

文章编号: 0253-2239(2010)01-0299-05

# 温度梯度控制成丝中的脉冲自压缩

孔维鹏<sup>1</sup> 曹士英<sup>2\*</sup> 庞冬青<sup>1</sup> 柴路<sup>1</sup> 王清月<sup>1</sup> 张志刚<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

<sup>2</sup> 北京大学信息科学技术学院量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100871

**摘要** 研究了温度梯度控制成丝中的自压缩现象。以充有  $2.0 \times 10^5$  Pa 氩气的密闭气体作为成丝介质, 在焦点处加热, 由热传导形成温度梯度。25 °C, 0.8 mJ 能量入射输出脉冲在没有任何色散补偿手段的情况下自压缩到 17 fs, 其傅里叶脉冲变换极限为 5.5 fs。将脉冲能量提高到 2.7 mJ, 在中心为 450 °C 的温度梯度下, 输出脉冲自压缩到 19 fs, 其傅里叶脉冲变换极限为 14.5 fs。通过温度控制将自压缩的能量提高了近 2 mJ, 实现了从脉冲自压缩到单丝脉冲展宽继而多丝的过程。

**关键词** 超快光学; 飞秒激光; 温度梯度; 自压缩; 成丝

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0299

## Pulse Self-Compression in Temperature Gradient Controlled Filamentation

Kong Weipeng<sup>1</sup> Cao Shiyong<sup>2</sup> Pang Dongqing<sup>1</sup> Chai Lu<sup>1</sup>

Wang Qingyue<sup>1</sup> Zhang Zhigang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

<sup>2</sup> *State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Institute of Quantum Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China*

**Abstract** The phenomenon of pulse self-compression in temperature gradient controlled filamentation is demonstrated.  $2.0 \times 10^5$  Pa argon gas sealed in quartz tube as the propagation medium, heating up at the focus, forms temperature gradient because of the heat conduction. At 25 °C, the input pulse energy is 0.8 mJ, the output pulse self-compresses to 17 fs without dispersion compensation, and the Fourier transform limit pulse is 5.5 fs. When the energy is up to 2.7 mJ, and temperature gradient at the center is 450 °C, the output pulse self-compresses to 19 fs and the Fourier transform limit pulse is 14.5 fs. The energy of self-compression increases by nearly 2 mJ through temperature control, achieves the process from self-compression to single-filament pulse broadening and then multi-filamentation.

**Key words** ultrafast optics; femtosecond laser; temperature gradient; self-compression; filamentation

## 1 引言

超短脉冲成丝技术发展到现在已经越来越成熟, 采用充气空心光纤和在惰性气体中成丝是目前获取周期级脉冲的两种基本手段。其原理都是首先在频域内对种子光进行光谱展宽, 然后对展宽后的

光谱进行色散补偿。充气空心光纤已经实现了最窄 2.8 fs 的脉冲输出<sup>[1]</sup>, 能量只有几百微焦到一毫焦。惰性气体成丝技术, 由于在自由空间成丝, 避免了空心光纤的复杂操作, 取得了接近空心光纤的光谱展宽效果, 但是引入过高能量会产生多丝现象, 导致输

收稿日期: 2009-03-06; 收到修改稿日期: 2009-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(60490280, 60778010)和天津市自然科学基金(07JCYBJC15500)资助课题。

作者简介: 孔维鹏(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事超快激光方面的研究。E-mail: kongweipeng229@163.com

导师简介: 张志刚(1955—), 男, 博士, 教授, 主要从事超快激光方面的研究。E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: caoshiying@hotmail.com

出光斑质量下降,无法进行压缩。采用梯度气压<sup>[2]</sup>的方法可以解决脉冲在传输过程中自聚焦以及多丝的产生,已在实验上获得证实<sup>[3~5]</sup>,并且能量达到几个微焦,在实现过程中,由于需要不断充气以保持气压的梯度,一方面造成了大量惰性气体浪费,另一方面引入了气流的扰动。

采取温度梯度控制成丝的方案,已经在数值模拟温度梯度空心光纤中实现了良好的展宽<sup>[6]</sup>,并且在氩气成丝实验中证实了温度控制成丝是一种自由控制成丝实现光谱展宽的技术,是实现高能量周期级飞秒脉冲的新方法<sup>[7]</sup>。高能量飞秒脉冲在成丝过程中伴随有脉冲自压缩现象<sup>[8~15]</sup>,此时成丝现象并不明显,提高能量会出现明显的单丝,由于自相位调制(SPM)效应光谱得到展宽,继续提高则出现多丝现象。本文通过实验证实了温度控制成丝中的自压缩现象,并通过提高温度的方法提高了自压缩的能量;通过温度控制实现了脉冲自压缩到单丝光谱展宽继而发生多丝。为进一步提高脉冲能量,掌握自压缩及成丝规律,寻求最佳的展宽压缩条件,提供了实验依据。

## 2 理论背景

气体成丝过程中有很多复杂的线性和非线性作用,例如自相位调制、自聚焦、群延迟色散、拉曼散射、电离等。其中自相位调制、自聚焦、群延迟色散可能把脉冲能量聚集到前沿,但是电离和拉曼散射可能会切断脉冲后沿。从而可能使出射脉冲大大短于入射脉冲,最终不需要任何压缩过程就可以得到周期量级的高能量脉冲,即脉冲自压缩。

气压梯度实质上是气体分子密度的梯度分布,即气压低的地方气体密度低,从而影响其非线性折射率较低,导致自聚焦阈值和电离阈值都比较高;气压高的地方气体密度高,从而影响其非线性折射率较高,导致自聚焦阈值和电离阈值都比较低。可以想象,在温度梯度中,高温对应低分子密度,低温对应高分子密度。所以,温度梯度和气压梯度在本质上是相通的,但是由于温度梯度的可控性,必将成为一种自由控制成丝实现光谱展宽的新技术。定义密度参量  $D_F$  来描述梯度气压及梯度温度量<sup>[3]</sup>。在理想气体状态下,密度参量  $D_F$  定义为

$$D_F = pT_0 / (p_0 T). \quad (1)$$

式中  $p_0$  和  $T_0$  是标准条件下的气压和温度,即  $p_0 = 1.0 \times 10^5$  Pa,  $T_0 = 273.15$  K。对于氩气气体,其非线性折射率  $n_2$  与密度参量  $D_F$  之间的关系可以表

示为

$$n_2 = 9.8 \times 10^{24} \times D_F. \quad (2)$$

对于高斯脉冲,自聚焦的临界功率可以表示为

$$P_{cr} = \lambda_0^2 / 2\pi n_2, \quad (3)$$

式中  $P_{cr}$  为临界功率,  $\lambda_0$  为中心波长。

实现温度梯度的方案是:在密闭充气石英管的某一位置加热,其它位置由空气冷却,由于热传导形成温度梯度。在相同气压下,气体的非线性折射率  $n_2$  随着温度的增加而降低,因此导致自聚焦阈值随着温度的增加而升高。图 1 所示是在充氩气  $2.0 \times 10^5$  Pa 条件下,石英管内部非线性折射率  $n_2$  和自聚焦阈值  $P_{cr}$  随温度变化的关系。可通过温度控制  $n_2$ , 也就是控制  $P_{cr}$ , 继而控制成丝。

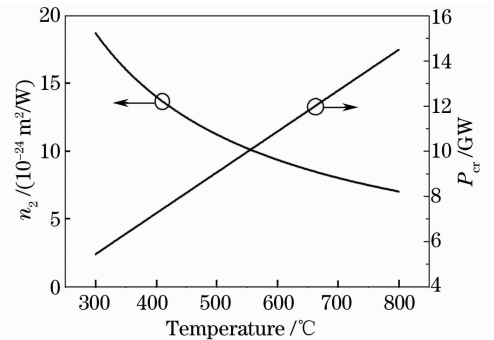


图 1 在充氩气条件下,非线性折射率  $n_2$  和自聚焦阈值  $P_{cr}$  随温度变化的关系

Fig. 1 Relation of non linear refractive index and the self-focusing threshold with temperature changes under the condition of filling argon gas

## 3 实验装置

实验系统结构如图 2 所示。光源为钛宝石啁啾脉冲放大器(CPA),输出光的中心波长为 800 nm,脉冲宽度为 35 fs,重复频率为 1 kHz,输出光斑直径约为 10 mm,最大能量为 6 mJ。为了便于控制成

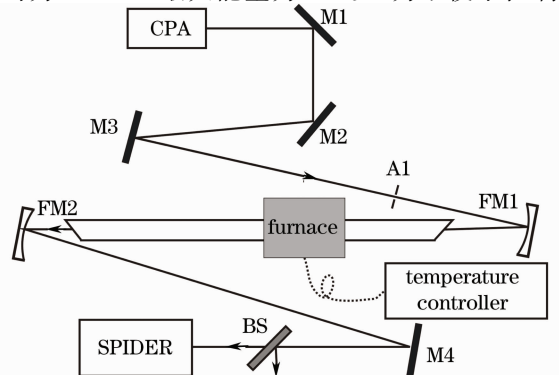


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic of the experimental setup

丝,放置可变光阑 A1 进行衰减。值得注意的是,CPA 光源光斑的不稳定性极大地影响成丝质量,不利于输出脉冲的测量,放置光阑对于成丝稳定性有一定帮助,但是解决光源稳定性依然是今后需要考虑的问题。从放大系统出射的光经平面镜 M1, M2, M3 反射后,利用曲率半径为 1.7 m 的凹面反射镜 FM1 进行聚焦,将入射激光耦合入密闭气体,焦点位置距离入射窗 47.5 cm。

实验中采用的密闭石英管,长度为 1 m,内径 30 mm。密闭玻璃管两端以布儒斯特角度切割,并且用 1 mm 石英片进行密封。整个密闭玻璃管充氩气作为传输介质,气压表位于出射窗附近以检测密闭玻璃管内的压强变化。实验开始时为室温 25 °C,石英管内压强为  $2.0 \times 10^5$  Pa。成丝后的输出光束由凹面反射镜 FM2 收束后采用光谱相位相干直接电场重构法 (SPIDER) 对脉冲的频域和时域信息进行测量。加热装置 furnace 在焦点处加热,温控装置 (temperature controller) 的反应灵敏度为 0.1 °C,所以只要达到设定温度,就能稳定地保持温度梯度。如图 3 所示,当温控装置设置为 500 °C 时,利用热电偶测量距离加热装置中心位置不同距离处的温度分布,由此实现温度梯度。增加温度后石英管内的压强会从  $2.0 \times 10^5$  Pa 上升到  $2.3 \times 10^5$  Pa,但是对实验并无太大影响。当加热中心和焦点相接近甚至重合时,焦点处峰值功率密度最大,而气体密度最小;焦点两侧峰值功率密度相对于焦点处峰值

功率密度逐渐递减,而气体密度由于温度梯度的影响在焦点两侧逐渐递增。因此,焦点处的自聚焦阈值最大,两侧递减,正好和光强分布一致,所以管子内部各处的自聚焦现象都可以得到有效的抑制。

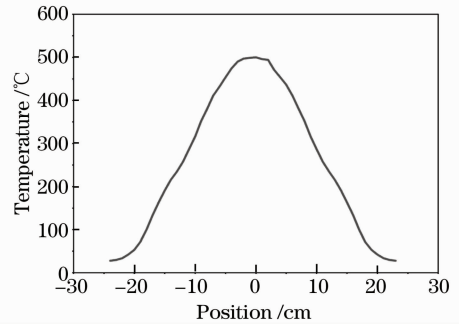


图 3 温控装置设置为 500 °C 时,密闭石英管内部温度分布  
Fig. 3 When the temperature controller is set to 500 °C, the internal temperature distribution in sealed quartz tube

#### 4 实验结果

室温 25 °C 下,石英管内  $2 \times 10^5$  Pa 时,引入 0.7 mJ 能量的脉冲,频域光谱和相位信息如图 4(a) 所示,经过密闭气体,成丝现象并不明显,只在焦点处有极短白丝,输出光脉宽由入射时的 35 fs 自压缩到了 23.5 fs,其傅里叶变换极限为 16 fs 如图 4(b) 所示。当引入脉冲能量提高到 0.8 mJ,频域光谱和相位信息如图 4(c) 所示,此时脉冲自压缩现象显著,输出光脉宽进一步压缩到 17 fs,其傅里叶变换极限为 5.5 fs,如图 4(d) 所示。

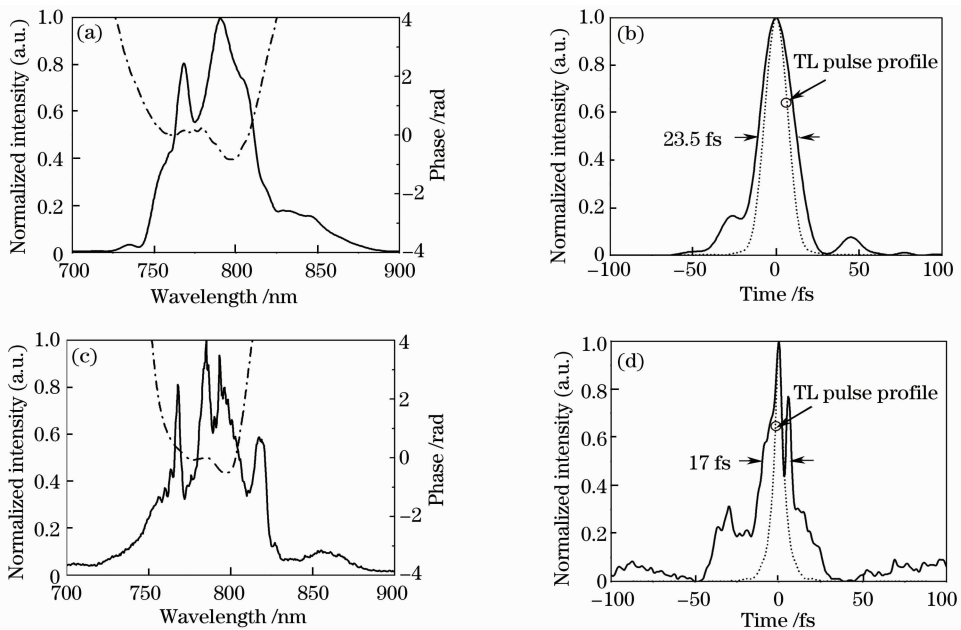


图 4 25 °C 输出脉冲自压缩的频域和时域信息

Fig. 4 Spectral and temporal profiles of output self-compression pulse at 25 °C

继续提高能量,成丝逐渐变长,呈现明显单丝,单丝长度可达 30 cm。1.1 mJ 时输出脉冲展宽到 84 fs。当引入脉冲能量到达 1.3 mJ 时,石英管中成丝在焦点后 5 cm 处分裂成为多丝,输出光至远场观察,可见光斑快速分裂聚合。为验证温度可以控制多丝变为单丝,增加能量到 1.7 mJ,此时多丝现象明显,使用温度控制系统加热,当加热中心温度提到 170 °C 时,多丝转变为单丝,脉冲展宽到 123 fs 输出光至远场观察,光斑稳定。在 170 °C 条件下提高

能量到 2.7 mJ 再次出现明显多丝,使用温度控制系统加热,当加热中心温度到达 400 °C 时,多丝又转变为单丝,再次验证了温度控制实现多丝变为单丝。为了验证温度控制实现单丝展宽到脉冲自压缩,在 2.7 mJ, 400 °C 时继续加热。当加热中心到达 450 °C,成丝现象不再明显,此时输出脉冲宽度自压缩至 19 fs,其傅里叶变化极限为 14.5 fs,如图 5(a) 和图 5(b) 所示。

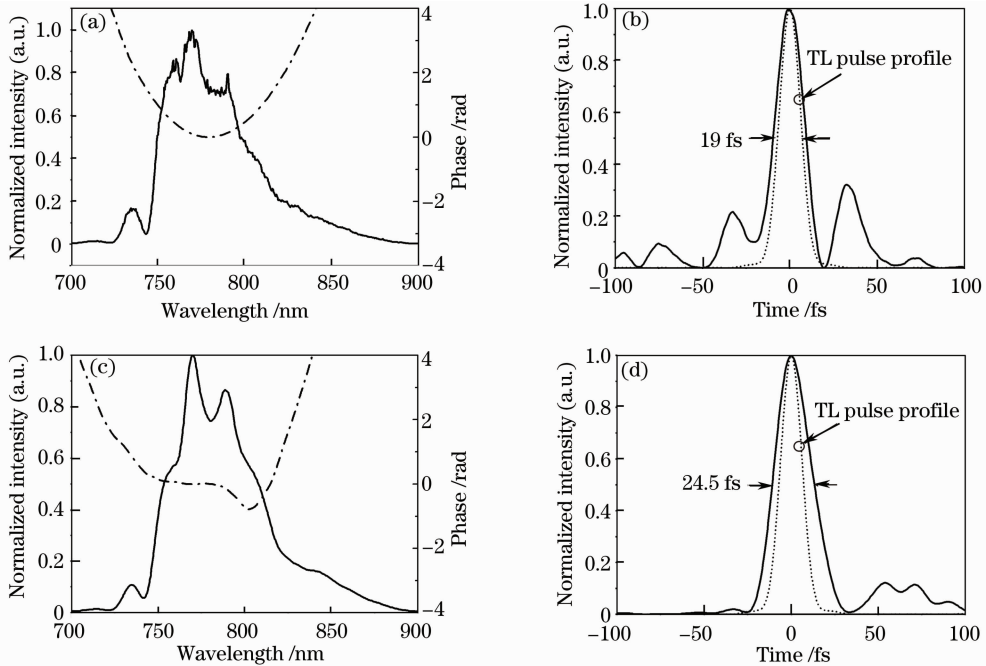


图 5 2.7 mJ 输出脉冲自压缩的频域和时域信息

Fig. 5 Spectral and temporal profiles of 2.7 mJ output self-compression pulse

此时相比较 0.8 mJ 自压缩至 17 fs,自压缩能量提高了近 2 mJ。继续加热到 500 °C,输出脉冲宽度自压缩至 24.5 fs,其傅里叶变化极限为 15 fs,如图 5(c) 和图 5(d)。此时成丝现象基本消失。在加热中心温度为 500 °C 的条件下,继续提高引入脉冲能量,当达到 5.7 mJ 时,再次实现单丝脉冲,并展宽到 69 fs。此时相比没有加温导致的多丝情况,用 500 °C 的温度使能量提高了近 4 mJ,并成功克服了多丝的产生。值得提出的是所得到的单丝展宽光谱都支持产生 10 fs 以下的脉冲。

如果定义脉冲自压缩率  $S$  为傅里叶脉冲变换极限与实际获得的自压缩脉冲宽之比。那么  $S$  反映了在没有任何色散补偿手段下自压缩的好坏, $S=1$  为理想值。如表 1 所示。

初步分析认为,相同温度下,能量提高有利于自压缩,但更高能量下的自压缩率比较低,需要色散补

偿才能达到理想值。相同能量下,不同温度梯度下的自压缩率会略有不同,低温下的自压缩率相对较高。

表 1 自压缩比

Table 1 Self-compression ratio

Temperature / °C	Energy / mJ	Real pulse width / fs	Transform limit / fs	$S$
25(No gradient)	0.7	23.5	16	0.6809
25(No gradient)	0.8	17	5.5	0.3235
450(Gradient)	2.7	19	14.5	0.7632
500(Gradient)	2.7	24.5	15	0.6122

## 5 结 论

实验研究了温度梯度控制成丝中的自压缩现象,并通过温度控制提高了脉冲自压缩的能量。25 °C, 0.8 mJ 时输出脉冲在没有任何色散补偿手段的情况下自压缩到 17 fs,其傅里叶脉冲变换极限为 5.5 fs。将脉冲能量提高到 2.7 mJ,通过温度控

制在加热中心为 450 °C 时, 输出脉冲自压缩到 19 fs, 其傅里叶脉冲变换极限为 14.5 fs. 通过温度控制实现了从脉冲自压缩到单丝脉冲展宽继而多丝的过程. 为进一步提高脉冲能量, 避免多丝产生, 寻求最佳的展宽压缩条件, 提供了实验依据. 还可以为通过自压缩及成丝技术获取高能量周期量级飞秒脉冲提供实验基础.

### 参 考 文 献

- 1 E. Matsubara, K. Yamane, T. Sekikawa *et al.*. Generation of 2.6 fs optical pulses using induced phase modulation in a gas-filled hollow fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(4): 985~989
- 2 M. Nurhuda, A. Suda, K. Midorikawa *et al.*. Propagation dynamics of femtosecond laser pulses in a hollow fiber filled with argon; constant gas pressure versus differential gas pressure[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 2002~2011
- 3 J. H. Sung, J. Y. Park, T. Imran *et al.*. Generation of 0.2-TW 5.5-fs optical pulses at 1 kHz using a differentially pumped hollow-fiber chirped-mirror compressor [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**(1): 5~8
- 4 A. Suda, M. Hatayama, K. Nagasaka *et al.*. Generation of sub-10-fs, 5-mJ-optical pulses using a hollow fiber with a pressure gradient[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(16): 1~3
- 5 J. S. Robinson, C. A. Haworth, H. Teng *et al.*. The generation of intense, transform-limited laser pulses with tunable duration from 6 to 30 fs in a differentially pumped hollow fibre [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **85**(4): 525~529
- 6 Z. Song, Y. Qin, G. Zhang *et al.*. Femtosecond pulse propagation in temperature controlled gas-filled hollow fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(15-16): 4109~4113
- 7 S. Y. Cao, W. P. Kong, Z. Wang *et al.*. Filamentation control in the temperature gradient argon gas[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **94**(2): 265~271
- 8 Gero Stibenz, Nikolai Zhavoronkov, Günter Steinmeyer. Self-compression of millijoule pulses to 7.8 fs duration in a white-light filament[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 254~256
- 9 Sun Gang, Zhang Qiuju, Wu Huichun *et al.*. Self-compression of femtosecond intense laser pulses in plasma[J]. *J. Atomic and Molecular Physics*, 2007, **24**(6): 1161~1165  
孙 刚, 张秋菊, 武慧春等. 飞秒强激光脉冲在等离子体中的自压缩[J]. *原子与分子物理学报*, 2007, **24**(6): 1161~1165
- 10 Chen Xiaowei, Zhu Yi, Liu Jun *et al.*. Self-compression of femtosecond laser pulses in normally dispersive solid material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11): 5178~5183  
陈晓伟, 朱 毅, 刘 军等. 飞秒激光脉冲在正常色散固体材料中的自压缩[J]. *物理学报*, 2005, **54**(11): 5178~5183
- 11 Chen Xiaowei, Liu, Jun Zhu Yi *et al.*. Self-compression of high-intensity femtosecond laser pulses in air[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(8): 3665~3669  
陈晓伟, 刘 军, 朱 毅等. 高强度飞秒激光脉冲在空气中的自压缩[J]. *物理学报*, 2005, **54**(8): 3665~3669
- 12 Li Xiaofang, Liu Jun, Chen Xiaowei *et al.*. Spatiotemporal self-compression of circularly polarized and linearly polarized pulses in normally dispersive media [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1882~1886  
李小芳, 刘 军, 陈晓伟等. 圆偏振光和线偏振光在正常色散材料中的时空自压缩[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1882~1886
- 13 I. G. Koprnikov, Akira Suda, Pengqian *et al.*. Self-compression of high-intensity femtosecond optical pulses and spatiotemporal solution generation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(17): 3847~3850
- 14 O. Shorokhov, A. Pukhov, I. Kostyukov. Self-compression of laser pulses in plasma[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(26): 265002-1
- 15 Nicholas L. Wagner, Emily A. Gibson, Tenio Popmintchev *et al.*. Self-compression of ultrashort pulses through ionization-induced spatiotemporal reshaping[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(17): 173902-1