文章编号:1002—2082(2005)03—0016—04

光纤Bragg光栅压力传感机理研究

李智忠,杨华勇,刘 阳,周伟林,胡永明
(国防科技大学 理学院,湖南 长沙 410073)

摘 要: 对光纤Bragg光栅的压力传感机理进行了理论研究。分析了引起光纤光栅中心波长偏移的各种物理效应,并对几种不同形式压力下各种物理效应所引起的灵敏度系数进行了计算。计算结果表明,纵向和横向压力灵敏度系数相反,屏蔽一个方向可获得较大的压力传感灵敏度;波导效应所引起的应变灵敏度系数都比弹光效应小几个数量级,因此可以忽略。并首次提出在不同方向的压力作用下,弹光效应对应变灵敏度具有不同的贡献。

关键词: 光纤Bragg光栅;压力传感;机理
中图分类号:TN25 **文献标识码:**A

Research on the Pressure Sensing Mechanism of Fiber Bragg Grating

LI Zhi-zhong,YANG Hua-yong,LIU Yang,ZHOU Wei-lin,HU Yong-ming
(College of Science,National University of Defense Technology, Changsha 410073,China)

Abstract: The pressure sensing mechanism of fiber Bragg grating has been researched. Various physical effects that induce the center wavelength of the fiber Bragg grating to shift are discussed and the sensitivity coefficients of different physical effects under different types of pressure are calculated. The calculation results show that the pressure sensing coefficients under the axial and the transverse pressures are opposite in sign, and the pressure sensitivity can be increased through shielding either of them. The strain sensitivity induced by the waveguide effect is several orders of magnitude smaller than that induced by the strain-optic effect, so it can be neglected. The conclusion that the strain-optic effect has different contributes to the stress sensitivity under pressure in different directions is also drawn for the first time.

Keywords: fiber Bragg grating; pressure sensing; mechanism

引言

1978年,K. O. Hill等人[1]首次发现掺锗光纤的光敏特性,并用侧向纵波写入法制成了世界上第一个光纤光栅。此后,Meltz又于1989年发明了紫外双光束全息曝光法写入技术[2],从而在世界范围内掀起了光纤光栅的研究高潮。

目前,众多的应用主要利用了光纤光栅的压力敏感特性。然而,对于其工作机理进行详细研究的报道并不多。由于对影响压力传感的因素缺乏了解,必然导致许多应用上的误区。因此本文主要以光纤Bragg光栅为例,对光纤光栅的压力传感原理进行研究。

1 光纤光栅压力传感机理

根据耦合模理论可知,光纤Bragg光栅(FBG)中心反射波长为

$$\lambda_B = 2n_{\mathrm{eff}}\Lambda \tag{1}$$

式中,n_{eff}为导模的有效折射率;Λ为光栅的周期。

对(1)式进行变分可得:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_B &= 2\Delta n_{\mathrm{eff}}\Lambda + 2n_{\mathrm{eff}}\Delta\Lambda \\ &= 2\Lambda\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial L}\Delta L + 2\Lambda\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial D}\Delta D + 2n_{\mathrm{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial L}\Delta L\end{aligned} \tag{2}$$

式中,ΔL代表光纤的纵向伸缩量;ΔD代表由于压力所引起的光纤直径变化;$\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial L}$表示弹光效应;

收稿日期:2004—02—05; 修回日期:2004—06—16
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:60377029)
作者简介:李智忠(1979—),男,山东潍坊人,国防科技大学理学院在读博士生,主要从事光纤信息技术和光纤光栅传感技术研究。

$\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial D}$表示波导效应；$\frac{\partial \Lambda}{\partial L}$表示压力所起的纵向弹性形变效应。光纤光栅的压力传感就是由以上各种效应所引起的。

1.1 弹光效应

根据(2)式可知,弹光效应所引起的波长偏移为

$$(\Delta\lambda_B)_1=2\Lambda(\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial L}\Delta L)=2(\Delta n_{\mathrm{eff}})_1\Lambda \tag{3}$$

利用材料的各向同性和弹光性质：

$$\Delta(\frac{1}{n_{\mathrm{eff}}^2})_1=\Delta(\frac{1}{n^2})_i=\sum_{j=1}^{6}P_{ij}\varepsilon_j \tag{4}$$

式中，P_{ij}为材料的弹光系数。

假设光纤内部不存在剪切应变,即$\varepsilon_4=\varepsilon_5=\varepsilon_6=0$。因此,我们只需考虑$i,j=1,2,3$的情况,同时由光纤内部性质可得弹光系数矩阵[3]：

$$P_{ij}=\begin{bmatrix}p_{11} & p_{12} & p_{12}\\ p_{12} & p_{11} & p_{12}\\ p_{12} & p_{12} & p_{11}\end{bmatrix} \tag{5}$$

则根据(3),(4),(5)式,可得弹光效应所引起的波长相对偏移：

$$(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B})_1=\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}(p_{11}\varepsilon_{rr}+p_{12}\varepsilon_{\theta\theta}+p_{12}\varepsilon_{zz}) \tag{6}$$

式中，$\varepsilon_{rr},\varepsilon_{\theta\theta},\varepsilon_{zz}$分别表示径向、切向及纵向应变。

1.2 波导效应

根据(2)式可知,波导效应引起的波长偏移为

$$(\Delta\lambda_B)_2=2\Lambda(\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial D}\Delta D) \tag{7}$$

定义$k_{wg}=\frac{\partial n_{\mathrm{eff}}}{\partial D}$,则$(\Delta\lambda_B)_2=2\Lambda\cdot k_{wg}\cdot D\varepsilon_{rr}$。

因此,波导效应引起的波长相对偏移为

$$(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B})_2=\frac{k_{wg}}{n_{\mathrm{eff}}}D\varepsilon_{rr} \tag{8}$$

1.3 纵向弹性形变

根据(2)式可知,纵向弹性形变所引起的波长偏移为

$$(\Delta\lambda_B)=2n_{\mathrm{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial L}\Delta L \tag{9}$$

利用光纤在均匀拉伸下满足条件:$\Delta L/L=\Delta\Lambda/\Lambda$,并根据纵向应变表达式$\varepsilon_{zz}=\Delta L/L$,则可得:$(\Delta\lambda_B)_3=2n_{\mathrm{eff}}\Lambda\varepsilon_{zz}$。

因此,纵向弹性形变所引起的波长相对偏移为

$$(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B})_3=\varepsilon_{zz} \tag{10}$$

1.4 综合效果

综合考虑各种效应,可得总的波长相对偏移：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}=\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}(p_{11}\varepsilon_{rr}+p_{12}\varepsilon_{\theta\theta}+p_{12}\varepsilon_{zz})+\frac{k_{wg}}{n_{\mathrm{eff}}}D\varepsilon_{rr}+\varepsilon_{zz} \tag{11}$$

2 不同压力作用的讨论

2.1 纵(轴)向作用

纵向作用对应的光纤内部应力状态为$\sigma_{zz}=-P,\sigma_{rr}=\sigma_{\theta\theta}=0$。根据虎克定理[4],可求各方向应变：

$$\varepsilon_{rr}=\varepsilon_{\theta\theta}=vP/E$$

$$\varepsilon_{zz}=-P/E$$

由此可知：

$$\varepsilon_{rr}=\varepsilon_{\theta\theta}=-v\varepsilon_{zz} \tag{12}$$

将(12)式代入(6)式,可得弹光效应引起的波长相对偏移：

$$(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B})_1=p_{z1}\varepsilon_{zz} \tag{13}$$

式中，$p_{z1}=-\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}[-(p_{11}+p_{12})v+p_{12}]$为弹光效应所引起的纵向应变灵敏度系数。

同理可得,波导效应引起的波长相对偏移为

$$(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B})_2=-\frac{k_{wg}}{n_{\mathrm{eff}}}av\varepsilon_{zz}=p_{z2}\varepsilon_{zz} \tag{14}$$

式中，p_{z2}为波导效应所引起的纵向应变灵敏度系数。

因此,光纤光栅的总波长相对偏移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}=(1+p_{z1}+p_{z2})\varepsilon_{zz} \tag{15}$$

根据纯熔融石英的参数[3]:$p_{11}=0.121,p_{12}=0.270,v=0.170,n_{\mathrm{eff}}=1.456,E=7.0\times10^{10}\ \mathrm{N/m^2}$(后文中的计算均基于以上参数),可求得$p_{z1}=-0.216$。在单模光纤的条件下,根据计算[4],可知$p_{z2}$约为$-0.000\ 8$(芯径$D$为$2\ \mu\mathrm{m}$，$NA=0.17$),比$p_{z1}$小4个数量级,因此可忽略,即由波导效应引起的波长偏移可以忽略。

因此,在纵向应力作用下,光纤光栅的波长相对偏移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}=\{-\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}[-(p_{11}+p_{12})v+p_{12}]+1\}\varepsilon_{zz}$$
$$=k_{\varepsilon z}\varepsilon_{zz}=-\{-\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}[-(p_{11}+p_{12})v+p_{12}]+1\}\frac{P}{E}=K_{pz}P \tag{16}$$

式中,$k_{\varepsilon z}$为纵向应变灵敏度系数,约为0.784;k_{pz}为纵向压力灵敏度系数,约为-11.2×10^{-6} $\mathrm{Mp_a}^{-1}$。

2.2 横(径)向作用

横向作用对应的光纤内部应力状态为

$$\sigma_{rr}=\sigma_{\theta\theta}=-P$$
$$\sigma_{zz}=0$$

应变张量为

$$\varepsilon_{rr}=\varepsilon_{\theta\theta}=-(1-v)P/E$$
$$\varepsilon_{zz}=2vP/E$$

则弹光效应引起的波长相对变化为

$$(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B})_1=\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}[-(p_{11}+p_{12})\frac{1-v}{2v}+p_{12}]\varepsilon_{zz}=P_{rl}\varepsilon_{zz} \tag{17}$$

式中,p_{rl}为弹光效应所引起的横向应变灵敏度系数,经计算可知,p_{rl}约为0.726。

此时波导效应所引起的横向应变灵敏度系数$p_{r2}=-\frac{k_{wg}}{n_{\mathrm{eff}}}D\frac{1-v}{2v}$,经计算可知$p_{rl}$约为$-0.004$,依然可以忽略。

因此,在横向应力作用下,光纤光栅总的波长相对偏移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}=\{\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}[-(p_{11}+p_{12})\frac{1-v}{2v}+p_{12}]+1\}\varepsilon_{zz}=k_{\varepsilon r}\varepsilon_{zz}$$
$$=\{\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}[(p_{11}+p_{12})\frac{1-v}{2v}-p_{12}]+1\}\cdot 2v\frac{P}{E}=k_{pr}P \tag{18}$$

式中,$k_{\varepsilon r}$为光纤光栅横向应变灵敏度系数,通过计算约为1.726;k_{pr}为横向压力灵敏度系数,约为8.38×10^{-6} MPa^{-1}。

2.3 两者同时作用

根据前面分析可以看出,在不同方向应力作用下,应变不成线性关系,因此必须将应力分解为纵向和横向应力,分别求出它们各自所引起的应变(总体应变灵敏度是两个方向应变灵敏度之和)。

有一种特殊情况,即我们经常遇到的各个方向应力相同:应力张量为$\sigma_{rr}=\sigma_{\theta\theta}=\sigma_{zz}-P$;则应变张量变为$\varepsilon_{rr}=\varepsilon_{\theta\theta}=\varepsilon_{zz}=(2v-1)P/E$。将其代入(11)式,忽略波导效应,可得总的波长相对偏移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}=[-\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}(p_{11}+2p_{12})+1]\varepsilon_{zz}=k_\varepsilon\varepsilon_{zz}$$
$$=[-\frac{n_{\mathrm{eff}}^2}{2}(p_{11}+2p_{12})+1]\cdot(2v-1)\frac{P}{E}=k_pP \tag{19}$$

式中,k_ε为应变灵敏度系数,约为0.2994;k_p为压力灵敏度系数,约为-2.82×10^{-6} MPa^{-1}。

值得注意的是,灵敏度系数为正值表示在施加压力时,中心波长向长波段方向移动;为负值时则表示中心波长向短波方向移动。

3 比较分析

3.1 不同压力作用比较

为了便于比较分析,我们将不同方向压力下的灵敏度系数进行归纳,如表1所列。

表1 不同方向压力下的灵敏度系数

Table 1 The sensitivity under different pressures

	应变灵敏度系数	压力灵敏度系数
纵向	$k_{\varepsilon z}=0.784$	$k_{pz}=-11.2\times10^{-6}$
横向	$k_{\varepsilon r}=1.726$	$k_{pr}=8.38\times10^{-6}$
两者	$k_\varepsilon=0.2994$	$k_p=-2.82\times10^{-6}$

由表1可以看出,虽然横向压力下的应变灵敏度系数比纵向大,但是压力灵敏度系数却小于纵向,即在相同压力时,纵向压力作用下的波长偏移较大。因此,在进行压力传感时,一般利用纵向进行传感。

同时也看到,这两个方向的压力灵敏度系数符号相反,表示施加压力时,中心波长分别向短波和长波方向移动。所以,在两个方向都有压力时,得出的压力灵敏度系数较小,仅为-2.82×10^{-6} MPa^{-1}。因此,在传感时,屏蔽一个方向的压力将会得到更大的灵敏度系数。这就是许多压力增敏措施的出发点。例如,在金属罐增敏方案[5]中,屏蔽横向压力,灵敏度系数比裸光纤光栅提高了1 722倍。

3.2 不同物理效应比较

对不同压力形式下各种物理效应所引起的应变灵敏度系数进行归纳,如表2所列。

表2　各种物理效应所引起的应变灵敏度系数

Table 2　The strain sensitivity caused by different effects

	纵向压力	横向压力
弹光效应	$p_{z1}=-0.216$	$p_{r1}=0.726$
波导效应	$p_{z2}=-0.0008$	$p_{r2}=-0.004$
弹性形变	$p_{z3}=1$	$p_{r3}=1$
总　体	$k_{\varepsilon z}=0.784$	$k_{\varepsilon r}=1.726$

由表2可以看出,无论在纵向或者横向压力下,波导效应所引起的应变灵敏度系数都比弹光效应所引起的应变灵敏度系数小几个数量级,因此由波导效应引起的波长偏移可以忽略。

在纵向压力的情况下,弹光效应所引起的应变灵敏度系数p_{z1}与波导效应所引起的应变灵敏度系数p_{z2}符号相同,都为负值;而弹性形变所引起的应变灵敏度系数p_{z3}却为正值;同时总的灵敏度系数$k_{\varepsilon z}$为正值。因此,在纵向压力作用下,弹光效应和波导效应都降低了光纤光栅压力传感的灵敏度。

同理,我们可以看出,在横向压力的情况下,弹光效应所引起的应变灵敏度系数p_{r1}为正值,而波导效应所引起的应变灵敏度系数p_{r2}为负值;同时总的灵敏度系数$k_{\varepsilon r}$为正值。因此,在横向压力下波导效应仍然降低了光纤光栅压力传感的灵敏度,而弹光效应却增加了传感的灵敏度。

4　结论

本文对光纤Bragg光栅压力传感机理进行了详细的研究,并对几种不同形式压力下各种物理效应所引起的灵敏度系数进行了计算。根据计算结果,进行了分析比较,得出了纵向和横向压力灵敏度系数相反,因此屏蔽一个方向可获得较大的压力传感灵敏度;波导效应所引起的应变灵敏度系数都比弹光效应小几个数量级,因此可以忽略;在不同方向的压力作用下,弹光效应对应变灵敏度具有不同的贡献。

值得注意的是,本文中的数值都是通过熔融石英材料参数进行计算的,对于不同材料和结构性能的光纤光栅,这些参数不尽相同。本文在建立传感模型时,进行了一系列理想情况下的假设,虽然比较接近实际,但是总存在一定的误差,因此理论计算值和实际测量值之间存在一定的差异。例如,各个方向压力相同时,压力灵敏度系数的理论计算值是$-2.82\times10^{-6}\ \mathrm{MPa}^{-1}$,而实际测量值仅有$-1.98\times10^{-6}\ \mathrm{MPa}^{-1}$[6]。另外,温度和压力的交叉敏感,也是导致两者存在差异的因素[6]。

参考文献:

[1] K O Hill, Y Fujii, D C Johnson, *et al*. Photosensitivity in optical fiber waveguide: Application to reflection filter fabrication[J]. Appl Phys Lett, 1978, 32(10): 647－649.

[2] G Meltz, W W Morey, W H Glenn. Formation of Bragg grating in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Opt Lett, 1989, 14(15): 823－825.

[3] G B Hocker. Fiber-optic sensing of pressure and temperature[J]. Appl Opt, 1979, 18(9): 1445－1448.

[4] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 198－202.

[5] 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研究[J]. 光学学报, 2002, 22(1): 89－91.

[6] M G Xu, L Reekie, Y T Chow, *et al*. Optical in-fiber grating high pressure sensor[J]. Electron Lett, 1993, 29(4): 398－399.