

文章编号: 0253-2239(2006)01-0019-6

偏振光干涉法消除光纤光栅解调中的交叉敏感现象

李 卫 张小频 张 民 叶培大

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要: 提出一种偏振光干涉的光纤光栅应变测量方法,该方法能解决光纤光栅应变和温度测量时的交叉敏感问题。对于钽酸钇晶体偏振光干涉仪,如果选择两个能使干涉仪产生 180° 相位差的不同中心波长的光纤光栅,一个用于应变测量,一个用于补偿温度,就能很好地解决光纤光栅应变测量时的温度交叉敏感问题。分析了构成偏振光干涉仪的晶体的厚度对应变偏差的影响。理论计算和试验结果显示,当晶体厚度为 0.5 mm 时温度对应变测量的交叉敏感现象被压缩到了 1.6%,相当于 $0.13 \mu\epsilon/\text{C}$ 。进一步的仿真分析发现当晶体厚度为 0.1 mm 时交叉敏感现象将被压缩到 0.08%,相当于 $0.0067 \mu\epsilon/\text{C}$ 。小的晶体厚度有利于减小交叉敏感现象,但小厚度的晶体加工困难,为此分析了双晶体结构的方案。

关键词: 光纤光学; 光纤传感; 应变测量; 偏振光干涉; 交叉敏感

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Reduction of Cross Sensitivity in Fiber Bragg Grating Sensor Based on the Principle of Polarized-Light Interference

Li Wei Zhang Xiaopin Zhang Min Ye Peida

(Optical Communications Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: An approach of fiber grating strain demodulation based on the principle of polarized-light interference is introduced, which can solve the so called cross sensitivity in the fiber Bragg grating sensor. To the yttrium vanadate (YVO_4) crystal polarized-light interferometer, by choosing two different fiber Bragg gratings with a π rad phase difference, one as a strain sensor and the other for temperature compensating. The cross sensitivity can be conquered. The analysis of the strain demodulation resolution shows that with the decreasing of the crystal thickness the resolution increases. The experiment shows that when the thickness of the YVO_4 crystal is 0.5mm the effect of cross sensitivity is reduced to $0.13 \mu\epsilon/\text{C}$ which is 1.6% of the effect with only one fiber Bragg grating for strain measure and that when the thickness is 0.1 mm the cross sensitivity is reduced to $0.0067 \mu\epsilon/\text{C}$ which is less than 0.08%. Reduced thickness of crystal benefits the resolution of strain measure but the machining of the small thickness crystal is difficult, and to solve this problem a new scheme of polarized-light interferometer with the structure of double layers crystal is analysed in the end.

Key words: fiber optics; fiber sensor; strain measurement; polarized-light interference; cross sensitivity

1 引 言

光纤光栅(FBG)在传感器领域中的应用近年来引起了人们极大的兴趣,这种用紫外光在光敏光纤纤芯中制作的光栅具有易于管线连接、低损耗、光谱特性好、可靠性高、不受光源功率波动及连接或耦合损耗的影响等特点。因此,作为传感元件它具有其他传感器无可比拟的优点。影响这一技术实用化的

一个关键问题是所谓光纤光栅应变与温度的交叉敏感问题。自 1993 年以来,国外就已经开始了对应变、温度同时测量光纤光栅传感器的研究,现有的已提出来的各种解决方案大多基于三种思想:1) 双波长矩阵运算法;2) 双参量矩阵运算法;3) 应变(温度)补偿法^[1~3]。近年来国内研究人员在这方面也作了大量的研究工作^[4~8]。本文在文献[9]提出的

作者简介: 李 卫(1970~),男,河北青县人,博士研究生,主要研究方向为光纤传感技术以及宽带接入网技术。

E-mail: herbicade@163.com

收稿日期: 2005-02-21; 收到修改稿日期: 2005-06-10

双折射晶体钽酸钷晶体(YVO₄)所构成偏振光干涉仪的基础上提出了一种解决光纤光栅的交叉敏感问题的新的解决方法。此方法的主要特点在于:交叉敏感问题的解决是在干涉仪内部自动解决的,不需要任何附加的处理。因此处理起来更加简单,并且有更高的精度。

2 偏振光干涉法消除交叉敏感原理

2.1 光纤光栅的应变和温度的交叉敏感

根据光纤耦合模理论,当宽带光在光纤光栅中传输时,产生模式耦合,满足布拉格条件的反射光波长为

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

式中 Λ 为光栅周期, n_{eff} 为有效折射率。当 Λ 和 n_{eff} 受外界条件作用产生变化 $\Delta\Lambda$ 和 Δn_{eff} 时,导致符合布拉格条件的反射波长发生移位 $\Delta\lambda_B$ 。下式是有关交叉敏感的表达式^[5,10]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\alpha + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \right) \Delta T + \left[1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} (P_{11} - \nu_2 P_{22} - \nu_3 P_{33}) \right] \epsilon = (\alpha + \xi) \Delta T + K_\epsilon \epsilon, \quad (2)$$

式中 P_{mm} 为材料的光弹系数, ν_2, ν_3 为泊松比, α 为热膨胀系数, ξ 为热光系数。且有: $\alpha + \xi = 6.7 \times 10^{-6}$, $K_\epsilon = 0.78 \times 10^{-6}$ 由(2)式可知,当知道波长的变化时,只有同时知道温度 ΔT 才能求得应变 ϵ 。这就是温度与应变的交叉敏感问题。

2.2 双折射晶体钽酸钷偏振光干涉仪

偏振光干涉光纤光栅解调的基本思想,是利用双折射晶体快轴、慢轴的折射率差 $n_e - n_o$ 来构成干涉光路。与Kersey等人发展的非平衡马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪光纤光栅解调法相比本方案有下述主要特点:1)不是利用光路长度差而是利用光路折射率差来构成干涉光路;2)必须利用偏振光的干涉原理来实现干涉;3)本干涉解调法基本不受外界干扰的影响,因而能实现高的测量精度。其原理图如图1所示,入射光经起偏器后入射到光轴与偏振方

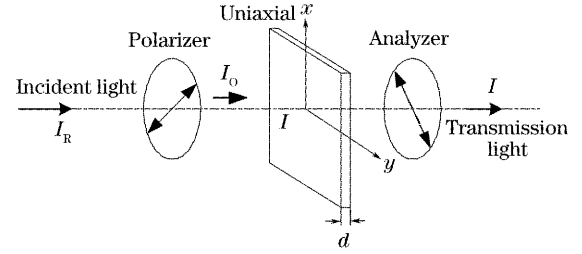


图1 基于偏振光干涉的光纤光栅波长解调示意图

Fig. 1 Schematic of the fiber Bragg grating wavelength demodulation based on polarization interferometer

向夹角 45° 的单轴晶体上,晶体的光轴与其表面平行,设 y 为光轴方向, d 为晶体厚度。这时入射的线偏振光分解为 o 光和 e 光,它们的光矢量方向分别位于 x 轴和 y 轴,由于这两束光在晶体中的传播速度不同,经过晶体后产生一定的光程差。两者的光程差为 δ ,根据晶体光学有下公式^[10]:

$$\delta = (n_o - n_e)d, \quad (3)$$

$$I = I_0 \sin^2(\pi\delta/\lambda) = \frac{I_0}{2} [1 - \cos(2\pi\delta/\lambda)], \quad (4)$$

式中 I_0 为起偏器的出射光强, I 为检偏器的出射光强。 $2\pi\delta/\lambda$ 表示反映干涉的相位 φ 即

$$\varphi = 2\pi\delta/\lambda, \quad (5)$$

入射光 I_R 为光纤光栅所反射的光强,令其为自然光有

$$I_0 = I_R/2, \quad (6)$$

根据(3)式和(5)式有

$$\varphi = 2\pi(n_o - n_e)d/\lambda, \quad (7)$$

将上式写成微分形式:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [(\Delta n_o - \Delta n_e)d + (n_o - n_e)\Delta d + (n_o - n_e)d\Delta\lambda/\lambda], \quad (8)$$

式中 $(n_o - n_e)d\Delta\lambda/\lambda$ 项反映了待测信号, $\Delta(n_o - n_e)d$ 、 $(n_o - n_e)\Delta d$ 项反映了外界环境干扰而引入的噪声,噪声项主要是由偏振光干涉仪中晶体本身的特性决定的,当选用性能优异的双折射晶体钽酸钷晶体(YVO₄)时,可略去噪声项^[9]。对晶体钽酸钷晶体 $n_o - n_e = 0.206137$,此时由(2)式、(4)式、(7)式、(8)式可得下列公式:

$$I = \frac{I_R}{4} \left\{ 1 - \cos \left[2\pi(n_o - n_e)d/\lambda + \Delta T 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \xi)/\lambda + \frac{2\pi}{\lambda} d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon \right] \right\}, \quad (9)$$

对给定的 $\lambda = \lambda_{B1}$,如果选择合适的晶体厚度 d 使 $2\pi(n_o - n_e)d/\lambda_{B1} = 2k\pi + \pi/2$ (将干涉仪调整到正交工作状态)。且当 $|\Delta\phi| \ll 1$ 时,(9)式可以化简为下列线性形式表达式:

$$I_{\lambda_{B1}} = \frac{I_{R1}}{4} [1 - \Delta T_1 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \xi)/\lambda_{B1} - 2\pi d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_1/\lambda_{B1}], \quad (10)$$

式中 ΔT_1 和 ϵ_1 分别为光栅 λ_{B1} 上的温度和应变。下面的讨论中 ΔT_2 和 ϵ_2 分别为光栅 λ_{B2} 上的温度和应变。

同样,如果选择另外一个光纤光栅满足 $\lambda = \lambda_{B2} = \lambda_{B1} + \lambda_{B1}^2/2(n_o - n_e)d$, 此时

$$\begin{aligned} 2\pi(n_o - n_e)d/\lambda_{B2} &= 2\pi(n_o - n_e)d \left/ \left[\lambda_{B1} + \frac{\lambda_{B1}^2}{2(n_o - n_e)d} \right] \right. = (2k\pi + \pi/2)\lambda_{B1} \left/ \left[\lambda_{B1} + \frac{\lambda_{B1}^2}{2(n_o - n_e)d} \right] \right. = \\ &= (2k\pi + \pi/2) \left/ \left[1 + \frac{\lambda_{B1}}{2(n_o - n_e)d} \right] \right., \end{aligned} \quad (11)$$

再根据 $2\pi(n_o - n_e)d/\lambda_{B1} = 2k\pi + \pi/2$ 有

$$1 + \frac{\lambda_{B1}}{2(n_o - n_e)d} = 1 + \frac{\pi}{2k\pi + \pi/2} = \frac{2k\pi + 3\pi/2}{2k\pi + \pi/2}, \quad (12)$$

将(12)式代入(11)式有

$$2\pi(n_o - n_e)d/\lambda_{B2} = 2k\pi + 3\pi/2, \quad (13)$$

再来考虑 $\Delta T_2 2\pi(n_o - n_e)d(\xi + \alpha)/\lambda_{B2}$ 和 $(2\pi/\lambda_{B2})d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_2$ 项,由(13)式得

$$\begin{aligned} \Delta T_2 2\pi(n_o - n_e)d(\xi + \alpha)/\lambda_{B2} &= (2k\pi + 3\pi/2)\Delta T_2(\xi + \alpha) = 2\pi(n_o - n_e)d\Delta T_2(\xi + \alpha)/\lambda_{B1} + \\ &= \pi\Delta T_2(\xi + \alpha), \end{aligned} \quad (14)$$

$$(2\pi/\lambda_{B2})d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_2 = (2k\pi + 3\pi/2)K_\epsilon \epsilon_2 = 2\pi(n_o - n_e)dK_\epsilon \epsilon_2/\lambda_{B1} + \pi K_\epsilon \epsilon_2, \quad (15)$$

此时将(13)式、(14)式、(15)式代入(9)式中得

$$\begin{aligned} I_{\lambda_{B2}} &= \\ &= \frac{I_{R2}}{4} \left\{ 1 - \cos \left[2k\pi + \frac{3}{2}\pi + 2\pi(n_o - n_e)d\Delta T_2(\xi + \alpha)/\lambda_{B1} + \pi\Delta T_2(\xi + \alpha) + \frac{2\pi}{\lambda_{B1}}d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_2 + \pi K_\epsilon \epsilon_2 \right] \right\} = \\ &= \frac{I_{R2}}{4} \left\{ 1 + \sin \left[2\pi(n_o - n_e)d\Delta T_2(\xi + \alpha)/\lambda_{B1} + \pi\Delta T_2(\xi + \alpha) + \frac{2\pi}{\lambda_{B1}}d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_2 + \pi K_\epsilon \epsilon_2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

当式中 $\Delta\varphi = -1 \ll \Delta T_2 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \xi)/\lambda_{B1} + \pi\Delta T_2(\xi + \alpha) + \frac{2\pi}{\lambda_{B1}}d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_2 + \pi K_\epsilon \epsilon_2 \ll 1$ 时,上式可以简写为

$$I_{\lambda_{B2}} = \frac{I_{R2}}{4} \left[1 + 2\pi(n_o - n_e)d\Delta T_2(\xi + \alpha)/\lambda_{B1} + \pi\Delta T_2(\xi + \alpha) + \frac{2\pi}{\lambda_{B1}}d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_2 + \pi K_\epsilon \epsilon_2 \right], \quad (17)$$

下面从式(10)和式(17)出发来分析如何抵消掉交叉敏感现象。如果令 $\epsilon_2 = 0, \Delta T_1 = \Delta T_2$, 此时 $I_{\lambda_{B1}} + I_{\lambda_{B2}}$ 可以表示:

$$I_{\lambda_{B2}} + I_{\lambda_{B1}} = \frac{I_{R2} + I_{R1}}{4} + \frac{I_{R2} - I_{R1}}{4\lambda_{B1}} 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \xi)\Delta T_1 + \frac{I_{R2}}{4} \pi\Delta T_1(\xi + \alpha) - \frac{I_{R1}\pi}{2\lambda_{B1}} d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_1, \quad (18)$$

下面分析式中的 $\frac{I_{R2} - I_{R1}}{4\lambda_{B1}} 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \xi)\Delta T_1 + \frac{I_{R2}}{4} \pi\Delta T_1(\xi + \alpha)$ 项,由 $2\pi(n_o - n_e)d/\lambda_{B1} = 2k\pi + \pi/2$ 可得下式:

$$\begin{aligned} \frac{I_{R2} - I_{R1}}{4\lambda_{B1}} 2\pi(n_o - n_e)d(\alpha + \xi)\Delta T_1 + \frac{I_{R2}}{4} \pi\Delta T_1(\xi + \alpha) &= \frac{I_{R2} - I_{R1}}{4} (2k\pi + \pi/2)(\alpha + \xi)\Delta T_1 + \\ &= \frac{I_{R2}}{4} \pi\Delta T_1(\xi + \alpha) = \frac{(\alpha + \xi)\Delta T_1 \pi}{4} \left[I_{R2} \left(2k + \frac{3}{2} \right) - I_{R1} \left(2k + \frac{1}{2} \right) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

(10)式和(17)式中的 I_{R2} 和 I_{R1} 分别为光纤光栅的反射光强,其值的大小是由光纤光栅的带宽决定的。根据光纤光栅的反射理论^[11],通过选择不同的光栅栅区的长度就能够实现对光纤光栅带宽的调节,相应的就能实现对 I_{R2} 和 I_{R1} 的调节。如果令上式中的 $I_{R2}/I_{R1} = (2k + 1/2)/(2k + 3/2)$ (这可以通过调整两个光栅的栅区长度来实现) 则上式为零,这样(18)式可以写为

$$I_{\lambda_{B2}} + I_{\lambda_{B1}} = \frac{I_{R2} + I_{R1}}{4} - \frac{I_{R1}\pi}{2\lambda_{B1}} d(n_o - n_e)K_\epsilon \epsilon_1, \quad (20)$$

从(20)式中,可以看出对应变的测量中没有了温度的影响,也就是说消除了所谓交叉敏感的影响。

图2反映了(10)式和(17)式决定的干涉仪工作在 λ_{B1} 和 λ_{B2} 时的工作状态。

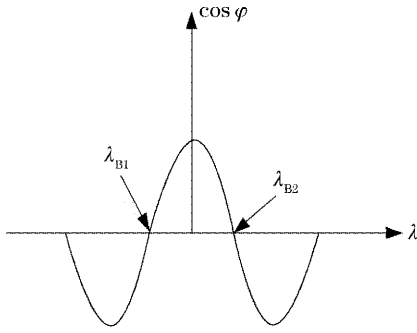


图2 偏振光干涉仪的两种工作状态

Fig. 2 Two states of the polarized-light interferometer

3 试验结果和讨论

实验装置如图3所示,传感光栅长1 cm,20℃时的中心波长 $\lambda_{B1} = 1299.404$ nm,带宽 $\Delta\lambda_{1/2} = 0.2$ nm, $\lambda_{B2} = \lambda_{B1} + \frac{\lambda_{B1}^2}{2(n_o - n_e)d} = 1303.499$ nm。光源为有致冷超辐射发光管 LED3S44-3,其功率为150 μ W,波长范围为1270~1330 nm。双折射晶体标称厚度 $d = 0.5$ mm的钽酸钪晶体 YVO₄。光纤准直器的作用是将光纤出射的光变为平行光并使其垂直入射到起偏器上。温度控制器的作用是控制 YVO₄ 晶体的温度变化 $\Delta T'$,并且用来调整干涉仪的正交状态。悬臂梁上粘有光纤光栅 λ_{B1} ,用来测量悬臂梁的应变,在 λ_{B1} 的附近有光纤光栅 λ_{B2} 用来进行温度补偿。

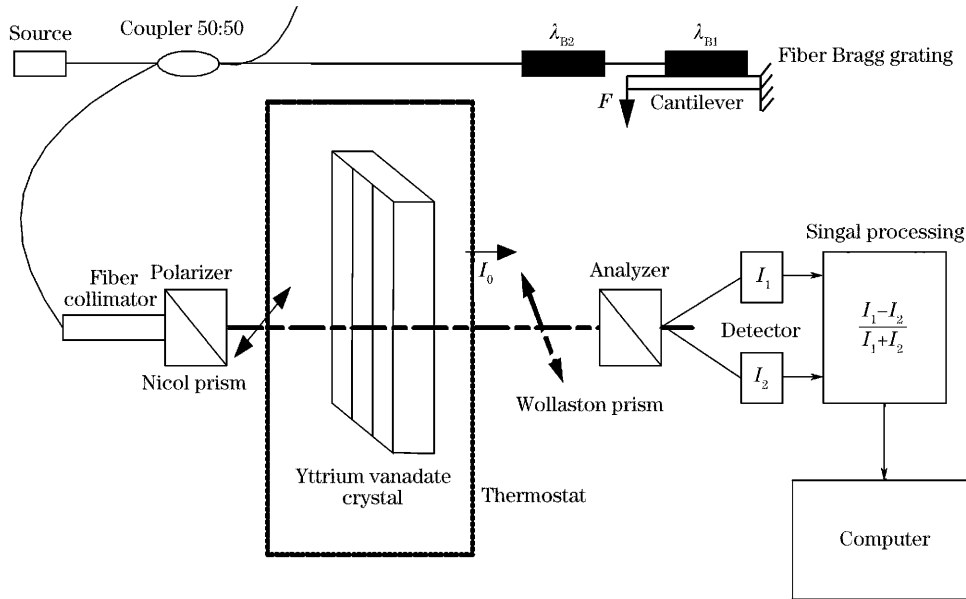


图3 光纤光栅解调实验装置

Fig. 3 Experimental setup for FBG demodulation

与图1不同,为了抵消光强变化的影响,检偏器渥拉斯顿棱镜输出的两路光 I_1 、 I_2 都要被用作信号处理。其中光 $I_2 = I_{\lambda_{B1}} + I_{\lambda_{B2}}$ 的光强由(20)式所确定。即

$$I_2 = \frac{I_{R2} + I_{R1}}{4} - \frac{I_{R1} \pi d (n_o - n_e) K_e \epsilon_1}{2\lambda_{B1}}$$

另一束出射光 I_1 的光强可根据能量守恒定律来确定,即

$$I_1 = \frac{I_{R2} + I_{R1}}{4} + \frac{I_{R1} \pi d (n_o - n_e) K_e \epsilon_1}{2\lambda_{B1}}$$

这样根据图中的信号处理方式就能测出 ϵ_2 :

$$\epsilon_2 = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} k_u \frac{\lambda_{B1}}{\pi d (n_o - n_e) K_e}, \quad (21)$$

式中 $k_u = (I_{R1} + I_{R2}) / 2I_{R1}$,反映了上文所述的两个光栅栅区长度需要调整的程度。当晶体厚度 d/λ_{B1} 比较大时 $k_u \approx 1$ 。例如当上述试验中所选取的数据: $d = 0.5$ mm, $\lambda_{B1} = 1299.404$ nm,此时由 $2\pi(n_o - n_e)d/\lambda_{B1} = 2k\pi + \pi/2$,计算得: $k = 79$,此时

$$k_u = \frac{I_{R1} + I_{R2}}{2I_{R1}} = 0.5 + 0.5 \frac{I_{R2}}{I_{R1}} = 0.5 + 0.5 \frac{2k + 1/2}{2k + 3/2} = 0.997,$$

此时(21)式可以简写为

$$\epsilon_2 = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \frac{\lambda_{B1}}{\pi d (n_o - n_e) K_e}. \quad (22)$$

在图3所示的实验装置中,对于给定的悬臂梁

结构^[12],在给定的载荷 F 的作用下,应用材料力学可以方便地计算出光纤光栅的应变。如果用这种应变来代表实际应变,而把利用(22)式计算出的称作测量应变。图 4 反映的是这两种应变的关系。从图 4 中可以看出在不同温度下的各种应变测量曲线基本上重合在一起,这就验证了(22)式的正确性。但从图 4 中还可以看出:随着实际应变的加大,各条曲线的离散度在加大,这种现象在图 5 中可以更加清楚地看出。(图 5 中的应变偏差是指实际应变与测量应变的差)造成这种现象的原因是由于在文中从(9)式到(17)式的推导过程中利用了近似关系。进一步分析可以发现只要晶体厚度足够小,(21)式的精度就足够高。图 6 是在不用近似推导的情况下晶体厚度为 0.1 mm 时 Matlab 软件的仿真结果。从这个仿真结果可以看出在应变为 400 $\mu\epsilon$,当温度从 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 变化到 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时所获得的应变的变化不超过 0.4 $\mu\epsilon$, (相当于 $0.0067\text{ } \mu\epsilon/^\circ\text{C}$) 而在实验图中(晶体厚度为 0.5 mm)这种应变变化范围为 8 $\mu\epsilon$ (相当于 $0.13\text{ } \mu\epsilon/^\circ\text{C}$)。

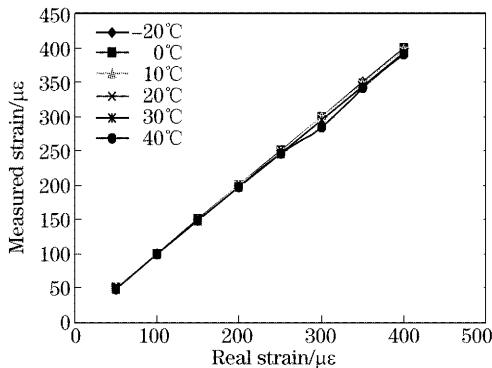


图 4 不同温度下的应变测量

Fig. 4 Strain measured under different temperatures

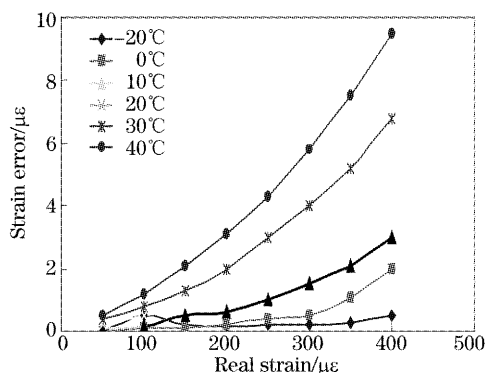


图 5 不同温度下的应变偏差与温度的关系

Fig. 5 Strain deviation under different temperatures

通过以上分析,可知如果不采取任何温度补偿的措施,可以算出当温度从 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 变化到 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,

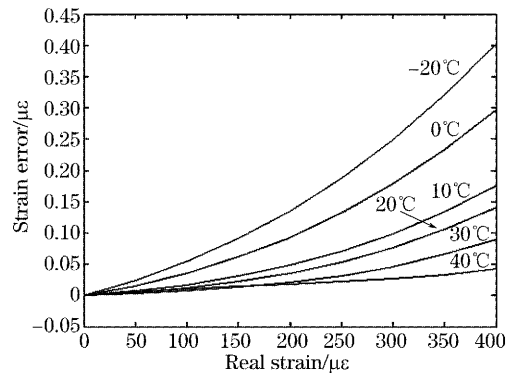


图 6 晶体厚度为 0.1 mm 时应变偏差与温度的关系

Fig. 6 Strain deviation under different temperatures when $d=0.1\text{ mm}$

由于温度的交叉敏感现象会引起相当于 $60 \times (\alpha + \beta) / K_e = 515\text{ } \mu\epsilon$ 的应变。也就是说当 YVO_4 晶体厚度为 0.5 mm 时,温度的交叉敏感被压缩到了 1.6%;而当 YVO_4 晶体的厚度为 0.1 mm 时温度的交叉敏感则被压缩到了 0.08%。上面的分析说明减小晶体的厚度有利于减小温度交叉敏感现象的影响,但当晶体厚度减小时机械加工将变得非常困难,一种可行的办法是采用图 7 所示的晶体结构。在图 7 中两块厚度分别为 d_1 和 d_2 ($d_1 > d_2$) 的晶体重叠放置在一起,每块晶体的快轴和慢轴分别和另一块晶体的慢轴和快轴取向一致。这样可以相当于一块晶体厚度为 $d_1 - d_2$ 的晶体。有关这方面的工作将在以后的论文中讨论。

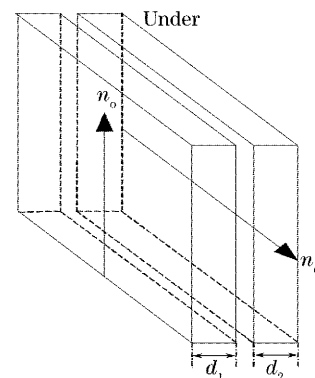


图 7 双晶体结构

Fig. 7 A structure of double crystal

参 考 文 献

- 1 H. J. Patrick, G. M. Williams, A. D. Kersey *et al.*. Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, 8(9): 1223~1225
- 2 Bai-ou Guan, Hwa-Yaw Tam, Xiao-ming Tao. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, 12(6):

- 675~677
- 3 Bi Weihong, Li Wei, Fu Guangwei *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature with a fiber Bragg grating sensor array[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(8): 827~834 (in Chinese)
毕卫红,李 卫,傅广为 等. 分布式光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(8): 826~834
- 4 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **31**(2): 232~235 (in Chinese)
黄 锐,蔡海文,瞿荣辉 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 232~235
- 5 Huang Yonglin, Tong Zhengrong, Xiang Yang *et al.*. Temperature-insensitive displacement sensing using the chirp effect of fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1015~1018 (in Chinese)
黄勇林,童峥嵘,项 阳 等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的位移传感[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1015~1018
- 6 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single long-period fiber grating element[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1116~1120 (in Chinese)
饶云江,王义平,冉曾令 等. 单个长周期光纤光栅实现横向负载和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12): 1116~1120
- 7 Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and pressure using a single fiber Bragg grating based on reflected wave's broadened bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1401~1405 (in Chinese)
郭 团,乔学光,贾振安 等. 单光纤光栅波谱展宽温度压力同时区分测量[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1401~1405
- 8 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying *et al.*. Research on the simultaneous measurements of pressure and temperature using one fiber grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(11): 1002~1006 (in Chinese)
刘云启,郭转运,张 颖 等. 单个光纤压力和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2000, **27**(11): 1002~1006
- 9 Bi Weihong, Li Wei. A novel approach to fiber grating demodulation system based on the principle of polarized-light interference[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 993~996 (in Chinese)
毕卫红,李 卫. 基于偏振光干涉的一种新型的光纤光栅解调系统[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 993~996
- 10 Xu Jiahua. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1988. 327~352
徐家骅. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 327~352
- 11 Bi Weihong, Zhang Chuang. Research on the reflection properties of fiber Bragg gratin [J]. *Technology of Optic Communication*, 2003, **6**: 45~46 (in Chinese)
毕卫红,张 闯. 光纤布喇格光栅的反射特性研究[J]. *光通信技术*, 2003, **6**: 45~46
- 12 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi. No-chirped linearly tuning technique for fiber Bragg grating with a cantilever beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 873~876 (in Chinese)
余有龙,刘志国,董孝义 等. 基于悬臂梁的光纤光栅无啁啾线性调谐[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 873~876