

文章编号: 1007-5461(2008)02-0221-05

泵浦光发散度对布里渊池重复运转特性的影响

刘安玲¹, 张为俊², 高晓明²

(1 长沙学院电子与通信工程系, 湖南 长沙 410003;

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 由于受激布里渊散射 (SBS) 介质大多为液体和气体, 当提高重复运转频率或延长泵浦脉冲的持续时间时, 其中的热积累和热弛豫将严重影响甚至破坏 SBS 的形成及其共轭品质。为改善 SBS 在高重复频率下的工作性能, 实验考察了具有 SBS 相位共轭镜的 MOPA (Master-oscillator-power-amplifier) 系统中泵浦光发散度对布里渊池重复运转特性的影响。结果表明: 降低泵浦光发散度有利于提高布里渊池的重复运转频率及改善 SBS 的时空特性, 但会增加 SBS 阈值, 减小布里渊池工作的泵浦能量范围, 同时, 保真度略有下降。

关键词: 非线性光学; 受激布里渊散射; 发散度; 重复频率

中图分类号: O437.2

文献标识码: A

Effect of divergence of pumping beam on repetition operation characteristics of Brillouin cell

LIU An-ling¹, ZHANG Wei-jun², GAO Xiao-ming²

(1 Department of Electronics and Telecommunications Engineering, Changsha College, Changsha 410003, China;

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Since most media of stimulated Brillouin scattering(SBS) are gases or liquids, the thermal collection or release within them will influence badly and destroy ulteriorly generation of SBS and its conjugation quality when the repetition rate was augmented or the duration of pumping pulse was prolonged adequately. It was experimentally investigated that effect of divergence of pumping beam on repetition operation characteristic of Brillouin cell in MOPA (Master-oscillator-power-amplifier) system with phase-conjugation mirror for improving the performance of SBS with high repetition frequency. The results show that repetition operation rate of Brillouin cell can be increased and the temporal and spatial characteristics of SBS can be improved, but the SBS threshold was increased and the pumped energy range of Brillouin cell was decreased with the divergence of pumping beam was decreased. Meanwhile, the fidelity decrease somewhat.

Key words: nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; divergence; repetition rate

1 引言

受激布里渊散射 (SBS) 相位共轭镜用于主振荡器功率放大器 (MOPA) 系统中改善光束质量、压缩脉宽已得到了充分的研究^[1~5]。然而, 由于 SBS 介质大多为液体和气体, 当提高重复运转频率或延长泵浦

基金项目: 2006 年湖南省教育厅科学研究课题 (05C062)、长沙学院科学研究课题

作者简介: 刘安玲 (1962 -), 女, 湖南省平江县人, 2004 年于中科院安徽光机所获博士学位, 副教授, 主要从事量子光学和非线性光学研究。 **E-mail:** anling919@163.com

收稿日期: 2007-08-28; **修改日期:** 2007-11-05

脉冲的持续时间时, 其中的热积累和热弛豫将严重影响甚至破坏 SBS 的形成及其共轭品质。1989 年, 前苏联科学院应用物理研究所 Bernalov^[6] 研究了毫秒区的受激热散射 (STS) 和受激布里渊散射 (SBS), 发现泵浦脉冲的持续时间越长, STS 与 SBS 的竞争越激烈; 并证明了由于小尺度的折射率不均匀, 大部分单模光被转化成了多模光。即使在飞秒区^[7], 由于重复频率的提高, 介质内的热积累也会严重影响 SBS 的共轭品质。因此, 长脉冲或高重复频率运转情况下, 热效应的影响不容忽视。本文理论分析并实验研究了纳秒区布里渊池的重复运转特性, 给出的方案可以减小热自相互作用的影响, 改善 SBS 在提高重复运转频率时的时空特性。

2 理论分析

破坏布里渊池运转的主要因素是介质中的自散焦。本质上, 这是由于焦平面前形成的热透镜造成的焦斑增宽。这种热透镜的影响即使在相对低的光吸收条件下也是很重要的。直径为 D , 衍射极限发散角 $\theta_d = 4/kD$ 的单模脉冲光的热散焦是用热散焦临界能量 W_{cr} 来表征的^[8]。

$$W_{cr} = 2\pi\rho C_p / (\partial n / \partial T)_p \alpha k^2, \quad (1)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长, α 为吸收系数, n 、 ρ 、 C_p 和 T 分别为介质的折射率、密度、定压比热和温度。 W_{cr} 的意义在于: 当单脉冲能量低于 W_{cr} 时, 热散焦是可以忽略的, 布里渊池正常工作。然而, 在高重复频率运转时, 即使很低的脉冲能量在 SBS 介质的热扩散时间 (特征时间 τ_d) 内的热积累也会产生热散焦。换句话说, 一般条件下, 只有在 τ_d 内通过焦斑的多脉冲总能量不超过 W_{cr} 时, 热自相互作用才是可以忽略的。

这对于非线性介质是一个非常严格的要求。我们首先来估算脉冲持续时间 (τ_{cr} 大于它, 则即使在 SBS 阈值, 也可能出现热透镜效应), 将 SBS 阈值能量等于临界能量^[7], 得到

$$\tau_{cr} = W_{cr} / P_{th}, \quad (2)$$

即 τ_{cr} 正比于 α^{-1} , 典型条件下, 液体在 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 和单模光的实验中, 由上式得

$$\tau_{cr}[\text{ns}] = 0.1 / (c \cdot \alpha[\text{cm}^{-1}]), \quad (3)$$

(方括号内为其前面物理量的量纲) 其中 c 为真空中的光速。很明显, 当具有阈值能量 P_{th} 的几个脉冲的总持续时间超过 τ_{cr} , 来不及热扩散的自散焦是与重复频率有关的。高重复频率运转时, 决定热自散焦是否产生的时间参数不是 τ_{cr} , 而是 $\tau_{cr}/f\tau_0$, 其中, f 是脉冲重复频率, τ_0 是单个脉冲的持续时间。要想热扩散能补偿横截面积为 S 的焦斑处温度的持续上升, 必须满足下列条件

$$\tau_{cr}/f\tau_0 > \tau_d, \quad (4)$$

其中 $\tau_d = S/\chi$ 是热扩散的特征时间, χ 是热扩散系数, 当 $S = 10^{-5} \sim 10^{-1} \text{cm}^2$ 、 $\chi = 10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$, τ_d 的值是 $0.01 \sim 0.1 \text{s}$, 将此值代入 (4) 式, 用 (3) 式得到

$$\alpha[\text{cm}^{-1}] \leq \frac{10^{-9} \sim 10^{-8}}{c \cdot f\tau_0}. \quad (5)$$

另一方面, 要达到百分之几十的 SBS 反射率, P 必须超过阈值 $5 \sim 10$ 倍, 这样, 通过焦斑的能量将是 P_{th} 的 $3 \sim 4$ 倍, 单模光的 SBS 高反射率只有在介质的吸收系数不超过 10^{-5}cm^{-1} 时才可能达到。

一般来说, 对小吸收系数的要求是必要的, 但并不总是足够的。事实上, 当聚焦光脉冲陡然上升的前沿到来时, 由于 SBS 在有限时间内的局域性或波动的非稳态, SBS 过程可能并未减少通过焦斑的能量, 结

果, 在某些介质 (更倾向于含吸收杂质微粒的介质) 中高能脉冲会导致光学击穿或者自聚焦引起多光子或雪崩电离。这是我们实验中必须尽量避免的。

3 实验装置

本文所采用实验装置如图 1 所示。Nd:YAG 调 Q 激光振荡器输出单脉冲激光脉宽 23 ns, 线宽 1.51 GHz, CCD 采集的远场光斑如图 2 所示。液体池长 200 mm, 充以纯丙酮液体 ($\alpha=0.0119 \text{ cm}^{-1}$)。激光脉冲经格兰棱镜、放大器后, 由 5 mm 直径光阑控制其空间品质, 此时的光束发散角为 1.354 mrad, 经 $f=100 \text{ mm}$ 透镜聚焦后进入丙酮池 (束腰直径 d 为 0.104 mm, 光束发散角 θ 为 13.08 mrad)。加入 4 倍扩束镜后 (放大倍率 $M=4$), 放大因子 $\alpha=M/\sqrt{2}=2\sqrt{2}$, 此时的束腰直径变为 $d'=\alpha d=2.83 \text{ mm}$, 光束发散角变为 $\theta'=\theta/\alpha=0.49 \text{ mrad}$, 再经同样的透镜聚焦后进入丙酮池 (束腰直径约为 0.05 mm, 光束发散角约为 28.91 mrad)。

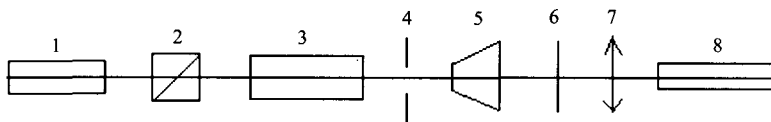


Fig.1 Experimental setup. 1 Nd:YAG oscillator, 2. Glan prism, 3. Nd:YAG amplifier, 4. aperture, 5. 4 times telescope, 6. 1/4 wave plate, 7. $f=1000 \text{ mm}$ lens, 8. liquid cell



Fig.2 Far-field spot of oscillator output

实验中我们比较了无扩束镜 (泵浦光发散角较大) 和有扩束镜 (泵浦光发散角较小) 两种情况下系统以不同重复频率运转时, 采用烧蚀法得到的从格兰棱镜输出的近、远场光斑, 用示波器采集了输出波形, 并记录了布里渊池在相同泵浦条件下的产生阈值、击穿阈值及 MOPA 系统输出能量与泵浦能量 (实际入射到布里渊池中的能量) 的关系。

4 结果和讨论

我们首先考察了无扩束镜时 MOPA 系统在 1 Hz、5 Hz、10 Hz、15 Hz 重复频率下的运转情况, 并控制泵浦能量使布里渊池中不出现光学击穿。结果如图 3、图 5、图 6(左) 所示。图 3 左边从下至上分别是重复频率为 1 Hz、5 Hz、10 Hz 时 MOPA 系统输出的近场光斑, 右边是在 2 m 焦距透镜的焦平面上采集的相应的远场光斑。很明显 1 Hz 时布里渊池运转良好, 5 Hz 时稍差, 10 Hz 时已出现明显的自散焦, 而 15 Hz 时已无后向散射光可放大。

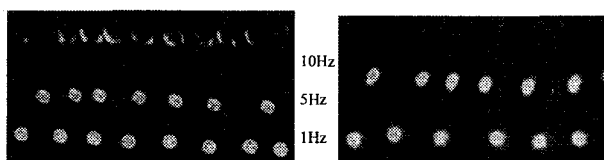


Fig.3 Output near (left) and far (right) field spatial profiles of MOPA system without telescope operating at different repetition rate

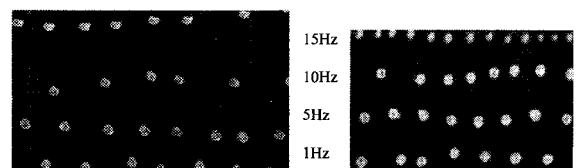


Fig.4 Output near (left) and far (right) field spatial profiles of MOPA system with 4 times telescope operating at different repetition rate

图 4 左边从下至上分别是重复频率为 1 Hz、5 Hz、10 Hz、15 Hz 时有扩束镜的 MOPA 系统输出的近场光斑, 右边是在 2 m 焦距透镜的焦平面上采集的相应的远场光斑。比较图 3 和图 4 可见: 1 Hz 运转时, 无扩束镜系统的 SBS 光斑 (图 3 下) 比有扩束镜 (图 4 下) 的要好, 这是因为无扩束镜时泵浦光在池中的焦斑较大, 同时图 2 右上角的较弱斑点亦得到放大, 因此焦斑处的光场强度极不均匀, 导致增益也不

均匀,使得通过这一区域的共轭模增益远大于其它模,因此SBS中的共轭成份较多。毫无疑问,此时的位相共轭保真度是较高的。但随着重复运转频率的提高,介质中来不及扩散的热积累下来,影响并最终破坏了SBS的形成,如图3中10 Hz所示光斑。值得注意的是:增加扩束镜后泵浦光发散角较小时,SBS的重复运转性能明显好转。10 Hz仍工作良好,15 Hz(图4上)的工作状态亦远远超过无扩束镜时10 Hz(图3上)的工作能力。不难看出,在相同的聚焦条件下,泵浦光发散角小的焦斑横截面积小,因而 τ_d 小,对于相同的材料参数和激光器条件,(4)式更易满足,亦即热积累更少;因此,减小泵浦光的发散角,可缩短热扩散的特征时间,减少介质中的热积累,达到提高布里渊池重复运转频率的目的。

图5(a)和(b)分别给出了无扩束镜和有扩束镜时MOPA系统双程输出能量与泵浦能量的关系。从图中可见,有扩束镜时(如图(b)),SBS的启动阈值较高、击穿阈值较低、增益也较低。我们认为这是因为,发散度较小的泵浦光在池中的焦斑也较小,同时由于扩束镜的加入而滤掉了基模边缘的杂散光,使得焦斑处的光场强度和增益非常均匀,因为缺乏模式竞争而导致了较高的SBS阈值及其偏低的保真度;同时,焦斑处的功率密度增高,使得光学击穿或电离比大发散角时来得早,因此在较低能量泵浦时亦会出现光学击穿;SBS增益较低同样是因为缺乏模式竞争,只有在模式竞争中共轭模才能获得最大增益(从而有较高的保真度),从泵浦光中抽运最多的能量。这也是图4中所看到的光斑不如图3中1 Hz运转的光斑保真度高的原因,因为此时SBS中的共轭分量相对较少。

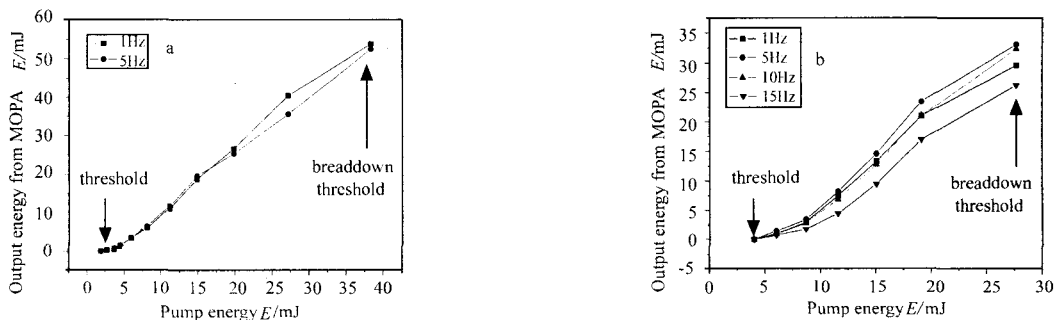
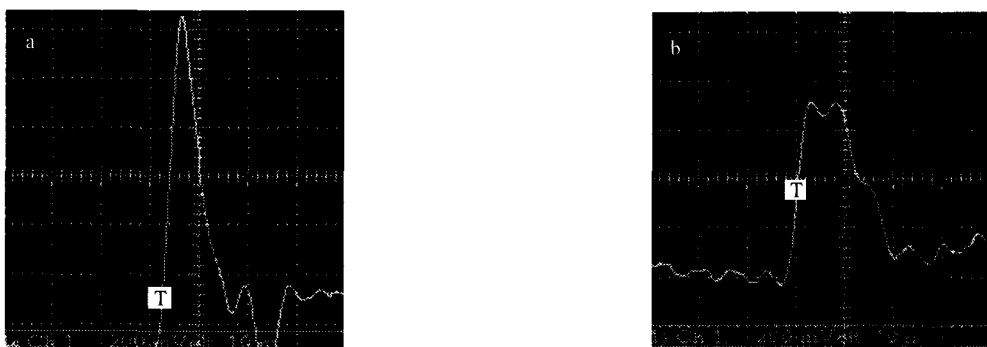


Fig.5 Output energy of MOPA system (a) without extender lens and (b) with extender lens versus pump energy

图6所示为无扩束镜时MOPA系统输出的波形。其中(a)为放大器泵浦电压取100 V时系统输出的波形,其启动阈值之低由此可见一斑。然而,也正因为它的启动阈值低,SBS开始得较早,其脉宽压缩较少;当增加泵浦能量时极易出现高阶SBS,加之提高重复频率后热积累导致的热散焦的影响,使得输出脉冲波形频繁出现多峰调制现象(如图6(b)所示);其脉宽在9~13 ns之间变化。



(a) weaker pump at 1 Hz

(b) stronger pump at 1 Hz~10 Hz

Fig.6 Temporal shapes of pulses from MOPA system without extender lens

与有扩束镜时的MOPA系统输出波形相比较(见图7(a)),有扩束镜时由于泵浦光的发散角较小,因而焦斑较小,同时由于扩束镜的加入而滤掉了基模边缘的杂散光,使得焦斑处的光场强度和增益非常均匀,

缺乏对流增宽和模式竞争, SBS 阈值较高, 启动较晚, 其脉冲前沿明显变陡, 脉宽压缩较多, 在 6~10 ns 之间; 且随着泵浦能量和重复频率的升高, 波形无明显变化, 始终为单峰。只是在 15 Hz 运转高能泵浦出现光学击穿时, 其输出波形才出现类似于图 6(b) 的多峰调制 (如图 7(b) 所示), 同样, 其脉宽也在 13 ns 左右。

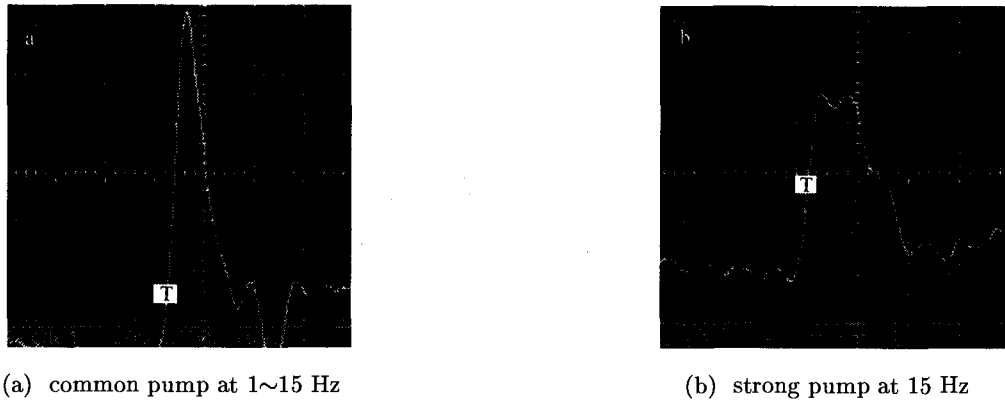


Fig.7 Temporal shapes of pulses from MOPA system with extender lens

5 小 结

我们的实验结果显示: 通过减小泵浦光束的发散度, 可以缩短介质热扩散的特征时间, 减少介质中的热积累, 有效提高布里渊池的重复运转频率, 改善高重复频率运转时 SBS 输出的时空特性; 但同时会增加 SBS 阈值, 减小布里渊池的动态工作范围。这对合理配置 SBS 在高重复频率下的工作条件有一定的参考价值和指导意义。

参考文献:

- [1] Chen Jun, Bao Chengfang, Qiu Wenfa, *et al.* Master-oscillator- power-amplifier (MOPA) laser system with optical fiber phase-conjugator [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2000, 27(6): 500-504 (in Chinese).
- [2] Yu Xin, Ju Youlun, Wang Yuezhu, *et al.* Experimental investigation for improving the solid state laser beam quality with SBS [J]. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 2001, 28(8): 685-688 (in Chinese).
- [3] Su Hong, Zhang Weijun, *et al.* Theoretical analysis of OPG and OPA based on SBS [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2002, 19(1): 35-37 (in Chinese).
- [4] Zhang Yi, Lu Zhiwei, He Weiming. The influence of pulse-width on SBS phase conjugation fidelity [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2007, 24(3): 369-373 (in Chinese).
- [5] Liu Anling, Zhang Weijun, Gao Xiaoming, *et. al.* Operating characteristic of instantaneous SBS fiber phase conjugation mirror at lower repetition rate [J]. *Chinese Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2004, 15(7): 766-770 (in Chinese).
- [6] Bepalov V I, Bubis E L, Kulagin O V, *et al.* Stimulated Brillouin scattering and stimulated thermal scattering of microsecond pulses [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1986, 16(10): 1348-1352.
- [7] Falconieri M, Salvetti G. Simultaneous measurement of pure-optical and thermo-optical nonlinearities induced by high-repetition-rate, femtosecond laser pulses: application to CS₂ [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, 69: 133-136.
- [8] Andreev N F, Khazanov Efim, Pasmanik German A. Applications of Brillouin cell to high repetition rate solid-state lasers [J]. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1992, 28 (1): 330-341.