

复合型双周期光纤光栅的理论实验研究^{*}

王目光[†] 魏 淮 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)
(2002 年 6 月 21 日收到, 2002 年 7 月 28 日收到修改稿)

报道一种新型结构的复合型双周期光纤光栅, 利用耦合模理论给出了其分析模型, 同时数值模拟了频谱响应特性, 并将其应用于温度应变传感系统中.

关键词: 光纤光栅, 耦合模理论, 传感系统

PACC: 4281 A281W A281P A280

1. 引 言

光纤光栅技术在近 10 年来得到了快速发展, 基于光纤光栅的各种器件(激光器、波分复用器、色散补偿器、滤波器和传感器)被广泛应用于光通信系统和传感领域中^[1,2]. 近来, 密集波分复用系统的发展, 双波长甚至多波长等各种结构的光纤光栅也相继而出. 尤其是光传感领域, 双波长光纤光栅巧妙地解决了一直让人困扰的温度应变交叉敏感问题, 从而获得广泛的研究和重视^[3,4]. 然而已报道的双波长光纤光栅皆为双布拉格光纤光栅, 由于两光栅周期大小相近, 这就造成了光栅写入的困难, 且该光栅的双布拉格波长对温度应变具有很小的敏感差异, 导致该结构的温度应变传感器测量精度较低. 基于此, 我们结合长周期光纤光栅(long period fiber grating, LPG)和短周期光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)对温度应变相差较大的敏感特性^[5], 提出了一种新颖结构的复合型双周期光纤光栅(compound dual-period fiber grating, CDPFG), 它是在同一段光敏光纤上利用紫外写入技术先后写入长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅复合而成. 本文以耦合模理论为基础, 给出其频谱分析模型, 对比实验结果, 验证了模型的正确性, 并采用自行研制的复合型双周期光纤光栅应用于温度应变双参量传感系统中, 实验结果表明, 它

具有高的测量精度和大的测量范围, 是一个很有发展前景的光纤器件.

2. 复合型双周期光纤光栅理论模型

所谓复合型双周期光纤光栅是指在光纤的同一段位置上先后写入短周期光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅, 亦即该段光纤芯层折射率具有两个不同调制周期和调制深度, 所以它同时具有短周期光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅的特点, 从而表现出复杂的频谱响应特性.

根据折射率调制周期和方向的不同, 光栅中的模式耦合可分为以下三种情况: 1) 正向基模和反向基模之间的耦合, 折射率调制周期一般为 $0.5\mu\text{m}$ 左右, 此即为布拉格光栅. 2) 正向导波模和反向包层模之间的耦合, 折射率调制与纵轴有一定的夹角, 此光栅为倾斜布拉格光栅. 3) 正向导波模和正向包层模之间的耦合, 折射率调制周期较长, 一般在 $200\sim 500\mu\text{m}$ 之间, 所以称为长周期光纤光栅. 双波长布拉格光栅中模式之间的耦合仅发生在基模与反向基模之间, 在文献[6,7]中已有相应的矩阵理论分析. 本文提出的复合型双周期光纤光栅由于折射率调制周期的不同, 正向传输的导模不仅与反向基模耦合, 还与同向包层模发生耦合, 由于光栅内发生多个模式之间的复杂耦合, 文献[6,7]中的矩阵分析将不适用. 因为紫外光引起的折射率变化相比芯、包层折射

^{*} 国家自然科学基金(批准号 69907001)资助的课题.

[†] E-mail: wangmuguang@263.net

率差, 可以看作微扰, 所以本文采用耦合模理论, 数值计算出了光栅的频谱响应, 并讨论对比了实验结果.

2.1. 耦合模方程

复合型双周期光纤光栅和芯层折射率调制示意图如图 1 (a) 和 (b) 所示. 它是两个不同周期和深度的折射率调制之和, 即

$$\delta n = \delta n_1 (1 + v_1 \cos(2\pi z/\Lambda_1)) + \delta n_2 (1 + v_2 \cos(2\pi z/\Lambda_2)), \quad (1)$$

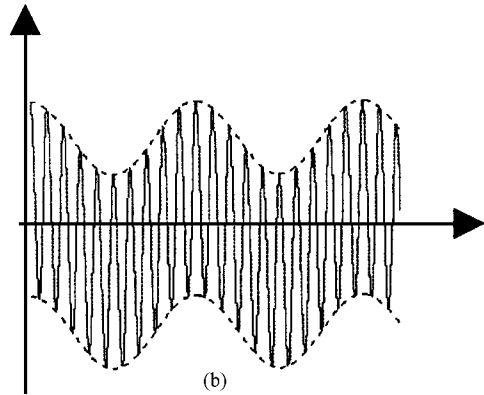
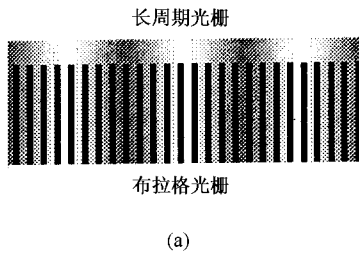


图 1 复合型双周期光纤光栅结构 (a) 和芯层折射率调制 (b) 示意图

$$\begin{aligned} \frac{da_1}{dz} - i\beta_1 a_1 &= i \left(K_{01-01} a_1 + \sum_{v=2} K_{01-0v} c_v + K_{01-01} b \right), \\ \frac{db}{dz} + i\beta_1 b &= -i \left(K_{01-01} a_1 + K_{01-01} b \right), \quad (2) \\ \frac{dc_v}{dz} - i\beta_v c_v &= i K_{0v-01} a_1, \end{aligned}$$

其中 $a_1, c_v (v=2, 3, \dots), b$ 分别为基模、包层模和反向基模, 可写为

$$\begin{aligned} a_1 &= A_1 \exp(i\beta_1 z), \\ b &= B \exp(-i\beta_1 z), \\ c_v &= C_v \exp(i\beta_v z), \end{aligned} \quad (3)$$

A_1, B, C_v 为模式振幅, $\beta_i (i=1, 2, \dots)$ 为模式的传播常数, K_{01-0v}, K_{0v-01} 为基模 LP_{01} 、包层模 LP_{0v} 之间的耦合系数, 忽略纵向分量之间的耦合, 选择合适的坐标系, 可表示为^[9]

$$\begin{aligned} K_{01-0v} = K_{0v-01} &= \frac{\omega\epsilon_0}{4} \iint_{\infty} \hat{e}_{01}^{t*} \\ &\times \hat{e}_{0v}^t \cdot 2n\delta n dx dy, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\hat{e}_{0v}^{t*}$ 为基模 ($v=1$)、包层模 ($v=2, 3, \dots$) 归一化

其中 z 为光场的传输方向, $\delta n_1, \delta n_2$ 指平均折射率调制, 调制周期分别为 Λ_1, Λ_2 ; v_1, v_2 为两光栅的调制系数. 因为我们所考虑的两调制周期相差较大, 不妨认为其调制相位相等且假设为零. 1 为短周期光栅调制, 2 为长周期光栅调制, 亦即 $\Lambda_1 \ll \Lambda_2$.

忽略基模与反向包层模、包层模之间的耦合, 假设只有基模、反向基模和同向包层模三种模式之间发生耦合, 则耦合模方程可写为^[8]

模场分布. 将 (1) 式代入 (4) 式, 并令

$$k_{01-0v} = \frac{n\omega\epsilon_0}{2} \iint_{\infty} \hat{e}_{01}^{t*} \cdot \hat{e}_{0v}^t dx dy,$$

则有

$$\begin{aligned} K_{01-0v} &= (\delta n_1 + \delta n_2) k_{01-0v} + \delta n_1 v_1 \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda_1}\right) k_{01-0v} \\ &+ \delta n_2 v_2 \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda_2}\right) k_{01-0v}. \end{aligned} \quad (5)$$

将模式表达式 (3)、耦合系数方程 (5) 代入耦合方程组, 忽略快变项 (沿 z 方向), 有如下方程:

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{dz} &= iA_1 k_{01-01} + \sum_{v=2} C_2 k_{01-0v} \delta n_2 v_2 \exp(i\delta_v z) \\ &+ B k_{01-01} \delta n_1 v_1 \exp(i\delta_1 z), \\ \frac{dB}{dz} &= A_1 k_{01-01} \delta n_1 v_1 \exp(-i\delta_1 z) - i k_{01-01} B, \\ \frac{dC_v}{dz} &= A_1 k_{0v-01} \delta n_2 v_2 \exp(-i\delta_v z), \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\delta_1 = \frac{2\pi}{\Lambda_1} - 2\beta_1$, $\delta_v = \frac{2\pi}{\Lambda_2} + \beta_v - \beta_1$, 其物理意义表示两个传导模式的相位失谐. (6) 式即为我们仿真所依据的复合型双周期光纤光栅耦合模方程. 由于该方程组难以求出解析解, 在给定边值条件下可以利

用数值积分进行迭代求解。

2.2. 数值计算

下面将根据方程组(6)计算该光栅的频谱响应特性,设该光栅的长度为 L ,由于在普通单模光纤中传输的只有基模,我们关心的是光栅基模透射率 $(|A_1(L)|^2/|A_1(0)|^2)$ 随波长的变化关系,也就是光栅的滤波特性。为了与实验结果进行比较,计算过程中选用了去除涂覆层后的普通氢载光敏光纤(Corning公司SMF-28™型号光纤),其具体折射率剖面分布如图2所示。(该结果是由折射率分布分析仪NR-9200(EXFO公司)实验测量获得。)由图2可认为其为阶跃光纤,具体参数分别为:芯层折射率 $n_1=1.461$,芯层半径 $a_1=4.15\mu\text{m}$,包层折射率 $n_2=1.455$,包层半径 $a_2=58.35\mu\text{m}$,最外层为测量时的匹配液折射率。双周期光纤光栅的耦合一般发生在基模(HE_{11})与基模、基模与一阶包层模(HE_{1v})之间,即标量模 LP_{01} — LP_{0v} 之间,同时考虑计算精度与代价,可以利用弱导条件,采用三包层标量近似来计算传输常数和模场分布^[8],从而求出模式之间的耦合系数。然后利用数值积分中的迭代公式求解耦合模方程,由于布拉格光栅即周期为 Λ_1 的折射率调制仅相对谐振波长附近属于慢变项,在其他波长范围内可在快变近似条件下忽略,仅考虑其平均折射率调制项,数值计算结果如图3所示。选用光栅参数: $L=4\text{cm}$, $\delta n_1=\delta n_2=5\times 10^{-6}$, $v_1=50$, $v_2=26$, $\Lambda_1=0.5286\mu\text{m}$, $\Lambda_2=420\mu\text{m}$ 。为了与实验数据比较,图3内插图为在可用光源测试范围内放大的透射谱曲线,与所制作的光纤光栅透射谱对比(见图5),发现基本符合。

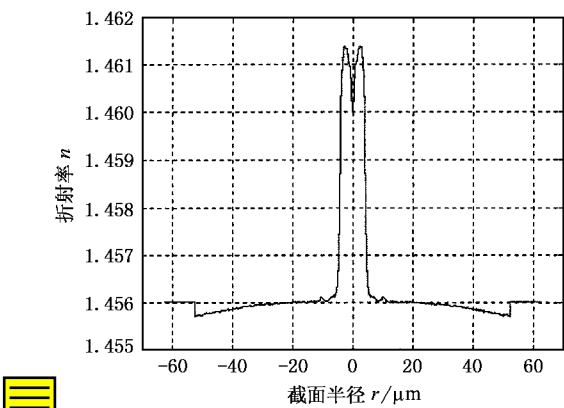


图2 光纤折射率剖面分布

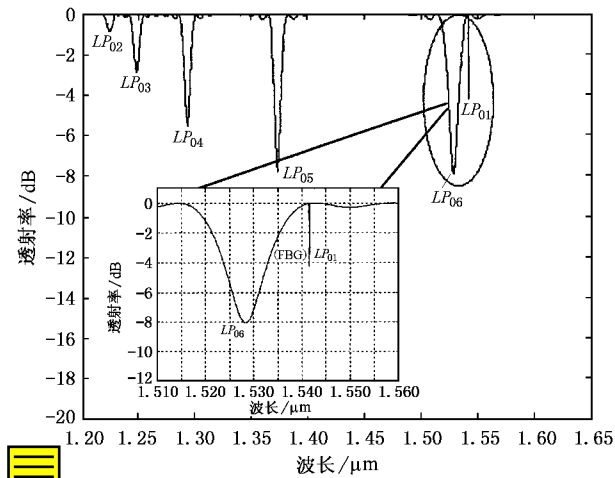


图3 数值计算的复合型双周期光纤光栅透射谱

由图3可以看出,折射率调制周期为 Λ_2 的长周期光纤光栅在该光谱范围内有多个谐振峰,且耦合强度随包层模阶次的升高而增大,这主要是由 $\delta n_2 \cdot L$ 值决定的。数值计算中发现,随 $\delta n_2 \cdot L$ 值的变化,与基模耦合最强的包层模阶次也在相应改变。这是因为 $\delta n_2 \cdot L$ 值的改变,将导致 $K_{01-0v} \cdot L$ 值变化,当 $K_{01-0v} \cdot L = \frac{\pi}{2}$ 时,基模耦合到 v 阶包层模的能量最强,而当 $K_{01-0v} \cdot L > \frac{\pi}{2}$ 时,发生了反向耦合,能量又从 v 阶包层模耦合入基模中,从而基模与 v 阶包层模的耦合峰值将会随之发生周期性变化。在弱导近似计算光纤包层模式有效折射率时可知 $n_v^{\text{eff}} < n_{v-1}^{\text{eff}}$,由耦合系数表达式得 $K_{01-0v} > K_{01-0v-1}$,因此随 $\delta n_2 \cdot L$ 值的增大,包层模按阶次从大到小的顺序依次与基模发生最强耦合。

另外,数值计算中改变其中一个折射率调制参数,调制周期或深度,发现除了由本调制周期所形成的谐振峰位置和大小有明显改变,基本对透射谱无影响。亦即在光栅写入过程中,在同一点写入的短周期光纤光栅与长周期光纤光栅相互之间基本上无影响,可以认为是性能的简单叠加。其成因从物理机理上我们试图给出以下解释:由于短周期光纤光栅和长周期光纤光栅折射率调制周期相差较大,约3个数量级,因此短周期和长周期折射率调制可相互看作芯径的平均折射率变化,只是使光栅谐振峰轻微向长波长移动,透射谱形状基本不变,这也为复合型双周期光纤光栅的易于制作性提供了理论依据。在同一段光纤上二次写入光纤光栅时,不必考虑其对

已写光栅透射谱的影响. 这与双布拉格周期光栅不同, 由于双布拉格光栅两个周期比较相近, 在满足相位干涉条件下透射谱将会发生大的变化^[4].

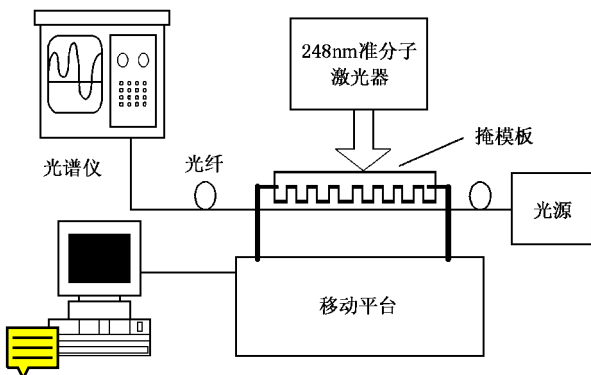


图4 复合型双周期光纤光栅写入实验装置示意图

3. 复合型双周期光纤光栅的制作

因为长周期光纤光栅的折射率调制周期远远大于均匀布拉格光栅, 从理论上采用紫外曝光技术易于实现光纤折射率的二次调制, 在长周期光纤光栅上实现短周期布拉格光栅的重复写入具有易操作性. 图4为采用紫外曝光扫描法制作双周期光纤光栅示意图. 来自 KrF 准分子 248nm 激光脉冲经过整形聚焦后, 通过相位或振幅掩模板, 对去掉涂敷层的氢载光敏光纤进行紫外曝光, 通过计算机控制移动平台系统, 精确控制光纤的曝光长度和曝光量. 光栅的周期由掩模板决定, 通过控制移动平台速度、时间和激光脉冲能量, 控制光栅透射率和带宽, 并可适量小范围地调整谐振波长. 实验中所用光纤是由 Corning 公司 SMF-28™ 普通单模光纤在室温和 1.1×10^7 Pa 大气压下氢载处理 8 周而成. 首先利用周期为 $422\mu\text{m}$ 的振幅掩模板在光纤上写入长度为 2cm 的长周期光栅, 随后在同一区域上将 1028nm 周期的相位掩模板替换振幅掩模板, 并同时调整脉冲能量和移动平台速度, 二次写入短周期光纤布拉格光栅. 图5为利用 ELED(edge-emitting LED)宽带光源在 AQ6317 光谱仪 OSA(optical spectrum analyzer)观测到的经过高温退火后的双周期光纤光栅透射谱, 光谱仪分辨率选择 0.05nm. 与图3相比, 基本符合, 只是在透射深度上存在差异, 这主要是由于光纤氢载量和曝光量的不确定性造成的. 另外, 紧靠短周期中心波长附近, 有一个较明显的旁瓣. 据实验和理论分析, 我们认为这主要是写入短周期光栅时, 平均曝光量较大,

导致芯层平均折射率变化明显造成的. 这种频谱恶化现象可以采用长度切趾的方法来避免.

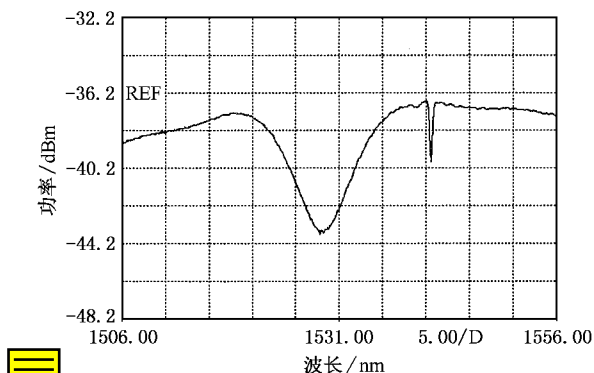


图5 复合型双周期光纤光栅透射谱

在写入短周期光纤布拉格光栅的实验过程中, 我们发现长周期光纤光栅的谐振波长也同时出现相对明显的红移现象, 约向长波长移动 12nm 左右, 而改变写入的先后顺序, 长周期光纤光栅写入过程中短周期光纤布拉格光栅波长基本无变化. 这主要是两个原因引起的. 第一, 短周期光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅具有不同的耦合机理, 纤芯平均折射率的增大, 将会改变其相位失谐函数 δ_v , 相位匹配条件在原谐振波长处不再满足, 因为波长变化时在长周期光纤光栅中两耦合模的传输常数 β_1, β_v 同向变化, 而短周期光纤布拉格光栅中两模式传输常数 $\beta_1, -\beta_1$ 反向变化, 在短周期光纤布拉格光栅波长轻微增加就可实现相位的重新匹配, 长周期光纤光栅则需要大的波长移动. 第二, 短周期光纤布拉格光栅的写入是利用相位掩模板后的同相位相干增强而成的场, 具有很大的曝光能量, 明显改变了氢载光纤的芯层平均折射率, 使长周期光纤光栅谐振波长向长波长有所移动. 而激光脉冲通过振幅掩模板后是光场的简单叠加, 相对能量较弱, 从而芯层的平均折射率变化不大, 短周期光纤布拉格光栅波长基本不变. 因此, 为了易于控制光栅频谱特性, 我们写入时采用短周期光纤布拉格光栅、长周期光纤光栅的先后顺序.

4. 应用: 双周期光纤光栅温度应变传感系统

光纤光栅传感器由于其体积小、灵敏度高、波长编码抗电磁干扰能力强等诸多优点, 一直受着广泛

的关注.其机理是基于光纤光栅布拉格波长的变化直接对应着传感量的变化,然而在被测环境中光栅布拉格波长同时响应温度和应变的变化.这就不可避免地出现温度应变交叉敏感问题,而我们所提出的该结构的复合型双周期光纤光栅恰好巧妙地解决了这一问题.理论和实验都已表明:短周期光纤布拉格光栅波长变化对应变较敏感($0.001\text{nm}/\mu\epsilon$),约为长周期光纤光栅的两倍;而长周期光纤光栅对温度非常敏感($0.07\text{nm}/^\circ\text{C}$),约为短周期光纤布拉格光栅的 7 至 8 倍^[5].长周期光纤光栅谐振波长 λ_L 和短周期光纤布拉格光栅波长 λ_B 与温度和应变的关系可以表示为

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_B &= K_{\epsilon_B}\epsilon + K_{TB}\Delta T, \\ \Delta\lambda_L &= K_{\epsilon_L}\epsilon + K_{TL}\Delta T,\end{aligned}\tag{7}$$

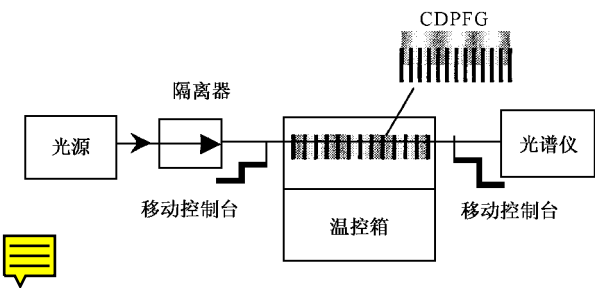


图 6 复合型双周期光纤光栅温度应变传感器

其中 ϵ 和 ΔT 分别为应变和温度变化量; K_{ϵ_B} 、 K_{TB} 、 K_{ϵ_L} 、 K_{TL} 分别为短周期光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅的应变温度系数,其大小主要由光纤光栅的

材料、光栅周期决定。(7)式有解的条件 $\Delta = K_{\epsilon_B}K_{TL} - K_{\epsilon_L}K_{TB} \neq 0$,通过以上分析,显然条件满足.因此我们通过读取该双周期光纤光栅的两个谐振波长的变化,利用方程组(7)就可以同时计算出温度和应变的变化值.利用单个光栅解决了传统中需要两个光栅克服的温度应变双参量传感系统,有效地降低了成本,并且克服了传统中两光栅传感器测量两个位置的温度与应变所带来的误差,实现了真正意义的点测量,提高了测量精度.该系统结构图如图 6 所示.将其在实验室中进行模拟测量实验,结果分析,不考虑其他计量器误差,在 $0\text{—}1700\mu\epsilon$ 、 $20\text{—}120^\circ\text{C}$ 测量范围内,最大误差为 $\pm 16\mu\epsilon$ 和 $\pm 0.8^\circ\text{C}$,此时选用的光谱仪的分辨率为 0.05nm ,如果采用更高分辨率的波长检测方式,相信可以进一步提高测量精度.详细报道见文献[9].

5. 结 论

本文从耦合模理论出发,推导出了复合型双周期光纤光栅耦合模方程,并将数值模拟结果与实验结果相比较,验证了模型的正确性.同时采用紫外曝光扫描法研制出该新型的复合型长周期光纤光栅,并对其应用于温度应变双参量传感系统进行了实验验证,指出其可以有效地解决温度应变交叉敏感问题,提高测量精度,具有重要的实际应用价值.

[1] Bennion I et al 1996 *Opt. Quantum Electron.* **28** 93

[2] Kersey A D et al 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 1442

[3] Xu M G, Archambault J L, Reekie L and Dakin J P 1994 *Electron. Lett.* **30** 23

[4] Bao J L et al 2001 *Opt. Commun.* **188** 31

[5] Patrick H J et al 1997 *Photon. Technol. Lett.* **8** 1223

[6] Bao J L et al 2001 *Acta Photon. Sin.* **29** 87 (in Chinese) [鲍吉龙等 2001 光子学报 **29** 87]

[7] Zhuo F et al 2001 *J. Optoelectron. Laser* **12** 354 (in Chinese) [卓锋等 2001 光电子·激光 **12** 354]

[8] Erdogan T 1997 *J. Opt. Soc. Am. A* **14** 1760

[9] Shu X W et al 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1731 (in Chinese) [舒学文等 2001 物理学报 **49** 1731]

[10] Wang M G et al 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 11 (in Chinese) [王目光等 2002 光学学报 **22** 11]

Experimental and theoretical study on the compound dual-period fibre grating^{*}

Wang Mu-Guang[†] Wei Huai Jian Shui-Sheng

(*Institute of Light-Wave Technology ,Northern Jiaotong University ,Beijing 100044 ,China*)

(Received 21 June 2002 ; revised manuscript received 28 July 2002)

Abstract

In this paper we design a novel compound dual-period fibre grating structure , and analyze its spectrum response using the coupled mode theory. The simulation result is compared with the experiment and it is shown that the model is correct. We also apply it in a temperature and strain sensor system.

Keywords : fibre grating , coupled mode theory , sensor system

PACC : 4281 A281W A281P A280

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.69907001).

[†] E-mail : wangmuguang@263.net