

变温条件下受激布里渊散射增益系数的实验测量*

陈蔚 陈学岗[†] 史久林[‡] 何兴道 莫小凤 刘娟

(南昌航空大学, 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

(2012年10月15日收到; 2012年12月8日收到修改稿)

从理论及实验上分析了介质温度对受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 阈值及增益系数的影响. 在理论分析的基础上, 提出了一种通过测量 SBS 阈值来决定介质 SBS 增益系数的新方法. 实验及测量结果表明, SBS 增益系数会随着介质温度的增加而呈现指数上升的趋势.

关键词: 受激布里渊散射, 阈值, 增益系数

PACS: 42.65.-K, 42.65.Es

DOI: 10.7498/aps.62.104213

1 引言

受激布里渊散射 (SBS) 由于具有相位共轭、脉宽压缩以及高能量反射率等特点^[1-3], 已经被广泛应用于放大^[4,5]、慢光^[6,7]以及布里渊激光雷达^[8,9]等. 然而, 对 SBS 一些特征参数的研究缺少相应的实验验证, 比如 SBS 增益系数 g_B ^[7,8]与温度的关系, 通常情况下我们只知道一些介质在室温下的增益值, 而对介质在变温条件下的增益值或者说变化规律知之甚少. 在对一些有机材料或者光纤中的布里渊散射研究中, 温度条件是一个比较常见的研究指标, 介质温度的变化会影响电致伸缩系数、折射率、密度以及声速等^[10,11]. 对液体介质而言, 介质的黏滞系数受温度变化影响尤为明显, 而布里渊散射阈值、增益等与黏滞系数有着直接的关系. 在布里渊激光雷达海洋遥感探测的实际应用中, 研究温度变化对增益系数的影响规律也有着非常重要的意义. SBS 在光纤中的增益特性^[12,13]已被广泛研究, 但在液体介质中的增益系数缺乏相应的实验验证工作. 本文选用水作为实验介质, 提出一种通过测量水中 SBS 阈值^[14]的方法来决定增益系数, 从理论及实验上详细分析布里渊增益系数的温度依赖性规律.

2 理论分析

由于 SBS 阈值和增益系数有直接的关系^[15], 因此可以通过研究 SBS 的阈值来确定增益系数. 为简单起见考虑两种比较特殊的情况: 稳态 SBS 和瞬态 SBS. 介质中的 SBS 是稳态还是瞬态取决于声子寿命 τ_B 和 SBS 相互作用时间 $\tau_c = RGL/v_p$ (RGL 为 SBS 的实际增益长度, v_p 为光在介质中的传播速度)之间的相互关系^[16]. 如果 $\tau_c \rightarrow \infty$, 将会发生稳态 SBS; 如果 $\tau_c \rightarrow 0$, 将会发生瞬态 SBS. 但实际上, 大多数 SBS 的发生既不属于理想稳态也不属于理想瞬态, 比如 Kroll^[17]和 Hon^[18]研究了当相互作用时间小于或等于声子寿命时的 SBS 阈值情况. 但是他们的研究是基于一个经验公式 $I_S(l) \approx I_L(0) \exp(-30)$, 其中 I_L 为抽运光强度, I_S 为后向散射光强度. 本文将从受激辐射的物理机制上来严格讨论这个问题.

根据耦合波方程理论, 忽略激光抽运损耗, SBS 强度可以定义为^[19]

$$I_S(z, t) = I_S(l, t) \exp \left\{ 2 \left[(g_B I_L(0) - \alpha) \times (l-z)t/\tau_B \right]^{1/2} - \frac{t}{\tau_B} \right\}. \quad (1)$$

根据 SBS 的物理机制, 当 $2[(g_B I_L(0) - \alpha)(l-z)t/\tau_B]^{1/2} \geq t/\tau_B$ 时, 散射光在传播过程中可以被

* 国家自然科学基金(批准号: 41206084, 41066001, 41266001, 61177096)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: Cxg3652000@yahoo.com

[‡] 通讯作者. E-mail: hyq1304@126.com

放大. 因此, 当在介质中 z 位置处发生 SBS 时满足以下关系:

$$2 \left[\frac{g_B}{\tau_B} (l-z) \int_0^{t_L} I_L(t) dt - \frac{\alpha}{\tau_B} (l-z) t_L \right]^{1/2} \geq \frac{t_L}{\tau_B}, \quad (2)$$

t_L 为激光的脉宽. 我们知道, 在室温条件下自发布里渊散射的线宽大约在 500 MHz 左右, 由于脉冲压缩效应的存在 [20], SBS 的线宽要大于 500 MHz. 根据文献 [16], 500 MHz 线宽对应于水中的最大有效增益长度为 $RGL_M = 0.22$ m, 因此, SBS 线宽对应的 RGL_M 值要小于 0.22 m. SBS 相互作用时间 τ_c 要比水中声子寿命 τ_B (0.26 ns) 小一到两个数量级, 即 $\tau_c \ll \tau_B$. 在这种条件下, SBS 阈值可以被严格的定义为 [16]

$$I_{Lth} \geq \frac{2}{4g_B \tau_B v_p} + \frac{\alpha}{g_B}, \quad (3)$$

因此, SBS 增益系数 g_B 可以表示为

$$g_B = \frac{2 + 4\alpha \tau_B v_p}{4\tau_B v_p I_{Lth}}, \quad (4)$$

式中 α 为介质的衰减系数.

3 实验测量及结果分析

图 1 为测量水中 SBS 阈值的实验装置图. SBS 的阈值可以分别通过用宽带和窄带激光测量介质的衰减系数 α 来准确测量 [14]. 所用激光为种子注入式脉冲 Nd:YAG 激光器 (continuum powerlite precision plus), 脉宽为 8 ns, 重复率为 10 Hz, 通过开关种子激光器可以得到 90 MHz 的窄线宽和 30 GHz 的宽线宽. 实验所用介质是衰减系数为 0.06/m 的蒸馏水, 实验水槽长度为 1.2 m, 用一个精度为 0.02 °C 循环水箱来控制水的温度, 温度变化范围为 10 °C—45 °C. 为了保证激光器工作的稳定性, 尽可能地减小实验误差, 实验过程中通过改变激光器谐振腔与放大级之间的时间延迟来改变激光的输出能量.

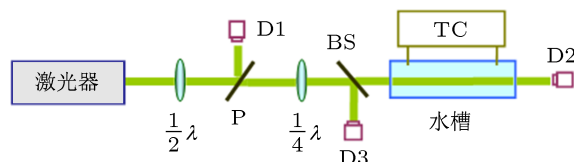


图 1 实验测量图 $\lambda/2, \lambda/4$ 分别为半波片及四分之一波片; P 为偏振耦合镜; BS 为分束镜; D1 和 D2 为功率计; TC 为温度控制器

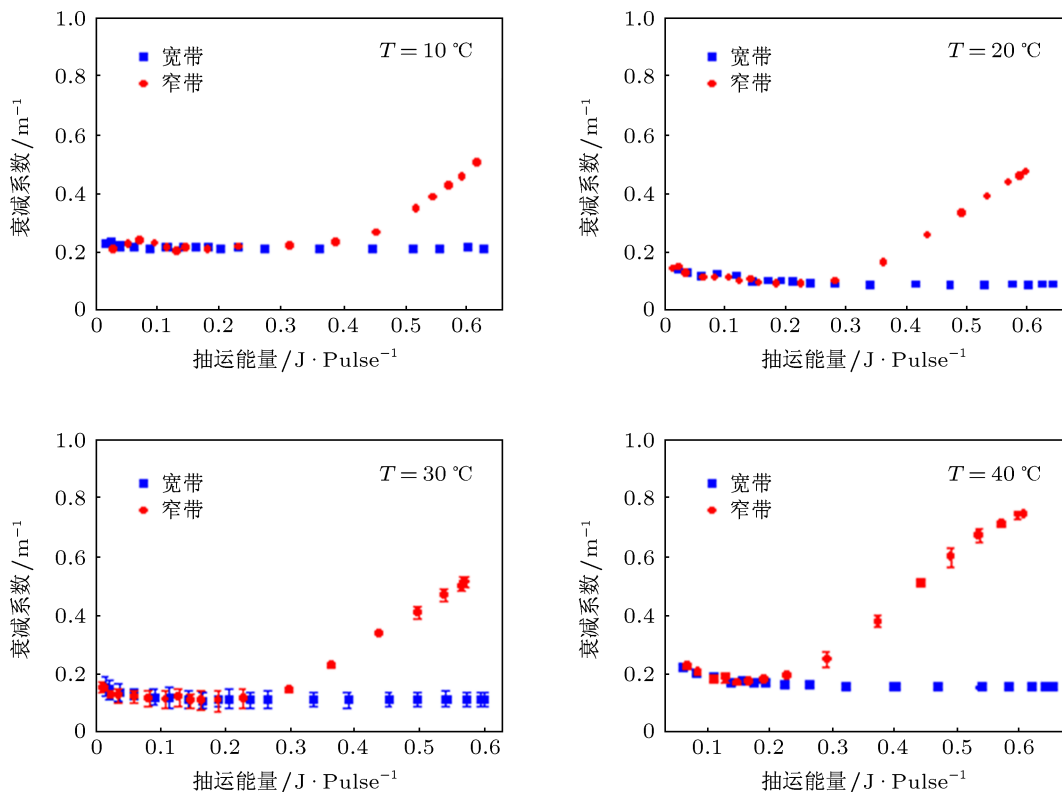


图 2 高能激光在不同水温条件下的衰减系数

图 2 所示为窄带和宽带高能脉冲激光在不同温度水中的衰减系数测量结果. 需要指出的是, 由于受激拉曼散射 (SRS) 阈值比 SBS 阈值高得多, 因此在非聚焦条件下, 当激光能量控制在一定范围内, SRS 对测量衰减系数的影响很微弱. 根据我们已有的研究内容 [14], 宽带和窄带激光衰减系数曲线的分叉点即为 SBS 的阈值. 用文献 [14] 中的方法可以得到不同水温下的 SBS 阈值, 结果如图 3 所示, 图中的结果为所测得的 8 组数据的平均, 并给出了误差棒. 从图 3 中可以很清楚地看出阈值对温度的变化非常敏感, 随着水温的升高而下降, 水温为 40 °C 的阈值仅为 10 °C 时的一半. 温度对 SBS 阈值的影响规律可用以下公式来表示:

$$I_{th}(T) = 0.043 + 0.348 \times \exp(-0.026T). \quad (5)$$

根据 (4) 式以及不同温度条件下的 SBS 阈值, 选取 $\tau_B = 0.26 \text{ ns}$, $v_p = 2.256 \times 10^8 \text{ m/s}$, $\alpha = 0.06 \text{ m}^{-1}$, 可以实验得到不同温度条件下的 SBS 增益系数 g_B , 表 1 和图 4 给出相应的实验结果. 从表 1 中可以看出, 在温度为 25 °C 所测得的 SBS 增益系数 g_B 为 2.9923, 与文献 [21] 中室温时所给的值 2.994 非常符合. 而在非室温条件下, g_B 会随温度的增加而呈现指数上升变化趋势.

表 1 不同温度条件下所测得的水中 SBS 增益系数 g_B 的值

T/°C	10	15	20	25	30	35	40	45
阈值/J·Pulse ⁻¹	0.3144	0.2715	0.2543	0.2276	0.2087	0.1787	0.1613	0.1565
对应能量密度/MW·cm ⁻²	39.7285	34.3115	32.1378	28.7635	26.3687	22.5773	20.3847	19.7718
$g_B/\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1}$	2.1665	2.5085	2.6782	2.9923	3.2641	3.8122	4.2223	4.3532

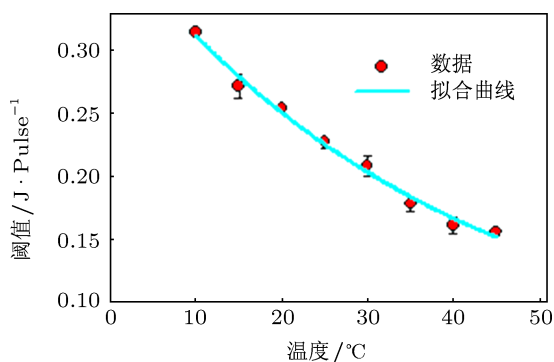


图 3 水在不同温度下所测得 SBS 阈值

SBS 增益系数可以表示为 [10]

$$g_B = \frac{\gamma^2}{ncv\rho\eta}, \quad (6)$$

式中 $\gamma = (n^2 - 1)(n^2 + 2)/3$ 为介质的电致伸缩系数, c 为真空中光速, v 为介质中的声速, ρ 为介质密度, n 为介质的折射率, η 为介质黏滞系数. 对水来说, 受温度变化影响最大的就是黏滞系数 η , 随着温度的升高, 水的黏滞系数 η 将会变小 [22], 这就会导致 g_B 的增大, 这与我们的实验测量结果相符合. 依据实验测量结果, SBS 增益系数对温度的依赖性规律我们可以用以下经验公式来表示:

$$g_B(T) = 1.82 \times \exp(0.02T). \quad (7)$$

由 (6) 式得到的结果与图 4 中数据的最大相对误差小于 5%, 在测量不确定度范围之内.

4 结论

实验研究了水的温度对 SBS 阈值及增益系数的影响, 并进行了相关的理论分析. 提出了一种测量 SBS 增益系数的新方法. 实验及测量结果表明, SBS 增益系数受介质温度变化影响明显, 随着温度的升高, 增益系数呈现指数上升趋势.

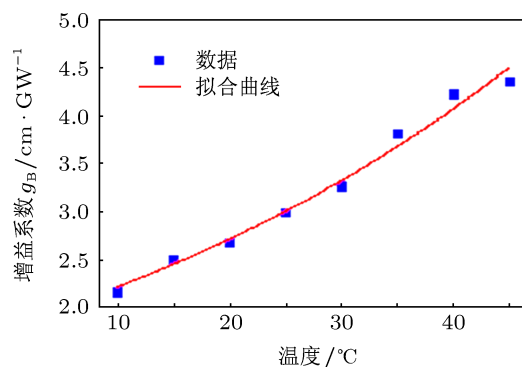


图 4 不同温度下的 SBS 增益系数

- [1] Gao W, Sun D, Bi Y F, Li J Y 2012 *Appl. Phys. B* **107** 355
- [2] Kong H J, Lee S K, Lee D W, Guo H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 051111
- [3] Shi J W, Gong W P, Bai J H, Liu D H 2007 *Physics* **36** 777 (in Chinese)
[石锦卫, 弓文平, 白建辉, 刘大禾 2007 *物理* **36** 777]
- [4] Gao W, Hu X B, Sun D, Li J Y 2012 *Opt. Express* **20** 20715
- [5] Gao W, Lu Z W, He W M, Zhu C Y 2011 *Appl. Phys. B* **105** 317
- [6] Okawachi Y, Bigelow S M, Sharping E J, Zhu Z M, Schweinsberg A, Gauthier J D, Boyd W R, Gaeta L A 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 153902
- [7] Schneider T, Junker M, Lauterbach K 2007 *Opt. Lett.* **32** 220
- [8] Shi J, Li G, Gong W, Bai J, Huang Y, Liu Y, Li S, Liu D 2007 *Appl. Phys. B* **86** 177
- [9] Shi J, Ouynag M, Gong W, Li S, Liu D 2008 *Appl. Phys. B* **90** 569
- [10] Hasi W L J, Guo X Y, 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
- [11] Heinicke W, Winterling C 1967 *Appl. Phys.* **11** 231
- [12] Garus D, Krebber K, Schliep F 1996 *Opt. Lett.* **21** 1402
- [13] Kurashima T, Horituchi T, Tateda M 1990 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **2** 718
- [14] Bai J H, Shi J W, Ouyang M, Chen X D, Gong W P, Jing H M, Liu J, Liu D H 2008 *Opt. Lett.* **33** 1539
- [15] Boyd W R, Rzazewski K 1990 *Phys. Rev. A* **42** 5514
- [16] Shi J W, Chen X D, Ouyang M, Liu J, Liu D H 2009 *Appl. Phys. B* **95** 657
- [17] Kroll N M 1965 *J. Appl. Phys.* **36** 34
- [18] Hon D T 1980 *Opt. Lett.* **5** 516
- [19] Damzen M J, Vlad V I, Babin V, Mocofanescu A 2003 *Stimulated Brillouin Scattering: Fundamentals and Applications* (Bristol: IOP Publishing)
- [20] Zhang L, Zhang D, Yang Z, Shi J W, Liu D H, Gong W P, Fry S E 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 221106
- [21] Weber J M 1994 *Handbook of Laser Science and Technology Supplement 2: Optical Materials* (Boca Raton: CRC Press) p358
- [22] Xu J F, Ren X B, Gong W P, Dai R, Liu D H 2003 *Appl. Opt.* **42** 6704

Measurement of gain coefficients of stimulated Brillouin scattering in water at different temperatures*

Chen Wei Chen Xue-Gang[†] Shi Jiu-Lin[‡] He Xing-Dao
Mo Xiao-Feng Liu Juan

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

(Received 15 October 2012; revised manuscript received 8 December 2012)

Abstract

In this paper, the influences of medium temperature on threshold and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering (SBS) in water are investigated theoretically and experimentally. Based on the theoretical analysis, a new method is proposed to determine the gain coefficient of SBS of the material by measuring the threshold. The experimental results indicate that the gain coefficient of SBS increases exponentially with the increase of medium temperature.

Keywords: stimulated Brillouin scattering, threshold value, gain coefficient

PACS: 42.65.-K, 42.65.Es

DOI: 10.7498/aps.62.104213

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41206084, 41066001, 41266001, 61177096).

[†] Corresponding author. E-mail: Cxg3652000@yahoo.com

[‡] Corresponding author. E-mail: hyq1304@126.com