

文章编号:1005-4642(2021)04-0039-06

学
生
园
地



超声脉冲法测量固体材料声速实验的 扩展与升级

张远武, 闫向宏, 刘钰姣, 张 逸

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

摘 要: 根据声速与材料弹性常量之间满足的克里斯托菲尔方程, 利用超声脉冲法测量了超磁致伸缩材料中超声波沿不同方向传播的声速, 计算出超磁致伸缩材料的弹性常量. 利用电磁铁激发均匀的外磁场, 测量了超磁致伸缩材料中超声波沿不同方向传播的声速与外磁场的关系, 研究了超磁致伸缩材料的弹性常量随外磁场的变化规律. 通过对传统固体介质声速测量实验内容的扩展与升级, 不仅加深了学生对超声脉冲法测量声速原理的理解, 还使传统的实验项目焕发了新的生命力.

关键词: 超磁致伸缩材料; 声速; 弹性常量; 磁场

中图分类号: O422.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.04.006

超声脉冲法测量固体材料中声速是大学物理实验中传统的实验项目^[1], 材料的弹性常量决定了材料中声速的大小, 弹性常量是用于表征材料力学特性的重要参量^[2-3], 对于各项同性的均匀材料只需 2 个弹性常量, 对属于四方晶系的超磁致伸缩材料而言, 需要 6 个弹性常量组成的矩阵来表征材料的力学特性.

超磁致伸缩材料是 20 世纪中叶发展起来的新型功能材料, 与传统磁致伸缩材料、压电陶瓷(PZT)材料相比, 其磁致伸缩应变 λ 比纯 Ni 大 50 倍, 比 PZT 材料大 5~25 倍, 能量转换效率高可达 60%, 响应时间仅 1 μ s; 频率特性好, 工作频带宽, 居里温度比较高, 可靠性高^[4-6], 在低频大功率声波换能器^[7-10]、海洋探测换能器^[11-13]、光纤传感技术^[14-15]、平面扬声器^[16]等高技术领域有着广泛的应用前景. 本文根据声波传播方向与超磁致伸缩材料的磁致伸缩方向之间的关系, 制作了 3 种超磁致伸缩材料样品, 并利用超声波脉冲法测量了样品在不同外磁场条件下的纵(横波)速度, 进而获得了超磁致伸缩材料的弹性常量随外磁场的

变化规律.

1 实验测量原理

不同晶系材料的弹性常量数量不同, 最多的有 21 个弹性常量(如三斜晶系材料), 最少的有 2 个弹性常量(各向同性材料), 对属于四方晶系的超磁致伸缩材料而言, 共有 6 个弹性常量. 表征声波的相速度与材料的弹性常量之间关系的克里斯托菲尔方程为^[17]

$$\begin{pmatrix} \Gamma_{11} - \rho V^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho V^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho V^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = 0, \quad (1)$$

式中, ρ 为晶体密度; V 为声波传播速度; U_x, U_y, U_z 分别为质点相对于 x, y, z 轴的质点位移方向余弦, 要使(1)式有非零的解, 则必须有

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{11} - \rho V^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{12} & \Gamma_{22} - \rho V^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{13} & \Gamma_{23} & \Gamma_{33} - \rho V^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (2)$$

式中 Γ_j 称为克里斯托弗尔模量, 其分量是由晶体的弹性常量和波法线余弦决定, 对四方晶系的超

收稿日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 11774433); 大学生创新训练计划项目(No. 20181405, No. 20181464)

作者简介: 张远武(2000-), 男, 陕西汉中, 中国石油大学(华东)理学院应用物理学专业 2017 级本科生. E-mail: 964717109@qq.com

通讯作者: 闫向宏(1966-), 男, 陕西蓝田, 中国石油大学(华东)理学院教授, 博士, 主要从事物理教学、超声换能器及声波测井方法研究. E-mail: yanxh@upc.edu.cn



磁致伸缩材料,有 6 个独立的弹性常量 $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{33}, C_{44}, C_{66}$ (其余为零),则克里斯托弗尔模量各分量的表达式为

$$\begin{cases} \Gamma_{11} = C_{11}l_x^2 + C_{66}l_y^2 + C_{44}l_z^2, \\ \Gamma_{12} = \Gamma_{21} = (C_{12} + C_{66})l_xl_y, \\ \Gamma_{13} = \Gamma_{31} = (C_{13} + C_{44})l_zl_x, \\ \Gamma_{22} = C_{66}l_x^2 + C_{11}l_y^2 + C_{44}l_z^2, \\ \Gamma_{23} = \Gamma_{32} = (C_{44} + C_{13})l_yl_z, \\ \Gamma_{33} = C_{44}(l_y^2 + l_x^2) + C_{33}l_z^2, \end{cases} \quad (3)$$

式中 l_x, l_y, l_z 为声波传播方向的方向余弦. 如图 1 所示,声波在超磁致伸缩材料中沿 r 方向传播(方向余弦为 l_x, l_y, l_z), z 方向沿晶轴方向(磁致伸缩方向). 将声波传播方向的方向余弦代入式(3),利用式(2)和式(1)即可得到声波传播速度及质点位移,并且可知此时的声波是纵波还是横波模式.

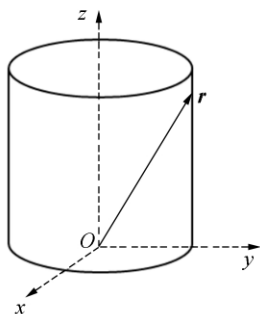


图 1 声波传播方向与晶轴之间关系示意图

实验中选用了 3 种超磁致伸缩材料样品,其中声波传播方向的方向余弦分别为 $\{0, 0, 1\}, \{1, 0, 0\}$ 以及 $\{\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}\}$. 超磁致伸缩材料的 6 个弹性常量与声波纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 之间的关系如表 1 所示,其中, $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}, S_1 = [\frac{1}{2}(C_{11} + C_{33} + 2C_{44}) - 2\rho V_p^2]^2 - \frac{1}{4}(C_{11} - C_{33})^2$.

表 1 超磁致伸缩材料中波速与弹性常量间关系

样品编号	l_x, l_y, l_z	V_p 与 C_{ij} 关系	V_s 与 C^j 关系
1	$\{0, 0, 1\}$	$C_{33} = \rho V_p^2$	$C_{44} = \rho V_s^2$
2	$\{1, 0, 0\}$	$C_{11} = \rho V_p^2$	$C_{66} = \rho V_s^2$
3	$\{\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}\}$	$C_{13} = \sqrt{S_1} - C_{44}$	

2 实验装置

2.1 超磁致伸缩材料中声波速度的测量

实验中利用超声脉冲穿透法测量材料中声波速度的实验装置如图 2 所示.

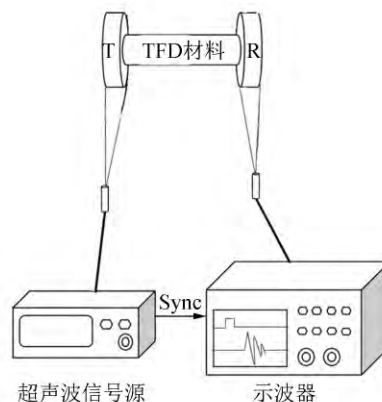


图 2 超声脉冲穿透法测量材料中声速装置示意图

超声信号源激励发射换能器 T 向材料中发射声波,声波经过一定时间被接收换能器 R 所接收,从示波器上即可得到声波在长度 l_1 样品中传播时间 t_1 . 弹性常量的测量精度取决于声波速度的测量精度,为提高声波速度的测量精度,同时再测量长度为 l_2 的样品中声波传播时间记为 t_2 ,则实验测量得到样品中声速为

$$V = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (4)$$

将式(4)计算得到的纵(横)波速度代入表 1 中,即可得到超磁致伸缩材料相应的弹性常量.

2.2 外磁场对超磁致伸缩材料弹性常量影响规律的探究

由于超磁致伸缩材料本身是一种磁性材料,在外磁场的作用下,超磁致伸缩材料具有相应的磁学效应,这势必会影响到材料的弹性常量^[18]. 为此设计了如图 3 所示的实验装置用于测量在不同外磁场条件下材料中声速,进而研究外磁场对材料弹性常量的影响规律. 将超声脉冲穿透法测量材料中声速的设备置于电磁铁的两磁极之间,改变恒流源输出电流大小,即可改变两磁极之间磁场的大小,利用超声脉冲穿透法测量出相应磁场下材料中声速,进而得到相应外磁场条件下材料弹性常量的变化规律.

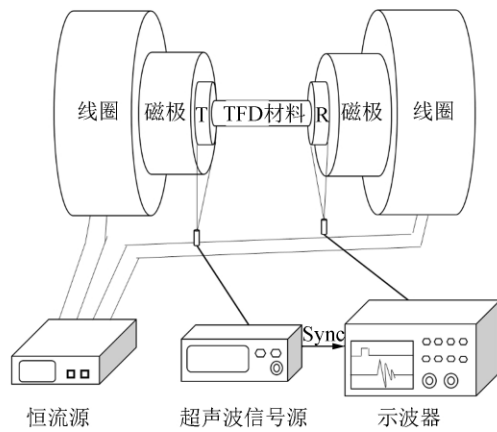


图 3 外磁场条件下超磁致伸缩材料中声速实验测量装置示意图

3 实验结果与分析

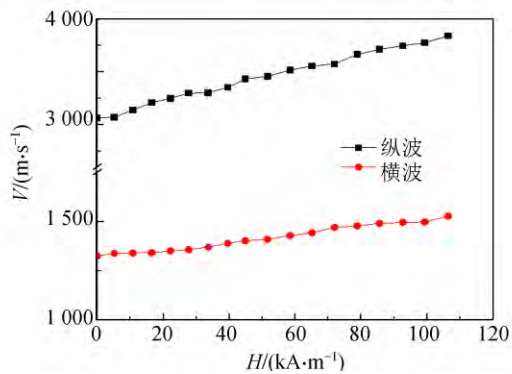
利用搭建的实验测量装置测量了由北京钢铁研究院提供的超磁致伸缩材料制作的 3 个声波传播方向余弦的样品中声速,其中 1# 样品中纵波速度为 3 516.27 m/s,横波速度为 1 250.16 m/s; 2# 样品中纵波速度为 3 254.84 m/s,横波速度为 1 498.97 m/s;3# 样品纵波速度为 3 330.59 m/s,

横波速度为 1 299.74 m/s,由表 1 中公式可以计算出该材料在零磁场条件下的弹性常量分别为 $C_{11}=10.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{12}=7.49 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{13}=4.78 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{33}=8.45 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{44}=1.58 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{66}=1.45 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,与文献[18]给出的超磁致伸缩材料弹性常量测量结果基本符合。

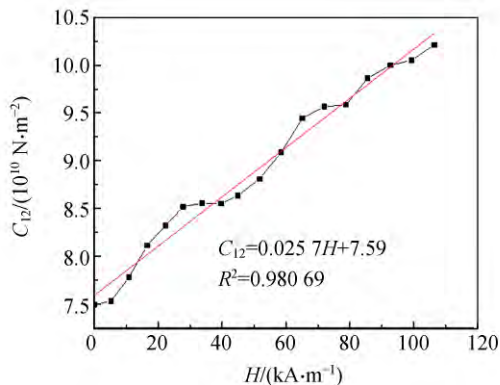
改变恒流源输出电流大小,调节超磁致伸缩材料所处外磁场的大小,测量得到相应外磁场下材料中声速数值如表 2 所示。从图 4 的超磁致伸缩材料中声速与外磁场关系曲线中可看出,随着外磁场的增加,超磁致伸缩材料中的纵波声速、横波声速都是线性增加,并由此计算出材料的弹性常量与外磁场大小之间的关系如图 5 所示。由图 5 可知外磁场的确会影响超磁致伸缩材料的弹性性能,表征该材料弹性的 6 个弹性常量都随着外磁场的增大而增大,其中弹性常量 C_{13} 和 C_{33} 随外磁场增加线性增大, C_{12} , C_{11} , C_{44} 和 C_{66} 与外磁场之间线性拟合相关系数都超过 0.96。由此可知对于超磁致伸缩材料而言,利用改变外磁场的大小可实现对材料的弹性特性的调控。

表 2 不同外磁场条件下 TFD 材料中声速测量结果

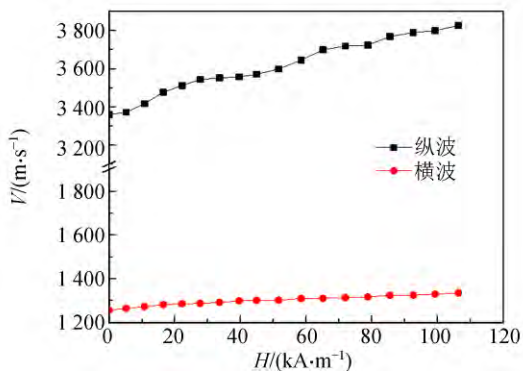
$H/(\text{kA} \cdot \text{m}^{-1})$	$V_p/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			$V_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
	1#	2#	3#	1#	2#	3#
5.20	3 061.07	3 359.09	3 090.06	1 323.43	1 255.42	1 221.36
10.80	3 070.44	3 371.30	3 155.39	1 337.56	1 263.40	1 221.86
16.56	3 137.72	3 416.85	3 220.06	1 338.45	1 271.48	1 222.86
22.24	3 208.00	3 476.63	3 357.71	1 340.24	1 280.85	1 222.36
27.76	3 249.59	3 511.74	3 491.23	1 349.26	1 284.99	1 224.36
33.68	3 297.70	3 543.05	3 600.72	1 355.65	1 286.77	1 229.41
39.68	3 303.13	3 552.09	3 694.31	1 369.54	1 290.95	1 230.93
44.96	3 352.84	3 556.64	3 817.14	1 387.54	1 298.18	1 231.44
51.68	3 433.22	3 570.33	3 871.60	1 401.12	1 300.00	1 233.98
58.56	3 456.90	3 598.03	4 012.10	1 408.01	1 301.22	1 236.02
65.20	3 517.54	3 645.18	4 151.60	1 427.05	1 309.18	1 236.54
72.00	3 554.96	3 698.48	4 288.79	1 441.41	1 309.79	1 239.10
78.88	3 573.98	3 718.26	4 294.96	1 468.86	1 312.88	1 239.62
85.60	3 665.45	3 723.23	4 455.22	1 476.44	1 315.99	1 240.13
92.72	3 712.96	3 768.63	4 522.73	1 489.60	1 323.50	1 240.65
99.36	3 747.66	3 789.16	4 599.38	1 494.04	1 324.76	1 242.71
106.48	3 775.89	3 799.51	4 678.68	1 496.27	1 329.19	1 243.75



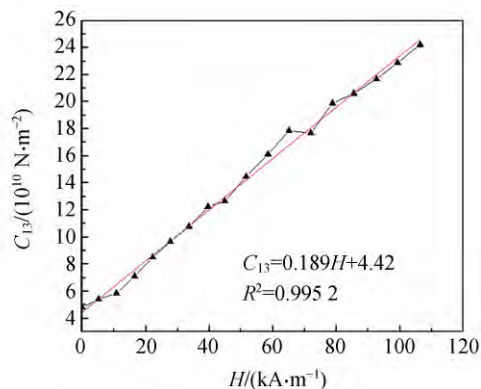
(a) 1 #



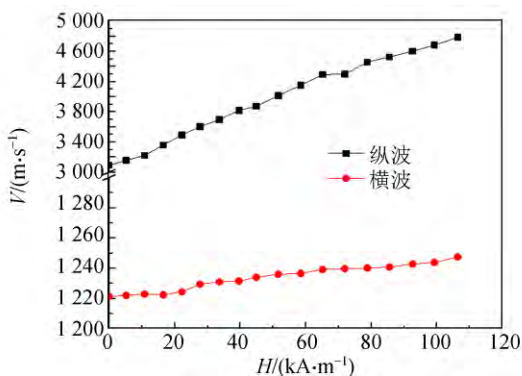
(b) C_{12}



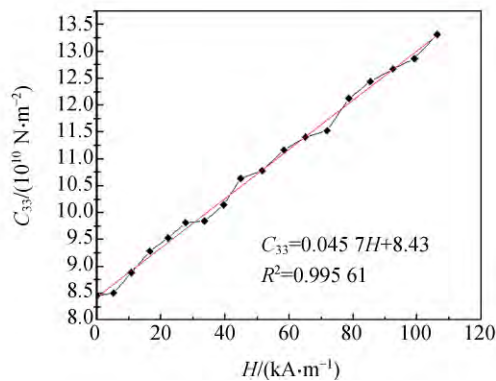
(b) 2 #



(c) C_{13}

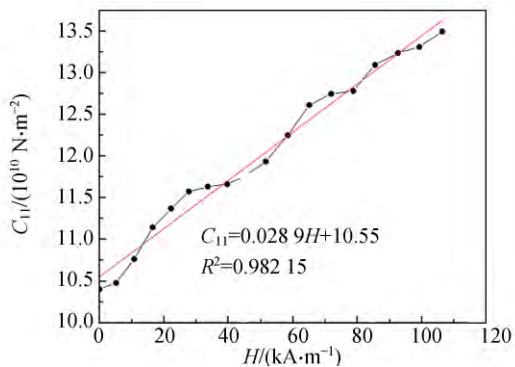


(c) 3 #

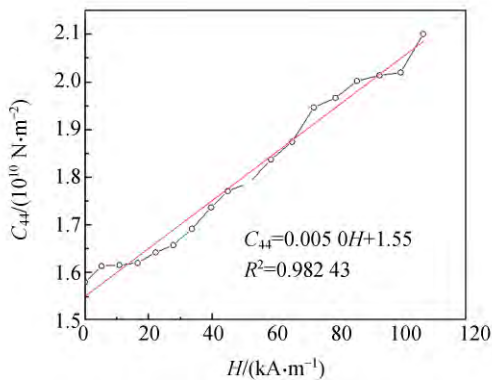


(d) C_{33}

图 4 超磁致伸缩材料中声速随外磁场变化规律



(a) C_{11}



(e) C_{44}

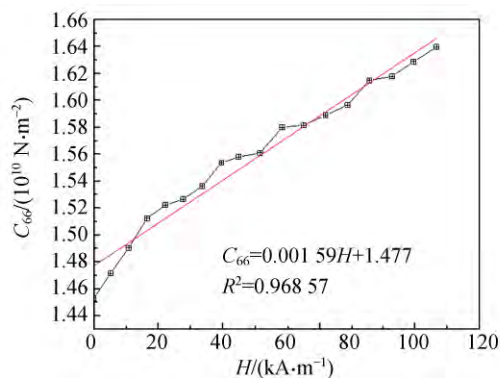
(f) C_{66}

图5 超磁致伸缩材料弹性常量随外磁场的变化规律

4 结束语

在超声脉冲穿透法测量固体材料声速实验的基础上,利用声速与固体材料弹性常量之间满足的克里斯托菲尔方程,选择声波传播方向余弦不同的3个测试样品,给出了超磁致伸缩材料的弹性常量与声速之间的关系,并进行了超磁致伸缩材料声速与弹性常量的实验测量,实验结果与文献结果符合。进一步考虑到超磁致伸缩材料是磁性材料,在声速测量实验的基础上增加了外磁场系统,对该材料的声速、弹性常量随外磁场(0~ 10^6 kA/m)的变化规律进行了探索。通过对传统声速测量实验的扩展与升级,不仅扩展学生的学术视野,提高学生的创新意识和创新能力,激发学生的学习兴趣,而且进一步巩固了声速测量实验技术的原理,为后续学生开展温度、压力等对声速、弹性常量的影响提供了可以借鉴的思路与方法。

参考文献:

[1] 李书光,张亚萍,朱海丰. 大学物理实验[M]. 北京:科学出版社,2013.
 [2] 洪子昕,郭无箏,白在桥. 动态法测杨氏模量实验中的双共振峰现象[J]. 物理实验,2019,39(9):48-53.
 [3] 章越,王家宝,亓山山,等. 动态法测量杨氏模量实验中的弹性各向异性[J]. 物理实验,2020,40(7):29-34.

[4] Clark A E, Teter J P, McMasters O D. Magnetostriction jumps in twinned $Tb_{0.3}Dy_{0.2}Fe_{1.9}$ [J]. Journal of Applied Physics, 1988,63(8):3910-3912.
 [5] Moffet M B, Clark A E, Wun-Fogle M, et al. Characterization of Terfenol-D for magnetostrictive transducers [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1991,89(3):1448-1455.
 [6] 唐鸿洋,张洪平,张羊换,等. 超磁致伸缩合金 $Tb-DyFe$ 组织与性能研究现状[J]. 金属功能材料, 2013,20(2):45-51.
 [7] 柴勇,莫喜平,刘永平,等. Terfenol-D 球形低频换能器[J]. 应用声学,2005,24(3):164-166.
 [8] 刘文静,周利生,夏铁坚,等. 稀土超声换能器特性研究[J]. 声学与电子工程,2005(4):28-31.
 [9] 贺西平,胡静. 圆环型稀土超磁致伸缩超声换能器[J]. 压电与声光,2006,28(5):541-542.
 [10] 陈浩,唐永宁,顾郑强. 超磁致伸缩复合棒换能器研究[J]. 雷达与对抗,2015,35(3):60-64.
 [11] 莫喜平. Terfenol-D 鱼唇式弯张换能器[J]. 声学学报,2001,26(1):25-28.
 [12] 贺西平,李斌,孙进才. 低频大功率稀土磁致伸缩弯张换能器的有限元设计理论及实验研究 II:实验部分[J]. 声学学报,2001,26(4):377-380.
 [13] 李宽,蓝宇. 稀土 IV 型弯张换能器研究[J]. 声学技术,2015,34(5):467-471.
 [14] 杜俊贤. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅磁场传感器[J]. 光通信研究,2015(6):55-57.
 [15] García-Miquel H, Barrera D, Amat R. Magnetic actuator based on giant magnetostrictive material Terfenol-D with strain and temperature monitoring using FBG optical sensor [J]. Measurement, 2016(80):201-206.
 [16] 周强,金才积,罗良进,等. 超磁致伸缩平面扬声器阻抗特性研究[J]. 实验技术与管理, 2011,28(3):81-83.
 [17] 韦汉道,王晓苓. $PbMoO_4$ 晶体中传播的声波及弹性常数测量[J]. 压电与声光,1980,26(5):11-14.
 [18] 陈宜保,王文翰,杨翔,等. 超磁致伸缩材料性能测量实验[J]. 物理实验,2008,28(12):13-15,20.
 [19] 唐海军,王伟,莫喜平,等. 新型稀土磁致伸缩材料 $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_{1.95}$ 的参数研究[J]. 功能材料, 2006,37(6):870-873.

Measuring sound velocity in solid medium by ultrasonic pulse method

ZHANG Yuan-wu, YAN Xiang-hong, LIU Yu-jiao, ZHNAG Yi

(College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: According to the Christofel equation which satisfies the relationship between acoustic velocity and elastic constant, the ultrasonic pulse method was used to measure the acoustic velocity of ultrasonic wave in giant magnetostrictive material. Using electromagnets to stimulate uniform external magnetic field (0~106 kA/m), the dependences of the ultrasonic velocity in three different directions on the external magnetic field were measured, and the elastic constants of the giant magnetostrictive material were calculated for varied external magnetic field. By this extension and upgrade of the traditional solid medium velocity measurement experiment, students' understanding on the principle of ultrasonic velocity measurement were deepen, and the traditional experimental project was given new vitality.

Key words: giant magnetostrictive material; acoustic velocity; anisotropic elastic constant; magnetic field

[责任编辑:郭 伟]

(上接 21 页)

Generation and application of narrow-band laser pulse based on Fabry-Pérot interferometer

YANG Yu-bo, LU Hao-yu, ZHANG Wen-kai

(Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The main principle of Fabry-Pérot interferometer is multi-beam interference. Due to its resonant cavity structure (F-P cavity), when the frequency of the incident light meets the resonance conditions, the transmission spectrum will have an extremely high peak. The resonant cavity can be used to screening the input frequency and obtain an ideal narrow-band pulse. This article briefly introduced the basic principles of F-P cavity and the basic method of using F-P interferometer to generate narrow-band pulse, and introduced the application of this narrow-band pulse in femtosecond stimulated Raman spectroscopy (FSRS), sum frequency spectroscopy (SFG), two-dimensional infrared spectroscopy (2D-IR) and other state of the art spectroscopy technologies.

Key words: Fabry-Pérot interferometer; narrow-band pulse; femtosecond stimulated Raman spectroscopy; sum frequency spectroscopy; two-dimensional infrared spectroscopy

[责任编辑:任德香]