

# 16 μm 仲氢受激喇曼激光器

金春植 林太基 吴序华 牛振亚 丁义山 李殿军 祝有信  
李玉兰 杨金峰 王乃弘

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

**提要:** 研制了 TEACO<sub>2</sub> 激光泵浦的仲氢受激喇曼激光器。讨论了影响喇曼转换效率的主要因素。最大输出能量达 536 mJ, 能量转换效率大于 13%, 量子转换效率超过 20%。

## A 16 μm para-H<sub>2</sub> stimulated Raman laser

*Jin Chunzhi, Lin Taiji, Wu Xuhua, Niu Zhenya, Ding Yishan, Li Dianjun, Zhu Youxin  
Li Yulan, Yang Jinfeng, Wang Naihong*

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

**Abstract:** A para-H<sub>2</sub> stimulated Raman laser pumped by a TEA CO<sub>2</sub> laser was developed. The principal factors affecting Raman conversion efficiency were discussed. When the laser ran at about 100K, the maximum output energy of the Stokes wave at 16 μm was 536 mJ, corresponding to an energy conversion of 13% and a quantum conversion of over 20%.

### 一、引言

仲氢受激转动喇曼激光器<sup>[1~5]</sup>的突出优点是转换效率高、输出功率大以及频率连续可调谐。因而迄今为止,该激光器仍作为分子法激光分离铀同位素所需要的优选激光器而受到重视,现在正朝着高重复频率和波长连续调谐的方向发展。

我们研制了 TEACO<sub>2</sub> 激光直接泵浦的仲氢受激转动喇曼散射激光器,获得了大能量 16 μm 喇曼激光输出。

### 二、仲氢的喇曼频率转换

根据分子对称性原理,仲氢分子只允许

$J=2n$  ( $n$  为整数) 态存在; 正氢分子只允许  $J=2n+1$  态存在。它们的喇曼跃迁均需满足选择定则  $\Delta J=2$ , 如图 1 所示。仲氢和正氢的喇曼位移分别为  $354.37 \text{ cm}^{-1}$  和  $587.03 \text{ cm}^{-1}$ 。由此可以算得 CO<sub>2</sub> 激光在仲氢和正氢中将分别产生约 16 μm 和约 25 μm 的喇曼激光。

喇曼散射是一种直接的双光子过程。图 1 中用虚线表示的能级,并非仲氢分子所固有,只是一个假想的虚态。由图可见,喇曼散射满足如下的频率关系:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_R \quad (1)$$

$\omega_p$ 、 $\omega_s$  和  $\omega_R$  分别是泵浦光频率、一级 Stokes 光频率和喇曼位移。由于喇曼位移

收稿日期: 1987 年 6 月 12 日。

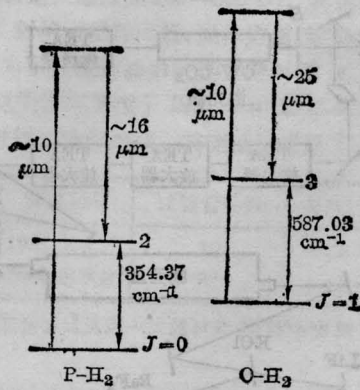


图1 正氢和仲氢的喇曼跃迁

$\omega_R$  是分子所固有的、不变的, 因此, 只要改变泵浦光的频率  $\omega_p$ , 就能相应地获得不同频率的 Stokes 光, 即受激喇曼激光。

要把  $\text{CO}_2$  激光有效地转换成所需要的喇曼激光, 必须满足条件: (1) 泵浦光的功率足够大; (2) 冷却喇曼介质(仲氢气体), 使大部分仲氢分子处于基态 ( $J=0$ ); (3) 泵浦光和仲氢之间有足够长的散射作用距离。

### 三、喇曼激光器输出功率的讨论

在受激喇曼散射效应中, 激光波长越长, 其喇曼增益越小。因此, 为了提高增益, 采用多程池结构, 当输出功率较大时, 除反射损失外, 还必须考虑到喇曼转换导致的泵浦光功率的损耗, 以及这些损耗对喇曼增益的影响。计入这个因素后, 受激喇曼散射激光的输出功率可以表示为<sup>[6]</sup>:

$$P_{sn} = \frac{R^{n-1} P_{s0} e^{\alpha} \left( \frac{1-R^n}{1-R} \right)}{1 + \frac{\lambda_s P_{s0}}{\lambda_p P_p} \left[ e^{\alpha} \left( \frac{1-R^n}{1-R} \right) - 1 \right]} \quad (2)$$

其中

$$\alpha = \frac{4P_p G}{\lambda_s + \lambda_p} \tan^{-1}(L/b) \quad (3)$$

(2) 式中,  $n$  为泵浦光通过多程池的传输次数;  $P_{s0}$  为自发喇曼噪声功率 ( $\sim 10^{-12}$  W),  $R$  为多程池中反射镜的反射率;  $P_p$  为入射的泵浦光功率;  $G$  为单位光强增益;  $P_{sn}$  为泵浦光

在多程池中传输  $n$  次之后产生的一级 Stokes 光功率;  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$  分别为泵浦光和一级 Stokes 光的波长;  $L$  为多程池中两个反射镜间的距离;  $b$  为共焦参量且由下式给出:

$$b = 2\pi W_p^2 / \lambda_p \quad (4)$$

式中,  $W_p$  为泵浦光在多程池中的光腰半径。

下面分别讨论 (2) 式中影响喇曼激光功率的几个主要参量。

1. 泵浦光功率  $P_p$ 。由 (2) 和 (3) 式可知, 对喇曼激光功率影响最大的参数是指数  $\alpha$ , 而  $\alpha$  又与泵浦光功率  $P_p$  成正比。因此, 除了增加  $\text{TEACO}_2$  激光能量外, 还要对其波形进行适当调整<sup>[7]</sup>, 以便提高泵浦功率。

当 (2) 式中参数取下列值:  $R=0.97$ ,  $n=25$ ,  $G=7.2 \times 10^{-5}$  cm/mW,  $\lambda_s=16$   $\mu\text{m}$ ,  $\lambda_p=10$   $\mu\text{m}$ ,  $P_{s0}=10^{-12}$  W,  $\tan^{-1}(L/b) \approx \frac{\pi}{2}$  时, 对于 10 MW、15 MW、20 MW 的泵浦光功率, 可算出相应的喇曼激光功率  $P_{sn}$  分别为  $1.3 \times 10^{-5}$  MW、4.2 MW 和 6.0 MW。另外需要指出, 泵浦光功率的提高, 最终要受到多程池内仲氢气体的击穿和光学元件的损伤所限制。

2. 单位光强增益  $G$ 。它直接影响 (2) 式的指数项。因而对喇曼激光的输出功率影响很大。 $G$  值的大小主要决定于仲氢气体的温度、压力以及泵浦光的偏振状态。

$G$  值与产生喇曼跃迁两能级间的分子数密度差  $\Delta N$  有关。对于给定的喇曼跃迁,  $\Delta N$  与温度的关系由下式给出:

$$\Delta N = \left[ 1 - \frac{6}{e^{(E(2)-E(0))/KT} + 5} \right] N \quad (5)$$

其中,  $N$  为产生喇曼跃迁的两能级总的分子数密度, 是仲氢气体压力的函数;  $E(2)-E(0)$  是仲氢的  $J=2$  和  $J=0$  能级间的能量差, 其值为  $354.37$   $\text{cm}^{-1}$ 。利用 (5) 式算出, 可当把仲氢气体冷却到 77 K 和 100 K 时,  $G$  值将比常温时分别高约 2.4 和 2.3 倍。可见降低仲氢气体的温度, 能够有效地提高喇曼激

光器的输出功率。

通常, 喇曼增益随仲氢气体压力的升高而增大。考虑到仲氢气体的击穿, 气压不宜太高, 一般取 300 Torr 左右(100 K 时)。

### 3. 光在程池中的传输次数 $n$ 。

从(2)式不难看出, 喇曼激光的功率随着传输次数  $n$  的增加而增加。当  $n$  大到一定值时, 喇曼激光的输出功率将趋于饱和。此时, 泵浦光基本耗尽, 喇曼激光的输出功率达到最大。之后, 喇曼激光的输出功率将因反射镜的反射损失而逐渐衰减。因此, 为了得到最大的喇曼激光输出, 需要选取最佳的  $n$  值, 它由下式给出<sup>[6]</sup>:

$$n = \ln \left[ 1 - \frac{(1-R) \ln(P_p/P_{s0})}{\alpha} \right] / \ln R \quad (6)$$

当式中参数取下述值:  $P_p = 15 \text{ MW}$ ,  $R = 97\%$ ,  $\lambda_s = 16 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_p = 10 \mu\text{m}$ ,  $P_{s0} = 10^{-12} \text{ W}$ ,  $G = 7.2 \times 10^{-5} \text{ cm/MW}$ ,  $\tan^{-1}(L/b) = \frac{\pi}{2}$  时, 算出最佳传输次数  $n = 23$ 。

此外, 从(2)式还可看出, 多程池反射镜的反射率  $R$  显然对喇曼激光功率影响很大。因此, 应尽量提高反射镜的反射率。

## 四、实验装置

整个仲氢喇曼激光器由 TEACO<sub>2</sub> 激光系统和低温仲氢喇曼多程池二部分组成。如图 2 所示。

### 4.1 TEACO<sub>2</sub> 激光系统

泵浦源 TEACO<sub>2</sub> 激光系统, 是在 [8] 激光系统基础上, 增加一级放大器而成。它包括一个 TEACO<sub>2</sub> 激光振荡器和三级 TEACO<sub>2</sub> 激光放大器。振荡器的谐振腔由全反射镜和光栅组成。腔内插入一个低气压 CWCO<sub>2</sub> 增益池。由此获得谱线可调的单纵模 CO<sub>2</sub> 激光。振荡器输出的线偏振光, 经 NaCl Fresnel rhomb 转变成圆偏振光(氢分子对圆偏振光

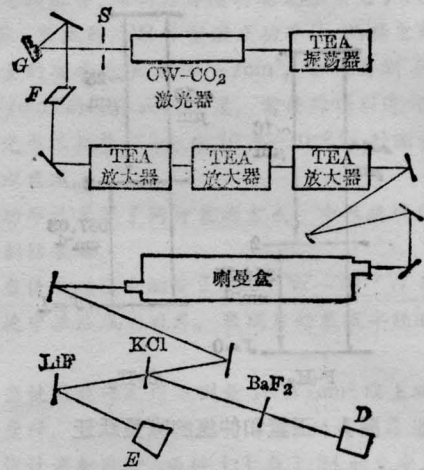


图 2 仲氢受激喇曼激光器简图

的喇曼散射截面比线偏振光大 50%)。然后经三级 TEACO<sub>2</sub> 激光放大器放大, 其中第一级放大器采用离轴卡塞格伦系统准直扩束, 以便提高放大效率。系统最终提供的脉冲, 能量可达 4.5 J, 脉宽约 90 ns。

### 4.2 低温仲氢喇曼多程池

CO<sub>2</sub> 激光光束经模式匹配系统耦合到仲氢多程池。多程池由三层同轴的金属圆筒构成。里面两层为无氧铜管, 外层为铝管, 池长 4 m。在里管两端各放置一曲率半径为 2 m 的、有特定通光孔的凹面反射镜, 对 10.6  $\mu\text{m}$  反射率约为 97%, 镜间距为 3.77 m。泵浦光通过一个反射镜上的通光孔进入池内, 在两个反射镜之间往返传输 25 次之后, 再通过另一反射镜上的通光孔输出。先在池内每传输一次都要在池中心聚焦一次。工作时, 里管充入约 300 Torr 的仲氢气体(约 100 K 时), 仲氢浓度通常是在 90% 以上。所用仲氢, 由取自钢瓶的高纯氢经低温催化作用制得。喇曼池的两层里管之间注入液氮, 用来冷却仲氢气体。最外层抽真空, 作为绝热层。工作时, 仲氢气体通常冷却到 100 K 左右。

利用 LiF 晶体的剩余反射特性, 检出 16  $\mu\text{m}$  波段的 Stokes 光, 用能量计测量能量; 用锗光子牵引探测器和存储示波器观测波形; 利用 BaF<sub>2</sub> 晶体滤波, 检出 10  $\mu\text{m}$  波段

剩余泵浦光，用锗光子牵引探测器和存贮示波器观测泵浦光的抽空情况。利用  $\text{CO}_2$  谱线分析仪测定泵浦光波长。再由测得的泵浦光波长和仲氢的喇曼位移算出准确的 Stokes 光波长。

## 五、实验结果及讨论

在上述实验装置上，用  $\text{CO}_2$  激光  $P$  支和  $R$  支的一些强线泵浦仲氢，均获得了相应的受激喇曼激光。用 4J  $\text{CO}_2$  的  $10R(20)$  线激光泵浦，获得  $16.09 \mu\text{m}$  的喇曼激光能量为 536 mJ。能量转换效率为 13%，量子转换效率为 21%。

我们进行了不同仲氢浓度、温度及压力条件下的实验。在相当大的变化范围内，都实现了受激喇曼转换。此外，泵浦光为多模时，同样观测到受激喇曼转换现象。但使用线偏振光泵浦时，即使泵浦光能量接近 5J，仍没有观测到喇曼转换现象。不同谱线的泵浦光，其受激喇曼转换的阈值也不同。当用  $10R(20)$  线的单纵模泵浦光时，喇曼阈值在 2.6~2.8J；当用  $9P(20)$  线的单纵模泵浦光时，喇曼阈值为 1.8~2.0J。

在  $R=97\%$ ， $n=25$ ，仲氢压力约 300Torr 和 100 K 的条件下，用 4J 的  $10R(20)$  线泵浦光时，理论上，应获得约 1000 mJ 的  $16 \mu\text{m}$  喇曼激光。但实际测得能量值仅为理论值的一半。主要是因为 (1) 泵浦光的光束质量不够理想；(2) 泵浦光与喇曼池腔模之间的模式匹配不完全合适。

实验中，多次观察到仲氢气体击穿现象，且击穿有一定随机性，击穿阈值变化范围较大。它与仲氢喇曼池中尘埃的粒度和密度、仲氢气体的温度梯度和扰动程度、泵浦光的光束质量以及模式匹配情况等因素有关。

由图 3 和图 5 可知，输出的喇曼激光脉宽 (30 ns) 远小于泵浦光的脉宽 (90 ns)。这种脉宽压缩现象是多程池结构所固有的。我

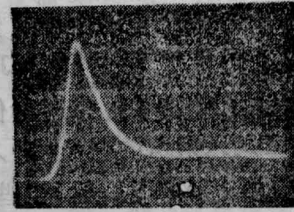


图 3 泵浦光波形

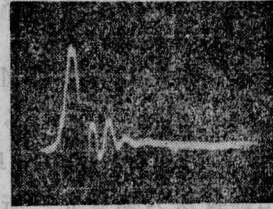


图 4 泵浦耗尽波

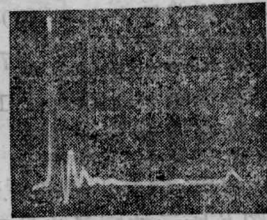


图 5 喇曼激光波形  
(转换较小)

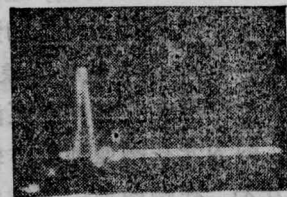


图 6 喇曼激光波形  
(转换较大)

们知道，受激喇曼散射具有阈值。只有峰值附近较高功率的泵浦光才能产生受激喇曼转换，得到一个较窄的喇曼激光脉冲。该喇曼激光脉冲在多程池中继续传输时，多次与时间上比它滞后的泵浦光相交叉。这种相互交叉，导致了已形成的喇曼激光从与它相交叉的泵浦光中得到能量，从而进一步被放大。从时间上看，能量聚集到已形成的较窄的喇曼激光脉冲之内。因而，当喇曼转换效率较高时，甚至会出现喇曼激光的峰值功率超过泵浦光的峰值功率<sup>[9]</sup>。

我们的实验结果证实了这种能量聚集。以 4J 的泵浦光获得了大于 500 mJ 的喇曼激光。泵浦光脉宽为 90 ns, 故其峰值功率约 44 MW。考虑到入射窗的损失, 进入喇曼池的实际功率可达 40 MW。假定这些泵浦光全部转换成喇曼激光, 则计入输出窗口的损失后(透过率为 92%), 能获得的最大输出喇曼激光功率为:

$$(R \cdot \lambda_p / \lambda_s \cdot P_p) 92\% \approx 11 \text{ MW}$$

其中,  $R$ 、 $\lambda_p$ 、 $\lambda_s$ 、 $P_p$  分别为 97%、10  $\mu\text{m}$ 、16  $\mu\text{m}$ 、40 MW,  $n$  为 25。事实上毕竟不能使全部泵浦光都转换为喇曼光, 所以实际获得的喇曼光功率显然不会大于 11 MW。然而, 实际上得到的喇曼光大于 500 mJ, 脉宽约 30 ns, 则其峰值功率已达约 17 MW。实验值比上述的理论值(11 MW)大 1.5 倍。这是由于多程池中光束的相互交叉, 产生附加的非线性相互作用, 提高了喇曼转换效率。

在图 5、图 6 所示的喇曼光波形中, 除一个较高的主脉冲之外, 还有几个较小的次脉冲。比较图 3 和图 4 可以看出, 经喇曼散射之后, 直到离脉冲峰点 450 ns 处的泵浦光脉冲尾部的能量都被耗尽。这种现象, 从时间关系上是不能用喇曼光主脉冲与泵浦光的交叉来解释的。因为光在喇曼池中传输的时间只有 300 ns 左右, 在喇曼池中形成的喇曼光主脉冲不可能与时间上比它滞后 450 ns 的泵浦光尾部在池中相交。因此可以认为, 离泵浦光脉冲峰值 450 ns 的尾部是被喇曼光的次峰所耗尽。对喇曼光次峰的形成, 我们提出一种可能的解释, 简述如下。

由于光束在喇曼池中传输时, 多次被聚

焦和发生交叉, 喇曼光首先在泵浦光脉冲的峰值附近形成。但开始时喇曼光功率很小, 剩余的泵浦光峰值部分功率仍然较大。因此当剩余的泵浦光峰值部分与时间上比它滞后的其它部分相交时, 交叉点处的功率密度增大, 从而提高了泵浦光峰值之外部分的喇曼转换效率。结果, 形成喇曼激光的次峰, 并继而得到放大。特别是当形成主脉冲的喇曼转换不很大时, 次峰的形成和幅度更明显。实验事实支持这种解释。图 6 是喇曼转换效率较高时的喇曼光波形, 与图 5 相比, 显然图 6 的主次峰比例更大些。需要指出, 喇曼光的几个脉冲峰, 通常是在最初几次聚焦和交叉时形成的。

杨丛斌、咎敬贤同志参加了部分实验工作。傅瑞卿、赵汝成同志协助进行了仲氢分析。此外, 本工作得到中国科学院大连化物所、南京工学院机械工厂, 哈尔滨工业大学焊接教研室等单位的大力协助。在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- 1 田代英夫 *et al.* レーザ—研究, 1985; (3): 76
- 2 Byer R L. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1986; **QE-12**: 732
- 3 Rabinowitz P *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1979; (35): 739
- 4 Jetter H *et al.* Max-Planck Institut Fur Quantenoptik Jahresbericht, 1983: 124
- 5 Bernardini M *et al.* *Opt. Commun.*, 1985; **52**: 343
- 6 金春植, 李殿军. 光学机械, 1985; (6): 19
- 7 Trutna W R *et al.* *Appl. Opt.*, 1980; **19**: 301
- 8 林太基 *et al.* 中国激光, 1986; **13**(1): 25
- 9 Perry B *et al.* *Opt. Lett.*, 1980; (5): 288