



## 水体参数对受激布里渊散射阈值及增益的影响

许锦 郭洋宁 罗宁宁 李淑静 史久林 何兴道

### Influence of water parameters on threshold value and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering

Xu Jin Guo Yang-Ning Luo Ning-Ning Li Shu-Jing Shi Jiu-Lin He Xing-Dao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 154205 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210326

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210326>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

相位调制信号对窄线宽光纤放大器线宽特性和受激布里渊散射阈值的影响

Effect of phase modulation on linewidth and stimulated Brillouin scattering threshold of narrow-linewidth fiber amplifiers

物理学报. 2017, 66(23): 234203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.234203>

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

Enhanced stimulated Raman scattering by suppressing stimulated Brillouin scattering in liquid water

物理学报. 2019, 68(4): 044201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181548>

M型少模光纤中模间受激布里渊散射特性及其温度和应变传感特性

Inter-mode stimulated Brillouin scattering and simultaneous temperature and strain sensing in M-shaped few-mode fiber

物理学报. 2020, 69(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200103>

毛细管放电类氩氦69.8 nm激光增益特性研究

Characteristics of gain in Ne-like Ar 69.8 nm laser pumped by capillary discharge

物理学报. 2017, 66(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.155201>

少模光纤的不同模式布里渊散射特性

Characterization of Brillouin scattering in a few-mode fiber

物理学报. 2017, 66(2): 024207 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024207>

掺铈微球的受激辐射激光和自受激拉曼散射

Stimulated lasing and self-excited stimulated Raman scattering of Nd<sup>3+</sup> doped silica microsphere pumped by 808 nm laser

物理学报. 2017, 66(24): 244208 <https://doi.org/10.7498/aps.66.244208>

# 水体参数对受激布里渊散射阈值及增益的影响\*

许锦<sup>1)2)</sup> 郭洋宁<sup>2)</sup> 罗宁宁<sup>2)</sup> 李淑静<sup>2)</sup> 史久林<sup>2)†</sup> 何兴道<sup>1)2)‡</sup>

1) (北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

2) (南昌航空大学, 江西省光电信息科学与技术重点实验室, 南昌 330063)

(2021年2月16日收到; 2021年3月14日收到修改稿)

受激布里渊散射在激光雷达海洋遥感领域具有广泛应用, 而水体参数变化对其阈值及增益等关键特征参数影响的研究还很缺乏. 本文利用分布式噪声模型及耦合波方程, 理论分析了水的温度、压强和衰减系数对受激布里渊散射阈值和增益系数的影响. 在理论分析基础上, 设计了一种温度压强可控实验系统, 采用平均衰减系数法实验测量了不同温度、压强及衰减系数下的阈值和增益系数. 结果表明, 受激布里渊散射阈值随压力和衰减系数的增大而增大, 随温度的升高而减小, 而增益系数则呈现与阈值相反的变化趋势. 温度和衰减系数对阈值和增益系数的影响大于压力. 研究结果对受激布里渊散射激光雷达海洋遥感探测具有重要意义.

**关键词:** 受激布里渊散射, 阈值, 增益, 水体参数

**PACS:** 42.65.Es, 42.68.Ay

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210326

## 1 引言

受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 是由入射高功率激光与介质内声波场相互作用而产生的<sup>[1-3]</sup>, 是一种典型的非线性散射效应, 其所具有的脉宽压缩、高能量反射率、多普勒频移等特殊性质使其在高功率短脉冲激光的获取<sup>[4]</sup>、窄带射频和光信号滤波<sup>[5,6]</sup>、超宽带信号的产生<sup>[7]</sup>、高灵敏度和高特异性的布里渊散射显微镜的研制<sup>[8,9]</sup>和激光雷达水下目标探测<sup>[10]</sup>等领域具有广泛应用. 其中, SBS激光雷达海洋遥感探测技术具有信噪比高、探测距离远和信号采集方便的优点, 可用于实时探测海水参数<sup>[11,12]</sup>. 在用于海洋环境遥感探测时, 水下的温度和压强等水体参数会对SBS的产生造成影响. 阈值和增益系数是SBS激光雷达研究中的两个重要特征参数, 介质参数的

变化会影响SBS的阈值和增益系数. 因此, 研究水体参数对SBS阈值及增益的影响对改善SBS激光雷达的探测性能具有重要意义.

在我们前期研究中, 利用平均衰减系数法测量了水中的SBS阈值, 同时结合瞬态SBS阈值与增益的关系得出了温度对SBS增益的影响<sup>[13]</sup>. 而有关水的压强及衰减系数对SBS阈值和增益影响的研究工作尚未开展. 为了深入研究SBS阈值和增益与水体参数之间的依赖关系, 本文分别从理论和实验两方面讨论了温度、压强和衰减系数对SBS阈值及增益系数的影响. 理论上, 依据瞬态SBS强度公式得出SBS阈值和增益随水的温度、压强和衰减系数的变化规律. 实验中, 通过测量激光在水中传输衰减系数的变化, 确定不同水体参数下水中SBS的阈值和增益系数, 从而得出温度、压强和衰减系数对SBS阈值及增益的影响规律.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41776111, 61865013)、国家重点研发计划 (批准号: 2018YFE0115700) 和国防工业技术发展计划项目 (批准号: JCKY2019401D002) 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)

## 2 理论分析

### 2.1 水体参数对布里渊散射强度的影响

图 1 为布里渊散射的产生过程, 当高斯光束在水中传输时, 由于介质内部热激发导致的密度涨落将产生一定频率范围的高频声波, 声波在水中连续不断地产生和湮灭, 形成瞬态相位光栅. 其内部物理过程为: 波矢量为  $k_p$  的入射光与波矢量为  $k_a$  的声波相互作用, 产生波矢量为  $k_s$  的散射光. 由于布拉格光栅随着水中的声速移动, 则根据多普勒效应将产生发生频移的 Stokes 和 anti-Stokes 光, 且两种散射光与入射光的频率差均为超声波频率, 形成自发布里渊散射. 此时, 散射光在各个方向上均存在. 随着入射光的增强, 介质中的电致伸缩效应增强, 产生更强的声波场, 使后向散射效应增强, 产生沿后向传播的 SBS 信号光.

SBS 的噪声起振模型主要包括边界式噪声注入模型 [14]、分布式噪声模型 [15,16]、自发 Brillouin

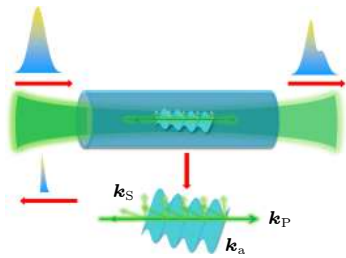


图 1 布里渊散射的产生过程  
Fig. 1. Process of Brillouin scattering.

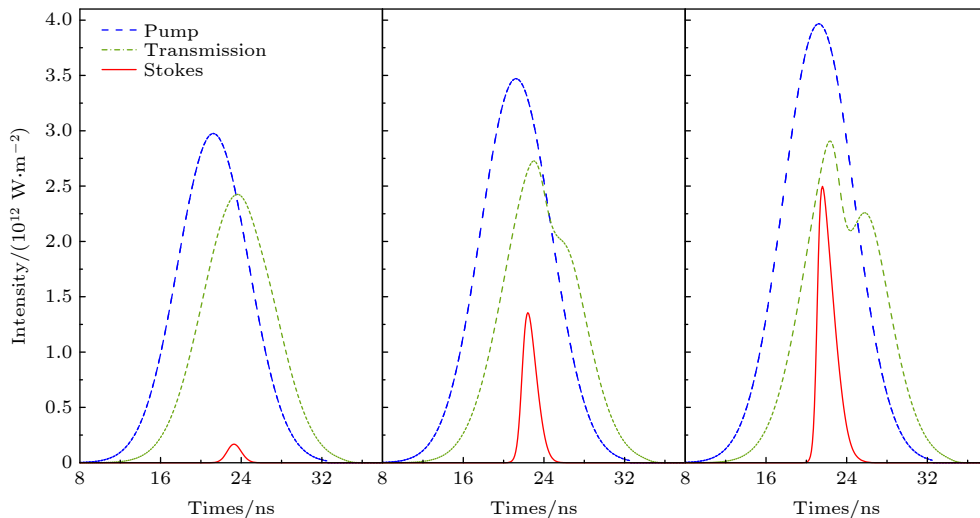


图 2 激光器泵浦能量分别为 60, 70, 80 mJ 时, 泵浦光、Stokes 光和透射光的波形  
Fig. 2. Temporal waveforms of pump, Stokes and transmission laser beams at the pump energy of 60, 70, 80 mJ.

散射噪声源模型 [17] 等. 为了解 SBS 产生过程中泵浦光、透射光及布里渊散射光能量的变化情况, 徐德 [18] 采用分布式噪声模型分析了非聚焦泵浦下 SBS 的产生, 在此基础上, 我们采用该方法对不同能量密度下泵浦光、Stokes 光和透射光的波形进行了仿真, 仿真结果如图 2 所示.

数值模拟中参数设置为: 水池长度为 1 m, 水的折射率为 1.324, 水的衰减系数  $\alpha = 0.25 \text{ m}^{-1}$ , 水中 SBS 增益系数为  $3.8 \text{ cm/GW}$ , 声子寿命为 0.26 ns, 泵浦光波长为 532 nm, 脉冲宽度为 8 ns, 束腰位置为 0.5 m, 初始噪声幅值为  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ . 由图 2 可知, 泵浦光能量较弱时, Stokes 光十分微弱, 随着泵浦光强的增加, Stokes 能量逐渐增强, 透射光能量受散射影响, 其峰值功率降低, 且波形不再是理想的高斯型, 这是 SBS 的光限幅特性. 由于 SBS 光脉冲与泵浦光脉冲传播方向相反, 总是 SBS 前沿首先与未被衰减的泵浦光脉冲相遇, 获得优先的放大, 而后沿不参与或很少参与耦合放大, 在放大的过程中, 脉冲前沿由于增益饱和效应而上升很快. 因此, 在脉冲得到完全放大后, 激光脉冲能量转移到了一个很窄的背向脉冲中, 从而实现脉冲压缩.

### 2.2 水体参数对 SBS 增益的影响

当泵浦激光达到阈值并激发出 SBS 信号后, SBS 增益决定了 Stokes 光的放大, 介质中的布里渊散射增益系数可表示为 [15]

$$g_s = \frac{\omega_s^2 (\gamma_e)^2 \tau_B}{c^3 n v_s \rho_0}, \quad (1)$$

其中  $\omega_s$  是布里渊散射频率;  $\gamma_e$  是电致伸缩系数;  $c$  是介质中的光速;  $n$ ,  $v_s$ ,  $\rho_0$  分别是介质的折射率、声速和密度. 水中的声子寿命  $\tau_B$  可表示为<sup>[19]</sup>

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

其中  $\eta$  为介质的体黏滞系数. 对于特定的波长  $\lambda$ , 水中声速  $v_s$  可用布里渊散射频移  $v_B$  表示<sup>[11]</sup>:

$$v_s = \frac{\lambda}{2n} \frac{v_B}{\sin(\theta/2)}, \quad (3)$$

式中  $\theta$  为散射角. 当水体参数改变时, 水中的黏滞系数及声速会发生变化, 导致 SBS 增益的改变.

图 3 给出了分布式噪声模型仿真所得不同水体参数下的 SBS 脉冲波形, 泵浦光能量为 26 mJ. 从图 3 可以看出, 在衰减系数  $\alpha = 0.25 \text{ m}^{-1}$ , 温度为  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 压强分别为 0, 4 和 10 MPa 的水中, Stokes 的强度随着压强的增加而降低; 衰减系数  $\alpha = 0.25 \text{ m}^{-1}$ , 压强为 4 MPa 时, 温度为 20 和 25  $^\circ\text{C}$  的水中, 温度越高 Stokes 强度越强; 温度为 25  $^\circ\text{C}$  且压强为 4 MPa 时, Stokes 的强度与衰减系数负相关. 因此, 入射光能量一定时, 水温越高, SBS 强度越高; 压强越大, SBS 强度越低; 衰减系数越小, SBS 强度越高. 产生该现象的原因是, 当温度及衰减系数恒定时, 0—10 MPa 的水体压强对黏滞系数的影响较小<sup>[20,21]</sup>, 可忽略, 仅考虑压强对声速的影响. 由于水中声速与压强正相关<sup>[22]</sup>, 随着压强的增加, 声速逐渐增大, 导致 SBS 的增益系数减小, 因此 Stokes 强度较弱. 当衰减系数及压强恒定时, 水体温度的增加将导致水体黏性减小, 声子寿命

增大, SBS 的脉冲建立过程相对缓慢, 导致 SBS 强度低<sup>[23,24,25]</sup>; 反之, 水体温度降低, 声子寿命减小, SBS 脉冲迅速建立, 泵浦光能量在极短的时间内向 SBS 信号充分转移, 因此 Stokes 强度较强. 当水体温度及压强恒定时, 依据朗伯比尔定律, 水的衰减系数增大, 泵浦能量衰减增大, 透射光能量及 SBS 信号能量衰减增加, 因此 Stokes 强度较弱.

### 2.3 SBS 阈值的理论计算

为从理论上定量分析 SBS 的阈值随水体参数变化的规律, 可采用 SBS 耦合波方程法来确定 SBS 阈值. 同时, 激光在水中传输时, 由于水的声子寿命  $\tau_B$  大于 SBS 相互作用时间, 则在这种条件下, SBS 偏向瞬态<sup>[26]</sup>. 因此, 在理论研究方面可从瞬态 SBS 的角度讨论阈值, 瞬态 SBS 的阈值可表示为

$$I_{th} \geq \frac{1}{2g_s \tau_B c} + \frac{\alpha}{g_s}. \quad (4)$$

由 (4) 式可看出, SBS 阈值与衰减系数成正比, 与 SBS 增益系数成反比, 因此, 当温度和压强的改变引起 SBS 增益变化时, SBS 的阈值也会随之改变.

### 3 理论仿真与实验测量结果

为了清晰地显示 SBS 阈值与水体参数的关系, 图 4 给出了纯水中稳态和瞬态 SBS 阈值随温度、压强和衰减系数的变化. 图 4(a) 和图 4(b) 分别为温度 25  $^\circ\text{C}$  时, 稳态和瞬态 SBS 阈值随压强和衰减系数的变化. 可以看出, 稳态和瞬态 SBS 阈值均与压强和衰减系数正相关. 然而, 压强对稳态 SBS 阈值的影响要小于压强对瞬态 SBS 阈值的影响. 主要原因是, 不同于瞬态 SBS, 稳态 SBS 阈值由经典的小信号理论, 可近似为衰减系数与增益的倒数线性正相关. 然而, 0—10 MPa 时, 压强对介质参数, 如水体黏滞系数、水中声速产生的影响较小, 随着压强的增加, SBS 增益系数的变化量较小, 因此阈值增量较小.

图 4(c) 和图 4(d) 分别是压强为 0 MPa 时稳态和瞬态 SBS 阈值随温度和衰减系数的变化, 可以看出, 随着温度的升高, 稳态和瞬态 SBS 阈值逐渐降低, 随着衰减系数的增大, 阈值逐渐增大. 这主要是因为温度引起的水体黏滞系数及水中声速的变化导致 SBS 增益系数改变, 进而引起稳态及瞬态 SBS 阈值的变化. 在衰减系数恒定时, 瞬态

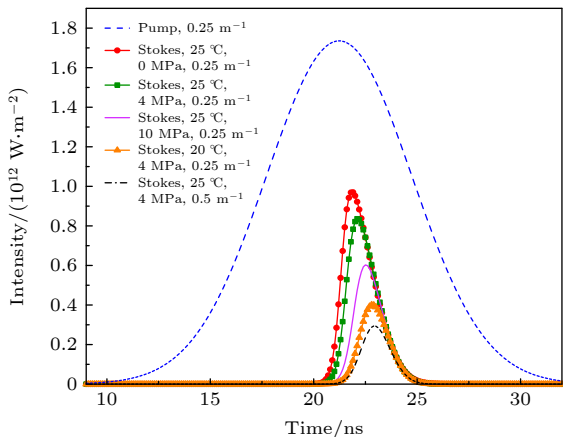


图 3 不同温度、压强和衰减系数下泵浦光和 Stokes 光的波形  
Fig. 3. Temporal waveforms of pump and Stokes laser beams at different temperatures, pressures and attenuation coefficients.

SBS 阈值是声速与增益系数的函数, 因此温度的变化对瞬态 SBS 阈值的影响远大于温度对稳态 SBS 阈值的影响.

图 4(e) 和图 4(f) 分别为衰减系数为  $0.25 \text{ m}^{-1}$  时, 稳态和瞬态 SBS 阈值随温度和压强的变化. 可以看出, 温度及压强一定时, 稳态和瞬态 SBS 阈值

在数值上有一定差异, 但两者随温度和压强的变化趋势相同, 温度对 SBS 阈值的影响远大于压强对 SBS 阈值的影响. 综合上述讨论, 对于稳态 SBS 的阈值, 温度和衰减系数是主要影响因素, 压强是次要影响因素; 对于瞬态 SBS 的阈值, 温度是主要影响因素, 衰减系数及压强是次要影响因素.

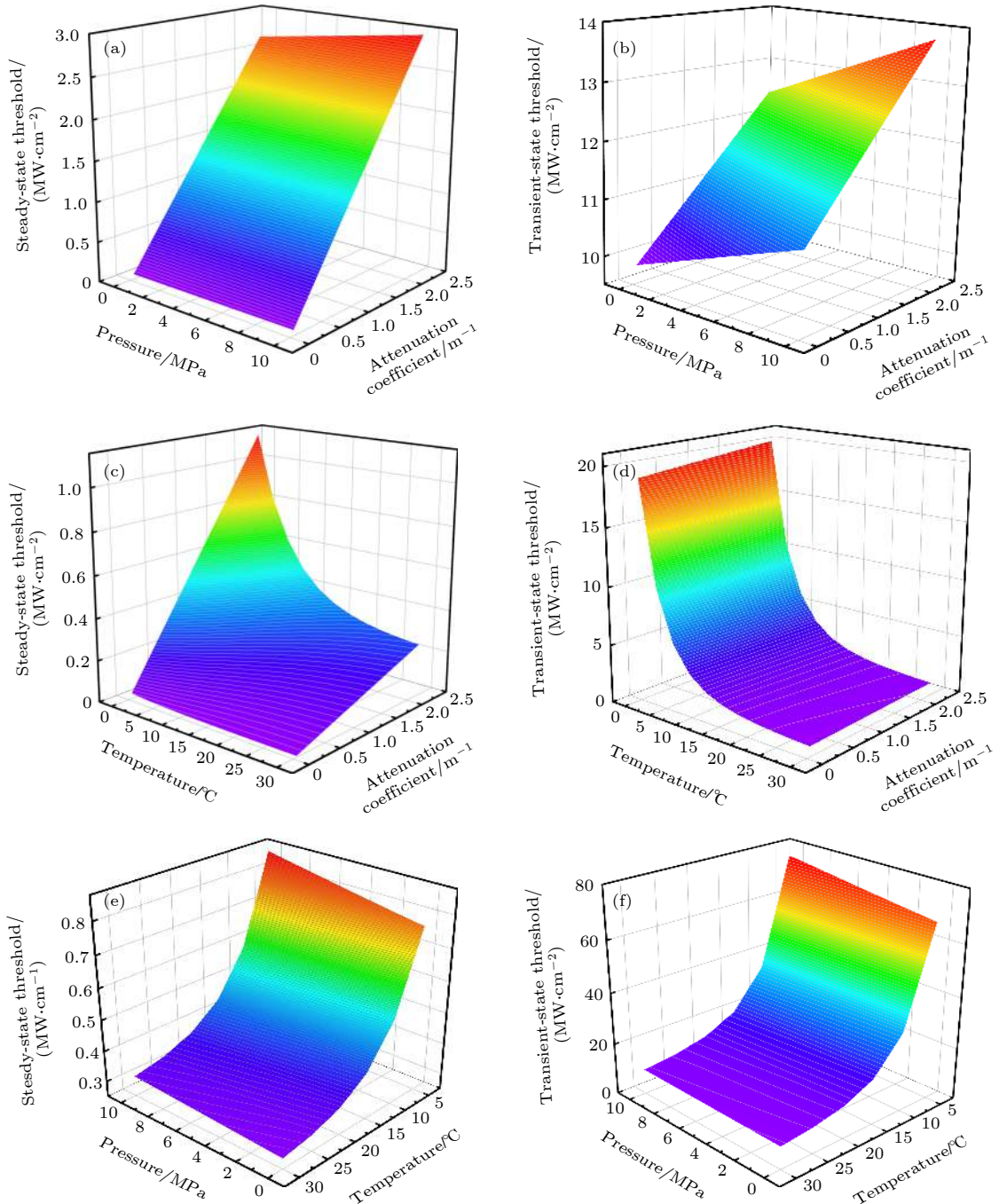


图 4 水中 SBS 阈值随水体参数的变化 (a)  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 稳态阈值; (b)  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 瞬态阈值; (c)  $0 \text{ MPa}$ , 稳态阈值; (d)  $0 \text{ MPa}$ , 瞬态阈值; (e)  $0.25 \text{ m}^{-1}$ , 稳态阈值; (f)  $0.25 \text{ m}^{-1}$ , 瞬态阈值

Fig. 4. Simulation values of steady- and transient-state threshold value of SBS at different water parameters: (a)  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , steady-state; (b)  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , transient-state; (c)  $0 \text{ MPa}$ , steady-state; (d)  $0 \text{ MPa}$ , transient-state; (e)  $0.25 \text{ m}^{-1}$ , steady-state; (f)  $0.25 \text{ m}^{-1}$ , transient-state.

图 5 给出了采用平均衰减系数法<sup>[27]</sup>实验测量得到的温度为 25 °C 和水的衰减系数  $\alpha$  为 0.3 m<sup>-1</sup> 时, 压强分别为 2 和 4 MPa 下单纵模和多纵模激光在水中传输时衰减系数的变化. 实验过程中, 水池与控制系统连接, 用来控制水池内的水体温度和压强, 温度控制精度为 0.02 °C, 压强控制精度为 0.01 MPa. 同时, 控制系统可实现对水池内水体循环, 从而控制水体衰减系数. 从图 5 可以看出, 随着压强的增大, 单纵模激光平均衰减系数与多纵模激光平均衰减系数分离点所对应的泵浦光强度在不断增加, 即 SBS 的阈值随着压强的增加而增加, 因此采用衰减系数法可有效确定温度、压强和衰减系数对 SBS 阈值的影响.

图 6 所示为不同温度、压强和衰减系数下的 SBS 阈值的实验测量结果. 可以看出, 温度一定时, SBS 阈值随着压强的增大而增大; 当温度和压强恒定时, 水的衰减系数越大, SBS 阈值越高; 同一

压强下, 温度越高, SBS 阈值越小.

图 7 为不同温度、压强和衰减系数下 SBS 阈值的理论仿真与实验测量结果的比较. 可以看出, SBS 理论计算所得阈值与实验测量阈值具有相同的变化趋势, 但数值上有一定差异, 这主要是因为理论仿真考虑的是理想瞬态 SBS 的情况, 而实验中产生的 SBS 既不属于理想稳态 SBS 又不属于理想瞬态 SBS, 实验测量值为偏向于瞬态 SBS 情况. 同时, 理论仿真仅考虑布里渊散射现象的产生, 然而实验测量过程中, 也将发生其他非线性效应, 进而导致实验值与理论值具有一定差异.

根据 (4) 式及实验测量的阈值, 可得到不同温度和压强下 SBS 增益, 如图 8(a) 和图 8(b) 所示. 图 8(c) 和图 8(d) 给出了由 SBS 增益公式理论仿真所得的压强为 0—10 MPa, 温度为 5—30 °C 时的 SBS 增益. 将实验测量结果与理论仿真进行对比可以看出, 温度恒定时, 随着压强的增大, SBS

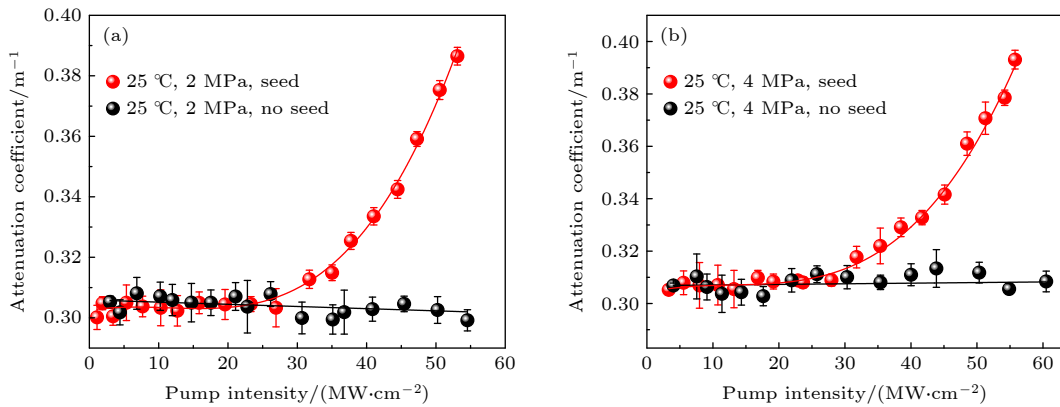


图 5 泵浦光在水中的衰减系数 (a) 25 °C, 2 MPa; (b) 25 °C, 4 MPa

Fig. 5. Measured attenuation coefficient of pulsed laser beams in water: (a) 25 °C, 2 MPa; (b) 25 °C, 4 MPa.

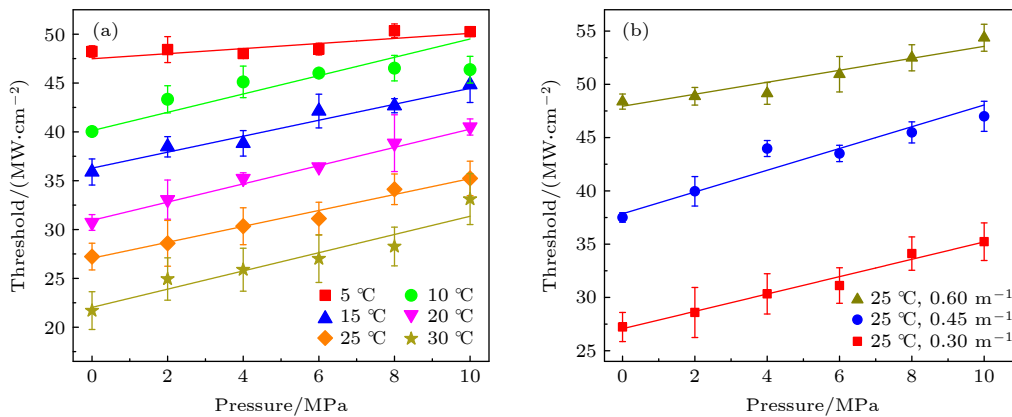


图 6 不同水体参数下 SBS 阈值的实验测量结果 (a)  $\alpha = 0.25 \text{ m}^{-1}$ ; (b)  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 6. Experimental measured values of threshold value of SBS in water at different water parameters: (a)  $\alpha = 0.25 \text{ m}^{-1}$ , (b)  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

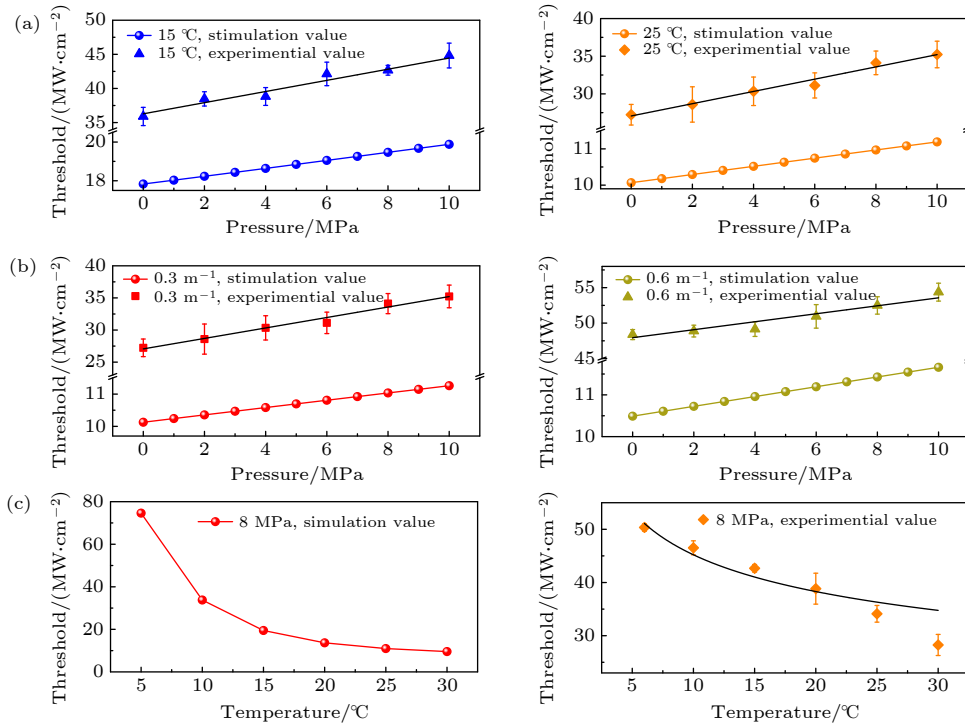


图 7 不同水体参数下 SBS 阈值的实验测量与理论仿真结果对比 (a) 相同衰减系数、不同温度; (b) 相同温度、不同衰减系数; (c) 相同压强和衰减系数、不同温度

Fig. 7. Comparison of experimental measurements with theoretical simulations of SBS threshold at different water parameters: (a) Different temperatures at the same attenuation coefficient; (b) different attenuation coefficients at the same temperature; (c) different temperatures at the same pressure and attenuation coefficient.

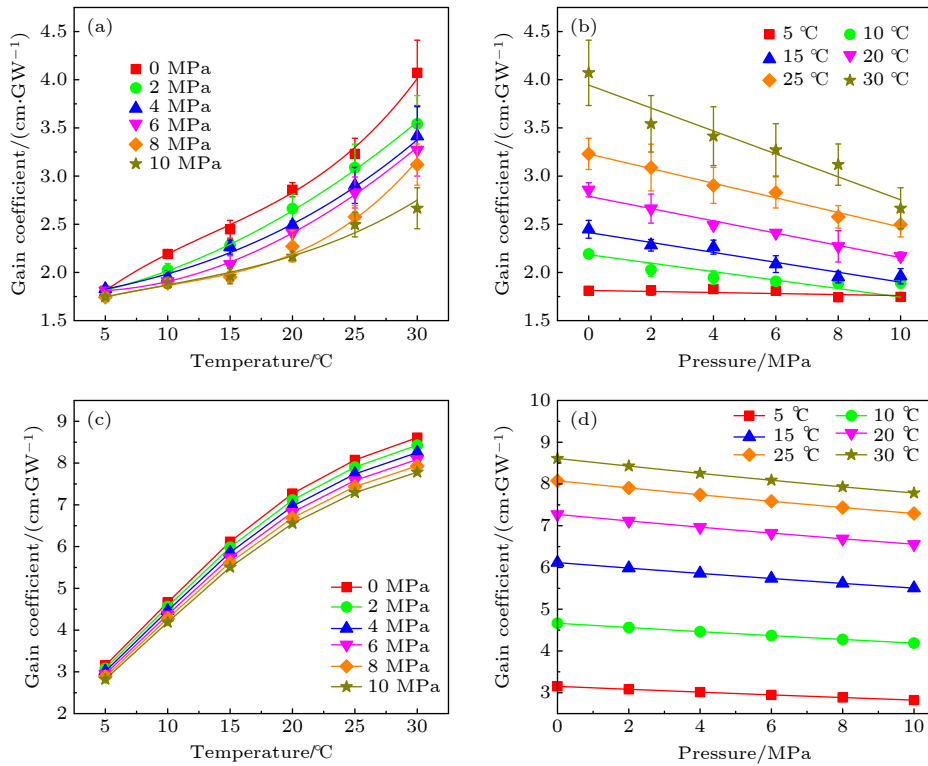


图 8 不同温度及压强下 SBS 增益的理论仿真与实验测量结果 (a), (b) 实验值; (c), (d) 理论值

Fig. 8. Comparison of experimental measurements with theoretical simulations of gain coefficient in water at different temperatures and pressures: (a), (b) Experimental values; (c), (d) theoretical values.

增益将逐渐减小; 压强恒定时, 随着温度的增高, SBS 增益将逐渐增大. 比较实验测量值与理论仿真值可知, 温度对 SBS 增益的影响大于压强对 SBS 增益的影响. 这主要是因为温度对水的声速和黏滞系数的影响较大, 而压强为 0—10 MPa 时, 其对水的黏滞系数影响较小, 可以忽略不计.

## 4 结 论

本文从理论和实验两方面研究了水体参数对 SBS 阈值和增益的影响. 理论上, 首先通过分布式噪声模型确定了温度和压强对 SBS 阈值和增益的影响; 其次, 为了定量分析温度和压强对 SBS 阈值的影响, 由瞬态 SBS 强度方程理论得出了 SBS 阈值随温度、压强和衰减系数的变化规律. 实验上, 通过测量不同温度及压强下 SBS 阈值, 进一步验证了温度、压强和衰减系数对 SBS 阈值的影响. 依据 SBS 阈值与增益的依赖关系, 通过 SBS 阈值测量结果计算得到不同水体参数下 SBS 增益, 并将计算结果与增益公式所得理论值进行对比, 进而确定温度和压强对 SBS 增益的影响. 研究表明, SBS 阈值随着温度的升高而降低, 随着压强和衰减系数的增大而增大; SBS 的增益与温度正相关, 与压强负相关.

## 参考文献

- [1] Damzen M J, Vlad V I, Babin V, Mocofanescu A 2003 *Stimulated Brillouin Scattering: Fundamentals and Applications* (Bristol: Institute of Physics Publishing) pp1–42
- [2] Bloembergen N 1965 *Nonlinear Optics* (New York: Benjamin) pp12–20
- [3] Eggleton B J, Poulton C G, Rakich P T, Steel M J, Bahl G 2019 *Nat. Photonics* **13** 664
- [4] Yuan H, Wang Y L, Lu Z W, Zheng Z X 2018 *Opt. Lett.* **43** 511
- [5] Choudhary A, Liu Y, Marpaung D, Eggleton B J 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 7600211
- [6] Jiang H, Yan L, Pan W, Luo B, Zou X 2018 *Opt. Lett.* **43** 279
- [7] Du C, Zhou W N, Wang Y, Wang M H, Wang D, Wang K J, Dong W, Zhang X D 2018 *Opt. Lett.* **43** 4915
- [8] Remer I, Shaashoua R, Shemesh N, Zvi A B, Bilenca A 2020 *Nat. Methods* **17** 913
- [9] Scarponi F, Mattana S, Corezzi S, Caponi S, Comez L, Sassi P, Morresi A, Paolantoni M, Urbanelli L, Emiliani C, Roscini L, Corte L, Cardinali G, Palombo F, Sandercock J R, Fioretto D 2017 *Phys. Rev. X* **7** 031015
- [10] Yuan D P, Xu J, Liu Z, Hao S G, Shi J L, Luo N N, Li S J, Liu J, Wan S P, He X D 2018 *Opt. Commun.* **427** 27
- [11] Liu D H, Xu J F, Li R S, Dai R, Gong W P 2002 *Opt. Commun.* **203** 335
- [12] Shi J L, Ouyang M, Gong W P, Li S, Liu D H 2008 *Appl. Phys. B* **90** 569
- [13] Shi J L, Tang Y J, Wei H J, Zhang Lei, Zhang D, Shi J W, Gong W P, He X D, Yang K C, Liu D H 2012 *Appl. Phys. B* **108** 717
- [14] Zel'dovich B Y, Pilipetsky N F, Shkunov V V 1985 *Principles of Phase Conjugation* (New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg) pp25–64
- [15] Boyd R W, Rzazewski K B 1990 *Phys. Rev. A* **42** 5514
- [16] Gaeta A L, Boyd R W 1991 *Phys. Rev. A* **44** 3205
- [17] Nguen-Vo N M, Pfeifer S J 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 508
- [18] Xu D 2008 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [徐德 2008 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [19] Park H, Lim C, Yoshida H, Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5073
- [20] Först P, Werner F, Delgado A 2000 *Rheol. Acta.* **39** 566
- [21] Tanaka Y, Matsuda Y, Fujiwara H, Kubota H, Makita T 1987 *Int. J. Thermophys.* **8** 147
- [22] Grosso V A D 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **56** 1084
- [23] Hasi W L J, Guo X, LU H H, Fu M L, Gong S, Geng X Z, Lu Z W, Lin D Y, He W M 2009 *Laser Part. Beams* **27** 733
- [24] Afshaarvahid S, Devrelis V, Munch J 1998 *Phys. Rev. A* **57** 3961
- [25] Hagknocker E, Minck R, Rado W 1967 *Phys. Rev. A* **154** 226
- [26] Shi J, Chen X, Ouyang M, Liu J, Liu D H 2009 *Appl. Phys. B* **95** 657
- [27] Bai J H, Liu J, Huang Y, Liu Y N, Sun L, Liu D H, Fry E S 2007 *Appl. Opt.* **46** 6804

# Influence of water parameters on threshold value and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering\*

Xu Jin <sup>1)2)</sup> Guo Yang-Ning <sup>2)</sup> Luo Ning-Ning <sup>2)</sup> Li Shu-Jing <sup>2)</sup>  
Shi Jiu-Lin <sup>2)</sup>† He Xing-Dao <sup>1)2)</sup>‡

1) (*School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

2) (*Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*)

( Received 16 February 2021; revised manuscript received 14 March 2021 )

## Abstract

Stimulated Brillouin scattering (SBS) is a typical inelastic scattering effect generated by the interaction between intense incident laser and the acoustic wave field in medium and has always been an active research topic in nonlinear optics. The SBS can be used as a novel LIDAR technology for active optical remote sensing of temperature and sound speed structure in ocean. Although, the threshold value and gain property of SBS at normal temperature are studied, none of the threshold values and gain coefficients of SBS at different temperatures, pressures and attenuation coefficients has been investigated in detail. Further, neither the relation between threshold value and water pressure nor the relation between gain coefficient and water pressure is clear now, and little work has been reported. The theoretical and experimental studies of the influence of water parameters on the threshold value and gain coefficient of SBS are still scanty. In this paper, the effects of temperature, pressure and attenuation coefficient of water on threshold value and gain coefficient of SBS are studied theoretically and experimentally. Theoretically, the variations of threshold value and gain coefficient of SBS with temperature, pressure and attenuation coefficient are analyzed by the average attenuation coefficient method based on the distributed noise model (DNM) and coupled wave equations. The temporal waveforms of Stokes-, pump- and transmission-beam at different water parameters are obtained by using the DNM. Experimentally, a temperature-pressure controlled simulator is designed to obtain the threshold values and gain coefficients of SBS in water at different temperatures, pressures and attenuation coefficients through measuring the change of attenuation coefficient of laser pulses. The results indicate that (i) the threshold value of SBS increases with pressure increasing at the same temperature and decreases with temperature increasing at the same pressure; (ii) the threshold value is positively correlated with the attenuation coefficient at the same temperature and pressure; (iii) the gain coefficient of SBS increases with temperature increasing at the same pressure and decreases with pressure increasing at the same temperature. We also find that the temperature and attenuation coefficient have greater effect on threshold value and gain coefficient of SBS than the water pressure. The studied results are of great significance in realizing the ocean remote sensing by SBS lidar.

**Keywords:** stimulated Brillouin scattering, threshold value, gain coefficient, water parameters

**PACS:** 42.65.Es, 42.68.Ay

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210326

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41776111, 61865013), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFE0115700), and the Defense Industrial Technology Development Program of China (Grant No. JCKY2019401D002).

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

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