

# 高压氢中的级联泵浦受激喇曼散射

楼祺洪 袁一风 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

利用 XeCl 准分子激光泵浦高压氢产生的受激喇曼散射(SRS)光,再次泵浦另一个长度较短的高压氢喇曼池,采用这种级联泵浦技术使高阶斯托克斯线强度增加。

## 一、引 言

由于高功率紫外准分子激光的发展,近年来它已广泛地用作受激喇曼散射的泵浦源,通过高压氢气中的受激喇曼散射过程将准分子激光的紫外辐射作频率下转换,是目前获得高功率蓝绿激光的重要途径之一<sup>[1]</sup>。要实现高效率的频率转换,要求泵浦用的激光束具有高的功率密度和较小的发散角,理论分析表明,转换效率与可聚焦的泵浦光功率密度和聚焦方式有关。但是,由于准分子激光介质的增益很高,一般的准分子激光束的发散角在衍射极限的十倍以上,不容易获得高的可聚焦功率密度。对于长度为1~2米的氢喇曼频移器,较难获得高的转换效率,一些高阶的斯托克斯或反斯托克斯线仅能用光谱仪观察,而其时间特性则较难检测到。近年来,虽然已出现用注入锁定的方法来获得很好的光束质量<sup>[2]</sup>、或者用振荡-放大装置<sup>[3]</sup>提高转换效率,但其结构都比较复杂,对实际应用不太方便。

本文试图用简单紧凑的两级级联泵浦技术,提高高阶斯托克斯的转换效率。其基本出发点是先将准分子激光泵浦一个氢喇曼池,使其产生具有比泵浦光较好方向性的受激喇曼光,再将它用一个聚焦透镜聚焦后去泵浦另一个较短的氢喇曼池。这种级联泵浦方式使高阶斯托克斯线增强,提高了转换效率。

## 二、级联泵浦实验装置

我们设想采用两个高压氢喇曼池,用准分子激光泵浦第一个喇曼池,再将其输出(准分子激光和斯托克斯光的混合)用透镜聚焦注入第二个高压氢喇曼池,希望这个级联泵浦装置比单纯延长单级喇曼池长度的方法,能获得更高的转换效率,特别是高阶斯托克斯光的转换效率。采用这种设计的主要依据是:首先,第一个喇曼池输出的斯托克斯光,其光束质量优于原泵浦光,方向性有所改善。我们的早期<sup>[4]</sup>实验表明, XeCl 准分子激光束通过长度为1米的喇曼池,输出的斯托克斯光发散角是泵浦光发散角的1/3左右。而发散角小的光束有利于受激喇曼散射,将这部分斯托克斯光泵浦另一个喇曼池就会提高下一级的斯托克斯光转换效率;其次,只有当泵浦功率密度超过阈值时,才会产生受激喇曼散射,在泵浦光束强度

不太高时,产生有效散射的仅是喇曼池中央一段不太长的聚焦区域,在这种情况下,即使增长喇曼池长度,转换效率亦不会有明显增大,如果将第一个池的输出光束再次聚焦泵浦第二个喇曼池,就又可以在第二个池的聚焦区产生有效的喇曼散射。另一方面,对于第二个喇曼池而言,泵浦光不再是单一的准分子激光,而是含有几个低阶斯托克斯分量的光束,各分量的强度比起普通的受激喇曼散射的噪声功率密度一般要高十个量级以上,因此有助于受激喇曼散射过程的建立,特别是有利于增强高阶斯托克斯的输出。

根据以上分析,我们设计的实验装置如图 1 所示。泵浦光源  $L$  是一台 X 光预电离放电

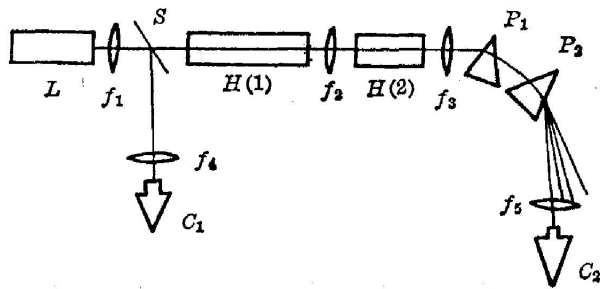


图 1 采用级联泵浦方法的受激喇曼散射实验方框图  
Fig. 1 Schematic diagram of the stimulated Raman scattering experiment with cascade pumping

泵浦准分子激光器<sup>[5]</sup>,其输出光斑为  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ,激光脉冲宽度约为  $85 \text{ ns}$ ,光束发散角为  $2 \text{ mrad}$ 。喇曼池  $H(1)$  和  $H(2)$  长度分别为  $100 \text{ cm}$  和  $35 \text{ cm}$ ,内径为  $4 \text{ cm}$  的不锈钢管制成,氢气压力可从  $0 \sim 17 \text{ atm}$  范围内连续可调。透镜  $f_1$  和  $f_2$  是石英透镜,分别保证光束聚焦于喇曼池  $H(1)$  和  $H(2)$  的中央,测得的焦距分别为  $140 \text{ cm}$  和  $33 \text{ cm}$ 。透镜  $f_3$  起准直作用,其准直后的光束由  $P_1$

和  $P_2$  两个石英三角棱镜分光将各级斯托克斯光和反斯托克斯光分开。移动透镜  $f_5$  和  $C_3$  即可测量不同阶散射光的能量,透镜  $f_4$ ,分光石英平板  $S$  和能量计  $C_1$  用于监视泵浦光束,由能量计  $C_1$  和  $C_2$  的读数可计算出各阶斯托克斯线的转换效率。用快速光电二极管及宽带示波器代替  $C_1$  或  $C_2$  则可测得泵浦光和斯托克斯光脉冲波形。在棱镜  $P_1$  处放置平面光栅光谱仪则可测量其光谱分布。

### 三、实验结果

用摄谱法在  $245 \text{ nm} \sim 630 \text{ nm}$  范围内观察到 4 条斯托克斯线和 2 条反斯托克斯线,如图 2 所示。在采用一个喇曼池的情况下,仅看到微弱的  $S_2$  而未观察到  $S_4$  讯号,此时池内氢气压力为  $17 \text{ atm}$ ,激光能量为  $280 \text{ mJ}$ ,光束发散角为  $2 \text{ mrad}$ 。而当将这个光束再聚焦通过另一个长度为  $35 \text{ cm}$  的喇曼池后(氢气压力亦为  $17 \text{ atm}$ ),  $S_3(\lambda=499 \text{ nm})$  讯号明显增大,而且  $S_4$  讯号也能用肉眼观察到。图 2 是在透镜  $f_5$  处放置一个屏幕拍摄的喇曼散射光彩色照片。由于感光底片灵敏范围的限制,对于更高阶的斯托克斯讯号未能显示。

图 2 是在透镜  $f_5$  处放置一个屏幕拍摄的喇曼散射光彩色照片。由于感光底片灵敏范围的限制,对于更高阶的斯托克斯讯号未能显示。

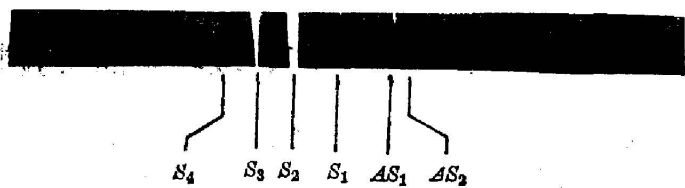


图 2 经过棱镜分光以后拍摄的斯托克斯光和反斯托克斯光的照片(泵浦光  $B$  用滤光片滤去)

Fig. 2 Photograph of the Stokes and anti-Stokes components

采用 GD-10 快速光电二极管和 OK-19 示波器检测到的泵浦讯号和受激喇曼散射讯号

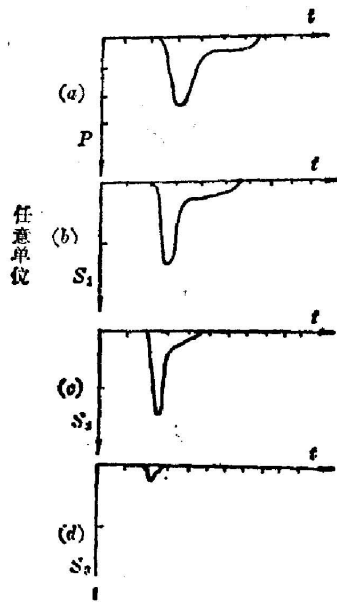


图3 采用单个喇曼池的泵浦光脉冲(a)和各级斯托克斯光脉冲:  $S_1$ (b);  $S_2$ (c) 和  $S_3$ (d) (时标为 100 ns/div)

Fig. 3 Stimulated Raman scattering with a single Raman cell: pumping XeCl laser pulse (a) and Stokes pulses of the first (b), second (c) and third (d) Stokes components

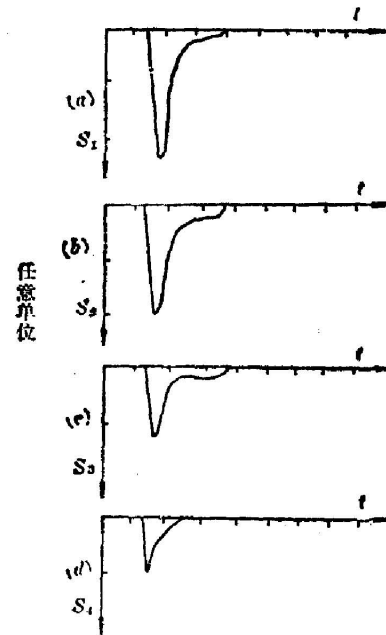


图4 采用级联泵浦后各级斯托克斯光脉冲:  $S_1$ (a),  $S_2$ (b),  $S_3$ (c) 和  $S_4$ (d) (时标为 100 ns/div)

Fig. 4 Stimulated Raman scattering pulses with cascade pumping scheme: (a) first Stokes  $S_1$  pulse, (b)  $S_2$  pulse, (c)  $S_3$  pulse and (d)  $S_4$  pulse. The time scale is 100 ns/div

由图3和图4给出。图3是通常的单个喇曼池的受激喇曼散射各级光电信号,由于要使接收器工作于线性范围,在接收器前加上不同的滤光片和衰减片来测量不同的受激喇曼散射讯号,其结果显示了受激喇曼散射过程的脉冲宽度变窄,在本实验条件下,泵浦光脉冲的宽度为 85 ns,而  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  的光脉冲宽度分别为 55 ns, 50 ns 和 38 ns。图4是本实验中级联泵浦条件下所测得的受激喇曼散射各级光电信号,分别测量它们的能量,表明高阶斯托克斯讯号的明显增强,不仅如此,还观察到了单个喇曼池下未能观察到的  $S_4$  ( $\lambda = 630$  nm) 讯号。令人感兴趣的是,在级联下的斯托克斯光脉冲宽度大于相应阶次的单个喇曼池下的斯托克斯光脉冲宽度。这证实了在级联泵浦下注入讯号强,很快建立受激喇曼散射过程导致脉冲宽度较大。我们定量测量了三级斯托克斯光  $S_3$  的脉宽其数据见表1。表中  $P_{H_2}(2)$  是第二个喇曼池内氢气压力。注意到:  $P_{H_2}(2) = 1$  atm 时,级联泵浦结构接近退化为单级泵浦结构。可见,当第二个氢池内氢气压力为 13 atm 时,两级泵浦受激喇曼散射的  $S_3$  脉宽为单级泵浦受激喇曼散射的  $S_3$  脉宽的一倍左右。

关于级联泵浦提高转换效率的定量结果如表2所示,表中忽略了三阶以上的斯托克斯讯号,因为它们的转换效率在 0.1% 以下。由于检测装置距喇曼池很远,背景散射比  $S_3$  更弱,更可以略去不计。从表2可以看出,采用两个喇曼池的级联泵浦装置,虽然第二个喇曼池长度仅为第一个喇曼池长度的 1/3 左右,但已可使总的斯托克斯光的转换效率从 19% 左右提高到 28% 左右。值得指出的是一阶斯托克斯  $S_1$  从 14.9% 提高到 21.0%, 比值为

表 1 两级泵浦 SRS 三级斯托克斯光  $S_3$  脉宽

Table 1 Pulsewidths of the third Stokes component of the stimulated Raman scattering with cascade pumping

$P_{H_2}(2)$ (atm)	16	13	9	5	1
脉宽 (ns)	77	88	64	40	38

表 2 单个喇曼池和两个喇曼池级联泵浦条件下能量转换率的实验值

Table 2 Experimental values of the energy transfer coefficient under pumping conditions of one and two Raman cells respectively

	单 个 喇 曼 池	两个喇曼池级联泵浦
泵浦 (308 nm)	80.5%	71.0%
$S_1$ (353 nm)	14.9%	21.0%
$S_2$ (414 nm)	3.7%	6.4%
$S_3$ (499 nm)	<0.1%	~0.1%

1.4; 而二阶斯托克斯  $S_2$  从 3.7% 提高到 6.4%, 比值为 1.7, 这表明第一个喇曼池输出的  $S_1$  具有较好的方向性, 经过再次聚焦泵浦第二个喇曼池很有利于  $S_2$  的产生, 这个结果与我们的分析是一致的。

严格而言, 要证明级联泵浦优于通常的单个喇曼池装置, 应该使单级喇曼池长度不小于级联泵浦中两个喇曼池长度之和。为此, 我们测定了长度为 173 cm 的单个喇曼池的转换效率实验结果表明, 其值与表 2 中长度为 100 cm 的喇曼池的结果很接近, 从而进一步证实了级联泵浦的效果, 亦证实了我们在第二节的分析。

#### 四、讨论和结论

本文提出了采用级联泵浦方法的受激喇曼散射技术, 并用两个长度分别为 100 cm 和

图 5  $S_3$  斯托克斯输出的环状结构Fig. 5 Ring pattern of  $S_3$  SRS pulse

35 cm 的高压氢喇曼池实验证实了这种方法能以较短的喇曼池、较简单紧凑的结构获得比单个喇曼池(池长与两个喇曼池长度之和接近)较高的斯托克斯转换效率, 特别是有利于提高高阶(如  $S_2$ 、 $S_3$  等)斯托克斯线的输出。本方法与振荡-放大组合结构的效果是不同的, 在我们的实验中, 由于第二个喇曼池的泵浦光中包含了原泵浦光及一些斯托克斯线, 使受激过程中四波混频过程有所加强。由于四波混频过程要求波矢满足一定的向量关系, 因此其发射光的光斑会呈现环状结构, 我们在实验中也观察到了  $S_3$  辐射的环状结构。这种结构一般在反斯托克斯光中呈现, 而且大部分是圆锥状的单环结构, 我们在实验中观察到的双环结构, 其图形如图 5 所示。

此外, 在一些斯托克斯线之间还用光谱仪拍摄到一些强度较低的谱线, 其波长为

442 nm 和 518 nm, 其产生原因可能属于四波混频过程, 有关这方面的理论分析正在进行之中。

总之, 我们在总长度为 135 cm 的两个高压氢喇曼池中, 采用了级联泵浦技术, 在几兆瓦的准分子激光泵浦下, 总体转换效率接近 30%。实验结果证实了我们的设想, 有利于紫外光向蓝绿光区的转换, 同时, 如果选择合适的泵浦参量, 加强某些四波混频谱线的强度, 可以使受激喇曼散射的输出谱线增加, 使我们在更多的波长上获得强激光输出。

作者对祁建平、董景星、丁爱臻、魏运荣等同志在实验上的帮助表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] H. Komine; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**, No. 7 (Apr), 551.
- [2] R. S. F. Chang, N. Djeu; *Opt. Lett.*, 1983, **8**, No. 3 (Mar), 139.
- [3] H. Komine *et al.*; *Opt. Lett.* 1982, **7**, No. 4 (Apr), 157.
- [4] 楼祺洪等;《中国激光》(待发表)。
- [5] 楼祺洪等;《中国激光》(待发表)。

## Stimulated Raman scattering with cascade pumping in high pressure H<sub>2</sub>

LOU QIHONG YUAN YIPENG AND WANG ZHIJIANG

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

(Received 26 March 1985; revised 18 June 1985)

### Abstract

The stimulated Raman scattering pulse from a high-pressure H<sub>2</sub> Raman cell pumped by a XeCl excimer laser was used to pump another short high-pressure H<sub>2</sub> Raman cell. The higher order Stokes lines were enhanced successfully by using this cascade pumping configuration.