

文章编号: 0253-2239(2007)06-1059-4

# 外加高压电场下空气中激光等离子体通道寿命研究

朱佳斌 季忠刚 邓蕴沛 刘建胜 李儒新 徐至展

(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, 上海 201800)

**摘要:** 通过对飞秒激光在空气中产生的等离子体通道两端外加高压, 来研究通道的寿命变化情况。实验得到, 当在等离子体通道两端外加高压时 (350 kV/m), 等离子体通道寿命延长了近 3 倍。理论模拟和分析结果表明在外加电场条件下, 碰撞电离得到增强, 吸附作用相对减弱, 解离复合系数随着电子平均能量的增加而下降的趋势更为剧烈, 这进一步引起了等离子体通道寿命的延长。实验结果与理论分析共同表明了利用外加电场对空气中激光等离子体通道寿命进行延长的可行性。

**关键词:** 等离子体; 延长寿命; 外加高压电场; 解离复合率

中图分类号: O437 文献标识码: A

## Study on Lifetime of a Plasma Channel Induced by Femtosecond Laser Pulses and an External Electric Field

Zhu Jiabin Ji Zhonggang Deng Yunpei Liu Jiansheng Li Ruxin Xu Zhizhan

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** The lifetime of plasma channel induced by femtosecond laser in air is investigated by adding external high voltage electric field. The lifetime is extended three times when the voltage reaches 350kV/m in our experiment. Theoretical simulation and analysis show that impact ionization is enhanced and attachment effect is reduced in high-voltage electric field. Also, a sharper falloff in dissociative recombination rate will lead to a corresponding marked increase in the lifetime of the plasma channel. Both experimental and theoretical results prove the feasibility of adding external electric field in prolonging the lifetime of plasma channel in air.

**Key words:** plasma; prolonging of lifetime; external high-voltage electric field; dissociative recombination rate

### 1 引 言

近来, 由于超短强激光脉冲在空气中传播过程的潜在应用, 如激光引雷<sup>[1,2]</sup>和大气遥感<sup>[3]</sup>, 它引起了科研人员的极大兴趣<sup>[4~11]</sup>。飞秒强激光脉冲在空气中传输时, 由于空气中的克尔效应产生的自聚焦过程与光束衍射和等离子体通道的自散焦过程形成了一种动态平衡, 从而出现了成丝现象。目前国内有关成丝现象的报道中, 已经能够得到 10 m 以上的等离子体通道。在实际应用中, 人们往往希望增加等离子体通道的长度, 提高等离子体的电离

度, 同时延长等离子体通道的寿命。目前已有一些关于等离子体通道寿命的研究报道<sup>[12~14]</sup>, 根据已有的方案<sup>[14]</sup>, 在沿等离子体通道方向上注入另一长脉冲激光, 由于其去吸附效应, 从而可以在一定的电子密度范围上 ( $10^{10} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) 延长等离子体通道的寿命。此外, 双飞秒脉冲方案<sup>[17]</sup>也被用于在一定时间尺度上 (几十纳秒) 实现通道寿命的延长。本文中, 我们提出了利用外加高压电场来实现激光等离子体通道寿命的延长, 从实验和理论分析两方面对该方案进行论证, 验证了这一方案的可行性。

作者简介: 朱佳斌(1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: jiabinzhu@mail.siom.ac.cn

导师简介: 李儒新(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光物理和激光技术方面的研究。

E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2006-03-10; 收到修改稿日期: 2006-06-01

实验中,我们在飞秒激光在空气中产生的等离子体通道两端外加高压,发现随着外加高压的增大,等离子体通道的寿命被延长。在外加 350 kV/m 高压的情况下,通道寿命被延长了 3 倍。理论计算与进一步分析表明,在外加高压电场的情况下,碰撞电离效应得到增强,导致自由电子数目减少的吸附作用在总体上也减小了。另外,外加高压的作用引起在解离复合中起作用的位能曲线的相对位置发生了变化。这样,随着电子平均能量的增加,解离复合系数将比原有的趋势下降的更为剧烈,解离复合系数的下降就进一步导致等离子体通道寿命的延长。实验成果与理论分析共同表明了外加电场对等离子体通道寿命延长的有效性和可行性。

## 2 实 验

我们的实验中使用了商业化钛宝石激光器系统,中心波长 800 nm,脉宽 100 fs,重复频率 10 Hz,脉冲能量 25 mJ。实验装置如图 1 所示,能量为 2 mJ 的激光脉冲经过  $f=50$  cm 的透镜聚焦后,在空气中产生了长度约为 3 cm 的等离子体通道。在

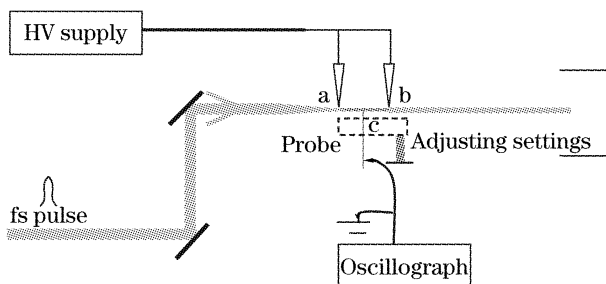


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

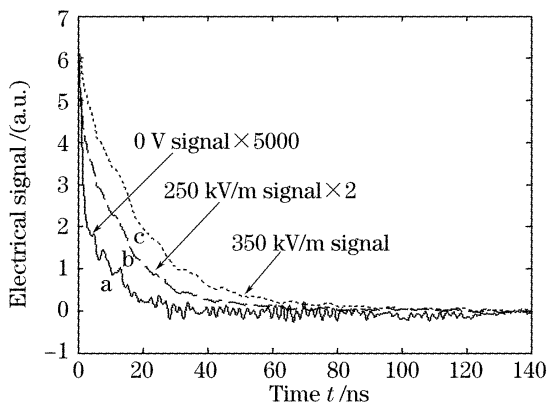


图 2 实线 a, 虚线 b, 点线 c 分别对应了外加电压 0 V, 250 kV/m, 350 kV/m 的电信号

Fig. 2 Solid line a, dashed line b and dotted line c are electrical signals with external electric voltages of 0 V, 250 kV/m, 350 kV/m respectively

得到的等离子体通道的两端 a 和 b, 我们外加了直流高压(变化范围 0~350 V/m)。金属探针 c 通过三维调整装置被置于通道附近, 与探针相连的是高频采样的示波器。我们改变外加的直流高压, 测量了等离子体通道内的电信号。所得的测量结果如图 2 所示。从图 2 中的电信号(曲线 a, b, c)可以看到, 随着外加电压的升高, 等离子体通道寿命得到了延长(从 20 ns 被延长至 60 ns 左右)。

## 3 理论分析

为了研究在外加高压电场条件下, 等离子体通道寿命延长的原因, 这里我们考虑空气中等离子体通道的弛豫机理。飞秒激光在空气中产生等离子体通道后, 激光等离子体通道作为一个包含有自由电子, 正离子, 负离子和中性分子的系统, 其弛豫过程的主要机理包括了: 电子离子复合过程; 正离子和负离子的复合过程、空气分子的碰撞电离过程、电子被空气中氧气吸附的过程、氧气的去吸附过程等等。结合性分离反应引起的退吸附以及碰撞导致的退吸附在室温条件下很小, 与其他项相比可以忽略不计。因此, 根据文献[14, 15], 有下列速率方程组:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \alpha n_e - \eta n_e - \beta_{ep} n_e n_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \alpha n_e - \beta_{ep} n_e n_p - \beta_{np} n_n n_p, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} = \eta n_e - \beta_{np} n_n n_p, \quad (3)$$

其中  $\alpha$  为碰撞电离系数,  $\eta$  为吸附率,  $\beta_{ep}$  和  $\beta_{np}$  分别为电子和正离子、负离子和正离子之间的复合系数。 $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\beta_{ep}$  和  $\beta_{np}$  与外加电场强度, 空气密度, 温度等等参量有关。为了研究外加电场强度对整个弛豫过程的作用机理, 我们分别研究外加电场强度对各个参量的影响。

自由电子在外加电场中被加速, 得到足够的能量的情况下将导致碰撞电离, 这里的碰撞电离系数为<sup>[15]</sup>

$$\alpha(s^{-1}) = \left(\frac{N}{N_0}\right) \frac{5.7 \times 10^8 \gamma^5}{1 + 0.3 \gamma^{2.5}}, \quad (4)$$

$N$  是空气密度,  $N_0 = 2.688 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ ,  $\gamma = 3.34 \times 10^{-7} E / (N/N_0)$ ,  $E$  为外加电场强度。

外电场中由于二体和三体解离吸附作用, 电子被吸附到中性分子上, 这导致了自由电子大量减少。总吸附率为

$$\eta = \eta_2 + \eta_3, \quad (5)$$

$\eta_2, \eta_3$  分别为二体和三体吸附率, 表达式分别为<sup>[15]</sup>

$$\eta_2 (s^{-1}) = 1.22 \times 10^8 \left( \frac{N}{N_0} \right) \exp(-42.3/E_0), \quad (6)$$

$$\eta_3 (s^{-1}) = 10^8 \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 \frac{0.62 + 800E_0^2}{1 + 10^3 E_0^2 [E_0(1 + 0.003E_0^2)]^{1/3}}, \quad (7)$$

这里  $E_0 = 3.34 \times 10^{-5} E(N/N_0)$ 。

根据(4)式~(7)式, 分别得到在外加电压不同的情况下不同的参量值, 具体数值如表 1。根据表 1 得到的参量, 对速率方程组进行计算得到如图 3 所示的结果。

表 1 各种电场条件下的参量表

Table 1 Parameters in different electric field

	a: $E=0$	b: $E=250 \text{ kV/mc}$	$E=350 \text{ kV/m}$
$\alpha$	0	$2.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$	$1.2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
$\eta_2$	0	$7.7 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$	$3.3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
$\eta_3$	$6.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	$2.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	$2.0 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
$\eta$	$6.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	$2.8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	$2.4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$

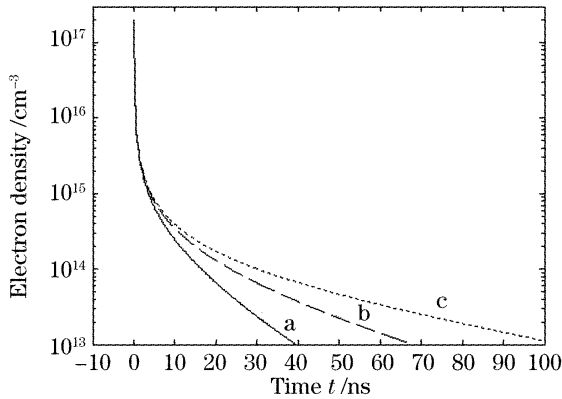


图 3 在未考虑电场对复合系数影响时, 不同的外加电场作用下, 对应的等离子体通道的弛豫过程。对应的参量如表 1 所示。取复合系数  $\beta_{ep} = \beta_{np} = 2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$

Fig. 3 Decay processes of plasma channels in different external electrical fields. Here, the impact on recombination rate by electric field is not included. Parameters used here are listed in Table 1 with the recombination rate  $\beta_{ep} = \beta_{np} = 2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$

从图 3 可以看到, 外加电场作用下, 等离子体通道的寿命得到了一定的延长。这是由于外加了高压电场后, 电子在电场中做加速运动, 碰撞电离效应得到增强。同时, 导致自由电子数目减少的吸附作用在总体上也减小了。所以, 总的电子弛豫时间得到了延长。但是可以看到, 这里通道寿命的延长仅在低密度范围。我们进一步考虑, 外加高压电场对复合系数的影响。

由于在电子密度高于  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  量级范围内, 外

加高压对碰撞电离效应以及吸附作用的影响并不明显, 因此, 在这个范围内, 我们仅考虑得到随着解离复合系数减小相应的等离子体通道寿命的数值模拟, 取  $\alpha = 2.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}, \eta = 2.8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。从文献 [15, 16] 中, 可以看到  $\beta_{ep}$  和  $\beta_{np}$  这两个系数的普遍表达式为

$$\begin{aligned} \beta_1 (\text{m}^3/\text{s}) &= 2.035 \times 10^{-12} T e^{-0.39}, \quad (e^- - N_2^+), \\ \beta_2 (\text{m}^3/\text{s}) &= 1.138 \times 10^{-11} T e^{-0.70}, \quad (e^- - O_2^+), \quad (8) \\ \beta_{ep} &= 0.79\beta_1 + 0.21\beta_2, \end{aligned}$$

由于  $\beta_{ep}$  和  $\beta_{np}$  有相同的数量级, 因此在计算中, 我们取  $\beta_{ep} = \beta_{np}$ 。我们认为, 当外加直流高压时, 在解离复合中起作用的位能曲线的相对位置发生了变化<sup>[16]</sup>, 导致随着电子平均能量的增加, 解离复合系数将比  $T e^{-0.39}$  以及  $T e^{-0.70}$  下降的更剧烈, 而解离复合系数的下降会导致等离子体通道寿命的延长<sup>[15, 16]</sup>。我们得到在不同的解离复合系数下的等离子体通道寿命曲线, 如图 4 所示的 a, b, c 曲线所示。可以看到随着解离复合系数减小, 电子密度在几十纳秒范围内仍能保持在  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  量级以上。

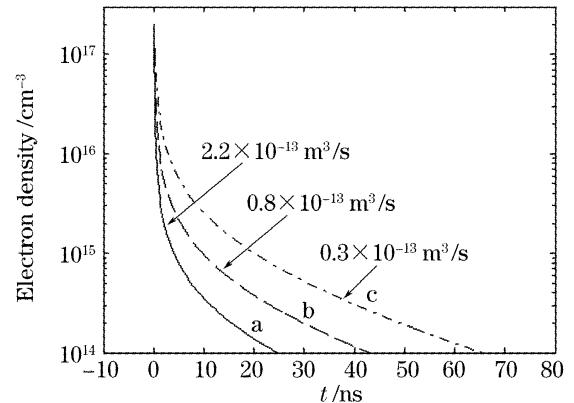


图 4 图中 a, b, c 对应了不同的解离系数  $\beta_{ep} = \beta_{np}$  分别为 a:  $2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ , b:  $0.8 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ , c:  $0.3 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$

Fig. 4 Different dissociative rate  $\beta_{ep} = \beta_{np}$  are used here a:  $2.2 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ , b:  $0.8 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ , c:  $0.3 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$

## 4 结 论

我们通过对飞秒脉冲激光在空气中产生的等离子体通道两端外加高压, 来研究有关等离子体通道寿命的特性。从实验中, 我们看到, 随着等离子体通道两端外加高压的升高, 等离子体通道寿命得到了延长。在此基础上, 我们进行了理论计算与分析。我们认为, 在外加高压电压的情况下, 碰撞电离效应得到增强, 导致自由电子数目减少的吸附作用在总

体上也减小了。经过进一步分析外加高压电场对于解离复合系数的影响,我们认为,在外加高压电场条件下,解离复合系数随入射电子能量上升而下降的趋势更为剧烈,这将进一步导致等离子体通道寿命的延长。我们的实验结果以及理论计算与分析说明了,利用外加高压来延长等离子体通道寿命的可行性与合理性。

### 参 考 文 献

- 1 A. Braun, G. Korn, X. Liu *et al.*. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1): 73~75
- 2 E. T. J. Nibbering, P. F. Curley, G. Grillon *et al.*. Conical emission from self-guided femtosecond pulses in air[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1): 62~64
- 3 Miguel Rodriguez, Riad Bourayou, Guillaume Méjean *et al.*. Kilometer-range nonlinear propagation of femtosecond laser pulses[J]. *Phy. Rev. E*, 2004, **69**(3): 036607
- 4 Hu Xueyuan, Zhong Fangchuan, Deng Jian *et al.*. Ultra-short intense laser pulse propagating in atmosphere: behavior of self-focusing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 1~5 (in Chinese)  
胡雪原, 钟方川, 邓建等. 超短强激光脉冲在大气传播中的自聚焦行为[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 1~5
- 5 S. A. Hosseini, Q. Luo, B. Ferland *et al.*. Effective length of filaments measurement using backscattered fluorescence from nitrogen molecules[J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**(6~7): 697~702
- 6 R. Ackermann, K. Stelmaszyk, P. Rohwetter *et al.*. Triggering and guiding of megavolt discharges by laser-induced filaments under rain conditions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(23): 5781~5783
- 7 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 (in Chinese)  
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
- 8 W. Liu, Q. Luo, S. L. Chin. Competition between multiphoton/tunnel ionization and filamentation induced by powerful femtosecond laser pulses in air[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(1): 56~59
- 9 F. Vidal, D. Comtois, C.-Y. Chien *et al.*. Modeling the triggering of streamers in air by ultrashort laser pulses[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(3): 418~433
- 10 Yu Huade, Chen Zhaoyang, Tu Qinfen *et al.*. Non-relativistic intense laser propagation characteristics in the plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 1~5 (in Chinese)  
余华德, 陈朝阳, 屠琴芬等. 强激光在等离子体中的传播特性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 1~5
- 11 J. Kasparian, M. Rodriguez, G. Méjean *et al.*. White-light filaments for atmospheric analysis[J]. *Science*, 2003, **301**: 61~64
- 12 H. Yang, J. Zhang, W. Yu *et al.*. Long plasma channels generated by femtosecond laser pulses[J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **65**(1): 016406
- 13 X. Lu, Xi Tingting, Li Yingjun *et al.*. Lifetime of the plasma channel produced by ultra-short and ultra-high power laser pulse in the air[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(10): 3404~3408 (in Chinese)  
鲁欣, 奚婷婷, 李英竣等. 超短超强脉冲激光在空气中产生的电离通道的寿命研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(10): 3404~3408
- 14 Hui Yang, Jie Zhang, Yingjun Li *et al.*. Characteristics of self-guided laser plasma channels generated by femtosecond laser pulses in air[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **66**(1): 016406
- 15 X. M. Zhao, Jean-Claude Diels, Cai Yi Wang *et al.*. Femtosecond ultraviolet laser pulse induced lightning discharges in gases[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(3): 599~612
- 16 M. A. Biondi. Recombination. in *Principles of Laser Plasmas*[M]. G. Bekefi, ed. New York: Wiley, 1976. 125~157
- 17 Dong Quanli, Yan Fei, Zhang Jie *et al.*. The measurement and analysis of the prolonged lifetime of the plasma channel formed by short pulse laser in air[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3247~3250 (in Chinese)  
董全力, 燕飞, 张杰等. 大气中激光等离子体通道寿命的延长及测量分析[J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3247~3250