

准分子激光束的喇曼整形*

楼祺洪 霍芸生 董景星 丁泽安 魏运荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

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和可见光波长。采用喇曼整形技术还可以获得衍射极限发散角的斯托克斯输出。本文研究了注入光束质量对喇曼整形的影响,并求得不同氢压力下的喇曼增益系数和饱和参量。

关键词: 准分子激光, 受激喇曼散射, 喇曼整形。

一、引 言

受激喇曼散射是将准分子激光输出频移到特定的近紫外和可见波段的有效方法。它不仅具有转换效率高,且能通过喇曼整形(Raman beam clean-up)改善斯托克斯光的光束质量^[1]。

喇曼整形的原理如图1所示。在一个喇曼池中同时注入一个泵浦光束及一个斯托克斯光束。如果注入的斯托克斯光束具有良好的光束质量,那么在喇曼池中由泵浦光产生的斯托克斯光束亦会具有良好的光束质量。从这个意义上讲,输出的斯托克斯光被“整形”成具有良好光束质量的光束。为了达到上述目的,在实验上必须满足以下两个条件:

(1) 注入喇曼池的泵浦光及一阶斯托克斯光束必须同时到达。在实验上往往采用一阶斯托克斯光先于泵浦光到达喇曼池,从而保证注入的一阶斯托克斯光对喇曼放大过程的控制作用。

(2) 为了提高喇曼整形的效果,泵浦光束与一阶斯托克斯注入光束在喇曼池中的模体积最好互相一致匹配。在物理上,它意味着注入一阶斯托克斯光能控制全部的喇曼放大过

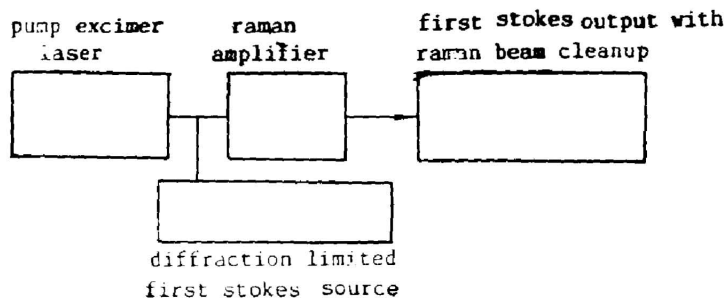


Fig. 1 Principle diagram of the Raman beam clean-up

收稿日期: 1987年5月7日; 收到修改稿日期: 1987年7月8日

* 本工作获得国家自然科学基金会资助。

程。

本文首先将准分子激光输出分成二束,用其中一束作喇曼放大池的泵浦光;另一束泵浦喇曼振荡器。采用空间滤波的方法来提取具有衍射极限特性的斯托克斯光,并用它作为喇曼整形的注入源。通过改变空间滤波器光阑直径,研究注入斯托克斯光束质量对喇曼整形的影响。同时,还进行了喇曼整形及喇曼放大的特性比较,求得了氢喇曼池中不同氢气压下的喇曼增益及饱和参量。

二、实验装置

喇曼整形的实验装置如图 2 所示。XeCl 准分子激光束通过分束器分成两束,一束占总能量 20% 的透射光用于泵浦喇曼振荡器。由于 XeCl 准分子激光采用非稳腔结构,输出窗口 W 为中间 $\phi 6\text{ mm}$ 镀有 308 nm 全反膜的凸透镜,故输出光束是自聚焦型的,所以必须将喇曼振荡器的中心置于此光束的焦点上。喇曼振荡器的输出经准直透镜 L_1 及色散棱镜将一阶斯托克斯光分离出来,该光束经过空间滤波器由反射镜 M_n 反射经双色镜 M_a 注入喇曼放大器。

占总泵浦能量 80% 的泵浦光经三块 M_o 反射镜及准直透镜 L_2 到达 M_a , 其总光程调节到该束光到达 M_a 的时间比由 M_n 来的一阶斯托克斯光滞后 5 ns 以上。

镜片 M_a 也是双色片,镜片 M_n 是 353 nm 的全反膜,对一阶斯托克斯光有很高的反射率,它与滤光片 F 配合,保证光电二极管或者能量计接收到的是一阶斯托克斯光。

为了测量输出斯托克斯光的远场分布,透镜 L_3 以及针孔 D_3 放置于能量计前方,当 D_3 在 L_3 的焦平面上作扫描移动,可以测量到光束的远场分布。我们采用 X 射线预电离的准分子激光,输出光束接近正方形,根据实际测量,二个方向上具有相同的方向性及发散角*。

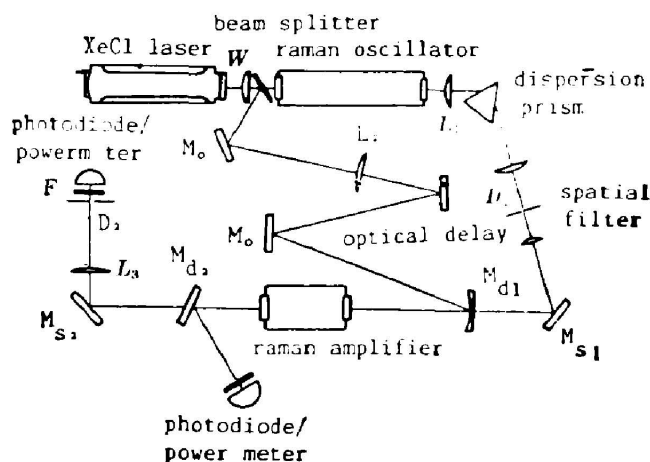


Fig. 2 Schematic of the Raman beam cleanup experiment]

- * M_a 是一块多层介质膜反射镜,对 308 nm 有高的反射率,而对一阶斯托克斯光具有较高的透过率。
- ** 在以下实验及分析中,仅给出一个方向发散角特性,另一个方向上具有相同的特性。在这一点上与常见的矩形光束准分子激光是不同的。

三、一阶斯托克斯光的振荡放大

在进行喇曼整形实验之前,首先进行一阶斯托克斯光的喇曼振荡放大研究。此时,图2

中的空间滤波器被拿走。经过仔细地调整光路,使两束光束在喇曼放大器中同轴且具有接近的膜体积。在文献[1]中,两束光的直径有较大的差别,注入光的直径为泵浦光的1/2~1/4左右。我们在仔细调整光路后,使两束光在喇曼池中传播的直径尽量一致,从而保证了较高的放大效率。

图3给出喇曼放大器中喇曼放大能量与输入能量的关系曲线,其输入能量来自喇曼振荡器。当改变喇曼放大池中氢气压力时,呈现不同的增益饱和和特性。根据喇曼放大理论,喇曼放大输出与输入能量之间满足^[3]

$$E_{out} = E_{sat} \ln \left\{ \exp(gL) \left[\exp\left(\frac{E_{in}}{E_{sat}}\right) - 1 \right] + 1 \right\}, \quad (1)$$

式中 E_{out} 为输出能量密度; E_{in} 为输入能量密度, E_{sat} 为饱和能量密度; g 为喇曼增益系数; l 为喇曼放大增益介质的长度。我们采用计算机编码方法对实验结果与公式(1)进行符合计算。计算结果由表1给出。此时喇曼放大器的泵浦能量为100 mJ。最大的转换效率为6%。

Table 1 Saturated parameters and Raman gain of 1st Stokes at different H₂ pressure

H ₂ pressure(atm)	E_{sat} (mJ/cm ²)	g (cm ⁻¹)
4	1.3	0.063
5	1.2	0.050
6	1.0	0.038

为了在喇曼整形实验中确定最佳的氢气压力,将放大器的输入信号减小到0.02 mJ,测得 S_1 的放大倍数随氢气压力的变化如图4(a)所示,在总气压为4 atm下获得最大的放大倍数,为此在喇曼整形实验中我们将放大池的氢气压力维持在4 atm。

令人感兴趣的是喇曼放大倍数和氢气压力的关系与喇曼振荡一阶斯托克斯转换效率曲线有很大的不同(见图4(b)中 $S(1)$ 曲线),在喇曼振荡过程中, $S(1)$ 的转换效率随氢气压力的增加而单调下降。其原因是在受激喇曼散射过程中,一旦第一阶斯托克斯光建立后,其频率为

$$\omega_s = \omega_p - \omega_v, \quad (2)$$

式中 ω_v 为氢分子 $v=0$ 与 $v=1$ 能级间的频率间隔, ω_p 为泵浦光频率, ω_s 为一阶斯托克斯

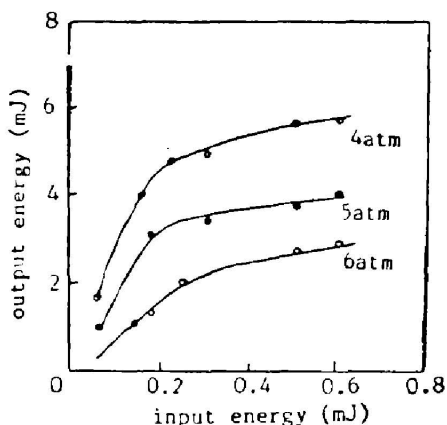


Fig. 3 H₂ Raman amplifier energy vs input energy

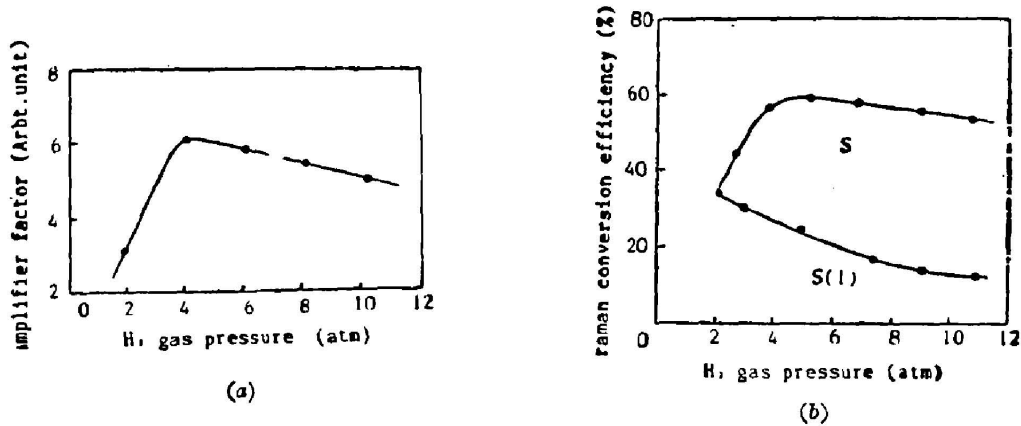


Fig. 4

- (a) Small signal amplification vs H_2 gas pressure for the first Stokes Raman amplification with input S_1 energy of 0.02 mJ;
 (b) Total Raman energy output and $S(1)$ energy conversion efficiency vs H_2 gas pressure.

光频率。当一阶斯托克斯光足够强时,又会被视为泵浦光去激励高一阶的斯托克斯光,产生频率为

$$\omega_n = \omega_n - \omega_0 = \omega_p - 2\omega_0 \quad (3)$$

的二阶斯托克斯输出。原则上,只要选择适当的喇曼池长度及泵浦光强,可以将泵浦光转换到任何级数的斯托克斯输出。事实上,由于激光波形不是严格的方波,泵浦激光及喇曼光在喇曼池截面上不是均匀的分布,这种“时间”和“空间”上面的不均匀性会引起受激喇曼散射的多波长输出,即不同阶数的斯托克斯光同时输出。如果我们将各阶斯托克斯光的效率叠加起来,作为氢气压力的函数(见图 4(b)中 ΣS 曲线),发现它的变化趋势与图 4(a)的喇曼放大曲线基本上一致,它说明在放大过程中,由于在放大器中首先建立起一个注入的被放大信号,它会在喇曼介质中提取大部分储能而不产生高阶的斯托克斯输出。以上实验表明,控制放大器的泵浦光能量是一个十分重要的因素,如果泵浦光能量太大会产生放大器的“自振”,从而使能量转到各级斯托克斯光上,影响放大效果,经过反复实验,我们选取放大器的泵浦能量在 100 mJ 量级,如果进一步降低泵浦能量,会使放大效果变差。

四、喇曼整形实验

在图 2 的光路中加入空间滤波器即可控制注入光的光束质量。在加入空间滤波器以后,采用衰减片改变注入光束的能量,得到类似于图 3 的喇曼放大曲线,其结果如图 5 所示,二者具有完全一致的变化规律。

用针孔法测量注入光束的远场分布,其发散角为 0.2 mrad,此时针孔的直径为 0.2 mm。经过喇曼放大器以后,其远场分布仍具有同样的性质,发散角仍为 0.2 mrad。图 6(c) 曲线给出喇曼整形后的远场分布,图中横坐标已折算成 mrad*。

* 由于注入光束的远场分布与图 6(c) 曲线一致,因此不再另外给出。

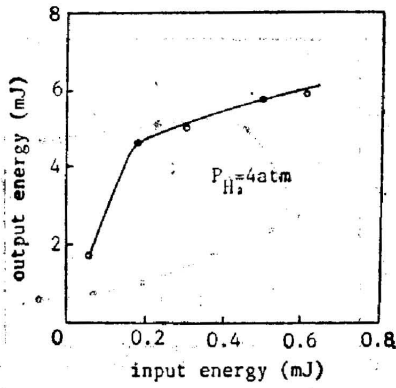


Fig. 5 H₂ Raman amplifier energy vs input energy with Raman beam cleanup at first stokes wavelength pumped by XeCl excimer laser

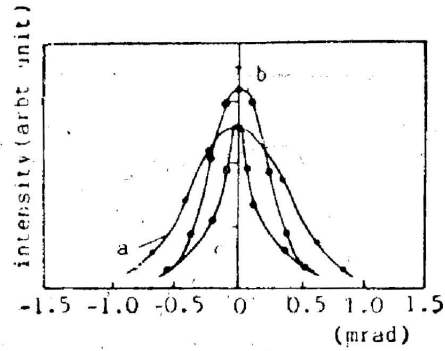


Fig. 6

(a) Undistorted far field profiles of the pump laser beam; (b) far field profile of the first stokes emission from Raman oscillator; (c) far field profile of the first stokes emission with Raman beam cleanup

作为比较, 图 6a 曲线给出泵浦光场的远场分布, 其发散角 0.8 mrad (采用非稳腔), 由此可见经过喇曼整形以后的光束发散角有 4 倍的改善。如果注意到喇曼振荡后一级斯托克斯光的发散角为 0.6 mrad (图 6b 曲线), 似乎采用喇曼整形的优越性并不显著。

事实上, 喇曼整形可以大大降低对泵浦光光束质量的要求, 作者曾在图 2 的泵浦光光路上插入厚度为 1 mm 的石英片, 并将其中一面磨毛使泵浦光场畸变, 则得其发散角为 2.5 mrad, 利用这种畸变后的泵浦光来泵浦喇曼振荡器, 那时的一阶斯托克斯光的方向性亦会随之变差, 其发散角约变差 3 倍。但如果采用喇曼整形技术, 放大后的一阶斯托克斯光发散角仍为 0.2 mrad。因此采用喇曼整形技术, 可以使一阶斯托克斯光的发散角比泵浦光束有数量级的改善。

综上所述实验结果可见, 经过喇曼整形后的放大斯托克斯光的发散角, 完全决定于注入光束的发散角, 而注入光束的发散角主要决定于空间滤波器的针孔直径。为此我们改变针孔的大小来测量喇曼整形以后的一阶斯托克斯光的发散角, 其结果如图 7 所示, 图 7 曲线分别表示针孔直径为 0.6 mm, 0.34 mm 及 0.2 mm 时的远场分布, 作为比较图 7a、b、c 曲线分别

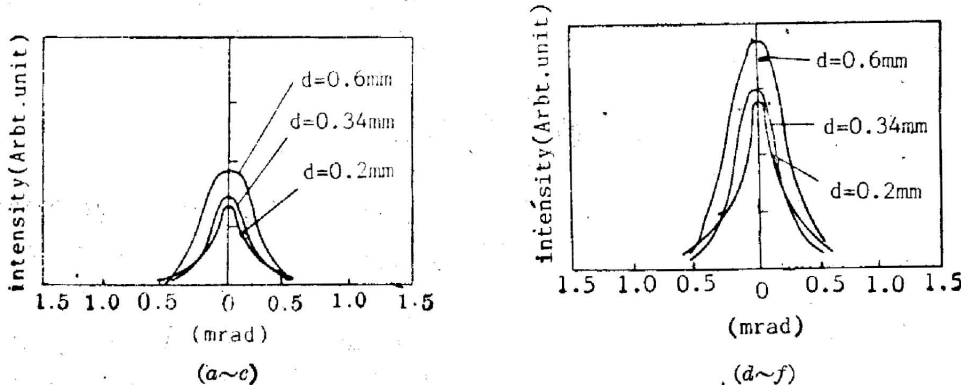


Fig. 7 Far field profiles of the first Stokes emission of the injection source (a~c) and of the Raman beam clean-up (d~f) for different pin hole diameters of the spatial filter

表示相应条件下注入光源的远场分布。我们可以根据对光束发散角的不同要求选择合适的针孔直径。当然,随着针孔的减小,注入能量亦会减小,放大后的能量亦会减小,亦即方向性改善以牺牲总输出能量来达到。但如果我们注意到图 5 的放大特性,当注入能量大于 0.2 mJ 后,放大器工作在饱和区,输入能量从 0.2 mJ 上升到 0.6 mJ (3 倍),放大后的能量仅增加 25% 左右,我们实验中的变化范围,正好在这个区域,因此输出能量的变化不大。

五、讨 论

(1) 本实验采用非稳腔 XeCl 激光输出,它是一个环状输出光斑,但其斯托克斯输出分布却并不呈环状特性。图 8(a)中曲线 1、2 分别表示非稳腔泵浦光和一阶斯托克斯光(中间强的分布)的近场分布。

为了解释上述实验现象,我们采用高斯-厄米模方法研究喇曼波面结构,即将泵浦场按高斯-厄米模展开,然后求解斯托克斯场的波面结构。计算结果表明,对于某些高阶的高斯-厄米模,它对应的斯托克斯场并不再现它的波面结构。作为例子,图 8(b)是第 10 阶高斯-厄米模的场分布,一定程度上代表了环状分布的非稳腔输出;它对应的一阶斯托克斯光场分布由图 8(c)给出,它呈现了中间强的钟形分布。因此,在理论上分析了这种受激喇曼散

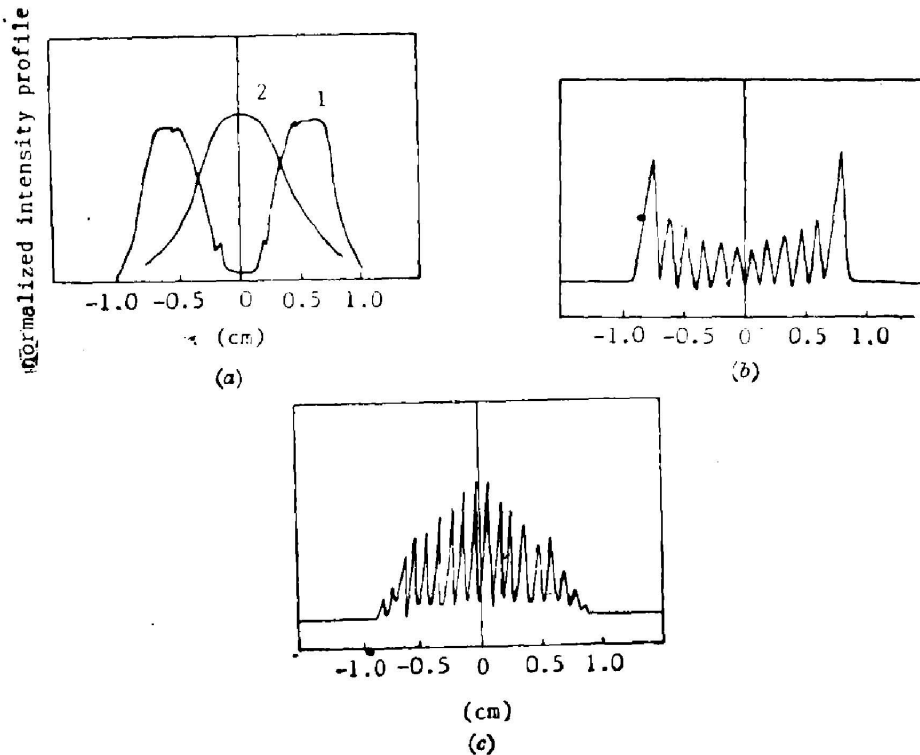


Fig. 8

(a) 1: near-field profile of the pump laser beam with unstable cavity; 2: near-field profile of the first stokes emission; (b) 10th order Gaussian-Hermite mode field profile; (c) Calculated field profile of the first stokes emission with the pump beam profile of 10th order Gaussian-Hermite mode

射过程的波面不再现性。

(2) 本技术原则上可推广到高阶斯托克斯光的喇曼整形。其中令人感兴趣的是第三阶斯托克斯光(499 nm), 这种蓝绿光输出对于海水通信有很大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] R. S. F. Chang, N. Djeu; *Opt. Lett.*, 1983, **8**, No. 3 (Feb), 139~141.
- [2] 楼洪洪等; 《光学学报》, 1985, **5**, No. 10 (Oct), 955~957.
- [3] P. B. Corkum *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 11 (Nov), 1962~1975.

Raman beam cleanup of excimer laser radiation*

LOU QIHONG, HUO YUNSHENG, DONG JINXING,

DING ZEAN AND WEI YUNRONG

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

(Received 7 May 1987; revised 8 July 1987)

Abstract

Stimulated Raman Scattering is one of the methods to shift the UV excimer laser radiation into the specific wavelengths in the near UV and visible regions. Diffraction limited first stokes output can be obtained by means of Raman beam cleanup. The effects of the beam quality of the injected emission on the Raman beam cleanup was investigated in this paper. The Raman gain coefficients and the saturated parameters of Raman amplifier were deduced for different H_2 gas pressures.

Key words: excimer laser; stimulated Raman scattering; Raman beam-clean-up.

* This work was supported by the Nature Science Fundation of China.