

对基于光纤光栅的两种水听器灵敏度的讨论

谭波^{1,2†} 黄俊斌¹ 李日忠¹ 顾宏灿¹ 何琳²

(1 武汉海军工程大学兵器工程系新概念武器研究室 武汉 430033)

(2 武汉海军工程大学振动与噪声研究所 武汉 430033)

摘要 本文简单介绍了基于光纤光栅的光纤布喇格光栅 (FBG) 水听器以及分布反馈式 (DFB) 光纤激光水听器的基本工作原理与信号解调的基本方法。在此基础上提出了 FBG 水听器和 DFB 光纤激光水听器波长漂移率、压力灵敏度系数、相位灵敏度与相位灵敏度级以及电压灵敏度的定义以及物理涵义。并且对干涉型光纤水听器与 DFB 光纤激光水听器在相位灵敏度以及物理涵义上的区别进行了说明。

关键词 FBG 水听器, DFB 光纤激光水听器, 波长漂移灵敏度, 相位灵敏度, 电压灵敏度

Discussion on the sensitivities of two kinds of hydrophones based on fiber grating

TAN Bo^{1,2} HUANG Jun-Bin¹ LI Ri-Zhong¹ GU Hong-Can¹ HE Lin²

(1 New Weapons Research Office, Dept. of Weaponry Eng., Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033)

(2 Research Inst. of Vibration & Noise, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract The fiber Bragg grating (FBG) hydrophone and the distributed feedback (DFB) fiber laser hydrophone are recent rapidly developing underwater sound detection technologies based on fiber grating. In this paper, their fundamental operating principles and the ways of their signal demodulation are briefly presented, and the sensitivities of the two kinds of hydrophones are defined in some form. Finally, differences between the definitions of the sensitivities of the interferometer fiber-optic hydrophone and the DFB fiber laser hydrophone are described.

Key words FBG hydrophone, DFB fiber laser hydrophone, Wavelength shift sensitivity, Absolute phase sensitivity, Voltage sensitivity

2006-10-08 收稿; 2007-02-26 定稿

作者简介: 谭波 (1979-), 男, 湖南双峰人, 博士研究生, 研究方向: 减振降噪、光纤传感。

黄俊斌 (1965-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。

李日忠 (1978-), 男, 助教, 硕士。

顾宏灿 (1980-), 男, 博士研究生。

何琳 (1957-), 男, 教授, 博士, 博士生导师。

† 通讯联系人 E-mail: whtbwjsw@163.com

1 引言

自20世纪70年代末以来,干涉型光纤水听器在声纳上的应用已获得很大发展,并比传统的压电水听器阵列具有许多明显的优势,例如重量轻,价格低,可靠性高,功耗少。而近年来,光纤光栅技术的出现又展现了新一代内置光纤传感器阵列的可能性^[1],基于光纤光栅的光纤布喇格光栅(FBG)水听器以及分布反馈式(DFB)光纤激光水听器与干涉型光纤水听器一样利用光纤作为信息载体,因而同样具有无需阻抗匹配、本质上抗电磁干扰、适于远距离大范围监测等优点;而与干涉型光纤水听器相比,FBG水听器与DFB光纤激光水听器的尺寸更小,可以制作出近似为点传感器的紧凑型水听器;由于其传感信息直接由波长编码,它是绝对的参数,不会受到总的光强、光纤连接和耦合的损失以及光源功率变化的影响,因而与干涉型光纤水听器相比,信号不易受到干扰,这也是基于光纤光栅的水听器所具有的重要优点之一。此外正由于具有波长编码的特性,因此它们能方便地利用波分复用技术(WDM)在同一根光纤中串接多水听器进行分布式测量,从而实现全光纤探测和传输,这也是基于光纤光栅的水听器所具有的另一个重要优点,使得水听器成阵时可大大减少水听器阵列的重量和尺寸,并降低成本,因而在应用上具有很大优势。基于光纤光栅的水听器的出现,为光纤水听器的研究提供了另一个可供选择的方案^[2]。

随着新的水听器技术的出现,也出现了许多新的物理概念与名词的定义。文献^[3]曾指出,光纤水听器作为一种新型的水下声传感器自进入水声界后,一直难于被水声界接受和理解,特别是光纤水听器灵敏度的涵义难以接受。同样作为近年来新出现的基于光纤光栅的FBG水听器与DFB光纤激光水听器,由于其传感机理与压电型水听器以及干涉型光纤水听器存在很大差异,因此在声压灵敏度这一参数上也有新的涵义与定义。为了让FBG水听器

与DFB光纤激光水听器尽早得到水声界更多的理解,需要对这两种水听器的灵敏度进行讨论,以便于在工程应用中的规范与统一。

本文对基于光纤光栅的FBG水听器以及DFB光纤激光水听器的基本工作原理与信号解调的基本方法进行简单介绍。在此基础上提出了FBG水听器和DFB光纤激光水听器波长漂移率、压力灵敏度系数、相位灵敏度与相位灵敏度级以及电压灵敏度的定义以及物理涵义。并且对干涉型光纤水听器与DFB光纤激光水听器在相位灵敏度、相位归一化灵敏度定义以及物理涵义上的区别进行了说明。

2 基于光纤光栅的FBG水听器与DFB光纤激光水听器的基本工作原理及信号解调

2.1 FBG水听器的基本工作原理与信号解调的基本方法

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性(外界入射光子和纤芯内离子相互作用引起的折射率的永久性变化)在纤芯内形成空间相位光栅,其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的滤波器或者反射镜。光纤光栅有多个种类,其中光纤布喇格光栅(FBG)成栅后的光纤纤芯折射率呈现周期性分布条纹并产生布喇格光栅效应,其基本光学特性就是以共振波长为中心的窄带光学反射元件,满足如下光学方程^[4]。

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

其中 λ_B 为布喇格波长, Λ 是光栅周期, n_{eff} 是纤芯的有效折射率。

由于声压作用引起的布喇格波长的变化 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\epsilon_z - \frac{n_{eff}^2}{2} ((p_{11} + p_{12})\epsilon_r + p_{12}\epsilon_z) \right) \quad (2)$$

其中 ϵ_z 和 ϵ_r 分别是压力引起的光纤纵向和径向的应变, p_{11} 和 p_{12} 为弹光系数。在任意正

应力状态下的光纤应变张量可表示为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P(1-\nu)/E \\ -P(1-\nu)/E \\ 2P\nu/E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S\nu/E \\ S\nu/E \\ -S/E \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 P 为光纤受到的径向压力, S 为光纤受到的轴向压力, E 为弹性模量, ν 为泊松比, $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta$. 将 (3) 式代入 (2) 式, 则光栅的应变灵敏度可表示为 [5]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}\right)_{all} &= \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}\right)_{P_r=-P} + \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}\right)_{P_r=-S} \\ &= \left[1 - \frac{n_{eff}^2}{2} \left((p_{11} + p_{12}) \frac{-(1-\nu)}{2\nu} + p_{12} \right)\right] \frac{2P\nu}{E} \\ &+ \left[-1 - \frac{n_{eff}^2}{2} \left((p_{11} + p_{12})\nu - p_{12} \right) \right] \frac{S}{E} \\ &= k_1 \cdot \frac{2P\nu}{E} - k_2 \cdot \frac{S}{E} \end{aligned} \quad (4)$$

即受任意压力作用的光纤所产生的波长漂移可分解为径向压力与轴向压力分别引起的波长漂移之和。上式括弧中的参数均由光纤的材料决定, 利用纯熔融石英的参数, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.27$, $\nu = 0.17$, $n_{eff} = 1.456$, $E = 7.2 \times 10^{10} \text{Pa}$. 代入式 (4) 可求得 $k_1 = 1.726$, $k_2 = 0.784$.

用一束宽光谱光源注入光纤, 从 FBG 将反射回一个中心波长为布喇格波长 λ_B 的窄带光波. 如图 1 所示, 当声压对光纤光栅产生激励时, 就会使光栅产生应变, 从而导致 FBG 波长的改变. 这个改变可以从光栅的反射光谱中检测出来, 将这个改变的布喇格波长与没受激励影响时的布喇格波长进行比较, 就可以测定光栅受激励程度, 从而解调出声压信号. 因此传感信息直接由波长编码, 它是绝对参数, 不会受到总的光强、光纤连接和耦合的损失以及光源功率变化的影响.

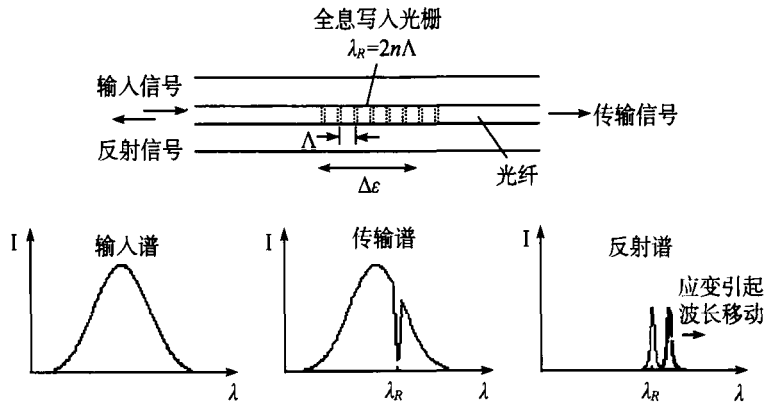


图 1 FBG 水听器的传感原理

FBG 水听器的信号解调本质上是对传感光栅反射谱进行实时监测, 分析出编码波长. 目前发展出来的解调方法主要有边缘滤波法、被动解调法、可调谐窄带滤波器扫描法、光纤光栅扫描滤波法等方法, 这里仅对边缘滤波法进行介绍.

边缘滤波法是利用波分耦合器的特殊传输特性来测量光纤光栅的波长变化. 波分耦合器在 1520~1560nm 的波长范围内, 耦合器的效率与波长基本呈线性关系, 因而可以利用该特

性来测量波长的变化, 测量系统原理如图 2 所示. 宽带光源发出的光被传感光栅反射回来后进入耦合器, 耦合器的出射光分为两束 (这两束光的功率与入射光的功率在同一坐标系下形如 x), 两束出射光通过光电探测器变成电信号, 经过处理后消除光功率变化的影响, 最后得到波长的变化量. 这种方法的电子处理电路极为简单, 但由于受器件传输特性的影响测量分辨率较低. 该方法对于一些对测量分辨率要求不是很高的场合提供了一种结构简单、性能

价格比很高的测量方案 [6]。

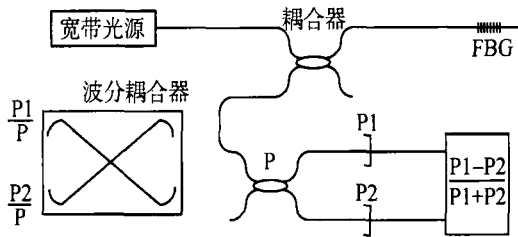


图 2 利用波分耦合器测量 FBG 波长示意图

2.2 DFB 光纤激光水听器的基本工作原理与信号解调的基本方法

DFB 光纤激光水听器是利用 DFB 光纤激光器作为敏感元件的水听器。DFB 光纤激光器是在掺铒光纤 (EDF) 中写入相移光栅构成的法布里 - 珀罗 (F-P) 激光谐振腔, 相移光栅的相移为四分之一布喇格波长, 如图 3 所示。当利用 980nm 或 1480nm 的短波长光泵浦时, 掺铒光纤铒离子的电子在不同能级之间跃迁, 释放出波长在 1550nm 附近的光子, 形成带宽约为 40nm 的自发辐射光谱。由于光纤光栅所组成的 F-P 谐振腔的选频作用, 自发辐射光在相移光栅之间多次反射, 其能量得到加强, 当辐射光的能量超过谐振腔的损耗时, DFB 光纤激光器将激射出波长为布喇格波长的窄线宽激光。

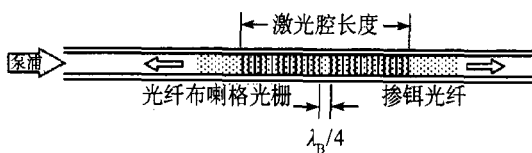


图 3 DFB 光纤激光器

将 DFB 光纤激光水听器放置在声场中时, 声压的作用将引起激光腔的应变, 从而使激光器输出波长 λ_{FL} 发生变化。而该输出波长是由谐振腔内相移光栅的布喇格波长决定的, 即 $\lambda_{FL} = \lambda_B$ [7,8]。

同样声压作用所引起的激光输出波长的变化 $\Delta\lambda_{FL}$ 为

$$\Delta\lambda_{FL} = \lambda_{FL} \left(\epsilon_z - \frac{n_{eff}^2}{2} ((p_{11} + p_{12}) \epsilon_r + p_{12} \epsilon_z) \right) \quad (5)$$

由于 DFB 光纤激光器具有很窄的激射线宽, 因此水听器的信号可采用干涉解调法进行解调, 通过与干涉型解调仪结合后, 水听器具有相当高的声压灵敏度。这里将对使用非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI) 的相干检测方法进行介绍。

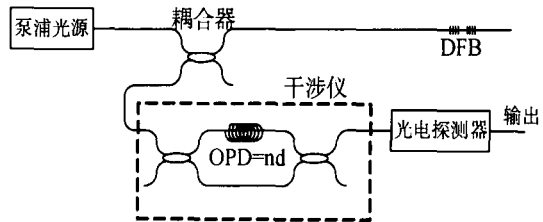


图 4 DFB 光纤激光器和干涉检测系统的基本原理图

图 4 为 DFB 光纤激光器和干涉检测系统的基本原理图, 泵浦光源出射波长为 980nm 或 1480nm 的激光, 在 DFB 光纤激光器激射出 1550nm 波长的激光, 通过 WDM 耦合器回路进入非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪, 该干涉仪是一个光学滤波元件, 其传递函数为 $\{1 + \cos\phi\}$, 相位由输入光的波长决定。干涉仪可将激光器出射激光的波长漂移转化为干涉仪输出的相位变化, 其关系由下式表示 [9,10] :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi nd}{\lambda_{FL}^2} \Delta\lambda_{FL} \quad (6)$$

其中 n 为光纤纤芯折射率, d 为非平衡路径。

可见, 相移量由激光谐振腔应变和干涉仪的不平衡路径决定, 其中非平衡路径可以产生信号增益。

3 FBG 水听器与 DFB 光纤激光水听器灵敏度的定义

3.1 波长漂移率

到目前为止, FBG 水听器还没有统一的声压灵敏度定义, 通常使用单位声压下的波长漂移率来描述 FBG 水听器声压灵敏度的大小 [11], 这一定义也常在光纤光栅型压力传感器的应用中 [12]。FBG 作为波长调制型传感器,

其被测信息被转化为特征波长的漂移, 因此在对光纤光栅的压力传感特性进行研究时, 波长漂移率是描述光栅对于压力敏感程度的最为直观的参数。可定义为: 由声压信号引起的 FBG 中心波长的漂移 $\Delta\lambda$ 与在声场中引入水听器前存在于水听器声学中心位置处的自由场声压的比值。单位是: nm/Pa。

$$M_W = \frac{\Delta\lambda}{P} (\text{nm/Pa}) \quad (7)$$

其物理意义是: 探头在声压 P (单位: Pa) 的作用下, FBG 中心波长的漂移量 $\Delta\lambda$ (单位: nm)。

3.2 压力灵敏度系数^[12-14]

考虑到不同的 FBG 有不同的中心输出波长 λ_B , 此外在采用不同结构或者不同聚氨酯涂敷方式对 FBG 进行封装时, 为了比较各种封装对于 FBG 的增敏效果, 有时也可用光纤光栅中心波长的相对变化 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 来描述声压灵敏度。由式 (4) 可知, 此时可令 $\Delta\lambda_B/\lambda_B = k_p \cdot P$, 其中 k_p 即称为压力灵敏度系数。可定义为: 由声压信号引起的 FBG 中心波长的相对变化 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与在声场中引入水听器前存在于水听器声学中心位置处的自由场声压的比值。单位为: 1/Pa。

$$k_p = \frac{\Delta\lambda_B/\lambda_B}{P} (1/\text{Pa}) \quad (8)$$

其物理意义是: 探头在声压 P (单位: Pa) 的作用下, FBG 中心波长的相对变化 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ (单位: 无量纲)。

压力灵敏度系数在光纤光栅压力传感器的应用中使用相当广泛, FBG 水听器作为光纤光栅压力传感器的一种, 也可利用压力灵敏度系数来描述其声压灵敏度。该系数在 FBG 水听器的声压增敏设计中有利于各种设计增敏效果的比较。

3.3 相位灵敏度

对于 DFB 光纤激光水听器, 也可通过波长漂移率和压力灵敏度系数描述其声压灵敏度大小, 但由于该水听器系统通常采用干涉仪进行

解调, 波长漂移信息转换为了相位漂移信息, 再使用这两个参数对声压灵敏度进行描述就不太直观了, 因此通常采用相位灵敏度来描述其声压灵敏度^[7]。可定义为: 由声信号引起的 DFB 光纤激光器波长漂移 $\Delta\lambda$, 经过干涉仪解调系统转换后输出的相位漂移 $\Delta\phi$, 与在声场中引入水听器前存在于水听器声学中心位置处的自由场声压的比值。单位是: rad/Pa。

$$M_{PD} = \frac{\Delta\phi}{P} (\text{rad/Pa}) \quad (9)$$

其物理意义是: 探头在声压 P (单位: Pa) 的作用下, DFB 光纤激光器所产生的波长漂移 $\Delta\lambda$, 经过干涉仪解调系统转换后输出的相位漂移 $\Delta\phi$ (单位: rad)。

值得注意的是, DFB 光纤激光水听器的相位灵敏度与干涉型光纤水听器的相位灵敏度虽然单位相同, 但两者的定义以及物理意义存在着本质的区别。干涉型水听器的相位灵敏度定义为: 由声信号引起的光纤水听器的干涉仪两臂的相位差 $\Delta\phi$ 与在声场中引入水听器前存在于水听器声学中心位置处的自由场声压的比值。其物理意义是: 探头在声压 P (单位: Pa) 的作用下, 干涉仪两臂相位差变化 $\Delta\phi$ (单位: rad)。

3.4 相位灵敏度级

相位灵敏度级是相位灵敏度与其基准值之比以 10 为底的对数乘以 20。单位是: dB。

$$M_{DFB} = 20 \log \left(\frac{M_{PD}}{M_{ref}} \right) (\text{dB}) \quad (10)$$

基准值是: $M_{ref} = 1 \text{rad}/\mu\text{Pa}$ 。

将干涉型光纤水听器的相位灵敏度级与 DFB 光纤激光水听器的相位灵敏度级进行比较能更清楚的显示两者之间的区别。

对于干涉仪, 有

$$\phi = \frac{2\pi n_1 d}{\lambda_0} \quad (11)$$

其中 n_1 为光纤纤芯的折射率, d 为干涉仪非平衡路径的长度, λ_0 是光波在真空中的波长。

(1) 在干涉型光纤水听器中, 由于声压会引起其传感臂长度的变化, 故有:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_1}{\lambda_0} \Delta d \quad (12)$$

令干涉型光纤水听器的相位声压灵敏度级为:

$$M_{in} = 20 \log\left(\frac{\Delta\phi}{P}\right) - 20 \log(M_{ref}) \quad (13)$$

则

$$M_{in} = 20 \log\left(\frac{\Delta d}{P} \cdot \frac{2\pi n_1}{\lambda_0} \cdot \frac{1}{M_{ref}}\right) = 20 \log\left(\frac{\Delta d}{P}\right) + 20 \log\left(\frac{2\pi n_1}{\lambda_0}\right) - 20 \log(M_{ref}) \quad (14)$$

可见干涉型光纤水听器的相位声压灵敏度级可转化为传感臂长度变化对灵敏度级的影响与一个常数之和。

(2) 而对于DFB光纤激光水听器, 声压会引起波长的漂移, 故有:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n_1 d}{\lambda_0^2} \Delta\lambda_0 \quad (15)$$

令DFB光纤激光水听器的相位声压灵敏度级为:

$$M_{DFB} = 20 \log\left(\frac{\Delta\phi}{P}\right) - 20 \log(M_{ref}) \quad (16)$$

则

$$M_{DFB} = 20 \log\left(\frac{\Delta\lambda_0}{P} \cdot \frac{2\pi n_1 d}{\lambda_0^2} \cdot \frac{1}{M_{ref}}\right) = 20 \log\left(\frac{\Delta\lambda_0}{P}\right) + 20 \log(d) + 20 \log\left(\frac{2\pi n_1}{\lambda_0^2}\right) - 20 \log(M_{ref}) \quad (17)$$

可见DFB光纤激光水听器的相位声压灵敏度级可转化为波长漂移对灵敏度级的影响加上干涉仪光纤缠绕长度的增益再加上一个常数。

3.5 自由场电压灵敏度

自由场电压灵敏度的定义是: FBG水听器或者DFB光纤激光水听器输出端的开路电压与在声场中引入水听器前存在于水听器声中心位置处的自由场声压的比值。单位: V/Pa。

$$M_V = 20 \log\left(\frac{V}{P}\right) (V/Pa) \quad (18)$$

它的物理意义是: 探头在声压P(单位: Pa)的作用下, 水听器的输出电压(单位: V)。

FBG水听器与DFB光纤激光水听器的自由场电压灵敏度定义与文献3所述的干涉型光纤水听器自由场电压灵敏度本质上相同。即它们的大小不仅与水听器本身的声压灵敏度有关, 而且与解调系统的总增益K有关。K的大小, 与到达光电探测器的光强、光电探头的灵敏度、信号解调的方法以及电信号的后端放大等因素有关。对于这两种水听器来说, 不能确切反映它们的物理本质。

综上所述, 对于这两种基于光纤光栅的水听器而言, 声压作用所引起的最本质反应是这两种水听器的波长漂移, 最后由于解调方式的不同而导致了各种灵敏度单位的区别, 因此波长漂移率 $\Delta\lambda/P$ 应当是最佳的灵敏度应用单位。

4 结束语

本文对基于光纤光栅的光纤布喇格光栅(FBG)水听器以及分布反馈式(DFB)光纤激光水听器的基本工作原理与信号解调的基本方法进行了简单介绍。提出了FBG水听器和DFB光纤激光水听器波长漂移率、压力灵敏度系数、相位灵敏度与相位灵敏度级以及电压灵敏度的定义以及物理涵义。并且对干涉型光纤水听器与DFB光纤激光水听器在容易混淆的一些定义和物理涵义上进行了比较, 从本质上说明了两者存在的区别。认为波长漂移率 $\Delta\lambda/P$ 应当是最佳的灵敏度应用单位。

干涉型光纤水听器尚未完全得到水声界的理解与接受, 基于光纤光栅的光纤布喇格光栅(FBG)水听器以及分布反馈式(DFB)光纤激光水听器又带来了新的冲击, 由于其传感机理与压电陶瓷水听器以及干涉型光纤水听器存在着本质的区别, 灵敏度的涵义更是存在很大的不同, 本文试图通过对上述内容的讨论, 以继

续推进光纤水听器在工程应用方面的发展, 促进其测量与应用的规范。

参 考 文 献

- [1] Scott F, Alexei T, Mark M, et al. A fibre laser hydrophone, Proceedings of SPIE, 2005. 5855: 627-630.
- [2] D. J. Hill, P. J. Nash, S. D. Hawker, et al. Progress toward an ultra thin optical hydrophone array. Proceedings of SPIE, 1998, 3473: 301-304.
- [3] 倪明, 张仁和, 胡永明, 等. 关于光纤水听器灵敏度的讨论. 应用声学, 2002, 21(6): 18-21.
- [4] 王惠文编. 光纤传感技术与应用, 北京: 国防工业出版社, 2001: 72.
- [5] 廖延彪编. 光纤光学, 北京: 清华大学出版社, 2000: 202.
- [6] 李志全, 许明妍, 汤敬, 等. 光纤光栅传感系统信号解调技术的研究. 应用光学, 2005, 26(4): 36-41.
- [7] D. J. Hill, P. J. Nash, D. A. Jackson, et al. A fiber laser hydrophone array. Proceedings of SPIE, 1999, 3860: 55-66.
- [8] Ian L, Zourab B, Trevor W, et al. A distributed-feedback fibre laser based optical fibre hydrophone system with very high-sensitivity. Proceedings of SPIE, 2005, 5634: 434-443.
- [9] K. P. Koo, A. D. Kersey. Bragg grating-based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1243-1249.
- [10] Dag T, Erlend R, Jon T K. Intrinsic distributed feedback fibre laser high frequency hydrophone. Bragg gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides, 1999 Technical Digest, 1999: 61-63.
- [11] Nobuaki T, Kazuto Y, Sumio T, et al. Characteristics of Fiber Bragg Grating Hydrophone. IEICE TRANS. ELECTRON, 2000, E83-C(3): 275-281.
- [12] 张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究. 光学学报, 2002, 22(1): 89-91.
- [13] 刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器. 中国激光, 2000, 27(3): 211-214.
- [14] 周少玲, 光纤光栅应变传感器研究, 硕士论文, 上海: 上海交通大学, 2003: 1.