

文章编号: 0253-2239(2004)10-1429-5

用碘分子共振吸收滤波器精确测量水中的 布里渊散射频移*

任晓斌 弓文平 戴 瑞 徐建锋 刘大禾**

(北京师范大学物理系应用光学北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要: 提出了一种基于分子共振吸收滤波技术的水中布里渊散射频移的探测方法——边缘探测方法。利用碘分子在水中的布里渊散射光谱范围内的两个对称的吸收峰, 可以对光在水中的布里渊散射频移实现高精度的实时测量。对这一方法的原理进行了分析, 给出了可用于实际测量的探测系统, 并给出了用此系统得到的实验测量结果。还分析了测量系统的固有误差及测量灵敏度。结果表明, 这一新方法 with 常规探测方法(如扫描干涉仪法)相比, 具有实时性好、灵敏度高、测量精度高等突出的优点。

关键词: 物理光学; 光散射; 布里渊散射; 边缘探测; 分子共振吸收滤波

中图分类号: O436.2 文献标识码: A

Accurate Measurements of Brillouin Shift in Water by the Filters with Resonating Absorption of Iodine Molecules

Ren Xiaobin Gong Wenping Dai Rui Xu Jianfeng Liu Dahe

(Department of Physics, Beijing Area Major Laboratory for Applied Optics,
Beijing Normal University, Beijing 100875)

(Received 1 September 2003; revised 19 December 2003)

Abstract: A method for measuring the Brillouin shift in water is investigated. It is based on the technique of the filters with resonant absorption of molecules. By using the two symmetric absorption peaks of iodine molecules within the frequency range of Brillouin scattering in water, accurate real-time measurement of Brillouin shift in water could be achieved. The principle of the technique is analyzed and a real system which can be used in practical applications is given. Also, the inherent errors and the sensitivity for measuring of the system are discussed. The experimental results using this method are given. It shows that this method has several advantages such as good real-time measurement, high sensitivity, high precision compared to the classical technique such as using Fabry-Perot.

Key words: physical optics; optical scattering; Brillouin scattering; edge technique; filtering by molecular resonance absorption

1 引 言

布里渊散射自从被提出后, 已经得到了相当深入的研究, 特别是固体中的布里渊散射。随后, 液体中的布里渊散射引起人们的注意, 这方面的工作已有不

少报导^[1~5]。布里渊散射方法由于其测量精度高、信噪比高等优点^[6], 开始在实际应用中受到人们的重视, 其中, 最具代表性的是在海洋实时监测中的应用^[7~10]。而这方面的应用对布里渊散射频移的高精度实时测量提出了更高的要求, 这无疑会对布里渊散射探测技术的发展起到极大的促进作用。

在以往布里渊散射光谱的测量中, 所采用的方法主要是用双法布里-珀罗标准具, 或用法布里-珀罗标准具加迈克耳孙干涉仪, 其中代表性的工作由

* 国家自然科学基金(69988001, 10274006)、国家 863 计划(2002AA633110)资助课题。

** 通信联系人。E-mail: dhliu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2003-09-01; 收到修改稿日期: 2003-12-19

Hirschberg^[7] 及 Guagliardo^[11] 完成。而对于光源, Hirschberg 使用的是单纵模连续激光器, Guagliardo 使用的是脉冲激光器。由于在双法布里-珀罗标准具的调整, 及激光器的频率特性等方面存在的一系列问题, 使这一方法不可能实现对布里渊散射频移的高精度实时测量。Fry^[12] 和 Liu^[10] 用种子注入脉冲 YAG 激光器作为光源, 采用高精度扫描法布里-珀罗干涉仪对布里渊散射的频移和线宽进行了精确的测量, 得到了相当理想的布里渊散射光谱。然而, 由于扫描的周期较长, 不能实现真正的实时测量, 且对于法布里-珀罗干涉仪, 为保证测量精度, 要求入射光为严格的平行光。这些都限制了上述方法在实际中的应用。

分子共振吸收滤波技术是近年发展起来的一项新技术^[13]。Korb 等^[14,15] 等将这一技术成功地应用于测量大气散射的多普勒频移, Piironen 等^[16] 则利用碘分子滤波器发展了一种高光谱分辨率的激光雷达系统用于大气的实时监测。Forkey 等^[17] 人则进一步提出了一种专门用于 YAG 激光器及其应用的碘分子吸收池的定标模型。

在本文中, 我们首次将分子共振吸收滤波技术用于实时测量水中的布里渊散射频移, 并在实验中得到了精确的测量结果。

2 原 理

2.1 基本设想

分子共振吸收滤波的基本原理如图 1 所示。被测光的频率位于一个高分辨率滤波器的光谱响应函数的边缘。当散射光的频率变化时, 散射光谱与吸收光谱的重叠面积不同, 使得透过滤波器的光强发生变化。由此, 可测量散射光的频移。如果光谱响应的线型函数具有很陡的斜率, 则被测光频率的微

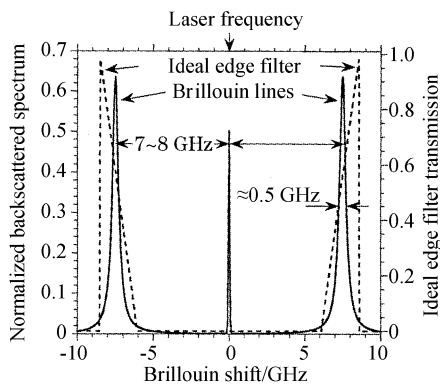


Fig. 1 Principles of the edge technique. Solid line: ideal Brillouin scattering in water, dash line: absorption spectrum of edge filter

小变化将导致通过滤波器后的透射光强的很大变化, 从而实现被测光频率的精确测量。

对于测量水中布里渊散射的分子共振吸收滤波技术应有如下的要求: 完全阻挡无频移的激光中心频率; 在两个布里渊峰的中心附近应具有对称的、边缘很陡的吸收峰; 在不饱和的情况下对布里渊散射信号有尽可能高的透过率; 对吸收峰边缘之外的噪声光有尽可能高的吸收。

$^{127}\text{I}_2$ 的吸收光谱中, 第 1071 号吸收峰和第 1073 号吸收峰刚好位于 YAG 激光器 532 nm 的光在水中两个布里渊散射峰的中心频率 (7.5 GHz) 附近, 而且, 这两个吸收峰具有相当好的对称性和很陡的边缘轮廓。图 2 为碘分子吸收池在水中布里渊散射频率范围附近的吸收光谱。因此, 可以用碘吸收池作为分子共振吸收滤波器。由于碘分子吸收池在 532 nm 无频移的中心频率处的透过率相当高, 必须用另一个滤波器滤掉这部分光, 才能保证测量的准确性。而溴分子在 YAG 激光器 532 nm 的光的无频移中心频率处有一个很强的吸收峰, 刚好可以满足测量中的要求。图 3 为溴分子吸收池在水中布里渊散射频率范围附近的吸收光谱。

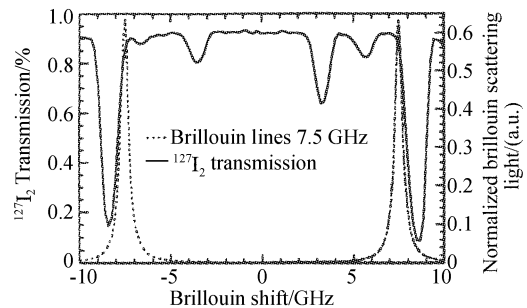


Fig. 2 Absorption spectrum of an iodine ($^{127}\text{I}_2$) cell. The value 0 on Brillouin shift corresponding to the unshifted laser frequency

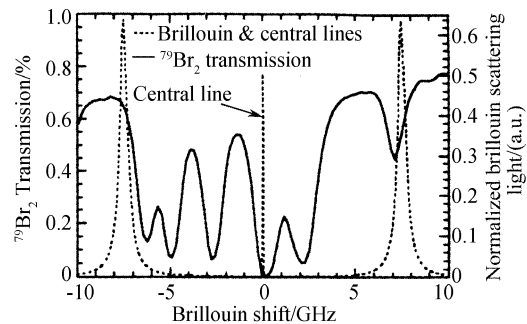


Fig. 3 Absorption spectrum of a bromine ($^{79}\text{Br}_2$) cell. The value 0 on Brillouin shift corresponding to the unshifted laser frequency

这两个分子吸收池组合在一起就构成了一个理想的分子共振吸收滤波器,可以高精度地实时测量水中的布里渊散射频移。为了更好地了解两个分子吸收池的作用,在图 2 和图 3 中,还同时给出了水中布里渊散射的理想散射光谱。

2.2 理论分析

基于上述基本设想,根据理想的使用分子共振吸收滤波技术测量水中布里渊散射频移的方法(如图 4 所示),设透过溴吸收池后的光强为单位光强,则探测器 1 和 2 接受到的信号分别为

$$S_1 = \frac{1}{2} \int f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) d\nu, \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} I_0 \int f(\nu, \nu_B) g_{Br}(\nu) g_I(\nu) d\nu, \quad (2)$$

其中

$$f(\nu, \nu_B) = \frac{1}{\pi \Gamma_B} \left\{ \frac{1}{1 + [2(\nu - \nu_B)/\Gamma_B]^2} + \frac{1}{1 + [2(\nu + \nu_B)/\Gamma_B]^2} \right\}, \quad (3)$$

为水中布里渊散射峰的线型函数,式中 ν_B 为布里渊频移, $\Gamma_B \approx 500$ MHz 为布里渊散射峰的线宽。 $g_{Br}(\nu)$ 和 $g_I(\nu)$ 分别为溴和碘吸收光谱的线型函数,他们可由图 2 和图 3 很容易地得到。定义归一化信号

$$S(\nu_B) = S_2/S_1, \quad (4)$$

$$S(\nu_B) = S_2/(S_1 - S_2), \quad (5)$$

定义(5)式是为了在有些情况下可以得到较大的归一化信号。根据(4)式或(5)式即可由归一化信号强度测出水中的布里渊散射频移。

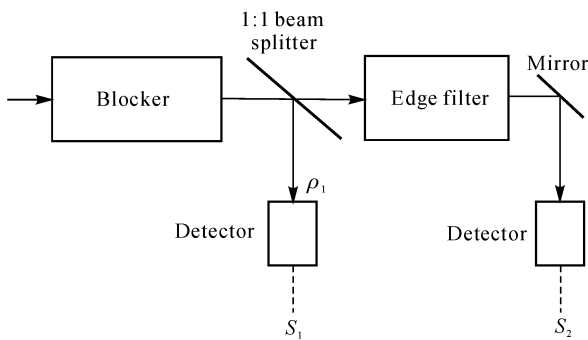


Fig. 4 Schematic for an example system

2.3 本方法的系统误差分析

假定测量系统的噪声仅为散粒噪声,则系统误差与系统的信噪比有关,且信噪比为^[17] $R_{SN} = N_{pe}/\sqrt{N_{pe}} = \sqrt{N_{pe}}$,因此,布里渊散射测量系统的固有误差可表示为

$$\Delta\nu_B = \frac{\alpha\Gamma_B}{R_{SN}} = \frac{\alpha\Gamma_B}{\sqrt{N_{pe}}}, \quad (6)$$

其中 N_{pe} 为激光所产生的输出布里渊散射光子数,设波长为 532 nm,背向布里渊散射系数为 $2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,信号接收立体角为 0.5 sr,取光电倍增管的量子效率为 15%,则可由激光器输出功率或能量计算出此光子数。图 5 给出了布里渊散射测

量系统的固有误差随回波信号光子数变化的理论关系。可以看到,增大回波信号光子数,能够提高信噪比,从而提高系统测量精度。在室温下,这种方法的系统误差可达 10 MHz,而待测的水中布里渊散射频移为 7.5 GHz,故其相对误差的理论值小于 1%。

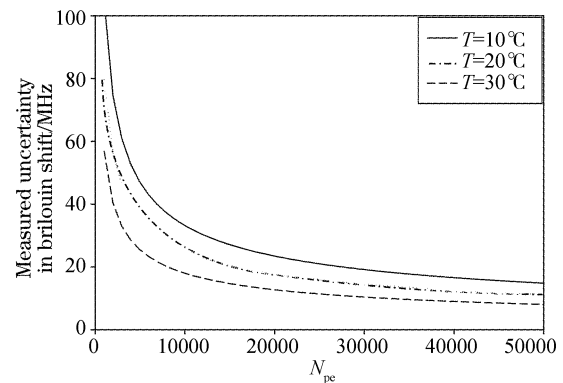


Fig. 5 Calculated inherent uncertainty in Brillouin shift of the method

3 实验结果

实验装置如图 6 所示。实验中所用的激光器为 Continuum 公司 Powerlite Precision II 8000 种子注入脉冲 YAG 激光器。所用光探测器为北京滨松 (Hamamatsu) CR-105 光电倍增管,光电信号经 Agilent Infinium-54832B 型数字示波器输入计算机。为尽量消除其他方向的杂散光,在带阻滤波器前增加了一个直径为 15 μm 的针孔滤波器。实验中选择带阻滤波器(溴吸收池)的工作温度为 54 $^{\circ}\text{C}$,分子共振吸收滤波器(碘吸收池)的工作温度为 67 $^{\circ}\text{C}$ 。水槽做成牛角形以避免管壁的反射光进入光电倍增管,从而保证测量精度。图中,为了清楚了解两个分子共振吸收滤波的作用,还给出了虚线箭头 A, B 所对应位置的理想光谱曲线。

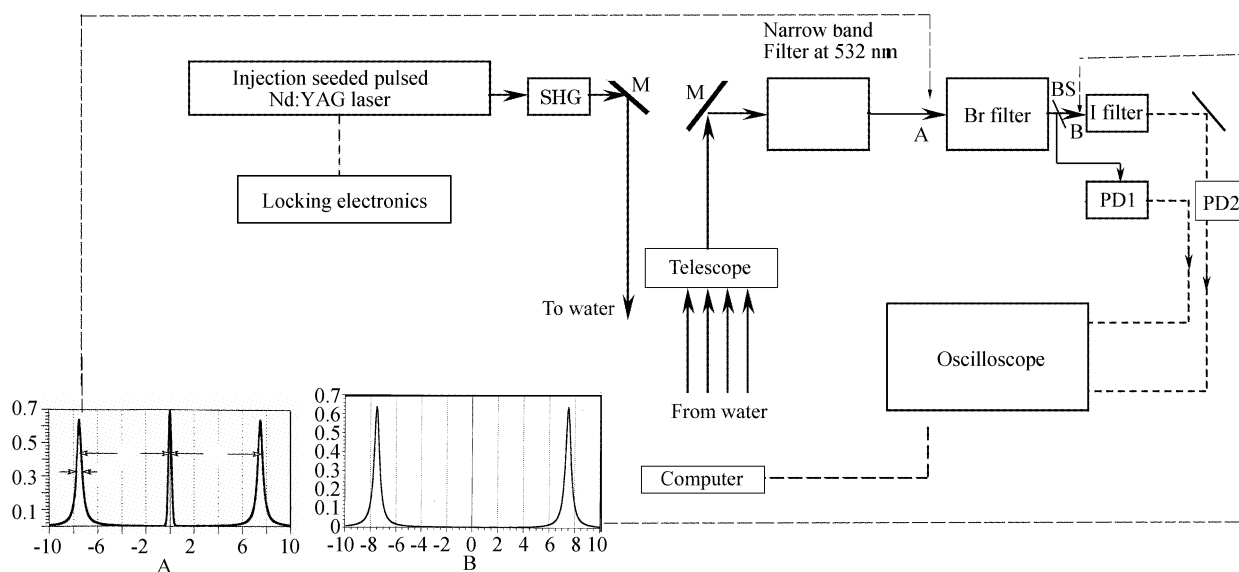


Fig. 6 Set-up geometry of experimental measurements based on edge technique

两个分子共振吸收滤波器的输入、输出窗口均为布儒斯特窗,因而,对被测信号的偏振状态相当敏感。实验所用激光器输出光束的偏振态为竖直偏振。但由于一些实际因素的影响,射到带阻滤波器的光并不是理想的线偏振光。在带阻滤波器前放置了一个偏振棱镜,旋转偏振棱镜可以改变被测信号相对于布儒斯特窗的偏振状态。图 7(a)和图 7(b)分别给出了偏振片透振方向平行和垂直于分子共振

吸收滤波器布儒斯特窗时的实验测量结果。图 7(a)中,对于偏振状态平行于分子共振吸收滤波器布儒斯特窗的实验结果,归一化信号大于 1,这是由于分束镜的分束比并不严格等于 1:1。另外,图 6 中探测器 PD1 接收到的信号经过多个分束镜和反射镜反射,每次反射均影响偏振态,从而改变 PD1 接收到的光强。图 7 中的每一个实验数据都是 200 次测量结果的平均值。图中给出了测量误差。

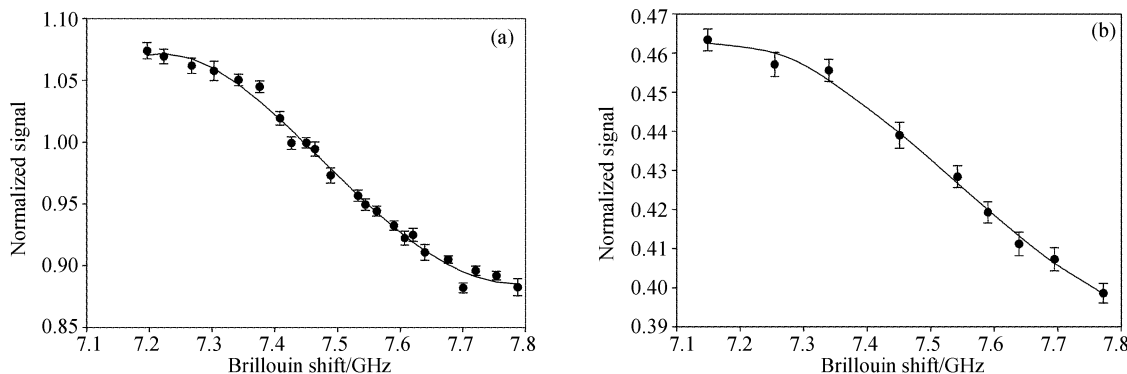


Fig. 7 Measured results of Brillouin shift in water by edge technique. (a) The polarization of the signal parallel to the Brewster window of the filter, (b) The polarization of the signal perpendicular to the Brewster window of the filter

实验测量的是在不同温度下进行的。由于布里渊频移是温度的函数,需要对不同温度下的测量结果进行定标。定标的依据是用扫描干涉仪精确测量不同温度下的布里渊散射频移,有关这方面的工作,参考文献[10]中已有详细的论述。图 7 所示的结果即是定标后的数据。

由图 7 可以看到,在本文给出的测量系统中,若布里渊频移的变化为 10 MHz,其值仅为被测频移 7.5 GHz 的千分之一,而系统归一化信号的变化为

百分之一。但在常规的法布里-珀罗干涉仪测量系统中,在测量的光谱中要测出千分之一的频率变化,要求干涉仪的精细度必须足够大,即反射镜的反射率要大于 99.99%,这是很难实现的。因此,边缘探测技术有更高的灵敏度。

结论 基于分子共振吸收滤波的布里渊散射频移测量方法具有以下突出的优点:1) 实时性好,可进行瞬时的测量;2) 频率的微小变化,将导致被测信号

光强的很大变化,因此,这种方法有极高的灵敏度; 3) 测量精度高。这是由于:布里渊散射峰的线型函数和分子共振吸收滤波器吸收光谱的线型函数均是已知的,而且是不变的,分子共振吸收滤波器吸收光谱的线宽非常窄,大大降低了环境噪声的影响;由于布里渊散射光谱和分子共振吸收滤波器吸收光谱都是对称的,当激光器的频率发生漂移时,二光谱一侧重叠面积的减小(或增加),必定伴随另一侧重叠面积等量的增加(或减小),因此这种方法有极好的抗干扰性;4) 分子共振吸收滤波器对入射光的平行度没有任何要求,光可以任意角度入射,这是法布里-珀罗干涉仪无法实现的。

因此采用分子共振吸收滤波测量水中的布里渊散射频移是一种非常好的有效的实际测量方法。

参 考 文 献

- 1 Fabelinskii I L. *Molecular Scattering of Light*. New York: Plenum Press, 1968
- 2 Cummins H Z, Gammon R W. Rayleigh and Brillouin scattering in liquids: the Landau-Placzek ratio. *J. Chem. Phys.*, 1966, **44**(7): 2787~2796
- 3 Moutain R D. *J. Research of National Bureau of Standards-A Physics and Chemistry*, 1966, **70A**: 207
- 4 Liu Dahe, Wang Huaying, Zhou Jing. Measurements of sound speed in sea water with different salinity and temperature by Brillouin scattering method. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **27**(4): 381~384 (in Chinese)
- 5 Xu Jianfeng, Li Rongsheng, Zhou Jing *et al.*. Measurements of bulk viscosity of water using Brillouin scattering. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(9): 1112~1115 (in Chinese)
- 6 Leonard D A, Sweeney H E. Remote sensing of ocean physical properties: a comparison of Raman and Brillouin techniques. *Proc. SPIE*, 1988, **925**: 407~414
- 7 Hirschberg J G, Byrne J D, Wouters A W *et al.*. Speed of sound and temperature in the ocean by Brillouin scattering. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2624~2628
- 8 Hickman G D, Harding J M, Garnes M C *et al.*. Aircraft laser sensing of sound velocity in water: Brillouin scattering. *Remote Sens. Environ.*, 1991, **36**: 165~178
- 9 Fry E S, Emery Y, Quan X *et al.*. Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speeding the ocean. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27): 6887~6894
- 10 Liu Dahe, Xu Jianfeng, Li Rongsheng *et al.*. Measurements of sound speed in the water by Brillouin scattering using pulsed Nd:YAG laser. *Opt. Commun.*, 2002, **203**: (Issue 4~6): 335~340
- 11 Guagliardo J L, Dufilho H L. Range resolved Brillouin scattering using a pulsed laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, **51**(1): 79~81
- 12 Fry E S, Katz J, Liu Dahe *et al.*. Temperature dependence of the Brillouin linewidth in water. *J. Modern Optics*, 2002, **49**(3/4): 411~418
- 13 Gelbwachs J A. Atomic resonance filters. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(7): 1266~1277
- 14 Korb C L, Gentry B M, Weng C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~4213
- 15 Korb C L, Gentry B M, Li S X. Spaceborne lidar wind measurement with the edge technique. *Proc. SPIE*, 1994, **2310**: 206~213
- 16 Piironen P, Eloranta E W. Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on a iodine absorption filter. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 234~236
- 17 Forkey J N, Lempert W R, Miles R B. Corrected and calibrated I₂ absorption model at frequency-doubled Nd:YAG laser wavelengths. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(27): 6729~6738
- 18 Goodman J W. *Statistical Optics*. New York: John Wiley & Sons, 1985. 470~520