

超声脉冲导入光纤光栅的动态光谱特性研究

李 佳^{1,2}, 刘 锋^{1,2}, 李 红^{1,2}, 周 锋^{1,2}

(1. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192;

2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016)

摘 要:提出超声以矩形脉冲波的形式轴向导入光纤光栅,分析超声脉冲作用于光纤光栅的机理;在此基础上,设计超声脉冲发生电路以及超声换能器,用高电压脉冲驱动堆栈式压电陶瓷产生沿光纤轴向的压缩脉冲,并通过符合声阻抗匹配的铝锥结构将脉冲幅值放大,高效地耦合进光纤光栅;采用 CCD 成像法高速采集光纤光栅在时域上的动态反射光谱,分析其时域上的光谱变化规律。结果表明:超声脉冲波长远大于光纤光栅长度时,超声脉冲导入的光纤光栅可有效搬移光谱,在脉冲作用时刻中心波长发生漂移。为超声脉冲与波分复用解调技术相结合提供参考。

关键词:超声脉冲;光纤光栅;动态光谱;光谱搬移;铝锥结构

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.12.011

Study on dynamic spectral characteristics of ultrasonic pulse into fiber Bragg grating

LI Jia^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, LI Hong^{1,2}, ZHOU Feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument,

Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical

Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: It is proposed that ultrasonic wave is introduced into fiber Bragg grating axially in the form of rectangular pulse wave. The mechanism of ultrasonic pulse acting on fiber Bragg grating is analyzed. On this basis, the ultrasonic pulse generator circuit and ultrasonic transducer are designed to drive the stack piezoelectric ceramics with high voltage pulse to generate compression pulse along the fiber axis, and then the pulse amplitude is amplified through the aluminum cone structure matching the acoustic impedance, which is coupled into the fiber grating efficiently. The dynamic reflection spectra of FBG in time domain were collected by CCD imaging method and the spectral variation law in time domain was analyzed. The results show that when the ultrasonic pulse is longer than the length of the fiber Bragg grating, the fiber Bragg grating (FBG) introduced by ultrasonic pulse can shift the spectrum effectively and shift the center wavelength at the moment of pulse action. It provides reference for the combination of ultrasonic pulse and wavelength division multiplexing demodulation technology.

Keywords: ultrasonic pulse; fiber Bragg grating; dynamic spectrum; spectral shift; aluminum cone structure

基金项目:国家自然科学基金项目 (No. 51775051; No. 51535002; No. 61903042); 北京市自然科学基金项目 (No. 4194077) 资助。

作者简介:李 佳 (1993 -), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅解调技术研究。

通讯作者:刘 锋, 男, 副教授, 硕士生导师从事光纤传感技术。E-mail: liufeng@bistu.edu.cn

收稿日期:2020-12-12

1 引言

超声波是指频率高于 20 kHz 在连续介质中传播的应力波,根据时域上连续与否可分为连续波和脉冲波。超声波以连续波的形式与光纤布拉格光栅 (FBG) 相互作用的研究已用于声波的检测^[1-2],水听器^[3],结构无损探伤^[4-5],声源定位^[6],其原理是将 FBG 作为传感器,利用 FBG 体积小、抗干扰的特点代替传统的压电器件感知介质中连续超声波信号^[7],已经得到各国学者的广泛关注和研究。但传统研究关注超声波以连续波的形式引起 FBG 的响应,而超声以脉冲波的形式与 FBG 作用尚未见报道,缺乏超声波以脉冲波的形式与 FBG 作用的光谱特性研究。超声脉冲波导入 FBG 可用于提高波分复用的解调容量,原理是在密集分布的同参数光栅,利用超声脉冲在光纤轴向传播的特性,在时域上脉冲依次作用于光纤光栅,即在时域上给每一个光栅脉冲标记,实现同参数光栅在时域上的光谱分离,在波分复用的基础上提高解调容量。

本文提出将超声波以脉冲波的形式导入 FBG,并分析超声脉冲与 FBG 响应的原理,搭建超声脉冲导入 FBG 实验装置;设计电路驱动堆栈式压电陶瓷产生压缩脉冲纵波,通过铝质锥超声聚能器放大后高效耦合进 FBG。采用线阵 CCD 光谱成像法高速采集超声脉冲导入 FBG 后的反射光谱,研究其时域上的谱形变化和中心波长漂移等光谱特性。为超声脉冲与波分复用解调技术相结合提供参考。

2 超声脉冲与 FBG 作用机理

根据耦合模理论,光纤布拉格波长 λ_B 可以表示为^[8]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其微分形式为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2)$$

式中, Λ 为 FBG 的周期; n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率。当带宽光源入射至 FBG 时,只有 FBG 谐振波长的光被反射,形成特征峰。

超声以矩形脉冲波导入光纤,沿光纤轴向产生脉冲应力波,脉冲波传播并作用于 FBG 的时刻如图 1(b)所示,该时刻对 FBG 产生两方面的影响:一是几何效应,即改变光栅周期 Λ ;二是弹光效应,即改变纤芯处的有效折射率 n_{eff} 。

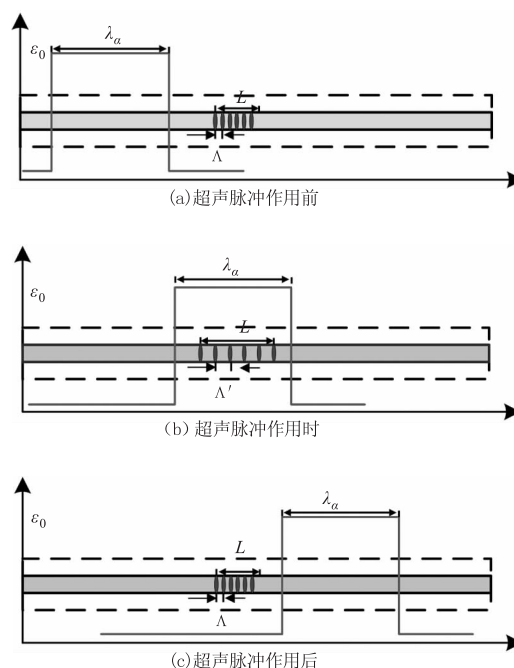


图 1 超声脉冲作用与 FBG

Fig. 1 Ultrasonic pulse action with FBG

当 FBG 长度 L 远小于超声脉冲波长 λ_α 时,整个光栅受到的应变分布是均匀的,弹光效应引起的折射率变化是均匀^[9-10],设矩形脉冲作用 FBG 上的产生的轴向应变为 ε_x ,则几何效应为:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (3)$$

弹光效应为:

$$\frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \varepsilon_x \quad (4)$$

式中, P_{ij} 为弹光系数; ν 为泊松比。综合式(1)~(3),得到:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{\Delta n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon_x \quad (5)$$

令:

$$P_e = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (6)$$

式中, P_e 为有效弹光系数,光纤介质中 $P_e = 0.22$ 。结合式(1)在脉冲作用与 FBG 的时刻,FBG 的漂移量为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (1 - P_e) \cdot \varepsilon_x \quad (7)$$

从式(7)可以看出,当 FBG 长度 L 远小于超声脉冲波长 λ_α ,时域上:矩形脉冲作用在 FBG 的时刻,FBG 波长发生漂移;而当脉冲向前传播,离开 FBG 时,FBG 不受应力的作用,中心波长将恢复初始状态。

3 光谱高速采集

当超声脉冲导入 FBG 后,为了实时捕捉 FBG 反射光谱的变化规律,需要高速采集时域上连续的光谱信息。光谱采集系统如图 2 所示,由 256 个像素点的 Ibsen 线阵 CCD 解调模块,耦合器,宽带光源,以及 AD 转换信号处理单元。利用线阵 CCD 解调模块对 FBG 反射光进行两级衍射分光、反射、准直,完成反射光信号从频域空间域的转换,空间光的位置由波长决定,形成一定顺序的均匀光谱垂直照射于线阵 InGaAs 光敏感元上,实现光强值到电压值的转换^[11]。线阵 CCD 光敏感元输出的模拟信号通过数据采集模块进行高速 AD 转换,并将转换后的光强数字信号以用户数据报协议(UDP)传输并储于计算机。

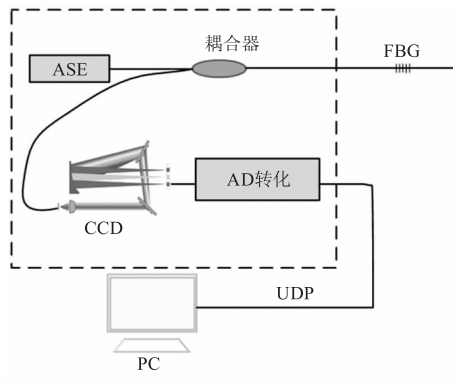


图 2 光谱高速采集系统

Fig. 2 Spectral high speed acquisition system

通常 FBG 的反射谱的形状可以表示为高斯型曲线,其表达式为^[12]:

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-\frac{\lambda - \lambda_0}{2\sigma_0^2}\right] \quad (8)$$

式中, I_0 为反射谱的峰值反射率; λ_0 为反射谱的中心波长; σ_0 为反射谱在 $1/e$ 强度处的半宽度,实际分析中,通常用反射谱的半峰全宽 σ_{FWHM} 代替 σ_0 ,两者之间的关系为^[13]:

$$\sigma_{FWHM} = 2 \sqrt{2 \ln 2} \sigma_0 \quad (9)$$

线阵 CCD 上 256 个 InGaAs 探测器输出的当前时刻每一个像素点的对应的光强值 (P_i, I_i)。将得到的这一系列离散的二位数组代入公式(8)高斯模型中,通过最小化误差的平方,其表达是为^[14-15]:

$$\sum_{i=0}^N [(P_i) - I(P_i)]^2 = \min \quad (10)$$

寻找数据的最佳函数匹配,得到 FBG 的反射光谱,如图 3 所示。

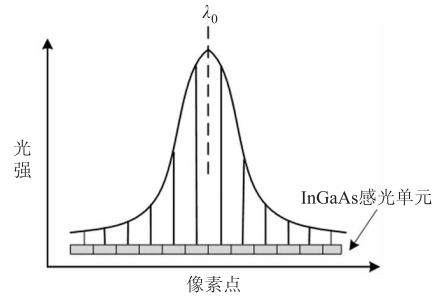


图 3 高斯光谱拟合

Fig. 3 Gaussian spectrum fitting

本文采用基于 Ibsen I-MON 256 线阵 CCD 解调模块实现最高 35 k 的光谱采样速率。

4 实验装置设计

4.1 超声脉冲发生电路

本文采用栈式压电陶瓷作为脉冲产生装置,为驱动堆栈式压电陶瓷产生脉冲超声,设计一种简单的脉冲发生电路,如图 4 所示,该电路是以 N 型金属-氧化物半导体场效应管(MOS-FET)为核心,通过信号发生器输出的脉冲宽度调信(PWM)控制 MOS 管的通断,调节压电陶瓷的两端电压脉宽和重复周期。

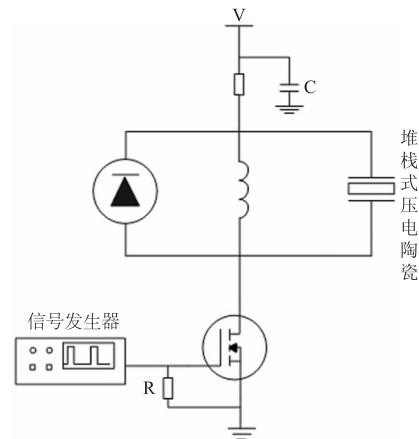


图 4 超声脉冲发生电路

Fig. 4 Ultrasonic pulse generator circuit

驱动堆栈式压电陶瓷为高电压脉冲信号,因此采用大功率高压 MOSFET 场效应管作为电子开关产生高压脉冲信号。在堆栈式压电陶瓷一端接入直流稳压源,另一端接到 MOSFET 的源极,并在堆栈式压电陶瓷两端并联上匹配电感以及快速恢复二极管。MOSFET 选择 FDPF51N25,该器件的耐压为 250 V,导通电流最大可以到 51 A,导通时间仅为 62 ns,导通电阻仅为 60 mΩ,可以有效降低功率,提高转换效率。信号发生器输出 PWM 信号

驱动 MOSFET 的栅极,同时在栅极串接保护电阻,防止静电击穿栅极。当信号发生器输出低电平时 MOSFET 处于关断状态,压电陶瓷两端电压相等,不振动。当输出高电平并大于 MOSFET 的开启电压 5 V 之后, MOSFET 瞬间打开,压电陶瓷一端接地,一端是高压,形成高压脉冲。通过调节信号发生器的 PWM 信号即可得到实验所需的超声脉冲频率和脉宽。

将压电陶瓷接入到电路中,观察压电陶瓷两端的电压如图 5 所示,底部为压电陶瓷两端电压波形。

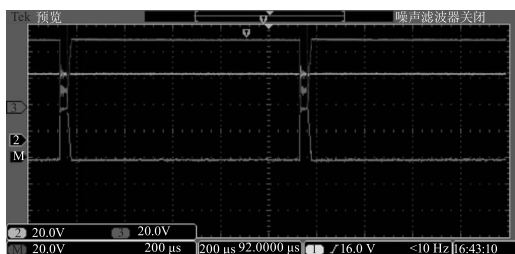


图 5 脉冲高压信号

Fig. 5 Pulse high voltage signal

为减少输出电压纹波,提高转换效率,设计采用 N 型 MOSFET 与输出电感匹配的脉冲发生电路。由于减少了传统电路中的电阻和功率二极管的功率损耗,这种电路具有非常低的无功功率消耗,在保证小的静态功率的同时获得最大的转换效率。

4.2 超声换能器设计

电压脉冲信号加载到堆栈式压电陶瓷上产生垂直振动模式的超声脉冲,为保证该超声脉冲信号高效耦合进入光纤中,设计如图 6 所示的超声换能器,其主要由衬底、堆栈式压电陶瓷、超声聚能器三部分组成。

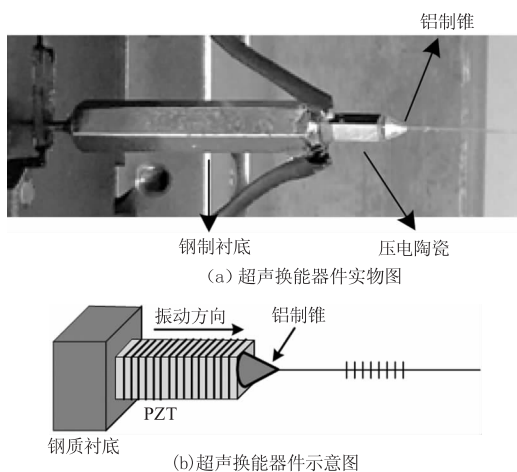


图 6 超声换能器

Fig. 6 Ultrasonic transducer

为确保堆栈式压电陶瓷具有比较高的单向辐射效率,衬底通常选择声阻抗大于堆栈式压电陶瓷声阻抗的材料,本文选择刚质材料作为超声换能器的衬底。

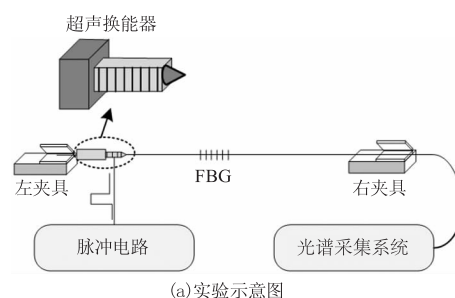
由于堆栈式压电陶瓷产生的超声脉冲的振幅比较小,需要将振幅放大后耦合进光纤中。考虑声阻抗匹配和加工难度,本文采用圆锥形超声聚能器结构,其能有效的将机械振动位移放大并把能量集中在较小的辐射面上。同时为实现超声聚能器和光纤之间的高效耦合,两者材料之间需要满足声阻抗匹配。圆锥形超声聚能器顶端的声阻抗可以表示为:

$$Z_r = c_r \rho_r A_r \quad (11)$$

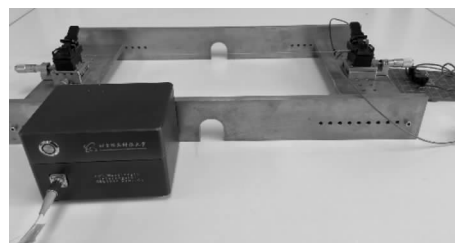
其中, c_r 为声纵波的波速; $c_r = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$; ρ 为制作超声聚能器所使用材料的密度; A_r 为超声聚能器顶端横截面的面积。类似的,光纤中传输超声波的声阻抗可以表示为 Z_0 。当两者声阻抗相同或者相近时,超声波能高效耦合入光纤中,即超声波通过两种不同材料介质的界面时不发生反射,保证超声波只向前单向传播^[16]。本文选择加工难度小且声阻抗与光纤相近的铝质材料。

5 实验与分析

图 7 为超声脉冲导入的 FBG 的光谱特性研究的实验装置图,使用的 FBG 中心波长为 1559.35 nm, 3 dB 带宽为 0.05 nm, 光栅长度为 10 mm, FBG 距离脉冲源的水平距离是 20 cm。



(a) 实验示意图



(b) 实验实物图

图 7 实验

Fig. 7 Experiment

实验采用的压缩脉冲频率为 25 kHz(占空周期 40 μs),重复周期为 1 ms,其超声脉冲波长为 200 mm,满足脉冲波长远大于光栅长度。光谱采集系统使用 30 kHz 的采样频率,采样周期为 33 μs 。

如图 8(a) 中所示,压电陶瓷的脉冲电压为 80 V,在时域上,当一个波长远大于光栅长度的压缩脉冲达到 FBG,使光栅均匀压缩,反应在光谱上:光谱形状未发生变化,光谱向波长小的方向漂移;随着超声脉冲向前传播离开 FBG 后,FBG 光谱恢复初始状态。如图 8(b) 所示,对比超声脉冲作用前后相邻 3 个时刻的反射光谱,矩形压缩脉冲作用前后的光谱几乎重叠,只有细微漂移,这是由于试验中压缩矩形脉冲在光纤传播过程中的应力峰值波动造成的,从图 9 的中心波长波动也能得到印证。

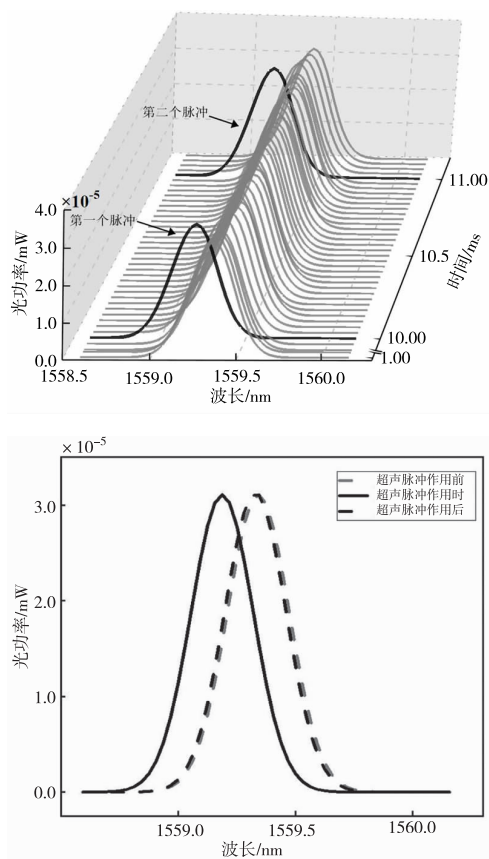


图 8 FBG 反射谱

Fig. 8 FBG reflection spectrum

如图 9 所示,记录时域上的中心 FBG 中心波长变化。超声脉冲的重复周期为 1 ms,在这重复周期内 CCD 解调仪将采集 30 个点,每一个点间隔 33 μs ,从图 9 可以看出,1 ms 的重复周期内,FBG 的反射光谱发生一次波长漂移,当电压为 80 V 时漂移为 171 pm。如图 10 所示随着电压越高,压缩脉冲

的应变越高,脉冲作用时刻中心波长向较短波长方向移动,呈现成线性变小。这与理论分析一致。

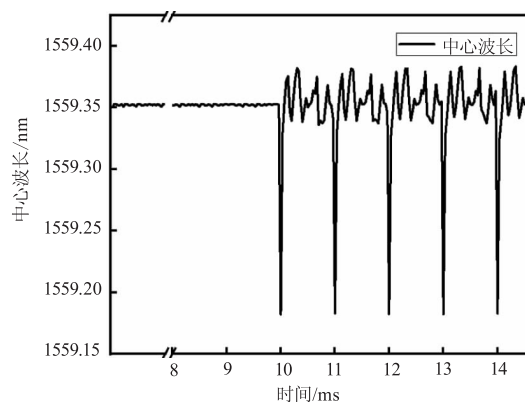


图 9 脉冲电压为 80 V 时域中心波长变化

Fig. 9 When the pulse voltage is 80 V, the central wavelength change in the time domain

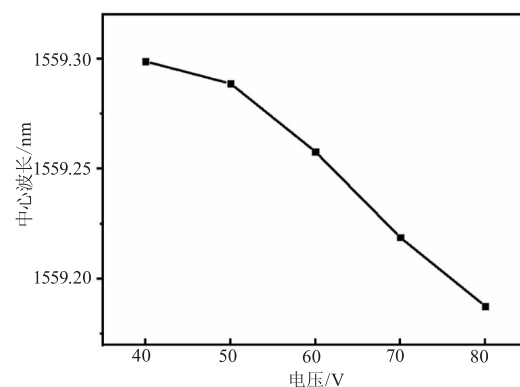


图 10 不同电压脉冲作用时刻中心波长

Fig. 9 The central wavelength of different voltage pulses at different moments of action

6 结 语

本文提出将超声波以矩形脉冲波的形式导入 FBG,分析超声脉冲作用于 FBG 的机理,在此基础上,设计超声脉冲发生电路以及超声换能器,用高电压脉冲信号驱动堆栈式压电陶瓷产生沿光纤轴向的压缩脉冲,采用 CCD 成像法高速捕捉 FBG 的光谱时在域上的变化。结果表明:当 FBG 长度远小于超声波长时,FBG 的反射光谱有效的发生搬移,只是中心波长发生漂移;随着压缩脉冲的应力增加,脉冲作用时刻中心波长向较短方向移动,呈现成线性变小,与原理分析结果相同。为超声脉冲与波分复用解调技术相结合提供参考。

参考文献:

- [1] Tanaka S. Fiber Bragg grating ultrasonic sensors based on intensity modulation technique[J]. Proceedings of SPIE-

- The International Society for Optical Engineering, 2015, 9655.
- [2] Wu Q, Okabe Y, Saito K, et al. Sensitivity distribution properties of a phase-shifted fiber Bragg grating sensor to ultrasonic waves[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 1094 – 1105.
- [3] Xiaohong B, Manli H, Tingting G, et al. A submerged optical fiber ultrasonic sensor using matched fiber Bragg gratings[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1942.
- [4] Zhao Y, Zhu Y, Yuan M, et al. A laser-based fiber Bragg grating ultrasonic sensing system for structural health monitoring[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2573 – 2576.
- [5] Zheng Yan, Yu Youlong, Mei Yujie, et al. Ultrasonic detection of metal sheet using fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(5): 138 – 141. (in Chinese)
郑艳, 余有龙, 梅钰洁, 等. 基于光纤光栅传感的金属薄板超声探测[J]. *光子学报*, 2016, 45(5): 138 – 141.
- [6] Zhang Faye, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, et al. Acoustic emission localization technique based on fiber Bragg grating sensing network and signal feature reconstruction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, (7): 202 – 210. (in Chinese)
张法业, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究[J]. *物理学报*, 2017, (7): 202 – 210.
- [7] Li Yao, Zhao Hong, Zhu Chen, et al. Study on fiber gratings technology[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(S1): 749 – 754. (in Chinese)
李尧, 赵鸿, 朱辰, 等. 光纤光栅技术综述[J]. *激光与红外*, 2006, 36(S1): 749 – 754.
- [8] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8): 1442 – 1463.
- [9] Minardo A, Cusano A, Bernini R, et al. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves. [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2005, 52(2): 304 – 305.
- [10] Italia V, Cusano A, Campopiano S, et al. Analysis of the phase response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic fields in the high frequency regime: towards new interrogation strategies[C]// *IEEE/LEOS Workshop on Fibres & Optical Passive Components*. IEEE Xplore, 2005.
- [11] Zhang Dengpan, Wang Jin, Wang Yongjie, et al. Real-time calibration technique of fiber Bragg grating demodulation system based on FBGA[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(7): 825 – 829. (in Chinese)
张登攀, 王璿, 王永杰. 基于 FBGA 光纤光栅解调系统的实时校准方法[J]. *激光与红外*, 2015, 45(7): 825 – 829.
- [12] Sano Y, Yoshino T. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(1): 132 – 139.
- [13] Agrawal G. *Nonlinear fiber optics* [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2001: 67 – 68.
- [14] Li Hong, Zhu Lianqing, Zhang Yumin, et al. Demodulation method for FBG reflection spectrum based on linear array InGaAs scanning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 236 – 240. (in Chinese)
李红, 祝连庆, 张钰民, 等. 线阵 InGaAs 扫描 FBG 反射谱的传感解调方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(1): 236 – 240.
- [15] Wei Yubo, Liu Feng, Liu Jia, et al. Research on demodulation precision of CCD by broadband FBG and self-correlation algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(1): 88 – 92. (in Chinese)
魏钰柏, 刘锋, 刘佳, 等. 宽带 FBG 与自相关算法提高 CCD 解调精度的研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(1): 88 – 92.
- [16] Wang lili. *Stress wave foundation* [M]. Beijing: National defense industry press, 2005: 46 – 47. (in Chinese)
王礼立. *应力波基础* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 46 – 47.