

文章编号: 1000-4734(2014)02-0283-07

布里渊散射及其在地学中的应用进展

王燕^{1,2}, 李和平^{1*}, 王攀^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 地球内部物质高温高压实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 布里渊散射通过测定光的频移, 精确计算物质的声速、弹性系数、弹光系数、折射率、绝热体弹模量, 极化率, 绝热方程等一系列基本的物理量。以这些物理量为基础, 可以得到物质的相变、结构, 以及地球深部及行星内部物质的组成、状态、性质等信息。声速和弹性对于压力的依赖性对模拟地球的成分和演化具有重要作用。本文介绍布里渊散射的产生和原理, 从不同温度、压力的角度阐述了布里渊散射在地球科学中的应用, 对目前该研究存在的问题作出了评述, 并对布里渊散射光谱的发展趋势进行了展望。

关键词: 布里渊散射; 声速; 弹性系数; 地球物质; 高温高压

中图分类号: O59; P579

文献标识码: A

作者简介: 王燕, 女, 1986 年生, 博士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业. E-mail: iamswallow1113@163.com

布里渊散射是由于物质中的声学声子或磁振子自旋波与入射光相互作用, 导致入射光的频率发生位移。在实验过程中, 通过测定光的频移 (也就是样品的声学模的频率), 可以得出样品的压电性质^[1-3], 声速^[4,5], 弹性系数^[6,7], 弹光系数, 折射率^[8-10], 绝热体弹模量, 极化率^[11]和状态方程^[12,13]等物理参数。布里渊散射光谱技术目前正逐渐被应用到地球科学领域, 用以研究物质在不同温度和压力下的相变、结构, 以及地球深部及行星内部物质的组成、状态、性质等^[14,15]。

1 布里渊散射光谱

1.1 布里渊散射光谱概述

布里渊散射光谱是一种非破坏性的微区分析手段, 以光为探针测量气体、液体和固体中的声子和自旋波等各种元激发, 是研究物质基本性质 (弹性和磁性相变) 及多种交叉效应 (压电、磁弹和光弹等) 的重要手段。光与物质的声学声子相互作用时, 声子的湮灭和产生分别引起光能增大或减小, 通过测量光子能量的变化可以得到声子能量的信息。

1914—1922 年, Brillouin^[16,17] 对具有声波密度起伏的光散射谱进行了计算, 从理论上预言了布里渊散射的存在。直到 1930 年, Gross^[18,19]

在液体中首先观察到这种现象: 当平面声波在介质中传播时, 因声波波长远大于晶格常数, 所以长波声学模所涉及的仍是单胞中所有原子的同位相的运动, 即约在 100 个单胞范围内, 原子位移近似相同, 从而验证了 Brillouin 的预言。目前, 布里渊散射理论的研究已有许多报道^[20-22]。

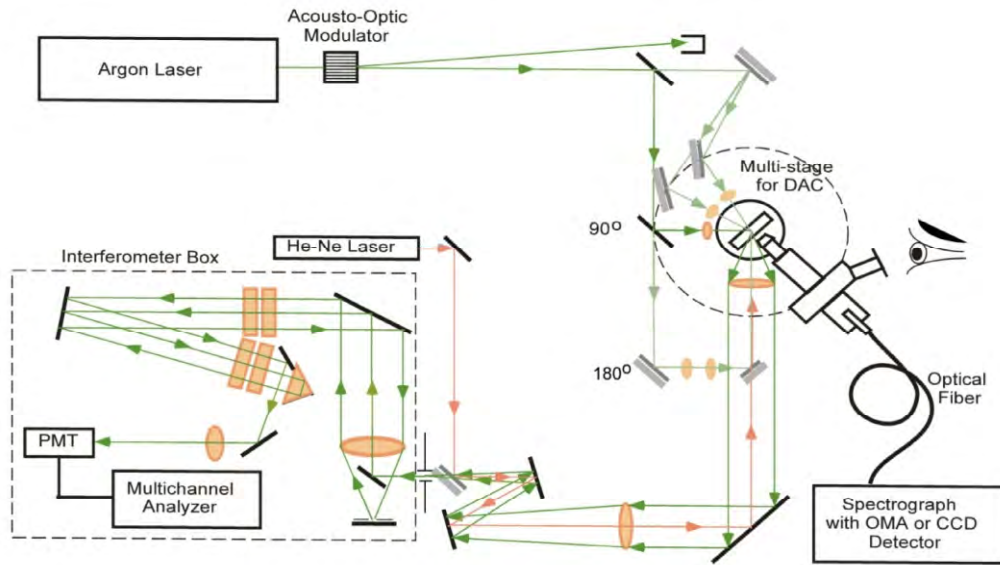
1.2 布里渊散射光谱仪结构

布里渊散射是研究能量较小的元激发, 如声子和磁振子等。散射信号强度很弱, 并且在频谱上和瑞利散射线靠得非常近, 较难分开。因此, 探测布里渊散射信号的光谱仪需要有足够高的分辨率。法布里-珀罗干涉仪 (FPI) 满足这一要求^[26], 目前使用的 FPI 多数为瑞士 JRS scientific instruments 公司生产的 3+3 串接多通 FPI^[27,28]。串接多通组合的实现将自由光谱区范围 (FSR) 提升为单极 FPI 的 10~20 倍, 增加了仪器的锐度 (>90) 与对比度 (>10¹¹), 提高了光谱信噪比。新型法布里-珀罗干涉仪在准直调节、长时间抗震稳定、维持镜间距及其平行度等方面都有较好改善^[29,30]。

用于弹性性质研究的布里渊散射系统的系统光路, 如图 1 所示。其核心组成部分为 JRS scientific instruments 公司生产的 3+3 通道 Sandercock 型法布里-珀罗干涉仪; 单频 Ar 离子激光器作为激发光源; 声光调制器 (Acousto-Optic Modulator) 用来抑制瑞利散射峰的强度; 样品台

收稿日期: 2013-10-23

基金项目: 中国科学研究地球化学研究所“135”项目



Argon Laser-Ar 离子激光器; Acousto-Optic Modulator-声光调制器; Multi-stage-样品台; Optical fiber-光纤; Spectrograph with OMA or CCD Detector-带有 OMA 或 CCD 探测器的光谱仪; He-Ne laser-He-Ne 激光器; PMT-光电倍增管; Multichannel Analyzer-多通道分析仪; Interferometer Box-干涉仪

图 1 布里渊散射系统图 (据 Zha 等^[31])

Fig. 1. Schematic diagram for Brillouin spectrometer.

(Multi-stage) 可根据测试需要更改散射角度; 便携式显微-光纤光谱仪系统用来进行原位温度和压力测量; He-Ne 激光器用来校准光路和设定散射角度; 系统配备具有活性防震功能的平台、自动控制法布里-珀罗干涉仪扫描/稳定和实时收集分析实验数据系统。

2 在地球科学中的应用与成果

自 1930 年起, 布里渊散射逐渐被各个领域的科学家所熟识, 但是直至 1976 年才第一次被引入到地球科学领域。下面根据不同压力和温度体系概述布里渊散射在地球科学研究中取得的应用成果。

2.1 常温常压

将布里渊散射引入地球科学领域之后, 1977~1982 年, 研究者们分别得出柯石英^[32]、透辉石^[34]、超石英^[37]在常温常压下的弹性数据, 与前人所得数据一致^[33,35-39], 证明了布里渊散射应用于弹性性质测量的可行性。之后利用布里渊散射相继对 Catherwood 陨石中的天然镁铝榴石和尖晶橄榄石^[40], $Mg_4Si_4O_{12}$ - $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ 体系中镁铁榴石及其固溶体^[41], 含铁瓦兹利石和尖晶橄榄石^[42], 粒硅镁石^[43], 单晶和多晶 $MgSiO_3$ 钙钛矿^[44], 沸石^[45,46], 方解石和菱锰矿^[47], 霞石^[48], 锰橄榄石^[49], Na_2O - MgO - SiO_2 玻璃^[50], 铝硅酸盐

玻璃^[51]等物质的弹性性质进行了细致的研究。

这些常温常压下的数据可以为推导下地壳和上地幔的组分及相变研究提供更加精确的依据。然而, 常温常压下弹性性质对于地球科学工作者们是远远不够的, 我们需要的是高压乃至高温高压下的弹性数据。

2.2 常温高压

目前, 有 3 种间接进行高压下物质声速的测量方法: 布里渊散射(Brillouin Scattering)、核共振非弹性 X 射线散射(Nuclear Resonant Inelastic X-Ray Scattering, 简称 NRIXS)、脉冲受激散射 (Impulsive Stimulated Scattering, 简称 ISS)。3 种测量方法的对比如表 1。

1976 年 Whitfield 等^[52]首次在金刚石压腔中进行了布里渊散射测量, 经过几十年的发展, 高压布里渊散射实验技术得到了很大的提高。通过金刚石压腔技术和布里渊散射技术的联用, 可以得到物质在高压下的声速、弹性系数、弹光系数、折射率、绝热状态方程等。1992 年, Shimizu 和 Sasaki^[53]通过旋转金刚石压腔测量平行金刚石砧面的任何方向的声子的布里渊散射。借助于金刚石压腔 Conrad, Sinogeikin, Duffy 等分别在 10 GPa、20 GPa 和 100 GPa 的压力下获得了镁铝榴石-钙铝榴石-铁铝榴石^[57]、镁铝榴石^[56]、镁橄榄石^[59]的弹性数据。

表 1 三种测量方法进行高压下物质声速测量的对比
Table 1. Comparison of Brillouin Scattering, NRIXS and ISS

测量方法	原理	优点	缺点
布里渊散射	样品中声学声子或磁振子自旋波与入射光相互作用, 使入射光发生频移	1. 精确度高 2. 耗时短, 以小时计 3. 对样品要求低	技术水平要求高
NRIXS	利用固体样品中放射性原子产生的无反冲自发辐射(穆斯堡尔辐射)的能谱	技术上相对简单	仅能适用于有放射性同位素的样品
ISS	测量具有不同延迟时间的激光脉冲的散射强度, 可以算出驻声波的声速	1. 没有强的背景光问题 2. 对信号接受系统要求不高 3. 易于检测低频模式 4. 耗时短, 以分钟或秒计	对光源要求高

MgO 在高压下弹性性质的研究也是高压地球科学中的热点。Sinogeikin 和 Bass^[61-62]分别对 MgO 进行了 18.6 GPa 和 20 GPa 压力下的布里渊散射研究, Zha 等人^[63]在 2000 年将实验压力提高至 55 GPa, 之后的 2009 年 Murakami^[64]将 MgO 的高压布里渊散射研究的压力继续提升至 130 GPa。

此外, 借助于布里渊散射技术, 研究者们还对瓦兹利石^[66], 镁硼锰石^[67], 含水镁橄榄盐^[68]等矿物在高压下的弹性性质进行了研究。

2.3 在高温常压地球科学中的应用成果

Sinogeikin 发明了一种高温金刚石压腔, 常压下利用外加热技术分别在 300~1510 K 和 923 K 高温下测量了 MgO^[70]和林伍德石^[71]的弹性系数, 并通过激光内加热技术在 2500±100 K 温度下测量了氧化物的弹性系数^[72]。

除此以外, 在高温常压下通过布里渊进行的研究还有硅酸钠玻璃^[73]、K₂Si₄O₉ 玻璃^[74]、 α -石英^[75]等。

2.4 在高温高压地球科学中的应用成果

高温高压下弹性系数的测量是获得地球内部矿物切变性质的唯一方法。高温高压布里渊散射模拟物质在地球内部的温度及压力条件, 可以原位展现地球内部物质的弹性性质。高温高压下物质弹性的研究对地球物理具有重要意义, 所得弹性数据与地震波数据对比, 可以推断出地球内部的结构及化学成分, 并且可以通过温度和压力对矿物弹性的影响, 解释地震波的各向异性。

目前布里渊散射在高温同时高压条件下的实验研究极少, 主要集中在对水的研究。液态水是地球基本组成部分, 对水的热力学状态方程的

研究是了解地球内部的关键所在^[54-55,60], 高温高压下水的性质也是物理学和化学领域的研究重点^[65]。高温高压布里渊散射研究现状见表 2。

3 在地球科学中的应用现状分析

3.1 布里渊散射用于地球科学研究的优势

在地球科学研究, 特别是高压地球科学及高温高压地球科学的研究中, 布里渊散射通过测定光的频移, 来精确计算物质的声速、弹性系数、弹光系数、折射率、绝热体弹模量, 极化率, 绝热方程等一系列基本的物理量。以这些物理量为基础, 可以得到矿物质的相变、结构, 以及地球深部及行星内部物质的组成、状态、性质等信息。声速和弹性对于压力的依赖性对模拟地球的成分和演化具有重要作用。物质的弹性系数对结构相变十分敏感, 可以用来探测物质的相变并提供原子间相互作用力的信息。高压下弹性系数的测量是获得地球内部矿物的切变性质的唯一方法。物质在高温高压下的声速及弹性性质的数据, 对于构建出地球内部物质的矿物学模型是非常重要的。高温高压下物质的弹性性质研究对地球物理及天体物理学来说具有重要意义, 通过弹性系数与地震波数据的比较, 可以推测地球内部结构及化学组分, 并且可以由高温高压对矿物的影响, 解释地震波的各向异性。

布里渊散射在实际操作中的优点表现在: 实验温度高, 通过激光加热及黑体辐射测温技术, 可以达到 2500 K 及以上的高温; 实验压力高, 通过 DAC 的帮助, 目前可以达到 130 GPa; 样品尺寸小, 可以在几十微米尺寸的样品上进行实验研究; 实验数据精度高; 样品纯度容易达到; 对样品无破坏性, 与样品无接触; 便捷快速。

表 2 高温高压布里渊散射的研究成果
Table 2. Applications of Brillouin scattering at high P-T

研究对象	作者	温度及加热方式	压力及加压方式	结 论
水	Decremps 等 ^[76]	300~723 K 外加热	0~9 GPa DAC	在实验压力下, 水的声速与压力呈线性关系, 没有发生液-液相变。同时, 实验结果修正了 Saul 和 Wagner ^[83] 提出的水的状态方程
水	李芳菲等 ^{[69][77]}	300~1320 K 双面激光加热	0~28.8 GPa DAC	首次发现了水由低密度相向高密度相转变的液-液相转变边界, 探讨了高温高压对液态水声速、弹性和分子结构的影响, 与分子动力学模拟的结果符合得很好, 解决了存在已久的争议问题, 拓展了水的高温高压相图
水	Asahara 等 ^[78]	550~900 K 激光加热	5~25 GPa DAC	水的液-固相变, 声速, 密度, 外推至地幔条件下水的状态方程
水	Sanchez-Valle 等 ^[79]	293~673 K 外加热	0.6~7 GPa DAC	水的状态方程, 反射率, 极化率随温度和压力的变化
Na ₂ SO ₄ 溶液	Mantegazzi 等 ^[80]	293~773 K 外加热	0.4~3 GPa DAC	Na ₂ SO ₄ 溶液的密度和状态方程值等热力学性质
含水林伍德石	Mao 等 ^[81]	300~673 K 外加热	0.0001~16.3 GPa DAC	含水林伍德石的弹性性质随压力和温度的变化情况, 以此来解释水合作用对地幔主要矿物声速的影响并估量地幔的水含量。地震波速异常和 660 km 间断面的位置下移可能是由于水的热力学作用引起
单晶含铁 镁铝榴石	Lu 等 ^[82]	300 K, 500 K, 750 K, 外加热	0~25 GPa DAC	含铁镁铝榴石的弹性性质, 认为含铁镁铝榴石对上地幔的声速异常没有贡献

3.2 布里渊散射用于弹性研究的缺点

近年来, 高压布里渊散射已经成为世界范围的研究热点。但是由于布里渊散射技术及高压技术的复杂性, 高压布里渊散射的研究只在国外少数几个研究单位开展起来, 而高温高压布里渊散射研究的技术更为复杂, 从加热系统的组装、专用金刚石压腔对顶砧的设计以及高压封垫材料的选择等方面, 都需要有很高的技术水平和一定的实践经验积累, 有很多问题还有待于完善和提高, 目前在国外只有极少数研究单位问津, 国内只有吉林大学在进行此类研究。

4 发展前景

布里渊散射为地球科学工作者们提供了一种全新、便捷和准确的测量物质弹性性质的方法。借助于金刚石压腔和激光加热技术, 高温高压布里渊散射实验技术得到了很大的发展, 激光加热金刚石压腔技术成为国际上高压科学研究的热点。通过高温高压布里渊散射实验方法, 可以获得更多更深层次的物质结构信息, 揭示高温高压在物质相变及解离过程中所起的作用。通过与 X 射线、同步辐射、拉曼散射、金刚石压腔等技术的联用, 布里渊散射技术必将在地球科学领域得到广泛的应用。

参 考 文 献:

- [1] Whitefield C H, Brody E M, Bassett W A. Elastic moduli of NaCl by Brillouin scattering at high pressure in a diamond anvil cell [J]. *Rev Sci Instrum*, 1976, 47(8): 942-947.
- [2] Shimizu H, Brody E M, Mao H K, et al. Brillouin measurements of solid n-H₂ and n-D₂ to 200 kbar at room temperature [J]. *Phys Rev Lett*, 1981, 47(2): 128-131.
- [3] WalnOfer W, Krempf P W, Asenbaum A. Determination of the elastic and photoelastic constants of quartz-type GaPO₄ by Brillouin scattering [J]. *Phys Rev B*, 1994, 49(15): 10075-10080.
- [4] Clouter M J, Kieft H. Velocity of hypersonic waves in liquid oxygen [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1973, 59: 2537.
- [5] Hirschberg J G, Byrne J D, Wouters A W, et al. Speed of sound and temperature in the ocean by Brillouin scattering [J]. *Applied optics*, 1984, 23(15): 2624-2628.
- [6] Shimizu H, Nakashima N, Sasaki S. High-pressure Brillouin scattering and elastic properties of liquid and solid methane [J]. *Physical Review B*, 1996, 53(1): 111.
- [7] Shimizu H, Imaeda H, Kume T, et al. High-pressure elastic properties of liquid and solid neon to 7 GPa [J]. *Physical Review B*, 2005, 71(1): 14108.
- [8] Zha C S, Duffy T S, Downs R T, et al. Sound velocity and elasticity of single-crystal forsterite to 16 GPa [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 1996, 101(B8): 17535-17545.

- [9] Duffy T S, Zha C, Downs R T, et al. Elasticity of forsterite to 16 GPa and the composition of the upper mantle [J]. *Nature*, 1995, 378(6553): 170-173.
- [10] Shimizu H, Bassett W A, Brody E M. Brillouin-scattering measurements of single-crystal forsterite to 40 kbar at room temperature [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(1): 620-626.
- [11] Ahart M, Yarger J L, Lantzky K M, et al. High-pressure Brillouin scattering of amorphous BeH [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2006, 124: 014502.
- [12] Xia X, Weidner D J, Zhao H. Equation of state of brucite: Single-crystal Brillouin spectroscopy study and polycrystalline pressure-volume-temperature measurement [J]. *American Mineralogist*, 1998, 83(1): 68-74.
- [13] Giordano V M, Datchi F, Dewaele A. Melting curve and fluid equation of state of carbon dioxide at high pressure and high temperature [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2006, 125: 054504.
- [14] Dully T S, Zha C S, Downs R T. Elasticity of forsterite to 16 GPa and the composition of the upper mantle [J]. *Nature (London)*, 1995, 378: 170-173.
- [15] Mao H K, Shu J F, Shen G Y. Elasticity and rheology of iron above 220 GPa and the nature of the Earth's inner core [J]. *Nature (London)*, 1998, 396: 741-743.
- [16] Brillouin L. Light diffusion by a homogeneous transparent body [J]. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences*, 1914, 158: 1331-1334.
- [17] Brillouin L. Diffusion of light and x-rays by a transparent homogeneous body [J]. *Ann Phys (Paris)*, 1922, 17: 88.
- [18] Gross E. Change of wave-length of light due to elastic heat waves at scattering in liquids [J]. *Nature*, 1930, 126: 201-202.
- [19] Gross E F. *Nature* 1-26, 201, 400, 603 (1930) Z [J]. *Physik*, 1930, 63: 685.
- [20] Sandercock J R. Light Scattering in Solids III (Cardona M and Güntherodt G eds.) [J]. *Topics Appl Phys*, 1982, 51.
- [21] Landau L D, Lifšic E M, Pitaevskii L P. *Electrodynamics of Continuous Media* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1960.
- [22] Bruesch P. *Phonons: Theory and experiments II* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986.
- [23] Shen Y R, Bloembergen N. Theory of stimulated Brillouin and Raman scattering [J]. *Physical Review*, 1965, 137(6A): A1787.
- [24] Brillouin L. Science and information theory [M]. Courier Corporation, 2013.
- [25] Loudon R. Theory of surface-ripple Brillouin scattering by solids [J]. *Physical Review Letters*, 1978, 40: 581-583.
- [26] 程光煦. 拉曼布里渊散射-原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 576-677.
- [27] Sandercock J R. *Light Scattering in Solids* [M]. Paris: Flammarion, 1971: 9.
- [28] Sandercock J R. *Light Scattering in Solids III* [M]. Berlin: Springer, 1982: 17.
- [29] Blachowicz T, Bukowski R, Kleszczewski Z. Fabry-Perot Interferometer in Brillouin Scattering Experiments [J]. *Rev Sci Instrum*, 1996, 67(12): 4057-4060.
- [30] Ercole A, Adeyeye A O, Bland J A C, et al. Size dependent Spin wave Frequency in ferromagnetic wire-array structures [J]. *Phys Rev B*, 1998, 58(1): 345-350.
- [31] Zha C S, Duffy T S, Downs R T, et al. Sound velocity and elasticity of single-crystal forsterite to 16 GPa [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 1996, 101(B8): 17535-17545.
- [32] Weidner D J, Carleton H R. Elasticity of coesite [J]. *Pecial Publications*, 1988, 26: 414-426.
- [33] Bassett W A, Dean Barnett J. Isothermal compression of stishovite and coesite up to 85 kilobars at room temperature by X-ray diffraction [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1970, 3: 54-60.
- [34] Levien L, Weidner D J, Prewitt C T. Elasticity of diopside [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1979, 4(2): 105-113.
- [35] Aleksandrov K S, Ryzhova T V. The elastic properties of rock-forming minerals, II: Layered silicates [J]. *Izv Acad Sci USSR, Geophys Ser*, 1961, 12: 186-189.
- [36] Liebermann R C, Mayson D J. Elastic properties of polycrystalline diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1976, 11(3): P1-P4.
- [37] Weidner D J, Bass J D, Ringwood A E, et al. The single-crystal elastic moduli of stishovite [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 1982, 87(B6): 4740-4746.
- [38] Sawamoto H, Weidner D J, SASAKI S, et al. Single-crystal elastic properties of the modified spinel (beta) phase of magnesium orthosilicate [J]. *Science*, 1984, 224(4650): 749-751.
- [39] Bass J D, Weidner D J. Elasticity of single-crystal orthoferrosilite [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 1984, 89(B6): 4359-4371.
- [40] Sinogeikin S V, Bass J D, Kavner A, et al. Elasticity of natural majorite and ringwoodite from the Catherwood meteorite [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(24): 3265-3268.
- [41] Sinogeikin S V, Bass J D, O'Neill B, et al. Elasticity of tetragonal end-member majorite and solid solutions in the system $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$ - $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1997, 24(2): 115-121.
- [42] Sinogeikin S V, Katsura T, Bass J D. Sound velocities and elastic properties of Fe-bearing wadsleyite and ringwoodite [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012)*, 1998, 103(B9): 20819-20825.

- [43] Sinogeikin S V, Bass J D. Single-crystal elastic properties of chondrodite: implications for water in the upper mantle [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1999, 26(4): 297-303.
- [44] Sinogeikin S V, Zhang J, Bass J D. Elasticity of single crystal and polycrystalline MgSiO₃ perovskite by Brillouin spectroscopy [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(6): L06620.
- [45] Sanchez-Valle C, Sinogeikin S V, Lethbridge Z A D, et al. Brillouin scattering study on the single-crystal elastic properties of natrolite and analcime zeolites [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(5): 53508-53508-6.
- [46] Sanchez-Valle C, Sinogeikin S V, Smyth J R, et al. Single-crystal elastic properties of dense hydrous magnesium silicate phase A [J]. *American Mineralogist*, 2006, 91(5-6): 961-964.
- [47] Chen C C, Lin C C, Liu L G, et al. Elasticity of single-crystal calcite and rhodochrosite by Brillouin spectroscopy [J]. *American Mineralogist*, 2001, 86(11-12): 1525-1529.
- [48] Liu L, Chen C, Lin C C, et al. Elasticity of single-crystal aragonite by Brillouin spectroscopy [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2005, 32(2): 97-102.
- [49] Lin C C, Chen C C. Elasticity of tephroite (α -Mn₂SiO₄) and a comparison of the elastic properties of silicate olivines [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2011, 23(1): 35-43.
- [50] Lin C C, Chen S F, Liu L G, Li C C. Anionic structure and elasticity of Na₂O-MgO-SiO₂ glasses [J]. *Non-Cryst Solids*, 2007, 353: 413-425.
- [51] Lin C C, Liu L. Composition dependence of elasticity in aluminosilicate glasses [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2006, 33(5): 332-346.
- [52] Whitfield C H, Brody E M, Bassett W A. Elastic moduli of NaCl by Brillouin scattering at high pressure in a diamond anvil cell [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1976, 47(8): 942-947.
- [53] Shimizu H, Sasaki S. High-pressure Brillouin studies and elastic properties of single-crystal H₂S grown in a diamond cell [J]. *Science*, 1992, 257(5069): 514-516.
- [54] Bina C R, Navrotsky A. Possible presence of high-pressure ice in cold subducting slabs [J]. *Nature*, 2000, 408(6814): 844-847.
- [55] Scambelluri M, Philippot P. Deep fluids in subduction zones [J]. *Lithos*, 2001, 55(1): 213-227.
- [56] Sinogeikin S V, Bass J D. Single-crystal elasticity of pyrope and MgO to 20 GPa by Brillouin scattering in the diamond cell [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2000, 120(1): 43-62.
- [57] Conrad P G, Zha C S, Mao H K, et al. The high-pressure, single-crystal elasticity of pyrope, grossular, and andradite [J]. *American Mineralogist*, 1999, 84: 374-383.
- [58] Duffy T S, Zha C, Downs R T, et al. Elasticity of forsterite to 16 GPa and the composition of the upper mantle [J]. *Nature*, 1995, 378(6553): 170-173.
- [59] Fujisawa H. Elastic wave velocities of forsterite and its beta-spinel form and chemical boundary hypothesis, for the 410-km discontinuity [J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 1998, 103: 9591-9608.
- [60] Spohn T, Schubert G. Oceans in the icy Galilean satellites of Jupiter? [J]. *Icarus*, 2003, 161(2): 456-467.
- [61] Sinogeikin S V, Bass J D. Single-crystal elasticity of MgO at high pressure [J]. *Physical Review B*, 1999, 59(22): R14141-R14144.
- [62] Sinogeikin S V, Bass J D. Single-crystal elasticity of pyrope and MgO to 20 GPa by Brillouin scattering in the diamond cell [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2000, 120(1): 43-62.
- [63] Zha C S, Mao H, Hemley R J. Elasticity of MgO and a primary pressure scale to 55 GPa [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(25): 13494-13499.
- [64] Murakami M, Ohishi Y, Hirao N, et al. Elasticity of MgO to 130 GPa: Implications for lower mantle mineralogy [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(1): 123-129.
- [65] Strässle T, Saitta A M, Godec Y L, et al. Structure of dense liquid water by neutron scattering to 6.5 GPa and 670 K [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(6): 67801.
- [66] Zha C, Duffy T S, Mao H, et al. Single-crystal elasticity of β -Mg₂SiO₄ to the pressure of the 410 km seismic discontinuity in the Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 147(1): E9-E15.
- [67] Reichmann H J, Sinogeikin S V, Bass J D. Single-crystal elastic properties of (Mg 0.987, Fe 0.013) 0 to 9 GPa [J]. *American Mineralogist*, 2008, 93(8-9): 1306-1311.
- [68] Sanchez-Valle C, Sinogeikin S V, Smyth J R, et al. Sound velocities and elasticity of DHMS phase A to high pressure and implications for seismic velocities and anisotropy in subducted slabs [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, 170(3): 229-239.
- [69] 李芳菲. 含氢分子体系的高温高压物性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [70] Sinogeikin S V, Jackson J M, O'Neill B, et al. Compact high-temperature cell for Brillouin scattering measurements [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(1): 201-206.
- [71] Sinogeikin S V, Bass J D, Katsura T. Single-crystal elasticity of ringwoodite to high pressures and high temperatures: Implications for 520 km seismic discontinuity [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 136(1): 41-66.
- [72] Sinogeikin S V, Lakshmanov D L, Nicholas J D, et al. High temperature elasticity measurements on oxides by Brillouin spectroscopy with resistive and IR laser heating [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, 25(8): 1313-1324.

- [73] Xu J, Manghnani M H. Brillouin-scattering studies of a sodium silicate glass in solid and melt conditions at temperatures up to 1000 °C [J]. *Physical Review B*, 1992, 45(2): 640.
- [74] Xu J, Manghnani M H, Richet P. Brillouin-scattering studies of $K_2Si_4O_9$ glass and melt up to 1000 °C [J]. *Physical Review B*, 1992, 46(14): 9213.
- [75] Polian A, Vo-Thanh D, Richet P. Elastic properties of α - SiO_2 up to 2300 K from Brillouin scattering measurements [J]. *Europhys Lett*, 2002, 57(3): 375.
- [76] Decremps F, Datchi F, Polian A. Hypersonic velocity measurement using Brillouin scattering technique. Application to water under high pressure and temperature [J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: e1495-e1498.
- [77] Li F, Cui Q, He Z, et al. Brillouin scattering spectroscopy for a laser heated diamond anvil cell [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(20): 203507-203507-3.
- [78] Asahara Y, Murakami M, Ohishi Y, et al. Sound velocity measurement in liquid water up to 25 GPa and 900 K: Implications for densities of water at lower mantle conditions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(3): 479-485.
- [79] Sanchez-Valle C, Mantegazzi D, Bass J D, et al. Equation of state, refractive index and polarizability of compressed water to 7 GPa and 673 K [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2013, 138: 54505.
- [80] Mantegazzi D, Sanchez-Valle C, Reusser E, et al. Thermodynamic properties of aqueous sodium sulfate solutions to 773 K and 3 GPa derived from acoustic velocity measurements in the diamond anvil cell [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2012, 137: 224501.
- [81] Mao Z, Lin J F, Jacobsen S D, et al. Sound velocities of hydrous ringwoodite to 16 GPa and 673 K [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 331: 112-119.
- [82] Lu C, Mao Z, Lin J F, et al. Elasticity of single-crystal iron-bearing pyrope up to 20 GPa and 750 K [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 361: 134-142.
- [83] Saul A, Wagner W. A fundamental equation for water covering the range from the melting line to 1273 K at pressures up to 25000 MPa [J]. *J phys Chem Ref Data*, 1989, 18:1537-1536.

Fundamentals, Applications and Future Prospects of Brillouin Scattering for Earth Science

WANG Yan^{1,2}, LI He-ping¹, WANG Pan^{1,2}

(1. Laboratory for High Temperature & High Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By means of measuring the frequency shifts, a series of physical quantities can be accurately calculated by Brillouin scattering like sound velocity, elastic constants, elasto-optical coefficient, refractive index, bulk modulus, polarizability and adiabatic equation. On the basis of these quantities, we can get material's phase transitions, structures and the information of earth and planetary interior. In this article, the research progress is reviewed on the following aspects: Brillouin scattering, applications of Brillouin scattering earth science under different temperatures and pressures. At the last of this paper, the further prospect was discussed.

Key words: brillouin scattering; sound velocity; elastic constant; earth material; high temperature and high pressure