

文章编号: 1001-3806(2003)02-0134-03

利用 SBS 调 Q 的喇曼频移 Nd:YAG 激光器研究

李 彤^{1,2} 万 勇¹ 苏心智¹ 吕百达²

(¹西南技术物理研究所, 成都, 610041) (²四川大学激光物理与激光化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 对采用 SBS 调 Q 产生喇曼频移输出的激光器进行了理论分析, 并对实验结果与染料调 Q 时的输出进行了对比, 提出了改进该种激光器性能的方法。

关键词: SBS 调 Q; 喇曼频移; Nd:YAG 激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Study on the SBS Q-switched Raman shifting Nd:YAG laser

Li Tong^{1,2}, Wan Yong¹, Su Xinzhi¹, Lü Baida²

(¹Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

(²Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: The SBS Q-switched Raman shifting Nd:YAG laser is studied theoretically and experimentally. The output energy at the SBS Q-switched mode and dye Q-switched mode is compared. The way of improving the laser output has been proposed.

Key words: SBS Q-switch; Raman shifting; Nd:YAG lasers

引 言

利用受激布里渊散射效应(SBS)获得的相位共轭腔具有不同于一般激光谐振腔的特性, 它可消除相位干扰而使输出光束质量改善, 也可作为被动 Q 开关用于激光器调 Q。目前, SBS 的研究工作比较集中在进行脉冲压缩和波前反转方面, 对将其用作 Q 开关的研究相对较少, 而对利用其调 Q 特性作泵浦源的研究也就更少。激光腔内的 SBS 效应可产生 Q 开关作用^[1], 其优点是可用于任何波长, 特别是应用于新波段产生高功率激光具有吸引力。对于某些新材料相应的新波段, 因没有适合的可饱和吸收体作被动 Q 开关, 或者采用电光晶体调 Q 时对应的晶压太高, 此时, 采用 SBS 效应作 Q 开关使用就显示出了其应用优势。文中采用了复合腔喇曼频移激光器结构, 对利用 SBS 的调 Q 作用产生受激喇曼散射输出的特性进行了理论与实验的研究。

1 实验装置及工作原理

采用复合腔喇曼频移激光器结构, 见图 1。图

作者简介: 李 彤, 男, 1970 年 7 月出生。工程师。现主要从事非线性光学方面的研究工作。

收稿日期: 2001-11-01; 收到修改稿日期: 2002-03-25

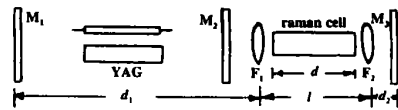


Fig. 1 Experimental setup of the SBS Q-switched Raman shifting laser

中晶体采用双掺 YAG 晶体, 以单灯泵浦, 喇曼池采用高压封装的甲烷气体; F_1, F_2 为一组聚焦准直的透镜, 其焦距的大小以及相隔距离对实验结果会产生影响^[2]; M_1, M_2, M_3 为平面镜, 其中 M_1 镜对 $1.06\mu\text{m}$ 波长全反射, M_2 镜对 $1.54\mu\text{m}$ 波长全反射, 对 $1.06\mu\text{m}$ 为高透射, 其透射率为 $T = 95\%$, M_3 镜对 $1.06\mu\text{m}$ 波长全反射, 对 $1.54\mu\text{m}$ 为增透输出, 透射率 $T = 70\%$ 。当泵浦开始后, 由 M_1, M_3 构成的长度为 L 的起始谐振腔在一定的泵浦输入下将容易产生自由振荡, 振荡的增强导致高压甲烷气体在透镜焦点附近的光强迅速超过产生受激布里渊散射的阈值光强, 后向反射的受激布里渊散射立即产生, 从而与 M_1 镜形成相位共轭腔; SBS 产生的 Stokes 脉冲经过 YAG 晶体的放大被 M_1 反射回甲烷池, 由于 SBS 对脉宽的压缩作用, 返回的光脉冲的光强将超过产生受激喇曼散射的光强阈值, 于是, 甲烷池中产生 SRS, 输出 $1.54\mu\text{m}$ 波长的频移脉冲。

2 理论分析

在利用甲烷气体的 SBS 调 Q 产生喇曼输出的

过程中, 由于 SBS 及 SRS 是两种相互竞争的受激散射过程, 因此, 对 SBS 的调 Q 特点, 以及如何提高 SRS 的转换效率的分析处理是必要的。

2.1 SBS 调 Q 特性分析

在图 1 的复合腔中, M_1 与 M_3 构成起始振荡腔, 由于两镜片均为对 $1.06\mu\text{m}$ 全反射, 因此, 起始腔的损耗仅为衍射损耗和光学元件及介质的吸收损耗, 即 $\delta = \delta_d + \delta_a$, 当起始腔的泵浦输入超过振荡阈值时, 腔内产生自由振荡激光场; 在光腔中的透镜聚焦作用下甲烷池中的焦点 A 点随近的光强将变大, 很容易超过产生 SBS 所需的光强阈值 I_{SBS} , 其值约为每平方厘米几百兆瓦, 此时介质中将被激发起相应的相干声波场, 声子的寿命可用来表示 SBS 的特性作用时间, 其大小由下式决定^[3]:

$$\tau_B = \rho_b / 4 \eta_b K_1^2 \sin^2(\theta/2) \quad (1)$$

式中, ρ_b 为介质密度, θ 为激励光与散射光的夹角, η_b 为粘滞度, K_1 为入射光波矢。该声波场将对入射激光产生强烈的受激布里渊后向散射, 形成相位共轭反射镜 (PCM), 它与 M_1 镜构成相位共轭腔 (PCR)。由于 PCR 比起始腔短, 所包含的光学元件数目少, 腔内的吸收损耗 δ'_d 就小于起始腔的吸收损耗 δ_a ; 同时, 由于相位共轭腔总是稳定腔^[4], 当起始腔是非稳腔时, PCR 的衍射损耗 δ_d 也会低于起始腔的衍射损耗 δ'_d , 这样一来, 相位共轭腔的总损耗 δ' 就会明显低于起始腔的总损耗, 产生调 Q 作用。根据 SBS 效应产生 Q 开关作用的这一原理, 可以通过控制 SBS 产生前后谐振腔衍射损耗差值来增强 SBS 的调 Q 效果^[5]。具体方法为通过对起始腔中元件参数的设计, 使之成为非稳腔。在图 1 所示的实验装置中, 起始腔是一个包含望远镜系统的多元件腔, 根据矩阵光学中有关等效谐振腔的计算方法^[6], 可以求出等效谐振腔的 g 参数, 从而确定腔内光学元件参数的取值。在图 1 所示结构下, 首先将 M_1 镜通过望远镜成像得到等效镜 M'_1 , 它与 M_3 镜组成的等效腔腔长为:

$$L' = [f_1 f_2 (d_1 + d_2 + l) - d_1 d_2 \Delta - l(f_2 d_1 + f_1 d_2)] / (f_1 f_2 - \Delta d_1 - l f_1) \quad (2)$$

式中, $\Delta = f_1 + f_2 - l$ 为望远镜调焦量。 M'_1 的曲率半径为:

$$\rho'_1 = f_1^2 f_2^2 / [\Delta (f_1 f_2 - d_1 \Delta - f_1 l)] \quad (3)$$

由此可得到等价腔的 g 参数为:

$$g'_1 = 1 - L' / \rho'_1 = 1 - \Delta [f_1 f_2 (d_1 + d_2 + l) - d_1 d_2 \Delta - l(f_2 d_1 + f_1 d_2)] / f_1^2 f_2^2 \quad (4)$$

$$g'_2 = 1 - L' / \rho_2 = 1 \quad (5)$$

由谐振腔稳定性判据可知, 当 $g'_1 g'_2 < 0$ 或 $g'_1 g'_2 > 1$ 时, 等效腔即为非稳腔, 由此可得到光腔内元件参数应满足的条件为:

$$d_1 d_2 \Delta^2 + l(f_2 d_1 + f_1 d_2) \Delta - f_1 f_2 (d_1 + d_2 + l) \Delta + f_1^2 f_2^2 < 0 \quad (6)$$

或

$$d_1 d_2 \Delta^2 + l(f_2 d_1 + f_1 d_2) \Delta - f_1 f_2 (d_1 + d_2 + l) \Delta > 0 \quad (7)$$

当 Q 开关发生作用后, 谐振腔成为 PCR 腔, 腔内光束每经过一次 PCM 的反射都会发生一次 SBS, 于是产生多阶 Stokes 脉冲, 这些多阶 Stokes 脉冲通过激活介质都将产生再生放大, 从而导致激光输出脉冲上叠加许多周期性的子尖峰结构, 如图 2 所示^[7], 尖峰之间的周期间隔时间正好是相邻阶 Stokes 脉冲产生的时间, 即光束经过 PCR 两端镜的一个往返时间。在图 1 所示的实验装置中, 将 M_1 镜换为 50% 反射率的输出片 (波长为 $1.06\mu\text{m}$), 在 M_1 后放上光电二极管示波器检测系统, 可以获得图 2 所示的波形图。这表明了 SBS 调 Q 与其它方式调 Q 在输出脉冲上存在一定差别。SBS 调 Q 输出的

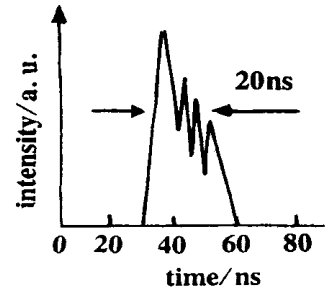


Fig. 2 Temporal shape of SBS Q-switch pulse output

带多峰结构的脉冲宽度与激光激活介质的增益带宽有关系, 当多阶 Stokes 脉冲超出增益带宽后, SBS 调 Q 过程也就随之结束^[8]。

2.2 受激喇曼散射 SRS 的产生

在图 1 的装置中, 当 SBS 调 Q 产生后, 其一阶 Stokes 脉冲经过激活介质的双程放大将重新回到高压甲烷池中, 此时脉冲的功率已大大增强, 若光强达到或超过受激喇曼散射 (SRS) 的阈值 I_{SRS} (其值约为 $10^9 \text{W}/\text{cm}^2$ 数量级), 则 SRS 也会产生; 这样, 就会出现 SRS 过程与二阶 SBS 过程相互竞争的情况, 根据受激散射光强放大公式: $I = I_0 \exp(gIL)$ (8) 当入射光强 I 及作用区域长度 L 都相同时, 光强的增长依赖于受激散射的增益系数。根据表 1 中列出

Table 1 The simulated scattering parameters of methane gas

scattering proces	shifting / cm^{-1}	gain factor / $(\text{cm} \cdot \text{GW}^{-1})$	relaxation time/ ns
SBS	0.029	65	$\tau_B = 17$
SRS	2914	1.2	$\tau_R = 0.03$

的SBS及SRS的相关参数^[9](甲烷气压为1MPa),可看出,SBS的增益系数远大于SRS的增益系数,故在稳态情况下,SBS是主导性的散射过程。但当入射激励脉冲的脉宽 τ 满足关系式 $\tau_R < \tau < \tau_B$ 时,SBS过程将变成瞬态现象,而SRS过程仍然是稳态过程,此时,SBS过程的光强放大公式变为^[10]:

$$I = I_0 \exp[2(gIL \cdot \tau / \tau_B)^{1/2} - \tau / \tau_B] \quad (9)$$

光强的增长明显依赖于比值 τ / τ_B ,当 $\tau < \tau_B$ 时,将导致增益大大降低甚至消失。此种情况下,SRS将成为主导性的散射过程。

在图1所示结构中,为了使SBS调Q产生的第一尖峰脉冲进入甲烷介质时产生SRS散射,并且成为主导性散射过程,需要尖峰脉冲的脉宽 $\tau < \tau_B$,采用的技术有两种方法:(1)延长SBS的弛豫时间 τ_B ;根据(1)式, τ_B 值的大小与介质的密度成正比,对于甲烷气体,在常温下密度与压强成正比,因此,当适当增加甲烷介质的气压,可以增大SBS的弛豫时间;(2)压窄SBS效应产生的一阶Stokes脉冲的宽度,在产生SBS的光路结构中,通过改变透镜焦距,透镜与布里渊池的距离可以方便地调节SBS脉冲的宽度在几个纳秒之间变化^[2]。通过上述两种方式,可以将 τ 控制在5ns以下,而将 τ_B 控制在20ns以上,这样就可以很好地满足条件 $\tau < \tau_B$,使得稳态SRS过程在竞争中成为主导过程。

3 实验结果及讨论

在图1的试验装置中,SRS-Cell采用了长度为180mm的喇曼池两端直接封装透镜的结构,充气气压为7MPa,当输入电压为500V时,在M₃镜后获得了3mJ/脉冲的输出能量;采用PIN管及示波器测得输出脉冲宽度为7ns;如图3所示;采用套孔法测得输出发散角为5mrad当输入电压增加为600V时,输出脉冲能量无明显变化,且仍为单脉冲;图4给出了实验中输入能量与输出的关系。当增大甲烷气压为9MPa时,输出脉冲能量3.6mJ。

从实验结果中可以看出,输出喇曼脉冲能量值比较低,为了作对比,在图1的结构中插入 $T = 19\%$ 的染料片,采用染料调Q方式,结果在M₃端获得

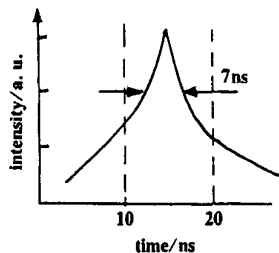


Fig. 3 Temporal profile of SRS output pulses

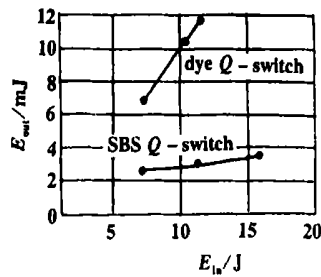


Fig. 4 Output energy as a function of the input energy at the SBS Q-switch mode and dye Q-switch mode

了12mJ的喇曼光输出,见图4。很明显,相同输入能量下,用SBS调Q方式不能有效地转换泵浦光能量,使得输出喇曼光的能量很低,电光效率不高。

从前面关于SBS调Q产生SRS输出的理论分析中可以知道,实际的喇曼输出是由SBS的Stokes脉冲转换而来的,在这一过程中,如果满足SRS的高效率散射条件,SRS仍然能高效率地产生;但是SBS的脉冲能量是受到了限制,它只能抽取泵浦的部分能量,原因在于,SBS的多次反射过程在没有完全充满YAG的增益曲线之前就已经终止,发生SRS效应,因而泵浦光不能够完全提供给SBS,从而使作为SRS泵浦光的SBS脉冲能量降低,影响最终的喇曼输出的电光效率。如果能提高SRS的阈值,使得发生SRS之前的SBS的多阶反射过程能够尽可能多地从泵浦光中抽取能量,就能够提高最终输出喇曼光的能量转换效率。

4 小 结

利用高压甲烷气体中受激布里渊散射产生的调Q作用,在喇曼频移Nd:YAG激光器的输出端获得了能量4mJ左右、脉宽在7ns左右的1.54 μ m喇曼频移输出脉冲。当选择合适的谐振腔结构以及高压甲烷的气压时,可以获得能量更高的稳定输出脉冲。该激光器在工程应用中具有比其它类型喇曼频移激光器节约调Q器件,成本更低的优点。

参 考 文 献

- [1] Pohl D. Phys Lett, 1967, A24(4): 239~ 240.
- [2] 刘 莉,吕志伟,何伟明. 中国激光, 2000, 27(1): 53~ 58.
- [3] 阿雷克 F T, 舒尔茨-杜波依斯 E O. 激光的物理应用. 北京: 科学出版社, 1979: 63.
- [4] 姚敏言, 汤剑鸣. 光学学报, 1992, 12(2): 144~ 147.
- [5] 葛传文, 张为俊, 王 沛. 中国激光, 2000, 27(11): 978~ 982.
- [6] 吕百达. 激光光学. 成都: 四川大学出版社, 1992: 234.
- [7] Chandra S, Fukuda R C. Opt Lett, 1985, 10(7): 356~ 358.
- [8] 杨径国, 姜宏伟, 杜定旭. 中国激光, 1991, 18(3): 212~ 216.
- [9] Hanna D C, Pointer D J, Pratt D J. IEEE J Q E, 1986, QE22(2): 332~ 336.
- [10] Kroll N M. J A P, 1965, 36: 34~ 36.