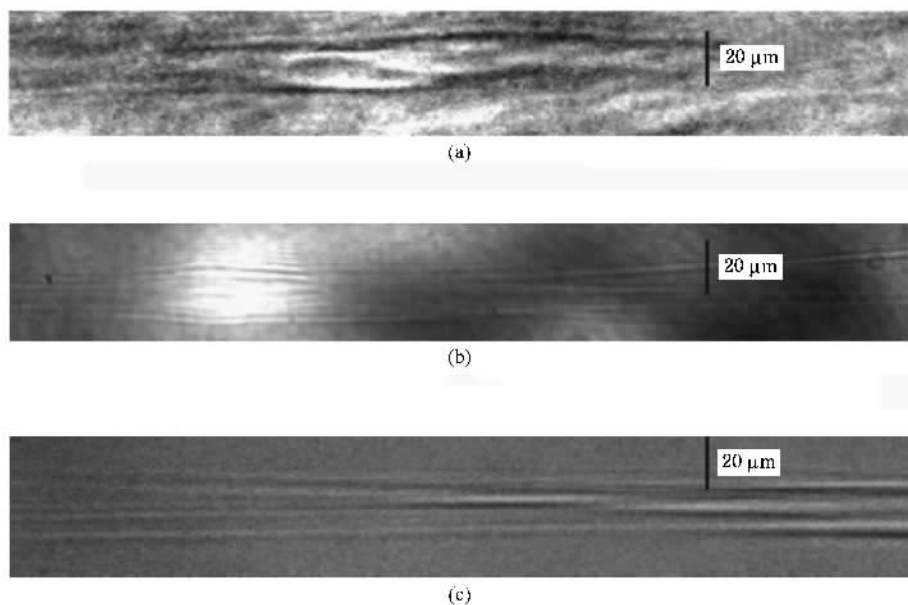


图6 采用飞秒激光产生的通道横向阴影.探针光延迟时间为 $t_d = 9$ ns,激光能量、脉冲宽度和采用聚焦透镜焦距分别为(a) 8 mJ, 150 fs 和 5 cm (b) 8 mJ, 50 fs 和 12 cm (c) 8 mJ, 50 fs 和 30 cm

阴影图.从图 7 可以看出,在通道内部产生了自发光,激光从右向左传输,这个通道比较稳定,自发光充满整个通道,整个通道都是亮的,并且有向左(激光传输方向)传输的特征,这种光的存在将通道壁非常清晰地显现出来.这一点证实了在空气中产生的等离子体通道与在低密度等离子体中产生的通道

相似,其内部有利于光的传输.

从以上的实验我们得出了在空气中形成稳定的单个等离子体通道的条件(在我们使用聚焦透镜的范围内).对于皮秒激光,采用 15 cm 的聚焦透镜能够形成准直单一的通道,对于飞秒激光,采用短焦距透镜有利于形成等离子体通道,这种情况下非线性

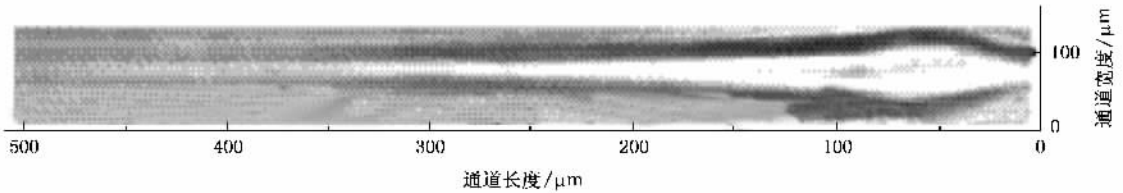


图 7 当聚焦能量为 8 mJ、聚焦透镜焦距为 15 cm、探针光延迟时间 $t_d = 9$ ns 时,采用脉冲宽度为 200 ps 激光产生通道的横向阴影

效应同样明显.

4. 结 论

本文利用皮秒和飞秒激光对激光在空气中聚焦产生单个通道的条件进行了研究,并定性分析了单个通道的内部特征.对于皮秒激光,在能量为 8—12

mJ、聚焦透镜焦距为 15 cm 的情况下,产生长度为 1.5 mm 的单个等离子体通道.通过横向和纵向阴影成像测量,发现通道的管壁对聚焦产生的自发光具有箍缩作用,而通道内部却有利于光的传输.对于飞秒激光,发现采用短焦距透镜有利于形成等离子体通道,但是形成通道的长度和直径都比较小,并且显示出强的非线性效应.

- [1] Braun A, Korn G, Liu X, Du D, Squier J, Mourou G 1995 *Opt. Lett.* **20** 73
- [2] Hao Z Q, Yu J, Zhang J, Yuan X H, Zheng Z Y, Yang H, Wang Z H, Ling W J, Wei Z Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1290 (in Chinese) [郝作强、俞进、张杰、远晓辉、郑志远、杨辉、王兆华、令维军、魏志义 2005 物理学报 **54** 1290]
- [3] Hao Z Q, Yu J, Zhang J, Li Y T, Yuan X H, Zheng Z Y, Wang P, Wang Z H, Ling W J, Wei Z Y 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 636
- [4] Tzortzakis S, Franco M A, André Y B, Chiron A, Lamouroux B, Prade B S, Mysirowicz A 2001 *Phys. Rev. E* **60** R3505
- [5] Yang H, Zhang J, Yu W, Li Y J, Wei Z Y 2001 *Phys. Rev. E* **65** 0164061
- [6] Proulx A, Talebpour A, Petit S, Chin S L 2000 *Opt. Commun.* **174** 305
- [7] Yang H, Zhang J, Li Y J, Zhang J, Li Y T, Chen Z L, Teng H, Wei Z Y, Sheng Z M 2002 *Phys. Rev. E* **66** 0164061
- [8] Schillinger H, Sauerbrey R 1999 *Appl. Phys. B* **68** 753
- [9] Liu J S, Duan Z L, Zeng Z N, Xie X H, Deng Y P, Li R X, Xu Z Z, Chin S L 2005 *Phys. Rev. E* **72** 026412
- [10] Li Y T, Zhang J, Teng H, Li K, Peng X Y, Jin Z, Lu X, Zheng Z Y, Yu Q Z 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056403

Generation of single plasma channel in air^{*}

Zhong Jia-Yong^{1,2)} Li Yu-Tong¹⁾ Lu Xin¹⁾ Zhang Yi¹⁾ Bernhardt Jens^{1,3)} Liu Feng¹⁾ Hao Zuo-Qiang¹⁾
Zhang Zhe¹⁾ Yu Quan-Zhi¹⁾ Chen Min¹⁾ Yuan Xiao-Hui¹⁾ Liang Wen-Xi¹⁾ Zhao Gang²⁾ Zhang Jie¹⁾

¹ *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

² *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100021, China*

³ *Institute for Optics and Quantum Electronics, Friedrich-Schiller-University Jena, Jena 07743, Germany*

(Received 12 March 2007 ; revised manuscript received 27 June 2007)

Abstract

The conditions of generating a single plasma channel in air are studied by using picosecond and femtosecond laser pulse. A stable and single plasma channel can be generated by a picosecond laser pulse with energy of 8—12 mJ and focusing length of 15 cm. The self-generated light emission is observed to be confined in the plasma channel and propagates in the channel. When using short focal length lenses it is easy to generate a single plasma channel in air with femtosecond laser with energy less than 10 mJ.

Keywords : plasma channel , picosecond laser , femosecond laser , shadowgraph imaging

PACC : 5240D

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60478047 ,10390161 ,10675164 ,60621063 ,10634020 , 10574161), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB815100) and the Main Direction Program of the Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. KZCX1-YW-01 ,KZCX2-YW-T01).