

基于套接字编程的共焦布里渊光谱测试装置

钟昆 王允* 张涛 赵维谦

北京理工大学精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 与拉曼光谱等光谱测试分析方法相比,布里渊光谱可反映测试样品弹性系数等力学性能。采用中心波长为532 nm的单纵模激光器作为激发源,使用扫描型多通道双串联式法布里-珀罗干涉仪对产生的布里渊光进行探测,成功搭建了一套共焦布里渊光谱测试装置。系统利用具有远程通信功能的套接字端口方式获取光子数,进行光谱采集和显示。该方法可进一步应用于与共焦布里渊显微成像相关的大型系统远程联动装置,在仪器设计方面具有广阔的应用前景。利用该套基于套接字编程的共焦布里渊光谱测试装置,测得树脂玻璃、硅胶和二氧化硅玻璃的布里渊光谱,并计算得到相应的纵向弹性系数。

关键词 显微; 共焦显微; 弹性系数; 布里渊散射; 套接字编程; 远程控制

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.091801

Confocal Brillouin Spectrum Measurement Setup Based on Socket Programming

Zhong Kun Wang Yun Zhang Tao Zhao Weiqian

Beijing Key Laboratory of Precision Photoelectric Measurement Instrument and Technology,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Compared with the spectrum test methods, such as the Raman spectroscopy, the Brillouin spectroscopy can reflect the mechanical properties including elasticity coefficient. By using a single-mode 532 nm laser as the excitation source, and a scanning multi-channel tandem Fabry-Perot interferometer to detect the Brillouin light, a confocal Brillouin spectrum test system has been successfully built. This system uses the socket port means with telecommunication function to acquire the photon counts and realize spectrum acquisition and display. This means is expected to be further applied to large-scale remote linkage setup related to confocal Brillouin imaging, and is a prosperous instrument design direction. Based on this confocal Brillouin spectrum test setup with socket programming, the Brillouin light of resin glass, silicon rubber and glass are obtained, and the corresponding longitudinal elasticity coefficients are calculated.

Key words microscopy; confocal microscopy; elasticity coefficient; Brillouin scattering; socket programming; remote control

OCIS codes 180.1790; 290.5830; 200.4560

1 引言

布里渊散射光谱的产生是微弱的非弹性散射过程,起源于光和介质的相互作用,并在介质内部形成以超声速行进的热学材料密度涨落。不同于标准的接触式测量技术,布里渊光谱学以非接触和非损伤方式进行材料的力学特性测量。结合共焦技术形成的共焦布里渊光谱技术可对样品微区进行精细测量。分析样品散射光中的布里渊光谱部分,可获得样品组分、弹性力学等信息^[1-5]。光束的布里渊光谱可通过法布里-珀罗

收稿日期: 2016-04-22; **收到修改稿日期:** 2016-05-24; **网络出版日期:** 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年基金(51422501)、国家自然科学基金重点项目(51535002)

作者简介: 钟昆(1986—),男,博士,主要从事布里渊散射测量、非线性光通信等方面的研究。

E-mail: wanstea@qq.com

* 通信联系人。E-mail: alotrabbits@163.com

(FP)多光束干涉仪测试获得^[6-9]。通过压电陶瓷换能器及相关电机控制调节 FP 光学腔腔长,使光束在不同的腔长条件下通过不同波长成分的光子。拉曼散射光谱源于光子与分子的振动和旋转模式间的相互作用^[10],可提供物质化合键、分子结构等信息。与拉曼光谱技术相比,布里渊光谱技术的鲜明特色是材料弹性力学特性的测量^[10]。

布里渊光谱技术的研究主要集中在材料和微区两方面。2012 年 Scarcelli 等^[11]利用布里渊光谱技术进行了人眼轴向组分研究,得到 60 μm 轴向分辨率结果;2013 年 Koski 等^[12]利用布里渊光谱技术以非受创方式实现了蜘蛛丝全部弹性系数的测量;2015 年 Olsson 等^[13]实现了硅片的布里渊光谱及其温度特性的测试。在国内,2014 年张念等^[14]利用布里渊光谱技术测量了海水布里渊散射谱特征参数;2014 年冯静等^[15]使用瑞利-布里渊系统测得氮气的自发瑞利-布里渊散射谱;2015 年张颖等^[16]利用自建布里渊实验装置实现了 CCl_4 声速测量。这些研究工作没有涵盖布里渊光谱技术可能涉及到的远程通信和自动控制功能。例如布里渊光谱测试系统包含的某些控制器件需运行于若干计算机平台,此时需考虑使用通信编程协调各个平台实现自动控制。

套接字端口通信功能可实现远程通信和自动控制,为仪器设计中的特定需求提供辅助功能^[17-18]。系统包含的某些控制器件需运行于若干计算机平台,且其他平台某个控制器件触发时需立即进行干涉仪扫描,此时可用套接字端口通信编程协调各个平台实现自动控制。干涉仪扫描结束时,需将扫描结束的状态反馈至各计算机平台,同样可利用套接字端口通信传输相关信息。此外,套接字编程还可运用于工业、医学等方面的信息传输设计^[19-20]。基于个人电脑(PC机)外接的数据采集卡的采集点数受限,需直接和 PC 机串口或并口相连,极大限制了 PC 机资源的充分利用。工业套接字网络编程为构建开放式模块化的数据采集奠定了基础^[19]。基于套接字的医学信息传送模块可运用于医院各科室及远程医疗系统,提高医学信息传输速度^[20]。上述相关研究都表明,套接字编程方法具有远程控制等方面的优势,是具有广阔前景的测试装置软件编程设计方向。

本文搭建了自主设计的共焦布里渊光谱测试装置,采用套接字编程方法成功采集了树脂玻璃等材料的布里渊光谱,并计算获得了测试样品的弹性系数。

2 实验系统

2.1 硬件系统

装置使用波长为 532 nm 的单纵模激光器作为激光光源,激发待测样品布里渊散射光,实验装置实物图如图 1(a)所示,对应的光路原理如图 1(b)所示。激光器出射光束首先经过隔离器,以防止反射光进入激光器。由于激光器光斑直径为 (2.25 ± 0.25) mm,不满足物镜后瞳满瞳要求,所以使用扩束镜(BE)将光束直径扩为 4.5 mm。扩束镜前折返镜将光路抬升至光轴高度 205 mm。光束首先经过消偏振分光棱镜 BS1,透射反射比为 50:50。反射的光束经由两个反射镜 M1 和 M2 改变其路径作为参考光,进入 FP 干涉仪参考光入光口。透射的光束再分别通过 50:50 消偏振分光棱镜 BS2 和滤光片。光束再经过折返镜抬升进入样品台。样品台由物镜驱动器、物镜、样品台、二维手动平移台和轴向电动升降台组成。光束通过数值孔径为 0.8 的物镜会聚至样品。样品散射的光,包括弹性碰撞产生的瑞利光和非弹性碰撞产生的布里渊光和拉曼光,沿原路返回由物镜收集。由于入射光和散射光总体成 180° 夹角,所以此种激发光收集方式为背向散射配置。Notch 为固定波长带阻滤波片,阻带为 532 nm 附近约 17 nm。滤波片反射瑞利光和布里渊光,透射光预留为拉曼光探测。滤波片反射的光束经过消偏振分光棱镜 BS2,BS2 将反射部分光导入消偏振分光棱镜 BS3。在 BS3 中光束同样分成透射和反射两路,其中透射光束预留为定焦探测,反射光束则进入共焦光路部分。共焦光路由两个焦距为 150 mm 的透镜 L1 和 L2,以及一个直径为 50 μm 的针孔(PH)组成。针孔位置位于透镜 L1 的焦点处,此焦点与会聚于样品表面的物镜焦点共轭^[21-22]。针孔发出的光相当于点光源扩散,光束经由针孔产生衍射现象。发散光经由透镜 L2 准直形成平行光。平行光束再通过两个反射镜 M3 和 M4 改变其光束路径,由焦距为 250 mm 的消色差透镜 L3 会聚光束,进入干涉仪针孔进行布里渊光探测。样品放置在轴向位移控制器上,连接至计算机。计算机同时连接干涉仪控制面板进行套接字远程端口控制。

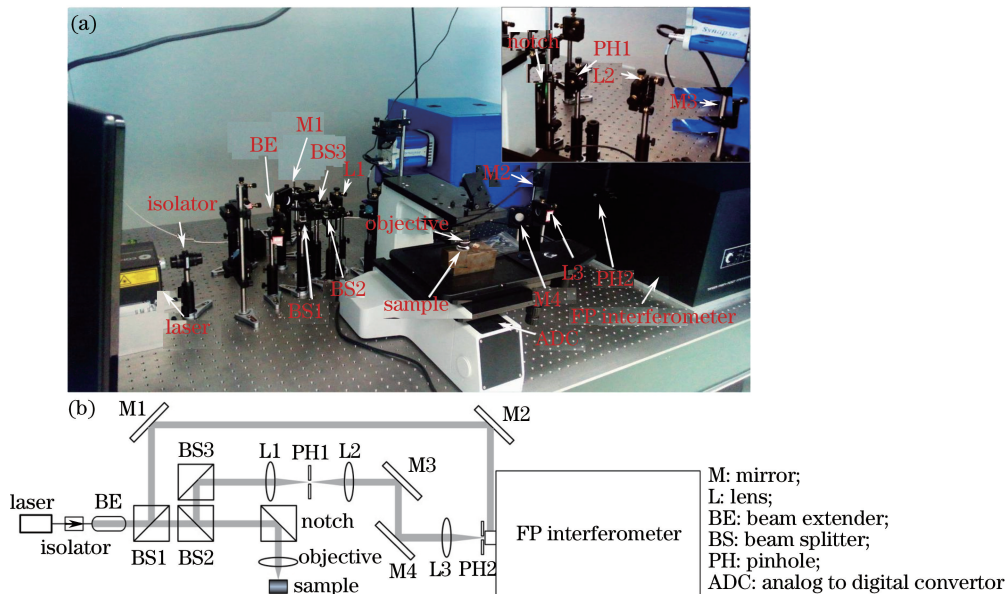


图 1 激光共焦布里渊装置(a)实物图和(b)光路原理图

Fig. 1 (a) Photograph and (b) schematic of laser confocal Brillouin setup

2.2 软件系统

干涉仪自带光谱采集软件 Ghost 的所有按钮功能,可通过套接字方式利用端口远程通信集成进入可编程软件模块^[17]。套接字方式不仅可实现两个仪器的远程通信控制,也可实现同一个电脑上两个软件的端口通信。按照软件端口通信模式,可编程软件模块可操作干涉仪自带光谱采集软件的各项功能。

首先建立两个软件程序的套接字通信连接,使用特定 TCP/IP 网络端口,端口号 4000。其中干涉仪自带光谱采集软件 Ghost 设置为主机模式,并打开侦听;可编程软件模块设置为用户模式。按照实验需要以及可提供的套接字命令,可编程软件模块布里渊光谱标签的界面基本对应自带光谱采集软件的功能,其界面设计如图 2 所示。

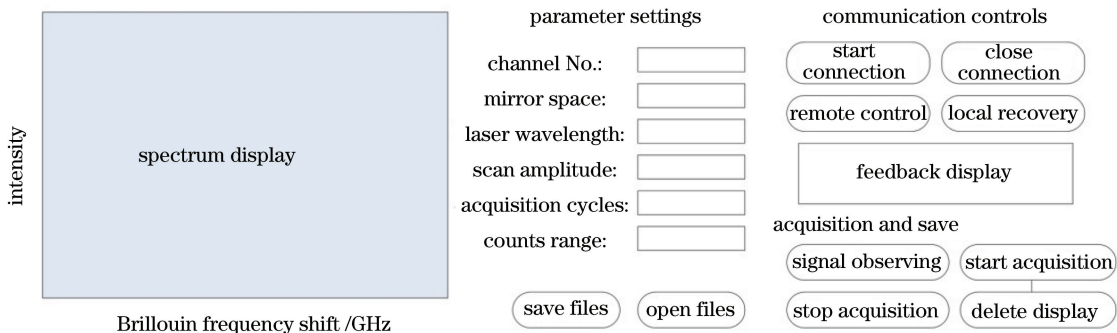


图 2 可编程软件模块布里渊光谱标签页设计

Fig. 2 Brillouin spectrum tag design in the programmable software module

标签页由通信控制、采集存储、参数设置、光谱显示以及存储打开文件 5 个部分组成。通信控制和采集存储的各个按钮均涉及套接字命令的发送。功能和对应套接字命令如表 1 所示。

在实现光谱显示功能时,需特别考虑额外自行计算图像点横坐标布里渊频移值。设镜子间距(FP 光学腔腔长)为 d_0 ,激光中心波长为 λ_0 ,扫描幅度(即 FP 光学腔腔长改变量)为 Δd ,真空光速为 c ,则频率扫描范围 Δf 的表达式为^[23]

$$\Delta f = \frac{c \Delta \lambda}{\lambda_0^2} = \frac{c \Delta d}{d_0 \lambda_0} \quad (1)$$

表 1 控制功能和对应套接字命令

Table 1 Control functions and corresponding socket commands

Function	Socket command
Start connection	START
Close connection	CLOSE
Remote control	OVERRIDE
Local recovery	RESTORE
Signal observing	OBSERVE
Start acquisition (nn cycles)	START nn
Stop acquisition	STOP
Delete display	DELETE

当 FP 光学腔腔长为 2.88 mm, 激光中心波长为 532 nm, 扫描幅度为 399 nm, 扫描通道数为 1024 时, 可计算得到频率扫描范围为 $\Delta f \approx 78.1$ GHz, 布里渊频移取值范围为 $[-39.05 \text{ GHz}, 39.05 \text{ GHz}]$, 相邻图像点的频率值间隔约为 76.3 MHz。

软件操作流程如图 3 所示, 启动测试界面后, 打开服务器远程通信功能, 此处为干涉仪自带软件的套接字端口。点击测试界面的建立连接按钮, 从自带软件反馈信息判断建立连接是否成功。若不成功, 则查找原因继续尝试建立连接。若连接成功, 测试软件尝试远程控制, 直到成功获得干涉仪自带软件操作权限。至此, 干涉仪自带软件的所有功能操作, 可通过测试软件以远程通信套接字端口方式进行。

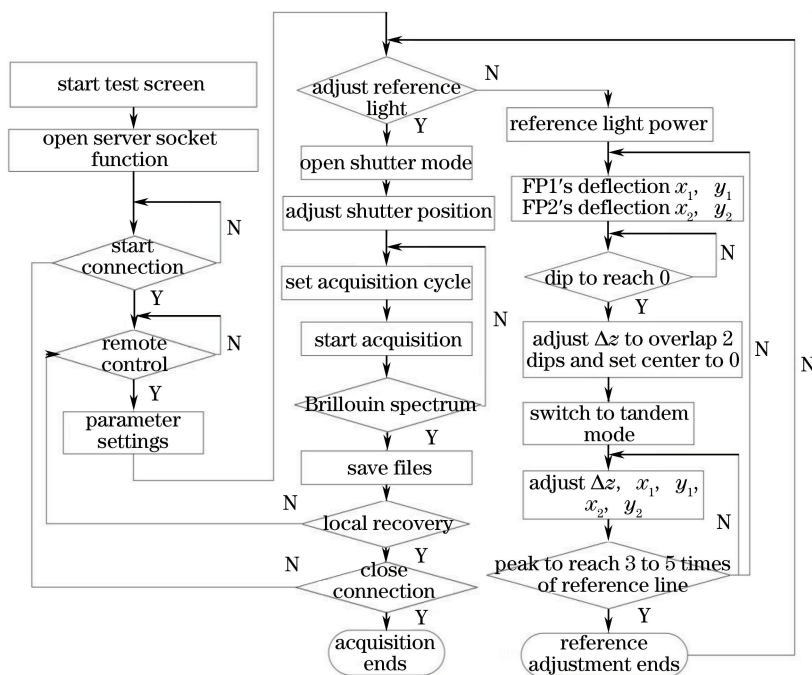


图 3 单点光谱采集流程图

Fig. 3 Flow chart of single point spectrum acquisition

3 结果和讨论

设置干涉仪通道数为 2^{10} , 光学干涉腔镜组间距为 2.88 mm, 激光器中心波长为 532 nm, 腔长变化扫描幅度为 399 nm, 采集周期为 1000 次, 光子数显示范围为 50 个。测试软件测得的树脂玻璃聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、硅胶和二氧化硅样品的布里渊光谱分别如图 4(a)~(c) 所示, 显示其频移分别在 15.7, 5.8, 33.8 GHz 位置处。根据布里渊频移与声速、弹性系数关系的相关公式^[23-25], 可计算相应的纵向声速和弹性系数。

样品各组分可由布里渊散射产生声速的不同加以区分。声速可表示为

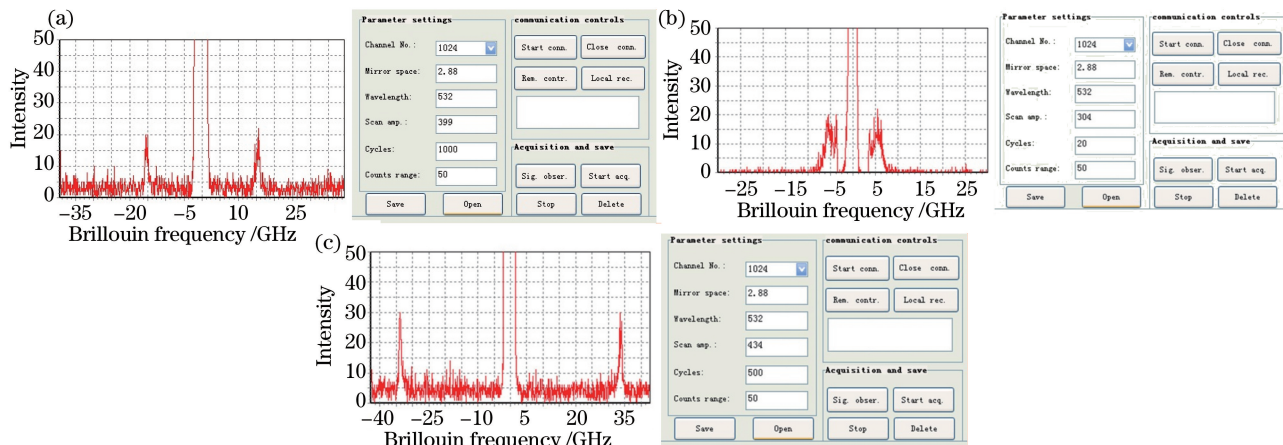


图4 单点采集(a)PMMA、(b)硅胶和(c)二氧化硅玻璃的布里渊光谱

Fig. 4 Single point acquisition of Brillouin spectra of (a) PMMA, (b) silicon rubber and (c) SiO₂ glass

$$\nu_a = \frac{\lambda_p f_B}{2n}, \quad (2)$$

式中 λ_p 为激光波长, f_B 为布里渊频移, n 为样品组分折射率。弹性系数可表示为

$$C_s = \nu_a^2 \rho, \quad (3)$$

式中 ρ 为样品的密度。实验中激光器波长 $\lambda_p = 532 \text{ nm}$, 当测试样品为树脂玻璃时, $f_{B1} = 15.7 \text{ GHz}$, $n_1 = 1.48$, $\rho_1 = 1.19 \text{ g/cm}^3$, 代入(2)式和(3)式, 可得树脂玻璃声速 $\nu_{a1} = 2.82 \text{ km/s}$, 弹性系数 $C_{s1} = 9.48 \text{ GPa}$ 。同理可计算得到硅胶与二氧化硅的声速和弹性系数, 结果如表2所示。

表2 二氧化硅玻璃、硅胶和树脂玻璃典型参数

Table 2 Typical parameters of SiO₂ glass, silicon rubber and PMMA

Sample	Refractive index	Density / (g/cm ³)	Brillouin frequency		Acoustic velocity / (km/s)	Longitudinal elasticity coefficient / GPa
			shift / GHz			
PMMA	1.48	1.19	15.7		2.82	9.48
Silicon rubber	1.37	0.955	5.8		1.23	1.21
SiO ₂ glass	1.47	2.23	33.8		6.12	83.40

实验装置布里渊频移的测量精度由干涉仪的频率分辨力决定。频率分辨力可表示为^[23]

$$\delta f = \frac{cb}{4\pi nd}, \quad (4)$$

式中 b 为亮纹的相位宽度, n 为干涉腔间介质折射率, d 为干涉腔镜组间距。在实验装置使用的干涉仪中, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $b = 0.043 \text{ rad}$, $n \approx 1.0$, $d = 2.88 \text{ mm}$ 。将上述数据代入(4)式, 计算可得 $\delta f = 0.357 \text{ GHz}$ 。表明当不同测试样品或样品不同组分的布里渊频移之差大于 0.357 GHz 时, 装置可准确地区分两种物质。

4 结 论

在搭建自主设计的共焦布里渊光谱显微测试装置的基础上, 以套接字端口通信可编程软件方式成功测试了树脂玻璃等样品的布里渊光谱, 计算了其纵向弹性系数。装置同时展示了布里渊光学测试样品力学特性在非接触、实时性等方面的优势, 以及套接字端口通信在开展远程仪器级联、联动测量、同步数据交互等方面的广阔前景。在该实验装置的基础上还可借助精密轴向升降台、二维平移台等辅助装置实现高精度二维平面以及三维立体的共焦布里渊显微成像, 在生物化学分析、仪器制造、机械加工等方面具有潜在应用。另外, 在布里渊光收集方面, 多角度收集设计的实现可提供全面的晶体弹性系数测量。在此基础上进行使装置仪器化的光学设计和优化的套接字远程通信协议, 可实现远程样品的便捷测试, 以及集测试和通信功能于一体的新型化仪器。

参 考 文 献

- 1 Liptak D C, Reber J C, Maguire J F, *et al.* On the development of a confocal Rayleigh-Brillouin microscope [J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78: 016106.
- 2 Yamaguchi M, Yagi T, Azuhata T, *et al.* Brillouin scattering study of gallium nitride: Elastic stiffness constants [J]. Journal of Physics, 1997, 9(1): 241-248.
- 3 Yamaguchi M, Yagi T, Sota T, *et al.* Brillouin scattering study of bulk GaN [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(12): 8502-8504.
- 4 Bi Weihong, Yang Xipeng, Li Jingyang, *et al.* Forward and backward Raman amplification of Brillouin scattering signal in Brillouin optical time domain reflectometer system [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1215007.
毕卫红, 杨希鹏, 李敬阳, 等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1215007.
- 5 Zhang Cong, Yu Wenfeng, Li Zhenglin, *et al.* Numerical study on scattering properties for the stimulated Brillouin scattering fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0319005.
张 聪, 余文峰, 李正林, 等. 光纤受激布里渊散射的散射特性数值研究[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0319005.
- 6 Speziale S, Marquardt H, Duffy T S. Brillouin scattering and its application in Geosciences [J]. Reviews in Mineralogy Geochemistry, 2014, 78: 543-603.
- 7 Mock R, Hillebrands B, Sandercock R. Construction and performance of a Brillouin scattering set-up using a triple-pass tandem Fabry-Perot interferometer [J]. Journal of Physics E, 1987, 20(6): 656-659.
- 8 Sandercock J R. Simple stabilization scheme for maintenance of mirror alignment in a scanning Fabry-Perot interferometer [J]. Journal of Physics E, 1976, 9(7): 566-569.
- 9 Stoddart P R, Crowhurst J C, Every A G, *et al.* Measurement precision in surface Brillouin scattering [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1998, 15(9): 2481-2489.
- 10 Cheng Guangxu. Raman Brillouin scattering [M]. Beijing: Science Press, 2008: 461-467.
程光煦. 拉曼布里渊散射[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 461-467.
- 11 Scarcelli G, Yun S H. *In vivo* Brillouin optical microscopy of the human eye [J]. Optics Express, 2012, 20(8): 9197-9202.
- 12 Koski K J, Akhenblit P, McKiernan K, *et al.* Non-invasive determination of the complete elastic moduli of spider silks [J]. Nature Materials, 2013, 12: 262-267.
- 13 Olsson K S, Klimovich N, An K, *et al.* Temperature dependence of Brillouin light scattering spectra of acoustic phonons in silicon [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106: 051906.
- 14 Zhang Nian, Ma Yong, Liang Kun, *et al.* Characteristics measurement of the ocean Brillouin scattering spectrum [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(11): 84-88.
张 念, 马 泳, 梁 琨, 等. 海水布里渊散射谱特征参数的测量[J]. 光电工程, 2014, 41(11): 84-88.
- 15 Feng Jing, He Xingdao, Wu Tao, *et al.* An experiment system measuring the spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering line profiles of gas [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 072901.
冯 静, 何兴道, 吴 涛, 等. 一种测量气体自发瑞利-布里渊散射频谱的系统[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 072901.
- 16 Zhang Ying, Wang Sheng, Zheng Xiong, *et al.* Speed of sound measurement from spontaneous Brillouin scattering [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 037801.
张 颖, 王 升, 郑 雄, 等. 利用自发布里渊散射测量液体声速[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 037801.
- 17 Zhao Junwei, Ouyang Zhonghui, Liu Dongxin. Network communications programme use of asynchronism socket based on message and multithreading technology [J]. Microcomputer Information, 2009, 25(10-3): 114-115.
赵均伟, 欧阳中辉, 刘东鑫. 基于消息的异步套接字和多线程技术网络通信编程[J]. 微计算机信息, 2009, 25(10-3): 114-115.
- 18 Du Fei, Liu Xinsong, Qiu Yuanjie, *et al.* Application and research of netlink socket in system communication [J]. Microcomputer Information, 2006, 22(3): 95-97.
杜 飞, 刘心松, 邱元杰, 等. Netlink 套接字在系统通信中的应用研究[J]. 微计算机信息, 2006, 22(3): 95-97.

- 19 Sun Qinlong, Shao Huihe. Application of socket in industrial data communication [J]. Control Engineering of China, 2006, 13(3): 274-277.
孙钦龙, 邵惠鹤. Socket 套接字在工业数据通信中的应用[J]. 控制工程, 2006, 13(3): 274-277.
- 20 Wang Weihong, Fan Tingjiu. Research on the designing and realization of medical information transmission based on the socket [J]. China Medical Equipment, 2014, 11(1): 36-39.
王维红, 樊廷玖. 基于 Socket 套接字的医学信息传送模块的设计与实现[J]. 中国医学装备, 2014, 11(1): 36-39.
- 21 Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution [J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5013-5021.
- 22 Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R. Tri-heterodyne confocal microscope with axial superresolution and higher SNR [J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5191-5197.
- 23 Xie Jinghui, Zhao Dazun, Yan Jixiang. Physics optics course [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012: 174-179.
谢敬辉, 赵达尊, 闫吉祥. 物理光学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012: 174-179.
- 24 Jamal M, Asadabadi S J, Ahmad I, *et al.* Elastic constants of cubic crystals [J]. Computational Materials Science, 2014, 95: 592-599.
- 25 Liu Jingye, Li Changjiang, Zhang Pengxiang, *et al.* Brillouin scattering of high polymer [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 1983 (1): 110-115.
刘竞业, 李长江, 张鹏翔, 等. 高聚物的布里渊散射[J]. 北京化工学院学报, 1983(1): 110-115.