

飞秒激光成丝过程中由等离子体光栅引起的超连续谱增强与转移*

张宗昕 许荣杰 宋立伟 王丁 刘鹏[†] 冷雨欣[‡]

(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)

(2012年1月20日收到; 2012年2月7日收到修改稿)

在飞秒宽带激光脉冲成丝过程中, 由于双光束干涉效应而形成的空间等离子体光栅, 研究了空气中飞秒宽带激光脉冲成丝所产生的超连续谱增强效应, 并进一步观测到泵浦光脉冲成丝产生的超连续谱能量向较弱的未成丝的探测光脉冲转移, 有效拓展探测光脉冲带宽的新现象. 通过基于布拉格衍射特性的理论计算较好地解释了实验结果.

关键词: 激光成丝, 超连续谱, 等离子体光栅, 布拉格衍射

PACS: 42.65.Jx, 52.38.Hb, 42.65.Sf

1 引言

从传统的刻划光栅到全息光栅、超声光栅等, 光栅的发展对近代物理学的进步起到了极大的推动作用. 仅以超短激光脉冲的测量技术为例, 就有空间光谱干涉 (SSI)^[1,2]、应用达曼光栅的二次谐波型频率分辨光学门 (Dammann SHG-FROG)^[3] 等脉冲测量方法均与光栅相关. 而交叉传播的强激光与等离子体相互作用将会产生一种特殊的衍射光栅结构——等离子体光栅. 从原理上来讲, 这种光栅结构的形成与全息光栅的制作过程很相似: 当两束强激光在介质中交叉相互干涉时, 介质电离产生等离子体, 而干涉光场的周期性涨落会对等离子体的折射率分布起到调制作用, 因此在空间形成等离子体光栅. 与传统光栅相比, 等离子体光栅具备光栅周期等调节可控, 以及很高的光栅破坏阈值等特点, 故而在强场激光和空间光学等领域具有特殊的用途^[4,5].

对于等离子体光栅的研究, 早在 20 世纪 80 年代

就已经开始. 1997 年 Plaja 和 Roso 分析说明了在等离子体表面形成光栅结构的可能^[4]. 2003 年 Sheng 等对稀薄等离子体中光栅结构的形成进行了理论研究^[6], 随后又进一步分析了应用等离子体光栅对强激光进行啁啾脉冲压缩等各种操控^[7,8]. 2009 年 Suntsov 等在实验中观测到了等离子体光栅的存在^[5]. 同年报道的还有等离子体光栅对三次谐波产生的影响^[9], 以及有人提出了光波导阵列的观点对这种光栅结构进行了描述^[10,11], 从而掀起了对等离子体光栅研究的新热潮. 近年来, 更多的实验和理论成果说明了等离子体光栅与光场间的相互作用关系^[12-14], 并发展出了二维等离子体光栅^[15]和动态等离子体光栅^[16,17]等.

本文主要对在飞秒宽带激光脉冲成丝过程中由于双光束干涉效应而形成的等离子体光栅, 以及由等离子体光栅所引起的超连续谱布拉格衍射进行了实验和理论研究, 发现等离子体光栅对于成丝超连续谱的产生具有增强作用, 并且在合适的条件下实现了超连续谱能量从一束光到另一束光的转移新现象等, 最后通过基于布拉格衍射特性的理论

* 国家自然科学基金 (批准号: 10734080, 60921004, 60908008, 61078037, 11134010, 60978012)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB808101) 和国际科技合作计划 (批准号: 2011DFA11300) 资助的课题.

[†] E-mail: peng@mail.siom.ac.cn

[‡] E-mail: lengyuxin@mail.siom.ac.cn

对实验结果进行了分析和解释.

2 实验

实验所用钛宝石飞秒激光器的主要性能指标为: 输出激光脉冲的半高全宽约为 30 fs, 工作波长在 800 nm 左右, 脉冲重复频率为 1 kHz, 最高单脉冲输出能量约为 5.3 mJ. 如图 1 所示, 钛宝石飞秒激光器输出的激光经过衰减后被 1:1 的分束片分为泵浦光和探测光, 探测脉冲经过一个时间延迟线的调节后, 与泵浦脉冲一起平行入射到焦距为 15 cm 的凹面镜, 经过其反射后聚焦. 最终两束激光以约 3.8° 的夹角在同一平面内交叉, 并利用光纤光谱仪对其光谱形状进行探测.

首先, 实验中泵浦光和探测光的单脉冲能量被控制在 0.5 mJ, 即单脉冲平均功率为 $1.67 P_{cr}$ (空气中 30 fs 激光脉冲自聚焦的阈值功率 P_{cr} 约为 10 GW)^[18]. 在这种情况下, 泵浦光和探测光分别在空气中产生成丝效应. 由于在成丝过程中自相位调制、自陡峭效应和等离子体的共同作用, 泵浦光和探测光激光光谱向高频端展宽从而产生超连续谱^[19]. 我们首先对飞秒激光脉冲成丝前后的光谱分别进行了测量, 如图 2 中所示. 单个飞秒激光脉冲成丝产生的超连续谱的最大峰值在 760 nm 处, 且在波长小于 750 nm 的高频方向有较大的光谱展宽, 这主要是由等离子体作用和陡峭脉冲前沿经自相位调制而造成的. 而 835 nm 处的小谱峰可能是由较平缓的脉冲前沿经自相位调制而产生的. 当泵浦光和探测光共同成丝时, 通过调节时间延迟线使两脉冲在空间和时间上相互重叠交叉. 当交叉区域的荧光强度最大时, 探测脉冲与泵浦脉冲在时间和空间上达到精确同步. 此时两光

丝交叉干涉从而形成空间等离子体光栅结构, 并造成飞秒激光脉冲成丝所产生的光谱在短波方向的展宽程度有所增强. 由图 2 中可见, 与单脉冲成丝的光谱相比, 双脉冲干涉成丝所产生的超连续谱主峰仍在 760 nm 处, 但在短波方向得到了明显的扩展, 光谱覆盖范围在短波长方向可以达到约 600 nm 处.

然后, 通过衰减器把探测光的单脉冲能量衰减为 0.1 mJ, 即脉冲平均功率约为 $0.33 P_{cr}$. 此时探测光自身不再满足成丝条件, 在空气中无法成丝, 但探测光与成丝的泵浦光干涉仍能在空间形成等离子体光栅, 只是在这种情况下存在相对较强的背景光. 由于等离子体光栅的布拉格衍射作用, 泵浦光成丝效应干涉增强所产生的展宽光谱成分将向探测光转移. 因此如图 3 中实线所示的探测光光谱在短波方向还是产生了明显展宽, 且展宽增强部分基本保持了图 2 超连续谱中对应的谱峰特征. 通过改变探测脉冲与泵浦脉冲之间的时间延迟 τ , 超连续谱能量的转移状况也将随之发生变化, 如图 3 所示. τ 为正时表示探测脉冲迟于泵浦脉冲, 而 τ 为负时表示探测脉冲先于泵浦脉冲. $\tau = -71.5$ fs 时探测光光谱稍有展宽且出现多峰结构. 此时存在较弱的自相位调制作用, 由脉冲不同部位产生的相同光谱成分间相互干涉从而呈现出这种特殊形态. $\tau = -21.5$ fs 时探测光脉冲前沿与泵浦光脉冲前沿相互作用, 探测光光谱在短波方向有所展宽但相对较弱. $\tau = 21.5$ fs 时探测光脉冲前沿与较为陡峭的泵浦脉冲后沿相互作用, 探测光光谱展宽较强且在低频端可以看到交叉相位调制的影响. 当 $\tau = 71.5$ fs 时探测脉冲不再与泵浦光脉冲发生直接相互作用, 但泵浦光成丝所产生等离子体还会对探测光脉冲造成吸收、散射等影响.

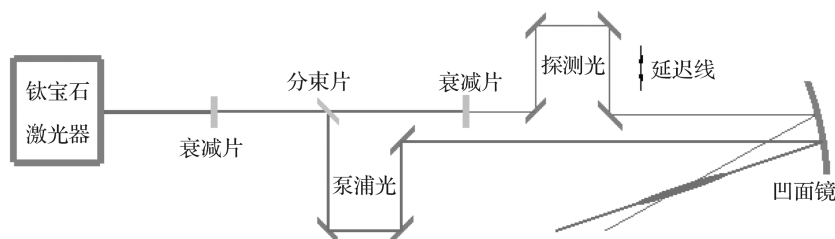


图 1 实验装置示意图

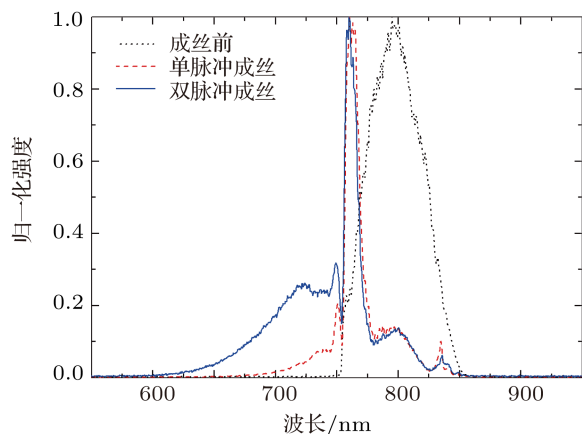


图2 飞秒激光脉冲成丝前光谱(点线)、0.5 mJ 飞秒激光脉冲成丝后的光谱(虚线)与双脉冲干涉成丝所产生的超连续谱(实线)

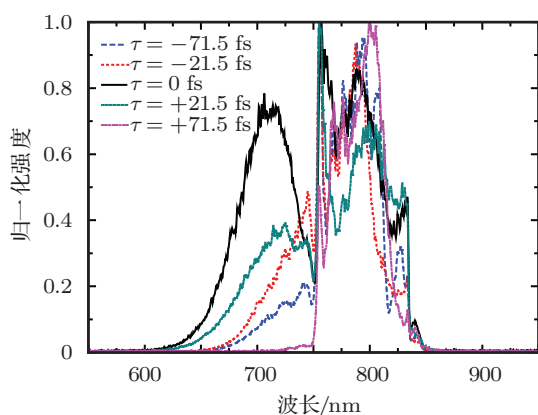


图3 探测光脉冲与泵浦光脉冲之间的时间延迟分别为 -71.5, -21.5, 0, 21.5 和 71.5 fs 时的探测光光谱

3 结果分析

飞秒激光脉冲在空气中成丝时可引发气体分子电离, 从而形成一个由等离子体构成的通道. 而在等离子体通道内发生双光束交叉干涉时, 便可以形成一个等离子体光栅, 其寿命约为几十 ps^[5]. 等离子体光栅的空间周期为

$$\Lambda = \lambda_0 / [2n_p \sin(\alpha/2)], \quad (1)$$

式中 λ_0 为所用飞秒激光的初始波长, 而 n_p 为与等离子体密度相关的通道内折射率, α 则表示这两束激光的交叉夹角^[7].

等离子体光栅对于波长和入射角符合一定条件的入射光可以实现布拉格衍射, 布拉格衍射条件可以表述为

$$n\lambda = 2\Lambda \sin(\theta_B), \quad (2)$$

式中 n 代表衍射级次, λ 为入射到等离子体光栅上的光波长, θ_B 表示该入射光的 n 级布拉格角^[17].

由(1)式和(2)式, 可得一级布拉格角

$$\theta_B(\lambda) = \sin^{-1} \left[\frac{n_p \lambda}{\lambda_0} \sin(\alpha/2) \right]. \quad (3)$$

假设两束交叉干涉激光的最大发散角为 φ , 如果满足

$$0 < \frac{\alpha - \varphi}{2} \leq \theta_B(\lambda) \leq \frac{\alpha + \varphi}{2} < 90^\circ, \quad (4)$$

那么就可以实现宽带激光脉冲能量在这两束激光之间的转移, 在本实验中主要体现为探测光脉冲和泵浦光脉冲之间光谱上的能量转移.

对于满足(2)式和(4)式的入射光, 等离子体光栅的衍射效率为

$$\eta(\lambda) = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n_p L}{\lambda} \right), \quad (5)$$

其中, L 为等离子体光栅的有效作用距离, 与两光束的交叉夹角 α 和光丝直径等因素相关, 而 Δn_p 是由等离子体密度调制所引起的折射率变化幅度.

可见, 光谱能量的衍射情况在一定程度上反映了等离子体光栅内等离子体密度的调制状况^[5]. 实验中当 $\alpha = 3.8^\circ$ 时两光束相互作用区域长度 L 约为 2.0 mm, 结合双光丝光谱增强(如图2中实线所示)和经等离子体作用的探测光光谱(对应于图3中点画线), 当 $\Delta n_p = 8.1 \times 10^{-4}$ 时, 由(5)式计算所得结果如图4所示, 与实验结果符合较好. 在实验结果中, 探测光光谱在波长 835 nm 处具有较大的谱峰, 这可能是在交叉相位调制中泵浦光脉冲较为陡峭的后沿对探测光脉冲光谱所产生的影响.

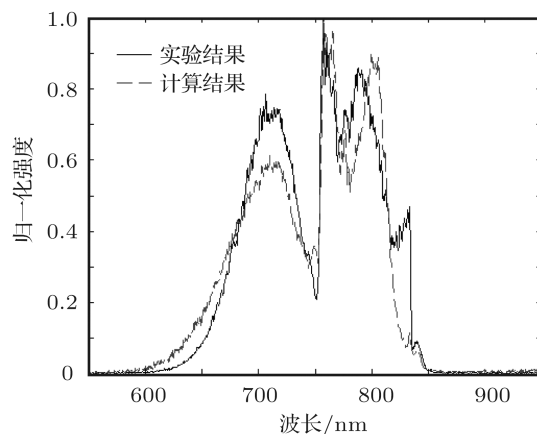


图4 探测光和泵浦光脉冲同步时探测光光谱的变化(实线为实验结果, 虚线为理论计算的结果)

4 结论

宽带飞秒激光在空气中成丝可以产生等离子体通道, 利用双光束干涉效应在等离子体通道内形成一个空间等离子体光栅, 这种特殊的等离子体光栅结构增强了由飞秒激光脉冲成丝所产生的超连续谱. 同时等离子体光栅还会对超连续谱产生布拉

格衍射效应, 利用等离子体光栅的这一特点实现了超连续谱能量从成丝泵浦光脉冲到较弱未成丝探测光脉冲的转移, 有效拓宽了探测光脉冲的光谱, 且实验结果与理论计算结果符合比较好. 基于本项工作, 并结合等离子体光栅便于调节、破坏阈值高等其他特点, 有可能利用等离子体光栅对宽带超短强激光脉冲光谱进行精密调控等.

-
- [1] Meshulach D, Yelin D, Silberberg Y 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 2095
- [2] Tanabe T, Tanabe H, Teramura Y, Kannari F 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2795
- [3] Dai E W, Zhou C H, Li G W 2005 *Opt. Express* **13** 6145
- [4] Plaja L, Roso L 1997 *Phys. Rev. E* **56** 7142
- [5] Suntsov S, Abdollahpour D, Papazoglou D G, Tzortzakis S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 251104
- [6] Sheng Z Z, Zhang J, Umstadter D 2003 *Appl. Phys. B* **77** 673
- [7] Wu H C, Sheng Z M, Zhang Q J, Cang Y, Zhang J 2005 *Phys. Plasmas* **12** 113103
- [8] Wu H C, Sheng Z M, Zhang J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 201502
- [9] Wu H, Yang T J, Wang Y L, Ding L E 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 645
- [10] Yang X, Wu J, Peng Y, Tong Y Q, Lu P F, Ding L E, Xu Z Z, Zeng H P 2009 *Opt. Lett.* **34** 3806
- [11] Xu S, Zheng Y, Liu Y, Liu W 2010 *Laser Phys.* **20** 1968
- [12] Wang Y D, Zhang Y S, Chen P, Shi L P, Lu X, Wu J, Ding L E, Zeng H P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 111103
- [13] Wahlstrand J K, Milchberg H M 2011 *Opt. Lett.* **36** 3822
- [14] Shi L P, Li W X, Wang Y D, Lu X, Ding L E, Zeng H P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 095004
- [15] Liu J, Li W X, Pan H F, Zeng H P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 151105
- [16] Liu Y, Durand M, Chen S, Houard A, Prade B, Forestier B, Mysyrowicz A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 055003
- [17] Durand M, Liu Y, Forestier B, Houard A, Mysyrowicz A 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 121110
- [18] Liu W, Chin S L 2005 *Opt. Express* **13** 5750
- [19] Couairon A, Mysyrowicz A 2007 *Phys. Rep.* **441** 47

Supercontinuum enhancement and transfer induced by a plasma grating in air*

Zhang Zong-Xin Xu Rong-Jie Song Li-Wei Wang Ding

Liu Peng[†] Leng Yu-Xin[‡]

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

(Received 20 January 2012; revised manuscript received 7 February 2012)

Abstract

We experimentally investigate the plasma grating created by two intersecting ultrashort laser pulses, and its effects on the supercontinuum generated from femtosecond laser filamentation. The enhanced supercontinuum generation is observed, with a plasma grating formed. And an energy transfer of the supercontinuum is demonstrated, from one pulse to the other, due to the diffraction property of plasma grating. The theoretical calculation accords well with the experimental result.

Keywords: laser filamentation, supercontinuum, plasma grating, Bragg diffraction

PACS: 42.65.Jx, 52.38.Hb, 42.65.Sf

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10734080, 60921004, 60908008, 61078037, 11134010, 60978012), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB808101), and International S&T Cooperation Program of China (Grant No. 2011DFA11300).

[†] E-mail: peng@mail.siom.ac.cn

[‡] E-mail: lengyuxin@mail.siom.ac.cn