

文章编号: 0253-2239(2001)04-400-04

无固体窗口拉曼池的受激拉曼散射实验研究*

楼祺洪 徐剑秋 魏运荣 董景星

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 在高功率激光作用下, 拉曼池窗口及其膜层很容易被激光损坏。设计了一种新型的无固体窗口的拉曼池, 利用安装在拉曼池两端的两个快门来取代通常的固体窗口, 拉曼池内充有与环境气体密度接近的混合气体, 在快门打开后的一定时间内, 气体扩散不占主导地位, 从而实现拉曼转换。研究了窗口气体流动对受激拉曼散射的影响。

关键词: 拉曼池; 气体窗口; 准分子激光

中图分类号: TN24 文献标识码: A

1 引 言

在高功率的拉曼放大链中, 后级拉曼放大器的抽运能量非常高, 抽运光照射到拉曼池的窗口上, 极易引起拉曼池窗口的损坏。在紫外光波段, 拉曼池的窗口一般由熔石英或 CaF_2 构成, 熔石英在光波长为 248 nm 处的损伤阈值小于 2 J/cm^2 ^[1], 因而严重限制了抽运光的最高输入能量, 尤其是当采用多束抽运光同时抽运时, 抽运光之间相互干涉往往在窗口上形成许多亮点, 这些亮点处的拉曼窗口首先损坏, 进一步限制了抽运光的输入能量。在通常情况下抽运光脉冲宽度为纳秒级, 输入的抽运光能量不能大于十几焦耳^[2]。

即使在低功率抽运的情况下, 拉曼窗口长时间处于激光照射也会导致窗口材料的劣化, 使窗口的透过率下降, 损伤阈值降低, 最后使拉曼窗口完全失效。在抽运能量为焦耳量级时, 一般工作近千个脉冲即可观察到明显的窗口劣化现象。如果拉曼窗口上镀有增透膜, 则损伤阈值将更低。

另一方面, 更换拉曼窗口, 尤其是大尺寸的拉曼窗口, 成本较高。在大功率拉曼放大链的运转中, 更换这些拉曼窗口构成了运转成本的主要成分, 严重影响了大功率拉曼放大链的应用, 限制了向更高功率的拉曼放大链的发展和研究。寻找提高窗口材料的损伤阈值和新的低损伤阈值的窗口材料显然是一个解决问题的方法, 但探索其它途径也是非常有价值的。

本文利用安装在拉曼池两端的两个快门来取代通常的固体窗口。在平时快门关闭, 拉曼气体被封闭在拉曼池中; 当抽运光到达时打开快门, 拉曼池中充有与环境空气密度一致的拉曼气体, 这样拉曼气体的扩散速率最低, 同时保持拉曼气体与环境空气的折射率相近, 使气体对流造成的光线畸变很小, 引入抽运光和斯托克斯种子光, 完成拉曼放大过程, 然后关闭快门重新封闭拉曼气体, 等待下一个抽运光脉冲。

2 无固体窗口拉曼池中的气体流动特性

利用 He-Ne 激光器对拉曼池中的气体流动进行研究, 由 He-Ne 激光器出来的激光束经透镜扩束为直径约 10 cm 的光束。拉曼池放置在马赫-曾德尔干涉仪的一支臂中, 另一支臂在空气中。由两臂射出的光束重合后经透镜组准直射到接受屏上, 接受屏为普通的毛玻璃。接受屏上干涉条纹的变化揭示了拉曼池中空气流动的情况。

实验中所用的拉曼池为 80 cm 长、直径 15 cm 的不锈钢管, 拉曼管两端装置有所设计的快门(快门结构见图 4)。拉曼池中充有 H_2 -Kr 的混合气体。混合气体的比例为 60% 氢气和 40% 氪气, 混合气体与空气的相对密度差 $\Delta\rho/\rho_{\text{air}} \approx 4\%$ 。根据混合气体折射率公式(洛伦兹-洛伦茨公式)

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \sum_i R_i B_i, \quad (1)$$

n 为混合气体的折射率, R_i 为第 i 个气体组分的等效极化率, 可由(1)式代入各气体组分的折射率反

* 国家自然科学基金(69788005)资助项目。

收稿日期: 1999-10-14; 收到修改稿日期: 1999-12-24

向求解得出, B_i 为第 i 个气体组分的压力比。可求出混合拉曼气体在 632.8 nm 处的折射率为 1.00026, 空气在 632.8 nm 处的平均折射率为 1.00029。气体界面的平均移动速度为 $1.2 \text{ cm/s}^{[5]}$, 则在打开快门 8 s 以后, 气体界面的移动距离约为 9.6 cm, 由此求得两臂的光程差的变化量约为 8 个波长。

实验中先打开快门但并不向拉曼池中充气, 调整马赫-曾德尔干涉仪的两臂使接受屏上的干涉图案为水平的三条亮条纹(如图 1 所示)。然后关闭快门并向拉曼池中充气如混合气体, 打开快门, 发现在最初的 3 s 内由于快门的运动对气体的干扰, 干涉条纹变得很模糊, 该扰动以声速向外扩散。3 s 过后, 干涉条纹重新变得清楚, 水平条纹逐渐变多变细密, 图 2 为拍摄下的 8 s 时的干涉图案, 可见明显的四个亮条纹。气体界面的移动对干涉图案的影响为等倾干涉, 光程差相对于初始状态的变化量为 8 个波长, 当这 8 个波长的光程差与原来的 3 个波长的光程差同相时, 应呈现 11 个条纹; 当这 8 个波长的光程差与原来的 3 个波长的光程差反相时, 应呈现 5 个条纹。由于空气的折射率与空气中的湿度和 CO_2 的含量有关, 由此造成对空气折射率的误差, 那么在 8 s 时观察到 4 个条纹是合理的。

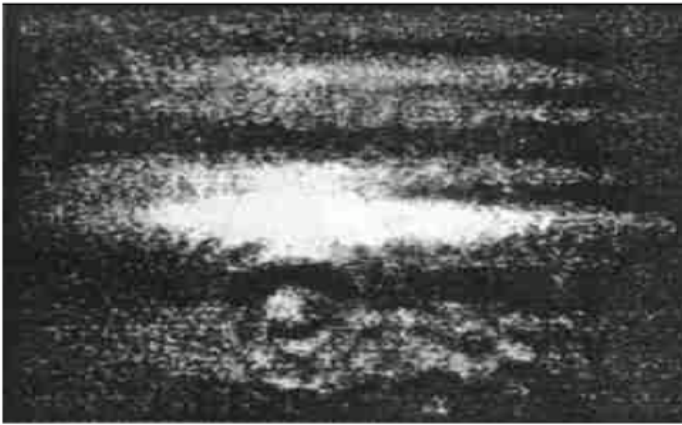


Fig. 1 The interference pattern at $t = 0$

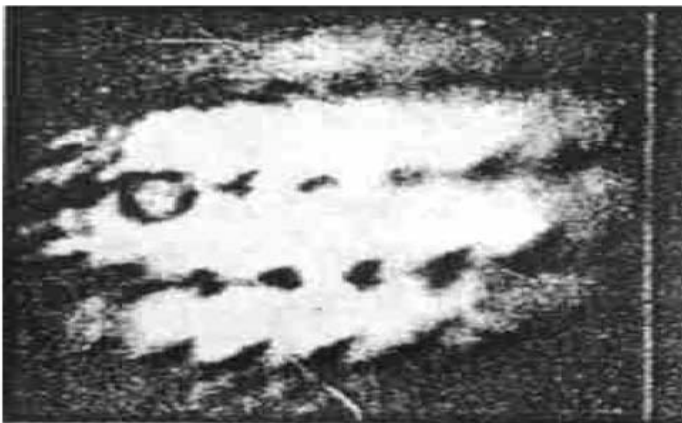


Fig. 2 The interference pattern at $t = 8 \text{ s}$

3 无固体窗口的受激拉曼散射

3.1 实验装置与结果

本节利用 XeCl 激光器抽运 H_2 及其混合气体, 研究无固体窗口的拉曼池中的气体流动对受激拉曼散射的转化效率和拉曼增益的影响。实验装置如图 3 所示。抽运源为自制的 XeCl 准分子激光器(SY-200), 拉曼池为 100 cm 长、通光口径为 3 cm 的不锈钢管, 抽运光经一焦距 $f = 120 \text{ cm}$ 的凸透镜聚焦在拉曼管的中部, 拉曼管中充有以 H_2 为拉曼介质的混合气体, 由拉曼管中输出的光束经透镜准直后, 由棱镜组分光, 其输出的结果再经中性衰减片衰减, 由数字示波器(LeCroy9632)和热电能量计测量斯托克斯光的波形和输出能量。

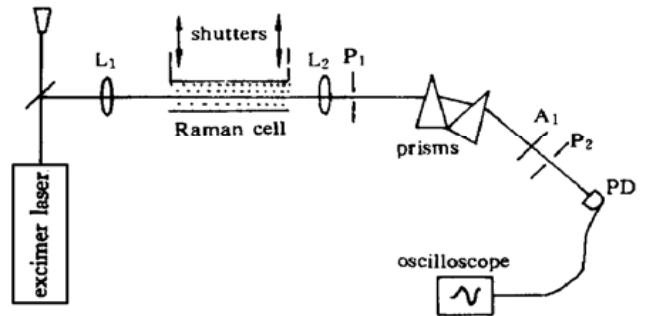


Fig. 3 Experimental setup for stimulated Raman scattering

L_1 and L_2 : lens, PD: photodiode, A: attenuator,

P_1 and P_2 : pinhole, PM: power meter

图 4 为装置在拉曼池两端的快门的结构示意图。整个快门由铝合金加工而成, 以减轻快门的重量, 便于快门的快速驱动。快门的抽拉由固定在快门帘 B 中部的齿条 C 带动。齿条 C 与快门帘 B 之间保持 1.5° 的夹角, 这样在快门帘放下时, 快门帘

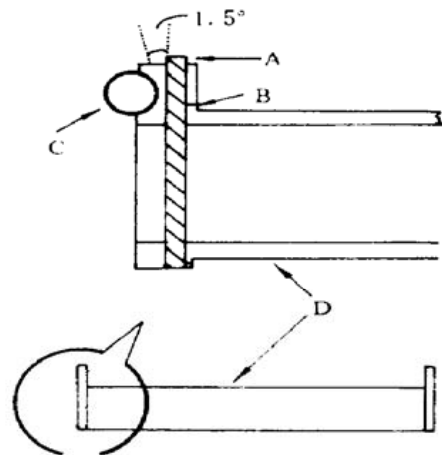


Fig. 4 The structure of gas valve using in the Raman cell

without solid window. A: shutter, B: sealed loop,

C: gear driven by a step motor (not shown in

figure) and D: the Raman cell

可以压紧密封橡胶圈密封拉曼池,防止拉曼气体的外泻。齿条 C 通过与步进电机相配的齿轮 D 驱动。快门帘由完全封闭到完全打开约需 0.5 s 的时间,实验中的时间由快门启动后 1 s 开始计时。

拉曼池中首先充上纯氢气,抽运光的能量为 150 mJ,脉冲频率为 1 Hz,因而可以忽略抽运光的热效应对气体流动的影响。打开快门,拉曼气体必然和周围空气产生对流,随着拉曼气体的外泻,拉曼的有效增益长度随之减小,输出的斯托克斯光的能量也将随之减少。

图 5 给出了实验结果,图中的横坐标为时间,即快门开启后拉曼气体流出的时间;纵坐标为一阶斯托克斯光的能量。由于实验中抽运光的能量控制得比较低,二阶斯托克斯光的能量低于实验中所用的能量的测量极限,约为 35 μ J。由图中可以看出,一阶斯托克斯光的能量开始时的变化比较平缓,到后部则下降得比较陡峭。其原因是在拉曼散射的实验中,当抽运光为聚焦光束时,斯托克斯光的产生主要集中在焦点附近,而快门打开之初,气体的交界面主要集中在拉曼池的两端,对拉曼散射的影响不大,随着时间的推移,当气体界面移动到拉曼池的中央时,拉曼散射的效率就显著下降。

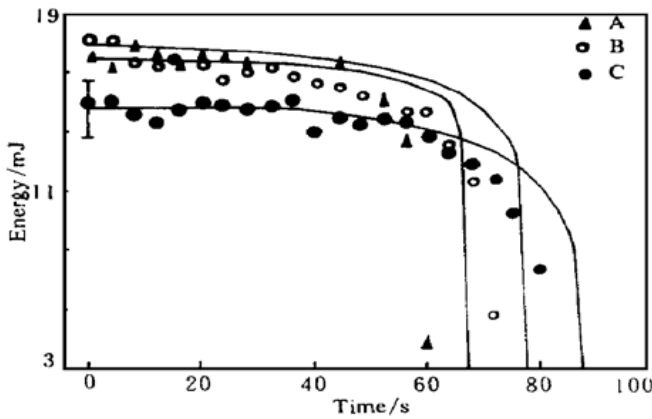


Fig. 5 The Stokes output vs time by using Raman cell without solid window

将拉曼池中的气体换成不同的混合气体,一种是由压力比分别为 10% 的氮气和 90% 的氢气组成,一种是由 20% 的氮气和 80% 的氢气组成。它们与空气的相对密度差 $\Delta\rho/\rho_{\text{air}}$ 分别为 $(62 \pm 2)\%$ 和 $(32 \pm 2)\%$ 。与此相对照,纯氢气与空气的密度差为 $(92 \pm 2)\%$,实验测量的结果如图 5(a) 所示。为便于比较,掺入 10% 氮气的拉曼散射(方实点)的抽运光能量调整为 190 mJ,掺入 20% 氮气的拉曼散射(空心圆)的抽运光的能量调整为 250 mJ,这样三条曲线输出的斯托克斯能量基本在同一数量级上。图中可

以得出当拉曼气体与空气的密度差越小时,拉曼散射的效率下降得越慢,拉曼散射保持较稳定的输出的时间越长。

3.2 结果分析

对于受激拉曼散射,如果忽略抽运光的耗散,则斯托克斯光的光强的慢变幅振幅 $A_s(r, z, t)$ 可表示为

$$\frac{\partial A_s(r, z, t)}{\partial z} = ik_2 A_L(r, z, t) Q^*(r, z, t), \quad (2a)$$

$$\frac{\partial Q(r, z, t)}{\partial t} = i[\omega_0 - (\omega_L - \omega_S) + \Gamma] Q^* + ik_1 A_L^*(r, z, t) A_s(r, z, t), \quad (2b)$$

式中 $A_L(r, z, t)$ 为抽运光的慢变幅振幅, Q 为分子的电极化率, k_1 和 k_2 为拉曼散射的耦合系数, ω_0 、 ω_L 和 ω_S 为拉曼跃迁、抽运光和斯托克斯光的角频率, Γ 为拉曼散射的跃迁线宽, r 为横向坐标, z 为平行于光传播方向的坐标, t 为时间。

由于所用的抽运光的横截面为长方形,因而假设抽运光的横向光强分布为

$$A_p(r, z, t) = E_0 T(t) \exp\left[-\frac{x^2}{r_x^2} - \frac{y^2}{r_y^2}\right], \quad (3)$$

$T(t)$ 为抽运光的时间包络函数,

$$r_x^2 = r_1^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_1^2}\right)^2\right], \quad r_y^2 = r_1^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi r_2^2}\right)^2\right],$$

其中 r_1 和 r_2 分别为抽运光束在 x 和 y 方向上的光腰直径 (HWHM), z 为光束传播方向的坐标。

由公式 (2a)、(2b) 和 (3) 可求得斯托克斯光的输出能量随气体逸出时间的变化。求得的数值结果如图 5 实线所示。数值计算的结果与实验观测值比较,其变化趋势及幅度基本上一致,实验测量值比数值结果下降的速度略快,陡峭下降的时间也略有提前,其原因可能是实验中周围环境的空气扰动加剧了气体的对流,另一个原因可能来自于计算中所用平均空气折射率与实际的实验室中空气折射率不同而引起的。

若将装置在拉曼管两个顶端的快门外部加装数厘米与拉曼管直径相同的不锈钢管,则拉曼气体的外逸并不造成有效拉曼增益长度的减少。换言之,拉曼增益长度在拉曼池的上部增长,在下部减小,但总体的增益长度保持不变。利用这种装置,斯托克斯光的输出能量可以在相对一段时间内保持不变,此时输出光的光束质量就显得比较重要。

参 考 文 献

- [1] 楼祺洪. 注入锁定准分子激光泵浦下 H_2 受激拉曼散射气压特性. 光学学报, 1991, **11**(3): 217~ 223
- [2] 楼祺洪. 准分子激光的拉曼组束. 光学学报, 1992, **12**(12): 1057~ 1061
- [3] Tille J M, Wenzel R G. High efficiency first Stokes generation from XeF pumped CH_4 . *J. Opt. Sci. Am. (B)*, 1986, **3**(10): 1489~ 1491
- [4] Duncan M D, Mahan R, Tankersley L L. Transient stimulated Raman amplification in hydrogen. *J. Opt. Sci. Am. (B)*, 1988, **5**(1): 37~ 52
- [5] Murry J R, Goldhar J, Szoke A. Backward Raman gain measurements for KrF laser radiation scattering by CH_4 . *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(9): 551~ 553

Experimental Research on Stimulated Raman Scattering Using Raman Cell without Solid Window

Lou Qihong Xu Jianqiu Wei Yunrong Dong Jingxing

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

(Received 14 October 1999; revised 24 December 1999)

Abstract: The window and its coating of the Raman cell are easily damaged by the laser beam with very high power laser. A novel Raman cell without solid windows is designed. Two gas switches are used at two ends of the Raman cell, a gas mixture with a density very close to the air is used as Raman medium. This gas mixture will not diffuse very fast after the gas switch is open. So the Raman conversion can be obtained without solid windows. The effects of gas flow during the gas window operation on the Stimulated Raman scattering are investigated.

Key words: Raman cell; gas windows; excimer laser