

文章编号: 0258-7025(2005)04-0553-04

长周期光纤光栅波导色散因子和有效折射率 热光系数的测量

高 侃, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要 对串联的长周期光纤光栅(CLPFG)的透射谱特性进行了理论分析和实验研究。分析表明,长周期光纤光栅中纤芯模和包层模之间的马赫-曾德尔干涉效应导致在长周期光纤光栅谐振峰内的梳状滤波结构特性;其峰值位置和峰间距同串联区光纤的长度以及光纤的波导色散因子有关。测量了长周期光纤光栅的透射谱,并研究了其温度特性。根据测量数据,得到对应于 1554 nm 波长处,所用单模光纤 HE₁₄ 模的波导色散因子 γ 为 0.874;纤芯/包层有效折射率差的热光系数为 $4.8 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。并对这一测试方法和结果,以及长周期光纤光栅的应用进行了讨论。

关键词 光纤光学; 串联长周期光纤光栅; 波导色散因子; 热光系数

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

Method of Measuring the Waveguide Dispersion Factor and the Thermo-Optic Coefficient of Effective Refractive Index of Long-Period Fiber Gratings

GAO Kan, FANG Zu-jie

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

Abstract Based on the Mach-Zehnder interference effect between the core mode and the cladding modes, the interference fringes are formed by a pair of cascaded long-period fiber gratings (CLPFG). It is found that the spectral spacing and the wavelength of these fringes are related to the absolute value of waveguide dispersion factor of LPFG. So by measuring the characteristics of the transmission spectra of CLPFG, the absolute value of waveguide dispersion factor $|\gamma|$ can be deduced. At the same time, the thermo-optic coefficient of effective refractive index μ can also be deduced by measured the thermo-effect of these fringes. By this method, at the wavelength of 1554 nm, the values of γ of HE₁₄ cladding mode and μ are calculated to be 0.874 and $4.08 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, respectively.

Key words fiber optics; cascaded long-period fiber gratings (CLPFG); waveguide dispersion factor; thermo-optic coefficient

1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)作为一种基于纤芯模和同向传输的包层模之间耦合的损耗型光纤滤波器,已在光纤通信和光纤传感领域得到了广泛的应用^[1~3]。将两根具有相同特性的长周期光纤光栅串联起来,并剥去串联区光纤的涂敷层,那么在光栅的每个谐振峰内将会由于纤芯模和包层模之间干涉的马赫-曾德尔效应而产生很多的小谐振峰。这种现象最早是由 X. J. Gu 报道的^[4]。这种结构的长周期光纤光栅可以被

用作为波分复用(WDM)系统中的梳状滤波器,也可以被用作温度、应力、弯曲传感器。B. H. Lee 对这种现象进行了详细的理论解释,并将这种结构加以改进,应用于温度的传感^[5,6]。

X. W. Shu 等^[7]首先提出了波导色散因子 γ 的概念,并据此分析了长周期光栅的温度、应力、折射率的敏感特性。 γ 值的大小与波导的物理参数、包层模的阶次、波长都有关,计算比较复杂;也不能通过长周期光纤光栅的温度效应和应变效应直接测

收稿日期: 2004-04-20; 收到修改稿日期: 2004-06-16

作者简介: 高 侃(1975—),男,江苏人,中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室博士研究生,主要从事光纤光栅在光通信和光传感领域的应用研究。E-mail: gaokan@mail.siom.ac.cn

量 γ 值。本文通过理论推导,发现串联长周期光纤光栅 (CLPFG) 的特性也同这个因子有密切的关系,并提供了一种直接测量波导色散因子绝对值和纤芯/包层有效折射率差热光系数的方法。

2 理论分析

根据耦合模理论和光纤基模与包层模的传输特性,分析如图 1 所示的串联长周期光纤光栅结构的传输特性,可以得到,在两个长周期光纤光栅特性相同的情况下,串联后的光振幅变化为^[5]

$$\frac{A(L+2d)}{A(0)} = \left[\cos^2 sd + \left(\frac{\Delta\beta}{s} \right)^2 \sin^2 sd \right] \times \exp(i\Psi) - \alpha \frac{\kappa\kappa^*}{s^2} \sin^2 sd = T_s \exp(i\Psi) - \alpha(1 - T_s), \quad (1)$$

式中

$$\Delta\beta = \frac{1}{2} \left(\beta_{\text{core}} - \beta_{\text{clad}} - \frac{2\pi}{\Lambda} \right) = \pi \left(\frac{n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}}{\lambda} - \frac{1}{\Lambda} \right),$$

$$s^2 = \kappa\kappa^* + \Delta\beta^2,$$

Λ 为光栅周期, κ 为耦合系数, β 为传播常数, L 为两光栅之间串联区的长度, d 为光栅的长度。 α 为串联区包层模的损耗系数, 在没有损耗的时候, $\alpha = 1$; 而完全损耗的时候, $\alpha = 0$ 。 T_s 为单个光栅的透过率, 相位因子 Ψ 可以表示为

$$\Psi = \Phi_{\text{in}} + \Phi_{\text{out}} = \Phi_{\text{in}} + (\beta_{\text{core}}^{\text{out}} - \beta_{\text{clad}}^{\text{out}})L, \quad (2)$$

Φ_{out} 为串联区的相移量, Φ_{in} 为由两个光栅区引起的相移的总和, 它满足关系

$$\tan(\Phi_{\text{in}}/2) = \frac{\Delta\beta}{2s} \tan(sd), \quad (3)$$

透射光强的光谱为

$$I(L+2d)/I(0) = T_s^2 + \alpha^2(1 - T_s)^2 - 2\alpha T_s(1 - T_s)\cos\Psi.$$

透射极大的波长位置在: $\Psi = (2m+1)\pi$; 透射率达到 $[T_s + \alpha(1 - T_s)]^2$ 。透射极小的波长位置在 $\Psi = 2m\pi$; 透射率为 $[T_s - \alpha(1 - T_s)]^2$ 。透射率变化的幅度为 $4\alpha T_s(1 - T_s)$ 。可见, 当 $T_s = 0.5$ 时, 干涉幅度达到极大, 为 α 。由于这种情况更为人们所关注, 下

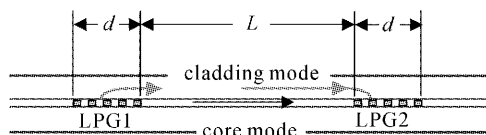


图 1 串联长周期光纤光栅示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CLPFGs

面就针对这种理想情况进行讨论。

对于光栅的折射率调制幅度较小, $T_s = 0.5$ 的情况, Φ_{in} 在一阶泰勒近似下可以表示为 $\Phi_{\text{in}} \approx \frac{4}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} d - \frac{4d}{\Lambda}$ 。同时, 在串联区长度 L 远大于光栅长度 d 的情况下, 可近似认为纤芯模和包层模的有效折射率差 Δn_{eff} 在光栅区内和区外基本相等, 相位因子可以简化为 $\Psi \approx \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}} \left(L + \frac{4}{\pi} d \right) - \frac{8d}{\Lambda}$ 。这样, 由相位因子的表达式, 可以得到串联长周期光纤光栅透射谱的干涉条纹间距

$$S = 2\pi \left| \frac{d\Psi}{d\lambda} \right|^{-1} = \frac{\lambda^2}{\left| \Delta n_{\text{eff}} - \lambda(\partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial \lambda) \right| \left[L + (4/\pi)d \right]}, \quad (4)$$

代入长周期光纤光栅峰值波长的基本关系 $\lambda_c = \Lambda \Delta n_{\text{eff}}$, 可得

$$S = \frac{\lambda_c^2}{\left| \lambda_c / \Lambda - \lambda(\partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial \lambda) \right| \left[L + (4/\pi)d \right]} \approx \frac{\lambda \Lambda}{\left| 1 - \Lambda(\partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial \lambda) \right| \left[L + (4/\pi)d \right]} = \frac{|\gamma| \lambda \Lambda}{L + (4/\pi)d}, \quad (5)$$

式中 γ 为长周期光纤光栅的波导色散因子, 它定义为

$$\gamma = [1 - \Lambda(\partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial \lambda)]^{-1}. \quad (6)$$

波导色散因子 γ 在长周期光纤光栅基本特性的理论分析中具有十分重要的意义^[5]。在描述长周期光纤光栅写入过程中峰值波长和幅度变化规律的方程中, 在长周期光纤光栅的温度调谐特性、应变调谐特性等效应的理论公式中, 波导色散因子都有很大的影响。长周期光纤光栅损耗峰峰值波长的温度关系就正比于波导色散因子

$$\frac{d\lambda_c}{dT} = \gamma(\eta + \mu)\lambda_c, \quad (7)$$

式中 η 为光纤材料的热膨胀系数; $\mu = (\Delta n_{\text{eff}})^{-1}(\partial \Delta n_{\text{eff}} / \partial T)$, 为 Δn_{eff} 的热光系数。由于 η 约为 $5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 远小于 μ , 往往可以忽略不计。理论计算和实验测试表明, 波导色散因子的数值同光纤的参数、包层模的阶次以及波长都有关系, 可正可负, 其数值变化范围很大。而且, 对于较大的温度和应变范围, γ 本身也是温度和应变的函数。因此, 使长周期光纤光栅呈现十分复杂多变的特性。它不能从长周期光纤光栅温度或应变调谐特性单一参数测试中计算出来。而从(5)式可以看到, 通过测量串联长周期光纤光栅的条纹间距, 可以算出相应谐振

峰的波导色散因子的绝对值 $|\gamma|$

$$|\gamma| = S \left(L + \frac{4}{\pi} d \right) / (\lambda \Delta). \quad (8)$$

而 γ 的符号可以通过观测光栅制作过程中谐振波长的移动方向来确定。当谐振波长往长波方向移动则符号为正,反之则为负。

利用上面的结果还可以分析出串联长周期光纤光栅谐振波长的温度特性。考虑改变串联区一段长度光纤 L_1 的温度,由于马赫-曾德尔干涉仪两臂(纤芯和包层)的光程差发生变化,干涉峰和谷的波长位置将随之发生位移,其温度系数可以由干涉峰表示式 $\Psi = 2m\pi$ 求导得到(忽略光纤的热膨胀系数)

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \frac{\gamma \Delta L_1}{L + (4/\pi)d} \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}}{\partial T} = \gamma \mu \lambda_c \frac{L_1}{L + (4/\pi)d}, \quad (9)$$

根据所测得的温度系数,在(9)式中代入 γ 值,可以得到纤芯/包层有效折射率差的热光系数 μ 。

3 实验方法和结果

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 HE_{13} 和 HE_{14} 的第 3,4 个谐振峰的中心波长分别为 1434 nm 和 1554 nm 。其中第 4 个谐振峰的损耗约为 3 dB 。将两根这样的长周期光栅串联在一起并保持拉直状态,串联区的光纤被剥去了涂敷层。

实验中分别采用了 4 种不同的串联长度测试了其透射谱,并采用半导体致冷器的温控装置对串联区中的 8 cm 长的光纤进行了温度调节,测量干涉峰的温度系数。由于长周期光纤光栅的温度没有发生改变,所以谐振小峰的包络外形并没有发生改变。当串联区局部的温度改变的时候,包络内的干涉峰发生移动。图 2 为串联区长度为 27 cm 的情况下(室温下)所测得的串联光栅的透射谱,图 3 是对 8 cm 串联区在 $-10 \text{ }^\circ\text{C} \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内进行温控所测得的谐振小峰波长的变化情况。表 1 为实验所测得的数据,均为处于谐振包络中心波长附近谐振小峰的测量值。波导色散因子是根据(8)式利用所测得的波长间隔计算出来的(光栅刻制时观测到谐振峰红移,所以 γ 的符号也为正)。而 μ 是根据(9)式利用实验结果所计算出来的。根据表 1,得到实验所用光纤的 HE_{14} 包层模的波导色散因子的平均值为 0.874 ± 0.020 。纤芯/包层模有效折射率差的热光系数的平均值为 $(4.08 \pm 0.23) \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,数据误

差为均方根值。实验中发现,随着温度的改变,波长间隔并没有发生显著的变化。为便于比较,测量了该长周期光纤光栅的第 4 个谐振峰的温度系数,实验测定值为 $0.059 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

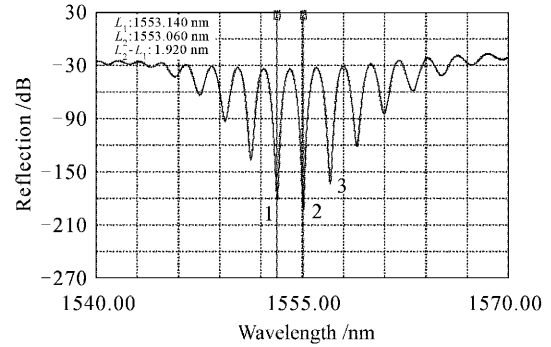


图 2 串联长周期光纤光栅的透射光谱
(串联区长度为 27 cm)

Fig. 2 Spectrum of CLPFG (the separation of gratings is 27 cm)

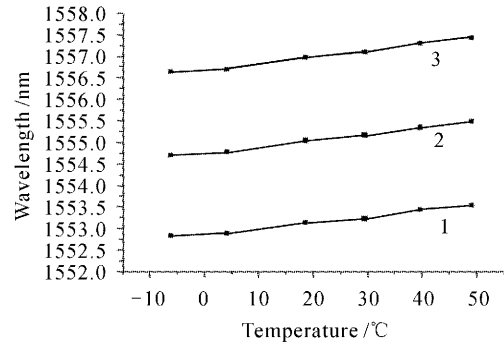


图 3 串联长周期光纤光栅干涉峰波长与温度的关系
(串联区长度为 27 cm)

Fig. 3 Temperature induced fringe-shift of CLPFG
(the separation of gratings is 27 cm)

表 1 不同串联长度情况下所测得的实验值
Table 1 The experimental results with different separation of gratings

L / cm	Wavelength interval / nm	γ	Temperature coefficient / $(\text{pm}/^\circ\text{C})$	$\mu / (10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$
42.7	1.24	0.847	9.1	4.13
32	1.68	0.891	12.1	4.05
27	1.92	0.881	12.8	3.75
21	2.28	0.851	17.8	4.39

4 讨论和结论

直接测量光纤波导色散因子和有效折射率热光系数的方法基于理论分析。在公式的推导中作了若

干近似和简化。第一,光栅区内的相移在弱光栅的情况下将近似为 $\Phi_{in} \approx \frac{4}{\lambda} \Delta n_{eff} d - \frac{4d}{\Lambda}$ 。第二,在长周期谐振峰带宽不是很大的情况下将 λ_c/λ 近似为 1。第三,光栅区和串联区的纤芯/包层有效折射率差 Δn_{eff} 近似地取为相等。在这些近似条件下,谐振包络内的小峰间隔可以认为是一致的,而在实际的测量中发现小峰的间隔略有差别,但差别比较小。文献[5]对此有详细的论述。为了能够得到较准确的计算值,采用处于谐振包络中心波长附近谐振小峰的测量值。

为了分析近似公式可能带来的误差,进行了数值模拟。纤芯和包层材料在 1554 nm 处的折射率分别选为 1.4681 和 1.4628,纤芯和包层的半径分别为 4.15 μm 和 62.5 μm ,光栅的周期为 450 μm ,为了能让第 4 个峰波长达到 1554 nm,紫外光照射过后的纤芯平均折变量被设定为 1.8×10^4 。通过数值计算得到光栅区内的有效折射率差为 3.4×10^{-3} ,串联区内的有效折射率差为 3.314×10^{-3} ,二者相差 4%。这说明将光栅区和串联区的纤芯/包层有效折射率差 Δn_{eff} 近似地取为相等是可行的。同样通过模拟计算可以知道,在 $L > 5d$ 的情况下,采用近似式(5)计算小峰间距所带来的误差小于 4%。

从表 1 可看到,在不同串联长度的情况下,所计算出的 γ 值并不完全一致,这是由实际测量时光谱仪的分辨率较低以及采用近似公式造成的。根据(7)式和(9)式,可以看到温度系数比为 $L_1/[L+(4/\pi)d]$,这与实验测得值是一致的。

该串联结构还可能在梳状滤波器、温度和应力

传感等方面得到应用。但是应用于温度传感时,如果测量温度过高就会引起光栅的退火效应,导致传感器失效。而裸光纤本身能够承受很高的高温,如果仅将串联长周期光纤光栅的串联区用作温度传感区,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,将串联区的一段放置于被测区域内,只需检测长周期光栅谐振峰中心波长 λ_c 处光功率变化的曲线就可以知道被测的温度。

参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~64
- 2 Wang Yiping, Rao Yunjiang, Hu Aizi *et al.*. A novel long-period fiber grating torsion sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1096~1099
王义平,饶云江,胡爱姿等. 长周期光纤光栅扭曲传感器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1096~1099
- 3 Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling *et al.*. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single long-period fiber grating element[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12): 1116~1120
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
- 4 X. J. Gu. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber grating [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 509~510
- 5 B. H. Lee, J. Nishii. Dependence of fringe spacing on the grating separation in a long-period fiber grating pair [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3450~3459
- 6 B. H. Lee, J. Nishii. Self-interference of long-period fibre grating and its application as temperature sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(21): 2059~2060
- 7 X. W. Shu, L. Zhang, I. Bennion *et al.*. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2): 255~266