

柚子型微结构光纤 Bragg 光栅温度和应变传感特性研究*

张春书[†] 开桂云[‡] 王 志 王 超 孙婷婷 张伟刚 刘艳格 刘剑飞 袁树忠 董孝义

(南开大学现代光学研究所 天津 300071)

(2004 年 8 月 4 日收到 2004 年 10 月 27 日收到修改稿)

通过对柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的多个反射峰的温度和应变传感特性进行的理论和实验研究,得出柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的反射波长与温度呈二次关系,且理论和实验二者吻合较好;同时发现每个反射峰的温度灵敏度不同.理论分析柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的反射波长与应变呈线性关系,实验得到了该种 Bragg 光栅的反射波长与应变的线性关系,实验结果与理论分析相吻合.由于微结构光纤光栅反射谱中多个峰对温度和应变等物理量敏感度不一致,这种 Bragg 光栅更适合应用到多参量传感领域.

关键词:微结构光纤,光纤 Bragg 光栅,温度传感,应变传感

PACC:4280S,4280F,0630M

1. 引 言

自 1996 年 Knight 等人研制出第一根微结构光纤以来^[1],微结构光纤(Microstructure Fiber 简称 MF)因其设计的灵活性和具有一系列独特的光学特性,引起了广大研究人员的兴趣^[2].微结构光纤的出现同样也促使光纤 Bragg 光栅进入一个新的研究领域^[3].在微结构光纤中写制的布拉格光栅(FBG)与普通的光纤 Bragg 光栅相比,具有一些独特的性质^[4,5].

本文从理论上分析出柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的反射波长随温度和应变的变化关系,得到了光栅的温度灵敏度系数和应变关系系数.用载氢敏化处理的柚子型微结构光纤写制光纤 Bragg 光栅,发现多个反射峰,实验研究了光栅的多个反射峰的温度和应变传感特性,并根据实验数据拟合得到了光栅随温度和应变的变化关系.理论和实验结果都表明柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的反射波长随温度呈二次关系变化,与应变呈线性关系.

2. 柚子型微结构光纤光栅温度和应变传感的理论分析

我们采用 OFS 公司生产的柚子型微结构光纤,光纤横截面如图 1 所示.这种光纤掺锗纤芯直径为 $6.6 \mu\text{m}$,内包层的直径为 $31 \mu\text{m}$,空气孔的直径为 $38 \mu\text{m}$,光纤的外径为 $130 \mu\text{m}$,光纤的截止波长为 $900\text{--}1100 \text{ nm}$.

本文采用有限元方法在理论上研究柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的温度和应变传感特性.微结构光纤的有限单元划分如图 2 所示.考虑纤芯和内包层处模式分别能量比较集中,所以对附近网格做了加密处理.

光源从微结构光纤布拉格光栅的一端入射,因纤芯折射率周期变化,光纤中向前传播和向后传播的光波耦合.当满足布拉格条件的光耦合到向后的传输波中,就形成一反射峰.

光栅中基模与基模耦合的 Bragg 条件为

$$\lambda_b = 2n_{co}\Lambda. \quad (1)$$

式中 λ_b 为光栅中心波长; n_{co} 为基模的有效折射率;

* 国家 973 计划项目(批准号 2003CB314906) 国家 863 计划项目(批准号 2002AA313110) 国家自然科学基金(批准号 60407005 60137010), 南开大学科技创新基金资助的课题.

[†] 联系人. E-mail: chunshuzhang@163.com

[‡] 永久联系人. E-mail: kaigy@eyou.com

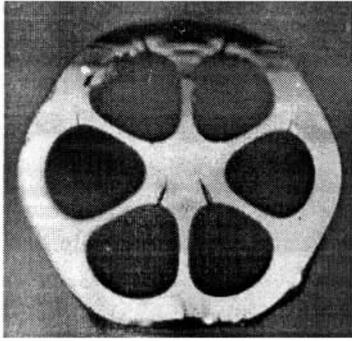


图1 柚子型微结构光纤截面图

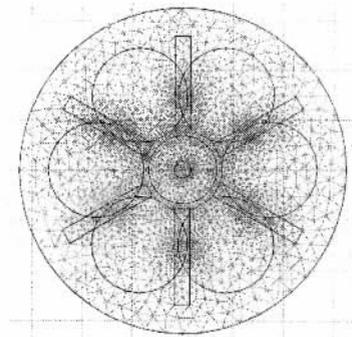


图2 柚子微结构光纤有限元计算模型

Λ 为纤芯折射率的调制周期.

包层模与基模耦合时满足布拉格条件

$$\lambda_b = (n_{co} + n_{cl})\Lambda, \quad (2)$$

式中 n_{cl} 为包层的有效折射率.

2.1. 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅温度传感特性分析

引起 λ 漂移的因素很多,若只考虑温度 T 的影响,则 λ_b, n, Λ 只是 T 的函数.设光栅所处的初始温度为 T_0 , $\Delta T = T - T_0$.将 λ_b 作泰勒展开^[6],保留二次项得:

$$\lambda_b(T) = \lambda_b(T_0) + \frac{d\lambda_b(T)}{dT}\Delta T + \frac{1}{2} \frac{d^2\lambda_b(T)}{dT^2}\Delta T^2. \quad (3)$$

由式(1)和式(3)得:

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{\lambda_b(T) - \lambda_b(T_0)}{\lambda_b} = \eta_{T1}\Delta T + \eta_{T2}\Delta T^2 \quad (4)$$

式中 $\eta_{T1} = \frac{1}{\lambda_b} \times \frac{d\lambda_b}{dT}$, $\eta_{T2} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\lambda_b} \times \frac{d^2\lambda_b}{dT^2}$, 分别表示光栅的一阶和二阶温度灵敏系数.

2.1.1. 光栅中基模与基模耦合的情况

将(1)式对温度 T 取导数,并整理得

$$\frac{1}{\lambda_b} \frac{d\lambda_b}{dT} = \frac{1}{n_{co}} \times \frac{dn_{co}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \times \frac{d\Lambda}{dT} T, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\lambda_b} \times \frac{d^2\lambda_b}{dT^2} = \frac{d\zeta}{dT} + \frac{d\alpha}{dT} + (\alpha + \zeta)^2. \quad (6)$$

用 $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$, $\zeta = \frac{1}{n_{co}} \frac{dn_{co}}{dT}$ 分别表示柚子型微结构光纤光栅热膨胀系数和热光系数.

由式(4)(5)(6)式得

$$\eta_{T1} = \alpha + \zeta, \quad (7)$$

$$\eta_{T2} = \frac{1}{2} \left[\frac{d\zeta}{dT} + \frac{d\alpha}{dT} + (\alpha + \zeta)^2 \right]. \quad (8)$$

由式(4)(7)(8)式分析可以看出在柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的基模与基模耦合时,反射波长随温度的变化呈二次关系.并且柚子型微结构光纤光栅一阶和二阶温度灵敏系数 η_{T1}, η_{T2} 与微结构光纤 Bragg 光栅的热膨胀系数和热光系数有关.

2.1.2. 光栅中基模和包层模耦合的情况

将(2)式对温度 T 取导数,并与(5)式相结合整理得:

$$\frac{1}{\lambda_b} \frac{d\lambda_b}{dT} = \alpha + \frac{n_{co}}{n_{co} + n_{cl}} \times \zeta + \frac{n_{cl}}{n_{co} + n_{cl}} \times \sigma, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_b} \frac{d^2\lambda_b}{dT^2} = & \frac{d\alpha}{dT} + \frac{n_{co}}{n_{co} + n_{cl}} \times \frac{d\zeta}{dT} + \frac{n_{cl}}{n_{co} + n_{cl}} \times \frac{d\sigma}{dT} \\ & + \frac{n_{co}n_{cl}}{(n_{co} + n_{cl})^2} (\alpha - \zeta)^2 + (\alpha + \zeta)^2. \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\sigma = \frac{1}{n_{cl}} \cdot \frac{dn_{cl}}{dT}$ 表示柚子型微结构光纤中包层的热光系数.

由(4)(9)(10)式得

$$\eta_{T1} = \alpha + \frac{n_{co}}{n_{co} + n_{cl}} \times \zeta + \frac{n_{cl}}{n_{co} + n_{cl}} \times \sigma, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \eta_{T2} = & \frac{1}{2} \left(\frac{d\alpha}{dT} + \frac{n_{co}}{n_{co} + n_{cl}} \times \frac{d\zeta}{dT} + \frac{n_{cl}}{n_{co} + n_{cl}} \times \frac{d\sigma}{dT} \right. \\ & \left. + \frac{n_{co}n_{cl}}{(n_{co} + n_{cl})^2} (\alpha - \zeta)^2 + (\alpha + \zeta)^2 \right). \end{aligned} \quad (12)$$

由式(4)(11)(12)式分析看出该光栅的基模与包层模耦合时,反射波长随温度的变化同样呈二次关系.相比于基模与基模耦合的情况,这种情形更加复杂.温度灵敏度系数不仅与光栅热膨胀系数和热光系数有关,而且与光纤中包层的热光系数有紧密关系.

2.1.3. 光栅的温度灵敏系数的理论计算

室温下熔融石英的热膨胀系数和热光系数^[6]分

别为 $\alpha \cong 0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $\xi \cong 8.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. 由于包层的热光系数 σ 与纤芯的热光系数 ξ 在同一数量级, 并且 α 比 ξ 小的多, 假定 α 保持不变. 由(7)(8), (11)和(12)式可以看出, 计算得到柚子型微结构光纤的热光系数 ξ 以及 $d\xi/dT$ 和 $d\sigma/dT$ 就在理论上求得光纤的一阶和二阶温度灵敏度系数.

根据熔融石英的折射率随温度的变化而变化的原理, 应用图2的理论模型用有限元方法计算出在不同的温度下柚子型微结构光纤前36个模式, 并分别取与基模耦合系数大的前三组模式的传播常数 β . 这三个模式分别是基模与基模耦合以及基模与包层模耦合的情况^[7], 并且三个模式的谐振波长分别为: 1556.8 nm, 1554.7 nm 和 1553.9 nm. 由于在光纤中传导的光波长 λ 、传播常数 β 和有效折射率 n_{eff} 存在 $n_{\text{eff}} = \beta \cdot \lambda / 2 \cdot \pi$ 的关系, 所以可以求得不同温度下相应模式的有效折射率. 图3为柚子型微结构光纤中与基模耦合系数大的前三组模式的有效折射率与温度关系曲线.

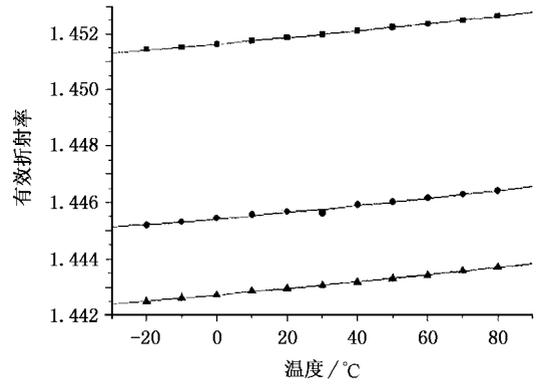


图3 柚子型微结构光纤中与基模耦合系数大的三组模式的有效折射率与温度关系曲线. ■, ●, ▲ 分别代表三个谐振波长的有效折射率随温度的变化, — 代表模拟线

根据纤芯与包层热光系数 ξ 和 σ 的定义, 并通过拟合图3中的数据点就可以得到相应的 ξ , σ , $d\xi/dT$ 和 $d\sigma/dT$. 据(7)(8)(11)和(12)式就可求得温度灵敏度系数, 如表1所示.

表1 光栅的谐振波长与模式的热光系数及其对温度导数、温度灵敏度系数

谐振波长/nm	热光系数/ $^{\circ}\text{C}$	热光系数对温度导数/ $^{\circ}\text{C}^2$	一阶温度灵敏度系数 $\eta_{T1}/^{\circ}\text{C}$	二阶温度灵敏度系数 $\eta_{T2}/^{\circ}\text{C}$
1556.8	7.546411×10^{-6}	1.820670×10^{-8}	8.046411×10^{-6}	0.913572×10^{-8}
1554.7	7.241206×10^{-6}	2.508990×10^{-8}	7.894229×10^{-6}	1.085799×10^{-8}
1553.9	7.547145×10^{-6}	1.614150×10^{-8}	8.046777×10^{-6}	0.862674×10^{-8}

2.2. 柚子型微结构光纤光栅应变传感的理论分析

当微结构光纤受到拉力时光纤中只有石英的部分承受外力, 所以光纤的应变是光纤中石英的应变. 不考虑光纤轴向变形引起的柚子型微结构光纤有效折射率的变化, 引用标准单模光纤光栅的应变特性模型来分析微结构光纤光栅应变传感特性^[8,9].

根据布拉格条件在柚子型微结构光纤 Bragg 光栅中基模与基模耦合时有:

$$\frac{d\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{dn_{\text{co}}}{n_{\text{co}}} + \frac{d\Lambda}{\Lambda}. \quad (13)$$

在弹性范围内, $\epsilon = \frac{d\Lambda}{\Lambda}$, ϵ 为应变. 光纤在单轴弹性变形下的折射率变化如下:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{n_{\text{co}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \epsilon, \quad (14)$$

式中 p_{11} 与 p_{12} 为光弹系数, ν 为泊松比. 由(13), (14)式得:

$$\frac{d\lambda_b}{\lambda_b} = \left(1 - \frac{n_{\text{co}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right) \epsilon = a_{\epsilon} \epsilon, \quad (15)$$

式中 a_{ϵ} 光栅基模与基模耦合时反射峰的波长变化与应变关系系数.

在基模与包层模耦合时, 根据(2)式得:

$$\frac{d\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{d\Lambda}{\Lambda} + \frac{dn_{\text{co}}}{n_{\text{co}} + n_{\text{cl}}} + \frac{dn_{\text{cl}}}{n_{\text{co}} + n_{\text{cl}}}. \quad (16)$$

由式(14)(15)和(16)式得:

$$\frac{d\lambda_b}{\lambda_b} = a'_{\epsilon} \epsilon, \quad (17)$$

式中 a'_{ϵ} 光栅基模与包层模耦合时反射峰波长变化与应变关系系数.

由(15)(17)式分析看出, 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅中基模与基模耦合、基模与包层模耦合时, 光栅反射波长与应变呈线性关系. 室温下, 光纤的 $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$, $\nu = 0.17$, 由图3得到三个谐振波长在室温下的有效折射率, 根据(15)(17)式求得光栅模式耦合相对应的谐振波长与微应变的

关系,如表 2 所示.

表 2 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅谐振波长与微应变的关系

谐振波长/nm	a_ϵ	每个微应变引起的 波长变化($\mu\text{m}/\mu\epsilon$)
1556.8	0.785470	1.222820
1554.7	0.786382	1.222589
1553.9	0.786776	1.222571

3. 微结构光纤光栅温度和应变传感的实验研究

实验中把光纤高压载氢敏化处理,用紫外光写入 Bragg 光栅^[10,11],写制光栅的反射谱中有一系列的反射峰,如图 4 所示.通过研究^[12]发现图 4 中 A 峰为基模与基模耦合形成的,B 峰和 C 峰是包层模与基模耦合的结果.我们通过测量这三个峰的情况来分析柚子型微结构光纤的温度和应变传感特性.

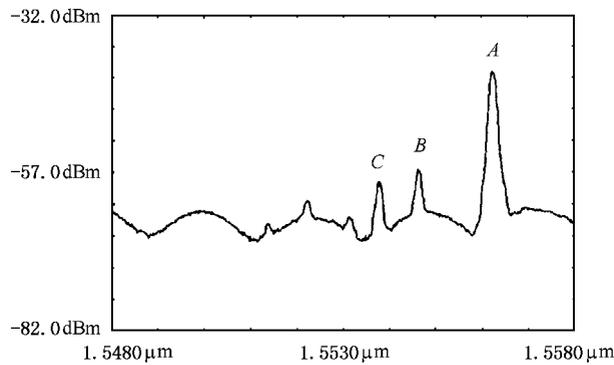


图 4 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅反射谱图

3.1. 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅温度传感的实验研究

图 5 为微结构光纤 Bragg 光栅温度传感特性研究的实验装置示意图.其中光谱分析仪(O SA)的分辨率为 0.1 nm,宽带光源 BBS 频谱范围为 1525 nm—1565 nm.匹配液 IMG 为防止端面反射.温度循环箱中测量光栅反射峰随温度变化的范围为 -25℃到 75℃^[12].实验表明光栅的三个反射峰的中心波长都随着温度变化而漂移,图 6 给出了光栅三个峰的中心波长随着温度变化的曲线,其中点为实验数据,三条平滑线为拟合曲线.从图 6 中可以看出光栅的反射波长随温度的变化呈二次关系变化,拟合光栅的三个反射峰随温度变化的关系式如下:

$$A: \lambda_b = 1556.85 + 0.00825 T + 0.0000234 T^2$$

$$B: \lambda_b = 1554.8 + 0.00894 T + 0.0000153 T^2$$

$$C: \lambda_b = 1554.01 + 0.00842 T + 0.0000163 T^2$$

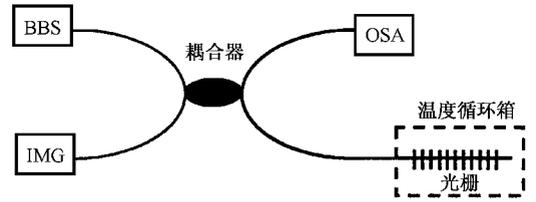


图 5 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅温度传感装置图

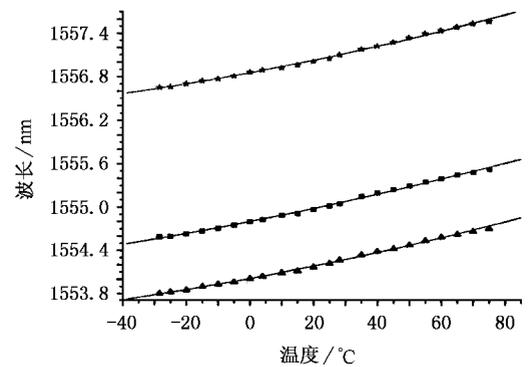


图 6 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅波长与温度关系曲线 ★, ■, ▲ 分别代表光栅反射谱的 A 峰, B 峰, C 峰的波长漂移 — 代表数据模拟线

拟合度分别为 A 峰 :0.99792, B 峰 :0.99775, C 峰 :0.99807.由上面三个式子可以得到柚子型微结构 Bragg 光栅的温度灵敏系数,如表 3 所示.

表 3 柚子型微结构 Bragg 光栅的温度灵敏系数

序号	谐振波长/ nm	一阶温度灵敏 系数 $\eta_1/^\circ\text{C}$	二阶温度灵敏 系数 $\eta_2/^\circ\text{C}$
A	1556.8	5.299331×10^{-6}	1.503083×10^{-8}
B	1554.7	5.750306×10^{-6}	0.9841126×10^{-8}
C	1553.9	5.418624×10^{-6}	1.048973×10^{-8}

与表 1 比较,一阶和二阶温度灵敏度系数吻合比较好,但仍有一定差异.这些差异是由于在实际的光纤结构中,空气孔与内包层相邻的区域与计算模型有所不同,并且理论分析是用石英材料的力学参数计算得到的,而石英在制作微结构光纤、光栅写入等操作后,原来的力学参数值发生了变化.从上面分析可以看出,柚子型微结构光纤 Bragg 光栅反射谱与温度的变化呈二次关系.这种非线性的温度特性是由于随着温度的变化光纤的许多参数(诸如光纤

的尺寸、光栅的周期芯模和包层模的有效折射率等)都发生变化而引起的。

3.2. 微结构光纤光栅应变传感的实验研究

本文的微结构光纤 Bragg 光栅应变传感实验在超净室室温下进行,为了排除温度变化对光纤光栅应变传感特性的影响,我们在较短时间内完成实验.图 7 为微结构光纤 Bragg 光栅应变传感特性研究的实验结构示意图.

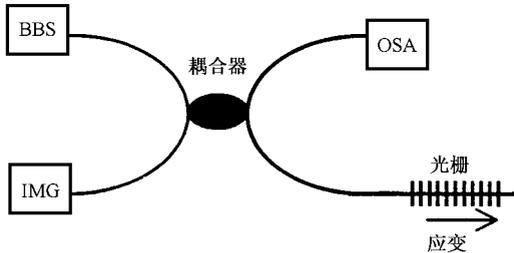


图 7 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅应变传感装置图

图 8 给出了在室温下柚子型微结构光纤 Bragg 光栅反射谱中三个峰随光栅微应变变化的曲线,其中点为实验数据,三条线为实验数据点的拟合曲线,分析实验结果可见光栅的反射波长与应变呈线性关系.

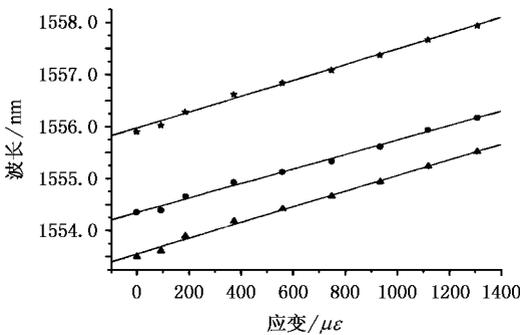


图 8 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅波长与应变关系曲线 ★, ● ▲ 分别代表光栅反射谱的 A 峰, B 峰, C 峰的波长漂移 — 代表数据模拟线

拟合得到光栅的应变与三个反射峰中心波长的波长变化关系为:

$$A \lambda_b = 1555.94805 + 0.00154 \epsilon$$

$$B \lambda_b = 1554.34218 + 0.00140 \epsilon$$

$$C \lambda_b = 1553.54098 + 0.00152 \epsilon$$

拟合度分别为, A 峰 0.99752, B 峰 0.99727, C 峰 0.99778.由上面三个关系式就可以得到柚子型微结构光纤 Bragg 光栅模式耦合的谐振波长与微应变的关系,如表 4 中所示.

表 4 柚子型微结构光纤 Bragg 光栅谐振波长与微应变的关系

序号	谐振波长/nm	每个微应变引起的波长变化($\text{pm}/\mu\epsilon$)
A	1556.8	1.54
B	1554.7	1.40
C	1553.9	1.52

比较表 2 和表 4,可见实验值与理论分析值吻合较好,但略有些差异,这与实际光纤结构中空气孔与内包层相邻区与计算模型略有不同有关.由以上实验和理论分析均证实柚子型微结构光纤 Bragg 光栅谱的波长与应变呈线性关系.不过反射谱中的三个峰中心波长随应变的变化有一些差别,差别是因三个峰是不同模式耦合造成,而这些不同的模式耦合对于相同的应变产生的波长的漂移也不同.

4. 结 论

本文利用经过载氢敏化处理的柚子型微结构光纤写制光纤 Bragg 光栅,对光栅反射谱中多个峰的温度和应变传感特性进行了理论和实验研究,得出了柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的温度和应变传感关系.理论和实验研究结果均表明柚子型微结构光纤 Bragg 光栅的反射波长变化与温度呈二次关系,且三个峰的温度灵敏度并不一致.光栅温度特性的非线性主要是随着温度的变化光纤的许多参数(光纤的尺寸、光栅的周期芯模和包层模的有效折射率等)都发生变化而引起的.而光栅的反射波长与应变则呈线性关系,但因三个峰是不同模式耦合造成,三个峰随应变的变化率有些差别.研究表明柚子型微结构 Bragg 光栅反射谱中的几个峰随温度和应变变化产生的漂移并不一致,利用这一特性可以实现多个物理量的同时测量,在多参量传感领域将有重要应用.

[1] Knight J C, Birks T A, Russell P S J and Atkin D M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1547

[2] Windeler R S, Wagener J L and Digiovanni D J 1999 *Optical fiber Conference FGI p105* (Piscataway, NJ :IEEE)

- [3] Eggleton B J , Westbrook P S , Windeler R S and Strasser T A 2000 *Optical Fiber Communication Conference* **3** 131 (Piscataway , NJ : IEEE)
- [4] Westbrook P S , Eggleton B J , Windeler R S , Hale A , Strasser T A and Burdge G L 2000 *IEEE Photonic Technol. Lett.* **12** 495
- [5] Eggleton B J , Westbrook P S , White C A , Kerbage C , Windeler R S and Burdge G L 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 1084
- [6] Qiao X G , Jia Z A , Fu H W , Li M and Zhou H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 494 (in Chinese) [乔学光、贾振安、傅海威、李明、周红 2004 物理学报 **53** 494]
- [7] Wang Z , Kai G Y , Zhang C S , Wang C , Sun T T , Zhang W G , Liu Y G , Liu J F and Dong X Y 2004 *J. Optoelectronics · Laser* **15** 增刊 113 (in Chinese) [王志、开桂云、张春书、王超、孙婷婷、张伟刚、刘艳格、刘剑飞、董孝义 2004 光电子·激光 , **15** Suppl. 113]
- [8] Lim J P , Yang Q P , Jones B E and Jackson P R 2002 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **51** 622
- [9] Zhuo F , Zhao Y C , Yan F P and Wang J H 2000 *Optical Communication Technology* **24** 134 (in Chinese) [卓 锋、赵玉成、延凤平、王均宏 2000 光通信技术 **24** 134]
- [10] Zhang W G , Xun Z W , Yang X P , Kai G Y , Zhao Q D , Yuan S Z and Dong X Y 2002 *Acta Optica Sinica* **22** 1070 (in Chinese) [张伟刚、许兆文、杨翔鹏、开桂云、赵启大、袁树忠、董孝义 2002 光学报 **22** 1070]
- [11] Zhang D S , Jiang L , Zhang W G , Li L J , Fan W D , Yuan S Z , Kai G Y and Dong X Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3087 (in Chinese) [张东生、姜 莉、张伟刚、李丽君、范万德、袁树忠、开桂云、董孝义 2003 物理学报 **52** 3087]
- [12] Eggleton B J , Ahuja A K , Feder K S , Headley C , Kerbage C , Mermelstein M D , Rogers J A , Steinvurzel P , Westbrook P S and Windeler R S. 2001 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **7** 409

Temperature and strain sensing property of grapefruit microstructure fiber Bragg grating *

Zhang Chun-Shu[†] Kai Gui-Yun[‡] Wang Zhi Wang Chao Sun Ting-Ting Zhang Wei-Gang

Liu Yan-Ge Liu Jian-Fei Yuan Shu-Zhong Dong Xiao-Yi

(Institute of Modern Optics , Nankai University , Tianjin 300071 , China)

(Received 4 August 2004 ; revised manuscript received 27 October 2004)

Abstract

The temperature and strain sensing property of a grapefruit microstructure fiber (MF) Bragg grating with multi-reflection peaks have been studied. Analysis indicates that the wavelength shift of this grating changes quadratically with the environmental temperature. Experimental results show that different reflection peaks have their individual temperature sensitivities. Furthermore , the relationship between the wavelength shifts and temperature variation has been fitted , which confirms the above analysis. However , theoretical analysis indicates that the wavelength shift have a good linear relationship with the strain change. The relationship between the wavelength shift and strain changes has been fitted through experiment. The inconsistent sensitivity of different reflection peaks for this grating ensures its practical applications in the field of multi-parameter sensing measurement.

Keywords : microstructure fiber , fiber Bragg grating , temperature sensing , strain sensing

PACC : 4280S , 4280F , 0630M

* Project supported by the National Basic Research Program of China (973 project) Grant No. 2003CB314906) , the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2002AA313110) , the National Natural Science Foundation Projects of China (Grant No. 60407005 and 60137010) and the Science & Technology Innovation Fund of Nankai University.

[†]E-mail : chunshuzhang@163.com

[‡]E-mail : kaigy@eyou.com