

一种利用混合介质测量 SBS 介质 布里渊线宽的方法*

哈斯乌力吉 刘述杰 吕志伟[†] 尹国和 滕云鹏 何伟明 赵晓彦

(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 150001)

(2007 年 4 月 16 日收到, 2007 年 6 月 18 日收到修改稿)

提出了一种利用双池受激布里渊散射(SBS)系统选用混合介质,进而测量 SBS 介质布里渊线宽的方法.在紧凑双池 SBS 系统的放大池中放入待测介质,在振荡池中放入布里渊频移可调的混合介质,测出放大池待测介质增益系数随布里渊频移偏离的洛伦兹曲线,该曲线半高处的线宽即为待测介质的布里渊线宽.实验上在 Nd:YAG 调 Q 激光系统中,选用 $\text{CCl}_4/\text{C}_6\text{H}_6$ 混合介质,测量了四氯乙烯(C_2Cl_4)、六氯丁二烯(C_4Cl_6)、丙酮($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)和正己烷(C_6H_{14})等介质的布里渊线宽,其值与理论计算值或其他文献值很接近.

关键词:受激布里渊散射,混合介质,布里渊线宽

PACC:4265C,4225B

1. 引言

由于受激布里渊散射(SBS)具有相位共轭特性,能够消除光传输过程中的相位畸变,提高光束质量^[1],因此多年来 SBS 相位共轭理论及其实验得到了广泛地研究^[2].不言而喻,散射介质对 SBS 特性有很大的影响,介质 SBS 参数是 SBS 特性的重要标志,因此介质 SBS 参数的测量是一项很有意义的工作.以往通常使用法布里-珀罗(F-P)干涉仪来测量介质布里渊频移和线宽,F-P 干涉仪具有分辨率和精度高等优点^[3].但是,F-P 干涉仪也受到带宽的限制,即一种 F-P 干涉仪只能测量特定入射光波长情况下的介质布里渊频移和线宽.因此,若想测量不同入射光波长时的介质布里渊频移和线宽就需要不同的 F-P 干涉仪,这就给测量带来不便.这也是大部分 SBS 介质的布里渊频移和线宽只测量了红宝石激光器(波长为 6943 nm)时的值,而在其他入射光波长时的布里渊频移和线宽还未测量的主要缘故^[4].

文献^[5]提出了一种利用混合介质测量 SBS 介质布里渊频移的方法,实验中发现该方法不仅能够测量介质布里渊频移,而且还能够测量介质布里渊

线宽.在紧凑双池 SBS 系统的放大池中放入待测介质,在振荡池中放入布里渊频移可调的混合介质^[6],测出放大池待测介质增益系数随布里渊频移偏离的洛伦兹曲线^[7],该曲线半高处的线宽即为待测介质的布里渊线宽^[8].本文实验上在 Nd:YAG 调 Q 激光系统中,选用 $\text{CCl}_4/\text{C}_6\text{H}_6$ 混合介质,测量了四氯乙烯(C_2Cl_4)、六氯丁二烯(C_4Cl_6)、丙酮($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)和正己烷(C_6H_{14})等介质的布里渊线宽,其值与理论计算值或其他文献值很接近,相对误差均小于 5%.

2. 理论分析

2.1. 介质增益系数与布里渊频移偏离的关系

介质增益因子由两部分组成,其中第一部分是电致伸缩的贡献,另一部分是吸收的贡献.由于放大池中需要选用吸收系数小的介质,因此可忽略吸收对增益的贡献,此时介质增益系数由以下方程给出^[7]:

$$g = g^e \frac{1}{1 + (2\Delta\nu/\Gamma)^2}, \quad (1)$$

式中 g^e 为电致伸缩增益因子; $\Delta\nu$ 为放大池介质和振荡池介质布里渊频移的偏离($\Delta\nu = |\nu_1 - \nu_2|$), ν_1

* 国家自然科学基金(批准号:60778019,10476009,60478020),中国博士后科学基金(批准号:20060390795)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助的课题.

[†] E-mail: zw_lu@sohu.com

为放大池介质的布里渊频移, ν_2 为振荡池介质的布里渊频移); Γ 为放大池介质的布里渊线宽. 从方程 (1) 可得, 增益系数 g 和布里渊频移的偏离 $\Delta\nu$ 之间具有洛伦兹函数关系.

$$\nu = \frac{2}{\lambda} \left\{ \frac{1 + \chi (\varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2) \left[\frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]}{1 - (\varphi_1 \rho_1 + \varphi_2 \rho_2) \left[\frac{\varphi_1 (n_1^2 - 1)}{\rho_1 (n_1^2 + 2)} + \frac{\varphi_2 (n_2^2 - 1)}{\rho_2 (n_2^2 + 2)} \right]} \right\}^{1/2} \times \left[\frac{M_1 X_1 / \rho_1 + M_2 X_2 / \rho_2}{\sqrt{(M_1 X_1 + M_2 X_2) (M_1 X_1 / \rho_1^2 v_1^2 + M_2 X_2 / \rho_2^2 v_2^2)}} \right], \quad (2)$$

式中 ν 为混合介质的布里渊频移值, λ 为入射光的波长, n_1, n_2 分别为二单体的折射率, ρ_1, ρ_2 分别为二单体的密度, φ_1, φ_2 分别为二单体的体积分数, $\varphi_1 = V_1 / (V_1 + V_2), \varphi_2 = V_2 / (V_1 + V_2)$, 其中 V_1, V_2 分别为二单体的体积, M_1, M_2 分别为二单体的分子量, X_1, X_2 分别为二单体的摩尔分数, v_1, v_2 分别为二单体的声速. 从方程 (2) 可知, 混合介质布里渊频移随混合比(体积分数 φ_i 或摩尔分数 X_i) 不断变化.

2.2. 混合介质布里渊频移随混合比的变化关系

由文献 [5] 可得混合介质布里渊频移随混合比的变化关系为

2.3. 介质布里渊线宽的理论计算

由文献 [9] 可得介质布里渊线宽的表达式为

$$\Gamma = \frac{16\pi^2 n^2 \eta}{\lambda^2 \rho}, \quad (3)$$

式中 Γ 为介质布里渊线宽, n 为介质折射率, η 为介质黏滞系数, ρ 为介质密度, λ 为入射光的波长. 根据文献 [9] 的关系式可算出 C_2Cl_4 的 SBS 参数(入射光波长为 $1.064 \mu\text{m}$), 如表 1 所示.

表 1 液体介质的 SBS 参数

	n	M	$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	α/cm^{-1}	ν/MHz	Γ/MHz	$g/\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1}$	τ/ns	$\eta/\text{mN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
C_2Cl_4	1.505	165.8	1066	1.622	0.003	3016*	376*	6.1*	0.42*	1.932
C_6H_6	1.501	78.11	1359	0.873	0.018	4130	238	9.6	1.4	0.602
CCl_4	1.460	153.8	938	1.594	0.003	2772	528	6	0.6	0.965

* 是理论计算值, 其他摘自文献 [10—12].

3. 实验研究

3.1. 实验装置

实验装置如图 1 示, Nd:YAG 调 Q 激光器由全反射镜 M_1 , 调 Q 染料片, 偏振片 P_1 , Nd:YAG 棒, 小孔光阑 hole 和部分反射镜 M_2 组成. 偏振片 P_2 和偏振片 P_1 平行, P_2 和 $1/4$ 波片组成隔离器, 防止 SBS 后向散射放大光进入 YAG 振荡器, 振荡器输出的 p 偏振光经 $1/4$ 波片后变成圆偏振光. SBS 系统由放大池、振荡池、透镜 L_1 和 L_2 组成, 放大池(池长为 60 cm)前面放入凸透镜 L_1 ($f = 80 \text{ cm}$), 其目的是对抽运光缩束以增强放大池中抽运光的强度; 抽运光被透镜 L_2 ($f = 5 \text{ cm}$) 聚焦到振荡池(池长为 30 cm)中产

生种子光, 产生的种子光在放大池中与抽运光耦合, 并得到有效的放大. 经过 $1/4$ 波片后变为 s 偏振光, 并被偏振片 P_2 反射. 抽运光和 SBS 光的能量用能量计 ED200 探测, 脉冲波形用 PIN 光电二极管探测, 并用数字示波器 TDS684A 来记录.

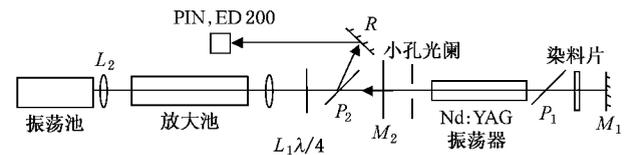


图 1 实验装置示意图

3.2. 混合介质的选取

为了获得较宽的测量范围, 选用了布里渊频移

较小的 CCl_4 和布里渊频移较大的 C_6H_6 作为混合介质。 CCl_4 和 C_6H_6 均为非极性分子^[11]，它们的混合成为弱相互作用混合介质，可由方程(2)计算其布里渊频移，进而可画出布里渊频移随混合比的变化曲线(几乎是线性关系)，如图 2 所示^[13]。另外， CCl_4 的增益系数比 C_6H_6 小，吸收系数也比 C_6H_6 小，因此该混合介质所产生的种子光能量随混合比的变化很小，几乎是个恒定值。

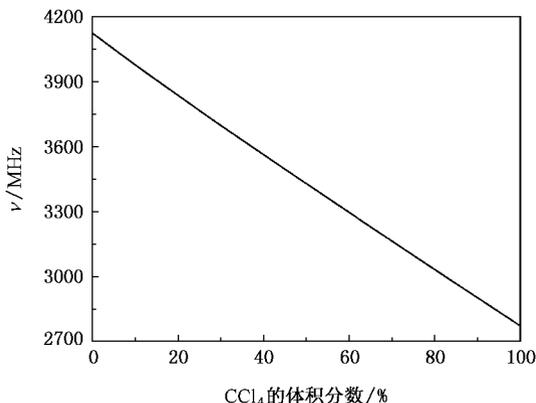


图 2 $\text{CCl}_4/\text{C}_6\text{H}_6$ 混合介质的布里渊频移随 CCl_4 的体积分数的变化关系

3.3. 实验结果及其讨论

实验时 Nd:YAG 调 Q 激光器输出抽运光波长

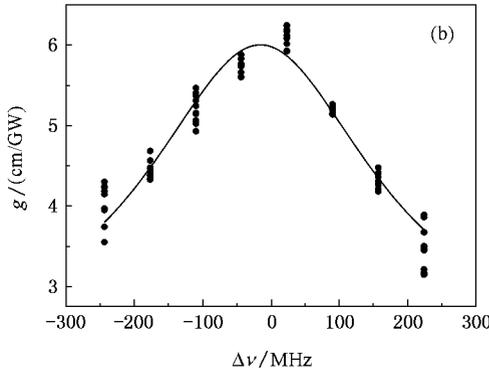
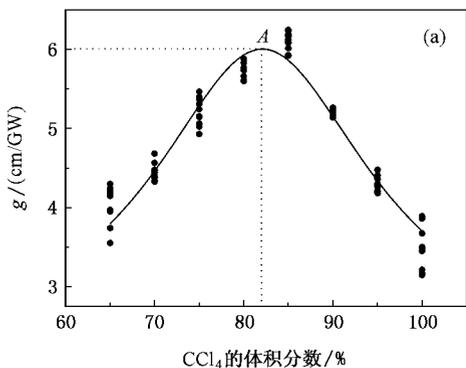


图 3 C_2Cl_4 增益系数随(a) CCl_4 体积分数和(b)布里渊频移偏离的变化关系

另外，用该方法还测量了 C_4Cl_6 、 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 和 C_6H_{14} 等介质的布里渊线宽(如表 2 所示)，其值与理论计算值或其他文献值很接近，相对误差均小于 5%。实验中发现，引起相对误差的因素主要有两个：首先是混合介质混合比的误差；其次是入射光作用下介质温度的变化。有两种方法可消除或降低温度的影响：1) 把 SBS 池放在恒温槽中进行；2) 利用混合介质的

为 $1.064 \mu\text{m}$ ，重复率为 1 Hz，脉宽约为 8 ns，最高能量约为 50 mJ。输入能量的变化是通过加入衰减片来实现，发散角约为 1.6 mrad(5 倍衍射极限)。放大池中的介质为 C_2Cl_4 ，振荡池中的介质为 $\text{CCl}_4/\text{C}_6\text{H}_6$ 的混合介质。放大池介质增益系数随布里渊频移偏离的变化关系是通过调节振荡池混合介质的混合比来获得的。增益系数是通过探测 Stokes 种子光(从振荡池输出的光)能量 E_{in} 和 Stokes 输出光(在放大池中得到放大之后的 Stokes 光)能量 E_{out} ，然后由下列公式计算而得^[8]：

$$g = \ln(E_{out}/E_{in})/LI_p(0) = At_p \ln(E_{out}/E_{in})/2LE_p \quad (4)$$

式中 L 为放大池长度， $I_p(0)$ 是抽运光功率密度， E_p 为抽运光能量， t_p 为抽运光脉冲宽度， A 为抽运光光束截面积。

图 3(a) 是放大池介质 C_2Cl_4 的增益系数随振荡池 $\text{CCl}_4/\text{C}_6\text{H}_6$ 混合介质中 CCl_4 体积分数的变化曲线(先测量实验值，然后用洛伦兹曲线拟合)。进一步根据图 2 可获得增益系数随布里渊频移偏离的变化曲线，如图 3(b) 所示。由于待测介质增益系数随布里渊频移偏离的曲线是洛伦兹型，因此图 3(b) 中半高处的线宽就是布里渊线宽，从拟合曲线中直接获得布里渊线宽为 389 MHz。

声速温度系数校正混合介质的声速^[14]。

表 2 液体介质的布里渊线宽

介质	布里渊线宽/MHz		相对误差/%
	测量值	理论计算值或其他文献值	
C_2Cl_4	389	376*	3.4
C_4Cl_6	669	649*	3.2
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	234	224	4.4
C_6H_{14}	233	222	4.8

* 是理论计算值，其他摘自文献[10]。

4. 结 论

提出了一种利用双池 SBS 系统选用混合介质, 进而测量 SBS 介质布里渊线宽的方法. 在紧凑双池 SBS 系统的放大池中放入待测介质, 振荡池中放入混合介质, 调整混合介质的混合比, 测出放大池待测

介质增益系数随混合介质布里渊频移偏离的洛伦兹变化曲线, 该曲线半高处的宽度即为待测介质的布里渊线宽. 实验上选用 $\text{CCl}_4/\text{C}_6\text{H}_6$ 的混合介质测量了 C_2Cl_4 , C_4Cl_6 , $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 和 C_6H_{14} 的布里渊线宽, 其值与理论计算值或其他文献值很接近, 相对误差均小于 5%.

- [1] Zel'dovich B Y, Popovichev V I, Ragul'skii V V, Faizullov F S 1972 *JETP Lett.* **15** 109
- [2] Pohl D, Kaiser W 1970 *Phys. Rev. B* **1** 31
- [3] Jones D C 1997 *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials* **6** 69
- [4] Boyd R W 1992 *Nonlinear Optics* (San Diego : Academic Press) pp323
- [5] Hasi W L J, Lü Z W, Li Q, He W M 2007 *Chin. Phys.* **16** 154
- [6] Andreev N F 1982 *Opt. Spectrosc. (USSR)* **53** 4
- [7] Kaiser W, Maier M 1972 *Laser Handbook* (Amsterdam : North-Holland Publ. Co.) pp1116
- [8] Animoto S T, Gross R W F, Garman D L, Good T W, Piranian J D 1991 *Opt. Lett.* **16** 1382
- [9] Li Q, Lü Z W, Hasi W L J, Dong Y K, He W M 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1481 (in Chinese) [李 强、吕志伟、哈斯乌力吉、董永康、何伟明 2006 强激光与粒子束 **18** 1481]
- [10] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullov F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 872
- [11] Dean J A 1991 *Lange's Handbook of Chemistry* (13th ED) (New York : McGraw-Hill Book Company) p10—106
- [12] Bergmann L 1964 *Ultrasonic* (Beijing : National Defence Industry press) p217 (in Chinese) [L 别尔格曼 1964 超声 (北京 : 国防工业出版社) 第 217 页]
- [13] Yang J G, Liu X M, Yu X J, Xue K, Du D X, Zhou Z B 1986 *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)* **4** 39 (in Chinese) [杨静国、刘新民、余学君、薛 康、杜定旭、周仲壁 1986 四川大学学报 (自然科学版) **4** 39]
- [14] Lu Y G, Feng J Y, Dong Y W, Tong J 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 2082 (in Chinese) [卢义刚、冯金垣、董彦武、全 杰 1999 物理学报 **48** 2082]

A method to measure the Brillouin linewidth of SBS medium using mixture media^{*}

Hasi Wu-Li-Ji Liu Shu-Jie Lü Zhi-Wei[†] Yin Guo-He Teng Yun-Peng He Wei-Ming Zhao Xiao-Yan

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China)

(Received 16 April 2007 ; revised manuscript received 18 June 2007)

Abstract

In order to measure the Brillouin linewidth of SBS medium , a method using mixture media in two-cell stimulated Brillouin scattering (SBS) system is proposed , which uses the medium to be measured as amplifier medium and the mixture media as generator medium. The profile of gain coefficient versus the difference of Brillouin frequency shift is fitted with Lorentzian curve. The width at half-maximum of this curve is the Brillouin linewidth. In the experiment , using Nd :YAG Q-switched laser system and CCl₄/C₆H₆ mixture , we measured the Brillouin linewidth of SBS media tetrachloroethylene (C₂Cl₄) , hexachlorobutadiene (C₄Cl₆) , acetone (C₃H₆O) and *n*-hexane (C₆H₁₄). The results show that the measured values are close to those calculated or published by other authors.

Keywords : stimulated Brillouin scattering , liquid mixture , Brillouin linewidth

PACC : 4265C , 4225B

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60778019 , 10476009 , 60478020) , the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20060390795) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology.

[†] E-mail : zw_lu@sohu.com