

氯化氙激光光束质量对 H_2 中 受激喇曼散射转换效率的影响*

楼祺洪 霍芸生 董景星 丁泽安 魏运荣 丁爱臻 高鸿奕
(中国科学院上海光机所)

提要: 比较了稳腔、平面平行腔及非稳腔氯化氙激光器在高压氢气中受激喇曼散射的特性。采用环状光阑截取非稳腔激光输出中光束质量最佳部分,在40mJ泵浦能量下,获得喇曼光子转换效率大于90%。

Effects of beam quality of XeCl excimer laser on Raman conversion efficiency in H_2

Lou Qihong, Huo Yunshen, Dong Jinxing, Ding Zean, Wei Yunrong, Ding Aizhen, Gao Hongyi
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: SRS characteristics in high pressure H_2 are evaluated for pumping laser with stable, plane-parallel and unstable laser resonators. By using a ring aperture to select the part of laser beam with best beam quality, more than 90% Raman photonconversion efficiency was obtained with a pumping energy of 40mJ.

引 言

在受激喇曼散射实验中,当聚焦区的功率密度大于阈值后,光束质量的好坏直接影响喇曼频移的转换效率。在目前的实验中,大部分实验是采用低能量的准分子激光器进行的^[1,2],转换到高阶斯托克斯的效率较低,少数用高能的光的实验由于激光脉冲宽度较大而降低了峰值功率,转移到高阶斯托克斯光的效率亦不十分大^[3]。

本文的目的在于比较不同光束发射角的激光输出对喇曼转换效率的影响,采用非稳腔结构的输出使光束发散角减小到0.3

mrads。当激光能量为焦耳量级时,总的喇曼转换效率从平面平行腔的22%提高到59%。为了进一步提高光束质量,我们采用环状光阑限止的方法。选取非稳腔输出的光束质量最好的一部分,当激光能量为40mJ时,总的能量转换效率达到60%以上,而且高阶斯托克斯光的分量有很大的增长。

腔结构对 SRS 过程的影响

SRS 实验装置可参阅文献[4],表1给出三种谐振腔下激光器的特性以及受激喇曼

收稿日期:1987年6月29日。

* 国家自然科学基金会资助课题。

表 1 各种谐振腔特性及对 SRS 总效率的影响

	腔长		激光能量 E (mJ)	发散角 θ (mrad)	焦点功率密度 P (MW/cm ²)	SRS 总效率 η (%)
	R ₁ (cm)	R ₂ (cm)				
稳腔	300	∞	100	1300	10	0
平面-平行腔	∞	∞	100	1400	4	22
非稳腔	300	-50	125	1000	0.3~0.5	2.5×10 ⁴ 59

散射特性。当采用一般的稳腔结构时,虽然输出能量达 1300 mJ,但聚焦区的功率密度仅 20 MW/cm²,远低于受激喇曼散射阈值,因此观察不到喇曼频移输出。用平行-平面腔的主要输出为一级斯托克斯,二、三级斯托克斯光比较弱,总的能量转换效率为 22%。使用望远镜式非稳腔结构,当 $m=6$ 时,方向性有很大的改善,聚焦区的功率密度达 25 GW/cm²,此时得到的总能量转换效率达 59%,相应的量子效率达 90% 以上。这表明大部分泵浦光子被倒空。在喇曼输出谱方面也与平面平行腔的情况有很大的不同,最强的为三阶斯托克斯光(499 nm),它的能量转换效率为 24%。

两种谐振腔下 SRS 转换效率与喇曼池中氢气压力的关系由图 1 给出。对于平面-平行腔从 5~17 atm,喇曼转换效率随气压缓慢上升;而对于非稳腔结构,在 $P_{H_2} > 5$ atm

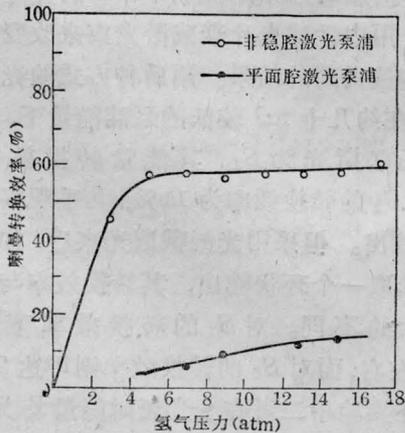


图 1 两种谐振腔激光泵浦下喇曼转换效率与氢气压力的关系
(泵浦激光能量均为 0.7J 左右)

后,喇曼转换效率趋于平坦而与气压无关。严格而言,图 1 中稳腔的实验结果也应有上述关系。但实验结果却有一定的偏差。其原因可能是我们在计算 SRS 转换效率中仅考虑了前向 SRS 过程,而忽略了后向 SRS 过程。在非稳腔情况下,由于总的转换效率高,这种近似引入的误差不大。但在稳腔情况下,总的转换效率较低,引入的误差就比较大。

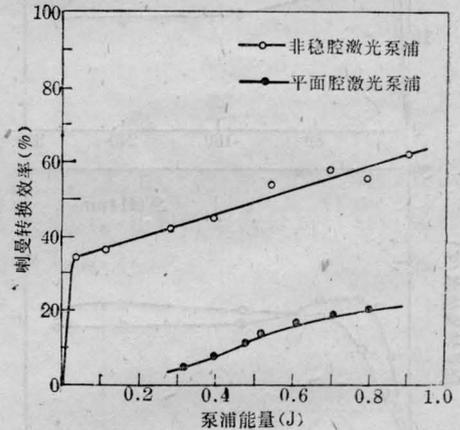


图 2 两种谐振腔激光泵浦下喇曼转换效率与泵浦能量的关系(氢气压力 15 atm)

图 2 给出两种激光腔下喇曼转换效率与泵浦能量的关系。对于平面平行腔,阈值能量为 300 mJ 左右。随着泵浦能量的增加,喇曼转换效率亦随之增长,而对于非稳腔,阈值能量仅为几个毫焦耳。在超过阈值能量后,喇曼转换效率随泵浦能量基本上按线性增长。

喇曼光的空间结构

我们采用光阑法截取激光束的一部分,

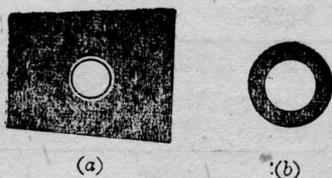


图 3

(a) 非稳腔输出光斑, 中间圆内的细环是衍射条纹;
(b) 用环状光阑选取的环状光斑输出

以便使用整个光斑中的光束质量特别好的部分。实验中使用的非稳腔输出光斑是外面为矩形中间有一圆孔的环状结构, 如图 3(a)

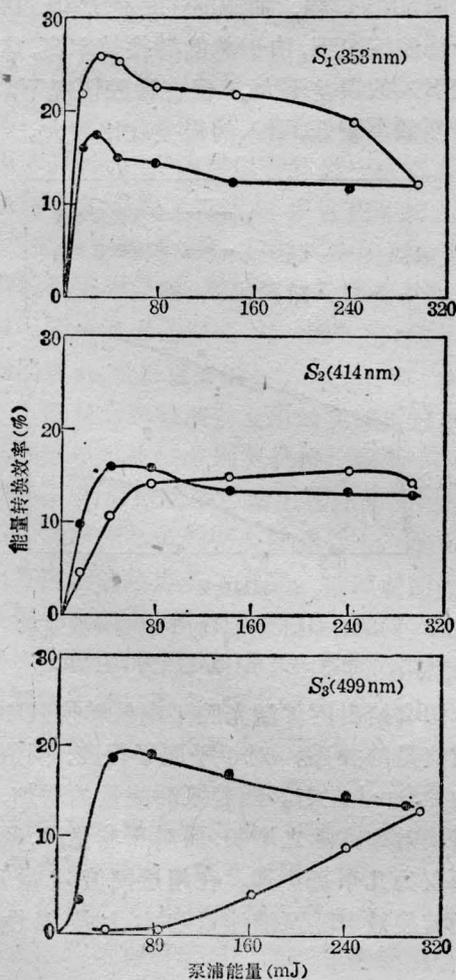


图 4 氢气压力为 17 atm 下, 喇曼能量转换效率与泵浦能量的关系

●—用光阑控制泵浦能量;
○—用衰减片改变泵浦能量

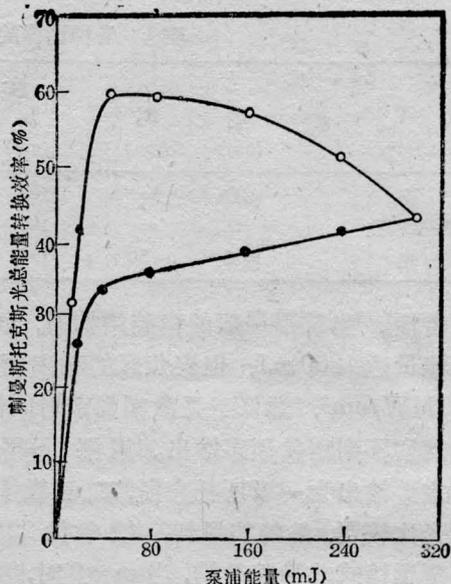


图 5 氢气压力为 17 atm 下喇曼斯托克斯光总能量转换效率与泵浦能量的关系

○—用光阑控制泵浦能量
●—用衰减片改变泵浦能量

所示。为此我们采用不同直径环状光阑来截取输出光斑的不同部位。图 3(b)是采用环状光阑后激光场的近场花样, 改变环的大小可以逐步增大环状光的能量, 这样可以研究光束中不同部位的喇曼转换的贡献。图 4 给出氢气压力为 17 atm 时, 采用光阑法改变泵浦能量对 S_1 、 S_2 和 S_3 三个斯托克斯光能量转换效率的影响, 以及维持图 3(a)的光斑形状不变, 用中性滤光片衰减激光束来改变激光泵浦能量得到的结果。用后种方式的光束泵浦时, 在约几十 mJ 较低的泵浦能量下, 最强的斯托克斯光为 S_1 , 其能量转换效率为 25%, S_2 的转换效率为 11%, 几乎观察不到 S_3 的输出。但采用光阑截取光束后, 如在中心处选取一个环状输出, 其转换效率与上者有很大的不同。对 S_1 的转换效率下降到 15% 左右, 而对 S_3 的转换效率则可达 20%。在上述实验中二者在全光斑时能量均为 320 mJ。这表明用光阑选取的环状部分的光束质量比非稳腔总体输出时还有所提高, 再次证实了光束质量的改善有利于向高阶斯托克

斯光的转换。图5给出二种情况下总的喇曼效率与泵浦能量的关系,结果表明采用光阑限制法大大提高了低能量区的转换效率。

在采用光阑法选取光束实验中,我们还发现了一些有趣的现象,即环状泵浦光产生的斯托克斯光并不呈现环状结构。原因可能是产生受激喇曼散射的区域主要处在聚焦透镜的焦深区附近,在这一区域,除了受激喇曼增益的非线性效应外,还存在泵浦光在聚焦区域自身的强烈衍射作用;其次,泵浦光是具有锥形分布的聚焦光束,这种聚焦光束的锥角除了提供了泵浦光与各阶斯托克斯光进行相干混频外,还会使一阶斯托克斯光与泵浦光相互作用产生“二次斯托克斯过程”^[5]提供位相匹配条件。我们的环状泵浦光在实验上模拟了边缘光强分布高于中心光强分布的高阶高斯-厄米模光场: $\psi_n(n=15)$,在适当的聚焦条件下,它们产生的一阶斯托克斯光束的光强会发生边缘减弱和中心加强。从图6可见,虽然理论计算中的 ψ_{15} 高斯-厄米模的光场与实验中的环状光场有一定的差别,但是如果将环状光场按高斯厄米模展开有

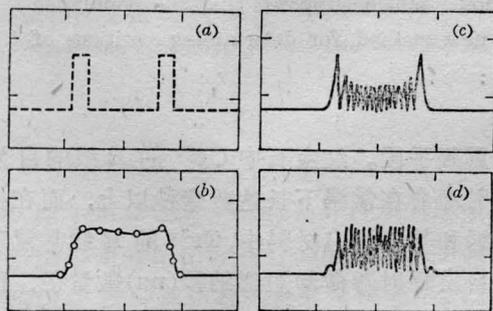


图 6

(a) 环状输出的近场光强分布; (b) 由环状光束泵浦的一阶斯托克斯光场分布; (c) 第15阶高斯厄米模的场分布; (d) 由15阶高斯-厄米模泵浦下第一阶斯托克斯光的场分布计算结果

$$I_r = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \psi_n$$

则其中对应的 a_{15} 值应大于其它 n 值下的系数。因此,作为定性的近似,以 ψ_{15} 作为主项去近似环状光场,可以定性地解释我们实验中观察的波面不再现性。

讨 论

我们在本文中仅从宏观上考虑光束分布中愈靠近中间的那部分能量,其光束发散角愈小。这是一种实验结果上的分析。严格而言,要对非稳腔的光斑输出进行波面分析,求解它们的空间分布及时间过程,再将它们各部分的喇曼过程进行动力学方面的研究,这是进一步要进行的工作。

另一方面,激光脉冲波形对转换效率亦有较大的影响。理想的情况脉冲应是方波,即具有无限快的上升时间,事实上任何脉冲均有一定的上升时间。本文采用的光脉冲上升时间仅为 $2 \sim 3$ ns,比文献[2]报道的 20 ns 要短得多,加上本文采用的峰值功率较高,使它向高阶斯托克斯光的转换效率比文献[2]有很大的改善。

根据以上二个要求改善泵浦激光束的质量,可以提高喇曼转换的效率。

参 考 文 献

- 1 Komone H *et al.* *Opt. Lett.*, 1979; **4** (12): 398
- 2 Trainor D W *et al.* *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982; **QE-18**(11): 1929
- 3 Falsini P *et al.* *Opt. Commun.*, 1985; **53**(6): 421
- 4 Lou Qihong *et al.* *Chinese Physics; Lasers*, 1986; **13** (4): 227
- 5 Coldhar J *et al.* *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982; **QE-18**(3): 399