

文章编号: 0258-7025(2001)04-0289-04

高功率同轴抽运宽带拉曼放大

雷 博 楼棋洪 董景星 魏运荣 黄 峰 李铁军 章 琳

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 研究了在宽带条件下非聚焦的同轴拉曼放大,采用 CH_4 作为放大拉曼介质,抽运源为 248 nm 的高功率 KrF 准分子激光系统,最高抽运能量为 1.5 J。给出了拉曼链一级放大器的级增益随小信号增益系数及放大器气压的变化。最后讨论了限制同轴宽带抽运拉曼放大的因素。

关键词 拉曼链,同轴抽运,宽带,光束质量

中图分类号 O 437 文献标识码 A

Broadband Raman Amplification with Coaxial Laser Pumping

LEI Bo LOU Qi-hong DONG Jing-xing WEI Yun-rong

HUANG Feng LI Tie-jun ZHANG Lin

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

Abstract The characteristic of Raman amplifier with coaxial broadband laser pumping has been studied. CH_4 is chosen to be the active medium. The different gains of amplifier at different gas pressure and small signal gain are given. At last, the limitation of Raman amplification pumped by broadband laser beam is discussed.

Key words Raman system, coaxial pump, broadband, optical beam quality

1 引 言

由于窄带激光的单位频率功率较大,时间相干性好,因此窄带激光抽运的拉曼增益大,容易获得放大,也是目前拉曼放大所普遍采用的抽运源。但是,对于 ICF 来说,宽带抽运源由于空间相干性小,不会在靶球上产生明显的干涉条纹,可以大幅度地降低核聚变所需的光强。因此对宽带抽运拉曼放大的研究在 ICF 拉曼链的总体设计中有着重要意义。本文旨在研究宽带 KrF 准分子激光抽运的拉曼链一级放大器的性能,并讨论限制同轴抽运宽带拉曼放大增益的因素。

采用合适的抽运角度,可以将多束空间不相干的抽运光在光波导内叠加,形成均匀的截面光强分布,使种子光得到无畸变的放大,这对光束的整形有着重要意义^[1],但是斜向的抽运也对拉曼放大带来了限制,随着抽运角度的增加会导致拉曼增益因子的下降^[2,3],尤其对于有显著多普勒增宽的拉曼介质。斜向抽运引入的抽运光与种子斯托克斯光沿光

轴传播方向速度的差异,也会导致相位失配,降低有效的拉曼放大^[4]。此外,多束抽运光之间的互相干涉形成空间光栅,会使斯托克斯光的光束质量下降。作为 ICF 高功率拉曼链的一级放大器,由于注入的斯托克斯种子光的能量相对较低,获得种子光的高增益是我们所关心的重要问题,因此单从增益角度来看,一级放大宜采用种子光与抽运光同轴的放大方式,这也是国外同类装置所采用的^[5]。在窄带抽运时,拉曼放大器内 CH_4 气体的气压较低(小于 3 atm),为了防止共线的四波混频导致二阶斯托克斯光的生长而和一阶斯托克斯种子光产生竞争,通常抽运光与斯托克斯种子光之间有一个很小的夹角^[6]。而在宽带抽运时由于增益较低且时间相干性差,不易于放大,因此为了使种子光得到饱和放大,一般放大器都工作在较高的气压下,本次实验的最高工作气压为 9 atm。此时,色散产生的相位失配足以抑制共线四波混频,因此为了得到最大的有效作用长度,使抽运光与种子光严格地共轴。

本次实验采用 CH_4 作为拉曼放大介质,因为 CH_4 具有较大拉曼散射截面($15.3 \times 10^{-29} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$)以

及很大的拉曼线宽(是 H_2 的几十倍),可以有效地提高增益以及能量转换效率^[7]。

2 实 验

同轴前向拉曼的实验装置如图 1 所示,LPX-150 型 KrF 准分子激光器输出的 248 nm 抽运光经分束镜 M_1 后,一束光经延迟光路,反射镜 M_3 和 M_4 后到达拉曼振荡器,产生 268 nm 种子光,另一束则传到电子束抽运的预放级,经预放级放大后,再通过反射镜 M_2 ,经透镜 L_1 和 L_2 后缩束成 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的光束进入拉曼放大器。为了研究宽带放大特性,LPX-150 激光器工作在自由运转状态,线宽 $0.3 \sim 0.4\text{ nm}$,脉宽 25 ns ,最高脉冲能量 500 mJ ,输出光束为口径 $1\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的矩形光斑,远场发散角为 0.8 mrad 。图 1 中,准分子激光经分束镜 M_1 后,70 mJ 的能量用于抽运拉曼振荡器,产生用于放大的斯托克斯种子光。其余能量的光经电子束抽运的预放级放大后,作为拉曼放大器的抽运光,其最高单脉冲能量为 1.5 J 。拉曼振荡器长 70 cm ,窗口直径 40 cm ,为了获得较高能量的斯托克斯光, CH_4 的气压保持在 12 atm ,聚焦透镜 L_3 的焦距为 60 cm 。拉曼放大器长 200 cm ,窗口直径 40 mm ,可承受的最高气压大于 9 atm 。

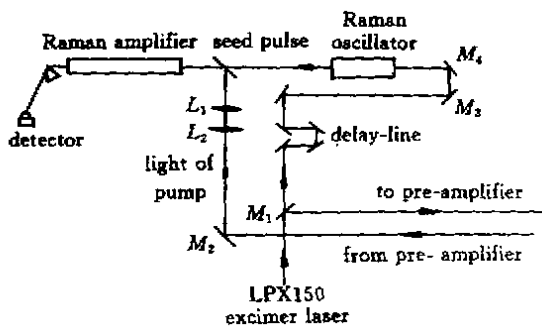


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

在高功率拉曼放大过程中,尤其是高压时易产生自激振荡,抽取抽运光能量,使种子光得不到有效的放大。文献^[8]给出了产生拉曼振荡所需的入射抽运强度表达式

$$I_{th} = B(0.32 + 0.012P) \quad (1)$$

其中 B 表示与斯托克斯频率、拉曼介质长度、抽运光频率有关而与气压无关的常数。

振荡的阈值光强,如图 2 所示。图中实线表示不同气压下的理论阈值强度,根据实验测得的抽运光脉宽为 25 ns ,最高单脉冲抽运能量 1.5 J 以及缩束后光斑口径 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 可计算出最高抽运强度约为 $0.06 \times 10^9\text{ W/cm}^2$,见图中虚线。可见实验中的抽运强度远低于产生自激的阈值。

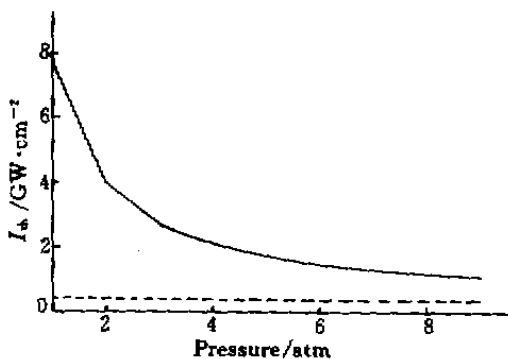


图 2 产生自激振荡的阈值抽运光强 I_{th} 随甲烷气压变化的曲线

实线表示理论曲线,虚线表示本次实验所达到的最高抽运强度

Fig. 2 I_{th} vs gas (CH_4) pressure

Solid curve is the theoretical value, dot line is the intensity of the experiment

但是,由于抽运光的截面光强分布很不均匀,所以在放大器中的局部点处的光强有可能超过自激的阈值。实验中,为了有效地抑制自激及其他参量过程,首先遮住拉曼振荡器的输出窗口,使放大器在没有斯托克斯种子光输入时,加入的抽运光所产生的 SRS 在可探测功率之下。

与受激拉曼散射不同,进入放大器的抽运光与斯托克斯种子光若不关联,它们的相位就会经过一个自我调整,使各个相应的抽运光与斯托克斯光的相位差达到一致,此时增益才会迅速增加。在时域范围内最佳的相关就是斯托克斯光与抽运光脉冲波形相称^[9]。由于斯托克斯种子光是由同一束抽运光振荡产生,在振荡器的输出窗口保持完全相关。因此,为了在放大器入口得到相关的抽运光与种子光,则需要它们所走的光程一致。通过调整种子光与抽运光的延迟,可以改善它们的关联程度。实验中由于条件的限制,采用一系列反射镜,经过多次反射提供种子光适当的延迟,但同时光束质量在经过长距离传输和反射后有所下降。

3 实验结果与分析

首先由公式(1)计算了在不同气压时产生自激

首先,测得种子光强度放大率与气压的变化曲线,结果如图 3 所示。由图可见,斯托克斯光的强度增益随放大器中的气压的增加而呈指数增长。在 9 atm 时,增益达到 21 倍。此时并未发现有自激光产生。由于四波混频要求介质色散较小,因此高压气的拉曼介质能有效地抑制这种高阶过程。

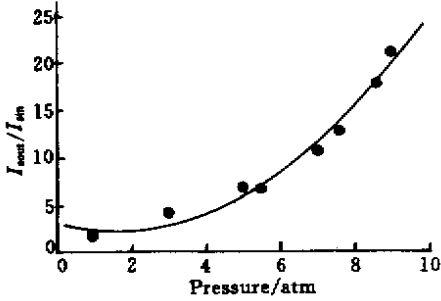


图 3 斯托克斯光强增益 I_{out}/I_{in} 随甲烷气压变化曲线

Fig. 3 I_{out}/I_{in} vs gas (CH_4) pressure

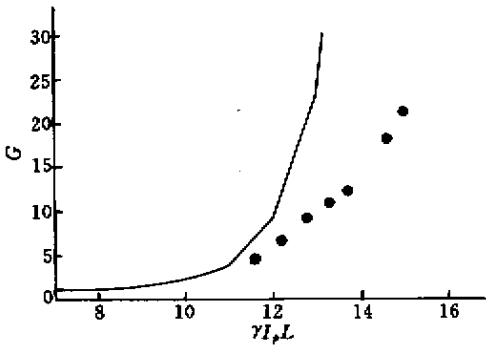


图 4 斯托克斯光强增益随小信号增益系数的变化曲线

Fig. 4 Intensity gain vs small signal gain

在稳态时,宽带拉曼放大器的级增益可表示为

$$G = 1 + \frac{1}{N} [\exp(\gamma I_p L) - 1] \quad (2)$$

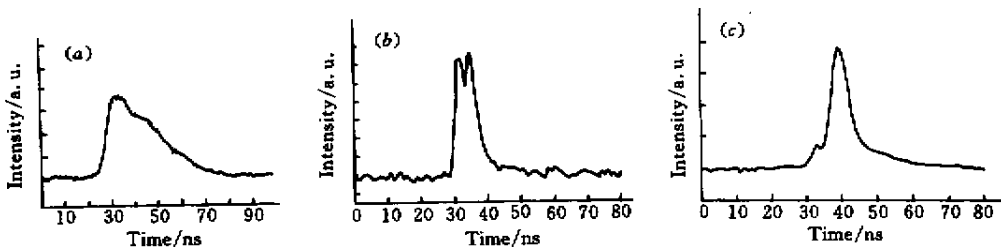


图 5 实验脉冲波形

(a) 抽运波形 (b) 未放大的种子光波形 (c) 放大后的种子光波形

Fig. 5 Waveform of the pulse

(a) pump pulse ; (b) seed-pulse before amplification ; (c) seed-pulse after amplification

式中 N 表示抽运光的纵模数。由于 LPZ-150 准分子激光器处于自由运转状态,所以此时的激光纵模数大于 2×10^5 。实验在保持抽运能量密度约为 1 J/cm^2 情况下,调节放大器气压得到了放大级增益随小信号增益系数变化的曲线。图 4 给出了实验结果,实线是根据(2)式所得的理论曲线。

由于斯托克斯种子光的能量较小,而抽运光的能量相对很大,因此放大过程中并未出现饱和现象。放大级增益偏离理论曲线与抽运光截面光强分布不均匀有关。抽运光的光束品质是影响拉曼增益的主要因素之一,随着抽运光束质量的恶化,斯托克斯光的有效增益急剧降低,将激发其他空间模式而使能量转移过去,同时,波前结构与抽运光一致的放大自发拉曼散射将会大量产生,对于要求增益越大的拉曼放大器,实现有效放大要求抽运光的品质越好。实验中,为了保证斯托克斯种子光与抽运光的相关,引入了如图 1 中所示的延迟光路,使 LPX-150 的输出激光在进入拉曼振荡器前,在延迟光路中经过了多次反射传播约 30 m。通过观察发现,从 LPX-150 输出的光强均匀的矩形光斑,经过透镜以及反射镜的多次反射,在传播到放大器时,光斑变成三条矩形光斑的叠加,而且强度分布不均匀,这是本次实验限制放大增益的主要因素。

利用示波器获得的斯托克斯种子光放大前及放大后的波形如图 5 所示。

图 5(a) 为抽运光波形,脉宽为 25 ns,比种子光脉宽要宽得多,有利于放大时能量的抽取。图 5(b) 为放大前的种子光波形,脉宽约 8 ns。可以看出,未放大的种子光顶部出现有小的分叉,估计是由于振荡器中高阶散射造成一阶斯托克斯光的一部分能量损失而产生的。图 5(c) 为放大后的种子光波形,脉宽约 5 ns。脉宽略有压缩,压缩率约为 1.5 倍。

4 结 论

在受激拉曼放大实验中,采用 CH_4 作为拉曼介质时通常为窄带抽运方式,而对其宽带抽运的性质少有研究,本文对高功率拉曼链的一级放大器的性能作了初步研究。在宽带条件下采用同轴抽运方式,得到了斯托克斯光强度增益随放大器中 CH_4 气体的气压以及小信号增益系数变化的曲线。实现了 1.5 倍的脉冲压缩。在本次实验条件下,宽带抽运的放大器工作在高气压下,没有发现自激现象,这有利于抑制四波混频产生的高阶过程。由于带宽对放大增益的限制,使宽带抽运时很难获得较高的增益。为了弥补带宽造成的增益下降,需要进一步提高抽运光的强度,但强度过高会超过 SRS 的阈值,同时由于现有反射镜反射膜层的抗激光破坏的限制,也不宜再提高光强度,本次实验已观察到由于多次累积而产生的反射膜层的损伤。在现有的能量基础上,提高光强横向分布均匀性,使可有效利用的能量提高,是可行的方法。实验表明,目前限制宽带放大增益的主要因素是高功率准分子激光在长距离传输过程中的光束质量的恶化,使有效提取能量降低,不均匀的光强分布也增加了产生自激的可能性。因此,如何实现高功率准分子激光的长距离有效传输,减少传播过程对光束质量的影响是目前所需解决的问题。

参 考 文 献

- 1 J. Reintjes, R. H. Lehmberg, G. Calame *et al.*. Beam clean-up with stimulated Raman Scattering. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(13) 3~8
- 2 J. P. Partanen, M. J. Shaw. High-power forward Raman amplifiers employing low-pressure gases in light guides. I. Theory and applications. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(10) 1374~1389
- 3 Lou Qihong, Ning Dong, Dong Jingxing. Wideband Raman amplification with tilted pumping beam. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **9**(9):1203~1207
- 4 Karen E. Hill, F. H. C. New, P. A. Rodgers *et al.*. The influence of noise and angular dispersion during short pulse Raman amplification. *Opt. Comm.*, 1992, **87**(5,6):315~322
- 5 M. H. Key, M. J. Shaw. KrF laser development & experiments. Rutherford Appleton Laboratory, 1991
- 6 E. C. Harvey, C. J. Hooker *et al.*. 12 ps operation of the sprite KrF pumped Raman laser at exceptionally high brightness. Paper Collection, Rutherford Appleton Laboratory, 1991
- 7 M. G. Raymer, J. Mostowski, J. L. Carlsten. Theory of stimulated Raman scattering with broad-band lasers. *Phys. Rev. A*, 1979, **19**(6) 2304~2316
- 8 Lou Qihong, Ye Zhenhuan, Gao Hongyi. Research on the threshold and spectroscopy characteristics of stimulated Raman scattering in CH_4 pumped by excimer laser. *Applied Laser* (应用激光), 1993, **13**(1):1~4 (in Chinese)
- 9 E. A. Stappaerts, W. H. Long, H. Komine. Gain enhancement in Raman amplifiers with broadband pumping. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(1) 4~6