

文章编号: 0253-2239(2005)12-1693-4

# 单长周期光栅迈克耳孙干涉仪特性研究

何慧灵 瞿荣辉 高侃 耿健新 蔡海文 方祖捷 阮昊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 单长周期光栅迈克耳孙(Michelson)干涉仪是由尾纤端面蒸镀高反膜的单根长周期光纤光栅构成。入射光经长周期光栅后,部分被耦合到包层中传输。经过包层和纤芯传输的光信号经尾纤端面反射后,重新耦合回到长周期光栅中,在光栅区域形成干涉。通过理论计算分析了各种因素对其光谱响应的影响。从实验上得到了干涉光谱的谐振峰波长位移与光纤段温度变化成良好的线性关系,测得其温度系数为 31.3 pm/°C。表明这种结构可用于高温传感或作为波分复用滤波器。

**关键词:** 传感技术;长周期光纤光栅;迈克耳孙干涉仪;温度传感

中图分类号: TP212.12 文献标识码: A

## Single Long-Period Grating Based on Michelson Interferometer

He Huiling Qu Ronghui Gao Kan Geng Jianxin Cai Haiwen Fang Zujie Ruan Hao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** A Michelson interferometer based on a single long-period fiber grating (LPPG) is presented. The input signal is partly coupled into the cladding of the fiber by LPPG, and the pigtail of the LPPG is coated with high reflection film (RF). Therefore, both of the transmitted optical signals in the core and cladding are coupled simultaneously back to the LPPG and interfere by the HR coating. The interference characteristics are analyzed theoretically. The fringe — shift of the interference spectrum shows good linear relationship to the temperature, which is measured to be 31.3 pm/°C in the experiment. The proposed device is expected to serve a high temperature sensor, as well as WDM filter.

**Key words:** sensor technique; long-period fiber grating; Michelson interference; temperature sensing

## 1 引言

根据光栅周期的不同,光纤光栅可以分为长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅。长周期光纤光栅(Long period fiber grating, LPPG)又称传输光栅,其周期通常为几十到几百微米。它的工作机理是前向传输的纤芯基模与同向的各阶包层模式之间的耦合,具有插入损耗低、可靠性高、低成本和易制作等优点<sup>[1,2]</sup>。若把两个完全相同的长周期光纤光栅串联,那么在光栅的每个谐振峰内将会因纤芯模和包层模间耦合产生的马赫-曾德尔干涉效应而出现很多的小谐振峰。这种现象最早是由 Gu 报道的<sup>[3]</sup>。串联长周期光纤光栅可以被用作波分复用(WDM)系统中的梳状滤波器,也可以被用作传感

和解调装置<sup>[4,5]</sup>。但是制作两个完全相同的长周期光纤光栅并不容易,于是将这种串联结构加以改进,得到一种基于单长周期光栅的自干涉结构<sup>[6]</sup>。本文从理论上研究了这种自干涉结构的特性,并对影响其特性的各个参量进行了模拟和分析,以便实现结构的优化。在实验上对其温度响应和应用进行了初步的研究和探索。

## 2 单长周期光栅迈克耳孙干涉效应耦合特性分析

单长周期光栅迈克耳孙干涉仪由尾纤端面蒸镀高反膜的单根长周期光纤光栅构成。如图 1 所示。

作者简介: 何慧灵(1980~),女,湖北宜昌人,中国科学院上海光学精密机械研究所光存储实验室硕士研究生,主要从事光纤温度传感领域的研究。E-mail: greatmagic@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2005-01-17; 收到修改稿日期: 2005-03-24

根据耦合模理论和光纤基模、包层模的传输特性<sup>[7~10]</sup>,采用传输矩阵法来分析其特性。单个长周期光纤光栅的传输矩阵为 $\begin{bmatrix} t & r \\ r & t^* \end{bmatrix}$ , $t$ 和 $r$ 为长周期光纤光栅中纤芯模和包层模的振幅,可表示成为 $t$

$=\sqrt{\tau}\exp(j\phi_{in})$ 和 $r=j\sqrt{1-\tau}$ , $\tau$ 为纤芯模的透射率, $\phi_{in}$ 为光栅内产生的纤芯模和包层模之间的相移差。在经过如图 1 所示的结构后,其传输矩阵可以表示为

$$M = \begin{bmatrix} t & r \\ r & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\phi_{out}/2) & 0 \\ 0 & \alpha\exp(-j\phi_{out}/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\phi_{out}/2) & 0 \\ 0 & \alpha\exp(-j\phi_{out}/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t & r \\ r & t^* \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$\phi_{out}$  是纤芯模和包层模的相位差。 $R_1$ 、 $R_2$  分别是反射膜对纤芯和包层模的反射率(包括尾纤端面与光轴垂直与否对各自反射率的影响)。 $\alpha$ 是耦合区 $L$ (光往返总长)内包层模的损耗系数。将入射光能量归一化,则输出光强表示为

$$I = R_1^2 \tau^2 + R_2^2 (1 - \tau)^2 - 2R_1 R_2' \tau (1 - \tau) \cos \psi, \quad (2)$$

其中 $\psi$ 为总的相移因子( $\psi = \phi_{in} + \phi_{out}$ ), $R_2' = \alpha^2 R_2$ ,定义为包层等效反射率。

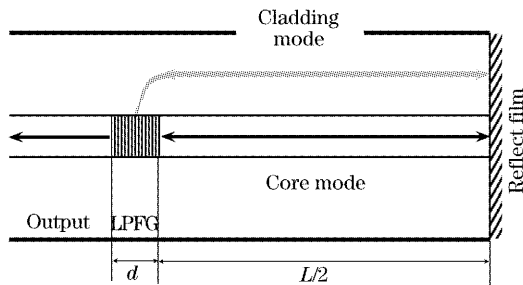


图 1 长周期光纤光栅自干涉原理图

Fig. 1 Schematic structure of LPFG self-interference

从(2)式中可以看到,在光谱上纤芯模的输出光强会由于 $\psi$ 的变化而产生一系列振荡。影响光谱特性主要有以下几个因素:1)长周期光纤光栅的透射率 $\tau$ ;2)纤芯反射率 $R_1$ ;3)包层等效反射率 $R_2'$ (包括传输区内包层损耗和包层反射率)。

在理想情况下(无任何损耗), $\tau$ 对干涉光强极大值(峰顶)没有影响,而仅仅影响干涉光谱衬比度的大小。因为干涉光强极大值代表光纤中总的传输光功率,只与传输损耗有关,与长周期光栅透射率无关。干涉光谱衬比度表示芯模与包层模的相干度。长周期光栅把部分芯模耦合至包层,经反射镜反射再由长周期光栅重耦合,仅当芯模振幅与包层模振幅相等时,干涉条纹衬比度最大。 $\tau$ 代表长周期光栅耦合芯模至包层模的程度。因此 $\tau=50\%$ 时光谱衬比度最大。芯模与包层模振幅相差越大,条纹衬比度越低。

下面考虑附加损耗的影响。从前面的分析可知,如果 $\tau$ 为50%,在无任何损耗情况下,干涉条纹衬比度最大。当 $R_1$ 或 $R_2'$ 降低时,芯模和包层模的振幅会相应发生衰减。在模拟计算中发现, $R_1$ 和 $R_2'$ 的不同大小对于最终的干涉输出特性的作用是不一样的。如图 2 所示为 $R_1 < R_2'$ 时的干涉光谱,图 3 为 $R_1 > R_2'$ 时的输出光谱。图中参量各取为 $\tau=50\%$ , $d=4\text{ cm}$ , $\Lambda=450\text{ }\mu\text{m}$ , $L=0.4\text{ m}$ ,并且长周期光纤光栅中心波长 $\lambda=1550\text{ }\mu\text{m}$ ,损耗峰带宽 $\Delta\lambda=30\text{ nm}$ , $\tau=50\%$ 为长周期光纤光栅中心波长处的透射率。从图 2 可以看出 $R_1$ 降低时,各干涉极大波长处的光强几乎同等降低,使干涉光谱整体下降。也就是说, $R_1$ 的减小表现为迈克耳孙干涉仪插入损耗的增加。而从图 3 可以看出,当 $R_2'$ 降低时,干涉衬比度也急剧下降,而且插入损耗的变化呈现出了一定的波长相关性,即干涉极大波长处的光强的包络出现中部凹陷。计算表明, $R_2'$ 与 $R_1$ 的差别越大,凹陷越明显。这是因为在干涉臂上,对于每个波长的信号来讲,在纤芯中传输的能量始终不小于在包层中传输的能量,而且在包层中传输的信号能量分布具有与长周期光纤光栅正好相反的光谱特性。因此,要得到理想的干涉光谱,长周期光纤光栅选择

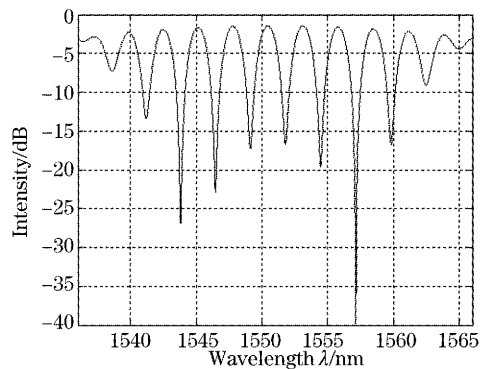


图 2 长周期光纤光栅迈克耳孙干涉效应理论模拟图

Fig. 2 Theoretical simulation of LPFG Michelson interference effect ( $R_1=0.7$ ,  $R_2'=1$ )

3 dB 损耗,镀膜端面的反射率尽可能高,传输光纤段不能弯曲,以使  $R_1$ 、 $R'_2$  尽可能相等。

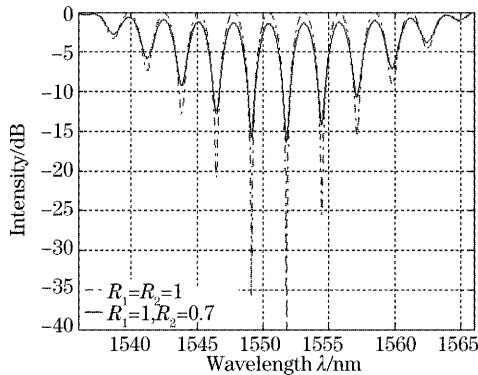
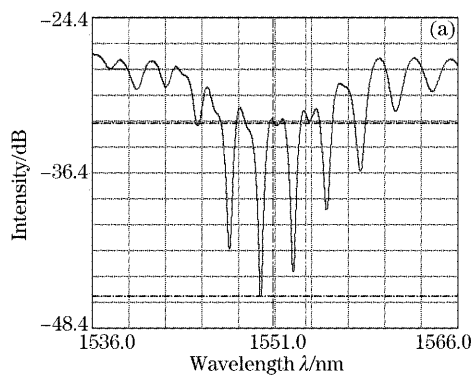


图 3 不同  $R'_2$  时长周期光纤光栅迈克耳孙干涉效应理论模拟图

Fig. 3 Theoretical simulation of LPFG Michelson interference effect with different  $R'_2$

### 3 单长周期光栅迈克耳孙干涉仪及其温度特性的实验研究

实验所采用的长周期光纤光栅是在 Corning SMF-28 光纤上制成的,光栅的周期是  $450 \mu\text{m}$ ,光栅的长度为 4 cm,对应于光纤包层模  $\text{HE}_{14}$  的第四个谐振峰的中心波长为 1551 nm,中心波长处的损耗为 4 dB.长周期光纤光栅的尾纤端面镀膜后的反



射率约为 65%。实验装置如图 4 所示。

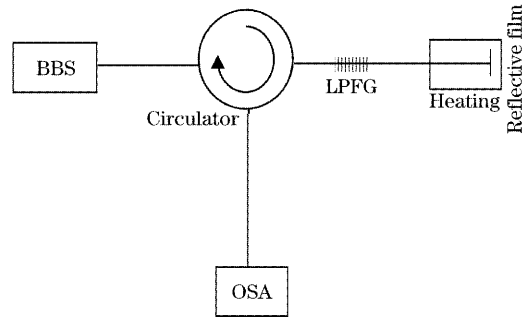


图 4 实验装置图

Fig. 4 Scheme of the experimental system

图 5(a)是  $L=40 \text{ cm}$  时的透射光谱,出现了一系列等间距的干涉峰。它是因为在纤芯中传输的光信号,和被长周期光纤光栅耦合到包层中传输,经端面反射镜反射后,又被耦合回到长周期光栅芯径中的光信号之间产生的迈克耳孙干涉效应。干涉输出信号经光纤环行器与入射光信号分离后连接到光谱仪(BBS)进行测量。图 5(b)是根据实验中的具体参量  $R_1=65\%$ ,  $\tau=4 \text{ dB}$ ,  $L=40 \text{ cm}$ , 并假设  $R'_2=30\%$ (考虑到实验中去涂覆层会引起包层损耗),由(2)式得到的模拟光谱图。可以看出,实验中芯模反射率与包层等效反射率确实存在差值,也存在包层损耗。因此,要获得高性能的干涉特性,必须从芯模反射率和包层等效反射率两方面来进行优化。

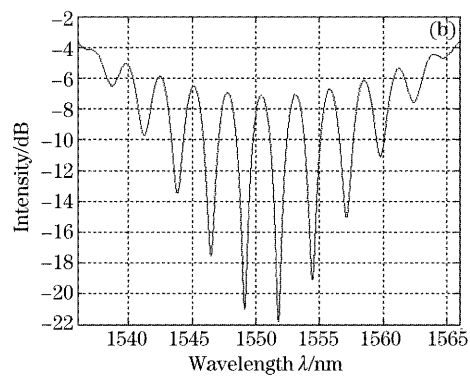


图 5  $L=40 \text{ cm}$  时,(a)透射光谱图,(b)模拟光谱图

Fig. 5 With  $L=40 \text{ cm}$ , (a) Transmission spectra, (b) simulative spectra

为了使光纤更好地响应外界温度的变化,实验是对裸光纤段中 8cm 的长度进行了温度调谐,测量干涉小峰的温度系数。由于发生干涉的芯模与包层模是纤芯与包层中的导模,因此去除涂覆层对包层模的传输性能没有影响。谐振小峰包络反应的是长周期光栅透射光谱。长周期光栅处于控温区外,温度没有发生变化,其光谱不会发生移动,因此谐振小峰的包络外形并没有发生移动。当控温区温度改变

的时候,因为光纤的芯模和包层模的有效折射率具有不同的温度系数,相当于改变了迈克耳孙干涉仪的光程差,于是包络内的干涉小峰就发生移动,由于变化量很小,因此干涉峰间距的变化几乎分辨不出。图 6 是进行温度调谐时所测得的包络中心附近谐振小峰波长的变化情况。从图中可以看到随着温度的升高,谐振小峰都往长波方向移动,实验测得波长的移动量和温度的改变量有着很好的线性关系,而且

四个小峰的温度系数几乎相同,约为 $31.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,小于常规单模光纤上长周期光纤光栅的温度系数( $50\sim 150 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ )。理论上谐振小峰与长周期光纤光栅的温度系数应成 $L_1/[L+(4/\pi)d]$ 的比例关系( $L_1$ 是控温区长度)。根据实验数据计算得到的长周期光纤光栅温度系数与实际数值基本一致。

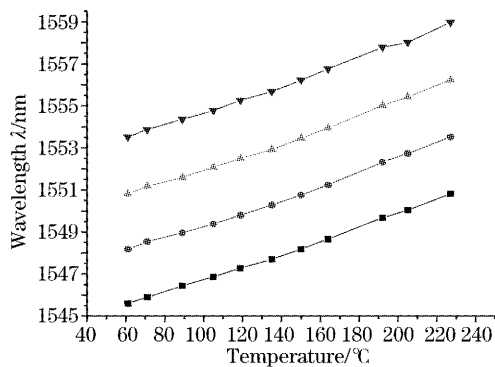


图 6 长周期光纤光栅迈克耳孙干涉仪干涉小峰的温度系数

Fig. 6 Temperature coefficient of the fringe in LPFG Michelson interferometer

将紫外写入的光纤光栅应用于温度传感时,如果测量温度过高就会引起光栅的退火效应<sup>[11]</sup>,导致传感器失效。而裸光纤本身能够承受很高的温度,如果仅本干涉仪的反射端光纤段用作温度传感区,那么就可以消除掉光纤光栅不能直接进行高温传感的缺陷。使用时,将反射端附近的一段裸光纤放置于被测区域内,只需检测长周期光栅谐振峰中心波长的变化曲线就可以得到被测的温度。

## 4 结 论

分析了一个由尾端镀膜的单根普通长周期光纤光栅构成的长周期光栅迈克耳孙干涉仪的特性。通过理论计算分析了各个因素对光谱响应的影响,为优化干涉仪提供了理论依据。并在实验上实现了通

过对光纤段进行温度调谐,得到了光谱的谐振小峰波长移动与温度变化的良好的线性关系,测量得到了 $31.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的温度响应。这种结构克服了紫外光折变光纤光栅的高温漂白等缺点,有望成为适用于较高温度环境下的温度传感技术方案。

## 参 考 文 献

- 1 Qu Ronghui, Zhao Hao, Fang Zujie. Long-period fiber grating: Imprinting technologies and applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1999, **12**(1): 8~13 (in Chinese)  
瞿荣辉,赵浩,方祖捷. 长周期光纤光栅的制作方法和应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 1999, **12**(1): 8~13
- 2 Gao Kan, Zhou Yingwu, Lin Feng *et al.*. A novel pressure sensor based on long period fiber grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 997~1000 (in Chinese)  
高侃,周赢武,林峰等. 基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 997~1000
- 3 X. J. Gu. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 509~510
- 4 Young-Geun Han, Byeong Ha Lee, Won-Taek Han *et al.*. Fibre-optic sensing applications of a pair of long-period fibre gratings [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**: 778~781
- 5 Byoung-ho Lee, Yong Wook Lee, Jaehoon Jung. Application of long-period fiber grating pair interferometers for sensors and communications[R]. *LEOS2002*, 1: 171~172
- 6 B. H. Lee, J. Nishii. Temperature sensor using the self-interference of a long-period fiber grating[R]. *Proc. Optical Fiber Sensors*, 1999, **13**: 418~421
- 7 Kan Gao, J. X. Geng, A. B. Yu *et al.*. Characteristics of metal-coated long-period fiber gratings[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4904**: 166~171
- 8 Y. Liu, J. A. R. Williams, L. Zhang *et al.*. Phase shifted and cascaded long-period fiber gratings[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**: 27~31
- 9 H. Ke, K. S. Chiang, J. H. Peng. Analysis of phase-shifted long-period fiber gratings[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1596~1598
- 10 He Wanxun, Shi Wenkang, Ye Ailun. Modes and couplings of long period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 302~306 (in Chinese)  
何万迅,施文康,叶爱伦. 长周期光纤光栅模式与耦合的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 302~306
- 11 Gao Kan, Cai Haiwen, Chen Gaoting *et al.*. A novel method of improving the thermal stability of LPFG[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1076~1080  
高侃,蔡海文,陈高庭等. 一种改善长周期光纤光栅热稳定性的方法[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1076~1080