

## 面向海洋静冰压力监测的薄膜结构光纤 Fabry-Perot 传感器设计与性能分析

黄梦醒<sup>1,2</sup>, 李宇航<sup>1,2</sup>, 王冠军<sup>1,2</sup>, 刘建勋<sup>2</sup>, 严璐<sup>3</sup>, 王隆娟<sup>1</sup>

- (1. 海南大学信息与通信工程学院, 海南 海口 570228;  
2. 海南大学南海海洋资源利用国家重点实验室, 海南 海口 570228;  
3. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 海冰是重要的自然灾害之一, 针对静冰压力监测需求, 首次提出一种基于光纤 Fabry-Perot 传感器的静冰压力测试新方法。结合膨胀辅助放电方法, 制备了一种薄膜结构的高灵敏度光纤 Fabry-Perot 压力传感器, 并采用金属管/PDMS/AB 胶组合方法对传感器进行了封装。在此基础上, 研究了-15℃~0℃之间静冰融化和冻结过程中的内部应变变化特性。实验结果表明, 所制备的薄膜结构光纤 Fabry-Perot 压力传感器在静冰压力监测中具有良好的灵敏度。所研究内容对远距离分布式海洋静冰特性监测具有一定的参考价值。

**关键词:** 光纤 Fabry-Perot 传感器; 静冰压力监测; 薄膜结构; 膨胀辅助放电

**中图分类号:** P229.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019087

## Design and characteristic analysis of fiber optic Fabry-Perot sensor for static ice strain monitoring

HUANG Mengxing<sup>1,2</sup>, LI Yuhang<sup>1,2</sup>, WANG Guanjun<sup>1,2</sup>, LIU Jianxun<sup>2</sup>, YAN Lu<sup>3</sup>, WANG Longjuan<sup>1</sup>

1. College of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China  
2. State Key Laboratory of Marine Resources Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou 570228, China  
3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

**Abstract:** Sea ice is one of the important natural disasters. A new method based on optical fiber Fabry-Perot sensor for ice strain measurement was proposed to meet the needs of ice strain monitoring. A high sensitivity optical fiber Fabry-Perot pressure sensor with thin-film structure was realized by means of pressure assisted arc discharge method, and the sensor was encapsulated by metal tube /PDMS /AB epoxy glue combination method. On this basis, the static internal strain characteristics of ice in the process of melting and freezing during -15℃~0℃ was studied. Experimental results show that this proposed thin-film fiber Fabry-Perot pressure sensor has good sensitivity characteristic in ice strain monitoring, it is believed of great value for the monitoring of remote distributed sea samples.

**Key words:** fiber Fabry-Perot sensor, static ice strain monitoring, thin film structure, pressure-assisted arc discharge

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-03-01

基金项目: 海南省自然科学基金面上基金资助项目 (No.617079); 国家自然科学基金地区基金资助项目 (No.61865005); 海南省重大科技计划基金资助项目 (No.ZDKJ2016015); 陕西省自然科学基金基础研究计划青年基金资助项目 (No.2018JQ6076); “十三五”装备预研领域基金资助项目 (No.61404140304); 海南大学人才引进科研启动基金资助项目 (No.KYQD(ZR)1882)

**Foundation Items:** The Natural Science Foundation of Hainan Province(No.617079), The Regional Project of National Natural Science Foundation of China (No.61865005), The Major Science and Technology Projects in Hainan Province(No.ZDKJ2016015), The Shaanxi Province Science Foundation for Youths (No.2018JQ6076), The "13th Five-Year Plan" Equipment Pre-Research Field Fund (No.61404140304), The Scientific Research Starting Foundation of Hainan University(No.KYQD(ZR)1882)

## 1 引言

海冰是重要的自然灾害之一,实时有效地监测海水静态特性对海洋交通运输、渔业、海洋石油钻井等领域至关重要。由于局限于恶劣的气候、复杂的地理环境等因素影响,如何精准地实现静冰压力实时监测,尚需科研工作者的持续关注。

常用的静冰压力测量仪器包括冻结力机械装置和压阻式压力传感器。传统的电阻式和波纹管压力计存在数据误差、准确度有限、分辨率低、监测效果受限于电源蓄电量等问题<sup>[1]</sup>,而光纤传感器则具有体积小、可集成、远距离、分布式传感、传感器无需供电等优势,在远距离静冰压力监测方面具有独特优势。2010年,Zhou等<sup>[2]</sup>通过在一个冰区和一个冰梁上安装光纤类传感器,分析了传感器在集中荷载作用下的轴向和弯曲行为,监测了静冰应变与冰结构损伤的特征,此类光纤传感器在长期冰结构的监测以及安全评估上有很大作用。2012年,Ge等<sup>[3]</sup>设计了一种光纤结冰传感器,可以用来确定冰的类型并精确测量冰的厚度,这种光纤结冰传感器在航空航天安全监测领域有很大的价值。2013年,Zou等<sup>[4]</sup>提出了一种光纤端面倾斜结构的光纤结冰传感器,这种传感器的输出电压会随着冰层厚度的增加迅速降低,而面对混合冰时则不会有显著的变化,可用于准确识别航天应用的冰类型。2015年,Cui等<sup>[5]</sup>提出一种可以实现自动连续测量的静冰压力光纤传感器,这种新型光纤传感器具有稳定的性能、高分辨率和高灵敏度特点,可监测冰的生长和融化过程中的静冰压力等参数。2016年,Marchenko等<sup>[6]</sup>使用 Bragg 光栅传感器来研究盐水结冰的热力学性质,光栅传感器可以观测由于冰水压力引起的液体盐水垂向运移而引起的热膨胀现象。2017年,Yang等<sup>[7]</sup>提出了一种静冰压力检测方法,该方法是基于光纤干涉环技术,这种压力检测方法具有对光源功率波动不敏感、结构简单、响应速度快、灵敏度高优点。综上所述,目前,国内外利用光纤传感器进行静冰压力监测的研究仍处于前期探索阶段,对适合静冰压力监测的光纤传感器设计与特性分析研究尚待完善。

此外,基于微腔结构的光纤 Fabry-Perot 传感器也是一种重要的应力应变监测方法。目前,文献中报道的光纤微腔制作方法有很多。例如, Ma 等<sup>[8]</sup>通过将一定长度的石英毛细管与单模光纤熔接,然后融

合(加热/熔化)毛细管制作了一种具有内部空气腔的微球传感器。Jiang<sup>[9]</sup>使用化学蚀刻法和电弧放电方式,将尖端形成槽的多模光纤放入熔接机中,并通过电弧放电方法在多模光纤端部形成一个微腔。Duan 等<sup>[10]</sup>采用熔接机电弧放电方法制造了空气腔结构的 Fabry-Perot 干涉式应力传感器,其制作微泡的应力灵敏度超过了  $4 \text{ pm}/\mu\text{e}$ 。Liu 等<sup>[11]</sup>设计了一种高灵敏度应力传感器,该传感器是基于两段标准单模光纤拼接成的空气腔结构光纤 Fabry-Perot 干涉仪,通过重复电弧放电方法,提高 FPI (Fabry-Perot interferometer) 空腔膜层薄度,相应的传感器达到  $6.0 \text{ pm}/\mu\text{e}$ 。通过改进两段单模光纤中间的微泡装置得到矩形气泡, Liu 等<sup>[12]</sup>将应力灵敏度提高到了  $43.0 \text{ pm}/\mu\text{e}$ 。2016年, Liu 等<sup>[13]</sup>提出了一种月牙形光纤 Fabry-Perot 腔传感器,新月形腔反射面有 2 个,与抛磨型或椭圆的腔结构传感器相比,应变灵敏度有所增强。

本文提出了一种基于光纤微泡结构 Fabry-Perot 传感器的静冰压力测试新方法,与以往的光纤光栅传感器结构不同,本文设计的是抗温度干扰能力比较强的微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器,通过优化微泡薄膜结构来优化传感器应变灵敏度特性,同时采用了金属管/PDMS/AB 胶组合封装方法对传感器进行封装,并在此基础上,展开了冰融化和冰凝固阶段的静冰应变特性研究,最后采用 ANSYS 软件仿真分析方法对结果进行了验证。

## 2 光纤 Fabry-Perot 传感器制备、封装与原理分析

为了准确有效地监测静冰压力特性,制备具有较高灵敏度特性的光纤 Fabry-Perot 传感器是首要前提。对于本文提出的微泡型传感器结构,由于微泡端部薄膜厚度和直径直接决定了传感器灵敏度,所以本文在以往研究基础上,对传感器制备方法进行了进一步优化。经过优化后的膨胀辅助放电法薄膜传感器制备方法主要包括以下 3 个步骤,具体如图 1 所示。

1) 将所用到的单模光纤和玻璃管端面切割整齐。实验所用的是康宁公司生产的单模光纤,该光纤的参数为内径  $8 \mu\text{m}$ , 外径  $125 \mu\text{m}$ 。玻璃管内径为  $75 \mu\text{m}$ , 外径为  $125 \mu\text{m}$ 。然后将单模光纤置于光纤熔接机(光纤熔接机的型号为 Fijikura FSM 60S)两端进行熔接,如图 1(a)所示。2) 在将接近熔接点的玻璃管置于电极

中心位置后，通过压力泵往玻璃管内填充一定压强值的空气，然后熔接机马达上施加一定的外向力。经 3~5 次放电熔接后，玻璃管会发生断裂，形成一个封闭的玻璃管结构，如图 1(b)所示。3) 将封闭的玻璃管结构移至电极放电区域后，进行多次放电，这样，玻璃管内残留的气体膨胀，会使得玻璃管端部变得越来越薄，最终形成薄膜型微泡，如图 1(c)所示。

实验涉及的填充压强中心值为 120 kPa，放电电流中心值为 20 bit (熔接机内显示单位)，放电时间约 300 ms。

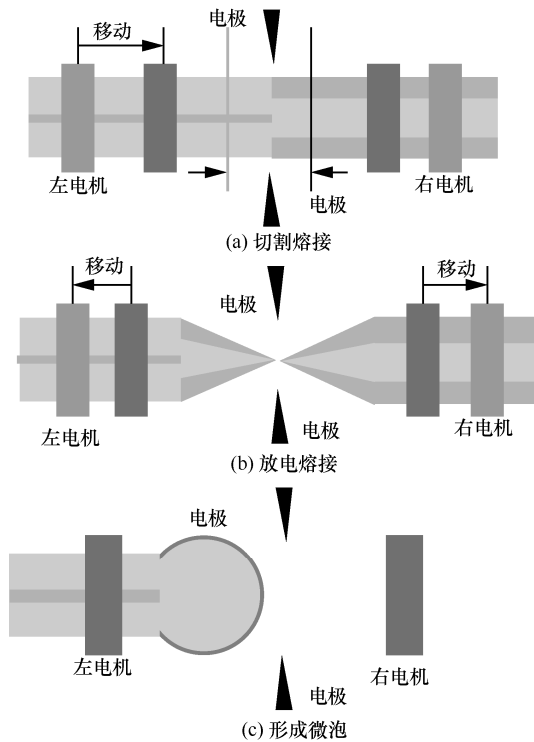


图 1 薄膜型光纤 Fabry-Perot 传感器制备流程

需要说明的是，膨胀辅助放电法薄膜传感器制备方法中的参数并不是固定的，可以根据制备目标和微泡各个阶段的形变效果进行调整。在制备超薄微泡结构时，有效地控制电弧放电与马达运动参数对壁厚均匀度极其重要，可调整放电时间进行调控。随着微泡结构端部区域越来越薄，容易造成泡结构厚度不均匀，这极易导致泡壁软化和膨胀区域反差过大。当微泡结构畸变到达一定界限后就会破裂。随着微泡膜层厚度变薄，上述参数需要相应微调。在实验中，几次放电作用后，沿轴向微泡区域膨胀伸长，泡壁也会变薄，并且有良好的均匀度，最后测得微泡壁厚范围在 3~8 μm 之间。

图 2 是本文制备的微泡型光纤 Fabry-Perot 传感

器，采用显微镜（显微镜的型号为 Leica DM750M）拍照。该传感器的特点是微泡呈球形结构，结构比较均匀对称。连接微泡的单模光纤直径为 125 μm，经测量，图 2 中的微泡腔长度  $d$  和毛细管壁厚  $t$  分别约为 200 μm 和 5 μm。在进行传感器实验时，光束会从图 2(a)中的单模光纤端部射出，在光纤端部（图 2(a)中“1”处）、微泡端部内壁（图 2(a)中“2”处）、微泡端部外壁（图 2(a)中“3”处）处反射，形成干涉。为了探测相应的干涉光谱，本文采用由北京理工大学江毅教授研制的光纤 Fabry-Perot 传感器解调仪进行高灵敏度解调。图 3 是相应的干涉光谱，呈现出比较明显的光谱干涉特点。

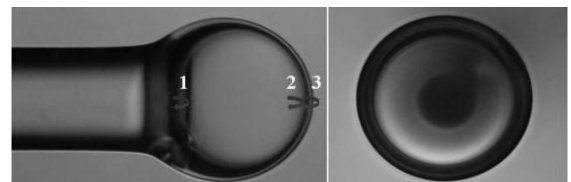


图 2 制备的薄膜结构光纤 Fabry-Perot 传感器

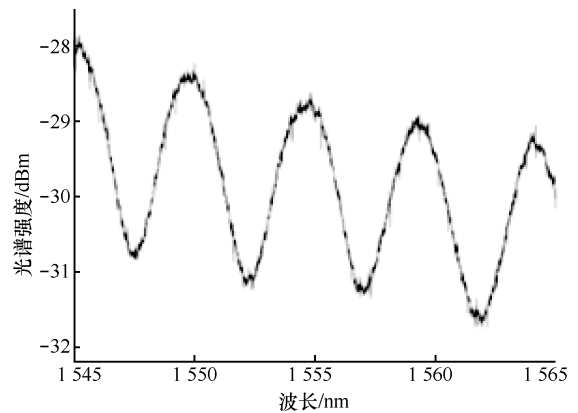


图 3 微泡结构的反射光谱

当应用于静冰压力监测时，微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器的微泡外部受到静冰压力作用会发生形变，导致光纤端部(图 2(a)中“1”处)、微泡端部内壁(图 2(a)中“2”处)之间的微泡腔长  $L$  产生变化，记为  $\Delta L$ ， $n$  为微泡空气的折射率， $\lambda$  为波长，相应的干涉光谱相位变化如式(1)所示。

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi n \Delta L}{\lambda} \quad (1)$$

当将光纤 Fabry-Perot 传感器应用于压力和应变时， $\Delta T$  是温度变化， $\Delta\Phi$  是相位变化，故由  $\Delta T$  引起的  $\Delta\Phi$  可以表示为

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} [(\alpha_t - \alpha_f)L\Delta T + \zeta_{air}L\Delta T] \quad (2)$$

其中,  $\alpha_t$  是石英毛细管的热膨胀系数;  $\zeta_{air}$  是空气的热光系数, 为  $0.1 \mu\epsilon/\text{C}$ ;  $\alpha_f$  是光纤的热膨胀系数。由于光纤和石英管均是用二氧化硅材料制成的, 系数  $\alpha_t$  与  $\alpha_f$  几乎没有差别, 同时  $\zeta_{air}$  可忽略不计。因此, 本文所涉及传感器对温度的交叉敏感可以控制到很低。当应用于静冰压力实验时, 静冰压力变化会导致微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器的微泡腔长  $L$  发生一定的形变。根据式(1)和式(2), 干涉谱相位和谱峰会发生相应移动<sup>[14]</sup>。如图 3 所示, 通过监测图 3 中的谱峰移动情况, 可计算出相应的光纤传感器应变量和静冰压力情况。

静冰压力测量一般是在比较恶劣的工作环境中进行的。由于冰内部形态的变化, 裸露在冰点的光纤很容易被损坏。考虑到光纤的使用寿命, 需要对微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器进行封装。在封装结构上, 封装材料可选择不锈钢管, 它的硬度和强度都比较大。在封装时, 首先将微泡结构光纤传感器悬空放入金属管中, 然后将 PDMS (poly dimethylsiloxane) 胶填充在金属管内, 同时用真空抽气泵将 PDMS 胶的气泡抽出, 保持管内被 PDMS 胶完全充满。这里的 PDMS 是聚二甲基硅氧烷, 是一种应用非常广泛的光纤传感器封装材料, 而且可以起到传感器灵敏度增强效果<sup>[15]</sup>。本文后面计算的传感器特性也包含了产生的增敏效果。金属管两端用 AB 胶固定, 以提高传感结构的稳定性。微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器封装方法, 如图 4 所示。

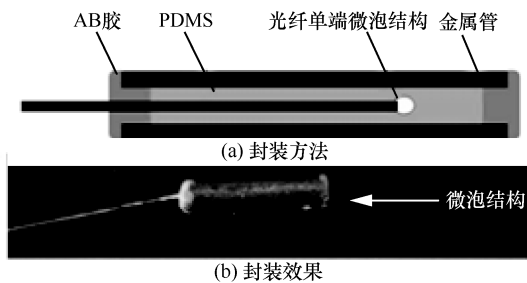


图 4 Fabry-Perot 传感器封装结构

在模拟静冰压力实验时, 将传感器放入一个装满水的固体容器中, 放入冰箱中冷冻。之后将完全冷冻的传感器拿出来, 在室温下进行融化。使用北京理工大学江毅教授研制的光纤 Fabry-Perot 传感器解调仪监测光纤 Fabry-Perot 传感器在水冷冻和冰融化过程中的频谱变化, 来研究光纤 Fabry-Perot 传感器对静冰压力的传感特性。同时在容器中传感器附近放置电子式温度传感器和应变传

感器, 用于标定冰内温度与应变值。

### 3 微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器的静冰压力实验结果及分析

图 5(a)给出了冷冻过程中微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器频谱随温度变化的干涉光谱。图 5(b)则分别显示了波长漂移与冰温、应变之间的关系。

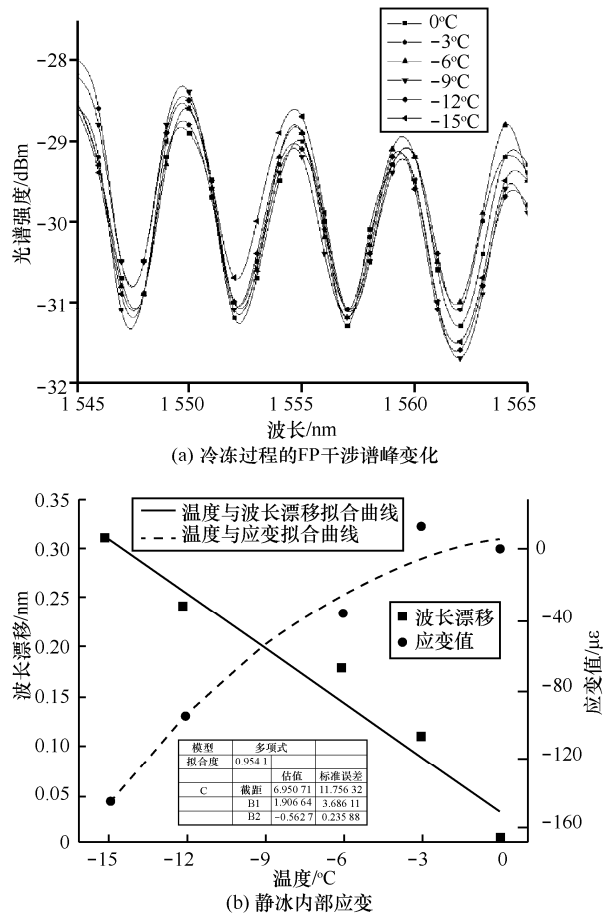


图 5 冷冻过程实验结果

由图 5(b)可知, 温度的零坐标在图的右下方, 应变值的零坐标在图的右上方, 分析应变时应从右到左, 从上到下。这里的应变是指压缩产生的应变, 为负值, 本文取绝对值加以分析。故冷冻时, 随着冰温度从  $0\text{C}$  降至  $-15\text{C}$  过程中, 相应的应变值呈指数增加趋势, 而且温度越低, 应变值就越大, 应变速率也逐渐增加。如图 5(b)可得到应变的拟合计算式为  $S=6.95071+1.09066T-0.5627T^2$ ,  $T$  代表温度。

图 6 则给出了静冰在融化过程中的谱峰及应变变化情况。图 6(a)为微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器在融化过程中随温度变化而发生波长漂移的反射光谱图。图 6(b)则显示了波长漂移与冰温和应变的

关系。如图 6(b)所示，可得到应变的拟合计算式为  $S=-0.7017 9+9.038 2T-0.395 5T^2$ 。对比图 5(b)和图 6(b)可以看出，冰冻过程和融化过程的静冰压力变化趋势基本相同，两者之间的偏差主要由测量过程中的不确定性造成，这些不确定性主要包括传感器封装与电子温度计、应变计之间的位置偏差、实验冰块的位置等，若进一步改进实验条件，两者会进一步吻合。

为了进一步解释上述实验结果。本文采用 ANSYS 有限元软件来进行光纤 Fabry-Perot 传感器结构的建模，模拟传感器在一定压力下的形变特性。每增加 1 MPa 的压强时，光纤端部微泡结构受到压力后产生的最大位移形变量约为 24.9 nm，如图 7(a)所示。图 7(b)也给出了微泡应变与外界压力之间的关系，纵坐标为压强，横坐标为应变值。随着压强的增加，其应变值也在不断增加。经过计算可知，直线的斜率  $K$  为  $6.67 \times 10^4$ ，也即为微泡结构的线性应力灵敏度为  $6.67 \times 10^4 \text{ MPa}/\mu\epsilon$ 。这也验证了上述实验结果的可靠性。

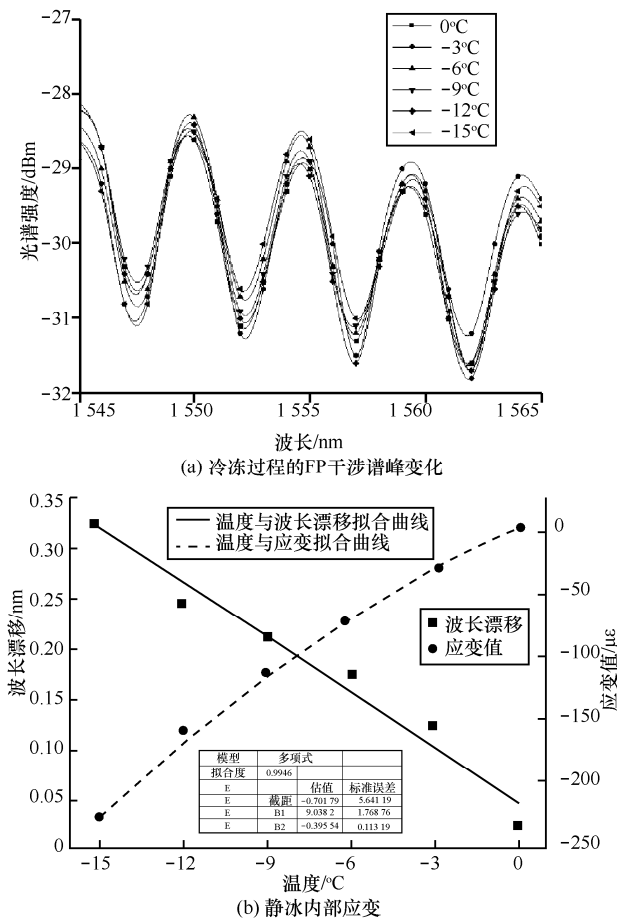


图 6 融化过程实验结果

传统的膜片式结构的静冰压力传感器则使用压力膜盒结构，当受静冰压力作用时，静冰压力传感器产生弹性变形的弹性平膜片会使静冰压力信号转变成弹性平膜片中心的微小位移信号，从而引起接收光纤束中信号光强的变化<sup>[5]</sup>。这类结构使用到的传感器探头由新型敏感元件（带有弹性平膜片的感应静冰压力的膜盒）和带有光源功率参考检测的光纤束组成，制作起来比较复杂，成本较高，且应力灵敏度只达到了  $2.74 \times 10^{-4} \text{ kPa}$ 。相比而言，本文的微泡结构光纤传感器制作起来比较方便，灵敏度也很高。

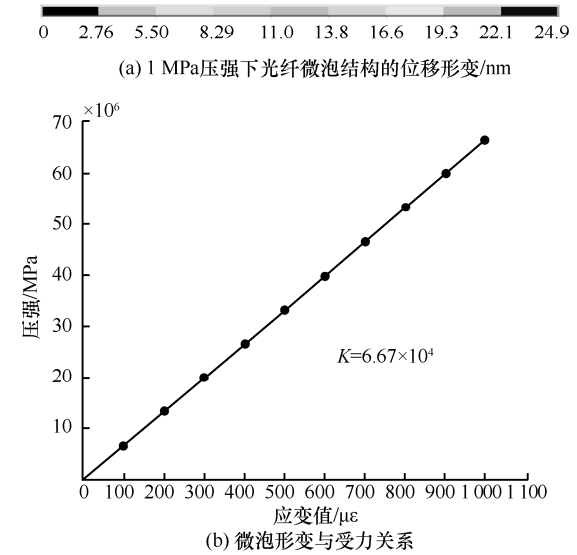
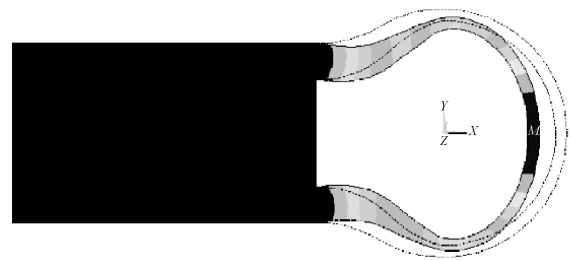


图 7 传感器特性仿真分析

### 4 结束语

静冰压力进行监测在海洋交通运输等领域具有重要应用价值。本文首次提出利用微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器来检测静冰压力特性。结合独特的膨胀辅助放电方法来制备灵敏度较高的微泡型光纤 Fabry-Perot 传感器，并详细讨论了微泡薄膜结构传感器制备过程、技术和关键难点。在此基础上针对监测对象特点对传感器进行了封装，

结合冰的冷冻过程和融化过程展开了实验研究,分析了传感器和静冰应变与温度之间的关系,发现随着温度的降低,冰内部的应变呈增加趋势,而且增加速率也在不断变大。最后结合 ANSYS 软件对实验结果进行了解释,且与压力膜盒式传感器进行对比。本文研究内容对冰力学特性研究具有一定的参考价值。

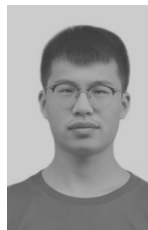
### 参考文献:

- [1] JIA Z G, REN L, LI DONG S, et al. Design and application of the ice force sensor based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 44(10): 2090-2095.
- [2] ZHOU Z, HUANG M H, HE J P, et al. Ice structure monitoring with an optical fiber sensing system[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 61(1): 1-5.
- [3] GE J F, YE L, ZOU J H. A novel fiber-optic ice sensor capable of identifying ice type accurately[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 175(4): 35-42.
- [4] ZOU J H, YE L, GE J F. Novel fiber optic sensor for ice type detection[J]. Measurement, 2013, 46(2): 881-886.
- [5] CUI L Q, LONG X, QIN J M. A bellow pressure fiber optic sensor for static ice pressure measurements[J]. Applied Geophysics, 2015, 12(2): 255-262.
- [6] MARCHENKO A, LISHMAN B. Thermal expansion measurements in fresh and saline ice using fiber optic strain gauges and multipoint temperature sensors based on bragg gratings[J]. Journal of Sensors, 2016(103): 1-13.
- [7] YANG Y, YANG L, ZHANG Z, et al. Fiber loop ring down for static ice pressure detection[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 36: 312-316.
- [8] MA J, JU J, JIN L, et al. Fiber-tip micro-cavity for temperature and transverse load sensing[J]. Optics Express, 2011, 19(3): 12418-12426.
- [9] JIANG X G, CHENG D. Low-cost fiber-tip fabry-perot interferometer and its application for transverse load sensing[J]. Program Electromagnetic Research, 2014, 48: 103-108.
- [10] DUAN D W, RAO Y J, HOU Y S. Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement[J]. Applied Optics, 2012, 51(8): 1033-1036.
- [11] LIU S, WANG Y, WANG G. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2121-2124.
- [12] LIU S, YANG K, WANG Y, et al. High-sensitivity strain sensor based on in-fiber rectangular air bubble[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 1-7.
- [13] LIU Y, WANG D N, CHEN W P. Crescent shaped Fabry-Perot fiber cavity for ultra-sensitive strain measurement[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 38390.
- [14] YAN L, GUI Z G, WANG G J, et al. A micro bubble structure based Fabry-Perot optical fiber strain sensor with high sensitivity and Low-Cost characters[J]. Sensors, 2017, 17(3): 555.
- [15] 杨睿. 新型微结构光纤传感器的制备及特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
YANG R. Preparation and characterization of new microstructure fiber optic sensor[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

### [作者简介]



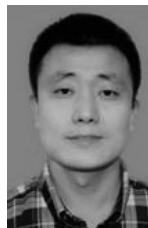
**黄梦醒** (1973- ), 男, 河南信阳人, 博士, 海南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为数据与知识工程、智能信息处理等。



**李宇航** (1994- ), 男, 河南漯河人, 海南大学硕士生, 主要研究方向为海洋信息探测与传输、海洋传感器与系统。



**王冠军** (1983- ), 男, 河南浙川人, 博士, 海南大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为海洋传感器与系统、光纤传感、集成光子学。



**刘建勋** (1982- ), 男, 山西大同人, 海南大学讲师, 主要研究方向为测试计量技术及仪器。



**严璐** (1992- ), 女, 浙江杭州人, 中北大学硕士生, 主要研究方向为光纤传感、光纤光学。



**王隆娟** (1976- ), 女, 海南东方人, 海南大学讲师, 主要研究方向为信息安全风险评估、网络攻防。