

斜波导拉曼池提高准分子激光 能量转换效率*

董景星 楼祺洪 向世清 宁 东 魏运荣 丁爱臻
(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 采用波导结构的拉曼氢气池,通过泵浦光束在波导内部的传播,增大了受激拉曼散射的作用区域,从而明显提高了转换效率。采用倾斜波导使光束截面在传播中逐渐收缩,在一定的气压范围内提高了转换效率,并从理论上分析讨论了提高效率的原因。

关键词 受激拉曼散射,倾斜波导管,准分子激光

1 引 言

通过准分子激光在 H_2 中的受激拉曼散射可获得更宽波长范围的激光。其主要问题是如何提高质量转换的效率。通常采用圆管拉曼池,泵浦光采用聚焦方式实现拉曼转换。聚焦后高功率密度的区域小,限制了拉曼转换的效率。采用波导结构的拉曼池通过泵浦光束在波导内的传播,可增大受激拉曼散射区域和提高转换效率。本文采用斜波导结构的拉曼氢气池,选择合适的氢气压和泵浦光入射角,在一定气压范围内再次提高了一阶斯托克斯光的转换效率。当氢气压在 5 atm 时, S_1 的转换效率比无波导的情况提高了 50%。这一结构对于光束质量较差的泵浦光能获得较高的拉曼转换效率较为适用。并对这一结果进行了理论分析。

2 实验装置

泵浦激光为 X 光预电离 XeCl 准分子激光,输出激光波长为 308 nm,激光脉宽(FWHM)为 65 ns,单脉冲能量为 200~ 300 mJ。拉曼池是一个 850 mm 长的不锈钢管,斜波导管长为 600 mm,内壁镀铝膜,输入口面积为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$,输出口面积为 $5 \times 3 \text{ mm}^2$ 。拉曼池窗口是未镀膜的石英平板。两个能量计分别探测入射的泵浦光和一阶斯托克斯光。拉曼光输出后先用一组棱镜分光,然后用一块 $f = 300 \text{ mm}$ 的透镜把波导管输出出口的激光光斑成像到一个平面上。调整透镜到波导管出口的距离,可以在成像的焦平面上获得不同大小的 S_1 光斑。泵浦光聚焦于波导管的输入口内。实验装置如图 1 所示。泵浦光的聚焦透镜焦距 $f = 1000 \text{ mm}$ 。泵浦光光斑面积为 $2 \times 2.5 \text{ mm}^2$,光束发散角小于 1 mrad。

* 国家高科技 416 青年基金资助项目。

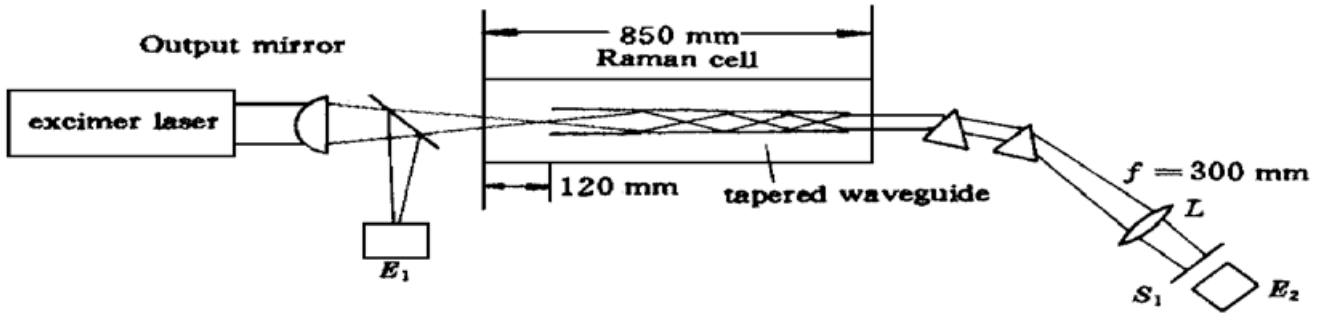


图 1 斜波导受激拉曼散射实验装置

E_1, E_2 分别为测量泵浦光能量和一阶斯托克斯光能量, S 是透镜 L 的焦平面

Fig. 1 Experimental setup of the stimulated Raman scattering with a tapered waveguide

Energy meters E_1, E_2 measure the pump energy and Raman energy, respectively; S_1 : the focal plane of the lens L

3 实验结果

实验对三种情况作了比较: 无波导、直波导和斜波导。直波导的口径为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$, 长度和斜波导一样均为 600 mm。因为光束在直波导内的反射次数与波导管的长度成正比, 斜波导内的反射次数除了与波导管的长度成正比外, 还与波导内壁的倾斜角度有关。为了能对实验结果作比较, 直波导和斜波导取同样的长度。由于在 600 mm 长度的直波导管光束的反射次数不够多, 所以在 7 atm H_2 气压以上, 直波导的效率与无波导效率相当。低于 7 atm H_2 时直波导的效率还是大于无波导的转换效率。斜波导与上述情况相比, 在整个实验气压范围内效率均有明显提高, 特别是在 5 atm H_2 气压附近。转换效率从无波导的 10.6%, 提高到直波导的 14%, 斜波导的 16.8%。与无波导的情况相比, 斜波导提高效率达 50%。在上述实验条件下, 无波导在 9 atm H_2 气压时达到最大效率 19.8%, 斜波导可达 23.8%。图 2 是三种波导的拉曼转换效率与 H_2 气压的关系。7 atm 以上曲线趋于平坦, 是因为一阶斯托克斯光向二阶斯托克斯光的能量转移所致。

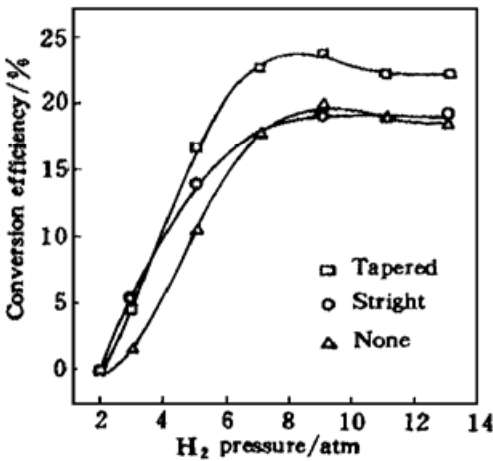


图 2 能量转换效率和氢气压的关系

Fig. 2 The energy transfer efficiency as a function of the H_2 pressure

23.8%。图 2 是三种波导的拉曼转换效率与 H_2 气压的关系。7 atm 以上曲线趋于平坦, 是因为一阶斯托克斯光向二阶斯托克斯光的能量转移所致。

4 理论分析

受激拉曼散射在泵浦光的焦点附近产生后在与泵浦光同时向前传播时不断从泵浦光 P 中获得能量而被放大, 在相同的实验条件下, 转换效率与拉曼池的长度有关。随着传播距离的增加, 光斑的面积越来越大, 最后损耗大于增益, 转换效率就不能靠增加拉曼池的长度来提高了。波导管可以把泵浦光与 S_1 限制在一个很小的空间内向前传播, 增大了 S_1 与泵浦光的作用区域, 从而提高了转换效率^[1]。但是, 一般矩形波导的反射壁的反射率受到材料的限制, 光强在波导内多次反射后因反射损耗而减小, 影响了拉曼转换效率的提高。斜波导使泵浦光的截面在传播中逐渐收缩, 提高光束密度, 补充一部分反射损耗引起的光束密度下降, 提高了拉曼转换

效率。

拉曼放大的稳态慢变增幅近似传播耦合方程为

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} - \frac{i\partial^2}{2k_s\partial z^2} \right] E_s(x, z) = \frac{\gamma}{2} \cdot |E_p|^2 E_s(x, z) \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial z} - \frac{i\partial^2}{2k_p\partial z^2} \right] E_p(x, z) = - \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{k_p}{k_s} |E_s|^2 E_p(x, z) \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\lambda_s^2}{hc} \cdot \frac{2N}{\pi\Delta\nu_R} \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (3)$$

式中 $k_p = 2\pi n_p/\lambda_p$ 和 $k_s = 2\pi n_s/\lambda_s$ 分别为泵浦光和斯托克斯光的波矢, n_p, n_s 为气体在泵浦光和斯托克斯光频率的折射率, z 为沿传播方向的坐标, x 为横向笛卡尔坐标, γ 为拉曼增益系数, N 为气体分子数密度, $\Delta\nu_R$ 为拉曼线宽 $d\sigma/d\Omega$ 受激拉曼跃迁截面。有效拉曼作用区域 $z_1 < z < z_2$, z_1 为斯托克斯光和泵浦光的入射位置, z_2 为拉曼池的输出窗口位置。方程组考虑了泵浦光的倒空以及波动光学的衍射效应, 忽略了瞬态和宽带效应以及高阶斯托克斯和反斯托克斯效应。分析表明, 这对得到的结论影响较小, 近似计算中可忽略。

要精确计算这一方程组并不容易。一个有效的方法是把耦合看作一系列分裂算符。从一层到下一层的传播用快速 Fourier 变换技术, 可以得出入射和出射的斯托克斯光场分布, 在倾斜波导中, 每一个薄层的面积会不断变小, 从而改善了激光束相互作用的条件。由于斜波导输出的激光光斑是经过波导内壁的多次反射重新组合而成的一个均匀光斑^[2], 并不是实际的斯托克斯光场分布。当光在拉曼池中传播时, 任一位置上的斯托克斯光强 (I_s) 表达式为^[3]

$$I_s(z) = I_p(0) \left/ \left[\frac{\omega_p}{\omega_s} + \exp[-\gamma I_p(0)z] \frac{I_p(0)}{I_s(0)} \right] \right. \quad (4)$$

其中 $I_p(0), I_s(0)$ 分别为拉曼池入射处的泵浦光强和斯托克斯光强, 取决于初始条件。

定义能量转换效率为

$$\eta = \frac{I_s(L) - I_s(0)}{I_p(0)} \approx \frac{I_s(L)}{I_p(0)} \quad (5)$$

式中 L 为拉曼池的有效长度, $I_s(L)$ 为拉曼池出口的斯托克斯光强。斜波导除了能把光束限制在越来越小的区域外, 另一个作用就是增加了激光作用的距离, 等效于加长了拉曼池的长度 L 。斜波导型拉曼池适用于泵浦光束较差、氢气压不能太高的情况下使用。

5 讨 论

高斯光束腰斑半径 $W_0 = \sqrt{\lambda f/\pi}$ ^[4]。受激拉曼散射的 S_1 对泵浦光 P 有一定的频移, 所以 $\lambda_p \neq \lambda_s, W_p \neq W_s$ 。由于腰斑的不重合, S_1 和 P 向前传播时有一部分光将不再重合。因此限制了效率的进一步提高。加长拉曼池的长度是有限的。斜波导把泵浦光和斯托克斯光限制在同一空间内, 增加了 P 和 S_1 的重合距离, 相当于增加有效增益区的长度。所以对能量的转换有一定的提高。我们实验使用的 308 nm 准分子激光带宽约 1 nm。这种带宽的激光对一阶斯托克斯光的无相关放大的原理目前已有一定的研究。波导拉曼池能提高能量转换效率, 对这种研究有一定的帮助。

参 考 文 献

- pump beams. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, **A21**(12) : 973~ 980 (in Chinese)
- 2 Dong Jinxing, Ye Zhenhuan, Gao Hongyi *et al.*. Improvement of the intensity homogeneity of excimer laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1995, **A22**(12) : 894~ 896 (in Chinese)
- 3 Partanen J. P., Shaw M. J.. High-power forward Raman amplifiers employing low pressure gases in light guides. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **B3**(10) : 1374~ 1388
- 4 Cheng Xusan, Wang Renwen. Gaussian-Hermite coupling method on solving stimulated Raman scattering wave equation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1987, **7**(5) : 443~ 448 (in Chinese)

Increasement of Raman Conversion Efficiency by Using a Tapered Waveguide

Dong Jinxing Lou Qihong Xiang Shiqing
Ning Dong Wei Yunrong Ding Aizhen

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

Abstract By transmitting a pumping beam through a waveguide located in the H₂ Raman cell, the interaction region of the stimulated Raman scattering and conversion efficiency can be increased in the Raman cell. In this paper, by replacing the original waveguide with a tapered one, the conversion efficiency was further increased in some range of H₂ gas pressure. The results are theoretically analyzed and discussed.

Key words stimulated Raman scattering, tapered waveguide, excimer laser