

水的衰减系数及有效增益长度对受激布里渊散射输出能量的影响*

何兴道[†] 夏健 史久林 刘娟 李淑静 刘建安 方伟

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

(2010年11月14日收到;2010年12月4日收到修改稿)

本文从理论和实验上分析了水的衰减系数及有效增益长度对受激布里渊散射(SBS)输出能量的影响。实验结果表明,衰减系数越小,SBS输出能量越高。由于脉宽压缩效应,当入射光能量足够高并且有效增益长度相对较长时,SBS易获得高能量而形成极高的峰值功率。一旦这种峰值功率超过受激拉曼散射(SRS)或者二阶SBS阈值,SBS就会作为一个新的激发源去激发SRS或者二阶SBS,从而消耗掉部分SBS的能量,所以会出现后向有效增益长度越长,SBS的输出能量越低的现象。

关键词: 受激布里渊散射, 衰减系数, 有效增益长度, 脉宽压缩

PACS: 42.65.Dr, 42.65.Es

1. 引言

受激布里渊散射(SBS)由于具有相位共轭和脉宽压缩效应以及高能量反射率等特点,可以用来消除光学相位畸变,提高光束质量,因此多年来一直受到广泛的研究^[1-5]。当抽运光强度超过SBS阈值强度^[6]时,SBS就会被激发并放大,由于脉宽压缩效应,会达到一个极高的峰值功率。而这种极高的峰值功率又可能激发二阶SBS、受激拉曼散射(SRS)等其他非线性过程,会消耗部分SBS的能量。另一方面,SBS的输出能量也会受到介质增益系数、激光相干长度、有效增益长度、激光发散角以及透镜焦距等各种因素的制约^[6,7]。根据文献[8]报道,当增益系数相对较大或者聚焦长度相对较短时,激光输出能量会被SBS钳制在一个相对较小的值,从而起到光限幅的作用。他们的研究主要是针对增益系数及不同透镜的聚焦长度对SBS及激光输出能量的影响,但是对同一聚焦长度不同后向有效增益长度并没有进一步的说明。本文选用不同衰减系数^[9]的水作为实验介质,对不同衰减系数及不同有效增益长度下的SBS作了详细的分析。实验结果表明,衰

减系数及后向有效增益长度对SBS输出能量有很大影响。

2. 实验装置

实验装置如图1所示。激光器为种子注入式Nd:YAG调Q脉冲激光器(Continuum Powerlite Precision Plus),脉宽为8 ns,重复频率10 Hz,线宽宽带为30GHz,窄带为90MHz,激光发散角0.45 mrad,经倍频后得到532 nm单脉冲能量约为1.3 J的脉冲光。激光器输出竖直偏振光,经过半波片后变成水平偏振并以高透射率透过偏振片P,然后被分成两部分。反射光用功率计D₁(Coherent Fieldmate)测量,用来监测入射光功率;透射光经过四分之一波片后变成圆偏振,圆偏振光经过透镜组L₁,L₂后会聚到长为2.4 m的水槽。由相位共轭特性,激发的SBS会沿入射光反向传播,并再次经过四分之一波片变成竖直偏振光被P以高反射率反射到探测器D₂(Molelectron PM 500A)。

为了保证入射光以同一发散角会聚到水槽中得到不同的后向有效增益长度,透镜L₁,L₂位置保持固定不变,只水平移动水槽。关于水的衰减系数

* 国家自然科学基金(批准号:41066001)和江西省自然科学基金(批准号:2009gzw0024)资助的课题。

[†] E-mail: xingdaohe@126.com

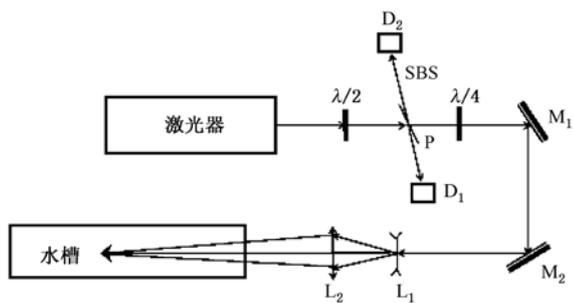


图1 SBS 测量原理图($\lambda/2$:半波片; $\lambda/4$:四分之一波片;P:偏振片; M_1, M_2 :全反镜; D_1, D_2 :功率计; L_1, L_2 :透镜组)

的测量请见文献[9], 文章中有详细的理论推导及实验说明.

3. 实验结果及分析

3.1. 理论分析

水中声子的寿命约为 1 ns, 对应的增益长度在厘米量级, 这就意味着在激光相干长度内当聚焦长度较短时, 后向增益长度也相对较短, SBS 接近于瞬态, 在瞬态情况下 SBS 阈值强度可表示为^[10]

$$I_{\text{th}} \geq \frac{2}{4g_B \tau_B v_p} + \frac{\alpha}{g_B}, \quad (1)$$

式中, g_B 为布里渊增益系数, τ_B 为介质中声子寿命, v_p 为介质中的声速, α 为水的衰减系数.

从(1)式中可以看出, 在瞬态情况下, SBS 阈值强度只跟介质本身的属性有关. 水中的 g_B, τ_B, v_p 可以认为是常数, 衰减系数越大, SBS 的阈值强度越高. 只有当入射激光强度超过 SBS 阈值强度的情况下, SBS 才有可能被激发, 并在后向传输过程中不断抽取入射光能量而被放大.

另一方面, 用系统的放大增益因子 G 来表征

SBS 的能量反射率^[11]

$$G = g_B I_L L_{\text{eff}}, \quad (2)$$

式中, $g_B = (4\pi^2 \gamma^2) / (nc\lambda_0^2 \rho_0 v_p \Gamma)$ 为布里渊增益系数(γ 为电致伸缩系数; n 为介质折射率; c 为光速; λ_0 为入射光波长; ρ_0 为介质密度; v_p 为介质中的声速; Γ 为声子混灭速率), 对于特定的介质来说, g_B 为常数; L_{eff} 为有效增益长度; I_L 为入射光在焦点附近的功率密度^[12],

$$I_L = \frac{E}{\pi \tau_p \omega_0^2} = \frac{4E}{\pi \tau_p f^2 \theta^2}, \quad (3)$$

式中, E 为入射光能量; τ_p 为激光脉宽; ω_0 为高斯光束腰束直径; f 为聚焦长度; θ 为远场发散角.

根据图 1 所示, 在透镜 L_1, L_2 位置固定不变的情况下, f, θ 为常量, G 只与有效增益长度 L_{eff} 有关, 有效增益长度越长, 系统的放大增益因子越大. 为了更好的理解上述理论, 相关原理图如图 2 所示.

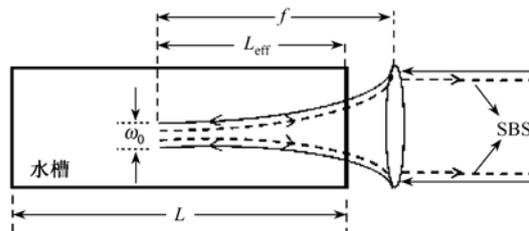


图2 SBS 理论模型

从图 2 中可以看出, 当前后水平移动水槽时, ω_0, θ, f 均保持不变, 只有有效增益长度 L_{eff} 会发生变化.

3.2. 实验结果

实验选用 5 种不同衰减系数的水, 有效增益长度分别为 0.8 m, 1.2 m, 1.6 m, 2.0 m. 实验结果如图 3 所示.

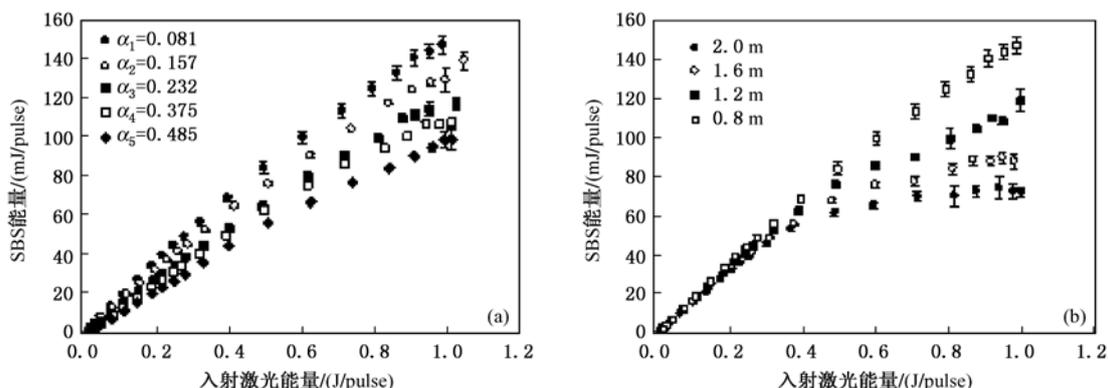


图3 SBS 能量随入射激光能量的变化 (a) 同一长度不同衰减系数;(b) 同一衰减系数不同长度

图 3(a)所示为聚焦长度在 0.8 m 时不同衰减系数下 SBS 能量随入射光功率的变化. 从图可看出,水的衰减系数 α 越小, SBS 能量线斜率越大,当衰减系数为 0.081 m^{-1} 时, SBS 能量随入射光能量几乎成线性增长趋势. 这主要是因为水的衰减系数影响了 SBS 的阈值强度; 衰减系数越小, SBS 阈值越小,当入射光强度超过阈值强度时, SBS 就会被立即激发并大量抽取入射光的能量而迅速累积到极强的值. 图 3(b)是在衰减系数为 0.081 m^{-1} 时不同后向有效增益长度下 SBS 随入射光的能量变化图. 从图中可以看出,当入射光能量超过 0.4 J/pulse 时, 1.2 m, 1.6 m, 2.0 m 三个长度下的 SBS 能量由线性增长逐渐变平缓; 当入射光能量超过 0.9 J 时, 随着长度的增加能量会出现下降的趋势. 这种有效增益长度越长, SBS 能量反而越低的现象表面上看并不符合理论分析的结果, 这主要是因为当入射光能量超过 SBS 阈值时, 由于脉宽压缩效应, 有效增益长度越长, SBS 越容易获得足够高的能量而达到一个极强的峰值功率, 当这个峰值功率超过二阶 SBS 或者 SRS 的阈值时, SBS 就会立即激发二阶 SBS 或者 SRS 从而消耗大量的能量. 因此, 当入射光能量足够高时, 随着后向有效增益长度的增加, SBS 能量会降低. 这种变化趋势, 我们也可以从能量比的关系看出, 如图 4 所示.

图 4(a)显示有效增益长度为 0.8 m 时, 不同衰减系数下 SBS 与入射光的能量比随入射光能量的变化. 从图中可以看出, 入射光能量在 0—0.15 J 范围内, 能量比呈线性增长趋势, 这对应于 SBS 的能量累加过程; 当入射光能量在 0.2—0.35 J 时, 能量比几乎不变; 当能量超过 0.35 J 并且衰减系数较小时, 能量比会出现下降的趋势. 图 4(b)为衰减系数是 0.081 m^{-1} 时不同有效增益长度下 SBS 与入射光的能量比. 从图可看出, 当入射光能量超过 0.2 J 时, 随着有效增益长度的增加, 能量比值出现下降趋势.

图 4 所显示出的能量比表现出不稳定的现象, 是因为当水的线性衰减系数比较小或者后向有效增益长度较长时, 原本稳定发生的 SBS 在此时能量受到了扰动. 我们认为, 这是由于 SBS 的能量积累到足够强从而激发出 SRS、二阶 SBS 等其他非线性效应. 我们在实验过程中也观察到这些非线性效应, 如图 5, 图 6 所示.

图 5 是衰减系数为 0.081 m^{-1} , 入射激光能量

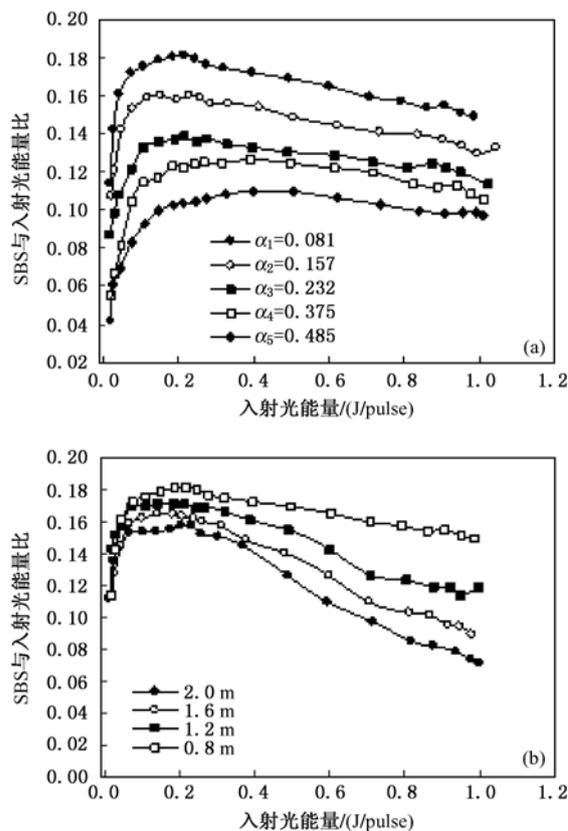


图 4 SBS 与入射光能量比随入射光能量的变化

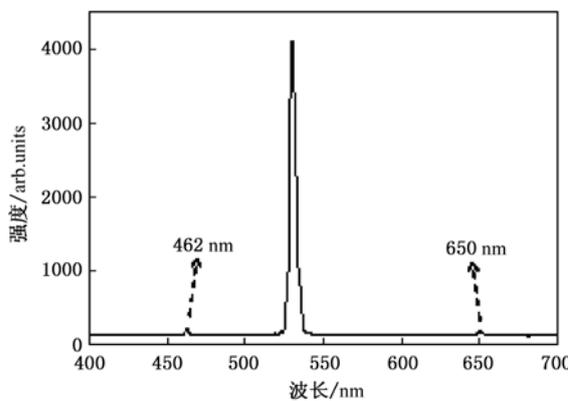


图 5 后向散射光谱图

为 0.23 J, 后向有效增益长度为 1.2 m 时光谱仪所测得的后向散射光谱. 光谱中间最强的峰包括 SBS 及瑞利散射(由于 SBS 频移只有 7.5 GHz, 而光谱仪的光学分辨率为 0.75 nm, 因此, 很难将二者分辨开); 左右两个较低的峰分别是后向 SRS (BSRS) 的反斯托克斯峰(462 nm)和斯托克斯峰(650 nm). 需要说明的是, 这里的 BSRS 可能包括两部分: 一部分是由入射光激发的 BSRS, 另外一部分则是由 SBS 激发的前向 SRS (FSRS), 两者同向传播. 由于 SBS

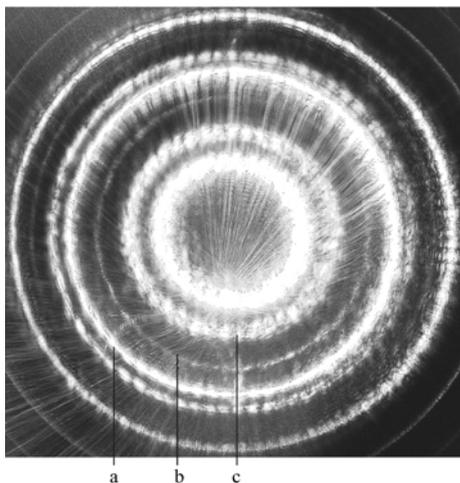


图6 后向散射的F-P频谱图(a为与入射光同频率的瑞利散射;b为一阶SBS激发的瑞利散射;c为二阶SBS)

的线宽在百兆赫兹量级,入射光窄带宽为 90 MHz,而 SRS 的线宽约为 100 GHz,因此,SBS 和入射光激发的 SRS 的谱线几乎重叠,在现有的实验条件下我们很难分辨出来.需要说明的是,这里的 BSRS 可能包括两部分:一部分是由入射光激发的 BSRS,另外一部分则是由 SBS 激发的前向 SRS(FSRS),两者同向传播.由于 SBS 的线宽在百兆赫兹量级,入射光窄带宽为 90 MHz,而 SRS 的线宽约为 100 GHz,因

此,SBS 和入射光激发的 SRS 的谱线几乎重叠,在现有的实验条件下我们很难分辨出来.需要说明的是,BSRS 的光强要比 SBS 低大约两个量级^[13,14],而且随着焦点距离的增加,SRS 的能量衰减也相对较大(与蓝绿光相比波长较长的红光在水中的衰减相对较大),我们实际测量的 SBS 能量中可能含有大约 1% 能量的 BSRS.

图6是入射光能量为 0.11 J,有效增益长度为 1.5 m 时 ICCD 接收到的 F-P 干涉频谱图.图中 a 是与入射光频率相同的瑞利散射,b 是一阶 SBS 激发的瑞利散射,c 是由一阶 SBS 激发的二阶 SBS.

4. 结 论

实验研究了水的衰减系数及后向有效增益长度对 SBS 输出能量的影响,并进行了相关的理论分析.实验结果表明,SBS 输出能量与衰减系数成反比,衰减系数越小,SBS 输出能量越高;由于脉宽压缩效应,当入射激光强度足够强时,有效增益长度越长,SBS 越容易达到一个极强的峰值功率,当峰值功率超过 SRS 或者二阶 SBS 的阈值时,就会激发二阶 SBS 等其他非线性过程,从而消耗掉大量的 SBS 能量,因此会出现有效增益长度越长,SBS 输出能量越低的现象.

- [1] Wang X H, Lü Z W, Lin D Y, Wang C, Zhao X Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1734
- [2] Yang J, Lü Z W, He W M, Lü Y L 2005 *Chin. Phys.* **14** 343
- [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] Shi J W, Li G X, Gong W P, Bai J H, Huang Y, Liu Y N, Li S J, Liu D H 2007 *Appl. Phys. B* **86** 177
- [5] Ouyang M, Shi J W, Zhao L H, Chen X D, Jing H M, Liu D H 2008 *Appl. Phys. B* **91** 381
- [6] 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
- [7] Gong H P, Lü Z W, Lin D Y, Lü Y L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2735 (in Chinese) [龚华平、吕志伟、林殿阳、吕月兰 2006 物理学报 **55** 2735]
- [8] Hasi W L J, Lu Z W, Gong S, Lin D Y, He W M, Fan R Q 2008 *Appl. Phys. B* **92** 599
- [9] Liu J, Bai J H, Ni K, Jing H M, He X D, Liu D H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 260 (in Chinese) [刘娟、白建辉、倪凯、景红梅、何兴道、刘大禾 2008 物理学报 **57** 260]
- [10] Shi J, Chen X, Ouyang M, Liu J, Liu D 2009 *Appl. Phys. B* **95** 657
- [11] Boyd R W, Rzazewski K, Narum P 1990 *Phys. Rev. A* **42** 5514
- [12] Yang J X, Meng S X 1992 *Acta Opt. Sin.* **12** 233 (in Chinese) [杨镜新、孟绍贤 1992 光学学报 **12** 233]
- [13] Shi J, Ouyang M, Chen X, Liu B, Xu Y, Jing H, Liu D 2009 *Opt. Lett.* **34** 977
- [14] Liu D, Shi J, Ouyang M, Chen X, Liu J, He X 2009 *Phys. Rev. A* **80** 033808

Influences of effective gain length and attenuation coefficient on output energy of stimulated Brillouin scattering in water*

He Xing-Dao[†] Xia Jian Shi Jiu-Lin Liu Juan Li Shu-Jing Liu Jian-An Fang Wei

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

(Received 14 November 2010; revised manuscript received 4 December 2010)

Abstract

In this paper, the effects of attenuation coefficient and effective gain length on output energy of stimulated Brillouin scattering (SBS) in water are investigated theoretically and experimentally. The experimental results indicate that the smaller the attenuation coefficient, the higher the output energy of SBS is. When the energy of incident laser is very high and the effective gain length is long enough, the SBS may obtain high enough energy thereby reach an extremely strong peak power due to the pulse compression; once it exceeds the threshold of SRS or second-order SBS, the SBS is able to excite an SRS or a second-order SBS as a new source and consumes a part of its own energy. Therefore, the longer the effective gain length, the lower the output energy of SBS is.

Keywords: stimulated Brillouin scattering, attenuation coefficient, effective gain length, pulse compression

PACS: 42.65. Dr, 42.65. Es

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41066001) and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (Grant No. 2009gzw0024).

[†] E-mail: xingdaohe@126.com