

强激光长程空气传输受激转动拉曼散射效应实验研究

王 静 韩 伟 周丽丹 李 平 向 勇 钟 伟 冯 斌 张小民

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 研究了强激光长程空气传输过程中主光束能量损耗与光束质量退化效应。使用 1053 nm 单波长、线偏振、脉宽 3 ns 平顶激光脉冲于空气环境中长距离传输, 当入射光强与传输距离乘积大于 13.7 TW/cm 时, 传输末端测得的光束光谱分布中出现了多种散射光频率成分, 各散射光成分和 1053 nm 主激光间的频率差与氮气分子不同转动能级间跃迁频率一致, 证明氮气分子的受激转动拉曼散射效应已建立。受激转动拉曼散射过程中, 入射光束功率密度微弱变化所产生的散射光能量变化剧烈。入射光强与传输距离乘积大于 17 TW/cm 时, 传输末端光束近场分裂为无序密布特征尺寸约 1 mm 的热斑, 峰值通量密度远高于入射光束通量密度。

关键词 受激转动拉曼散射; 发生阈值; 能量损耗; 近场光束质量退化; 热斑

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100410

Experimental Research on Stimulated Rotational Raman Scattering in Air with High-Power Laser

Wang Jing Han Wei Zhou Lidan Li Ping Xiang Yong Zhong Wei
Feng Bin Zhang Xiaomin

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Propagation of high intensity laser beams through long air paths suffering from energy loss and beam quality deterioration was experimentally demonstrated. For linearly polarized, 3 ns flat-topped laser pulse at 1053 nm, when the intensity-path-length product of main laser pulse was above 13.7 TW/cm, the spectrum measured at the end of propagation showed the occurrence of stimulated rotational Raman scattering as frequency shifts from main laser of 1053 nm to the sideband components produced during propagation, corresponds to the transition between rotational states of nitrogen molecules. During the process of stimulated rotational Raman scattering, the energy loss will vary dramatically with even minor changes in the intensity of input laser pulse. Furthermore, the near field degrades to intense speckle pattern and thickly dotted hot spots with characteristic diameters about 1mm were observed at an intensity-length product above 17 TW/cm.

Key words stimulated rotational Raman scattering; threshold; energy loss; near field beam quality deterioration; hot spots

OCIS codes 190.0190; 140.0140; 290.0290

1 引 言

惯性约束聚变(ICF)需要高功率固体激光驱动器输出数百束强激光光束均匀辐照靶面。对数百束大口径光束进行编组使之均匀入射靶室, 空间排布的结果为编组站位置光束管道长达数十米。若管道中光束传输介质为空气, 空气对高功率激光脉冲的非线性光学响应成为 ICF 驱动器性能评估的一大难题。研究表明, 空气中氮气(N_2)分子的受激转动

拉曼散射(SRRS)阈值较低, 是强激光长程空气传输过程中最主要的寄生非线性光学效应^[1~8]。

强激光长程空气传输过程中, 入射光场与 N_2 分子转动能级间跃迁相耦合, 部分能量驱动能级跃迁由自发辐射转变为受激放大, 剩余能量转换为散射光输出, 不同转动能级间跃迁对应产生的散射光波长不同, 该过程称为 N_2 的 SRRS 效应。由于介质能级跃迁起源于量子涨落, 具有随机的空间强度

收稿日期: 2011-01-12; 收到修改稿日期: 2011-02-15

作者简介: 王 静(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事非线性光学等方面的研究。E-mail: wangjingxt@gmail.com

导师简介: 张小民(1955—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率激光驱动器等方面的研究。E-mail: zxmcaep@gmail.com

及位相分布,产生的散射光束空间相关性极差,这部分能量无法用于ICF物理实验。另外, N_2 分子转动能级跃迁的受激放大机制一旦建立,入射光束能量迅速向散射光成分转移,并且入射光强微弱的变化对应的散射光产生份额变化显著,这意味着SRRS效应不仅降低驱动器输出光束可聚焦功率,还将导致束间功率严重不平衡,进一步破坏ICF等熵压缩过程。

目前国内对高能激光脉冲长程空气传输SRRS效应的研究局限于数值模拟^[9~11],本文基于神光Ⅲ原型装置开展强激光长程空气传输研究实验,观察到了 N_2 的SRRS效应,着重研究SRRS过程中入射光束能量损耗及光束质量退化的增长规律,获得SRRS效应影响高功率激光驱动器装置性能的阈值条件。

2 四维数值模型

慢变振幅近似下受激拉曼散射的过程中主激光损耗、Stocks放大和物质极化可描述为^[3~5]

$$\left(\nabla_{\perp}^2 + \frac{\partial}{\partial z}\right)E_L = -i\kappa_2 Q E_S, \quad (1)$$

$$\left(\nabla_{\perp}^2 + \frac{\partial}{\partial z}\right)E_S = -i\kappa_2 Q^* E_L, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q^*}{\partial \tau} = -\Gamma Q^* + i\kappa_1 E_S E_L^* + F^*, \quad (3)$$

式中 E_L 、 E_S 和 Q 分别为抽运光,Stocks光及物质极化波的复振幅。 Γ 为拉曼线宽, κ_1 、 κ_2 为耦合系数。 F 表征分子碰撞引起的随机退相。

OMEGA^[3,4]与LIL^[5]都指出长程空气传输SRRS效应数值研究的难点在于所需采样率高,程序运算量大。事实上,光束长程传输的衍射效应,光束近场光强调制、位相畸变以及时域光强与位相调制均将影响相应SRRS效应,因此数值计算模型需具有4D,以实现对接口径强激光脉冲2D空间近场,与1D时间波形演变规律的模拟,并在光束传输方向1D描述物质极化。4D模型采样率的确定是影响程序结果准确性及运行时间的核心因素。为了兼顾准确度与速度,必须在深入掌握强激光长程传输SRRS物理机制的基础上,仔细设计各个维度所需数值模拟分辨力。考虑到光束近场光强调制点典型尺寸在厘米量级,空间分辨力定为亚毫米量级;考虑到物质激发对应的光学声子寿命为133 ps,时间分辨力定为皮秒量级。对物质极化的描述需要在光束传输方向切片,研究表明切片间隔应根据受激散

射过程在传输方向的增长快慢来决定。受激光散射的稳态增长满足

$$I_s = I_{s0} \exp(G) = I_{s0} \exp(gIz), \quad (4)$$

式中 I_{s0} 、 I_s 为初始位置及 z 位置处Stocks光强,因此 z 的采样必须保证 gIz 整体采样间隔不能太大。数值模拟发现保证 $1/gI$ 的距离内具有几十个采样点即可保证模拟的准确性。

3 实验装置

强激光长程空气传输SRRS效应实验装置示意图如图1所示。神光Ⅲ原型装置主放大级输出一1053 nm单波长,线偏振,脉宽为3 ns的矩形激光脉冲,由预放系统液晶光阀将输出光束口径限定为20 cm×20 cm,并由装置主放系统综合诊断组件监测每一发次主放输出光束的能量,近场分布及时间波形。将主放输出光束导入空气环境传输113 m,于传输末端搭建SRRS诊断与测量平台。由光学多通道分析(OMA)光谱仪测量传输末端光束光谱,以研究散射光成分的产生与增长规律。所用光谱仪光栅系数为1200 line/mm,可探测光谱范围为953~1153 nm。通过监测传输末端近场研究不同能量发次光束近场演变规律。实验共打了10发主放,能量分布于1.2~2.1 kJ之间。实验中强激光的空气传输环境洁净度控制在千级,属恒温恒压密闭环境,空气湍流微弱可忽略。

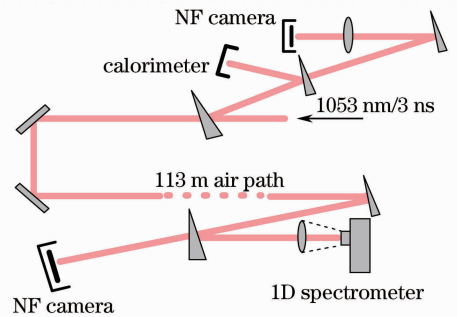


图1 强激光长程空气传输效应研究实验装置
Fig. 1 Experimental layout for the research on long air-path propagation with high-power laser pulse

4 实验结果及分析

4.1 主光束能量损耗增长规律

不同能量发次光束长程空气传输末端光谱如图2所示。图3为图2的光谱灰度统计处理得到的光谱强度分布曲线,可从该图读出各散射光成分的波长,对散射光成分强度进行积分所得结果除以所有光

谱成分强度积分值便得到传输末端拉曼散射光场能量份额,即 SRRS 效应导致的主光束能量损耗份额。

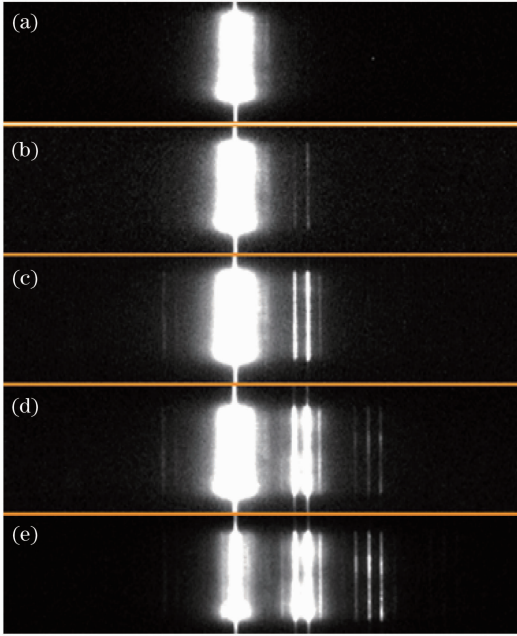


图 2 强激光长程空气传输末端光谱,对应的 IL 值分别为: (a) 13.7, (b) 15, (c) 16.5, (d) 17.9 和 (e) 19.6 TW/cm

Fig. 2 Spectrums of laser beam measured at the end of long air paths, with IL products of (a) 13.7, (b) 15, (c) 16.5, (d) 17.9 and (e) 19.6 TW/cm, respectively

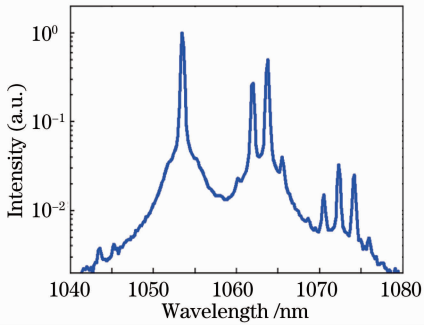


图 3 用于计算拉曼散射光场能量份额的光谱强度分布曲线
Fig. 3 Calibrated spectrum of SRRS used to determine the Raman generation rate

如图 2 所示,随着入射光束光强与传输距离乘积 IL 增长,多种边频成分逐渐产生并迅速增强。一般地,将频率下转换的散射光成分(图 2 右侧)称为 Stokes,频率上转换成分(图 2 左侧)称为反 Stokes。图 2(a)中可观察到两根微弱的 Stokes 谱线,包含能量约为总输出能量的 1%,此时 $IL=13.7$ TW/cm。 IL 一旦大于 13.7 TW/cm,散射光成分及所占输出能量份额急剧增加,如图 2(b)~(e)所示,因此将

13.7 TW/cm 定义为 1053 nm,线偏振,3 ns 强激光方脉冲长程空气传输 SRRS 效应发生阈值。

图 2(d)中出现四根一阶 Stokes 辐射谱线,波长分别为 1059.6,1061.4,1063.2 和 1065 nm,相对 1053 nm 主激光频移分别为 59,75,91 和 107 cm^{-1} ,分别对应 N_2 分子 S(6),S(8),S(10)与 S(12)转动能级跃迁^[1,2,7],证明了强激光长程空气传输过程中激发了 N_2 的 SRRS 效应。其中 S(8),S(10)最先出现,S(10)成分强于 S(8),如图 2(b)所示。图 2(c)中于 1053 nm 主激光谱线左侧出现了两根反 Stokes 谱线,波长分别为 1043 nm 和 1044.8 nm,相对主激光上频移分别为 75 cm^{-1} 和 91 cm^{-1} 。图 2(e)于一阶 Stokes 四根谱线的右侧出现了四根二阶 Stokes 谱线,波长依次为 1069.9,1071.8,1073.6 和 1075.6 nm,相对 1053 nm 主激光的频移依次为 150,166,182 和 199 cm^{-1} ,对应着 N_2 分子转动能级两级跃迁分别为 S(8)+S(8),S(8)+S(10),S(10)+S(10),S(10)+S(12),此时 IL 约为 19.6 TW/cm,该图中还观察到三根微弱的三阶 Stokes 谱线。

图 4 给出了传输末端拉曼散射光场能量份额与 IL 关系曲线。星号为实验测量数据,实线为理论计算值。可见散射光增长呈现出明显的阈值特性,当散射光能量份额大于 1%,即 IL 大于 SRRS 发生阈值,主激光能量迅速向散射光转移,另外,入射光强与传输距离乘积增加 10%,产生的散射光能量变化可大于 100%。实验结果表明,ICF 驱动器一般包含数百束强激光,若运行通量过高或于空气环境中传输距离过长,使得 IL 大于 SRRS 发生阈值,传输末端主激光能量损耗严重,束间功率及能量不平衡风险极大。

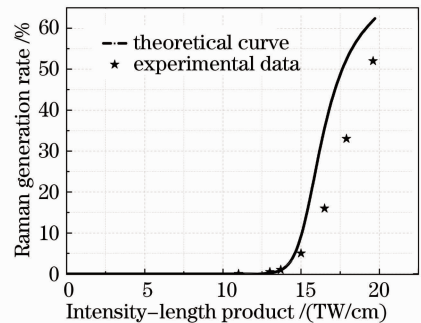


图 4 传输末端拉曼散射光场能量份额与 IL 关系曲线

Fig. 4 Raman generation with increasing IL product

图 4 显示数值模拟与实验结果在散射光增长的初始阶段吻合得较好,随着散射光能量持续增长,理论值高于实验测量值。这种差异来源于数值模拟中

进行了单一 Stocks 成分的假设,认为入射光束只激发介质分子一种能级跃迁,对应产生单一 Stocks 成分。而实验结果显示,随着 IL 持续增长,强激光长程空气传输末端出现了若干种 Stocks 及反 Stocks 成分,这表明入射光束在传输介质中激发了若干种能级跃迁,这些不同能级跃迁模式间的竞争必然导致散射光增长比单一 Stocks 成分假设下模拟的散射光增长慢,因此理论计算的散射光增长偏快。多种散射光间的竞争机制复杂,且 ICF 驱动器以规避 SRRS 为目的,只关心 SRRS 建立及初始增长过程,对数值模拟也只要求给出置信度足够高的发生阈值,因此数值模拟时进行单一 Stocks 成分假设是可行的。

4.2 输出光束近场质量退化规律

不同能量发次光束长程空气传输末端近场分布如图 5 所示。 $IL=16.5 \text{ TW/cm}$ 时,传输末端光束近场分布基本均匀; $IL=17.9 \text{ TW/cm}$ 时,近场强度调制显著增长,开始呈现分裂特征;当 IL 增大到 19.6 TW/cm ,近场出现无序密布的热斑,热斑尺寸约为 $1\sim 3 \text{ mm}$,通量远高于入射光束平均通量。

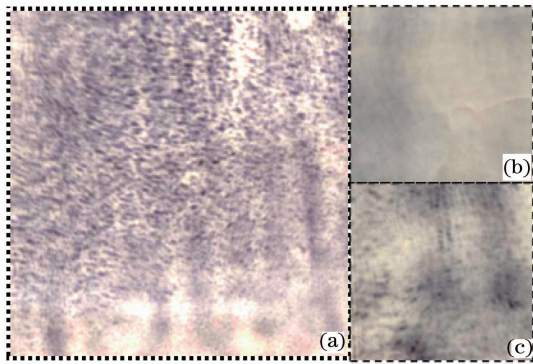


图 5 不同 IL 条件传输末端测得光束近场。
(a) 19.6 , (b) 16.5 和 (c) 17.9 TW/cm

Fig. 5 Experimental beam near field after propagation with different IL of (a) 19.6 , (b) 16.5 , and (c) 17.9 TW/cm

图 6 为强激光长程空气传输光束近场分布演变基于(1)~(3)式所得的数值模拟结果与实验测的近场特征基本吻合,数值模拟结果还显示近场热斑对应着散射光频率成分。值得一提的是,文献 [9] 给出的 SRRS 效应对抽运光束近场退化特征的理论模拟结果中未见图 5 所示的热斑形态,其原因可能为数值计算过程空间采样率过低。

强激光长程空气传输 SRRS 效应导致光束近场分裂式退化的原因是散射光起源于入射光场与介质分子能级跃迁间耦合,而能级跃迁又起源于量子噪声,空间强度及位相呈随机分布,因此耦合产生的初

始散射光近场也相应呈随机分布。初始散射光近场强区与入射光场强耦合驱动该位置介质分子能级跃迁放大的倍数大于初始散射光近场弱区,如此构成散射光近场不均匀性增长的正反馈机制。另外,近场不均匀的散射光束传输的衍射效应导致了近场调制进一步增长。

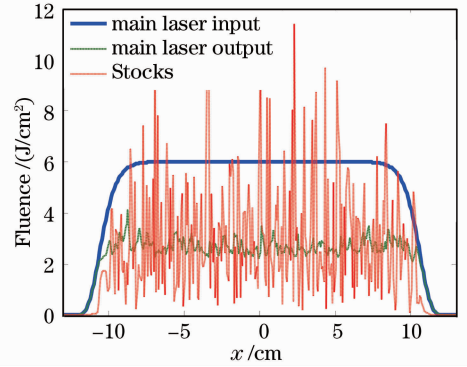


图 6 SRRS 效应中光束近场通量密度分布演变的数值模拟
Fig. 6 Numerical simulation of near field distribution during SRRS process

图 7 给出忽略衍射效应得到的传输光束近场演变特征,其余输入条件与图 6 一致,可见若不考虑衍射效应光束近场任一位置散射光通量密度总低于入射光通量密度。

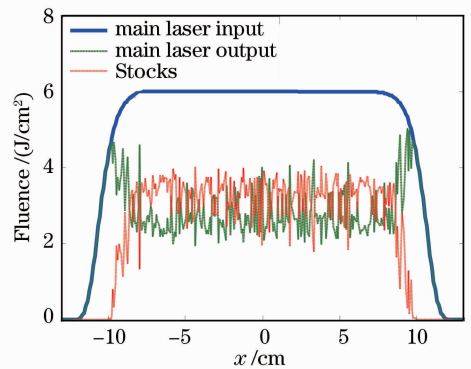


图 7 忽略光束长程传输衍射效应,模拟 SRRS 过程中光束近场分布演变

Fig. 7 One-dimensional beam near field fluence distribution neglecting the diffraction effect

强激光长程空气传输 SRRS 效应产生的散射光近场调制特性一方面证明了散射光能量对驱动器输出光束可聚焦功率无贡献,另一方面,散射光场峰值通量密度为入射光束功率密度若干倍将直接导致后继光学元件损伤。

5 结 论

基于神光 III 原型装置开展了 1053 nm , 线偏振,

口径 20 cm, 脉宽 3 ns 的平顶激光脉冲长程空气传输特性研究实验, 通过测量传输末端拉曼光谱验证了 SRRS 效应的发生, 获得 SRRS 导致主光束 1% 能量损耗对应的光束功率密度与传输距离乘积为 13.7 TW/cm, 由此定义 SRRS 发生阈值。装置一旦运行于阈值条件之上, 入射光能量散射迅速转换为多种 Stocks 与反 Stocks 成分, 构成主传输光束能量损耗机制, 入射光强与传输距离乘积变化 10%, 产生的散射光能量改变可能达到 100%, 构成 ICF 驱动器束间功率及能量不平衡机制。传输末端光束近场图像还表明, 光束功率密度与传输距离乘积大于 17 TW/cm 时, 光束近场出现密布的尺寸约为 1 mm, 通量密度为传输前光束通量密度若干倍的“热斑”, 这些“热斑”对应散射光频率成分, 构成了强激光长程空气传输过程中光束质量退化机制同时增大了后续光学元件损伤风险。

参 考 文 献

- 1 M. A. Henesian, C. D. Swift, J. R. Murray. Stimulated rotational Raman scattering in nitrogen in long air path[J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(11): 565~567
- 2 M. A. Henesian, C. D. Swift, J. R. Murray. Summary of stimulated Raman scattering experiments in the Nova air-path and projected Nova and Nova II system performance limits [C]. UCRL-TR-234110, 2007, LRD 85-342: 1~12
- 3 Y. Lin, T. J. Kessler, J. J. Armstrong. Laser system power balance effects from stimulated rotational Raman scattering in air [C]. *SPIE*, 1993, **1870**: 14~25
- 4 Y. Lin, T. J. Kessler, G. N. Lawrence. Raman scattering in air: four-dimensional analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(21): 4781~4791
- 5 E. Bordenave, T. Chies. Numerical stimulation of stimulated Raman scattering in LIL transport section with Miro propagation code and comparison with ENOLIT diagnostic result [J]. *J. Phys. IV France*, 2006, **133**: 661~663
- 6 G. Thiell, H. Grailot, P. Joly *et al.*. Laser physics studies with phebus as part of the megajoule laser project [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, **44**: 157~162
- 7 M. Rokni, A. Flusberg. Stimulated rotational Raman scattering in the atmosphere [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **22**(7): 1102~1108
- 8 R. Penano, P. Sprangle, P. Serafim *et al.*. Stimulated Raman scattering of intense laser pulses in air [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **68**(056502): 1~15
- 9 Zhang Shijie, Chen Jianhua, Li Kun *et al.*. Effect of stimulated rotational Raman scattering on beam quality of fundamental frequency beams [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(10): 1654~1658
张世杰, 陈剑华, 李 琨 等. 受激旋转拉曼散射效应对基频光光束质量的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(10): 1654~1658
- 10 Chen Jianhua, Li Keyu, Li Kun *et al.*. Effect of stimulated rotational Raman scattering on phase of high-power ultraviolet laser beam [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(7): 1121~1125
陈剑华, 李恪宇, 李 琨 等. 受激旋转拉曼散射对强紫外激光相位的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(7): 1121~1125
- 11 Li Tinhong, Zhang Bin, Cai Bangwei *et al.*. Stimulated rotational Raman scattering of high-power ultraviolet laser beams in long air path [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(10): 937~939
李廷红, 张 彬, 蔡邦维 等. 强紫外激光在空气中长程传输受激旋转拉曼散射效应 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(10): 937~939