

引用格式: XU Jin, GUO Yang-ning, HU Fen, *et al.* Influence of Water Characteristic Parameters on Threshold Value and Gain of Stimulated Brillouin Scattering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1229002

许锦, 郭洋宁, 胡芬, 等. 水体参量对受激布里渊散射阈值及增益的影响[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 1229002

# 水体参量对受激布里渊散射阈值及增益的影响

许锦<sup>1</sup>, 郭洋宁<sup>1</sup>, 胡芬<sup>1</sup>, 罗宁宁<sup>1,2</sup>, 张余宝<sup>1,2</sup>, 史久林<sup>1,2</sup>, 何兴道<sup>1,2</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)

**摘 要:** 针对水中受激布里渊散射阈值和增益这两个重要特征参量, 理论分析了温度和盐度对水中受激布里渊散射增益的影响, 同时采用耦合波方程与平均衰减系数相结合的方法, 研究了阈值与温度和衰减系数的相关性. 研究结果表明, 受激布里渊散射的增益与温度和盐度正相关, 随着温度和盐度的升高, 受激布里渊散射增益增大; 而受激布里渊散射阈值随着温度的增加而减小, 随着衰减系数的增大而增大. 研究结果对了解水中的受激布里渊散射过程提供理论依据.

**关键词:** 受激布里渊散射; 增益; 阈值; 温度; 盐度

中图分类号: O437.2

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1229002

## Influence of Water Characteristic Parameters on Threshold Value and Gain of Stimulated Brillouin Scattering

XU Jin<sup>1</sup>, GUO Yang-ning<sup>1</sup>, HU Fen<sup>1</sup>, LUO Ning-ning<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Yu-bao<sup>1,2</sup>, SHI Jiu-lin<sup>1,2</sup>, HE Xing-dao<sup>1,2</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*)

**Abstract:** To investigate the two important characteristic parameters of threshold value and gain coefficient of Stimulated Brillouin Scattering (SBS) in water, the effects of temperature and salinity on SBS gain are analyzed theoretically, and meanwhile coupling wave equation combined with average attenuation coefficient are employed for analyzing the dependence of SBS threshold value on the temperature and attenuation coefficient of water. The results show that, SBS is positively correlated with temperature and salinity of water; the threshold value decreases with the increase of temperature and increases with the increase of attenuation coefficient. The results provide theoretical basis for understanding the SBS process in water.

**Key words:** Stimulated Brillouin scattering; Gain; Threshold value; Temperature; Salinity

**OCIS Codes:** 290.5900; 190.2640; 280.3640

## 0 引言

受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin scattering, SBS) 是一种典型非弹性散射, 由于其具有高信噪比、

**基金项目:** 国家自然科学基金 (Nos. 41666004, 41776111, 41576033, 61865013, 61665008), 江西省自然科学基金 (No. 20171BAB202039), 江西省杰出青年基金 (No. 20171BCB23053), 南昌航空大学研究生创新专项资金 (No. YC2018-S377)

**第一作者:** 许锦 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为布里渊散射. Email: 27501498@qq.com

**导师 (通讯作者):** 史久林 (1983—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光散射及光谱技术. Email: jiuลินshi@126.com

**收稿日期:** 2019-06-17; **录用日期:** 2019-07-27

<http://www.photon.ac.cn>

高能量反射率和定向性等特点,目前已被广泛应用于光放大、光束整形、光通信以及布里渊散射激光雷达等领域<sup>[1-7]</sup>.在布里渊散射激光雷达海洋遥感探测的应用中,早期研究的自发布里渊散射探测技术存在信噪比低,探测距离短,信号采集困难等缺点<sup>[8]</sup>,无法用于实际海洋环境遥感探测.为了提高布里渊散射激光雷达系统的信噪比和探测距离,提出了一种基于SBS可实时探测的雷达系统<sup>[9]</sup>.但使用该系统探测不同海域的海水时,水的温度、盐度和衰减系数的变化会影响受激布里渊散射激光雷达的探测性能.因此,必须了解水的温度、盐度和衰减系数等水体参量对SBS基本特性的影响.与自发布里渊散射相比,SBS明显的阈值特性决定了布里渊散射雷达系统探测不同距离时信号产生所需要的能量.而受激散射光的增强与散射的增益系数有着密切的关系.因此,研究水体参量对SBS增益和阈值的影响对于提高布里渊散射激光雷达的探测性能有着重要意义.阈值和增益作为SBS的两个重要参量,在气体和光纤<sup>[10-11]</sup>等介质中已有很多相关的理论研究,但有关水中SBS阈值和增益的研究相对比较匮乏.

在我们前期研究中,提出了一种通过测量激光在水中传输的平均衰减系数来确定SBS阈值的方法<sup>[12]</sup>,基于该方法实验测量了不同温度下SBS的阈值,同时结合瞬态SBS阈值表达式得出了温度对受激布里渊散射增益的影响<sup>[13]</sup>.但是该研究仅仅考虑了温度对瞬态SBS阈值的影响,并缺少温度对稳态SBS阈值、瞬态SBS阈值及增益影响的理论分析,同时未考虑水的温度和衰减系数对受激布里渊散射阈值的共同影响.为从理论上进一步验证温度对SBS阈值的影响并探讨SBS阈值与水体其他参量之间的依赖关系,本文以水中的SBS过程作为研究对象,理论分析了水中SBS增益的温度和盐度依赖特性,揭示了温度和盐度与SBS增益之间的关系;在此基础上,讨论了温度和衰减系数对SBS阈值的影响,进而获得SBS阈值随温度和衰减系数的变化规律.研究结果对了解水中的受激布里渊散射过程具有重要的意义.

## 1 理论分析

### 1.1 温度和盐度对SBS增益的影响

受激布里渊散射的主要特性参量包括阈值、增益系数、脉宽及能量转化效率等,而介质温度、盐度及衰减系数是影响关键特性参量的主要因素.在受激布里渊散射过程中,声子寿命的长短决定了SBS脉冲建立过程的快慢,而介质温度和盐度决定介质中的声子寿命.介质中的布里渊散射增益表示为<sup>[14]</sup>

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

式中, $\omega_s$ 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, $n$ 、 $\nu_s$ 和 $\rho_0$ 分别是介质的折射率、声速和密度, $\Gamma_B$ 是自发布里渊散射的线宽.对于特定的波长 $\lambda$ ,水中声速 $\nu_s$ 可用布里渊散射频移 $\nu_B$ 表示<sup>[15]</sup>

$$\nu_s = \frac{\lambda}{2n} \frac{\nu_B}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2)$$

式中, $\theta$ 为散射角.由体粘滞系数的计算公式<sup>[9]</sup>,得出布里渊散射的线宽为

$$\Gamma_B = \frac{4\pi^2 \nu_B^2 (3\eta_b + 4\eta_s)}{3\rho_0 \nu_s^2} \quad (3)$$

式中, $\eta_b$ 为体粘滞系数, $\eta_s$ 为剪切粘滞系数.

因此,SBS的增益最终可表示为

$$g_B = \frac{3\omega_s^2 (\gamma_e)^2 \lambda^2}{16\pi^2 c_0^3 \nu_s (3\eta_b + 4\eta_s)} \quad (4)$$

式中, $c_0$ 是真空中光速.液体的声速和电致伸缩系数均受温度和盐度的影响,同时液体的体粘滞系数、剪切粘滞系数与温度有直接关系,因此可根据式(4)理论得出温度和盐度与SBS增益的关系.

### 1.2 耦合波方程求SBS阈值

为了便于理解,首先定义实际增益长度,它是指单纵模激光泵浦下SBS能够产生并被放大的长度.对于给定条件的入射光,最大的实际增益长度定义为

$$RGL = L_c / 2 \quad (5)$$

式中, $L_c$ 是泵浦光的相干长度.因此,SBS的增益时间可表示为 $\tau_c = RGL/c$ ,指在产生SBS过程中激光与介

质相互作用的时间.通常,SBS包括稳态和瞬态两种情况,若 $\tau_c \rightarrow \infty$ ,此时的SBS是理想稳态SBS;若 $\tau_c \rightarrow 0$ ,此时为理想瞬态SBS.因此,设声子寿命为 $\tau_B$ ,当 $\tau_c \geq 100\tau_B$ 时,此时的SBS可看作稳态SBS;当 $\tau_c \ll \tau_B$ 时,即为瞬态SBS过程.在SBS过程中,还存在即非理想稳态也非理想瞬态的情况,需依据实际条件进行分析.接下来将分别讨论这三种情况的阈值.

### 1) 稳态 SBS

基于耦合波方程所求解的SBS在介质起始端点的光强表示为<sup>[16-17]</sup>

$$I_s(0) = I_s(l) \exp \{ [g_B I_p(0) - \alpha] l \} \quad (6)$$

式中, $l$ 为介质长度, $I_s(l)$ 为自发布里渊散射光强, $I_p(0)$ 为入射泵浦光强,对于稳态SBS,如果 $g_B > \alpha$ ,SBS将发生和放大, $\alpha$ 为水的衰减系数.则此时SBS的阈值为

$$I_{th} \geq \frac{\alpha}{g_B} \quad (7)$$

### 2) 瞬态 SBS

只考虑介质吸收不考虑激光损耗,在大增益条件下,SBS的斯托克斯信号强度为

$$I_s(z, t) = I_s(l, t) \exp \{ 2[(g_B I_p(0) - \alpha)(l - z)t / \tau_B]^{1/2} - t / \tau_B \} \quad (8)$$

因此,散射光在传播过程中被放大的条件为

$$2[(g_B I_p(0) - \alpha)(l - z)t / \tau_B]^{1/2} \geq t / \tau_B \quad (9)$$

当发生SBS时,激光在介质中的传输时间 $t = t_L$ , $t_L$ 是泵浦激光的脉冲宽度,在距离 $z$ 处应满足关系

$$2 \left[ \frac{g_B}{\tau_B} (l - z) \int_0^{t_L} I_p(t') dt' - \frac{\alpha}{\tau_B} (l - z) t_L \right]^{1/2} \geq \frac{t_L}{\tau_B} \quad (10)$$

若泵浦脉冲为方形,当激光的脉宽小于声子寿命时,SBS的阈值可表示为

$$I_{th} \geq \frac{t_L}{4g_B \tau_B (l - z)} + \frac{\alpha}{g_B} \quad (11)$$

由于只有当激光脉宽远小于声子寿命时才会发生真正的瞬态SBS,式(11)中的 $(l - z)$ 表示的是散射光有效相互作用时间内的传播距离,忽略光速的色散,在这里可用 $\frac{t_L c}{2}$ 表示,因此瞬态SBS的阈值可表示为

$$I_{th} \geq \frac{1}{2g_B \tau_B c} + \frac{\alpha}{g_B} \quad (12)$$

### 3) 即非稳态也非瞬态情况

在很多情况下,SBS过程既不是瞬态也不是稳态的情况,实际阈值的强度与声子寿命 $\tau_B$ 和SBS增益时间 $\tau_c$ 有关,决定了SBS是偏向稳态还是偏向瞬态.在讨论SBS阈值时,先根据激光与介质的相互作用时间与声子寿命的大小关系判定发生的SBS是稳态成分多还是瞬态成分多,再按照稳态和瞬态的情况进行具体分析.

## 1.3 利用平均衰减系数求SBS阈值

依据我们前期的研究成果,窄线宽与宽线宽激光在水中衰减系数的分离点可定义为SBS的阈值<sup>[18]</sup>,因此可从平均衰减系数的角度考虑SBS的阈值与温度的关系.当一束激光在长度为 $l$ 的水池中传输时,设水中激光的衰减仅由水的吸收和SBS引起,由于SBS是后向散射光,则最后接收到的散射信号是由激光在传输过程中的两次吸收和一次光散射形成,利用式(6)并结合朗伯比尔定律,可得到激光在水中传输的平均衰减系数为

$$\gamma = -\ln \left\{ \exp(-\alpha l) - \frac{I_s(l)}{I_p(0)} \exp [g_B I_p(0) + \alpha] l \right\} / l \quad (13)$$

根据式(6),可通过测量不同温度下的 $I_s(0)$ 来确定 $I_s(l)$ 的经验常数,结合SBS增益的温度依赖性,进而可得到不同温度下衰减系数与入射泵浦能量的变化规律.如室温条件下 $I_s(l)$ 和 $I_p(l)$ 两者的关系可用经验公式表示为 $I_s(l) \approx I_p(l) \exp(-30)$ , $I_p(l)$ 为 $l$ 处的泵浦强度,假设介质长度、水的衰减系数和增益系数一定,可得到室温条件下衰减系数与入射泵浦能量的关系

$$\gamma = -\ln \{ \exp(-\alpha l) - \exp [g_B I_p(0) l - 30] \} / l \quad (14)$$

进而确定室温下 SBS 的阈值。

由上述分析可知, SBS 增益和阈值有直接关系, 因此在研究温度与增益两者之间关系的基础上, 依据不同温度下 SBS 增益, 可进一步获得温度对 SBS 阈值的影响, 而衰减系数的变化将直接改变 SBS 阈值。

## 2 结果与分析

SBS 增益随温度和盐度的变化如图 1 所示。图 1(a) 为通过式(4)仿真所得盐度分别为  $S=0\%$  和  $S=35\%$  时, 不同温度下水中 SBS 的增益系数。根据中国近海及毗邻海域海水温度变化情况, 将理论仿真的温度设置在  $0^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$  范围内。图 1(a) 中的附图为两种盐度条件下增益系数的差值随温度的变化情况, 可以看出, 随着温度的增加, 盐度对 SBS 增益的影响逐渐增大。图 1(b) 为通过式(4)理论仿真所得温度分别为  $T=15^{\circ}\text{C}$  和  $T=20^{\circ}\text{C}$  时, 不同盐度条件下水中 SBS 的增益系数。对比图 1 中的结果可知, SBS 的增益均随着温度和盐度的增加而增加, 但在数值上温度对 SBS 增益系数的影响比盐度对 SBS 增益系数的影响高两个数量级。其主要原因是水的粘滞系数受温度影响较大, 而海水盐度及盐度变化范围较小, 对水的折射率和声速产生的影响十分微弱, 进而导致盐度对 SBS 增益系数的影响较小。

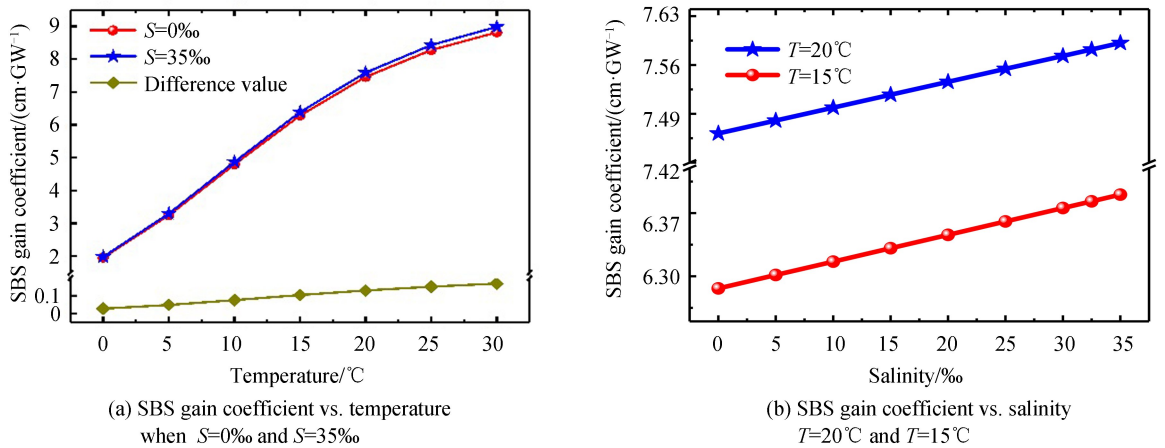
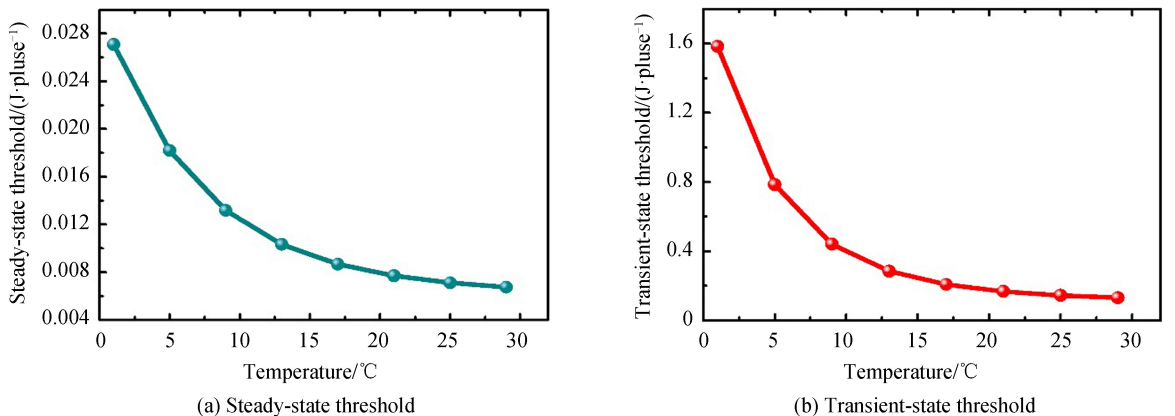
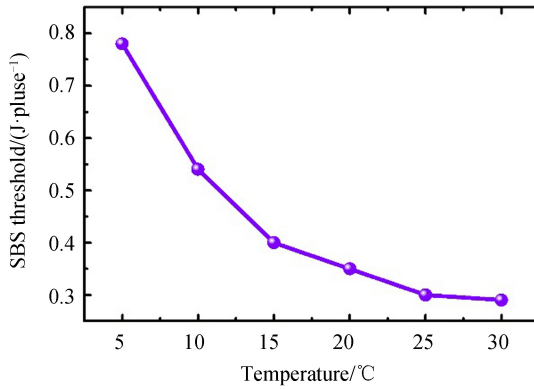


图 1 SBS 增益系数随温度和盐度的变化

Fig.1 SBS gain coefficient varying with the temperature and salinity of water

为了分析及解释 SBS 阈值随温度变化关系, 理论仿真了不同温度下 SBS 阈值变化。图 2 为盐度  $S=35\%$  和衰减系数  $\alpha=0.06\text{ m}^{-1}$  时, SBS 阈值随温度的变化关系。图 2(a) 和图 2(b) 分别为利用式(7)和式(12)所得稳态和瞬态 SBS 阈值理论仿真结果, 图 2(c) 为利用平均衰减系数式(14)计算所得的 SBS 的阈值。从图 2 可看出, 采用不同方法求得的阈值具有相同的变化趋势, 阈值均随着温度的升高而减小, 但在数值上有所不同。同一温度下, 瞬态 SBS 阈值大于稳态阈值, 利用平均衰减系数的方法所求得的阈值介于稳态和瞬态之间, 主要原因是利用平均衰减系数所求的阈值考虑了在水中不同位置处激光的衰减, 更贴近于实际实验过程, 但应注意的是该方法主要适用于水等宽带激光无法产生 SBS 的介质中。





(c) SBS threshold obtained by using average attenuation coefficients

图2  $S=35\%$ 和 $\alpha=0.06\text{ m}^{-1}$ 时,SBS 阈值随温度的变化  
Fig.2 SBS threshold varying with temperature when $S=35\%$  and  $\alpha=0.06\text{ m}^{-1}$

研究水的衰减系数对 SBS 阈值的影响,要先确定衰减系数的变化范围,查阅资料得到依据表 1 所示参量,将水的衰减系数范围设置为  $0\sim 2.2\text{ m}^{-1}$ .为了更清晰地显示衰减系数对 SBS 阈值的影响,图 3(a)和(b)分别给出了室温  $25\text{ }^\circ\text{C}$  条件下水中稳态和瞬态 SBS 阈值随衰减系数的变化.从图中可以看出,当水的温度一定时,SBS 阈值随着衰减系数的增加而增加,衰减系数与 SBS 阈值存在线性关系.

表 1 不同海水的衰减系数

Table 1 Attenuation coefficients of sea water

Types	Pure sea water	Clear ocean water	Costal ocean water	Turbid harbor water
Attenuation coefficient/ $\text{m}^{-1}$	0.056	0.151	0.298	2.17

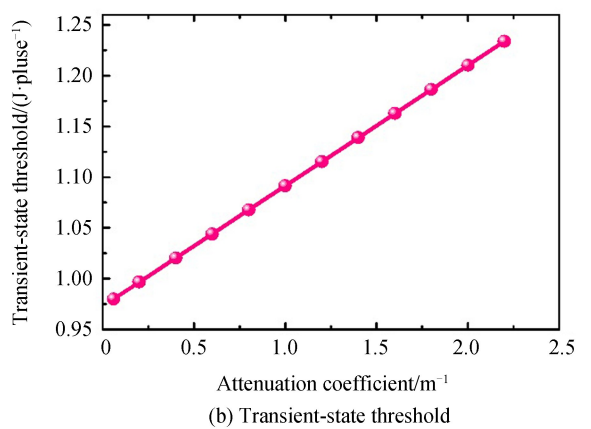
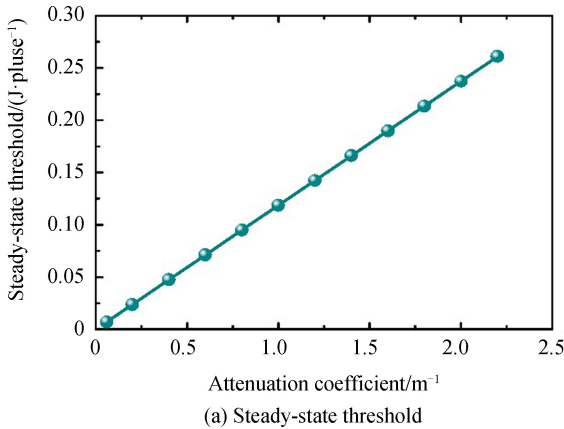


图 3 室温条件下 SBS 阈值随衰减系数的变化

Fig.3 SBS threshold varying with the attenuation coefficient at room temperature

为了更清晰地显示 SBS 阈值与温度及衰减系数的关系,图 4 给出了盐度为  $S=35\%$  时,水中稳态和瞬态 SBS 阈值随温度和衰减系数的变化情况.图 4(a)为稳态 SBS 阈值随温度和衰减系数的 3D 变化,从图中可以看出,稳态 SBS 的阈值受温度和盐度的共同影响,随着温度的升高,稳态 SBS 阈值降低,随着衰减系数的增大,稳态 SBS 阈值逐渐增大.图 4(b)为瞬态 SBS 阈值随着温度和衰减系数的 3D 变化,从图中可明显看出温度对瞬态 SBS 阈值的影响,而衰减系数对瞬态 SBS 阈值影响较小.产生该结果的主要原因可从图 2(b)和图 3(b)的比较分析中得出,图 3(b)中瞬态 SBS 的阈值随着衰减系数的增加而增加,但其变化率很小,而图 2(b)温度对瞬态 SBS 阈值的影响较大.在同时分析温度和衰减对瞬态 SBS 阈值影响时,温度造成的阈值的的变化远大于衰减系数造成的阈值的的变化.



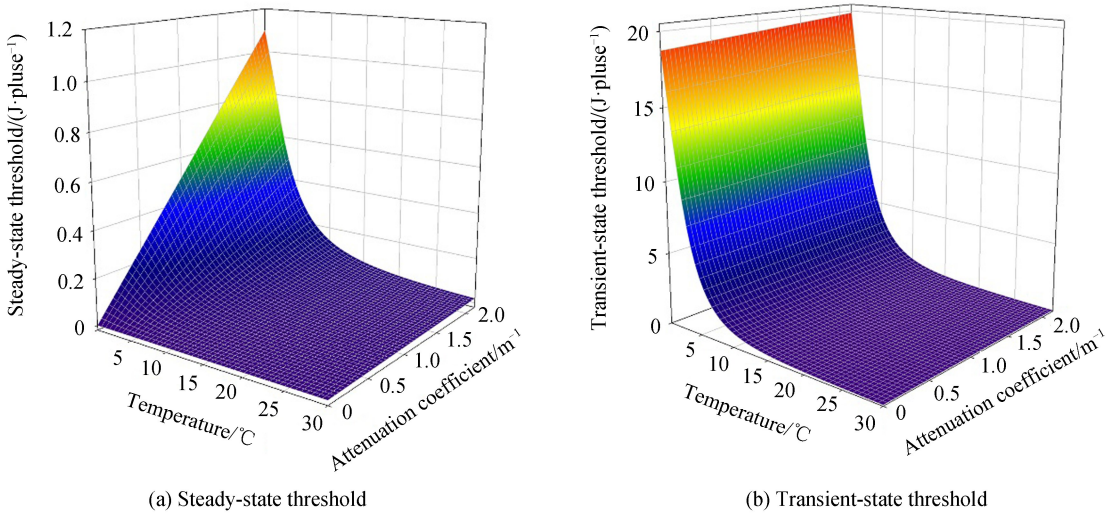


图4 SBS 阈值随温度和衰减系数的变化

Fig.4 SBS threshold varying with the temperature and attenuation coefficient

图5给出了盐度  $S=0\%$  时,不同温度下水中 SBS 增益的理论模拟结果与文献[13]中前期实验结果的对比.实验中所用激光器为种子注入式 Nd: YAG 脉冲激光器,脉冲宽度 8 ns,重复频率 10 Hz.将实验测量的水注入 1.2 m 长前后透光的水池中,使用精度为  $0.02^\circ\text{C}$  的温度控制系统控制水的温度,实验中采用两个 Coherent PowerMAX 探测器分别测量窄带和宽带激光入射到水池中的泵浦光强及透过水池的出射光强.测量所得数据用公式  $\gamma = -\frac{1}{L} \ln\left(\frac{I_2'/I_1'}{I_2/I_1} \times 0.927\ 388\right)$  计算可得到水的平均衰减系数与入射泵浦光强的关系<sup>[16]</sup>.

其中  $L$  为水池长度,  $I_1$  和  $I_2$  分别为空腔实验的入射光强和出射光强,  $I_1'$  和  $I_2'$  分别为加水实验的入射光强和出射光强.根据窄线宽与宽线宽激光在水中传输平均衰减系数的分离点确定 SBS 阈值<sup>[18-19]</sup>.实验所用水的盐度为  $S=0\%$ , 衰减系数为  $\alpha=0.06\ \text{m}^{-1}$ .将实验测量结果进行数据拟合,测量结果之间的最大相关误差小于 5%,在测量不确定度范围内.对比理论仿真与实验结果可知, SBS 的增益系数均随着温度的增加而增加,具有相同的变化趋势.需要说明的是,同一温度下,理论计算所得的增益要大于实验所测得的增益,其主要原因是理论分析只考虑了水中的 SBS 过程,而忽略了热瑞利散射、拉曼散射等其它散射效应,因此理论模拟值与实际测量值有所差别,但这并不影响 SBS 增益随温度的变化规律.

图6为  $S=0\%$  和  $\alpha=0.06\ \text{m}^{-1}$  时,不同温度下水中 SBS 阈值的理论仿真与实验结果对比.由于利用平均衰减系数获得阈值的方法更贴近于实际,因此将该方法所得的理论仿真与实验结果进行对比.实验中所用激

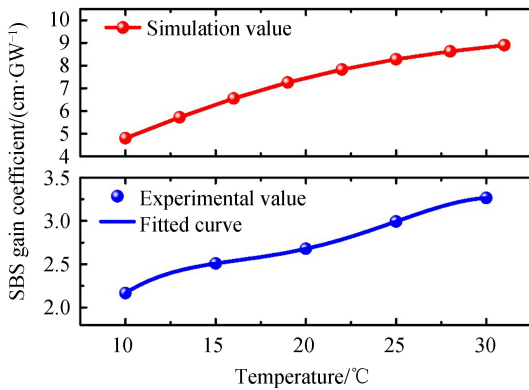


图5  $S=0\%$  时,不同温度下水中 SBS 增益的理论模拟与实验结果对比

Fig.5 Simulation value vs. experimental value of SBS gain in water at different temperatures when  $S=0\%$

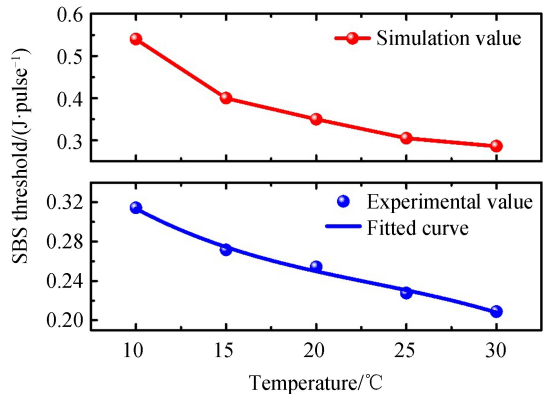


图6  $S=0\%$  和  $\alpha=0.06\ \text{m}^{-1}$  时,不同温度下水中 SBS 阈值的理论仿真与实验结果对比

Fig.6 Simulation value vs. experimental value of SBS threshold in water at different temperatures when  $S=0\%$  and  $\alpha=0.06\ \text{m}^{-1}$

光的脉宽是 8 ns,则散射光与介质相互作用时间内的传播距离约为  $\frac{t_{LC}}{2} \approx 1$  m,发生 SBS 时,激光与介质的相互作用时间大于声子寿命,因此该实验中发生的 SBS 偏向于稳态 SBS.将理论仿真与实验结果进行比较可看出,随着温度的升高,SBS 的阈值均逐渐减小,同一温度下 SBS 阈值的理论和实验结果在数值上有一定差异,但总体变化趋势相同.

### 3 结论

理论研究了水体参量对 SBS 阈值和增益的影响.首先理论分析了水中 SBS 增益的温度和盐度依赖特性,揭示了温度和盐度与 SBS 增益之间的关系;在此基础上,借助耦合波方程,分别讨论了稳态及瞬态 SBS 的阈值,并通过模拟计算获得了温度和衰减系数对 SBS 阈值的影响规律.研究表明,SBS 的增益随着温度和盐度的增加而增加,但温度的变化对 SBS 增益系数的影响远大于盐度的影响;阈值随着温度的升高而减小,同一温度下,瞬态 SBS 阈值大于稳态阈值;当水的温度一定时,SBS 阈值随着衰减系数的增加而增加,衰减系数与 SBS 阈值存在线性关系.理论仿真结果与前期实验测量结果具有很好的一致性,研究结果对于研究水下受激布里渊散射具有重要意义.

### 参考文献

- [1] CHIAO R Y, TOWNES C H, STOICHEFF B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves[J]. *Physical Review Letters*, 1964, **12**(21): 592-595.
- [2] YUAN Hang, WANG Yu-lei, LV Zhi-wei, et al. Theoretical investigation on 200 ps laser pulses amplification based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(9): 0914003.  
远航,王雨雷,吕志伟,等.基于受激布里渊散射的 200 ps 激光脉冲放大的理论研究[J]. *光学学报*, 2016, **36**(9): 0914003.
- [3] ZHANG Cong, YU Wen-feng, LI Zheng-lin, et al. Numerical study on scattering properties for the stimulated Brillouin scattering Fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0319005.  
张聪,余文峰,李正林,等.光纤受激布里渊散射的散射特性数值研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(3): 0319005.
- [4] GAO Wei, HU Xiao-bo, SUN Di, et al. Simultaneous generation and Brillouin amplification of a dark hollow beam with a liquid-core optical fiber[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(18): 20715-20720.
- [5] OMATSU T, KONG H J, PARK S, et al. The current trends in SBS and phase conjugation[J]. *Laser and Particle Beams*, 2012, **30**(1): 117-174.
- [6] YI Li-lin, ZHANG Tao, LI Zheng-xuan, et al. Secure optical communication using stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *Optics Communications*, 2013, **290**: 146-151.
- [7] SHI Jin-wei, GONG Wen-ping, LIU Da-he, et al. A lidar system based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Physics B*, 2007, **86**(1): 177-179.
- [8] LIU Da-he, XU Jian-feng, LI Rong-sheng, et al. Measurements of sound speed in the water by Brillouin scattering using pulsed Nd: YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2002, **203**(3): 335-340.
- [9] SHI Jin-wei, OU-YANG Min, GONG Wen-ping, et al. A Brillouin lidar system using F - Petalon ICCD for remote sensing of the ocean[J]. *Applied Physics B*, 2008, **90**(3): 569-571.
- [10] HANGRENLOCKEE E E, MINCK R W, RADO W G. Effects of phonon life on stimulated optical scattering in gases [J]. *Physical Review*, 1967, **154**(2): 226-233.
- [11] HANSRYD J, DROSSF, WESTLUND M, et al. Increase in the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution[J]. *Lightwave Technology*, **19**(11): 1691-1694.
- [12] BAI Jian-hui, LIU Juan, HUANG Yi, et al. Investigations of the attenuation coefficient of a narrow-bandwidth pulsed laser beam in water[J]. *Applied Optics*, 2003, **46**(27): 6804-6808.
- [13] SHI Jiu-lin, HE Xing-dao, LIU Da-he, et al. Temperature dependence of threshold and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering in water[J]. *Applied Physics B*, 2012, **108**(12): 717-720.
- [14] BOYD R W, RZAZEWSKI K. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering [J]. *Physical Review A*, 1990, **42**(9): 5514-5521.
- [15] Fry E S, EMERY Y, QUAN Xiao-hong, et al. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(27): 6887-6894.
- [16] OUYANG Min, SHI Jin-wei, LIU Da-he, et al. Real time measurement of the attenuation coefficient of water in open ocean based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Physics B*, 2008, **91**(2): 381-385.

- [17] DAMZEN M J, VLAD V I. Stimulated brillouin Scattering: fundamentals and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [18] BAI Jian-hui, SHI Jin-wei, OU-YANG Min, *et al.* Method for measuring the threshold value of stimulated Brillouin scattering in water[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(13): 1539-1541.
- [19] ZENG Zhao-quan, ZHANG Hui-hui, DONG Yu-han, *et al.* A survey of underwater wireless optical communication[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, **19**(1): 204-238.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41666004, 41776111, 41576033, 61865013, 61665008), the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20171BAB202039), the Distinguished Young Fund of Jiangxi Province (No. 20171BCB23053), the Graduate Student Innovation Fund of Nanchang Hangkong University (No. YC2018-S377)