

# 利用受激布里渊散射能量反射率测量液体 介质运动黏度方法的研究\*

耿西钊 哈斯乌力吉<sup>†</sup> 郭翔宇 李杏 林殿阳 何伟明 范瑞清 吕志伟<sup>‡</sup>

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150080)

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2010年6月2日收到; 2010年7月30日收到修改稿)

本文提出了一种利用受激布里渊散射(SBS)能量反射率的变化测定不同温度时的液体介质运动黏度的方法. 液体介质的运动黏度随温度而变化, 这导致了介质增益系数和SBS能量反射率的变化, 因此通过SBS能量反射率的变化可测定不同温度时的液体介质的运动黏度. 在Continuum Nd:YAG种子注入激光系统中测定了不同温度时的水的运动黏度并与运动黏度计测定的结果进行了比较. 用本方法获得的不同温度时的水的运动黏度测量值与运动黏度计测量值很接近, 相对误差小于5%.

**关键词:** 受激布里渊散射, SBS能量反射率, 温度, 运动黏度

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Es

## 1. 引言

液体介质的运动黏度是表征液体黏滞性的重要参数, 在流体力学方面有重要作用, 尤其是检验润滑油性能的一种重要参数之一, 因而快速、准确地测定运动黏度具有一定的意义<sup>[1-3]</sup>. 目前对运动黏度的测量主要是应用毛细管黏度计, 这种黏度计结构简单、价格低, 但是, 测量时间长, 不容易清洗, 对测量液体的要求也比较高<sup>[4-6]</sup>.

受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术是获得相位共轭光的重要手段, 与其他非线性相位共轭技术相比, 具有频移小、结构简单、高保真度和高反射率的特点<sup>[7-13]</sup>. 大量研究表明介质对SBS性能有很大的影响<sup>[14-17]</sup>, 目前使用的SBS介质有三类: 即气体、液体和固体. 与气体和固体介质相比, 虽然液体介质具有易挥发、易流动和有毒等缺点, 但是液体介质具有SBS阈值低、布里渊线宽窄、操作简单和价格低廉等优点, 因此目前普遍使用液体SBS介质. 我们研究SBS相位共轭镜时发现, SBS能量反射率随介质的温度而变化, 而导致该变化的主要因素

是介质的运动黏度随温度的变化<sup>[18-21]</sup>, 因此根据SBS能量反射率的变化可测定不同温度时的液体介质的运动黏度, 这对测定液体介质的运动黏度提供了一种新的方案. 本文选用水作为散射介质, 在Continuum Nd:YAG种子注入激光系统中测定了不同温度时的水的运动黏度, 并与运动黏度计测定的结果进行了比较.

## 2. 理论分析

众所周知, 液体具有流动性, 即无固定形状, 在外力作用下其内部产生相对运动. 另一方面, 当液体处在运动状态时, 若液体质点之间存在着相对运动, 则质点间要产生内摩擦力(又称黏滞力)抵抗其相对运动, 这种性质称为液体的黏滞性. 液体黏滞性越大, 流动性就越小. 例如, 从容器中把润滑油倒完要比把水倒完慢得多, 这是因为润滑油流动时内摩擦力比水大的缘故. 在工程中, 通常使用运动黏度这一概念表示液体介质的黏滞性. 所谓运动黏度是指动力黏度 $\mu$ 与密度 $\rho$ 的比值, 即 $\eta = \mu/\rho$ , 单位为 $\text{m}^2/\text{s}$ 或 $\text{cSt}$ (厘斯).

\* 国家自然科学基金(批准号:60778019, 60878005, 20771030), 新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-08-0173)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:HIT.BRET2.20100/2)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: hasiwuliji@sohu.com

<sup>‡</sup> E-mail: zw\_lu@sohu.com

SBS 能量反射率由系统指数增益系数决定, 系统指数增益系数的表达式为<sup>[22-25]</sup>

$$G = gIL, \quad (1)$$

式中  $G$  系统指数增益系数,  $g$  为布里渊介质增益系数,  $I$  为入射光功率密度,  $L$  为有效作用长度. 从方程 (1) 可知, 当固定抽运参数  $I$  和结构参数  $L$  时, 系统指数增益系数  $G$  只与介质增益系数  $g$  有关. 介质增益系数的表达式为<sup>[26-29]</sup>

$$g = \frac{\gamma^2}{4\pi^2 cn^3 v \eta \rho}, \quad (2)$$

式中  $g$  为介质增益系数,  $n$  为介质的折射率,  $\gamma$  为介质的电致伸缩系数(电致伸缩系数与折射率的关系为  $\gamma = (n^2 - 1)(n^2 + 2)/3$ ),  $c$  为真空中的光速,  $v$  为介质的声速,  $\eta$  为介质的运动黏度,  $\rho$  为介质的密度. 从方程(2)可知, 虽然介质的增益系数与其折射率、声速、密度和运动黏度等参数均有关, 但是对液体介质而言, 折射率、声速和密度等参数随温度的变化较小, 唯独运动黏度随温度的变化较大<sup>[30-33]</sup>. 图 1 画出了水的折射率、声速、密度和运动黏度等参数随温度的变化<sup>[34-37]</sup>.

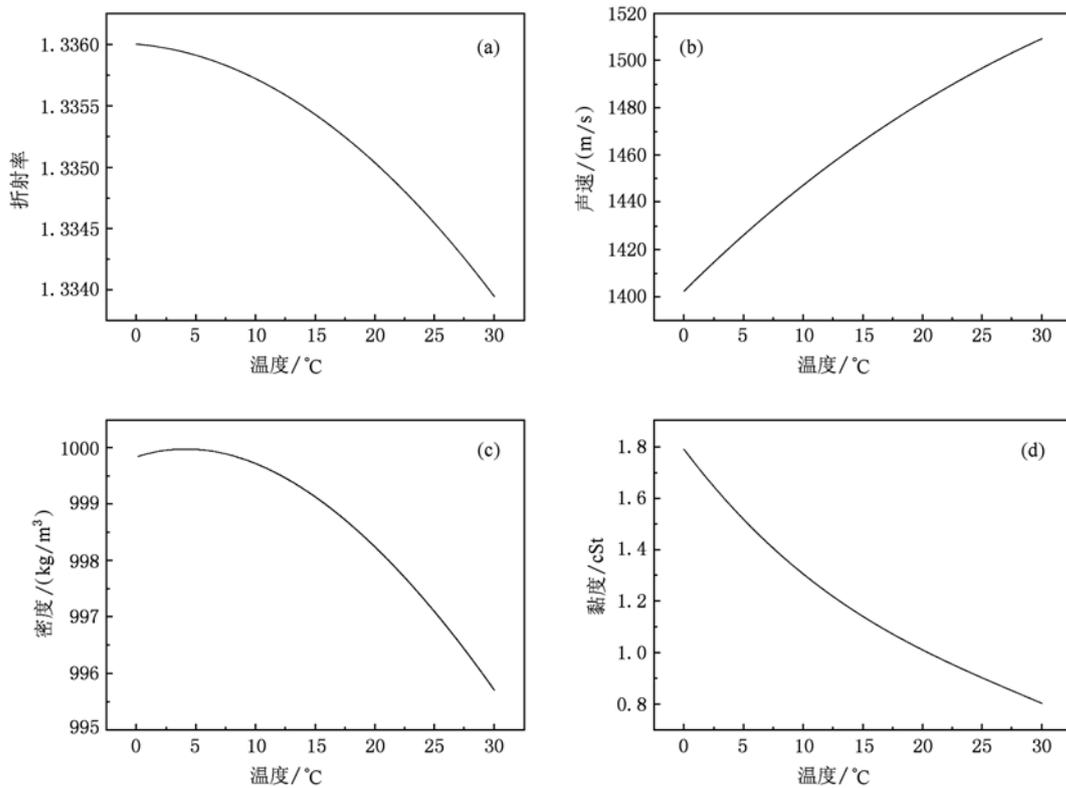


图 1 水的折射率、声速、密度和运动黏度随温度的变化曲线

定义介质某一参数的变化率为  $|(x_2 - x_1)/x_1| \times 100\%$ , 则从图 1 可算出, 水的温度从 1°C 升到 30°C 时, 其折射率由 1.3360 增大到 1.3339, 变化率为 0.15%; 声速由 1407 m/s 增大到 1509 m/s, 变化率为 7.24%; 密度由 1000 kg/m<sup>3</sup> 降低到 996 kg/m<sup>3</sup>, 变化率为 0.04%; 而运动黏度由 1.73 cSt 降低到 0.80 cSt, 变化率为 53.75%. 从变化率可知, 液体介质的折射率、声速和密度随温度的变化相对较小, 而运动黏度随温度的变化较大. 这就说明, 液体介质运动黏度随温度的变化是导致 SBS 能量反射率随介质温度而变化的主要因素, 因此利用 SBS 能量

反射率的变化可测定不同温度时的液体介质的运动黏度, 这就是该方法的基本原理.

### 3. 实验研究

实验装置如图 2 所示, Continuum Nd: YAG 种子注入激光器产生的 s 偏振光通过 1/2 波片变为 p 偏振光, p 偏振光经 1/4 波片后变成圆偏振光, 并入射到 SBS 产生系统中. SBS 产生系统由振荡池和透镜 L1 组成, 入射光首先被透镜 L1 ( $f = 20$  cm) 聚焦到振荡池中产生 SBS 作用, 并产生 Stokes 光. 偏振

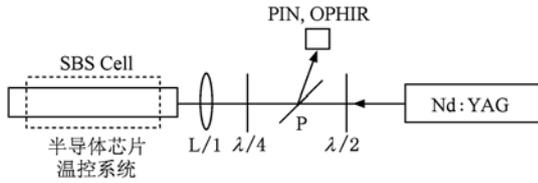


图2 实验装置示意图

片 P 和 1/4 波片组成隔离器,防止后向 Stokes 光进入 YAG 激光器.产生的 Stokes 光通过 1/4 波片后变为 s 偏振光,并被偏振片 P 反射.实验中通过调整 1/2 波片,获得了不同能量的入射光.入射光和 Stokes 光的能量用能量计 MIN-E1000 探测.

实验时 Nd:YAG 激光器输出波长为 532 nm,重复率为 1 Hz,脉宽为 8 ns,发散角为 0.45 mrad, SBS 池中的液体介质为水,其 SBS 参数列于表 1 中<sup>[38,39]</sup>.水的温度是通过半导体芯片温控系统来控制.另外,为了消除低温时由池内外温差引起的 SBS 池窗片起霜问题,我们设计了双窗片式结构的 SBS 池<sup>[18,19]</sup>.

表 1 水的 SBS 参数

介质	$n$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$g/\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1}$	$\tau/\text{ns}$	$\nu/\text{MHz}$	$\Gamma/\text{MHz}$
H <sub>2</sub> O	1.32	<0.0004	4.8	0.47	5690	317

图 3 是抽运参数和结构参数恒定(即入射光功率密度  $I$  和有效作用长度  $L$  恒定)时,SBS 能量反射率随介质温度而变化的实验曲线.从图可看出,SBS 能量反射率随着介质温度的升温而提高.这是因为介质的温度越高,其运动黏度就越小,增益系数就越大,因此 SBS 能量反射率就越高.

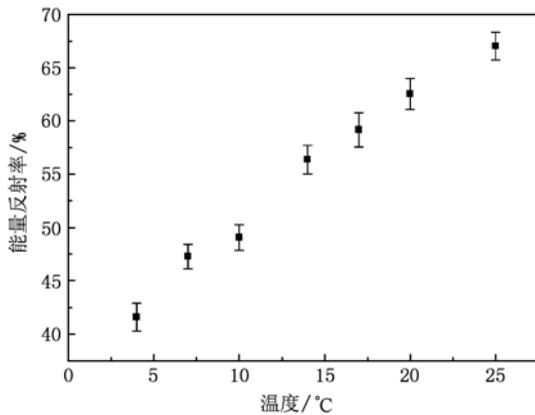


图3 水的 SBS 能量反射率随温度而变化的实验曲线

从方程(1)和(2)可知,相同实验条件下(即入射光功率密度  $I$  和有效作用长度  $L$  恒定时),忽略折

射率、声速和密度随温度的变化时,不同温度时的液体介质的 SBS 能量反射率之比等于其运动黏度之比,即

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{g_1 IL}{g_2 IL} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (3)$$

根据方程(3)和图 3 的实验结果,可获得不同温度时的水的运动黏度,如表 2 所列.从表中可看出,水的运动黏度随其温度的升高而降低,这是因为随着温度的提高,水分子之间的距离变大,进而导致作用力变小的缘故.为了进行比较我们还用运动黏度计(SYP1003-VIII)测定了不同温度时的水的运动黏度,并列入表 2 中.表中本方法的运动黏度值是十次测量结果的算术平均值,4°C 时的运动黏度值取自运动黏度计的测量值,其他温度下的运动黏度值是根据方程(3)对比而得.从表中可看出,用本方法获得的不同温度时的水的运动黏度测量值与运动黏度计测量值很接近,相对误差小于 5%.本方法中忽略了折射率、声速和密度等参数随温度的变化,实际上它们随温度也有微小的变化<sup>[34-37]</sup>,这是产生相对误差的主要因素.我们利用方程(2)和(3)估算了一下折射率、声速和密度等参数随温度的变化后对测量结果的影响,结果表明它们导致的相对误差在 0.8%—4.2% 之间.另外,某些液体介质的吸收系数也随温度而变化<sup>[40]</sup>,这也会导致相对误差的产生.若考虑折射率、声速、密度和吸收系数等参数随温度的变化,并进行适当的校正,可进一步降低相对误差.

表 2 不同温度时的水的运动黏度

温度/°C	运动黏度		相对误差/%
	本方法测量值/cSt	黏度计测量值/cSt	
4	1.57	1.57	0.00
7	1.38	1.43	3.50
10	1.33	1.31	1.53
14	1.16	1.17	0.85
17	1.10	1.08	1.85
20	1.04	1.00	4.00

注:相对误差是指本方法测量值相对于运动黏度计测量值的误差.

## 4. 结 论

本文提出了一种利用 SBS 能量反射率的变化测定不同温度时的液体介质运动黏度的方法,这为测定液体介质的运动黏度提供了另一种新的方案.

液体介质的运动黏度与增益系数成反比关系,因此可根据 SBS 能量反射率的变化测定不同温度时的液体介质的运动黏度. 在 Continuum Nd: YAG 种子注入激光器中测定了不同温度时的水的运动黏度,并与运动黏度计测定值进行了比较,相对误差小于 5%. 折射率、声速、密度和吸收系数等参数随温度的

变化是导致相对误差的主要因素,通过校正上述参数的变化,可进一步降低相对误差. 另外,我们用该方法还对 FC-75, FC-72, CCl<sub>4</sub>, 乙醇等常用 SBS 液体介质进行了运动黏度的测量,结果表明,该方法测量值与运动黏度计测量值均非常接近,这就说明该方法可适合于所有 SBS 液体介质范围之内.

- [1] Zafarani-Moattar M T, Khoshsima Z 2008 *J. Chem. Thermodyn.* **40** 1569
- [2] Saggin R, Coupland J N 2001 *J. Am. Oil Chem. Soc.* **78** 509
- [3] Sadat A, Khan I A 2007 *J. Food. Eng.* **80** 1194
- [4] Kawata M, Kurase K, Yoshida K 1970 *NRLM* **20** 16
- [5] Kurano Y, Kobayashi H, Yoshida K, Imai H 1992 *Int. J. Thermophys.* **13** 643
- [6] Einfeldt J, Schmelzer N 1982 *Rheol. Acta.* **21** 95
- [7] 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、倪恺、景红梅、何兴道、刘大禾 2008 物理学报 **57** 260]
- [8] Wang S, Chen J, Tong L X, Gao Q S, Liu C, Tang C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1719 (in Chinese) [汪莎、陈军、童立新、高清松、刘崇、唐淳 2008 物理学报 **57** 1719]
- [9] Guo S F, Lin W X, Lu Q S, Chen S, Lin Z Z, Deng S Y, Zhu Y X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2218 (in Chinese) [郭少峰、林文雄、陆启生、陈燧、林宗志、邓少永、朱永祥 2007 物理学报 **56** 2218]
- [10] Wang Y L, Lü Z W, Wang S Y, Zheng Z X, He W M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4675 (in Chinese) [王雨雷、吕志伟、王双义、郑振兴、何伟明 2009 物理学报 **58** 4675]
- [11] Gao W, Lü Z W, He W M, Hasi W L J, Zhang Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3765
- [12] Gong H P, Lü Z W, Lin D Y, Liu S J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5263 (in Chinese) [龚华平、吕志伟、林殿阳、刘松江 2007 物理学报 **56** 5263]
- [13] Hasi W L J, Lu H H, Gong S, Fu M L, Lü Z W, Lin D Y, He W M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2835
- [14] Hasi W L J, Lü Z W, Gong S, He W M, Lin D Y, Zhang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6360 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、公胜、何伟明、林殿阳、张伟 2008 物理学报 **57** 6360]
- [15] Gong S, Hasi W L J, Lü Z W, Dong F L, Lin D Y, He W M, Zhao X Y, Fan R Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 304 (in Chinese) [公胜、哈斯乌力吉、吕志伟、董粉丽、林殿阳、何伟明、赵晓彦、范瑞清 2009 物理学报 **58** 304]
- [16] Guo S F, Lin W X, Lu Q S, Chen S, Lin Z Z, Deng S Y, Zhu Y X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2218 (in Chinese) [郭少峰、林文雄、陆启生、陈燧、林宗志、邓少永、朱永祥 2007 物理学报 **56** 2218]
- [17] Hasi W L J, Liu S J, Lü Z W, Yin G H, Teng Y P, He W M, Zhao X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1709 (in Chinese) [哈斯乌力吉、刘述杰、吕志伟、尹国和、何伟明、赵晓彦 2008 物理学报 **57** 1709]
- [18] Hasi W L J, Guo X Y, Lu H H, Fu M L, Gong S, Geng X Z, Lü Z W, Lin D Y, He W M 2009 *Laser Part. Beams* **27** 733
- [19] Hasi W L J, Li X, Guo X Y, Lu H H, Lü Z W, Lin D Y, He W M, Fan R Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** (to be published) (in Chinese) [哈斯乌力吉、李杏、郭翔宇、鲁欢欢、吕志伟、林殿阳、何伟明、范瑞清 2010 物理学报 **59** 待发表]
- [20] Ning Y N, Zhang H Y, Liu C T, Liu Y H 1999 *Journal of Daqing Petroleum Institute* **23** 30 (in Chinese) [宁英男、张海燕、刘春天、刘玉华 1999 大庆石油学院学报 **23** 30]
- [21] Li Y Y 1994 *Journal of KaiFeng Institute of Education* **3** 25 (in Chinese) [李永远 1994 开封教育学院学报 **3** 25]
- [22] Boyd R W, Rzazewski K 1990 *Phys. Rev. A* **42** 5514
- [23] Chen J 1999 *Optical Phase Conjugation and Its Application* (Beijing: Science Press) p129 (in Chinese) [陈军 1999 光学相位共轭及其应用(北京:科学出版社)第129页]
- [24] Hasi W L J, Lu H H, Fu M L, Gong S, Lü Z W, Lin D Y, He W M, Gao W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5362
- [25] Hasi W L J, Lü Z W, Fu M L, Lu H H, Gong S, Lin D Y, He W M 2009 *Appl. Phys. B* **95** 711
- [26] Park H, Lim C, Yoshida H, Nakatsuka M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 5073
- [27] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullov F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 872
- [28] Pohl D, Kaiser W 1970 *Phys. Rev. B* **1** 31
- [29] Hasi W L J, Lü Z W, Liu S J, He W M, Zhao X Y, Zhang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2976 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、刘述杰、何伟明、赵晓彦、张伟 2008 物理学报 **57** 2976]
- [30] Lagemann R T, Woolf W E, Evans J S, Underwood N 1984 *J. Am. Chem. Soc.* **70** 2994
- [31] Diego G D, Juan C M, Jose M N, Antonio R A 2003 *J. Chem. Eng. Data.* **48** 231
- [32] Pochylski M, Aliotta F, Blaszczak Z, Gapin S J 2006 *J. Phys. Chem. B* **110** 20533
- [33] Dmitri P. Kharakoz, Elena A S 2000 *J. Phys. Chem. B* **104** 10368
- [34] Del Grosso V A 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **56** 1084

- [35] Quan X, Fry E S 1995 *Appl. Opt.* **34** 3477  
[36] Fry E S, Mery Y, Quan X H, Katz J W 1997 *Appl. Opt.* **36** 6887  
[37] Richards S D 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **103** 205  
[38] Boyd R W 2003 *Nonlinear Optics* (2nd Edition), (New York: Academic Press) p421  
[39] Hulburt E O 1945 *J. Opt. Soc. Am.* **35** 698  
[40] Zhao G X, Li S M 1999 *Journal of East China University of Metallurgy* **16** 34 (in Chinese) [赵光兴、李绍民 1999 华东冶金学院学报 **16** 34]

## Study on measuring the kinematic viscosity of liquid medium based on the energy reflectivity of SBS \*

Geng Xi-Zhao Hasi Wu-Li-Ji<sup>†</sup> Guo Xiang-Yu Li Xing Lin Dian-Yang  
He Wei-Ming Fan Rui-Qing Lü Zhi-Wei<sup>‡</sup>

(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;*

*National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable laser, Harbin Institute of Technology Harbin 150080, China)*

(Received 2 June 2010; revised manuscript received 30 July 2010)

### Abstract

In the paper, a method of measuring the kinematic viscosity of liquid medium based on stimulated Brillouin scattering (SBS) at different temperatures is proposed. The kinematic viscosity of liquid medium, which is related to the temperature, greatly affects the gain coefficient of medium and SBS characteristics. Therefore the kinematic viscosity at different temperatures can be measured by the reflectivity of SBS. In experiment, the kinematic viscosities of water at different temperatures are determined based on SBS in continuum's Nd:YAG seed-injected laser and compared with the results measured from kinematic viscosimeter, and the relative error of the experiment results is less than 5%.

**Keywords:** stimulated Brillouin scattering, energy reflectivity, temperature, kinematic viscosity

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Es

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60778019, 60878005, 20771030), the Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-08-0173) and the Fundamental Research Funds for Central Universities (Grant No. HIT. BRET2. 20100/2).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: hasiwuliji@sohu.com

<sup>‡</sup> E-mail: zw\_lu@sohu.com