

水体温度对受激布里渊散射时间相干性的影响

许锦^{1,2}, 郭洋宁², 罗宁宁², 李淑静², 史久林^{1,2,*}, 何兴道^{1,2,**}

¹南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;

²南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063

摘要 为了研究介质参数对受激布里渊散射(SBS)时间相干性的影响,提出一种基于迈克耳孙干涉仪的测量及验证方法。理论上分析温度对 SBS 时间相干性影响的物理机制;实验上测量并分析水体温度对 SBS 时间相干性的影响。研究表明:SBS 时间相干性与水体温度直接相关,随着温度的降低,SBS 的时间相干性变差;温度一定时,当相干光的光程差增大到一定值后,对应的 SBS 相干脉冲波形不再是准高斯型。

关键词 散射;受激布里渊散射;时间相干性;复相干度;温度

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0929001

Influence of Water Temperature on Temporal Coherence of Stimulated Brillouin Scattering

Xu Jin^{1,2}, Guo Yangning², Luo Ningning², Li Shujing², Shi Jiulin^{1,2,*}, He Xingdao^{1,2,**}

¹Key Laboratory of Nondestructive Test, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China;

²Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract A measurement and verification method based on Michelson interferometers is proposed for investigating the influence of medium parameters on the temporal coherence of stimulated Brillouin scattering (SBS). The physical mechanism behind the influence of temperature on the temporal coherence of SBS is presented theoretically, and the influence of water temperature on the temporal coherence of SBS is measured and analyzed experimentally. The research results indicate that the temporal coherence of SBS is directly related to water temperature. As the temperature decreases, the temporal coherence of SBS deteriorates. When the temperature is fixed but the optical path difference of coherent light increases to a certain value, the corresponding coherent pulse waveform of SBS is no longer quasi-Gaussian.

Key words scattering; stimulated Brillouin scattering; temporal coherence; complex degree of coherence; temperature

OCIS codes 290.5900; 190.2640; 290.5855

1 引 言

受激布里渊散射(SBS)是一种典型的非线性光散射效应^[1-2],在各个领域具有广泛应用。如其脉宽压缩特性有利于提高单纵模激光的光束质量,可用于产生超短、高能脉冲^[3-5];基于 SBS 的高分辨率雷达系统可用于水下目标探测以及水中的声速和温度

等参数测量^[6-9];其相位共轭特性不仅能消除光束波前畸变,同时对相干光束的整合及激光的放大具有重要作用^[10-12],布里渊散射过程中的光子-声子耦合效应可实现光子-声子之间轨道角动量的可控转换^[13]。时间相干性是光学研究的基础问题之一,SBS 相干时间影响相干长度,而 SBS 的相干长度体现了 SBS 产生的并被放大的实际增益长度^[14],因此

收稿日期:2019-11-14;修回日期:2020-01-04;录用日期:2020-01-17

基金项目:国家自然科学基金(41666004,41776111,41576033,61865013,61665008)、江西省自然科学基金(20171BAB202039,20161BBH80036)、江西省杰出青年基金(20171BCB23053)、南昌航空大学研究生创新专项资金(YC2018-S377)

* E-mail: jiulinshi@126.com; ** E-mail: xingdaohe@126.com

对 SBS 时间相干性的研究尤为重要。早期, Bespalov 等^[15]讨论了激光在液体中发生的 SBS 可有效压缩脉冲的现象, 压缩后的 SBS 信号具有较高的时间和空间相干性, 但并没有给出影响 SBS 相干性的相关介质参数。1995 年, Wait 等^[16]利用光纤马赫-曾德尔干涉仪测量了光纤中不同泵浦能量下布里渊散射的相干长度, 并结合相干长度与线宽的关系得出了对应的布里渊散射线宽。在前期工作中, 本课题组^[17]发现水中 SBS 时间相干性会随线宽压缩程度变化, SBS 的脉宽压缩率和时间相干性不能同时达到最佳值。

为了研究水体固有参数(温度)与 SBS 时间相干性的关系, 本文首先从 SBS 脉宽及线宽温度依赖特性的角度考虑了温度对 SBS 时间相干性的影响, 通过实验测得的干涉图样和条纹可见度, 得到同一温度下 SBS 分出的两束相干光的光程差与 SBS 时间相干性的关系。在此基础上对 SBS 时间相干性和复相干度随温度的变化规律进行讨论, 并比较分析了不同光程差时的 SBS 的脉冲波形。

2 理论分析

2.1 SBS 的理论基础

布里渊散射可根据入射光强度的不同分为自发布里渊散射和受激布里渊散射。自发布里渊散射产生的主要原因是: 介质内分子热运动产生的较弱声波场引起介质内部折射率发生周期性调制, 当入射光在介质中传播时, 衍射作用产生频率为斯托克斯和反斯托克斯的背向散射光。当入射光泵浦功率增加到一定值时, 介质中由电致伸缩效应产生的较强声波场加强了这种衍射, 从而产生受激布里渊散射。

布里渊散射的特征参数主要包括频移、线宽及脉宽等。其中频移和线宽与水体参数的关系^[18-19]可表示为

$$\nu_B(S, T) = \frac{2n(S, T)}{\lambda} \nu_a(S, T) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1)$$

$$\Gamma_B = \frac{1}{\rho} \left[\frac{4}{3} \eta_s + \eta_B + \frac{\mu}{C_P} (C - 1) \right] k_a^2, \quad (2)$$

式中: ν_B 和 Γ_B 分别为布里渊散射的频移和线宽; n 、 ρ 、 S 及 T 分别为介质的折射率、密度、盐度及温度; ν_a 为水中声速; θ 为散射角; λ 为泵浦光波长; η_B 和 η_s 分别为介质的体黏滞系数和剪切黏滞系数; μ 为热导率; 绝热系数 $C = C_P/C_V$, C_P 和 C_V 分别为定压热容和定体热容; k_a 为声波的波矢量大小。因此

水体参数的变化将直接影响布里渊散射的频移和线宽。SBS 脉冲的建立时间由声子寿命决定, 声子寿命与介质黏滞系数的关系^[20]可表示为

$$\tau_B = \frac{\rho c^3}{\eta \omega^2 n^2}, \quad (3)$$

式中: η 为介质黏滞系数; ω 为入射光频率; c 为介质中的光速。温度越高, 黏滞系数越小, 声子寿命越长, SBS 脉冲建立过程缓慢, 脉宽较大; 温度越低, 黏滞系数越大, 声子寿命越短, SBS 脉冲迅速建立, 脉宽压缩效应明显。

脉宽压缩特性是 SBS 的重要特性之一, 其基本原理为: 泵浦光入射到介质池中, 当功率密度超过 SBS 阈值时, 电致伸缩效应产生后向传输的斯托克斯光, 其脉冲前沿与前向传输的激光脉冲相遇, 激光脉冲能量通过材料共振耦合到斯托克斯脉冲中, 由于泵浦能量不足, 斯托克斯脉冲前沿得到充分放大, 而后沿放大不明显。因此, 激光脉冲能量几乎全部转移到一个很窄的背向脉冲中, 从而实现脉宽压缩。

2.2 时间相干性

光波在一定光程差下能发生干涉的事实表明了光波的时间相干性, 相干长度是干涉特性的一个重要参量, 其大小与最大光程差相等。两者的关系^[21]可表示为

$$L = c_0 \times \Delta t = \Delta_{\max}, \quad (4)$$

式中: L 为相干长度; c_0 为真空中的光速; Δt 为相干时间; Δ_{\max} 为最大光程差。根据波长宽度与谱线宽度之间的关系, 并结合最大光程差的波长表示形式, 最终可得到谱线宽度与相干时间的关系, 即

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta \nu}, \quad (5)$$

式中: $\Delta \nu$ 为谱线宽度。从上述分析可知, 光通过相干长度所需的时间称为相干时间, 相干时间是光的时间相干性的量度, 它决定光波的谱线宽度。因此, 谱线宽度的变化将会影响光波的时间相干性。

研究光束的相干性对保持光束单色性、高亮度及高方向性等优点具有重要意义。结合前期的研究成果可知, 温度影响 SBS 的脉宽和线宽, 同时 SBS 线宽与脉宽之间满足傅里叶变换关系^[22]。因此, 温度对 SBS 时间相干性造成的影响是: 随着温度的降低, SBS 的脉宽被压缩, 结合脉宽与线宽的傅里叶变换关系可知, SBS 线宽发生相应的变化, 进而引起 SBS 相干时间的变化, 从而 SBS 相干长度发生改变, 最终 SBS 时间相干性发生变化。

不同谱线宽度的光波具有不同的相干长度, 光

波的谱线宽度使其条纹可见度在相干长度内随光程差的增加而逐渐降低。则在同一光程差位置,条纹可见度的改变表征了相干长度的变化,进而同一光程差处干涉条纹可见度变化可表征温度对 SBS 时间相干性的影响。

2.3 复相干度

实际光源在时间、空间上均为部分相干,某点的干涉效应虽然取决于产生干涉的两光源的互相干函数,但它的大小除了与相干性有关,还与光场强度有关。为消除光场强度的影响,定义归一化互相干函数(复相干度)描述这种一般相干性。在迈克耳孙干涉系统中,当两束光相干时,互相干函数则变为自相干函数^[23-24],表示为

$$\Gamma_{\tau} = \langle u(t + \tau)u^*(t) \rangle, \quad (6)$$

式中: τ 为光程差所对应的时间差; $u(t)$ 为关于光扰动的时间位置 and 时间的实际标量函数的简写; $\langle \rangle$ 为自相关运算。假设光场在广义上是稳定统计的,则可由自相干函数得出复相干度^[25]:

$$\gamma_{\tau} = \frac{\Gamma_{\tau}}{\Gamma(0)}, \quad (7)$$

此时的复相干度即为复时间相干度。干涉后任意一点的光强可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta |\gamma_{\tau}|, \quad (8)$$

式中: I_1 和 I_2 为两束光的光强。则条纹可见度与复相干度的模之间的关系表示为

$$K = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma_{\tau}|. \quad (9)$$

由于实验中分束镜的分光比为 1:1,则 $I_1 = I_2$,因此复相干度的模等于干涉条纹可见度,则可根据不同温度下干涉条纹可见度的变化得到温度对复相干度的影响。

3 实验测量

图 1 为实验测量原理图。激光器为 Nd:YAG 种子注入式脉冲激光器,工作波长为 532 nm,脉冲宽度为 8 ns,重复频率为 10 Hz,单纵模线宽为 90 MHz。输出的竖直偏振方向的泵浦光经过半波片后变为水平偏振光,并以布儒斯特角入射至偏振耦合镜(PBS,对水平偏振光具有高透射率,对竖直偏振光具有高反射率);经分光后透过四分之一波片变为圆偏振光,随后通过聚焦系统聚焦到水池中。水温用一个温度循环机控制,控制精度是 0.02 °C,透射光被衰减器吸收。当泵浦光能量达到 SBS 阈值时,后向 SBS 被激发,散射信号经四分之一波片后变为竖直偏振光,该竖直偏振光被 PBS 及反射镜 R1 和 R2 反射后进入迈克耳孙干涉系统。水温用一个温度循环机控制,控制精度是 0.02 °C,透射光被衰减器吸收。当泵浦光能量达到 SBS 阈值时,后向 SBS 被激发,散射信号经四分之一波片后变为竖直偏振光,该竖直偏振光被 PBS 及反射镜 R1 和 R2 反射后进入迈克耳孙干涉系统。

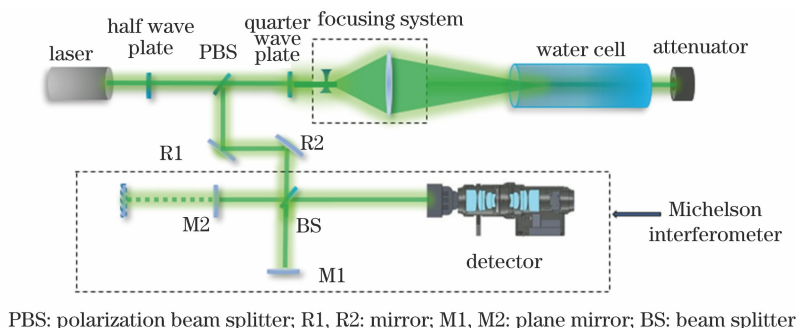


图 1 实验测量原理图

Fig. 1 Schematic of experimental measurement

实验过程中,通过调节干涉仪系统的平面镜 M2 来改变干涉臂的长度,从而改变两束光的光程差,以获得干涉图样,并用 CCD 相机记录 SBS 的干涉条纹。干涉条纹测量结束后,在 CCD 位置处放置示波器,用以测量干涉后的 SBS 脉冲波形。实验中,M2 从与 M1 等光程差位置处开始移动,即光程差从 0 m 开始逐渐增大,直到干涉图样上的干涉条纹消失。对 CCD 所采集的干涉图像进行光强分析,得到不同级次干涉条纹的光强信息,结合干涉条纹光强与条纹可见度的关系,进而确定 SBS 干涉条纹

可见度,对所有条纹可见度进行归一化处理,得出温度和光程差对条纹可见度的影响。

4 实验结果

4.1 水中 SBS 的时间相干性

实验过程中由布里渊散射系统产生的 SBS 并不是绝对的单色,它的线宽会使干涉条纹可见度随光程差的增大而降低。图 2 为温度为 15 °C 的纯水产生的 SBS 在不同光程差时所对应的干涉图样。由图 2 可知,0 m(等光程)处的干涉条纹最清晰,

0.6 m处的干涉条纹消失,随着光程差的增加,SBS干涉现象逐渐变差。为了得到干涉条纹可见度与光程差的关系,用 CCD 采集不同光程差时的干涉图像,根据干涉条纹的光强信息确定条纹可见度,进而

得出不同光程差所对应的条纹可见度,如图 3 所示。可以看出,在温度为 15 °C 时,随着光程差的增加,干涉条纹可见度逐渐降低,最大光程差即为该温度下的相干长度。

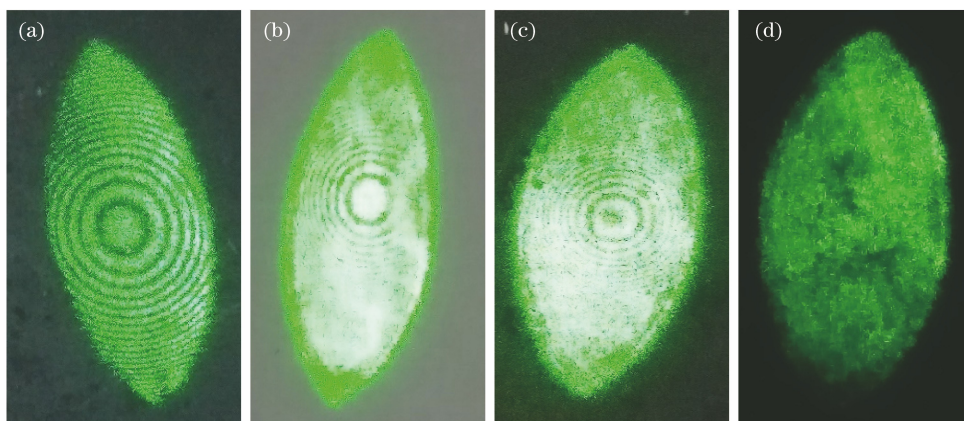


图 2 不同光程差下的 SBS 干涉图样。(a) 0 m; (b) 0.2 m; (c) 0.4 m; (d) 0.6 m

Fig. 2 SBS interference images under different optical path differences. (a) 0 m; (b) 0.2 m; (c) 0.4 m; (d) 0.6 m

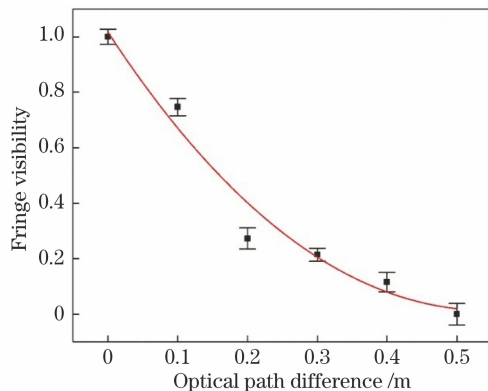


图 3 不同光程差下的干涉条纹可见度

Fig. 3 Fringe visibility under different optical path differences

产生这种现象的原因是某一点的干涉条纹强度分布取决于两光波在该点的光程差或相位差。某点干涉条纹强度可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(k\Delta), \quad (10)$$

式中: k 为任意常数; Δ 为光程差。如果两束光的光程差发生变化,其相位差也发生变化,因此随着两相干光光程差的增加,干涉条纹可见度逐渐降低。另一方面,由于光源有一定的频带宽度,且复包络相干性随光程差的增大而下降^[26],因此随着 M2 的移动,干涉条纹逐渐模糊,当光程差超过相干长度时,干涉条纹消失。

4.2 水体温度对 SBS 时间相干性的影响

图 4 为光程差为 0.3 m 时,水体温度为 5 ~ 30 °C 时的 SBS 干涉图样。从图 4 看出,随着温度的降低,SBS 干涉条纹逐渐模糊,5 °C 时干涉条纹完全消失。光程差为 0.3 m,温度分别为 30 °C 和 5 °C 时 SBS 相干后的脉冲波形如图 5 所示,可看出 30 °C 下相干后的脉冲波形仍然是准高斯型,但 5 °C 下的脉

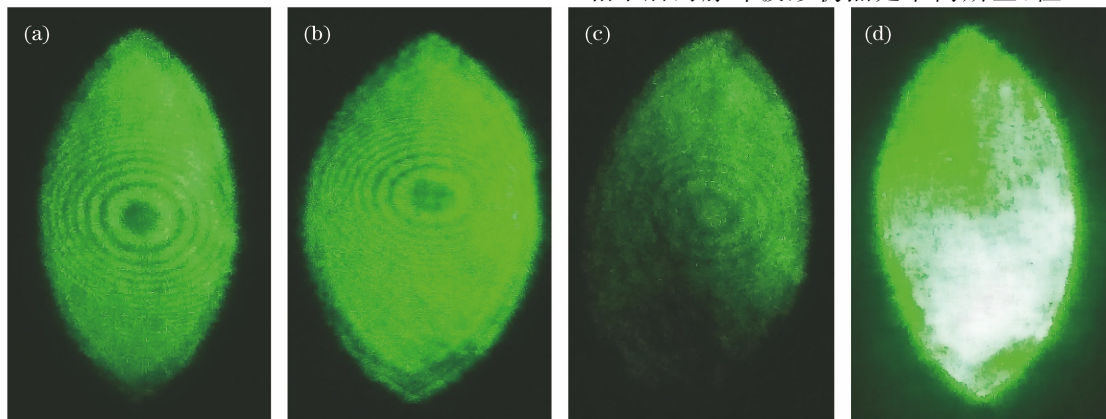


图 4 不同温度下的 SBS 干涉图样。(a) 30 °C; (b) 20 °C; (c) 10 °C; (d) 5 °C

Fig. 4 SBS interference images under different temperatures. (a) 30 °C; (b) 20 °C; (c) 10 °C; (d) 5 °C

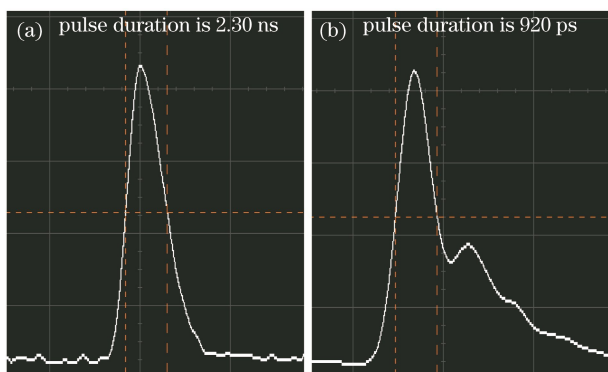


图 5 不同温度下 SBS 干涉后的脉冲波形。
(a) 30 °C; (b) 5 °C

Fig. 5 Pulse waveforms after SBS interference under different temperatures. (a) 30 °C; (b) 5 °C

冲波形发生畸变。由上述讨论可知,温度越高,SBS的时间相干性越好。为减小光斑大小对条纹可见度的影响,实验中在分束镜前加一凸透镜,使干涉光源变为准单色点光源,以形成更好的非定域干涉,从而能观察到更清晰的干涉条纹。

为了量化温度对 SBS 条纹可见度的影响,图 6 给出了光程差为 0.3 m 时,不同温度下的干涉条纹可见度,可以看出,随着温度的升高,SBS 干涉条纹可见度逐渐增加。

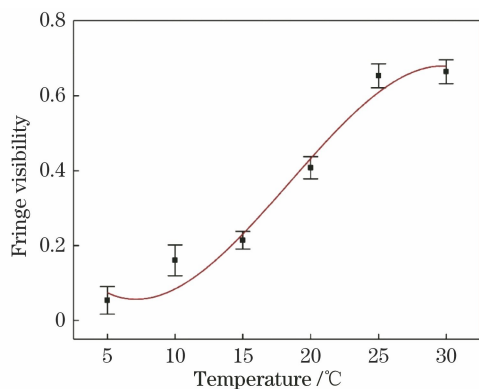


图 6 条纹可见度随温度的变化

Fig. 6 Fringe visibility versus temperature

为验证上述实验结果,实验测量了 5~30 °C 时 SBS 进入迈克耳孙系统前脉宽的变化,如图 7 所示,脉宽随温度的降低而减小,从而对应的线宽逐渐增加,相干长度变小,SBS 时间相干性变差,与上述实验结果一致。

为了更好地理解光程差和温度对 SBS 干涉后脉冲波形的影响,图 8 和图 9 分别给出了不同条件下干涉条纹的时序波形图。当水温为 10 °C,光程差分别为 0.1 m 和 0.4 m 时干涉图样以及对应相干脉冲波形如图 8 所示。从图 8 可以看出,光程差较小时,干涉

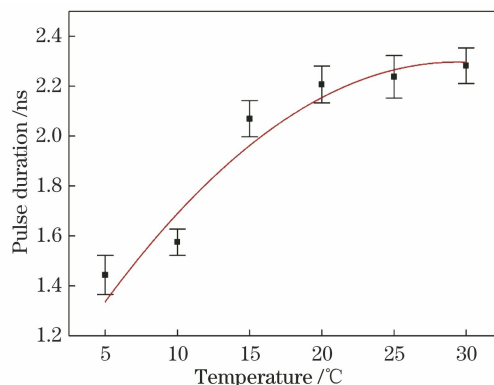


图 7 SBS 脉宽随温度的变化

Fig. 7 Pulse duration of SBS versus temperature

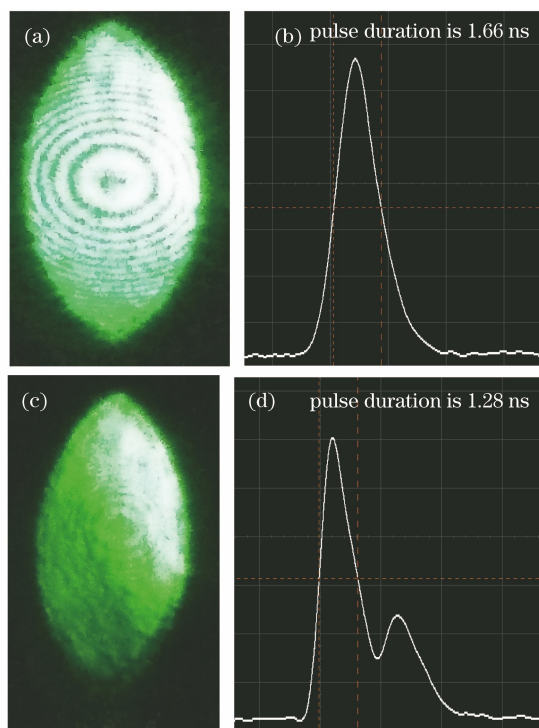


图 8 $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同光程差对应的干涉图样及脉冲波形。(a) 0.1 m 处干涉图样;(b) 0.1 m 处脉冲波形;(c) 0.4 m 处干涉图样;(d) 0.4 m 处脉冲波形

Fig. 8 Interference images and pulse waveforms under different optical path differences when T is 10 °C. (a) Interference image at 0.1 m; (b) pulse waveform at 0.1 m; (c) interference image at 0.4 m; (d) pulse waveform at 0.4 m

条纹更清晰,相干后的波形是准高斯型;当 SBS 干涉条纹可见度较差时,对应相干波形主峰被压缩。当水温为 20 °C,光程差分别为 0.1 m 和 0.4 m 时干涉图样以及对应相干脉冲波形如图 9 所示。将图 8 和图 9 进行比较,光程差为 0.1 m 时,20 °C 下的干涉条纹效果明显比 10 °C 下的效果好,但在光程差为 0.4 m 时,20 °C 和 10 °C 下的脉冲波形均被压缩。

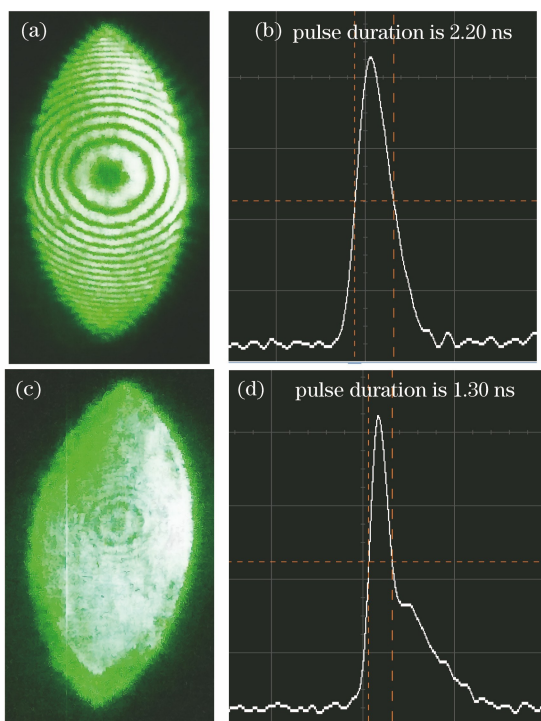


图 9 $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同光程差对应的干涉图样及脉冲波形。(a) 0.1 m 处干涉图样;(b) 0.1 m 处脉冲波形;(c) 0.4 m 处干涉图样;(d) 0.4 m 处脉冲波形

Fig. 9 Interference images and pulse waveforms under different optical path differences when T is $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) Interference image at 0.1 m; (b) pulse waveform at 0.1 m; (c) interference image at 0.4 m; (d) pulse waveform at 0.4 m

4.3 水体温度对 SBS 复相干度的影响

由理论分析可知,复相干度的模等于 SBS 干涉条纹可见度。表 1 为光程差为 0.3 m 时,不同温度对应的复相干度;表 2 为水温为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同光程差对应的复相干度。可以看出:随着温度的增加,SBS 的复相干度逐渐增加;随着光程差的增加,SBS 的复相干度逐渐减小。

表 1 $\Delta=0.3\text{ m}$ 时,不同温度下的复相干度

Table 1 Complex degree of coherence at different temperatures when Δ is 0.3 m

$T / ^{\circ}\text{C}$	5	10	15	20	25	30
Complex degree of coherence	0.05	0.16	0.21	0.41	0.65	0.66

表 2 $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同光程差的复相干度

Table 2 Complex degree of coherence at different optical path differences when T is $15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Δ / m	0	0.1	0.2	0.3	0.4
Complex degree of coherence	1.00	0.75	0.27	0.21	0.12

5 结 论

基于迈克耳孙干涉仪,研究了水中 SBS 的时间相干性。通过调节水体温度和相干光的光程差,分析不同温度及光程差下的干涉条纹可见度和相干后的脉冲波形,研究了温度和光程差对 SBS 时间相干性的影响。在此基础上结合复相干函数,得出了温度和光程差与 SBS 复相干度的关系。研究表明:光程差一定时,温度越高,SBS 的时间相干性越好,干涉条纹可见度增加,复相干度增大;温度一定时,随着光程差的增加,干涉图样条纹可见度逐渐降低,复相干度减小。

参 考 文 献

- [1] Shen Y R. The principles of nonlinear optics [M]. New York: Wiley-Interscience, 1984: 188-192.
- [2] Damzen M J, Vlad V, Mocofanescu A, et al. Stimulated Brillouin scattering: fundamentals and application [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003: 33-36.
- [3] Bai Z X, Wang Y L, Lü Z W, et al. High compact, high quality single longitudinal mode hundred picoseconds laser based on stimulated Brillouin scattering pulse compression [J]. Applied Sciences, 2016, 6(1): 29-37.
- [4] Liu Z H, Li S S, Bai Z X, et al. Stokes duration broadening suppressing in the process of stimulated Brillouin scattering compression [J]. Electro-Optic Technology Application, 2019, 34(2): 17-21. 刘照虹, 李森森, 白振旭, 等. 受激布里渊散射 Stokes 脉冲展宽现象抑制研究 [J]. 光电技术应用, 2019, 34(2): 17-21.
- [5] Liu Z H, Wang Y L, Bai Z X, et al. Pulse compression to one-tenth of phonon lifetime using quasi-steady-state stimulated Brillouin scattering [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23051-23060.
- [6] Yuan D P, Xu J, Liu Z, et al. High resolution stimulated Brillouin scattering lidar using Galilean focusing system for detecting submerged objects [J]. Optics Communications, 2018, 427: 27-32.
- [7] Shi J, Ouyang M, Gong W, et al. A Brillouin lidar system using F-P etalon and ICCD for remote sensing of the ocean [J]. Applied Physics B, 2008, 90(3/4): 569-571.
- [8] Liu D H, Xu J F, Li R S, et al. Measurements of sound speed in the water by Brillouin scattering using pulsed Nd: YAG laser [J]. Optics Communications, 2002, 203(3/4/5/6): 335-340.
- [9] Popescu A, Schorstein K, Walther T. A novel approach to a Brillouin-LIDAR for remote sensing of

- the ocean temperature[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(8): 955-961.
- [10] Zhang Y, Ke X Z, Chen M S. Simulation experiment of wavefront distortion correction in stimulated Brillouin scattering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1122001.
张颖, 柯熙政, 陈明莎. 受激布里渊散射波前畸变校正仿真实验[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1122001.
- [11] Park S, Cha S, Oh J, et al. Coherent beam combination using self-phase locked stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors with a rotating wedge for high power laser generation[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8641-8646.
- [12] Tsubakimoto K, Yoshida H, Miyanaga N. High-average-power green laser using Nd: YAG amplifier with stimulated Brillouin scattering phase-conjugate pulse-cleaning mirror [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12557-12564.
- [13] Zhu Z H, Gao W, Mu C Y, et al. Reversible orbital angular momentum photon-phonon conversion [J]. *Optica*, 2016, 3(2): 212-217.
- [14] Shi J, Chen X, Ouyang M, et al. Theoretical investigation on the threshold value of stimulated Brillouin scattering in terms of laser intensity [J]. *Applied Physics B*, 2009, 95(4): 657-660.
- [15] Bespalov V G, Stasel'Ko D I. Spatial-temporal coherence of Stokes radiation under conditions of stimulated Brillouin scattering compression in liquids [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1985, 15(12): 1649-1651.
- [16] Wait P C, Newson T P. Measurement of Brillouin scattering coherence length as a function of pump power to determine Brillouin linewidth [J]. *Optics Communications*, 1995, 117(1/2): 142-146.
- [17] Zhang L, Zhang D, Shi J L, et al. Investigations on coherence of stimulated Brillouin scattering excited by a single-mode-pulsed laser [J]. *Applied Physics B*, 2012, 109(1): 137-141.
- [18] Shi J L, Tang Y J, Wei H J, et al. Temperature dependence of threshold and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering in water [J]. *Applied Physics B*, 2012, 108(4): 717-720.
- [19] Ge Y, Shi J L, Zhu K X, et al. Determination of bulk viscosity of liquid water via pulse duration measurements in stimulated Brillouin scattering [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(11): 112902.
- [20] Park H, Lim C, Yoshida H, et al. Measurement of stimulated Brillouin scattering characteristics in heavy fluorocarbon liquids and perfluoropolyether liquids [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(6A): 5073-5075.
- [21] Yao Q J. A course in optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989: 38-40.
姚启钧. 光学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 38-40.
- [22] Zhang L, Zhang D, Yang Z, et al. Experimental investigation on line width compression of stimulated Brillouin scattering in water [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(22): 221106.
- [23] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 466-467.
- [24] Goodman J W. Statistical optics [M]. New York: John Wiley & sons, 1985: 158-163.
- [25] Thompson B J, Wolf E. Two-beam interference with partially coherent light [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1957, 47(10): 895-902.
- [26] Jiang X M, Zhao J J, Huang W S. Advanced optics [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1996: 163-186.
蒋秀明, 赵家驹, 黄维实. 高等光学 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 163-186.