Design and Simulation of Sapphire High Temperature Optical Fiber Pressure Sensor*

HU Zhenpeng[1,2], *JIA Pinggang*[1,2], *QIAN Jiang*[1,2], *XIONG Jijun*[1,2*]

(1.*Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory*, *Taiyuan Shanxi* 030051, *China*;
2.*Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement*, *Ministry of Education*, *North University of China*, *Taiyuan Shanxi* 030051, *China*)

Abstract: In response to the pressure measurement requirements in high temperature environments, sapphire material is proposed to construct optical fiber high temperature Fabry-Perot pressure sensors which is suitable for special environment. Based on the pressure sensitivity principle of the circular diaphragm, the structure size of the sensor sensitive unit is designed, and the equivalent model of the sensitive unit is established through Comsol finite element software. The surface displacement and stress distribution on the sensitive diaphragm are simulated, which verifies the reliability of the theoretical derivation. At the same time, the temperature sensitivity effect of the sensor is analyzed, and the results show that as the temperature increases, the sensitivity of the sensor will increase, which will cause an error in the pressure measurement, about 1.51 kPa/℃, The results above provide an effective guidance for optimizing the structure and performance design of sapphire high temperature pressure sensor.

Key words: optical fiber pressure sensor; sapphire; circular diaphragm; high-temperature; finite element analysis
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.01.001

蓝宝石高温光纤压力传感器的设计与仿真*

胡振朋[1,2], 贾平岗[1,2], 钱 江[1,2], 熊继军[1,2*]

(1.中北大学电子测试技术国防重点实验室, 山西 太原 030051;
2.中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对高温环境下压力测量需求, 提出采用蓝宝石材料来构造适用于特殊环境下的光纤高温法珀压力传感器。基于圆形膜片压力敏感原理设计了传感器敏感单元结构尺寸, 通过 Comsol 有限元软件建立了敏感单元模型, 对敏感膜片的表面位移及应力分布情况进行了仿真, 验证了传感器设计的可靠性; 同时分析了传感器的温敏效应, 结果表明随温度升高, 传感器的灵敏度会增大, 会对压力测量产生误差, 约为 1.51kPa/℃, 上述结果为蓝宝石高温压力传感器的结构和性能优化设计提供了有效指导。

关键词: 光纤压力传感器; 蓝宝石; 圆形膜片; 高温; 有限元分析
中图分类号: TP212 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2021)01-0001-07

目前, 高温环境下压力的测量与监测在航空航天、石油勘采、军事装备、工业化工等领域都有着广泛的应用需求; 尤其在先进发动机领域, 对传感器的耐温强度、工作量程、测量精度、工作寿命等指标的要求也越来越高[1-4]。常见压阻式和压电式高温压力传感器由于存在输出信号线热传导损坏后续处理电路的问题, 一定程度上限制了其在高温领域的发展[5-8]。尽管无线无源电容式高温压力传感器解决了信号线热传导问题, 但如何克服高温导致的低耦合效率仍需要进一步研究[9]。

光纤式高温压力传感器具有体积小、质量轻、测量精度高、抗电磁干扰、耐高温潮湿等诸多优点, 在高温压力测量领域展现出巨大的应用潜力[10-13]。本文采用蓝宝石材料来设计压力敏感头, 其主要成

项目来源: 国家自然科学基金项目(51935011); 山西省自然科学基金项目(201901D111160); 山西省“1331 项目”重点学科建设项目
收稿日期: 2020-10-15 **修改日期**: 2020-12-01

份是 Al_2O_3,理论上可以承受 1 500 ℃以上的高温、同时能够抗酸碱腐蚀[14-17]。对于蓝宝石法珀压力传感器来说,从材料属性上看可以满足测量高温的要求,从法珀结构上看可以满足高精度的要求,所以说其在高温、高腐蚀性、强电磁的环境中会有较好的发展前景。

高温压力传感器的结构参数和敏感膜片材料的性能是影响传感器高温压力检测性能的重要影响因素。本文根据弹性力学理论推导出蓝宝石敏感膜片的形变分布,为设计蓝宝石高温法珀压力传感器提供了依据,并对其灵敏度、温漂效应等进行了一系列数值模拟和仿真,为研制蓝宝石高温法珀压力传感器提供了有力的理论依据。

1 传感器结构

蓝宝石高温法珀传感器结构如图 1 所示,传感器主要是由三层不同的蓝宝石晶片通过高温键合而成,第一层晶片表面均匀平整作为敏感膜片,第二层晶片表面带有刻蚀槽与第一层晶片形成法珀腔,第三层晶片带有直径为 1 mm 的通孔作为传感器基座,为后续光纤能够更准确垂直法珀端面提供固定作用。

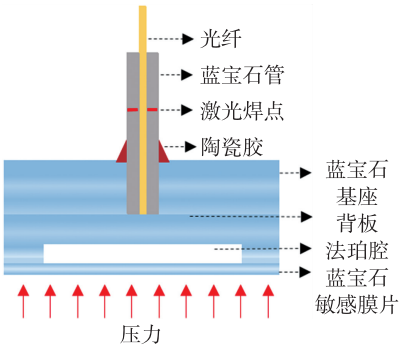


图 1 蓝宝石高温法珀传感器结构

在光纤的另一端接入光源时,光信号经过光纤传输到蓝宝石法珀压力传感器,由于法珀腔的存在产生干涉光信号返回到解调系统中,解调系统可根据干涉光信号解调出法珀腔长。当外界压力作用于传感器时,敏感膜片向内发生形变导致法珀腔长的改变,继而引发输出的干涉光信号发生改变,利用法珀腔长与干涉光信号特性的变化关系可以确定出外界压力。

2 压力敏感原理及结构参数设计

2.1 压力敏感原理

膜片压力敏感原理是基于弹性力学中的薄板小挠度形变理论,薄板指的是平板厚度 H 与平面最小尺寸 L 的比值在 0.012 5~0.200 0 之间的膜片;小挠度变形指外部均匀载荷 P 垂直作用于膜片中面时,膜片的最大形变量不超过其厚度的 1/5,最大形变发生在膜片中心处。针对圆形膜片,在受到外部均匀载荷 P 作用时,根据薄板小挠度变形理论,挠度 $y(r)$ 在极坐标系下的平衡方程可表示为:

$$\left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial y}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 y}{\partial \varphi^2}\right)\left(\frac{\partial^2 y}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial y}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 y}{\partial \varphi^2}\right)=\frac{12P(1-u^2)}{EH^3} \tag{1}$$

式中:$y(r)$ 表示半径为 r 位置处的挠度,P 是施加于膜片的载荷,φ 表示转角,u 是泊松比,E 是弹性模量,H、r 分别是敏感膜片的厚度和半径。由周边固支的圆形膜片满足的边界条件,即在膜片 $r=R$ 处,膜片的弹性形变为 0,则有:

$$y(r)|_{r=R}=0, y'(r)|_{r=R}=0 \tag{2}$$

圆形膜片在均匀载荷下,产生轴对称的挠度变化,且挠度值与转角变化率无关,由此可得:

$$y'(\varphi)=0, y''(\varphi)=0 \tag{3}$$

联立式(1)~式(3)可得圆形膜片的挠度公式为:

$$y(r)=\frac{3P(R^2-r^2)^2(1-u^2)}{16EH^3} \tag{4}$$

式中:R 为圆形膜片的有效半径,在圆形膜片中心处产生最大挠度 y_{max} 有:

$$y_{max}=\frac{3PR^4(1-u^2)}{16EH^3} \tag{5}$$

根据圆形膜片弹性薄板小挠度理论,可得到膜片表面上任意位置的径向应力 σ_r、切向应力 σ_t 与外部施加的均匀载荷 P 之间的关系:

$$\sigma_r=\frac{3P}{8H^2}[R^2(1+u)-r^2(3+u)] \tag{6}$$

$$\sigma_t=\frac{3P}{8H^2}[R^2(1+u)-r^2(1+3u)] \tag{7}$$

由式(6)(7)可得,圆形膜片表面的径向应力与切向应力均集中在膜片边缘处,径向应力最大值 $(\sigma_r)_{max}$ 为:

$$(\sigma_r)_{max}=\frac{3PR^2}{4H^2} \tag{8}$$

2.2 膜片结构参数设计

根据压力敏感膜片设计准则和薄板小挠度理论公式,对膜片厚度 H 和膜片有效半径 r 使用 MATLAB 进行参数仿真。将蓝宝石材料弹性模量 $E=380$ GPa,$u=0.27$,代入到挠度及径向最大应力推导公式中,分析当外部载荷 $P=1$ MPa 时,不同膜

片厚度和半径对其中心挠度和最大应力变化的影响。图 2 为膜片最大挠度与膜片结构参数的关系图，图 3 为膜片最大径向应力与膜结构参数的关系图。从图中可以看出，膜片的厚度越薄、有效半径越大，膜片的中心挠度越大，相应传感器的灵敏度越高，但同时膜片所产生的应力也会越大，为保证膜片安全使用，膜片的最大应力不能超过材料破坏应力的 1/5，所以传感器在量程一定时，膜片产生最大的应力会制约传感器的灵敏。

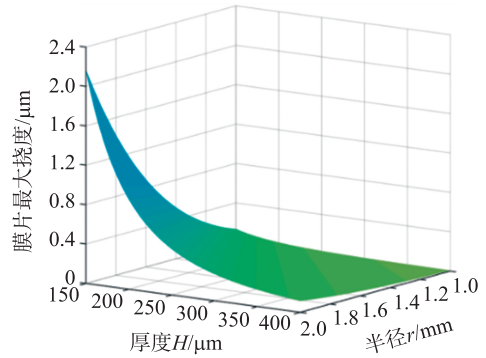


图 2　压力 1 MPa 时膜片中心挠度与膜片厚度及有效半径的变化关系

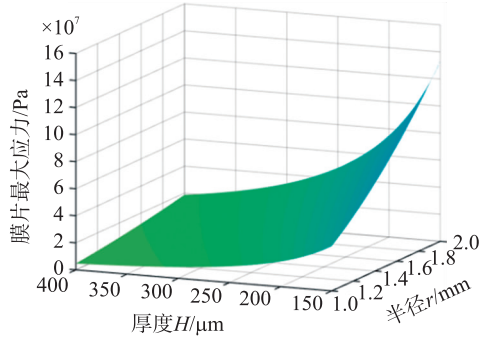


图 3　压力 1 MPa 时膜片最大径向应力与膜片厚度及有效半径的变化关系

在实际设计一款压力传感器时，需要对材料的选择、敏感膜片的参数、加工工艺、封装等进行综合考虑，而敏感膜片参数的设计是保证压力传感器高性能的关键，对压力传感器的测量量程、灵敏度、线性度起着决定性作用。从缩小传感器体积、提高传感器灵敏度的角度，本文选择边缘固支型的膜片，敏感膜片在设计时应准循以下三个原则：

①线性原则

线性原则是指敏感膜片在设计过程中，在传感器量程内应使敏感膜片处于弹性形变范围内，要求敏感膜片最大形变不超过膜片厚度的 1/5，那么有：

$$y_{\max}=\frac{3PR^4(1-u^2)}{16EH^3}<0.2H \tag{9}$$

将传感器最大量程设定为 10 MPa，蓝宝石材料弹性模量 $E=380$ GPa，$u=0.27$，代入上式中得：

$$R/H<14.5 \tag{10}$$

②抗过载能力

敏感膜片所能承受的最大应力值，是判断压力传感器抗过载能力的一个重要指标。当膜片表面产生的最大应力超过这个极限值时，材料会发生断裂导致传感器不能再正常工作。为满足传感器的抗过载要求，在传感器最大量程下，敏感膜片表面最大应力应不超过材料破坏应力的 1/5，那么有：

$$(\sigma_r)_{\max}=\frac{3PR^2}{4H^2}<0.2\sigma_{\max} \tag{11}$$

当传感器量程为 10 MPa 时，取蓝宝石材料断裂强度为 400 GPa，代入上式可得：

$$R/H<103.3 \tag{12}$$

③灵敏度原则

在蓝宝石高温法珀压力传感器中，外部载荷的作用导致膜片挠度变化从而改变法珀腔长，因此传感器的灵敏度 S 可以表示为：

$$S=\frac{\mathrm{d}y_{\max}}{\mathrm{d}P}=\frac{3R^4(1-u^2)}{16EH^3} \tag{13}$$

由式(13)可以看出，传感器的灵敏度与膜厚呈负相关，与膜片有效半径呈正相关。

基于上述膜片设计原则，考虑要将传感器做到微型化，同时兼顾加工工艺的难度，设计的传感器敏感膜片有效半径 $R=2$ mm，即法珀腔半径为 2 mm，第二层蓝宝石背板刻蚀深度为 20 μm，即传感器法珀腔原始腔长 $L=20$ μm，分析在 10 MPa 压力范围内不同膜片厚度传感器的法珀腔长随压力的变化，如图 4 所示。综合考虑，选择膜片厚度为 200 μm，理论仿真计算该参数的传感器灵敏度为 0.915 nm/kPa。

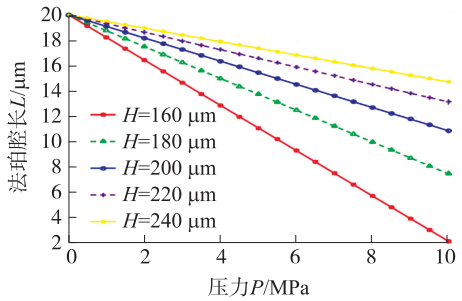


图 4　不同膜片厚度传感器法珀腔长随压力的变化

3　有限元仿真

3.1　常温下传感器敏感单元分析

利用 Comsol 软件对蓝宝石压力传感器进行有限元仿真，分析其敏感膜片的形变及应力分布情况，

验证理论推导设计的正确性和可行性。根据上文设计出的传感器结构参数,在 Comsol 中建立蓝宝石压力敏感单元的等效模型,具体参数如表 1,在建立的模型中添加蓝宝石材料相应参数,并对敏感单元圆柱面施加固定约束,在敏感膜片上施加 1 MPa 的均匀载荷,进行网格化处理如图 5 所示,添加相应的研究分析敏感膜片的表面位移和应力分布情况,结果如图 6、图 7 所示。

表 1 蓝宝石压力敏感单元的等效模型参数

单位:mm

敏感单元半径/mm	膜厚/mm	膜片有效半径/mm	法珀腔长/mm	背板厚度/mm	基座厚度/mm
4.0	0.2	2.0	0.02	0.5	2.0

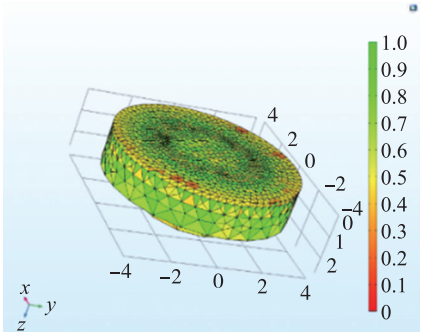
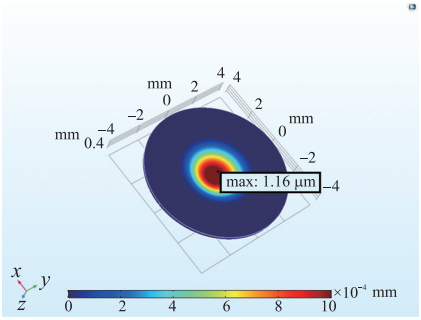
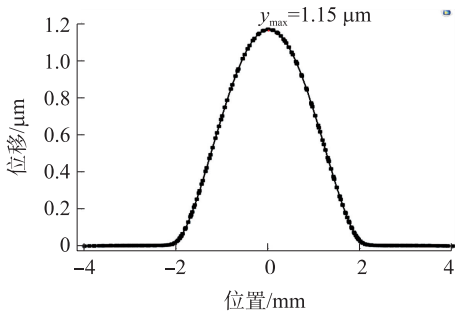


图 5 Comsol 建立的压力敏感单元等效模型网格化结果

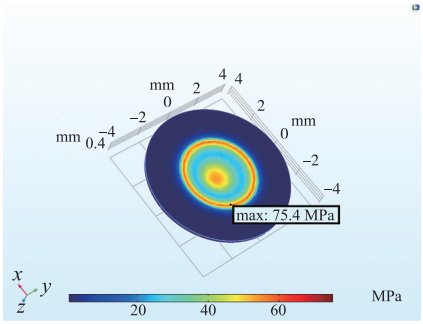


(a) 表面位移分布

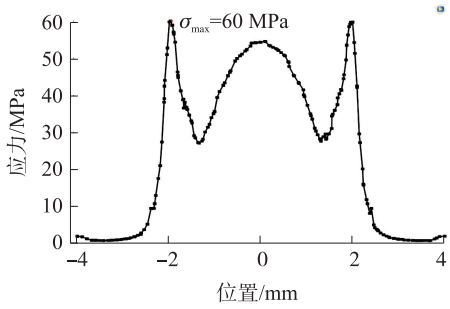


(b) 中心线上位移分布

图 6 施加 1 MPa 时压力敏感膜片 Comsol 仿真结果



(a) 表面应力分布



(b) 中心线上应力分布

图 7 施加 1 MPa 时压力敏感膜片 Comsol 仿真结果

从图 6 中敏感膜片表面及其中心线上位移分布的仿真结果分析可得,敏感膜片表面最大挠度变化发生在中心位置处,施加 1 MPa 压力时膜片最大挠度 Comsol 结果约为 1.15 μm,与理论计算最大挠度值 0.915 μm 相近,在中心线上位移变化量由中心到膜片边缘呈抛物线递减情况,与理论公式中的挠度中的变化随距离半径增大而减小保持一致。结合图 7 中敏感膜片表面及其中心线上应力分布的仿真结果可得,膜片表面应力最大值出现在法珀腔边缘处,即膜片有效半径最大位置处,敏感膜片中心线上的应力分布呈 W 型,当施加 1 MPa 压力时膜片最大应力 Comsol 结果约为 75.4 MPa,将仿真模型参数代入理论推导式(8)计算最大应力值为 75.0 MPa,与仿真结果近似。通过以上 Comsol 仿真结果验证了蓝宝石压力敏感膜片结构尺寸设计的合理性和可靠性。

3.2 高温下传感器敏感单元分析

压力传感器在实际应用中,我们都希望传感器能够做到只与压力有关而与温度等其他参数无关,但由于传感器敏感单元材料本身的温度特性,使得传感器的性能随温度发生改变,影响传感器在高温环境下测量的准确性。因此,对传感器温度特性的研究非常重要。对于蓝宝石高温法珀压力传感器而言,经过研究发现,温度效应主要是由敏感单元在高温环境下其材料属性改变以及结构发生热膨胀导致法珀原腔长漂移引起的。为了分析温度对传感器的

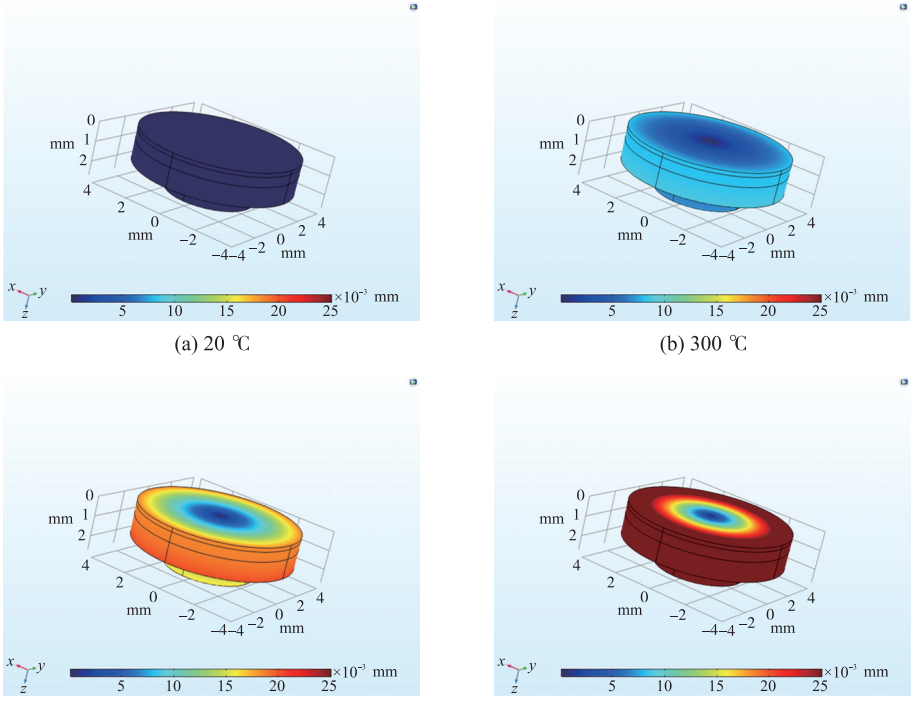
具体影响，对蓝宝石敏感单元模型进行相应的温度仿真。

针对蓝宝石材料在不同温度下弹性模量、泊松比的不同，以及高温下发生热膨胀的现象，使用 Comsol 对敏感单元做 20 ℃（室温）、200 ℃、400 ℃、600 ℃、800 ℃、1000 ℃的热耦合仿真分析。蓝宝石在不同温度下的特性参数如表 2 所示。

在 Comsol 中对敏感单元模型添加相应的温度场，分析敏感单元在不受外部均匀载荷情况下的热膨胀，20 ℃、300 ℃、600 ℃、1 000 ℃时敏感单元表面位移云图如图 8 所示；对不同温度下敏感单元的法珀腔长进行仿真计算，得到腔长的零点温度漂移曲线如图 9 所示，可以看出蓝宝石法珀压力传感器的零点漂移近似线性变化，随温度升高其初始腔长逐渐增大，从 20 ℃～1 000 ℃腔长从 20 μm 变化到 20.17 μm，变化了 117 nm，计算可得其零点温度漂移系数约为 0.17 nm/ ℃。

表 2　不同温度下蓝宝石的属性参数

温度 / ℃	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg/m^3)	热膨胀系数 /(10^{-6} K^{-1})
20	380	0.270	3 989	5.69
200	372	0.273	3 975	6.83
400	362	0.276	3 958	7.54
600	351	0.279	3 937	7.98
800	341	0.282	3 916	8.33
1 000	330	0.284	3 893	8.64



(a) 20 ℃　(b) 300 ℃

(c) 600 ℃　(d) 1 000 ℃

图 8　不同温度下传感器的表面位移分布云图

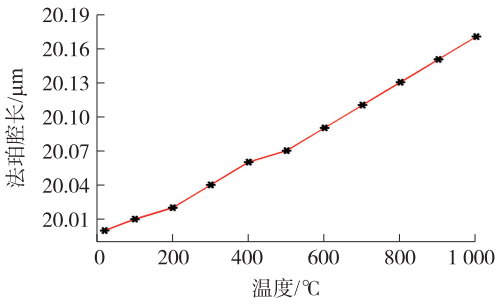


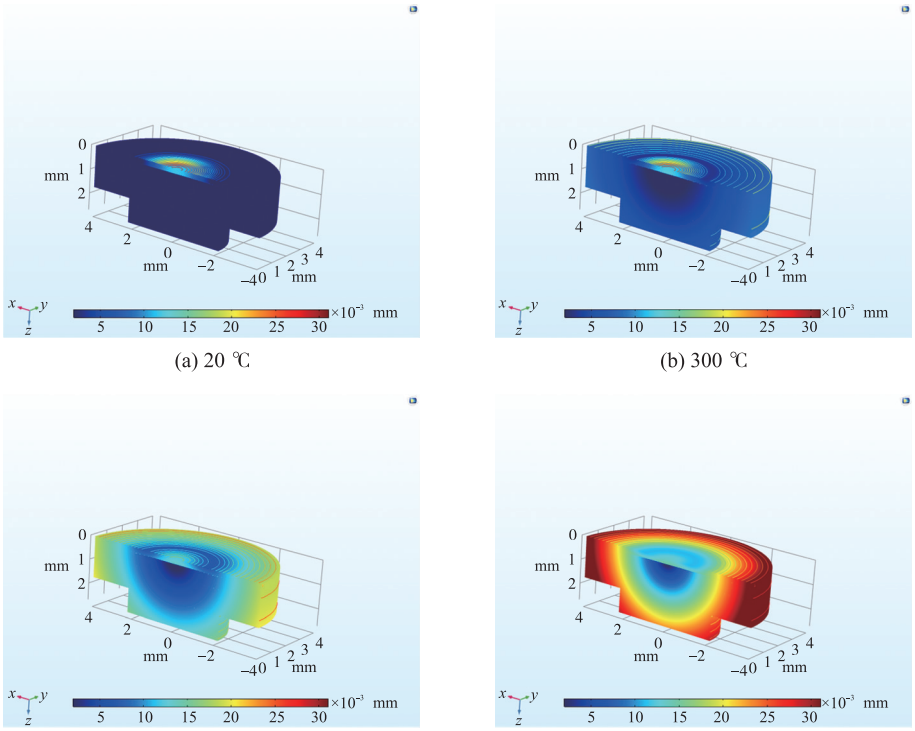
图 9　传感器初始腔长随温度变化关系

从表 2 可知蓝宝石材料在不同温度下，其弹性模量、泊松比等参数发生变化，那么在外部相同的均匀载荷下，敏感膜片的挠度也会发变化。在 Comsol 中对敏感单元施加 0～10 MPa 的压力，分析不同温度下敏感单元的变化情况，在不同温度下施加 10 MPa 时的敏感单元位移仿真云图如图 10 所示，对其各法珀腔长进行仿真计算，得到蓝宝石高温压力传感器在 20 ℃至 1 000 ℃温度下压力响应仿真曲线如图 11所示。

根据仿真数据，对高温压力传感器在不同温度下的灵敏度计算，结果如表 3 所示。

表 3　传感器在不同温度下的灵敏度仿真结果

温度/℃	灵敏度/(nm/kPa)	温度/℃	灵敏度/(nm/kPa)
20	1.15	600	1.24
200	1.18	800	1.28
400	1.21	1 000	1.32



(a) 20 ℃ (b) 300 ℃

(c) 600 ℃ (d) 1 000 ℃

图 10 不同温度下施加 10 MPa 时敏感单元体位移仿真云图

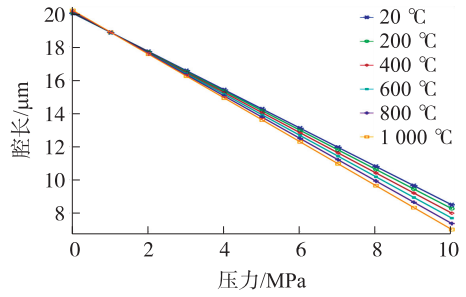


图 11 传感器在 20 ℃至 1 000 ℃温度下压力响应仿真曲线

根据结果绘制灵敏度温度变化关系如图 12 所示,通过仿真结果可得传感器的灵敏度随温度升高而增大,结合传感器常温压力灵敏度来说,传感器由温度引起的压力测量误差约为 1.51 kPa/℃,可以看出温度给蓝宝石压力传感器带来了不可忽视的误差,影响了压力测量的准确度,在实际设计中,需要进行近一步的温度补偿设计。

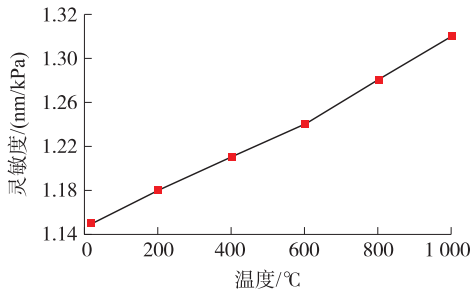


图 12 蓝宝石传感器灵敏度随温度变化关系

4 结论

本文通过理论计算结合 MATLAB 仿真分析得到合理的蓝宝石压力传感器结构尺寸。使用 Comsol 有限元分析软件建立蓝宝石压力传感器敏感单元模型,对膜片位移及应力分布情况进行了仿真分析,验证了理论推导的正确性;同时对传感器敏感单元进行了温敏效应仿真分析,结果表明敏感单元在温度由 20 ℃变化至 1 000 ℃,其腔长零点温度漂移系数约为 0.17 nm/ ℃,灵敏度由 1.15 nm/kPa 变化至 1.32 nm/kPa,由温度引起的压力测量误差约为 1.51 kPa/℃,这仿真结果为今后蓝宝石高温压力传感器的设计与应用提供了参考,具有很好的实际意义。

参考文献:

[1] 何文涛,李艳华,邹江波,等. 高温压力传感器的研究现状与发展趋势[J]. 遥测遥控,2016,37(6):61-71.

[2] 黄漫国,邹兴,郭占社,等. 高温大压力传感器研究现状与发展趋势[J]. 测控技术,2020,39(4):1-5,32.

[3] 曹群,贾平岗,熊继军,等. MEMS 光纤法珀压力传感器的设计及解调方法实现[J]. 传感技术学报,2015,28(8):1141-1148.

[4] 吕涛. 非本征法布里-珀罗腔光纤压力传感器研究进展[J]. 仪表技术与传感器,2015(7):1-6.

[5] 李丹丹,梁庭,李赛男,等. 基于 MEMS 工艺的 SOI 高温压力传感器设计[J]. 传感技术学报,2015,28(9):1315-1320.

[6] 金善龙,范桂芬,吕文中,等. $BiScO_3$-$PbTiO_3$ 基高温压电陶瓷研究进展[J]. 电子元件与材料,2017,36(1):8-13.

[7] 张瑞,梁庭,熊继军,等. 一种大量程 SOI 压阻式压力传感器[J]. 传感技术学报,2015,28(8):1125-1130.
[8] Gridchin V A, Lubimsky V M, Sarina M P. Piezoresistive Properties of Polysilicon Films[J]. Sensors and Actuators A (Physical),1995,49(1-2):67-72.
[9] Xiong J, Li Y, Hong Y, et al. Wireless LTCC-Based Capacitive Pressure Sensor for Harsh Environment[J]. Sensors and Actuators A Physical,2013,197(8):30-37.
[10] 张硕,江毅. 一种光纤高温压力传感器[J]. 仪表技术与传感器,2018(1):10-12.
[11] 陈伟民,雷小华,张伟,等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. 光学学报,2018,38(3):139-152.
[12] 江毅,马维一,陈淑芬,等. 微纳光纤高温压力传感器[J]. 光学技术,2017,43(1):12-15.
[13] 江小峰,林春,谢海鹤. MEMS F-P 干涉型压力传感器[J]. 红外与激光工程,2014,43(7):2257-2262.
[14] 施纯俊,张连翰,洪佳琪,等. 蓝宝石晶体的热学性能研究[J]. 人工晶体学报,2015,44(10):2652-2657.
[15] 张朝阳,朱永,梁波. 蓝宝石晶体高温传感技术研究[J]. 传感技术学报,2009,22(9):1255-1260.
[16] Mills D A, Alexander D, Subhash G, et al. Development of a Sapphire Optical Pressure Sensor for High-Temperature Applications[C]//Spie Sensing Technology+Applications.2014.
[17] Li W, Liang T, Jia P, et al. Fiber-Optic Fabry-Perot Pressure Sensor Based on Sapphire Direct Bonding for High-Temperature Applications[J]. Applied Optics,2019,58(7):1662.

胡振朋(1999—),男,硕士生,主要从事光纤传感,高温环境下测试技术研究;

熊继军(1971—),男,现任中北大学校长,中北大学教授以及博士生导师,主要研究方向为无线无源微纳传感器以及系统集成技术、高温压力传感器等方面,xiongjijun@ nuc.edu.cn。