

文章编号: 0258-7025(2003)03-0223-04

高功率 KrF 激光后向拉曼压缩的实验研究

叶震寰¹, 楼祺洪¹, 董景星¹, 凌磊¹, 魏运荣¹, 龚堃², 汤秀章², 单玉生²

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 利用聚焦的后向拉曼过程实现高功率准分子激光的高效脉冲压缩。获得了 15 倍的脉冲压缩和 17% 的总体能量转换效率, 在 10 J 抽运能量下最大获得 1.7 J 的压缩脉冲输出。对聚焦抽运方式抑制前向拉曼散射和提高后向光强增益的机理进行了探讨。

关键词 非线性光学; KrF 激光; 后向拉曼散射; 拉曼压缩

中图分类号 TN 248.2⁺ 2; O 437.3 **文献标识码** A

Experimental Research on Backward SRS Pumped by High Power KrF Laser

YE Zhen-huan, LOU Qi-hong, DONG Jing-xing, LING Lei, WEI Yun-rong

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

GONG Kun, TANG Xiuzhang, SHAN Yusheng

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract In this paper, high efficient backward stimulated Raman compression is obtained pumped by high power KrF laser using focused-beam geometry. The pulse duration is compressed by 15 times with total energy conversion efficiency of 17%. Maximum 1.7 J pulse (1.5 ns) is obtained when pumped by 10J pulse (22 ns). The mechanism of high efficient backward SRS in focused geometry is discussed.

Key words nonlinear optics; KrF laser; backward Raman scattering; Raman compression

1 引言

高功率准分子激光在惯性约束聚变和等离子体物理等方面的应用潜力一直受到相当大的重视^[1,2]。中国原子能院的百焦耳级 KrF 准分子激光天光一号也致力于这些研究^[3]。获得较好的光束质量和较短的脉冲, 则是近几年的工作重点。近年来的研究表明, 受激拉曼散射正是脉冲压缩和改善光束质量的重要方法。利用拉曼过程进行脉冲压缩主要有后向拉曼散射^[4]和混合气体的拉曼散射^[5]。后向拉曼散射压缩脉宽由于其简明的概念和简洁的光路成为人们主要采用的方法。本文采用聚焦方式进行后向拉曼实验来补偿前后向拉曼增益不对称性

的影响, 增强了后向拉曼增益, 在获取脉冲压缩和能量转换效率方面取得了较满意的结果。

2 高效的后向拉曼压缩

研究后向拉曼增益就必须考虑受激拉曼过程中拉曼增益(系数)的前后向不对称性。主要源于: 1) 相对于后向而言, 前向的 Doppler 效应可以忽略不计; 2) 抽运光线宽主要影响后向拉曼过程的增益, 而对前向拉曼过程的增益没有影响^[6]。因此, 后向拉曼增益和前向拉曼增益的关系(这里定义为不对称系数 A_R) 可表示如下

$$A_R = \frac{G_b}{G_f} = \frac{\Delta\nu_r}{\Delta\nu_r + \Delta\nu_d + \Delta\nu_p} \quad (1)$$

收稿日期: 2001-12-12; 收到修改稿日期: 2002-02-01

基金项目: 国家 863-804-6 计划资助项目。

作者简介: 叶震寰(1968-), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光技术研究室博士研究生, 主要从事紫外激光的受激拉曼散射以及激光消融的研究。E-mail: ye_zhenhuan@hotmail.com

其中 G_f 和 G_b 分别代表前后向的拉曼增益, $\Delta\nu_r$, $\Delta\nu_d$, $\Delta\nu_p$ 分别代表拉曼弛豫线宽、多普勒加宽和抽运光线宽。我们知道, 拉曼弛豫时间为 $T_2 = 1/\pi\Delta\nu_r$, 因此定义有效的后向斯托克斯的弛豫时间为 $T_{2b} = 1/\pi(\Delta\nu_r + \Delta\nu_d + \Delta\nu_p)$ 。

根据稳态理论(CH4: $T_2 = 30$ ps, $\tau_p, \tau_s \gg T_2$) 后向一阶和二阶斯托克斯(后向二阶斯托克斯光定义为由后向一阶斯托克斯光产生的二阶前向斯托克斯光) 增益之间的关系为

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{T_{2b}}{T_2} \frac{I_p}{I_s} \frac{\nu_s^3}{\nu_p^3} \quad (2)$$

其中, ν_p, ν_s 为抽运光和斯托克斯光频率, $\nu_p/\nu_s = 0.93 \approx 1$, I_p, I_s 为抽运光强和后向一阶斯托克斯光强(平均光强)。

$$I_s = \eta \frac{\tau_p}{\tau_s} I_p = \eta \kappa I_p \quad (3)$$

其中 η 为能量转换效率, κ 为脉冲压缩率。定义后向光强增益 G_i 为

$$G_i = \frac{I_s}{I_p} = \eta \kappa \quad (4)$$

要获得高的光强放大, 既要有高的转换效率, 又要有高的脉冲压缩效率。由式(2)和式(4)得到

$$\eta \kappa \propto \frac{G_2}{G_1} \quad (5)$$

这里, G_2/G_1 之前有一个系数, 即为前后向拉曼增益(或线宽)的不对称系数。当二阶斯托克斯增益达到阈值, 后向一阶斯托克斯光达到最大值(这里需要指出的是, I_s 需要放大到足够大时才会使 G_2 达到阈值, 这里 G_2 应为二阶斯托克斯光的增益阈值)。一般情况下增益阈值 $G_2 \gg G_1$ 。从(5)式可以看出, 通过提高二阶斯托克斯的阈值可以提高总体的后向光强增益。

3 增益不对称性的补偿

如图 1 所示为在拉曼池中的聚焦的光束示意图, 后向斯托克斯光从焦点处开始产生并沿抽运光相反的方向与抽运光相互作用得到放大; 前向斯托克斯光产生于入射窗口或稍后处并沿抽运光方向与抽运光相互作用。由于拉曼增益为 $\nu I_p L$, ν 为拉曼增益系数, I_p 为抽运光强。很明显入射处的 I_p 远小于焦斑处的 I_p , 因此抽运光强的这种类似圆锥状分布对增益作了补偿, 从而有可能使后向拉曼散射在与前向拉曼散射的能量竞争中获得优势。可以预计, 前向的拉曼过程得到有效的抑制。实验中由于

拉曼管长度不够, 出射窗口离焦点太近容易被打坏, 改用铝质窗口后无法测量前向拉曼光。但是我们从后向出射的斯托克斯光的强度与以前的实验数据比较可以作出正确的判断。

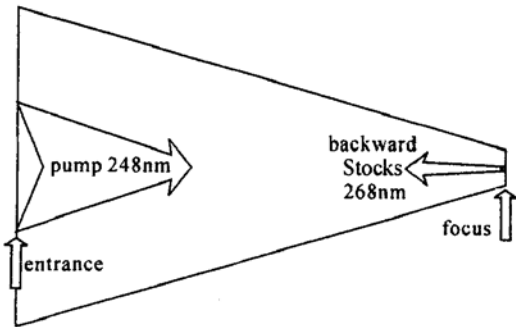


图 1 聚焦方式的后向拉曼在拉曼池中的光束示意图

Fig. 1 Sketch map of backward Raman amplification with focused beam geometry

由于后向二阶斯托克斯光是由后向一阶斯托克斯光达到一定强度时产生的, 此时的空间位置应该在入射窗口和焦斑之间的某个点。由于光束的发散, 与不发散时相比, 此时的光强要小得多, 二阶拉曼增益也减小。换句话说, 二阶拉曼的阈值大大提高。这与上一节中提到的结论是相符合的。

4 实验装置

图 2 为实验装置。248 nm 抽运光是由北京原子能院的天光 I 号 MOPA 系统提供的六束光中的其中一束。MOPA 系统振荡源为一台注入锁定准分子激光器, Lambda Physik LPX150, 窄带运行。其脉冲半宽度(FWHM)为 21.9 ns, 带宽 0.45 cm^{-1} 。振荡源经空间滤波器后, 经预放和主放两级放大, 输出总能量为 100 J 以上, 单束能量超过 20 J。抽运光经一块双波长片(248 nm: $R = 90\%$, 268 nm: $T =$

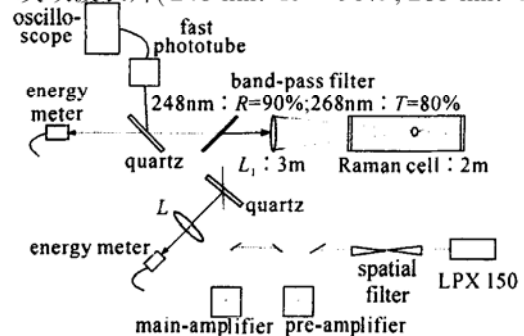


图 2 实验装置图

Fig. 2 Sketch map of experiment set-up

80%) 反射,再经一块石英汇聚透镜 ($f: 3\text{ m}$) 聚焦到拉曼池。考虑到双波长片的破坏阈值等因素,采用的有效抽运能量为 10 J 。拉曼池由不锈钢管制成,长 2 m ,前窗为 $\phi 100\text{ mm}$ 的石英平板,与光轴垂直方向成 5° 的夹角,避免反射光。焦点在离前窗 1.5 m 的位置,后窗口为一块铝板,以免打裂。工作气体为数个气压的纯甲烷气体 ($T_2 = 30\text{ ps}$)。

后向斯托克斯光经强流管再由一台示波器 (Tektronix TDS340A, 100 MHz , 500 MS/s) 监测其波形,同时用一台能量计测得输出能量。抽运光能量也由一台能量计监测。

5 结果与分析

在有效抽运光能量为 10 J 和 2.5 J 下获得最大

(在 5 atm 气压下) 的后向一阶 Stocks 光的能量分别为 1.7 J 和 0.22 J , 分别对应能量转换效率为 17% 和 9% 。实验结果分别见图 3。解释上述结果,即在某个气压下获得最大的转换效率,有以下几个原因: 1) 随着气压的增加,各种拉曼过程的增益增加,而拉曼阈值降低,导致前向拉曼过程以及其他的四波混频过程消耗了更多的能量; 2) 由于后向拉曼过程实际上可以理解为抽运光脉冲前沿部分产生的斯托克斯种子光被其脉冲后沿放大,而有效的作用距离仅为 5 ns 的脉冲宽度,由于拉曼阈值的降低,后向拉曼放大所利用的抽运光能量处于脉冲的稍前部分,能量较小是很容易理解的。我们认为后一种原因的作用更为明显。提高拉曼阈值并增加拉曼池的长度预计可以增强后向拉曼的作用过程。

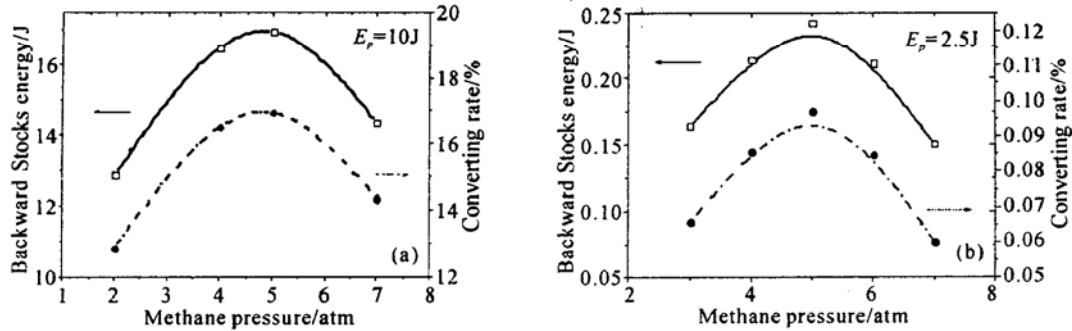


图 3 不同气压下的能量转换效率

(a) 抽运能量 10 J ; (b) 抽运能量 2.5 J

Fig. 3 Pressure dependence of energy conversion efficiency at pump energy 10 J (a) and 2.5 J (b)

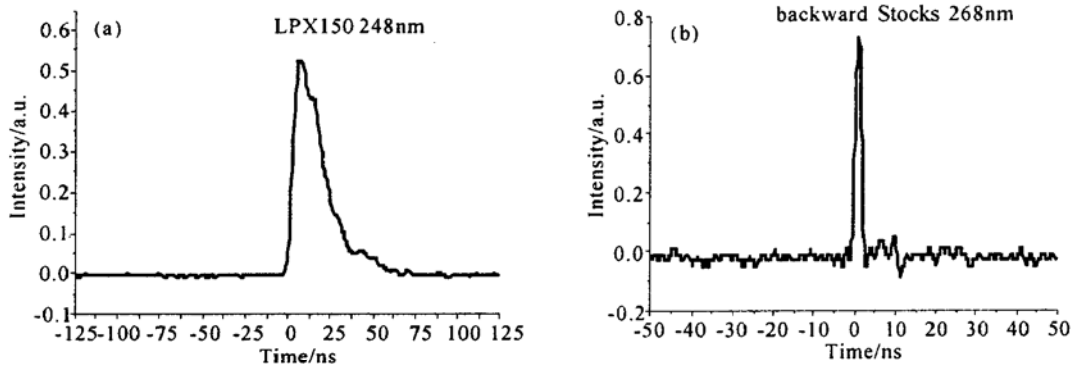


图 4 抽运光 248 nm (a) 和后向斯托克斯光 268 nm (b) 的脉冲波形

Fig. 4 Time scale waveforms of pump 248 nm (a) and backward Stocks 268 nm (b)

抽运光脉宽为 21.9 ns , 而我们获得的后向 Stocks 光的脉宽为 1.5 ns , 脉宽压缩 15 倍(见图 4, 由于示波器带宽仅为 100 MHz , 故 10 ns 以下的脉冲波形无法正确显示, 下一轮实验中将改用带宽为 1.5 GHz 的示波器来精确测量)。在本次实验中, 压

缩后的脉宽在不同的抽运光能量 (10 J 和 2.5 J) 下没有影响。另外后向斯托克斯光的光束质量明显好于抽运光, 在没有对斯托克斯光采取进一步净化的情况下, 抽运光和后向 Stocks 光的光束斑比为 2.5 (图 5)。因此得到光强增益为 6.3 。

实验结果达到了预计目标, 获得了超过 1 J 量级的后向斯托克斯光。并且获得了较好的压缩和转换效率。在下一轮实验中后向斯托克斯光的脉宽有待更精确的测量, 不同长度的聚焦透镜以及更长的

拉曼管将被用来进行更深入的聚焦特性的研究, 并测量前向拉曼光的变化情况。在解决双波长片膜层破坏阈值问题的情况下, 获取更高能量密度的光束将成为可能。

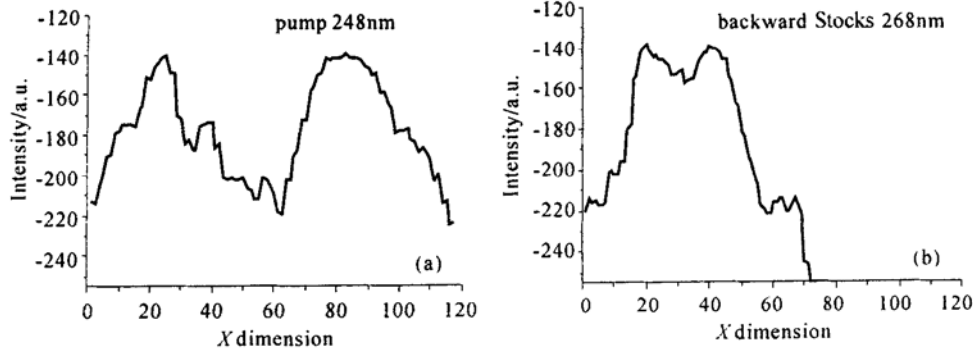


图 5 抽运光 248 nm(a) 和后向斯托克斯光 268 nm(b) 的一维焦斑图

Fig. 5 One-dimension transverse waveforms at focus of pump 248 nm (a) and backward Stokes 268 nm (b)

参 考 文 献

- 1 J. P. Partanen, M. J. Shaw. High-power forward Raman amplifiers employing low-pressure gases in light guides. I. Theory and applications [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(10): 1374~ 1386
- 2 S. G. Preston, W. J. Blyth, K. M. W. Zepf *et al.*. Feasibility studies of optically-ionised recombination XUV laser schemes on the Spite KrF CPA laser system [C]. Central Laser Facility (CLF), Rutherford Appleton Laboratory (RAL) Annual Report, 1994~ 95, 38~ 39
- 3 Lou Qihong. Excimer laser system in China for inertial fusion with Raman beam combination [R]. The Ninth International Conference on Emerging Nuclear Energy System 1998 (ICENE' 98), TEL-AVIV, ISRAEL, June 28~ July 2 (1998)
- 4 Lou Qihong, Xu Jianqiu, Dong Jingxing *et al.*. Superbroadband Raman compression in hydrogen [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(1): 62~ 68 (in Chinese)
- 5 Xu Jianqiu, Lou Qihong, Dong Jingxing. Competition of stimulated Raman scattering in H_2-CH_4 mixed gases [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(10): 718~ 720
- 6 W. R. Trutna, Jr., Y. K. Park, R. L. Byer. The dependence of Raman gain on pump laser bandwidth [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(7): 648~ 655