

一种测量气体自发瑞利-布里渊散射频谱的系统

冯 静 何兴道 吴 涛* 夏如孝 葛 洋 李 翔

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

摘要 设计了一种测量气体自发瑞利-布里渊散射频谱的系统。激光器输出波长为 532 nm 的连续窄带光, 激光束聚焦到压力可控的密闭气体散射池中, 与气体分子相互作用, 产生散射信号, 在散射池侧向 90° 方向测量气体的自发瑞利-布里渊散射频谱。使用该系统测得了氮气在温度为 300 K, 压强为 300 kPa 下的自发瑞利-布里渊散射频谱, 并将实验结果与 Tenti S6 模型仿真结果进行了对比, 分析了偏差产生的主要原因, 为未来空间激光雷达大气参数的测量提供了参考。

关键词 散射; 自发瑞利布里渊; Tenti S6 模型; 散射池

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.072901

An Experiment System Measuring the Spontaneous Rayleigh-Brillouin Scattering Line Profiles of Gas

Feng Jing He Xingdao Wu Tao Xia Ruxiao Ge Yang Li Xiang

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

Abstract An experiment system to measure the spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering line profiles of gas is designed in this paper. A narrow bandwidth laser delivers a vertical polarization beam of continuous wave light at 532 nm. The beam is focused on the pressure controlled gas cell, interacts with gas molecules and generates the scattering signal. The spontaneous rayleigh-brillouin (RB) scattering line profiles of gas are measured at the lateral direction of 90° of the cell. The spontaneous RB scattering line profiles of N₂ under the temperature of 300 K and the pressure of 300 kPa are measured by this system. The results of experiment and simulation results of Tenti S6 model are compared and the causes of the deviation between them are analyzed. It provides a reference for future space lidar measurement of air parameters.

Key words scattering; spontaneous Rayleigh-Brillouin; Tenti S6 model; scattering cell

OCIS codes 290.1310; 290.5830; 290.5870; 300.6310

1 引言

20 世纪 60 年代窄带激光器发明后, 测量散射频谱的技术得到了发展, 布里渊散射峰与中央瑞利峰分离的问题得到了解决, 该技术首先被应用在液体和固体^[1-2]介质中, 之后被应用在气体^[3]介质中。20 世纪 70 年代, 人们对气体介质(特别是氢气、氮气和各种多原子气体)中的瑞利-布里渊(RB)散射进行了详细的研究, 并提出了多种用来描述散射谱线的模型。1972 年, Boley 等^[4]在 WCU 方程基础上建立了单原子气体布里渊散射模型, 称为 Tenti S6 模型。Tenti S6 模型是目前公认的、在宽波段范围内描述 RB 散射谱线最准确的模型。特别是在最近的研究中, 人们发现 Tenti S6 模型可以准确地描述由不同原子和分子组成的气体和空气中的 RB 散射谱线。RB 散射谱线可以通过不同的方法进行测量, 在早期的研究中人们直接通过法布里-珀罗(F-P)干涉仪来分离散射光^[5-6], 后来使用频率可调谐激光器的超外差等光拍频探测技术。虽然早期人们研究的主要是自发 RB 散射, 但相干 RB 散射的研究也得到了进一步发展。2002—2005 年, 美国普林斯顿大

收稿日期: 2014-02-01; 收到修改稿日期: 2014-03-10; 网络出版日期: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61177096)、江西省自然科学基金青年科学基金(20114BAB212008)

作者简介: 冯 静(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: nchufengjing@foxmail.com

导师简介: 何兴道(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事光散射技术方面的研究。E-mail: xingdaohe@126.com

* 通信联系人。E-mail: wutccnu2001@aliyun.com

学的 Xingguo Pan 等^[7-9]使用了一束窄带探测光和两条带宽较宽的光束采集到了二氧化碳、氧气的后向相干 RB 散射频谱,还使用该技术测得了多种气体的体粘滞系数。2012 年, Benjamin Witschas 等^[10]使用 355 nm 激光器在高山上测得了空气的后向 180° 自发 RB 散射频谱,证明 Tenti S6 模型在某种程度上能够描述实际空气中的自发 RB 散射频谱,这为该项技术迈向实际应用奠定了一定的基础。国内研究人员也在该方面进行了一些研究,王双义等^[11]介绍利用布里渊散射的目标探测技术,讨论了在海水和大气中的布里渊散射基本理论。马泳等^[12]提出利用大气布里渊散射频移来反演大气温度,在理论上得出了比常规探测方法更高的测量精度。黄文发等^[13]测量了不同温度下单模光纤受激布里渊散射的光谱,实验表明,随着温度的升高,布里渊频移逐渐增大,在一定温度范围内,布里渊频移与温度成线性关系。杨巍等^[14]提出了一种基于广义谐波小波变换的布里渊光时域反射计(BOTDR)的数字包络解调技术从而在不影响 BOTDR 的空间分辨率情况下提高布里渊频移测量精度。RB 散射是研究气体特性的一种有效方法,本文将实验测得的自发 RB 散射频谱和 Tenti S6 模型仿真的频谱进行对比反演出气体的温度、压强、密度分布、体积黏度等参数,这对于未来开展实际大气探测研究具有重要意义。

2 气体 RB 散射理论分析

布里渊散射是入射光波场与介质内的弹性声波相互作用而产生的一种光散射现象。散射光的频率相对于入射光的频率发生变化,并且这种变化的大小与散射角和散射介质内的声波场特性有关。布里渊散射光频移 $\Delta\nu$ 的公式如下:

$$\Delta\nu = \pm \frac{2n\nu}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

式中 n 为散射介质的实折射率, ν 为介质中的声速, λ 为入射激光的波长, θ 为散射角。

气体中的自发 RB 散射是由气体内部的热密度扰动引起的。RB 散射线型由气体密度决定,如果气体非常稀薄,气体分子就像直线运动的独立微粒,分子间的碰撞可以忽略不计;如果气体非常密集,接近流体状态,气体分子主要的运动形式属于流体力学范畴,碰撞在运动过程中起主导作用。为确定气体是“稀薄”还是“密集”,这里定义了一个参数 y , y 为散射波长和气体分子平均自由程之比,公式如下:

$$y = \frac{p}{k\nu_0\eta} = \frac{Nk_B T}{k\nu_0\eta}, \quad (2)$$

式中 p 为压强, $k = |\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i|$, \mathbf{k}_s 和 \mathbf{k}_i 分别为入射光和散射光的波矢, $\nu_0 = (2k_B T/M)^{1/2}$ 为热速度, M 为分子量, η 为剪切粘度, N 为数密度, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度。

当 $y \gg 1$ 时为流体力学区域,如图 1 中虚线($y=5.6$, $p=1000$ kPa, $T=293$ K)所示,分子平均自由程远小于散射波长,散射谱线可以用 Navier - Stokes 方程描述,近似为三个洛伦兹线型之和。当 $y \ll 1$ 时为克努森区域,如图 1 中实线($y=0$, $p \approx 0$ kPa, $T=293$ K)所示,分子平均自由程远大于散射波长。散射仅仅是由单个分子热运动引起的,散射谱线可用高斯线型描述。当 $0.3 \ll y \ll 3$ 时为动力学区域,如图 1 中点划线($y=0.56$, $p=100$ kPa, $T=293$ K)所示,该区域与实际大气散射相关,分子平均自由程与散射波长相当。在该区域中,散射谱线可用基于密度扰动的玻尔兹曼方程来描述。Tenti S6 模型是目前公认的描述 RB 散射谱线最准确的模型,通过 Tenti S6 模型得到的散射谱线如图 1 所示。

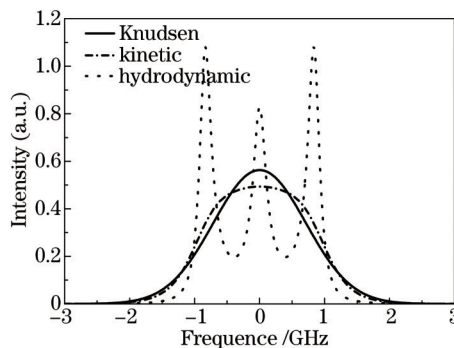


图 1 通过 Tenti S6 模型得到的氮气在不同散射区域的自发 RB 散射谱线。

Fig.1 Spontaneous RB scattering spectra of different regions in nitrogen obtained through Tenti S6 model

3 自发RB散射的实验装置

3.1 实验框图

测量自发RB散射频谱的实验框图如图2所示,激光器为全固态抽运激光器,输出波长为532 nm的连续窄带激光,最大功率为10 W,线宽小于5 MHz。输出的激光被分光镜M1分成两束激光:一束能量较强的95%的激光反射到全反镜M3,经过全反镜M3的光又经过透镜L1,直接聚焦到散射池^[15]中心,与池中的气体分子相互作用,产生散射信号;另一束较弱的5%的激光透过M1到全反镜M2,用来校准光路,称之为参考光。系统在散射池90°方向收集探测散射信号,散射信号经透镜L2准直,由透镜L3聚焦到针孔S1,滤除掉多余的杂散光,透镜L2、L3和L4的焦距分别为8 cm、5 cm和5 cm,针孔S的直径为100 μm,然后经透镜L4准直,进入到F-P扫描干涉仪中鉴频。F-P扫描干涉仪使用两个平行镜片,构成平平腔,镜片上面涂有高反射膜,反射率为96%。F-P扫描干涉仪的自由光谱范围设置为7.5 GHz,分辨率达到125 MHz,精细度为60。最后经透镜L5将散射信号聚焦到光子探测器(photon detector)中,在计算机中进行观测。由于散射信号经F-P干涉仪后非常微弱,肉眼看不到散射信号,只能看到参考光,为了保证散射信号能最大效率地耦合到连接光子探测器的光纤中,必须调节光路使散射光和参考光共轴。

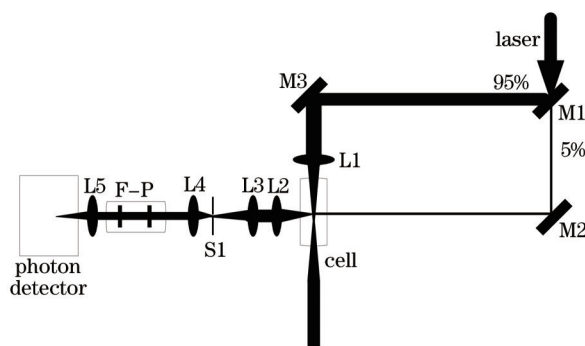


图2 散射实验结构图

Fig.2 Scattering experimental setup

3.2 散射池

实验中,为了测量高压下气体的散射,就必须将所测气体充到密闭的容器中,为此设计了一个气体散射池。散射池结构图如图3所示,散射池内气体的压强是可控的,压强的大小通过压力表进行测量。散射池入射窗口和出射窗口的镜片上镀了532 nm波长的增透膜,以减少窗口造成的散射光。在散射池的设计中采用了布儒斯特角的设计,布儒斯特角为34°,以减少能量损失和池子内杂散光干扰。在靠近散射池出射窗口的的位置凿了两个小孔S,深度为1 cm,使得激光在出射窗口镜片反射的光进入小孔S内,以减少出射窗口镜面反射光对散射信号的影响。另外,池子的孔径直径为1 cm,在池子内部添加了两个小孔P,直径为4 mm,进一步减少了池子内的杂散光。

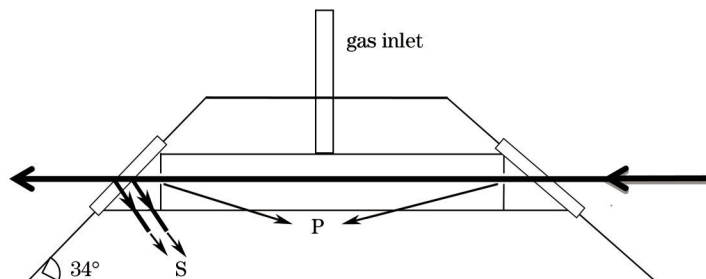


图3 气体散射池结构图

Fig.3 Gas scattering pool structure diagram

3.3 数据采集框图

本系统的数据采集框图如图4所示,散射光首先进入F-P扫描干涉仪进行选频,F-P扫描干涉仪扫描时间变化范围为10 ms~2 s,可以方便地改变采集时间。散射光经过F-P扫描干涉仪后经过透镜L6会聚进入

光纤, 散射信号通过光纤到达光子探测器, 进行信号的采集。DG535是一种高精度的数字延时发生器, 可以控制延迟信号的输出, 获得所需的延迟时序。F-P扫描干涉仪的锯齿波信号控制DG535产生触发信号使光子计数卡对光子探测器采集的信号计数, 使得光子计数卡与F-P扫描干涉仪同步, 最后测得的频谱在PC端显示。F-P扫描干涉仪的锯齿波信号、DG535产生的触发信号和光子计数卡采集的光子数均在示波器上显示。

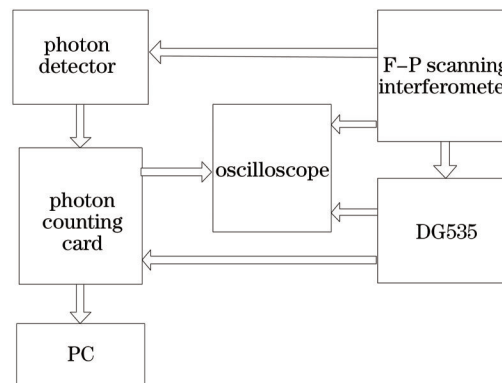


图4 本系统的数据采集框图

Fig.4 Block diagram of data acquisition of the system

4 实验结果及分析

图5为本系统参考光测得的F-P扫描干涉仪仪器函数频谱图。根据Tenti理论模型可知低气压下自发RB谱近似服从高斯分布, 高斯半峰全宽(FWHM)为3 GHz, 要得到完整的频谱, F-P干涉仪的自由光谱范围(FSR)至少要大于6 GHz, 本系统中选用7.5 GHz。

图6(a)中灰色曲线为使用该系统测得的氮气在温度为300 K、压强为300 kPa下的自发RB散射频谱, 黑色曲线为Tenti S6模型在相同条件下的仿真结果, 显示出利用本文设计的系统测得的实验结果能与Tenti S6模型仿真结果较好地吻合, 该系统能较好地测得气体自发RB散射频谱。纵坐标为归一化强度, 横坐标为频移, 计算机设定的采集时间为80 ms, 采集次数为200次。图6(b)为实验测得的频谱和Tenti S6模型相同条件下仿真频谱的偏差, 产生偏差的主要原因是: 1) 激光器频率的漂移; 2) F-P扫描干涉仪仪器函数的影响, 实验得到的RB散射频谱是由光子计数器经F-P扫描干涉仪选频后测得的, 而F-P扫描干涉仪中压电陶瓷伸缩长度的变化与扫描电压是非线性关系, 并且外界条件变化导致F-P扫描干涉仪频率漂移, 这些因素影响F-P扫描干涉仪仪器函数的精确性, 导致最终实验测得的瑞利布里渊散射频谱产生偏差。

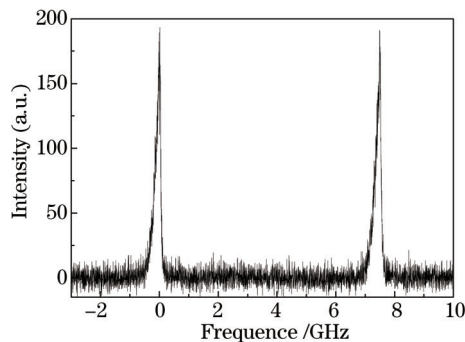


图5 实验测得F-P仪器函数频谱图

Fig.5 Measured F-P spectrum of instrument function

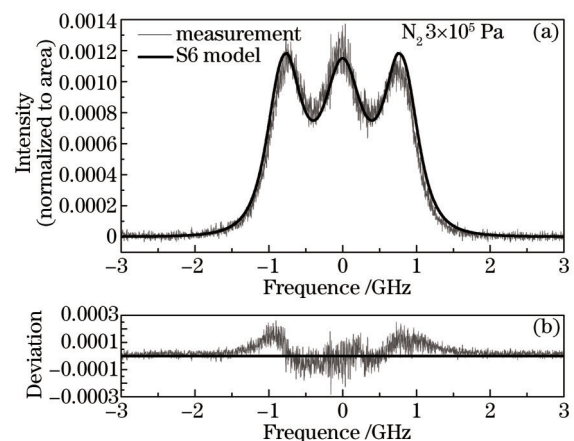


图6 (a) 实验测得的频谱和Tenti S6模型仿真的频谱; (b)

两者之间的偏差

Fig.6 (a) Measured spectrum and Tenti S6 model simulation spectrum; (b) deviation between the two

5 结 论

使用 532 nm 窄带激光器、散射池、F-P 扫描干涉仪和光子探测器设计了一种测量气体自发 RB 散射频谱的系统,使用该系统测得了温度为 300 K,压强为 300 kPa 时,90°方向上的氮气自发 RB 散射频谱,并将实验结果与 S6 模型仿真频谱进行了对比。结果表明,该系统能较好地测量气体的自发 RB 散射频谱。

参 考 文 献

- 1 G B Benedek, J B Lastovka, K Fritsch, *et al.*. Brillouin scattering in liquids and solids using low-power lasers[J]. J Opt Soc Am, 1964, 54(10): 1284-1285.
- 2 R Y Chiao, B P Stoicheff. Brillouin scattering in liquids excited by the He-Ne maser[J]. J Opt Soc Am, 1964, 54(10): 1286-1287.
- 3 T J Greytak, G B Benedek. Spectrum of light scattered from thermal fluctuations in gases[J]. Phys Rev Lett, 1966, 17(4): 179-182.
- 4 C D Boley, Rashmi C Desai, G Tenti. Kinetic models and Brillouin scattering in a molecular gas[J]. Canadian Journal of Physics, 1972, 50(18): 2158-2173.
- 5 Q H Lao, P E Schoen, B Chu. Rayleigh - Brillouin scattering of gases with internal relaxation[J]. The Journal of Chemical Physics, 1976, 64(9): 3547.
- 6 L Letamendia, J P Chabrat, G Nouchi, *et al.*. Light-scattering studies of moderately dense gas mixtures: hydrodynamic regime[J]. Phys Rev A, 1981, 24(3): 1574-1590.
- 7 Xingguo Pan, Mikhail N Shneider, Richard B Miles. Coherent Rayleigh-Brillouin scattering[J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(18): 183001.
- 8 Xingguo Pan, Mikhail N Shneider, Richard B Miles. Coherent Rayleigh-Brillouin scattering in molecular gases[J]. Phys Rev A, 2004, 69(3): 033814.
- 9 Xingguo Pan, Mikhail N Shneider, Richard B Miles. Power spectrum of coherent Rayleigh-Brillouin scattering in carbon dioxide[J]. Phys Rev A, 2005, 71(4): 045801.
- 10 Benjamin Witschas, Christian Lemmerz. Horizontal lidar measurements for the proof of spontaneous Rayleigh - Brillouin scattering in the atmosphere[J]. Appl Opt, 2012, 51(25): 6207-6219.
- 11 Wang Shuangyi, Lü Zhiwei, Lin Dianyang, *et al.*. Target detection using Brillouin scattering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(2): 13-17.
王双义, 吕志伟, 林殿阳, 等. 利用布里渊散射进行目标探测[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(2): 13-17.
- 12 Ma Yong, Liang Kun, Lin Hong, *et al.*. Model of atmosphere detection based on Brillouin scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 962-966.
马 泳, 梁 琨, 林 宏, 等. 基于布里渊散射信号检测的大气探测模型[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 962-966.
- 13 Huang Wenfa, Wang Xiaochao, Wang Jiangfeng, *et al.*. Temperature characteristic of stimulated Brillouin scattering in single-mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405001.
黄文发, 汪小超, 王江峰, 等. 单模光纤中受激布里渊散射的温度特性[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405001.
- 14 Yang Wei, Yang Yuanhong. Digital envelope detection technique for Brillouin optical time-domain reflectometry based on generalized harmonic wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506004.
杨 巍, 杨远洪. 基于广义谐波小波变换的布里渊光时域反射计的数字包络解调技术[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506004.
- 15 He Xingdao, Xu Jinjun, Shi Jiulin, *et al.*. Influences of optical breakdown on wideband SBS and forward SRS[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0619005.
何兴道, 徐进军, 史久林, 等. 光学击穿对宽带受激布里渊散射及受激拉曼散射特性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0619005.