

# 飞秒强激光经氩气和氩团簇的传播\*

王向欣 王 成 李邵辉 倪国权 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 通过数值求解三维电场传播方程, 理论模拟了飞秒强激光脉冲(50 fs,  $10^{16}$  w/cm<sup>2</sup>) 在氩气和中等尺寸氩团簇中的传播效应. 结果表明, 飞秒强激光脉冲经氩气传播将发生频谱蓝移展宽和光束发散; 而经中等尺寸氩团簇传播, 则存在一定程度的自聚焦效应.

**关键词** 非线性光学; 飞秒激光; 氩气; 氩团簇

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

## 0 引言

在适当的高背压下, 惰性气体经喷嘴向真空超声绝热膨胀的过程中冷却凝聚而形成团簇. 团簇介于单个原子分子和凝聚态之间, 由多个原子分子靠范德瓦耳力聚合在一起, 因此团簇在宏观上是气体密度, 而微观上却是固体密度, 正是由于团簇这种特殊的尺寸结构特点, 超短超强激光与团簇相互作用和超短超强激光与气体相互作用具有不同的行为特征. 在超短超强激光与气体相互作用中, 飞秒强激光脉冲在气体中的传播, 将受到电离引起的时空调制, 发生频谱蓝移展宽和光束发散<sup>[1,2]</sup>, 从而降低了激光脉冲的聚焦功率密度, 阻碍了激光和气体实现高功率密度和高电子密度的相互作用; 与气体的情况明显不同, 在飞秒强激光脉冲与团簇相互作用中, 由于团簇集体平均极化率的调制效应, 存在着自聚焦现象<sup>[3]</sup>. 本文通过数值求解介质中三维传播方程, 分别在理论上模拟了飞秒强激光脉冲在氩气和中等尺寸氩团簇中的传播, 比较了飞秒强激光脉冲在气体和团簇中的不同传输特性.

## 1 计算模型

由麦克斯韦方程结合介质中相应的极化强度  $P$  来模拟飞秒强激光脉冲在介质中的传播. 采用慢变振幅波近似<sup>[4]</sup>, 可得运动坐标系下的三维电场传播方程<sup>[5]</sup>

$$\partial_t E(r_{\perp}, \xi, \tau) - \frac{c}{2} \nabla_{\perp}^2 \int_{-\infty}^{\tau} d\tau' E(r_{\perp}, \xi, \tau') = -\frac{2\pi}{c} \partial_{\tau} P[E(r_{\perp}, \xi, \tau)]$$

其中  $c$  是真空光速, 运动坐标  $\xi = z, \tau = t - z/c, r_{\perp} = (x, y), \nabla_{\perp}^2$  为横向拉普拉斯变换. 当在波长距离内极化波对激光场产生的影响很小时, 慢变振幅波近似成立. 一般情况下慢变振幅近似适用于欠稠密介质如气体, 对于团簇, 虽然其局部密度接近固体, 但平均为气体密度, 故基本上满足慢变振幅近似. 且该传播方程对激光脉宽无任何限制, 适用于超短飞秒激光脉冲.

在气体中, 依据准静态模型<sup>[6]</sup>, 利用经典牛顿运动方程得到<sup>[5]</sup>

$$\partial_{\tau} P(r, \tau) = I_p \left( \frac{\partial_{\tau} n_e(r, \tau)}{E(r, \tau)} \right) + \frac{e^2}{m} \int_{-\infty}^{\tau} d\tau' n_e(r, \tau') \cdot E(r, \tau')$$

式中  $I_p$  为离化势, 因气体中碰撞电离影响很小, 只考虑光场电离机制, 由 ADK 电离率公式计算光场电离率.

对于团簇, 其电离膨胀过程采用流体动力学模型<sup>[7]</sup>来模拟计算, 每个团簇被近似看作一个均匀膨胀的等离子体小球, 等离子体球内每个原子感受的电场是等离子体球在外场中由于极化产生的屏蔽场,  $E' = \frac{3}{|\epsilon + 2|} E$ , 介电常数  $\epsilon$  为等离子体的介电常数,  $\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + iv)}$ , 其中  $\omega_p$  是等离子体频率,  $\omega_p =$

$\sqrt{4\pi e^2 n_e / m_e}$ ,  $v$  是电子-离子碰撞频率. 因团簇局部密度较高, 电离机制除光场电离外还要考虑碰撞电离, 包括热电子碰撞电离和激光驱动电子碰撞电离. 每个等离子体球即每个团簇的偶极距为  $p = \frac{4}{3} \pi r_c^3 (\epsilon - 1) E' = \frac{4}{3} \pi r_c^3 \frac{\epsilon - 1}{|\epsilon + 2|} E$ , 其中  $r_c$  为团簇半径. 记空间团簇密度为  $n_c$ , 则团簇集体的宏观极化强度  $P = n_c p$ . 极化强度随时间的演变在激光周期上取平均可得,  $\partial_{\tau} P = \frac{\omega}{2} P$ .

\*国家自然科学基金(No. 29890210)和上海科技基金(No. 0159nm022)资助  
Tel: 021-64941016 Email: wangxiangxin@mail.siom.ac.cn  
收稿日期: 2004-04-23

## 2 结果与分析

取激光为基模高斯光束形式,参数如下:波长 792 nm,脉宽 50 fs,真空焦斑半径 15  $\mu\text{m}$ ,真空聚焦功率密度  $10^{16} \text{ w/cm}^2$ . 考虑到激光团簇相互作用中的脉宽和团簇尺寸的相关效应,对于所选脉宽 50 fs 的激光脉冲,在其持续时间内,较大尺寸的团簇不能充分膨胀,只有中等尺寸团簇能膨胀经过共振点,从而与其充分相互作用. 采用四阶龙格-库塔方法,数值计算上述传播方程,分别模拟激光脉冲在氩气和中等尺寸氩团簇中传播 100  $\mu\text{m}$  后的光场变化,进行傅里叶变换得到光场的径向和频域分布.

取对应不同密度的氩气计算所得的光场中心频率处的一维径向分布和光斑中心处的一维频谱分别如图 1 和图 2. 从图 1 可以看出,激光在氩气中传播其光斑变得发散,且气体密度越大,发散越严重,径向光场由原始的高斯分布逐渐向环状过渡. 观察光场的频谱分布图 2,发现激光在氩气中传播,其频谱发生蓝移展宽,随着气体密度增加,激光频谱的蓝移量增加,频谱变得更宽. 上述光场的径向和频谱变化反映了飞秒强激光脉冲在气体传播时电离气体形成等离子体过程中受到的自相位调制效应<sup>[1]</sup>. 时间上,电离发生引起电子密度增加,折射率减小,使激

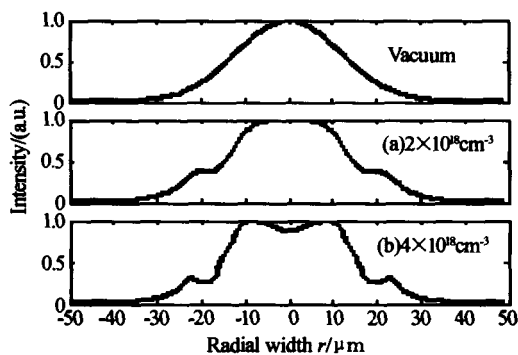


图 1 经不同密度氩气传播的光场径向变化  
Fig. 1 Radial profiles of transmitted-pulses in Ar gases with different density

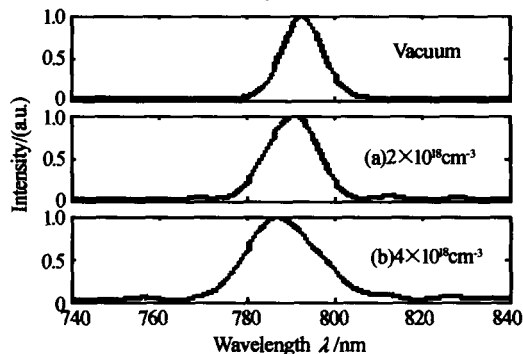


图 2 经不同密度氩气传播的光场频谱变化  
Fig. 2 Transmitted-pulse spectra in Ar gases with different density

光脉冲发生蓝移. 径向上,因光场原始横向强度的高斯分布,电离将产生相似电子密度分布,相反的折射率分布类似于负透镜,使光斑发散.

飞秒激光脉冲在不同初始半径的氩团簇中传播的径向和频谱变化的数值计算结果分别示于图 3 和图 4. 图 3 中光场的径向分布显示出,激光脉冲经团簇传播光斑有变小的趋势,说明激光脉冲在氩团簇传播过程中发生了自聚焦,而且团簇初始半径越大,光斑会聚程度越大,即自聚焦程度也越大. 从图 4 看到,经氩团簇传播,飞秒激光的频谱在短波和长波方向均有展宽,两侧展宽基本对称,随团簇初始半径增大,激光频谱展宽量增加. 这些变化反映了团簇集体的电离膨胀对激光脉冲的宏观相位调制<sup>[3]</sup>,在团簇整个膨胀时间过程中,团簇集体平均极化率因而折射率会经过由正到负的变化过程,膨胀前期,团簇平均极化率从零正方向缓慢增加,其在径向上的分布沿径向减小,从而相似的折射率分布,相当于正透镜将使光束会聚,引起自聚焦;膨胀后期的径向折射率分布与气体中相似将使其中传播的激光光斑发散;中期是逐渐过渡阶段. 对于我们计算所取的参数条件,激光脉冲持续时间覆盖团簇膨胀的前期和中期的前半部分,自聚焦影响较大,而且折射率先缓慢增加,接着迅速下降,因而频谱近似对称展宽.

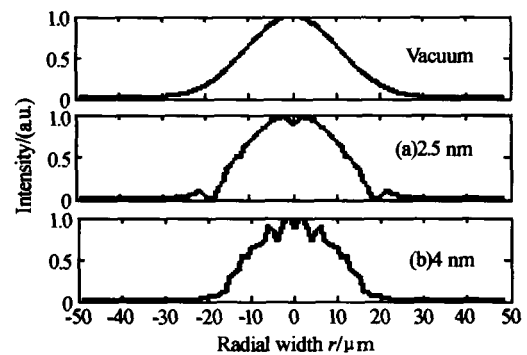


图 3 经初始半径不同的氩团簇传播的光场径向变化  
Fig. 3 Radial profiles of transmitted pulses in Ar clusters with different initial radius

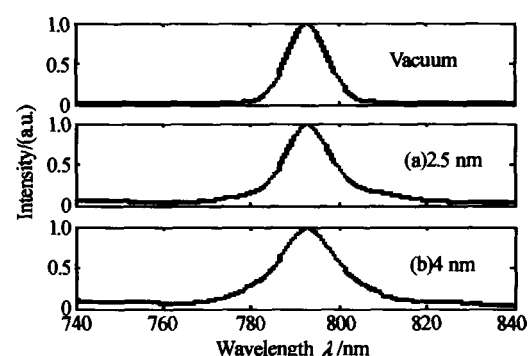


图 4 经初始半径不同的氩团簇传播的光场频谱变化  
Fig. 4 Transmitted-pulse spectra in Ar clusters with different initial radius

### 3 结论

从上述分析比较可知,飞秒强激光脉冲经气体和经团簇传播所受影响有很大不同.激光在气体中将受到电离引起的频谱和空间调制,发生频谱蓝移展宽和光斑发散,不能理想聚焦达到高激光功率密度条件下的激光气体相互作用;而在激光脉冲作用下电离膨胀的团簇将可能引起激光的自聚焦,这种自聚焦现象将对实现激光理想聚焦达到高功率激光团簇相互作用产生正面影响.

#### 参考文献

- 1 Chessa P, Wispelaere E D, Dorchies F, *et al.* Temporal and angular resolution of the ionization-induced refraction of a short laser pulse in Helium gas. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**(3): 552~555
- 2 Nikitin S P, Yuelin L, Antonsen T M, *et al.* Ionization-induced pulse shortening and retardation of high intensity femtosecond laser pulses. *Opt Commun*, 1998, **157**(1-6): 139~144
- 3 Alexeev I, Antonsen T M, Kim K Y, *et al.* Self-focusing of intense laser pulses in a clustered gas. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**(10): 103402
- 4 Brabec T, Krausz F. Nonlinear optical pulse propagation in the single-cycled regime. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(17): 3282~3285
- 5 Geissler M, Tempea G, Scrinzi A, *et al.* Light propagating in field-ionizing media: extreme nonlinear optics. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**(15): 2930~2934
- 6 Corkum P B, Burnett N H, Brunel F. Above-threshold ionization in the long-wavelength limit. *Phys Rev Lett*, 1989, **62**(11): 1259~1262
- 7 Ditmire T, Donnelly T, Rubenchik A M, *et al.* Interaction of intense laser pulses with atomic clusters. *Phys Rev A*, 1996, **53**(5): 3379~3402

## Propagation of Intense Femtosecond Laser Pulses in Ar Gas and Ar Clusters

Wang Xiangxin, Wang Cheng, Li Shaohui, Ni Guoquan, Xu Zhizhan

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2004-04-23

**Abstract** The propagation of intense femtosecond laser pulses ( $50 \text{ fs}$ ,  $10^{16} \text{ w/cm}^2$ ) in Ar gas and middle-size Ar clusters is modelled by solving 3D propagation equation numerically. The results show that the intense femtosecond laser pulses propagating in Ar gas will experience ionization-induced modulations, including spectral blueshifting and beam refraction, while self-focusing may occur for the intense femtosecond laser pulses propagating in Ar clusters.

**Keywords** Nonlinear optics; Femtosecond laser pulse; Ar gas; Ar clusters

**Wang Xiangxin** was born in 1979, in Henan Province. Now she is a master candidate in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. She is working in the field of nonlinear optics. Her research interests at present is nonlinear interactions of high-intensity ultrashort-pulse laser with matter.

