

# 氢气中的超宽带拉曼脉冲压缩\*

楼祺洪 徐剑秋 董景星 黄 峰 魏运荣

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 对氢气中的超宽带拉曼脉冲压缩进行了实验研究,利用工作在阈值附近的拉曼振荡器,对准分子激光抽运源的脉冲宽度为 23 ns 时,得到了 6 ns 的拉曼种子光,并采用反向拉曼放大得到了放大倍数近 3 倍的放大拉曼光。并就实验中的气压和气体掺杂对实验结果的影响进行了讨论。

**关键词** 超宽带,受激拉曼散射,脉冲压缩

## 1 引 言

在激光惯性约束核聚变应用中,需要宽带宽和短脉冲的激光驱动源,避免干涉引起的光照不均匀性和获得高的光照亮度<sup>[1]</sup>。准分子激光器由于其高功率和宽带宽受到人们的青睐,为了得到较高的工作效率和提取效率,准分子激光器的脉冲宽度需保持在几十个纳秒。因此通常利用后向拉曼散射(backward stimulated Raman scattering, BSRS)对准分子激光脉冲进行压缩以获得较短的脉冲,但由于拉曼散射的前后向增益的不对称性,导致宽带后向拉曼的增益很低,抽运光的带宽有一个上限( $\text{FWHM} < 1 \text{ cm}^{-1}$ ),超过上限将不易获得有效的脉冲压缩。拉曼的前后向增益比一般与拉曼的自然线宽成反比,与抽运光线宽成正比<sup>[2]</sup>。对于抽运光线宽较窄的情形,选择拉曼自然线宽较宽的介质,如甲烷等,对降低拉曼的前后增益比,提高压缩比有较大作用<sup>[3,4]</sup>。但对于宽带尤其超宽带( $\text{FWHM} > 10 \text{ cm}^{-1}$ )抽运光,后向拉曼压缩不易取得明显效果。另外一些拉曼脉冲压缩的方案,如角多路法<sup>[5]</sup>、混合气体法<sup>[6]</sup>等都对抽运光带宽有一定限制。

本文提出一种新的方法,利用工作在阈值附近的拉曼振荡器,根据拉曼振荡在阈值附近的指数增长特性,可以有效地削短缓慢变化的抽运光脉冲,得到短脉冲的拉曼种子光。此方法对抽运光的带宽没有很严格的要求,可用于超带宽的拉曼短脉冲的产生。实验中以自由运转的准分子激光器( $\text{FWHM} = 50 \text{ cm}^{-1}$ )为抽运源,当抽运光脉冲宽度为 23 ns 时,得到了 6 ns 的 Stokes 光,然后经反向拉曼放大得到约 10 mJ 的 Stokes 光,该拉曼光可用做拉曼放大链的前级输入,为拉曼放大链提供短脉冲、宽带宽的注入种子光。

## 2 实验与结果

实验选用紫外预电离自由运转 XeCl 准分子激光器(308 nm, SY-200 型,  $\text{FWHM} = 50$

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-06-18; 收到修改稿日期: 1998-09-28

$\text{cm}^{-1}$ ) 做抽运源, 激光器由放大率  $M = 6$  的正支共焦非稳谐振腔组成, 输出能量最大值为 200 mJ。激光的重复频率由放在激光前的快门控制, 约每 3 min 一次, 以消除激光脉冲间热效应的影响。

实验装置见图 1。拉曼振荡器长为 630 mm, 直径为 80 mm, 充有 8 atm 的氢气(纯度为 99.9%), 非稳腔输出的抽运光聚焦在拉曼振荡器的中部。欲使拉曼振荡工作在阈值附近, 需调节输入抽运光的强度。抽运光的强度的调节由调节抽运光放电电压及选择分束片  $\text{BS}_1$  完成。过大调节放电电压会改变抽运光的脉冲波形, 由激光器的后向输出监视激光的波形和能量, 当因调节放电电压而使抽运光波形变化时, 就需调换分束片  $\text{BS}_1$  并将电压回调。图 2 给出拉曼光脉冲宽度与输入抽运光能量工作在阈值附近的变化关系, 图中各点由 20 个测量值平均得到, 此 20 个点的输入能量起伏限制在 5% 以内, 超出此范围的点被舍掉。当输入抽运光的能量为  $(56 \pm 2)$  mJ 时(总能量为 160 mJ,  $\text{BS}_1$  的反射率为 35%), 得到 6 ns 的拉曼种子光。虽然愈接近阈值, 可得到的拉曼脉冲宽度愈窄, 但拉曼光输出同时也变得不稳定。由图中可以看出当输入抽运光为 65 mJ 时, 由于饱和效应, Stokes 光的脉冲宽度变化趋于稳定。

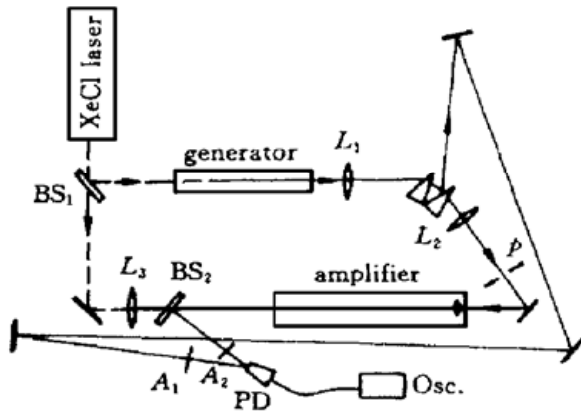


图 1 实验装置图

$L_1 \sim L_3$ : 透镜;  $P$ : 小孔; PD: 强流管; Osc: 示波器;

$\text{BS}_1, \text{BS}_2$ : 分束片; generator: 拉曼振荡器; amplifier: 拉曼放大器

Fig. 1 The diagram of the experimental setup

$L_1 \sim L_3$ : lenses;  $P$ : pinhole; Osc: oscilloscope;

$\text{BS}_1, \text{BS}_2$ : beam splitters

实验中发现, 由于四波混频效应二阶 Stokes 光可以在很低的能量下产生, 将极大地展宽一阶 Stokes 光的脉冲宽度。尤其在抽运光的光束质量较差时, 二阶 Stokes 光的产生会成为脉冲展宽的主要因素, 因此需仔细调整抽运光的能量, 抑制二阶 Stokes 光的产生。

拉曼种子光经透镜  $L_1$  和棱镜组分光后, 由透镜  $L_2$  准直并由小孔  $P$  滤去剩余的抽运光和杂散光后射入拉曼放大器, 拉曼光前沿与抽运光前沿在放大器输入窗的附近(图 2 中圆实点处) 相遇, 抽运光经透镜  $L_3$  微弱聚焦, 焦点在拉曼放大器的中部。拉曼放大器管长为 830 mm, 直径为 150 mm, 充有与振荡器中同样的氢气(两管之间有细管相连)。输出的拉曼光由普通熔石英薄片  $\text{BS}_2$  采出, 经强流管和数字示波器(LeCroy 9632) 检测并经微机处理。另有一束参考光由棱镜组中的后棱镜反射经延迟约 20 ns 后也射入强流管中, 选用适当的中性衰减片  $A_1$  和  $A_2$ , 使参考光与未经放大的拉曼光强度相等。通过与参考光对比, 可以监测输出拉曼光的波形和测量放大的倍数。实验结果如图 3 所示。图 3(a) 为抽运光的波形, 抽运光大致为三角形, 脉宽为 23 ns。图 3(b) 为放大的拉曼光与参考光, 放大光的脉宽仍为 6 ns, 放大倍数约为 3 倍。考

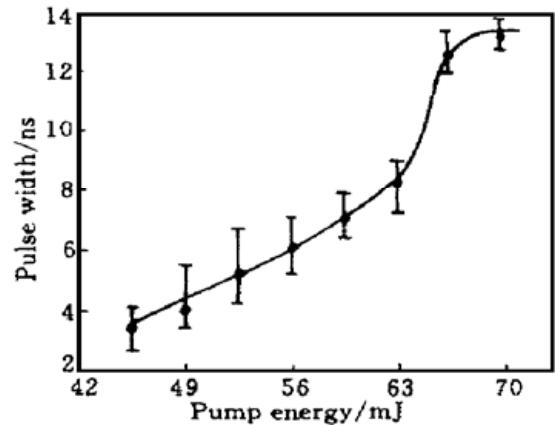


图 2 拉曼光脉冲宽度随抽运强度的变化

Fig. 2 The pulse width of Stokes versus the intensity of the pump

虑石英的反射率可算出由拉曼放大器中的出射拉曼光强度约为  $(10 \pm 2)$  mJ。

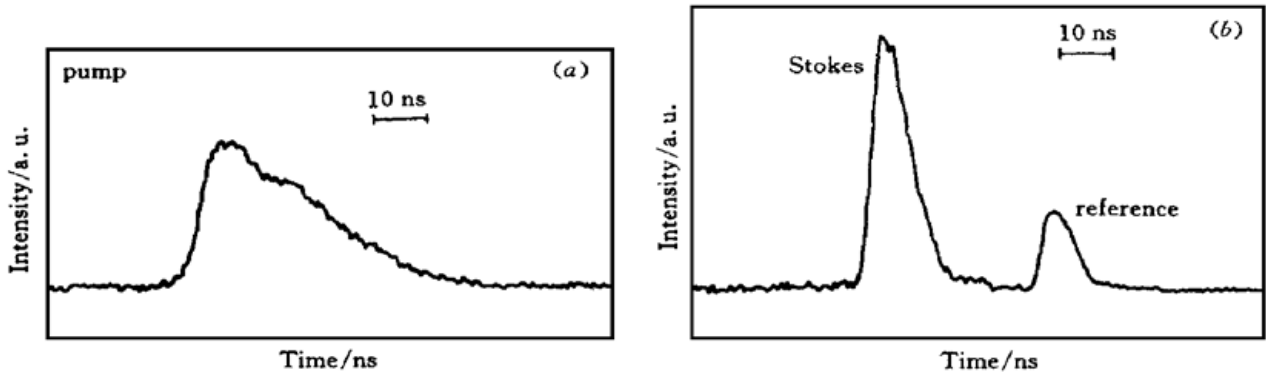


图3 (a) 抽运光的波形; (b) 参考光与放大拉曼光的波形

Fig. 3 (a) The profile of the pump; (b) The profiles of the reference and the amplification Stokes

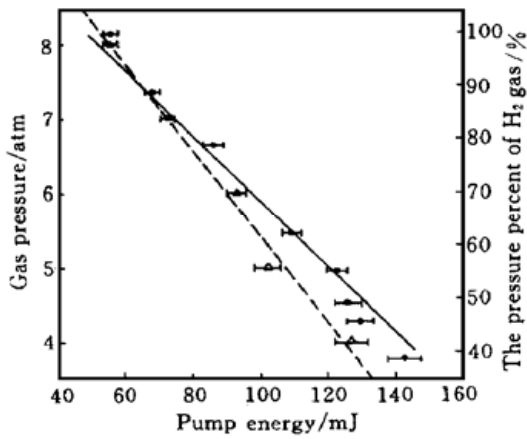


图4 抽运光能量(三角形)随氢气气压的变化, 及氢气中掺杂氦气时, 抽运光能量(圆点)随氢气气压比的变化

Fig. 4 The measurement (triangle) of the pump energy versus the gas pressure, and when the He gas was doped, the measurement (circle) of the pump energy versus the pressure percent of the hydrogen gas

改变拉曼放大器的气压, 由宽带拉曼光的增益系数<sup>[7]</sup>  $g = \frac{\rho \lambda_s}{h \nu_s} s(\nu) \frac{d\sigma}{d\Omega}$ , 其中  $\rho$  为气体密度,  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  为微分受激发射截面,  $s(\nu)$  为拉曼线型函数。在低气压氢气中  $s(\nu)$  因气压而变化很小, 可知拉曼散射增益主要由粒子数决定。降低拉曼气体的气压, 粒子数也相应下降, 增益系数因而也下降, 但并不改变阈值附近的拉曼性质, 相应改变抽运光的能量, 可得到同样宽度的 Stokes 脉冲。以产生 6 ns 的 Stokes 光为例, 测量不同气压下所需抽运光的能量, 其结果示于图 4。可以看出所需能量与气压基本成线性, 其与线性关系的偏差主要来源于  $s(\nu)$  随气压的非线性变化。在氢气中掺进其他缓冲气体也导致拉曼分子数的降低, 而使增益下降, 但也不改变受激拉曼阈值附近的特性。图 4 同时给出在氢气中掺入不同比例的氦气对放大效率的影响。实验中掺入其他气体如氮气等也给出同样结果。

### 3 分析与讨论

当不考虑抽运光的耗空及拉曼介质的色散时, 对于抽运光为平面波的情形, 宽带拉曼光脉冲的慢变幅电场强度  $E_s$  由下式给出<sup>[8,9]</sup>

$$E_s(z, t) = E_s(0, t') + (K_s z)^{1/2} E_L(t) \int_{-\infty}^{t'} \exp[-\Gamma(t-t')] |E_L(t')|^2 \frac{E_L(t') E_s(0, t')}{[\tau(t) - \tau(t')]^{1/2}} \cdot I_1\{2K_s z [\tau(t) - \tau(t')]^{1/2}\} dt' \quad (1)$$

其中  $E_L$  为抽运光的电场强度,  $\Gamma$  为拉曼光的线宽,  $K_s$  为拉曼光的增益系数, 变量  $\tau(t) = \int_{-\infty}^{t'} |E_L(t')|^2 dt'$  为抽运光的积分能量。 $I_1(x)$  为变量是  $x$  的一阶 Bessel 函数。

当拉曼过程为瞬态时,  $\Gamma t \ll 1$ , 利用 Bessel 函数的渐进公式 ( $x \gg 1$  时,  $I_1(x) \approx$

$(2\pi x)^{-1/2} e^x$ ), 方程可简化为

$$E_s(z, t) = E_s(0, t) \exp[(2K_{sz} |E_p|^2 z t)^{1/2}] \quad (2)$$

其中  $E_p$  为抽运光的平均电场强度。考虑到光场的聚焦特性, 则增益系数  $K_s$  需变为<sup>[10]</sup>

$$K_f = 2E_p \left[ \frac{K_s}{\lambda_p + \lambda_s} \tan^{-1} \left[ \frac{L}{b} \right] \right]^{1/2} \quad (3)$$

由公式(2)可以看出 Stokes 光与抽运光能量成指数增长, 当抽运光的能量接近阈值时, 其缓慢变化的脉冲包络受指数增长的增益曲线的削制而形成短脉冲的 Stokes 光, 原理如图 5 所示。由(2)式与图 5 可以得出, 当抽运光的脉冲包络以斜率  $\tan\theta = |E_d(t)|^2/t_d$  下降时, Stokes 光将以斜率

$$\tan\theta_s = \frac{\exp(2K_{sz} |E_d|^2 z t) - 1}{t_d} \quad (4)$$

下降, 其中  $E_d, t_d$  分别为抽运脉冲峰值点到阈值点的电场与时间差值。若假设抽运光为具有陡峭上升沿的三角形脉冲, Stokes 光脉冲与抽运光脉冲的宽度比将为

$$P = |E_d(t)|^2 / [\exp(2K_{sz} |E_d|^2 z t) - 1] \quad (5)$$

根据实验中的数值可得  $P$  约等于 0.6, 如果考虑到推导中的近似和受激拉曼阈值等值的测量误差及抽运光脉冲并不是严格的三角形包络, 计算值与实验所得总压缩比等于 0.4, 基本符合。

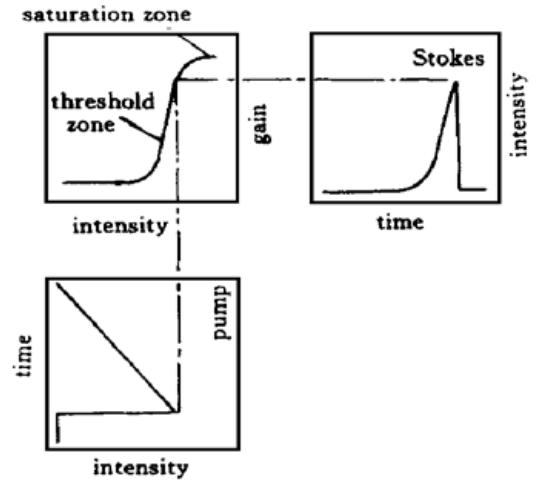


图 5 利用工作在阈值附近的拉曼散射进行脉冲压缩的原理示意图

Fig. 5 The illustration of the pulse compression by the Raman scattering in the range of threshold zone

表 1 甲烷与氢气的拉曼参数<sup>[11]</sup>

Table 1 The Raman parameters of methane and hydrogen gas<sup>[11]</sup>

gas	linewidth/cm <sup>-1</sup>	gain <sup>*</sup> /cm/MW	dephasing time	Raman shift/cm <sup>-1</sup>
methane	0.36	1.2 × 10 <sup>-3</sup>	30 ps	2916
hydrogen	0.01	6.8 × 10 <sup>-3</sup>	1.0 ns	4155

\* Note: The gain parameter is given as the steady state Raman gain at 10 atm with plane-wave pumping.

根据常用的拉曼气体的特性选择合适的拉曼介质也是非常重要的, 表 1 列出常用的拉曼气体甲烷和氢气的参数。对于实验中所用的抽运光脉冲, 宽度为 23 ns, 带宽为 50 cm<sup>-1</sup>, 甲烷气体较宽的拉曼线宽并不具有在窄线宽的拉曼压缩中的优势, 而氢气的高增益、长弛豫时间可高效利用抽运光能量和控制在后向拉曼放大中的二阶 Stokes 光<sup>[3]</sup>, 所以我们选择氢气做后向拉曼散射的拉曼介质。

由于工作在阈值附近的拉曼振荡器产生的拉曼光强度较低, 不能直接输入拉曼放大链, 需先通过预放大。反向拉曼放大可以在保持种子光脉冲宽度不变的情况下, 对种子光进行放大, 其较低的增益基本可以满足对拉曼放大链的注入光的要求。

## 4 结 语

利用工作在阈值附近的拉曼振荡器指数增益性质,可有效地削制缓变抽运光脉冲,从而产生比抽运光脉冲短的拉曼种子光,可以实现对超宽带激光脉冲的压缩。由此产生的短脉冲拉曼光再经反向拉曼放大器对其进行放大,可得到拉曼放大链所需的超宽带短脉冲的前级注入光。本文利用自由运转的 XeCl 准分子激光器(带宽  $50\text{ cm}^{-1}$ )抽运  $\text{H}_2$  进行了实验研究,在抽运光为 23 ns 时,得到了 6 ns, 10 mJ 的 Stokes 光。对实验结果的分析表明此方法对实现宽带宽、短脉冲的拉曼脉冲有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 M. D. Skeldon, R. S. Craxton, T. J. Kessler *et al.*. Efficient harmonic generation with a broad-band laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(5): 1389~ 1399
- 2 J. R. Murray, J. Goldhar, D. Eimerl. Raman pulse compression of excimer lasers for application to laser fusion. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(5): 342~ 368
- 3 H. Nishioka, K. Kimura, K. Ueda *et al.*. High compression ratio backward Raman conversion for high brightness excimer laser systems. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(7): 2251~ 2257
- 4 H. J. Kong, Y. G. Jeon, J. K. Kim. Efficient Raman conversion through backward stimulated Brillouin scattering. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(6): 993~ 995
- 5 C. J. Hooker, J. M. D. Lister, P. A. Rodgers. Short pulse amplification in the ultraviolet using stimulated Raman scattering. *Opt. Comm.*, 1991, **82**(5, 6): 497~ 502
- 6 E. Takahashi, Y. Matsumoto, K. Kuwahara. Short Stokes pulse generation by mixed Raman gas. *Opt. Comm.*, 1997, **136**(5, 6): 429~ 432
- 7 M. J. Shaw, J. P. Partanen, Y. Owadano. High-power forward Raman amplifiers employing low-pressure gases in light guides. Experiments. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(10): 1466~ 1475
- 8 M. G. Raymer, J. Mostowski. Stimulated Raman scattering: unified treatment of spontaneous initiation and spatial propagation. *Phys. Rev. A*, 1981, **24**(4): 1980~ 1993
- 9 R. J. Heeman, H. P. Godfried. Gain reduction measurements in transient stimulated Raman scattering. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(2): 358~ 364
- 10 W. R. Trutna, R. L. Byer. Multiple pass Raman gain cell. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(2): 301~ 312
- 11 D. C. Hanna, D. J. Pointer, D. J. Pratt. Stimulated Raman scattering of picosecond light pulses in hydrogen, deuterium, and methane. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(2): 332~ 336

## Superbroadband Raman Compression in Hydrogen

Lou Qihong Xu Jianqiu Dong Jingxing Huang Feng Wei Yunrong

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

**Abstract** Experiments of superbroadband Raman compression in hydrogen gases were conducted. The Raman seeds of 6 ns pulse duration were obtained from a near-threshold oscillator pumped by an excimer laser pulse of 23 ns. Then the seeds were amplified 3 times in a backward Raman amplifier. The effects of pressure and mixture of Raman gases were discussed.

**Key words** superbroadband, stimulated Raman scattering, pulse compression