

# 水中受激拉曼散射的能量增强及受激布里渊散射的光学抑制\*

史久林<sup>1)2)†</sup> 许锦<sup>1)</sup> 罗宁宁<sup>1)</sup> 王庆<sup>1)</sup> 张余宝<sup>1)</sup>  
张巍巍<sup>1)</sup> 何兴道<sup>2)‡</sup>

1) (南昌航空大学, 江西省光电检测技术工程实验室, 南昌 330063)

2) (南昌航空大学, 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

(2018年8月17日收到; 2018年12月24日收到修改稿)

为提高液体介质中受激拉曼散射的输出能量, 提出了通过温度调控来抑制受激布里渊散射的方法, 设计了 532 nm 多纵模宽带脉冲激光泵浦的受激拉曼散射发生系统, 测量了不同温度下水中前向受激拉曼散射及后向受激布里渊散射的输出能量, 分析了水温、泵浦激光线宽及热散焦效应对受激拉曼散射输出能量影响的物理机制. 实验结果表明: 通过降低水温可实现对受激布里渊散射过程的有效抑制, 同时减小热散焦效应带来的光束畸变, 从而有效提高受激拉曼散射的输出能量. 研究结果对液体介质中的受激拉曼散射多波长转换具有重要意义.

**关键词:** 受激拉曼散射, 受激布里渊散射, 能量放大, 热散焦

**PACS:** 42.65.Dr, 42.65.Es, 42.65.Ky

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181548

## 1 引言

液体介质中的受激散射过程在非线性光学领域一直是研究的热点. 其中, 受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 是非常重要的三阶非线性散射过程, 也是典型的由激光与介质相互作用产生的非弹性散射过程<sup>[1,2]</sup>. 由于其在光谱分析、光传感、激光雷达等领域有着非常重要的应用, 因此, 过去几十年在理论和实验方面都有着广泛的研究<sup>[3-8]</sup>.

SRS 是 1962 年 Woodbury 和 Ng<sup>[9]</sup> 在研究红宝石调 Q 激光器中首次发现. 其典型应用是通过

高阶非线性光学过程在增益介质中产生多波长激光, 例如, 在无机盐水溶液中, 利用 SRS 可获得可见光范围内的多波长激光输出<sup>[10]</sup>. 通过这种方法可获得用于生物医学、可见光通信、光学全息成像等不同应用领域的激光光源. 相对于固体和气体增益介质, 在液体介质中可获得更高的 SRS 能量转化效率<sup>[11,12]</sup>. 在液体介质中, 提高 SRS 的能量转化效率需要高能量泵浦光作为激发光源, 例如, 可采用短脉冲的纳秒激光通过聚焦的方式来获得较高的峰值功率密度, 以保证 SRS 的高能量输出. 但高能量的泵浦激光会产生受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS)、热散焦、

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41776111, 41666004, 61865013, 41576033, 61665008)、江西省自然科学基金 (批准号: 20171BAB202039, 20161BBH80036)、江西省杰出青年基金 (批准号: 20171BCB23053) 和航空基金 (批准号: 2016ZD56007, 2016ZD56006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [jiulinshi@126.com](mailto:jiulinshi@126.com)

‡ 通信作者. E-mail: [xingdaohe@126.com](mailto:xingdaohe@126.com)

光学击穿等其他非线性过程,而这些过程在某种程度上会抑制 SRS 的有效产生,降低其能量转化效率.尤其是 SBS,其与 SRS 是一个相互竞争的过程,这种竞争过程会消耗部分泵浦光能量,而且在高增益介质中,SBS 过程占主导优势,其会大大抑制 SRS 的产生<sup>[13-16]</sup>.而液体介质中的 SBS 阈值、增益系数、声子寿命等依赖于介质温度的变化<sup>[17,18]</sup>,因此,通过改变介质的温度可在某种程度上抑制 SBS 的产生过程,这将有利于介质中 SRS 的有效产生.

基于上述思考,本文采用波长为 532 nm 的固体调 Q 脉冲激光器作为泵浦源,通过实验测量水中的前向 SRS,并分析水体温度对其能量转换效率的影响.实验证明了通过改变水体温度可实现对水中 SBS 的抑制,从而有效提高 SRS 的能量输出.实验结果对研究液体介质中的 SRS 多波长转换具有重要意义.

## 2 实验装置

实验测量原理图如图 1 所示.实验所用泵浦源为调 Q 式脉冲 Nd:YAG 激光器 (continuum power-lite precision plus),脉宽为 8 ns,重复率为 10 Hz,多纵模输出线宽为 30 GHz.激光器输出 1064 nm 的基频光,经二倍频晶体 (SHG) 后输出波长为 532 nm 倍频光,并依次经过全反镜 (M1、M2)、偏振分光镜 (PBS)、四分之一波片 (QW) 后,由透镜组 (L) 聚焦到温度可控的圆形水池中,激发前向受激拉曼散射 (forward stimulated Raman scattering, FSRS) 及后向受激布里渊散射 (backward stimulated Brillouin scattering, BSBS).水池长度为 1.2 m,光束聚焦长度为 1.0 m.前向剩余泵浦光及 FSRS 光经透镜准直及二向色镜 (DM) 分光后分别由功率计 D3、D4 接收.入射泵浦光及 BSBS 光分别由功率计 D1、D2 接收.实验所用介质是衰减系数为 0.06/m 的去离子水,水温由温度控制器 (temperature controller, TC) 精确控制,其温控精度为 0.02 °C.水槽用厚度为 5 mm 的隔热材料包裹,以保持实验过程中内部水温的恒定,水槽两端安装有机光学玻璃窗口,尽可能减小光传输过程中的损耗.实验过程中,采用热吹风机来消除低温情况下玻璃窗口两端的冷凝水.

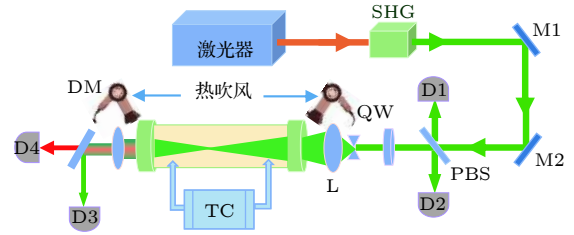


图 1 实验测量原理图

Fig. 1. Principle diagram of experimental measurement.

## 3 实验结果与分析

泵浦光脉冲时域轮廓如图 2(a) 所示,脉宽约为 8 ns.图 2(b) 所示为 532 nm 激光脉冲泵浦下水的归一化 SRS 光谱,水的温度为 23 °C,泵浦能量为 100 mJ,光谱由分辨率为 0.4 nm 的光纤光谱仪 (AvaSpec-ULS2048, Avantes) 在水槽出光口采集获得.可以看出,在泵浦光波长两侧分布着发生“红移” (~649 nm) 和“蓝移” (~436 nm) 的 SRS 特征峰,分别对应纯水中 SRS 的斯托克斯和反斯托克斯分量.其中,斯托克斯频移是由水分子对称分

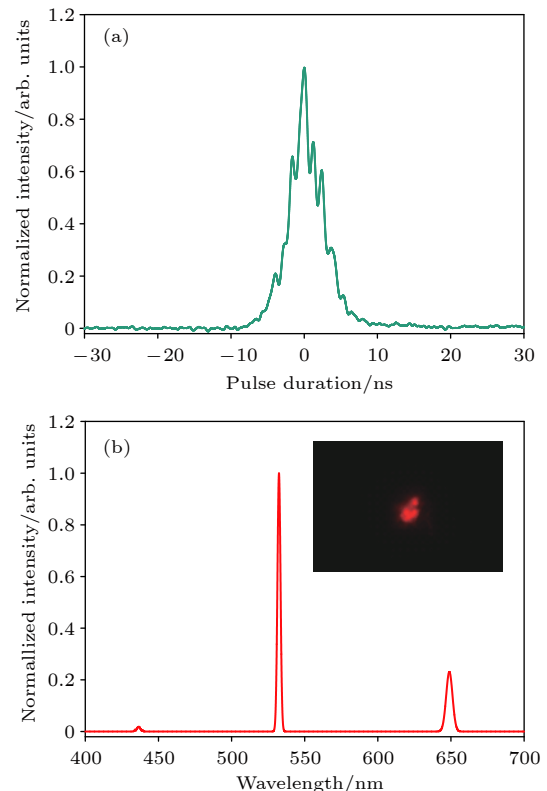


图 2 (a) 泵浦光时域轮廓; (b) 水的受激拉曼散射归一化光谱图,泵浦能量为 100 mJ/Pulse

Fig. 2. (a) Temporal profile of pump laser; (b) normalized SRS spectrum of distilled water at pump energy of 100 mJ/Pulse.

布的 O—H 键拉伸振动引起, 其强度远远大于反斯托克斯. 图中插图为单反相机拍摄记录的经二向色镜分光后的 SRS 光斑, 可明显看出发生“红移”的斯托克斯信号.

图 3 所示为不同温度下 FSRS 输出能量随入射泵浦光能量的变化关系. 从图 3 可以看出, 在相同温度下, SRS 能量随入射光能量增加而增加, 且在低温时趋于线性变化; 而在相同泵浦能量不同温度条件下, 温度越高, SRS 能量越低, 在水温为 5 °C 时, 最大输出能量为 26.2 mJ, 水温 35 °C 时的最大输出能量为 8.5 mJ.

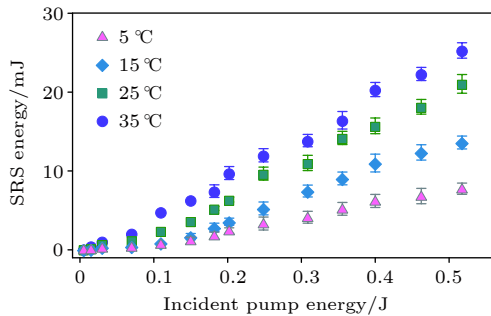


图 3 不同温度下 SRS 输出能量随入射泵浦光能量变化  
Fig. 3. Output energy of SRS versus the incident pump energy at different temperatures.

为了分析及解释 SRS 能量随温度变化关系, 实验同步测量了不同温度下 BSBS 输出能量变化. 图 4 为同一实验条件下, BSBS 输出能量随入射泵浦能量的变化关系. 从图 4 中可看出, 在相同温度下, SBS 能量随泵浦能量增加而增加, 当入射能量超过一定值时, 增加斜率减小. 在相同泵浦能量下, 温度越高, SBS 输出能量越高, 在水温为 35 °C 时最大输出能量为 16 mJ, 在水温为 5 °C 时, SBS 输出能量小于 1 mJ.

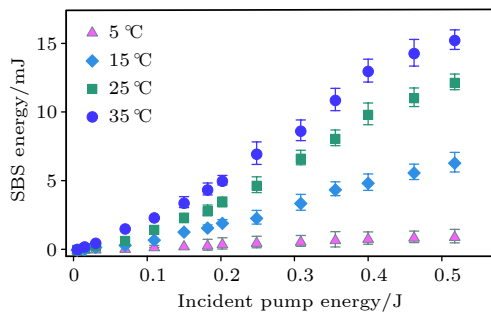


图 4 不同温度下 SBS 输出能量随入射泵浦光能量变化  
Fig. 4. Output energy of SBS versus the incident pump energy at different temperatures.

对比图 3 和图 4 可知, 在相同泵浦能量下, SBS 能量随温度增加而增加, 但 SRS 能量随温度增加而减小. 在低温条件下, SRS 输出能量远大于 SBS 输出能量, 表示 SRS 过程在低温条件下占据主导优势; 在水温为 25 °C 时, SRS 最大输出能量为 13.5 mJ, SBS 最大输出能量为 12.7 mJ, 二者近似相等; 但在 35 °C 时, SBS 最大输出能量大于 SRS. 这种能量变化与单纵模窄带激光泵浦水中 SBS 与 SRS 之间的关系完全不同, 在单纵模窄线宽情况下, 水中 SBS 输出能量远大于 SRS 能量, 甚至超过 2 个数量级, 占据绝对优势<sup>[19–21]</sup>. 针对上述实验观察, 认为导致 SRS 及 SBS 能量变化的主要原因有两点: 一是入射泵浦光条件的不同导致水中 SBS 增益系数的变化; 二是水的体粘滞系数随温度变化而变化, 而 SBS 的两个重要参数声子寿命和增益系数依赖于水的粘滞系数.

对于介质中的受激布里渊散射, 其增益系数  $g_B$  可表示为<sup>[1,22]</sup>:

$$g_B = \frac{\gamma_e^2 \omega_s^2}{n v_a c^3 \rho_0 (\Gamma_B + \Gamma_P)}, \quad (1)$$

其中,  $\gamma_e$  为介质的电致伸缩系数;  $\omega_s$  是斯托克斯频率;  $n$  是介质折射率;  $v_a$  是介质中的声速;  $c$  是真空中光速;  $\rho_0$  为介质密度;  $\Gamma_P$  是泵浦光线宽;  $\Gamma_B$  为自发布里渊散射线宽. 依据文献<sup>[23]</sup>, 介质中的声子寿命  $\tau_B$  可表示为:

$$\tau_B = \frac{1}{\Gamma_B} = \frac{\rho_0 c^2}{\eta \omega_s^2 n^2}, \quad (2)$$

式中  $\eta$  为介质的粘滞系数. 由 (1)、(2) 式可知, 对于给定的散射介质, 其布里渊散射增益取决于泵浦激光线宽及水的粘滞系数. 因此, 泵浦激光线宽越窄增益越高, 线宽越宽增益越低, 这也是本文选择多纵模宽带激光作为泵浦源的主要原因, 其可以有效地抑制 BSBS 过程. 此外, 当温度高时, 水的粘滞系数减小, 声子寿命增加, 介质的布里渊增益系数会增大; 而当温度低时, 水的粘滞系数大, 声子寿命较短, 布里渊增益系数减小.

而对于介质中的 SRS, 其增益系数  $g_R$  可表示为<sup>[23]</sup>:

$$g_R = \frac{8\pi c N}{\hbar \omega_R^2 n^2 \Gamma_R} \frac{d\sigma}{d\Omega}, \quad (3)$$

式中,  $N$  为单位体积内的分子数;  $\hbar$  是普朗克常量;  $\omega_R$  是拉曼斯托克斯频率;  $\Gamma_R$  是自发布拉曼散射线宽;

$d\sigma/d\Omega$ 项为拉曼散射截面. 在宽带激光泵浦条件下, 水中拉曼增益系数  $g_R$  通常小于布里渊增益  $g_B$  (例如室温条件下水的拉曼增益  $g_R = 0.14 \text{ cm/GW}$ , 而布里渊增益  $g_B = 0.24 \text{ cm/GW}$ )<sup>[10,17,23]</sup>. 另一方面, 产生 SRS 的光学支声子寿命在  $\sim 10^{-12}$  秒量级 (对应于  $\sim 10^3$  GHz 频率), 远小于产生 SRS 的声学支声子寿命 ( $\sim 10^{-9}$  秒量级, 对应于 GHz 频率)<sup>[22]</sup>, 用于抑制 SRS 增益的宽带泵浦激光相对于 SRS 来说则属于窄带激光, 在有限的带宽范围内可以忽略泵浦带宽对拉曼增益系数的影响. 因此, 多纵模宽带激光泵浦下, SRS 输出能量甚至超过 SRS 能量, 这种现象在低温下更为明显, 这主要得益于泵浦激光线宽与介质温度对 SRS 双重抑制的结果.

实验过程还发现另外一种影响 SRS 能量输出的因素, 那就是液体介质中的热散焦效应. 对于液体介质来说, 其作为拉曼散射介质的一个重要缺点是低热传导率和高折射率—温度系数 ( $dn/dT$ ). 这种低热传导率和高折射率—温度系数特性会导致激光在介质中传输时发生光学热畸变效应, 影响光束传输质量. 当高斯光束入射到液体介质中, 折射率依赖于入射光强度<sup>[24,25]</sup>:

$$n = n_0 + n_1 I, \quad (4)$$

式中,  $n_0$  是初始折射率;  $n_1$  是非线性折射率系数;  $I$  为入射光强. 对于水中的 SRS 过程, 每一个斯托克斯频移会伴随相应的能量损耗, 而损耗的能量会被散射介质吸收, 导致水的折射率随温度的增加而减小, 即非线性折射率项  $n_1 < 0$ , 此时, (4) 式的一阶近似可表示为:

$$n = n_0 + \frac{dn}{dT} T, \quad \frac{dn}{dT} < 0. \quad (5)$$

因此, 随着温度的增加折射率减小, 会产生介质的热散焦效应. 依据文献 [26] 报道, 当介质温度降到  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 可以近似认为  $dn/dT = 0$ , 即可以不考虑温度对折射率的影响. 这就说明可以通过降低介质的温度来减小热散焦效应对水中 SRS 过程的影响, 从而提高 SRS 的输出能量.

图 5 显示的是 CCD 相机测量的不同温度下出光口剩余泵浦光束强度远场分布轮廓. 入射泵浦光能量为  $50 \text{ mJ}$ , 出光口剩余泵浦光经过衰减器 ( $40 \text{ dB}$ ) 及聚焦透镜 ( $f = 150 \text{ cm}$ ) 后入射到 CCD 阵列, CCD 的象元尺寸为  $6.5 \text{ }\mu\text{m}$ . 图 5(a) 显示的水温  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  时剩余泵浦光的强度分布轮廓, 其横截面

高斯拟合相似度在  $X, Y$  方向分别为  $77.1\%$  和  $80.2\%$ , 近似于高斯光束. 图 5(b) 显示的是水温为  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  时的强度分布轮廓, 能很明显地看出光束出现强度分布畸变. 从 SRS 的光斑分布上也可以看出热散焦效应带来的光束畸变不利于 SRS 的有效产生, 如图 6 所示. 图中显示的是入射光泵浦能量为  $150 \text{ mJ}$  时, 用单反相机记录的经过二向色镜分光后的 SRS 输出光斑分布, 从图 6 中可以看出, 在  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  时 SRS 的光斑能量更集中, 而在  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  时光斑出现扩散现象, 并且强度明显减弱, 这也印证了我们的分析结果.

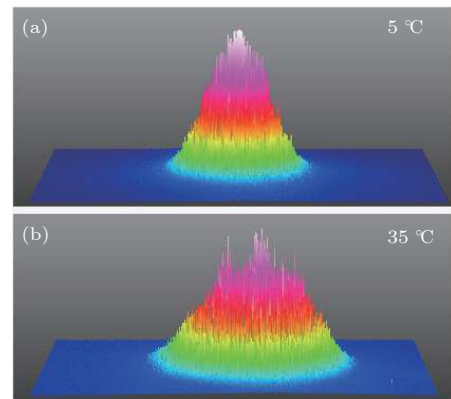


图 5 入射泵浦能量为  $50 \text{ mJ}$  时, 不同温度下水池出光口剩余泵浦光强度的远场分布轮廓 (a)  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $35 \text{ }^\circ\text{C}$   
Fig. 5. Far-field profiles of intensity distribution of residual pump beam at the exit of the cell window at different temperatures, when the incident pump energy is  $50 \text{ mJ/Pulse}$ : (a)  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

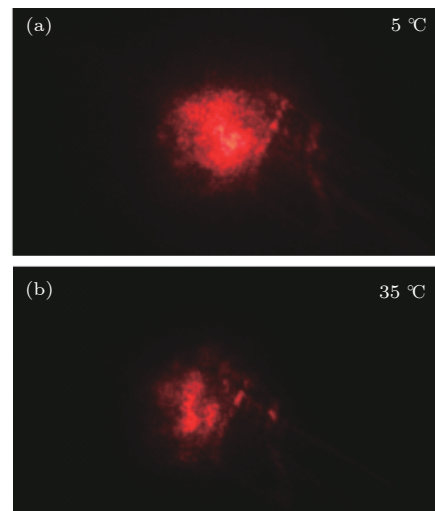


图 6 入射泵浦能量为  $150 \text{ mJ}$  时, 不同温度下的 SRS 输出光斑分布 (a)  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $35 \text{ }^\circ\text{C}$   
Fig. 6. Facula profiles of SRS at different temperatures when the incident pump energy is  $150 \text{ mJ/Pulse}$ : (a)  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (b)  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

需要说明的是, 本实验条件不满足后向 SRS 产生的增益条件, 而且其能量极其微弱, 因此实验过程中不考虑后向 SRS 的变化. 此外, 实验采用的是衰减系数为 0.06/m 的去离子水, 通过控制入射泵浦光能量及水温, 可有效降低自聚焦、光学击穿等其他非线性效应的影响. 当水温超过 40 °C 时, 水中开始出现明显的气泡, 会造成入射泵浦光在传输过程中的能量衰减, 影响 SRS 和 SBS 的产生, 因此, 实验没有对 40 °C 以上温度进行分析.

## 4 结 论

本文分析了水中前向 SRS 的温度依赖特性, 通过采用多纵模宽带激光作为泵浦源, 实验测量了不同温度下水的 FSRS 及 BSBS 输出能量, 并从理论上分析了 SRS 输出能量随温度变化的原因. 通过测量 SRS 及 SBS 在不同温度下的输出能量, 对比分析了泵浦带宽及水的粘滞系数对 SBS 的抑制过程, 同时分析了热散焦效应对 SRS 的影响. 但本文没有考虑后向 SRS、自聚焦和光学击穿等其他非线性效应的影响, 只从温度变化的角度验证了通过降低温度来提高 FSRS 输出能量的有效性. 研究结果对提高 SRS 在液体介质中产生多波长激光输出效率具有一定的指导意义.

## 参考文献

- [1] Boyd R W 2008 *Nonlinear Optics* (Third Edition) (Burlington: Academic Press) pp 429-471
- [2] Penzkofer A, Laubereau A, Kaiser W 1979 *Prog. Quant. Electron.* **6** 55
- [3] Pasiskevicius V, Fragemann A, Laurell F, Butkus R, Smilgevičius V, Piskarskas A 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 325
- [4] Kalosha V P, Herrmann J 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1226
- [5] Findeisen J, Eichler H J, Kaminskii A A 1998 *Nonlinear Optics 98: Materials, Fundamentals and Applications Topical Meeting* (Cat. No. 98CH36244), USA, August 10-14, 1998 p381
- [6] Huang Y T, Peng L X, Zhuang S J, Li Q L, Liao T D, Xu C H, Duan Y F 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 244208 (in Chinese) [黄衍堂, 彭隆祥, 庄世坚, 李强龙, 廖廷佛, 许灿华, 段亚凡 2017 *物理学报* **66** 244208]
- [7] Vasa N J, Hatada A, Nakazono S, Oki Y, Maeda M 2002 *Appl. Opt.* **41** 2328
- [8] Chen W, Chen X G, Shi J L, He X D, Mo X F, Liu J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104213 (in Chinese) [陈蔚, 陈学岗, 史久林, 何兴道, 莫小凤, 刘娟 2013 *物理学报* **62** 104213]
- [9] Woodbury E J, Ng W K 1962 *Proc. Inst. Rad. Eng.* **50** 2367
- [10] Ganot Y, Bar I 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 131108
- [11] Ganot Y, Shrenkel S, Barmashenko B D, Bar I 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 061107
- [12] Helle M H, Jones T G, Penano J R, Kaganovich D, Ting A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 121101
- [13] Shi J, Chen W, Mo X, Liu J, He X, Yang K 2012 *Opt. Lett.* **37** 2988
- [14] Walsh C J, Villeneuve D M, Baldis H A 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1445
- [15] Snow J B, Qian S X, Chang R K 1985 *Opt. Lett.* **10** 37
- [16] Yehud L B, Belker D, Ravnitzki G, Ishaaya A A 2014 *Opt. Lett.* **39** 1026
- [17] Shi J, Tang Y, Wei H, Zhang L, Zhang D, Shi J, Gong W, He X, Yang K, Liu D 2012 *Appl. Phys. B* **108** 717
- [18] He X, Tang Y, Shi J, Liu J, Cheng W, Mo X 2012 *J. Mod. Opt.* **59** 1410
- [19] Shi J, Ouyang M, Chen X, Liu B, Xu Y, Jing H, Liu D 2009 *Opt. Lett.* **34** 977
- [20] Liu D, Shi J, Ouyang M, Chen X, Liu J, He X 2009 *Phys. Rev. A* **80** 033808
- [21] Shi J L, Liu J, Li S J, Jian X, Jian L, Wei F, Ke Y, He X D 2011 *J. Opt.* **13** 075201
- [22] Damzen M J, Vlad V I, Babin V, Mocofanescu A 2003 *Stimulated Brillouin Scattering: Fundamentals and Applications* (Bristol: Institute of Physics Pub.) pp 39-50
- [23] Colles M J 1969 *Opt. Commun.* **1** 169
- [24] Richerzhagen B, Delacretaz G, Salathe R P 1996 *Opt. Eng.* **35** 2058
- [25] Abbate G, Bernini U, Ragozzino E, Somma F 1978 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **11** 1167

# Enhanced stimulated Raman scattering by suppressing stimulated Brillouin scattering in liquid water\*

Shi Jiu-Lin<sup>1)2)†</sup> Xu Jin<sup>1)</sup> Luo Ning-Ning<sup>1)</sup> Wang Qing<sup>1)</sup> Zhang Yu-Bao<sup>1)</sup>  
Zhang Wei-Wei<sup>1)</sup> He Xing-Dao<sup>2)‡</sup>

1) (*Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*)

2) (*Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*)

( Received 17 August 2018; revised manuscript received 24 December 2018 )

## Abstract

Stimulated Brillouin scattering (SBS) and stimulated Raman scattering (SRS) are two kinds of emblematic inelastic scattering processes resulting from the interaction of high-intensity laser with matter. Generally, competition between SBS and SRS is a common phenomenon in many substances. In liquid or high-pressure gas, if a single longitudinal mode laser is used as a pump source, both SBS and SRS can be excited, but the SBS will become very strong due to higher gain and optical phase conjugation. In comparison, the SRS gain is typically 2 orders of magnitude smaller than the SBS gain so that most of the pump laser energy is spent on the SBS and the SRS is greatly suppressed. To improve the output energy of SRS in liquid medium, a method of suppressing the SBS process by controlling temperature of medium is proposed. The SRS generation system using broadband pulse laser of 532 nm in wavelength as a pumping source is designed, the output energy of forward SRS (FSRS) and backward SBS (BSBS) in water with different temperatures are measured, and the physical mechanisms of the influences of water temperature, pumping linewidth and thermal defocusing on the output energy of SRS are analyzed. The experimental results indicate that by reducing the water temperature, the SBS process can be significantly suppressed, and the beam distortion caused by thermal defocusing effect can be reduced, thus effectively improving the output energy of SRS. Unlike the single longitudinal mode laser, when the pump source is handled in multiple longitudinal modes with a wide linewidth, the gain of FSRS is higher than that of the backward SRS (BSRS). Meanwhile, since the SBS gain coefficient is restricted by the linewidth of the pump laser, the FSRS process is dominant and both backward SBS and BSRS are significantly suppressed. It is necessary to state that none of the influence of backward SRS, self-focusing, optical breakdown and other non-linear effects on the output energy of SRS is considered in this paper, and only the effectiveness of reducing temperature to improve the energy output of forward SRS is verified from the perspective of temperature change. The results are of great significance for the multi-wavelength conversion of SRS in liquid medium.

**Keywords:** stimulated Raman scattering, stimulated Brillouin scattering, energy amplification, thermal defocusing

**PACS:** 42.65.Dr, 42.65.Es, 42.65.Ky

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181548

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41776111, 41666004, 61865013, 41576033, 61665008), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province, China (Grant Nos. 20171BAB202039, 20161BBH80036), the Distinguished Young Fund of Jiangxi Province, China (Grant No. 20171BCB23053) and the Aeronautical Science Foundation of China (Grant Nos. 2016ZD56007, 2016ZD56006).

† Corresponding author. E-mail: [jiulinshi@126.com](mailto:jiulinshi@126.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [xingdaohe@126.com](mailto:xingdaohe@126.com)