

准分子激光束的喇曼组束*

楼 祺 洪

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

受激喇曼散射可以将紫外准分子激光辐射频移到特定的近紫外或可见光波长, 采用喇曼整形技术可以改善斯托克斯光的光束质量, 本文报道喇曼组束提高喇曼整形效率的实验结果。

关键词 准分子激光, 受激喇曼散射。

1 引 言

文献[1]给出了准分子激光束喇曼整形的研究结果, 这一技术的特点是当斯托克斯光在喇曼池中被放大时, 仅仅从泵浦光束提取能量, 而不反映泵浦光束的位相和振幅结构。

稳态受激喇曼散射过程中, 令 $A_L(r, z)$ 为泵浦光的复数振幅 $A_L(r, z) = |A_L| \exp(i\phi_L)$, $A_s(r, z)$ 为斯托克斯光的复数振幅, 这两种光均沿 z 方向传播。在光速轴对称情况下, 可以简化横向变量为 x 。不考虑高阶斯托克斯过程, 受激喇曼相互作用可表达为

$$\frac{1}{2iK_s} \frac{\partial^2 A_s}{\partial x^2} + \frac{\partial A_s}{\partial z} = \frac{g}{2} A_s |A_L|^2, \quad (1)$$

$$\frac{1}{2iK_L} \frac{\partial^2 A_L}{\partial x^2} + \frac{\partial A_L}{\partial z} = -\left(\frac{g}{z}\right) \left(\frac{\omega_L}{\omega_s}\right) |A_s|^2 A_L, \quad (2)$$

式中 ω_L 和 ω_s 分别代表泵浦光和斯托克斯光的频率, $(g/2)$ 为稳态放大增益系数, K_s 和 K_L 分别为斯托克斯光和泵浦光的波矢。

对于喇曼组束的情况, 首先采用近轴的平面波泵浦喇曼放大器, 可近似地认为光强沿 x 方向是均匀的, 而作为喇曼组束池的喇曼放大器是工作在低增益区, 使高阶斯托克斯光的增益变得可以忽略。鉴于以上条件, (1)式和(2)式可简化为

$$\left(\frac{dA_s}{dz}\right) = (g/2) |A_L|^2 A_s, \quad (3)$$

$$\left(\frac{dA_L}{dz}\right) = -(g/2) \left(\frac{\omega_L}{\omega_s}\right) |A_s|^2 A_L, \quad (4)$$

公式(3)的平面波解为

$$A_s(z) = A_s(0) \exp\left[(g/2) \int_0^z |A_L|^2 dz'\right]. \quad (5)$$

当喇曼介质的长度为 L 时, 输出端的斯托克斯光强 I 为

$$\left. \begin{aligned} I &= |A_s(L)|^2, \\ A_s(L) &= A_s(0) \exp\left[(g/2) \int_0^L |A_L|^2 dz'\right]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由(6)式可见,在任何横向位置上的斯托克斯波的增益由泵浦光强度沿传播方向的积分来确定,只要泵浦光强在相互作用区的积分与径向位置无关,斯托克斯光的增益在光束的所有部分会全部一致,甚至当泵浦光光强与径向位置有关时,这些变化也不会斯托克斯光中获得增长.从这个意义上讲,放大后的斯托克斯光仅仅依赖于泵浦光强度的平均值^[2,5].

这种喇曼整形技术可以采用如文献[1]结构,此时泵浦光及斯托克斯光互相平行交叠传播;用交叉光束的结构,它们的传播方向之间有一个角度交叉.这种交叉结构的优点是可以利用多光束泵浦光同时与斯托克斯光相互作用,从而实现几个光束的喇曼组束.本文在氯化氙准分子激光喇曼整形的基础上,进行交叉光束喇曼整形的特性研究,且进一步实现了双光束的喇曼组束.实现结果表明,在双光束组束下,转换效率比单光束有成倍的提高.

2 喇曼放大特性研究

为了实现喇曼组束,首先将种子光子的获得及其放大特性作一研究.由于在组束技术中,种子光束是通过组束镜之间的空隙进入放大器,需要将分束技术作一定的改进.作者曾在文献[1]中采用部分透射的分光板,而本文则采用了小孔耦合式的分光片.因此进入种子光束的泵浦光仅为总光束的一小部分(约占准分子激光输出总能量的10%左右),从而使大部分能量用于放大或组束池的泵浦光.图1给出这一实验的方框图,选择适当的空间滤波器参数,可以获得接近衍射极限的种子光束.

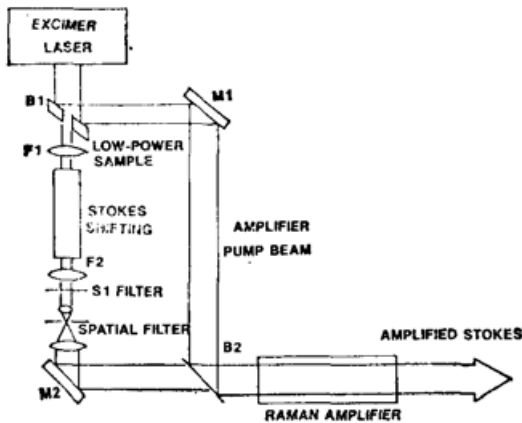


Fig. 1 Generation of diffraction-limited Stokes beam and Raman amplifier experiment set-up

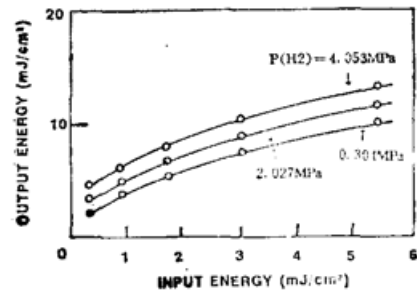


Fig. 2 Raman amplifier characteristics at different hydrogen gas pressure

首先进行的是单光束情况下,斯托克斯光的放大特性,以确定组束时的喇曼放大器中氢气压力及光束特性.当泵浦光为准直光束时,喇曼放大器中不同氢气压力下的放大特性由图2给出.在较低的输入能量密度下($\leq 1 \text{ mJ/cm}^2$),显示较大的放大倍数,进一步增大输入能量密度,使喇曼放大呈饱和状态.同时,还可以看到,不同的氢气压力(从3个大气压增加到40个大气压),在饱和区的放大倍数仅增大30%左右,因此放大池的工作气压可选在低气压(几个大气压)范围内.

在相同的气压下,放大器泵浦的聚焦状态对放大特性亦有重要的影响.当泵浦光用较短的焦距的透镜聚进入放大器后,放大器会产生自振,从而影响放大特性.如果采用弱聚焦的方式,在一定的气压范围内,不仅可以克服自振,而且可以提高放大器对一阶斯托克斯光

的放大倍数。采用弱聚焦泵浦后,在较大的范围内,放大倍数比准直光束约提高 50% 左右。图 3 给出喇曼池气体压力为 3 个大气压时的放大特性。值得注意的是,弱聚焦情况仅适用于喇曼放大池中氢气压力较低的情况,如果在气压较高的情况下,容易产生自振。

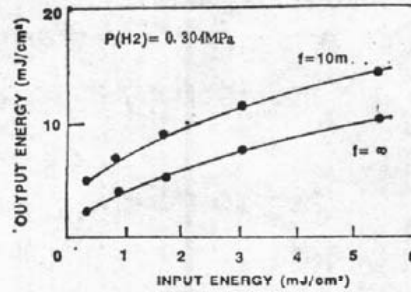


Fig. 3 Raman amplifier characteristics at different focus conditions

3 喇曼组束

喇曼组束的实验装置图由图 4 给出,其中用棱镜 P 代替图 1 中的 S1 滤光片,其目的是提高种子光的亮度。原来使用的 S1 滤光片由于要抑制各种反斯托克斯光、泵浦光及高阶斯托克斯光,往往使用两片以上滤光片,透过率较低。放大器的泵浦光束由反射镜 M7 及 M8 分成二束,并以小的倾斜角度进入喇曼放大池。在泵浦光束到达 M7 和 M8 反射镜之前,经过 M1, M2 和 M3 三块镀有介质膜的全反射片,调正它们之间的距离可以调正泵浦光束到达喇曼放大池的时间。一般而言,理想的情况是种子光束与泵浦光束同时到达喇曼放大池,在大多数情况下,使种子光束稍为提早(约为 5 ns 以下)到达放大器。

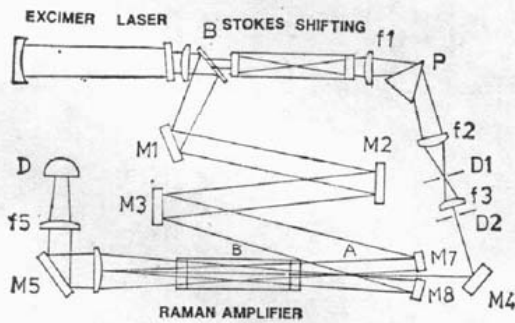
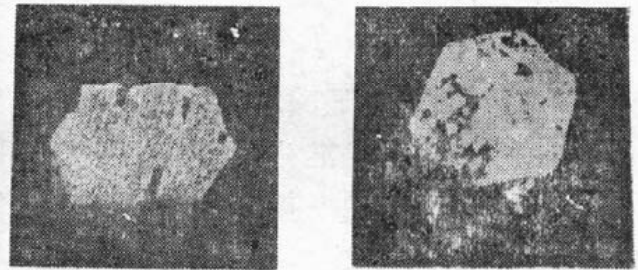


Fig. 4 Experimental set up for Raman beam combination



(a) (b)

Fig. 5 Beam patterns at different positions: (a) position A in Fig. 4 and (b) position B in Fig. 4

反射镜 M7 及 M8 是两块独立可调正的全反射镜,光路的调正要求两束泵浦光对称入射到喇曼放大池中,且与种子光有尽量大的相互作用区。为了调正方便,且尽量利用种子光进入的范围, M7 及 M8 制成正六角形,在调正中要求二束光在 B 处完全重叠且与种子光束重合,在 A 处两束光部分交叉,图 5 给出喇曼放大池在进行两光束喇曼组束时在 A 及 B 处的光斑形状。

经过组束以后的斯托克斯光经透镜准直后由双色反射镜 M5 反射进入检测器。反射镜 M5 对泵浦光全部透过而对一阶斯托克斯光主要起反射作用。采用平面快速二极管及宽带示波器分别接收了种子讯号 S1、单束泵浦喇曼整形信号及两束泵浦组束讯号。首先将反射

镜 M7 及 M8 全部取走, 测量到注入 S1 信号, 其峰值幅度为 18 mV, 然后加入反射镜 M7, 获得单束泵浦喇曼整形信号由图 6 中间的波形给出, 其峰值幅度约为 160 mV, 令人感兴趣的是

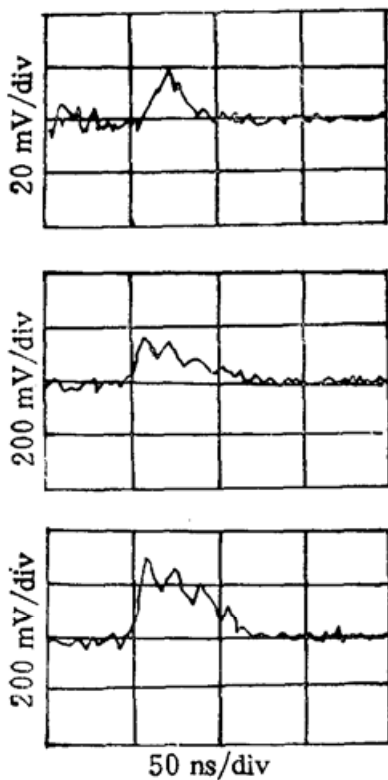


Fig. 6 Pulse shapes for unamplified (top) and amplified (single pump beam, middle and two pump beams, bottom) Stokes beams

放大以后的信号呈现明显的多峰结构, 这是由于种子光束亦具有这种结构的缘故. 当采用双束泵浦光进行光束组合时, 所得到的放大信号成倍地增大, 其峰值幅度达 200 mV. 由此可见经过喇曼组束可以使喇曼池的放大倍数有成倍地提高.

关于斯托克斯光的光峰结构, 作者曾对各阶斯托克斯光的波形进行比较详细的实验研究^[4], 实验观察到第一和第二阶斯托克斯光呈现一些小的尖峰结构, 而三阶以上斯托克斯光呈现明显的弛豫振荡. 一般而言, 这种尖峰结构来源于二种过程, 其一是合作喇曼散射, 它出现于共振喇曼散射条件, 例如铅蒸汽的受激喇曼散射^[5]; 另一种过程是多波喇曼相互作用^[6], 由于氢气中的受激喇曼散射不处于共振状态, 因此多峰结构很可能来自多波喇曼相互作用. 且这种多峰结构在喇曼整形或喇曼组束过程中进一步得到增强.

经过喇曼组束后的光束, 其光束发散角基本上与种子光束的发散角一致. 在组束情况下, 如果喇曼放大器的二束泵浦光质量较好(例如为几倍的衍射极限), 则组束放大后的斯托克斯光如中心强区外, 由于非轴上的四波混频过程产生的斯托克斯分量, 周围还会有一定的“背景”光, 如果喇曼放大池泵浦光的光束质量为几十倍甚至上百倍衍射极限, 则非轴分量会明显减小, 甚至得到抑制.

用喇曼组束来改进准分子激光束的光束质量对于激光定向发射方面有重要的应用前景. 从应用角度而言, 这一系统的组束效率是十分重要的参数. 在本实验中, 将放大器的转换效率从文献[1]的 6% 提高了将近一倍达 11%, 并成功地将两束光组合成一束高质量的斯托克斯光. 但尚不能满足实际应用的要求. 为了进一步提高转换效率, 可采用的办法是 (1) 增加组束的数量, 原则上可以提高效率, 但在具体光路实施技术上会引入一定的复杂性; (2) 增大泵浦光与种子光之间相互作用的区域. 最近, 英国罗瑟福实验室采用矩形波导型喇曼放大池^[7], 使泵浦光在波导内多次反射, 增大作用区域, 并采用四束光组束, 在甲烷气体中达到 50% 左右的转换效率, 这是下一阶段值得重视研究的途径.

参 考 文 献

- [1] 樊祺洪等. XeCl 激光泵浦高压氢的衍射极限 SRS 斯托克斯输出. 光学学报, 1988, 8 (6): 509~513
- [2] R. S. F. Chang, N. Djeu. Amplification of a diffraction-limited Stokes beam by a severely distorted pump. *Opt. Lett.*, 1983, 8 (3): 139~141
- [3] J. Reintjes, R. H. Lehberg, G. Calame *et al.*, Beam clean-up with stimulated Raman scattering, *J. O. S. A.* (A), 1985, A2 (13): 3~8
- [4] 成序三等. 高阶喇曼辐射的弛豫振荡和光束特性. 中国激光, 1988, 5 (9): 564~566

- [5] 霍芸生等. 铅蒸气电子能级近共振喇曼散射的合作效应. 中国激光, 1988, 5 (3): 170~173
- [6] R. V. Johnson, J. H. Marburger, Relaxation oscillation in stimulated Raman and Brillouin scattering. *Phys. Rev. (A)*, 1971, A4 (3): 1175~1182
- [7] B. Dance, Raman amplifier combines laser beams efficiently. *Laser Focus World*, 1990, 26 (2): 25~27.

Raman beam combination of excimer laser radiation

LOU QIHONG

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 9 September 1991; revised 22 April 1992)

Abstract

Stimulated Raman Scattering (SRS) is one of the methods to shift the UV excimer laser radiation into the near UV and visible region. The beam quality of the Stokes output can be improved by means of Raman beam clean-up. In this paper, the experimental results of Raman beam combination are reported for increasing the efficiency of the Raman beam clean-up.

Key words excimer laser, stimulated Raman scattering.

庆贺王大珩教授从事科研 55 周年座谈会

1992年10月25日, 庆贺王大珩教授从事科研55周年座谈会在北京友谊宾馆举行。中科院院长周光召、副院长胡启恒, 国防科工委主任丁衡高, 中国科协主席朱光亚教授, 著名科学家王淦昌教授, 卢嘉锡教授等到会祝贺。

周光召教授在座谈会上高度评价王大珩教授为中国光学事业乃至中国科技事业发展所作的杰出贡献, 尤其赞誉了王大珩教授为“中关村科技一条街”的创建和繁荣所作的努力, 他说, 称王大珩教授为“中国光学之父”当之无愧。

中科院长春光机所在会上详细地介绍了王大珩教授从事科研半个多世纪的学术功绩。

中科院学部委员、上海光机所王之江研究员专程赴北京出席会议。全国30多个科研、高校、学术团体等单位向王大珩教授送、发了贺词贺电, 共有80多位专家、学者, 研究生出席了座谈会。中国光学学会、《光学学报》编辑部也派人出席会议, 向王大珩教授表示祝贺。

(沈士璠)