

泵浦光束质量对受激拉曼散射的影响*

楼祺洪 宁东 董景星 魏运荣

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 主要讨论泵浦光束质量对低气压拉曼种子源特性的影响。文中给出了一阶斯托克斯光泵浦阈值、输出能量和光束质量的实验数据。用 M^2 因子分析了泵浦光和一阶斯托克斯光的光束质量。根据考虑泵浦聚焦和泵浦光束质量影响的近似拉曼散射理论计算了泵浦阈值的理论曲线, 并与实验数据和有关文献进行了比较。

关键词 光束质量, M^2 因子, 拉曼种子源。

1 引 言

气体受激拉曼散射与放大系统是改善大功率准分子激光器输出光束质量、获得紫外波段高功率辐射源的有效途径^[1]。在该系统中为后级放大提供高质量斯托克斯种子光的拉曼发生器(拉曼种子源)通常采用单通道聚焦泵浦方式, 其各项特性(泵浦阈值、能量转换效率、输出光束质量)受到泵浦光束质量的影响^[2, 3]。在低气压($< 5 \times 10^6$ Pa)拉曼池中, 由于色散效应不足以抑制四波混频对一阶斯托克斯能量抽取, 拉曼种子源的一阶泵浦阈值和能量转换效率还受到泵浦聚焦参数的影响^[4]。

本文给出了 248 nm KrF 准分子激光泵浦的低气压($< 10^6$ Pa)氢气拉曼种子源输出一阶斯托克斯光(波长 277 nm)的泵浦阈值、能量转换效率和光束质量的实验数据。分析讨论了泵浦光束质量及聚焦参数对种子源特性的影响。根据包含泵浦聚焦和光束质量因子的近似拉曼散射理论计算了泵浦阈值的理论值, 与实验数据和有关文献的结果进行了比较。

2 理 论

2.1 光束质量因子

光束质量通常是指光束的发散性或可聚焦性。在聚焦泵浦的拉曼种子源中, 泵浦光束质量影响着聚焦区域内的泵浦光强度和焦区长度, 两者的乘积决定了拉曼散射的增益。近年来提出的描述光束质量的 M^2 因子被定义为实际光束发散角与具有相同束腰半径的基模高斯光束发散角的比值^[5]。引入易于测量的 M^2 因子可以方便地描述具有高斯强度分布的非衍射限光束在聚焦区域内光束半径的变化。设光束质量因子为 M^2 , 则光束半径 $w(z)$ 为:

* 国家科委 863 高技术项目。

收稿日期: 1997-04-01; 收到修改稿日期: 1997-08-11

$$w^2(z) = w_0^2 [1 + (z - z_0)^2 / z_r^2], \quad z_r = kw_0^2 / 2M^2 \quad (1)$$

式中 z_r 为瑞利长度, z_0 为光束束腰位置, w_0 为束腰半径。由(1)式可知, 非衍射限光束的焦区长度($\sim z_r$) 为具有相同束腰半径的基模高斯光束的 $1/M^2$ 。在聚焦泵浦的拉曼种子源中, 焦区缩短意味着拉曼增益下降, 泵浦阈值增大, 能量转换效率降低。(1)式中的 M^2 因子可通过测量光束聚焦后半径 w 随 z 的变化决定。得到 M^2 因子的另一近似方法为测量准直光束聚焦后在焦点处的光斑半径 w_F 和入射光束半径 w_L (即透镜处的光斑半径)。根据 M^2 的定义, 有^[5]:

$$M^2 = (k/2) (w_F w_L / F) \quad (2)$$

式中 F 为透镜焦距。(2)式为(1)式在准直条件下的近似。

2.2 稳态拉曼散射方程

大多数文献在讨论拉曼散射时假设泵浦光为平行光, 即在拉曼介质中泵浦光束半径恒定^[6, 7]。这一假设仅适于软聚焦情况, 即拉曼池长度 $L \gg z_r$ 。在紧聚焦条件下, 必须考虑泵浦光束半径的变化。设泵浦光截面光强为高斯分布, 束腰半径为 w_{p0} , 在束腰处 $z = 0$ 。其光束半径满足(1)式。则忽略泵浦倒空时的稳态拉曼散射方程为^[8]:

$$[\nabla_t^2 + 2ik_s(\partial/\partial z)]E_s = ik_s \gamma I_p E_s \quad (3)$$

式中 γ 为拉曼增益因子, $I_p(x, y, z)$ 为泵浦光强度:

$$I_p(x, y, z) = I_0 w_{p0}^2 / w_p^2(z) \exp[-2(x^2 + y^2) / w_p^2(z)] \approx I_0 / (1 + z^2 / z_r^2) [1 - 2(x^2 + y^2) / w_{p0}^2(1 + z^2 / z_r^2)] \quad (4)$$

(4)式中的窄光束近似只在斯托克斯光束半径远小于泵浦光束半径时成立。考虑拉曼散射的增益聚焦效应^[8, 9], (4)式在高增益条件下是有效的。此时方程(3)有解析解^[8, 9]:

$$E_s = \cos \phi \exp [A \phi - \frac{(x^2 + y^2)}{w_{s0}^2} \cos^2 \phi (B + i \tan \phi)] \quad (5)$$

式中 $\phi = \arctan(z/z_r)$, $w_{s0}^2 = 2z_r/k_s$, A 和 B 为复常数。则聚焦泵浦时斯托克斯光获得的增益为

$$G = 2\text{Re}(A) \Delta \phi = [2G_p - \sqrt{2(G_p b - 1)}] \Delta \phi \quad (6)$$

式中 $G_p = \gamma I_0 z_r / 2 = \gamma P / \lambda_p M^2$, P 为泵浦功率, $b = 2w_{s0}^2 / w_{p0}^2 = 2\lambda_s / \lambda_p M^2$ 。稳态受激拉曼散射的阈值通常定义为光强增益 $G_t = 25$ 。考虑瞬态效应时, 阈值应修正为 $G_t = 25 + 131.5T_2/t_p$ ^[7], 式中 T_2 为拉曼弛豫时间, t_p 为泵浦脉冲宽度。由(6)式可以计算出拉曼散射的阈值泵浦能量。

3 实 验

对泵浦光源和实验装置的详细介绍参见文献[4], 本文主要讨论泵浦光和一阶斯托克斯光的光束质量因子 M^2 和截面光强分布的测量。用刀口法测量泵浦光聚焦后的光束半径, 透镜焦距 $F = 100$ cm, 60 cm, 30 cm, 实验设置如图1所示。令 $D(z)$ 为位置 z 处透过能量比率从 90% 变化到 10% 时刀口的移动距离, 则 $w_p(z) = 0.78D(z)$ ^[2]。

图2为透镜焦距 $F = 100$ cm 时, 泵浦光束半径随 z 的变化, 图中曲线为(1)式对实验数据的最佳拟合。拟合时令 w_{p0} 和 z_r 为独立变量, 根据两者的关系得 M^2 因子为 5.32, 相当于 3.4 倍衍射极限。由于实验中没有使用消球差透镜, 因此聚焦对泵浦光束质量有明显的影响。焦距为 60 cm、30 cm 时, M^2 因子为 3.98、11.25, 分别对应 2.5 倍、7.2 倍衍射极限。泵浦光源为 KrF 脉冲准分子激光器, 单脉冲能量起伏接近 5%, 在每一刀口位置均对 10 个脉冲进行平均。根据焦点和透镜处的光束半径, 按(2)式计算的 M^2 因子在 $F = 100$ cm、60 cm 和 30 cm

时分别为 5.4、3.8 和 11。对比拟合值, 误差分别为 1.5%、4.5% 和 2.2%。

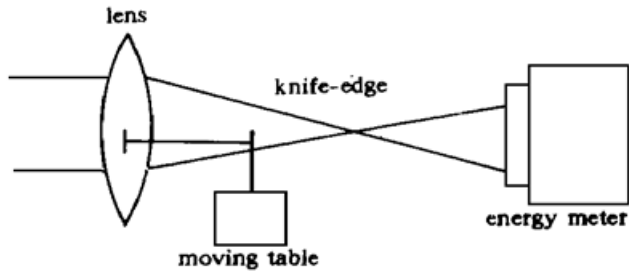


Fig. 1 Measure the beam radius using knife-edge technique

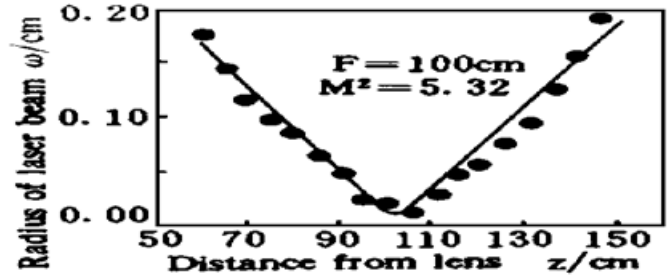


Fig. 2 Pump beam radius versus distance from the lens. The curve is a best fit of Eq. (1) to the experimental data. $F = 100$ cm, $M^2 = 5.32$

由于一阶斯托克斯光输出能量有较大的起伏, 不能用刀口法测量 M^2 因子。拉曼种子源输出的一阶斯托克斯光经分光、准直后由 100 cm 焦距的透镜聚焦, 光敏纸在焦点处接收到的焦斑由 600 DPI 的灰度扫描仪转化为 256 级灰度图像。由图像的 $1/e$ 灰度变化决定焦点处的光斑半径 w_p , 根据(2) 式可以计算出斯托克斯光束的 M^2 因子。由于斯托克斯光能量较低,

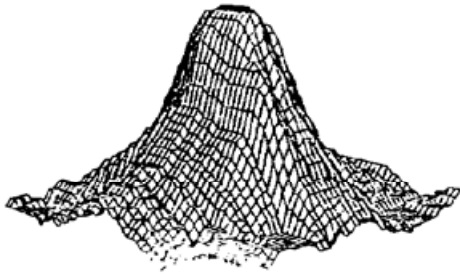


Fig. 3 The intensity profile (Grayscale) of pump beam at focus when $F = 100$ cm

可以近似认为光敏纸的光强-灰度响应曲线是线性的。考虑到分光准直系统和聚焦透镜对光束质量的影响, 实际输出的光束质量应高于测量值。

为了确定泵浦光截面光强为高斯分布, 用光敏纸接收低能量时的泵浦光焦斑。图 3 为 $F = 100$ cm 时泵浦光焦斑的灰度数据图像近似为高斯分布。图中没有出现能量过高造成的灰度饱和, 也不存在高阶模形成的尖峰。上述低能量测量是将泵浦光用衰减片衰减后获得的, 中性密度衰减片对光场分布的影响并不严重。因此理论中的高斯强度分布是相当好的近似。

4 实验结果与分析

图 4 为 $F = 100$ cm 时实验测得的阈值泵浦能量随拉曼池气压的变化和理论曲线。图中曲线 1 为依据(6) 式计算的理论阈值, 曲线 2 为根据文献[7] 中假设泵浦光为基模高斯光束推导的阈值能量公式计算的理论结果。前者比后者更好地与实验数据相吻合。图 4 中实验结果偏高与拉曼散射的光强阈值和四波混频效应与一阶能量的抽取有关。详细分析见文献[4]。

图 5 为泵浦能量 55 mJ 时, 一阶斯托克斯能量与气压的关系。影响拉曼种子源一阶能量转换效率的因素很多, 主要有聚焦参数、高阶散射和泵浦光束质量。在(6) 式中与聚焦参数有关影响拉曼增益的因子 $\Delta\phi = 2 \arctan(z/z_r)$ 。实验测得 $F = 100$ cm, 60 cm, 30 cm 时的瑞利长度 z_r 分别为 1.7 cm、0.64 cm 和 0.44 cm, 对应值为 3.04、3.11 和 3.12, 即聚焦参数对拉曼增益的影响较小。在一些拉曼散射实验中, 采用长焦距透镜和高气压(8.106×10^6 Pa~ 1.621×10^7 Pa) 拉曼池以抑制四波混频产生的高阶散射对一阶能量的抽取^[3, 10]。在低气压拉曼池中四波混频效应未被抑制, 长焦距透镜反而使其增强^[4], 故图 5 中一阶斯托克斯输出能量的饱和气压随焦距增大而下降。但焦距 60 cm 时仍然获得最高的一阶能量和能量转换效率($F = 100$ cm、60 cm 和 30 cm 的转换效率分别为 28%、33% 和 21%)。因此, 光束质量因子通过影响泵浦聚焦强度和焦区长度决定了受激拉曼散射的增益 ($G_p \propto 1/M^2$) 和斯托克斯能量转

换效率。

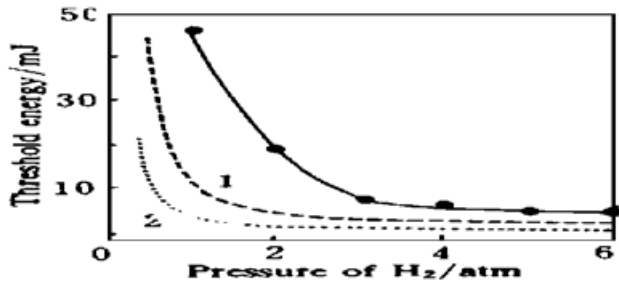


Fig. 4 Measured energy threshold versus pressure of Raman cell when $F = 100$ cm. Curve 1 is a calculated theory result of Eq. (6). Curve 2 is calculated according to Ref. [7]

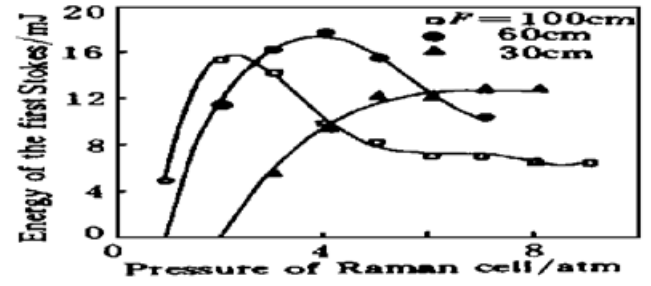


Fig. 5 Measured energy of the first Stokes versus pressure of Raman cell. $F = 100$ (□), 60 (●), 30 cm (▲). Pump energy is 55 mJ

在(3)式中忽略泵浦光的倒空和衍射效应, 此时斯托克斯光场 E_s 的解只取决于泵浦光的强度, 与光场的相位起伏无关。如果窄光束近似(4)式成立, (5)式为 E_s 的严格解。由于式中不存在与泵浦光相位起伏相关的相位扰动项, 意味着输出斯托克斯光束质量与泵浦光束质量无关, 应当为 $M_2 = 1$ 的基模高斯光束。这一结论在泵浦光非倒空(阈值附近)时是成立的, 并为实验所证实^[11]。考虑泵浦光倒空和衍射效应, 拉曼散射过程应当用耦合放大方程描述^[12]:

$$(\nabla_{\perp}^2 + 2ik_s \partial/\partial z) E_s = ik_s \mathcal{Y} |E_p|^2 E_s, \quad (\nabla_{\perp}^2 + 2ik_p \partial/\partial z) E_p = -i(k_p^2/k_s) \mathcal{Y} |E_s|^2 E_p \quad (7)$$

在(7)式中泵浦光的横向相位起伏, 或空间相位关联, 将影响斯托克斯光的横向相位分布, 使得光束质量下降。泵浦倒空使泵浦光强度偏离高斯分布, 在斯托克斯光中产生高阶模式, 也会使光束质量下降。 M^2 因子实际上反映了光束的空间相位关联程度^[12], 因此斯托克斯光束质量主要取决于泵浦光束的 M^2 因子和倒空程度。表 1 给出了不同气压和聚焦参数时一阶斯托克斯光和泵浦光的 M^2 因子和发散角, 焦距 60 cm 时光束质量最好。表 1 中斯托克斯光 M^2 因子随气压的变化不大, 这一现象与文献[12]中 M^2 因子近似与增益无关的数值计算结果(增益从 100 到 10^{10} , M^2 因子仅增大 30%)一致。因此, 一阶斯托克斯光束质量主要取决于泵浦光束质量, 泵浦倒空的影响相对较小。表中同时给出了光束质量为衍射极限 dl 的倍数。

Table 1. Beam quality of the first order Stokes (pump energy 1.20 mJ)

focus distance /cm	M^2 concept of pump beam	pressure of H ₂ / (101.325 kPa)	divergence angle /mrad	beam quality /dl	M^2 concept of the first Stokes
100	5.32	8	2.12	19	29.1
		6	2.09	19	28.6
		4	1.86	17	25.5
		2	1.97	18	26.9
60	3.98	8	1.25	14	24.2
		6	1.28	14	23.5
		4	1.38	15	25.0
		2	1.06	12	20.6
30	11.25	8	0.97	26	40.4
		6	0.99	27	41.3
		5	0.80	22	33.2
		4	0.73	20	31.0

参 考 文 献

- [1] J. P. Partanen, M. J. Shaw, High-power forward Raman amplifiers employing low-pressure gases in light guides. I. Theory and applications. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(10) : 1374~ 1389
- [2] J. C. Heuvel, F. J. Putten, R. J. Leron, The SRS threshold for a nondiffraction-limited pump beam. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(9) : 1930~ 1936
- [3] T. T. Lay, S. Wada, T. Tashiro *et al.*, Relation of pump-beam quality and conversion efficiency in the Raman downward conversion. *Appl. Phys. (B)*, 1996, **69** : 59~ 64
- [4] 宁 东, 楼祺洪, 向世清等, 氟仕氮准分子激光在氢氧中受激拉曼散射阈值的实验研究. *中国激光*, 1997, **24**(10) : 942~ 946
- [5] T. F. Johnston, M^2 concept characterizes beam quality. *Laser Focus World*, 1990, May, 173~ 183
- [6] B. Bobbs, C. Warner, Absence of second Stokes in a Raman generator with no four-wave mixing. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(2) : 88~ 90
- [7] N. J. Everall, J. P. Partanen, J. R. Barr *et al.*, Threshold measurements of stimulated Raman scattering in gases using picosecond KrF laser pulse. *Opt. Commun.*, 1987, **64**(4) : 393~ 397
- [8] B. N. Perry, P. Rabinowitz, M. Newstein, Wave propagation in media with focused gain. *Phys. Rev. (A)*, 1983, **27**(4) : 1989~ 2002
- [9] K. J. Drühl, S. Shakir, M. Yousaf, Approximate theory of Stokes amplification and conversion valid at large gain. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(7) : 446~ 448
- [10] J. M. Telle, R. G. Wenzel, High-efficiency first Stokes generation from XeF-pumped CH₄. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(10) : 1489~ 1491
- [11] J. L. Carlsten, J. Rifkin, D. C. MacPherson, Spatial mode structure of stimulated Stokes emission from a Raman generator. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(10) : 1476~ 1482
- [12] J. C. Heuvel, Numerical study on beam quality in SRS. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(4) : 650~ 657

The Influence of Pump Beam Quality on Stimulated Raman Scattering

Lou Qihong Ning Dong Dong Jingxing Wei Yunrong

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

(Received 1 April 1997; revised 11 August 1997)

Abstract The influence of pump beam quality on Raman generator at low pressure is discussed. The experimental results of energy threshold, output energy and beam divergence of the first Stokes are present. The quality of pump and the first Stokes beam is analyzed using the M^2 concept. The energy threshold of the first Stokes is calculated according to an approximate theory including the effect of focused pump beam and beam quality. The results are compared with experiments and theory in related references.

Key words beam quality, M^2 concept, Raman generator.