

改变作用区长度对高压 H_2 受激喇曼散射的影响

丁海曙 李 港 郭奕理
(清华大学无线电电子系)

提 要

用高压氢作为工作物质,以 YAG 二倍频激光器为泵源,实现了高效率的受激喇曼散射。本文研究了作用区长度和光束聚焦对阈值和转换效率的影响,并对实验结果进行了初步分析。

近年来,受激喇曼散射(SRS)已成为实现激光频率扩展的重要手段。根据 SRS 原理制成的激光频率扩展器在光谱学、光化学、生物医学等方面具有广阔的应用前景。

以高压 H_2 为介质,以 YAG 二倍频(5320 \AA)为泵浦,我们实现了 SRS,观测到从三阶斯托克斯(Stokes) s_3 , $\lambda = 1.58 \mu\text{m}$ 到六阶反斯托克斯(anti-Stokes) as_6 , $\lambda = 2286 \text{ \AA}$ 的 9 级输出^[1]。

转换效率 η 是衡量 SRS 是否充分进行一个重要指标,通常定义 $\eta_{\text{总}} = (\sum E_{s_n} + \sum E_{as_n}) / E_i$ 和 $\eta_{s1} = E_{s1} / E_i$, 其中 E_i 、 E_{s_n} 、 E_{as_n} 分别为泵浦、 n 阶斯托克斯和反斯托克斯光波的能量。一般说来,提高 $\eta_{\text{总}}$ 可从三方面来考虑:(1) 提高泵浦光的质量、输出功率和压缩光束发散角;(2) 有一个适当的氢气压强;(3) 有一个适当的作用区长度和相应的光学系统。本文着重讨论最后一个问题。

一、实验装置和结果

实验装置如图 1 所示。本实验采用具有非稳腔的 YAG 激光器为泵源,经二倍频后输出波长为 5320 \AA 的脉冲光束,脉宽 8 ns 。红外吸收玻璃 F 用于吸收倍频后残存的 $1.06 \mu\text{m}$ 光波,吸收率为 98.3% 。透镜 L_1 和 L_2 共焦,可适当放在合适的位置上使焦点落在喇曼池中心。泵浦光束经聚焦透镜 L_1 进入拉曼池 C ,在池中发生 SRS 过程,形成各级散射光,并由透镜 L_2 准直之后射向转向棱镜 P_1 。 P_2 为 Pellin-Broca 棱镜,它同时起到色散和转向作用,当棱镜绕其自身的转动中心作小角度转动时,在垂直于入射光束 r 的方向上将依次有各级斯托克斯和反斯托克斯光波通过挡板 D 输出。 M_1 用于测定由分束片 G 以固定比例取出的泵浦能量。 M_2 用于测定各级散射光的能量。在 M_2 的位置上,也可以放置光电管观察波形,或放置摄谱仪标定波长。

(1) 实验测量了三种不同作用区长度($l = 720 \text{ mm}$ 、 470 mm 、 260 mm , 以下分别称为长、

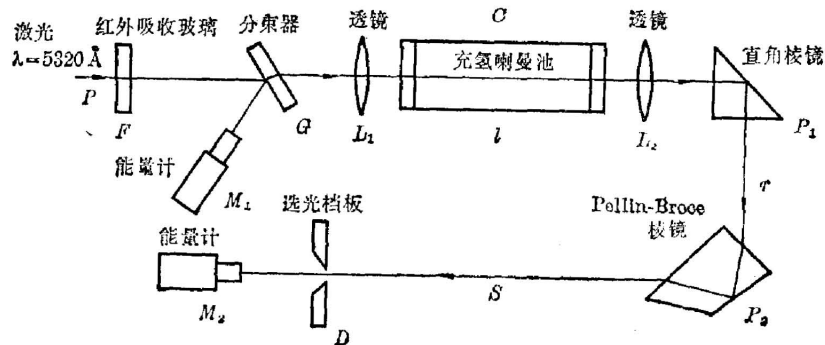


图 1 实验布置图

Fig. 1 Arrangement of the experiment

中、短池)下的 $E_{s1} \sim E_l$ 曲线。透镜焦距均为 $f_1 = f_2 = 490 \text{ mm}$ 。实验结果如图 2 所示。当 E_l 较大时, a 、 b 曲线要相交, 这是由于长池情况下的 E_{s1} 部分地转化为 E_{s2} 所致(参阅图 3)。

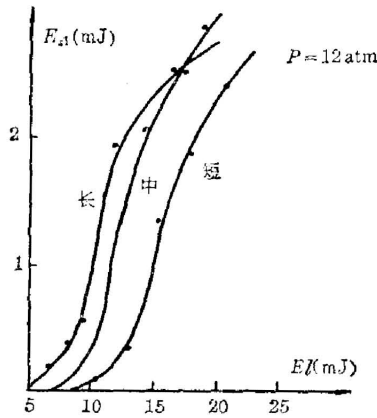


图 2 不同喇曼池长度情况下的 $E_{s1} \sim E_l$ 曲线
Fig. 2 E_{s1} versus E_l for different lengths of the Raman cell

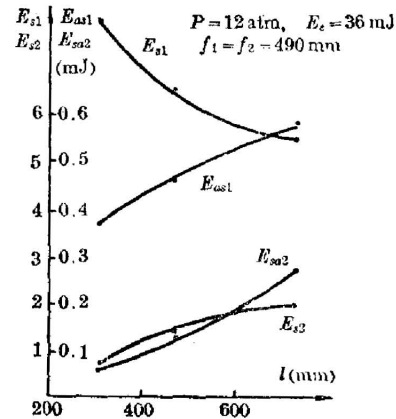


图 3 E_{s1} 、 E_{s2} 、 E_{as1} 、 E_{as2} 随池长的变化
Fig. 3 E_{s1} 、 E_{s2} 、 E_{as1} 、 E_{as2} versus the length of the cell

(2) 测量 E_{s1} 、 E_{s2} 、 E_{as1} 、 E_{as2} 随池长的变化。

(3) 改变透镜焦距对 E_c 的影响。

对于短喇曼池 ($l = 260 \text{ mm}$, $E_l = 23 \text{ mJ}$, $P = 12 \text{ atm}$), 测得两种不同焦距的透镜以及无透镜(相当 f 为 20)情况下的 E_{s1} 和 η_{s1} (如表 1 所示)。表 2 给出了 $l = 260 \text{ mm}$, $P = 12 \text{ atm}$ 时的焦距对能量阈值 E_c 的影响。

表 1 不同透镜焦距对 η_{s1} 的影响

Table 1 η_{s1} versus different lens focuses

焦距 (mm)	E_{s1} (mJ)	η_{s1}
$f_1 = f_2 = 185$	0.75	3.2%
$f_1 = f_2 = 260$	2.23	10%
$f_1 = f_2 = 20$	0	0

表 2 不同透镜焦距对 E_c 的影响

Table 2 E_c versus different lens focuses

焦距 (mm)	E_c (mJ)
$f_1 = f_2 = 185$	2.4
$f_1 = f_2 = 495$	13.5
$f_1 = f_2 = 20$	很大

二、理论分析及讨论

关于 SRS 前人曾进行过许多理论分析和实验研究。根据 SRS 的量子力学描述^[2], 可以得到随着 P_l (或强度 I_l) 的增加, P_{s1} 将依次经历四个阶段。

- (1) 自发喇曼散射阶段。 $P_{s1} \sim P_l$ 呈线性关系, P_{s1} 极其微弱。
- (2) P_{s1} 随 P_l 作指数增长阶段。

$$P_{s1}(x) = P_{s1}(0) \exp g, \quad g = K I_l z, \quad (1)$$

其中 z 表示沿喇曼池轴向的坐标位置, 原点选在光速进入喇曼池的入口处。 $P_{s1}(0)$ 为入口处的自发喇曼噪声, 它和 s_1 波的频率 ν_{s1} 以及 s_1 波的自发散射线宽 $\delta\nu$ 有关, 可近似认为是常量。 I_l 为泵浦光强, 如果假定光束截面均匀, 则 $I_l = P_l/A$, A 为光斑面积。 K 为仅由气体性质、压强决定的物理量。由此可见, 为了在出口处 ($z=l$) 获得较大的 $P_{s1}(l)$, 需要增大 $K I_l l$ 。这里, 我们将 $K I_l l$ 定义为喇曼增益, 并以 g 表示。显然, 同样在 P_l 情况下, 光束截面 A 愈小, I_l 便增大, 喇曼增益 g 也增大。

(3) 阈值阶段 (又称为参量不稳定区)。随着 P_l 增加, P_{s1} 急骤增长 (改变几个量级), 一直增大到和 P_l 具有同样量级。

(4) 饱和阶段。 P_s 已最大限度地转为各级 S_n 和 α_{sn} , η_{sn} 趋于饱和。

上述四个阶段中的 (2)、(3)、(4) 阶段只有在泵浦强度超过 MW/cm^2 的量级才能出现, 属于强光作用下的 SRS 效应。

上述的理论分析, 首先为液氮 (或液氧) 中进行的 SRS 实验所证实^[2]。在高压氢中也观

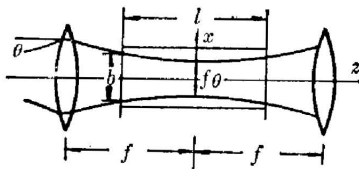


图 4 在泵浦光束聚焦情况下, 计算沿 z 轴之积分喇曼增益

Fig. 4 Integral Raman gain along the z axis for the focused pumping beam configuration

察到了明显的阈值现象, 并通过实验证实的确存在指数增长区 (例如, 在 $P=95 \text{ atm}$ 条件下, 测得 $K=1.65 \times 10^{-9} \text{ cm/W}$ 与理论计算 $1.8 \times 10^{-9} \text{ cm/W}$ 符合甚好^[3])。

喇曼增益值 g 的计算 为实现高效率的 SRS, 在我们的实验装置中, 对光束进行了聚焦。在喇曼池中, 光束截面是改变的, I_l 也是 z 的函数。因此, g 不能写成 (1) 式的形式, 而必须通过积分来计算^[4]。图 4 给出了计算喇曼增益值 g 的模型示意图, b 为喇曼池入口处的光束直径, 并假定光腰处 (喇曼池中点) 的直径为 $f\theta$ 。考虑光束截面改变时

$$g = K \int_{-l/2}^{l/2} \frac{P_l}{A} dz = \frac{2K}{\pi} \int_0^{l/2} \frac{P_l}{x^2} dz, \quad (2)$$

经透镜聚焦之后, 光束的包络可近似地认为旋转双曲面, 它与 xOz 平面相交的双曲线方程为 $(x^2/a^2) - (z^2/c^2) = 1$ 。利用 $z=0$, $x=(f\theta/2)$ 和 $z=(l/2)$, $x=b/2$ 的条件确定上式中之系数 a 、 c 后, 代入 (2) 式得喇曼增益值 g 为

$$g = \frac{4K P_l l}{\pi f \theta b} \text{arc tg } (b/f\theta) = K' l P_l, \quad (3)$$

$$P_{s1}(l) = P_{s1}(0) \exp K' l P_l. \quad (4)$$

讨论

(1) 关于 $E_{s1} \sim E_l$ 曲线及阈值问题。

图 2 中的 E_{s1} 是用能量计直接测量的, 检流计灵敏度为 $7.2 \mu\text{J}/\text{mm}$ 。实验指出: 不论是长、中、短池, 只有当 E_l 增加到各自相应的特定值时, 才能获得可观测到的 E_{s1} 。当 E_l 继续增加, E_{s1} 经过一段增长之后就会急骤上升(斜率大)。我们定义, 当 E_{s1} 开始急剧上升时对应的 E_l 为阈值(这样的定义与定义急骤上升段的其它部分为阈值相比, 在数量上或对一些规律性的研究上差别不大)。这就可粗略地定出长、中、短池的能量阈值。

(2) 改变工作区长度对阈值的影响。

表 3 不同长度下的阈值

Table 3 Thresholds for different length of the Raman cell

	$l(\text{mm})$	$E_c(\text{mJ})$	$P_c(\text{MW})$	脉宽 $\tau(\text{ns})$
长 池	720	9	1.1	8
中 池	470	11	1.3	8
短 池	260	13.5	1.6	8

从表 3 可见, l 愈长, P_c 愈小。可定性解释为: 阈值区是从指数区发展而来的, 从 (4) 式可见, l 愈大, 指数区增长就愈迅速, 因此可以在较小的 P_c 的情况下达到阈值。从图 5 中可以看出, l 增加虽然增长了作用区的长度, 但所增部分光束截面积是比较大的。因此, 随着 l 的增长, g 的增长是比较慢的。

(3) 关于作用区长度对各级的影响。图 3 表明, 当 $E_l = 36 \text{ mJ}$ (对长、中、短池都远远超过阈值), 短池的 E_{s1} 比长池大, 而长池的 E_{s2} 、 E_{as1} 、 E_{as2} 比短池大, 即随着作用区长度增长, E_{s1} 将显著地减小, 而 E_{s2} 、 E_{as1} 、 E_{as2} 将显著增加。这是因为, 当一级斯托克斯光波 s_1 增到足够强时, 它将作为泵浦光通过 SRS 效应而产生二级斯托克斯光波 s_2 。因此, 沿着光束行进方向来看, 总是先由泵浦光产生一级斯托克斯光波 s_1 , 然后再增加到足够强的一级斯托克斯光波 s_1 产生二级斯托克斯光波 s_2 。也就是说, 作用区的延长将有利于 E_{s1} 向 E_{s2} 的转化。由于 E_{s1} 、 E_{s2} 比其它各级散射光要强许多, 因此, 上述转化过程就决定了在实验中测得的 E_{s1} 沿轴向减小, E_{s2} 沿轴向增加的基本趋势。至于各级反斯托克斯光波 a_{sn} , 它是通过各种光波场之间可能产生的参量过程和非参量过程得到的, 由于涉及诸波矢之间的匹配问题, 很难准确解释, 但总可以粗略认为, 只有当一级斯托克斯光波 s_1 产生并达到一定强度之后, 才能产生可以观测到的反斯托克斯谱线。

(4) 关于透镜焦距对 η_{s1} 和 E_c 的影响。从表 1 来看, 不加透镜 ($f \rightarrow \infty$) 时, 在喇曼池各处光束截面都很大, 因此不难理解这时 $E_{s1} = 0$, $\eta_{s1} = 0$ 。但是, 这并不是说 f 愈小 η_{s1} 愈大, 而 $f = 185 \text{ mm}$ 时的 η_{s1} 反而比 $f = 260 \text{ mm}$ 时的 η_{s1} 要小。也就是说, f 的改变对 η_{s1} 的影响不是单调的。对上述现象, 可根据 (3) 式作如下定性解释。(3) 式中 θ 角很小, $b/f\theta$ 较大,

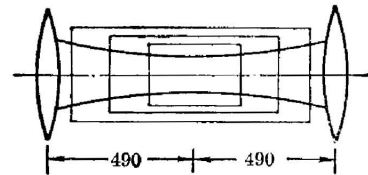


图 5 喇曼池入射窗口处光束直径随 l 的变化

Fig. 5 The diameter of beam at the input window of Raman cell versus different l

$\arctg(b/f\theta)$ 接近于 $(\pi/2)$ 。因而 $\arctg(b/f\theta)$ 随 f 、 b 的改变较小。于是 (3) 式近似地认为 $g \propto (1/fb)$ 。 l 一定, 当 f 改变时, 喇曼池入口处的光斑直径 b 也会改变, 而且 f 增加必然使 b 减小, f 减小则 b 增加。即短焦距透镜使焦点处光斑面积减小, 因而使焦点附近 I_i 很大, 这是有利于 g 增加的因素, 但在喇曼池入口处光斑直径 b 却较大, 这是使 g 减小的因素。对长焦距透镜, 情况正好相反。因此, 焦距过长或过短对于增加 g 都不利。图 6 给出了上述解释的示意图。我们认为, 对已确定的喇曼池长 l , 应当存在一个最佳透镜焦距 (对应于最大 η_{s1})。此外, 从 (3) 式可以看出, 减小光束发散角 θ , 对于增加 g 也十分有利。

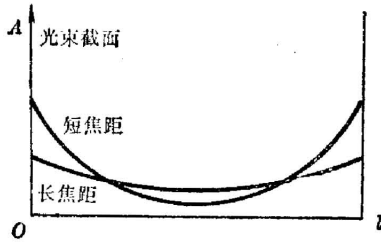


图 6 泵浦光束光斑面积沿喇曼池的轴向分布

Fig. 6 Variation of the area of beam profile along the Raman cell axis

(对应于最大 η_{s1})。此外, 从 (3) 式可以看出, 减小光束发散角 θ , 对于增加 g 也十分有利。

以上是对转换效率的分析。对于阈值能量 E_0 , 也可以做类似的解释。

三、结 束 语

综上所述, 我们可以得到:

(1) 池长 l 增加将使阈值 E_0 有所降低, 如果泵浦只能提供较低的功率, 则增加池长将有利于实现 SRS。

(2) 当泵浦较强, 大大超过阈值之后, 池长的增加将有利于一级斯托克斯光波 s_1 转化为二级斯托克斯光波 s_2 , 并有利于获得较强的反斯托克斯散射。

(3) 当池长 l 确定之后, 要适当选择透镜焦距, 使得焦点处和喇曼池入口处的光束截面都较小, 这样容易获得较高的转换效率和较低的阈值。

(4) 减小光束发散角 θ 将有利于提高喇曼增益。

参 考 文 献

- [1] 科研报导:《清华大学学报》, 1982, **22**, No. 4(Nov), 64.
郭奕理等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 2(Feb), 120.
- [2] Amnon Yariv;《Quantum Electronics》, (John Wiley & Son Lne, 1975), 470.
- [3] A. Penzkoccr, A. Laubercou et al.;《Progress in Quantum Electronics》, 1980, **6**, 55.
- [4] A. de Martino, R. Frey et al.;《IEEE J. Quant. Electron.》, 1980, **QE-16**, No. 11(Nov), 1184.

The effects of varying the interaction length on SRS in high pressure H₂

DING HAISHU LI GAUG AND GUO YILI

(Dept. of Radio Electronics, Qinghua University)

(Received 7 March 1983, revised 26 July 1983)

Abstract

High efficiency SRS (Stimulated Raman Scattering) in high pressure H₂ was excited by YAG SHG laser. Two orders of Stokes output and six orders of anti-Stokes output have been obtained and the corresponding wavelength ranges from 0.229 to 1.58 micron. The influences of interaction length and beam focusing on the threshold and the conversion efficiency is presented in this paper. Explanation of the experimental results is given.

全国高速摄影应用技术学术交流会在上海召开

由中国光学学会高速摄影与光子学专业委员会主办的全国高速摄影应用技术学术交流会议, 于 1983 年 12 月 6 日至 9 日在上海召开。来自全国 10 个省、市的 44 个单位的 82 名代表出席了会议, 代表们在会议期间宣读了论文报告 34 篇, 观看了有关应用技术的十几部电影和 2 部电视录像。论文报告及电影和录像的内容可分为五个方面:

1. 高速摄影技术的应用

我国的高速摄影技术随着国民经济发展的需要, 已由原来专为国防建设服务转向各个经济领域, 这次会议主要是反映近些年来我国的高速摄影技术在工、农业生产的各个行业, 在科研、教学中的具体应用情况, 论文报告介绍了具体应用的经验。柴油机的研究和生产、土木工程中离心模型的试验、金属的切削加工和焊接加工、风洞破坏试验、矿用防爆水槽的研究、合金的超弹性试验、电弧运动、纺织工程、农机研究和生产等方面, 运用了高速摄影技术, 不仅可以成功地记录其工序、工艺的流程和过程, 还可以为解决关键性技术, 提高生产效率, 提供了大量靠一般方法难以获得的资料和数据。例如, 用高速摄影技术研究柴油机油嘴的喷雾过程, 发现了油嘴孔的形状是否规范对喷油状态的影响很大。又如, 用高速摄影机拍摄农机收割、粉碎和播种的运动状态, 为研究其动态过程和改进设计提供了依据, 使改革后的农机的工作效率明显提高。

论文还报道了高速摄影技术在教学、科研和体育事业中的应用。例如, 应用高速摄影技术研究了射流元件内部的流动过程, 发现了射流在附壁前发生回弹的重要现象, 为进一步研究射流元件的机理提供了重要数据。又如, 对跳高、跳远全过程的动作, 用高速摄影机记录下来, 然后进行慢放、分帧研究, 借以改进训练方法。

(下转第 125 页)