

利用光敏光纤制作少模光纤布喇格光栅*

范万德^{1,2} 项阳¹ 许兆文¹ 张昊¹ 宁鼎³ 袁树忠¹ 董孝义¹

(1 南开大学现代光学研究所,天津 300071)

(2 南开大学物理学院,天津 300071)

(3 中国电子科技集团第46研究所,天津 300220)

摘要 利用相位掩模技术在光敏光纤中制作出了少模光纤布喇格光栅,1.06 μm波长附近有2~3个特征峰,峰值约4~5 dB. 对这种光纤光栅的特性进行了分析,结果表明理论与实验结果符合得较好,并对光纤光栅的温度特性进行了实验研究和理论分析,实验结果测得光纤光栅的温度敏感度为9~10 pm/°C.

关键词 光纤布喇格光栅(FBG);相位掩模;少量模;温度特性

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

0 引言

自从 Meltz 等人利用全息法首次在光纤中制作出光纤布喇格光栅(FBG)以来^[1],光纤光栅在光通信领域中得到了广泛的应用,如在激光器选频、色散补偿、OADM、增益平坦、传感等方面. 光纤光栅的制作通常是在单模光纤(SMF)中采用全息或相位掩模技术写出的,其特性已被人们所熟知. 多模光纤(MMF)或少模光纤(Few-Mode Optical Fibers)的布喇格光栅有其特殊的光谱特性^[2,3],在光纤激光器和光纤光栅传感等领域可以有新颖的应用,而且实验表明少模光纤中的布喇格透射峰和反射峰具有更窄的峰值,对光纤激光器的选频和光纤通信中的降低色散会带来很大的益处.

我们利用光敏光纤在波长为1.06 μm处制作出了具有几个峰的少模光纤布喇格光栅,峰值约4~5 dB. 对少模光纤光栅产生多个峰的机理进行了分析,并对其温度特性进行了实验研究和理论分析,实验表明少模光纤光栅的各透射峰的特性基本一致.

1 实验与结果

1.1 少量模光纤光栅的制作

采用相位掩模法制作光纤布喇格光栅,实验装置如图1所示. 紫外光源是准分子(KrF)激光器,工作波长为248 nm,脉冲输出能量为120 mJ. 激光输出经柱面透镜聚焦到相位模板上,而光敏光纤置于模板下方. 所用光敏光纤为中国电子科技集团公司第46研究所的掺锗(Ge)光纤,其截止波长为1439 nm,模场直径为6.97 μm,数值孔径NA为

0.208,相对折射率差为0.01. 由此看出,这种光敏光纤在波长为1.06 μm处将有几个低阶模式传输,称为少模光纤.

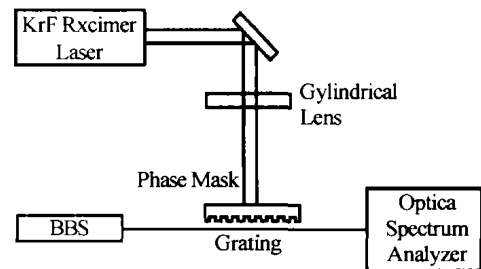


图1 相位掩模制作FBG装置示意图

Fig. 1 Experimental setup for fabrication of few-mode fiber Bragg gratings

用掺Yb³⁺光纤自制的宽带光源,对光敏光纤的曝光过程进行监测. 由于使用的模板中心波长为1.06 μm,所以用这种光敏光纤制作的光纤布喇格光栅,与传输模式对应,将有相应少量的几个透射或反射峰存在. 用光谱分析仪在线监测光纤光栅的透射谱,最后得到的光纤光栅(FBG)透射谱如图2. 从图中可看到,得到了预期的少模FBG的透射主峰,另外还存在背景本底信号,其原因是少模光纤中的低阶模式(如LP₀₁与LP₀₂)间干涉的结果^[4]. 模间相位差 $\Delta\psi = (\beta_1 - \beta_2)L$,其中 β_1, β_2 分别为LP₀₁、LP₀₂模传输常数,L为少模光纤长度. 由于LP₀₁模最强,

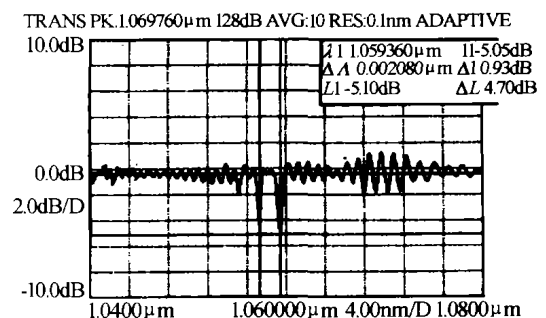


图2 FBG的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of a Bragg grating in few-mode fiber

* 国家自然科学基金重点基金(60137010)资助项目

Email: fanwande@eyou.com

收稿日期:2003-06-12

干射的深度取决于 LP_{02} 模的强度和模间相位差的大小.

1.2 少模光纤布喇格光栅的温度特性

将写出的光纤布喇格光栅置于温控箱中,对少模光纤布喇格光栅的透射布喇格波长随温度的变化进行实验. 温度由 25°C 升到 95°C 的过程中,每隔 10°C 对布喇格波长随温度变化进行记录,经数值拟合后得到如图 3 所示关系曲线. 可以看出少模光纤布喇格光栅的各个透射峰变化趋势相同,随温度变化关系互相依赖,同时向长波移动,它是由光敏光纤的热膨胀系数和纤芯、包层的折射率随温度的变化关系决定. 从图中可以看出光栅的温度敏感度为 $9 \times 10^{-6} \sim 10^{-5} \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$, 即 $9 \sim 10 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. 与单模光纤中的光纤布喇格光栅温度敏感度在数量级上相同^[5].

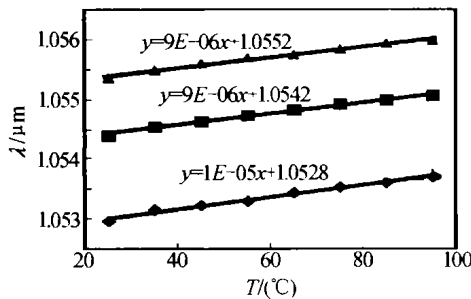


图 3 布喇格光纤光栅中心波长随温度变化的关系

Fig. 3 The central wavelength of FBG vs. temperature

在给 FBG 加温的过程中,用光谱分析仪监测其透射光谱图,可以看出当整个光栅都处于均匀温度区时,温度由 25°C 升高到 95°C 的过程中透射谱图形状基本上没有变化,只是向长波方向平移,各个透射峰只随温度的改变而平移,温度的敏感度基本相同.

2 理论分析与讨论

相位匹配条件,也称为布喇格反射条件,在少模光纤光栅中同样适用,用下式表示: $\beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\Lambda$, 其中 Λ 是光纤中的介质折射率受到调制的调制周期, β_1, β_2 分别为前向和后向的传输常数,对于同一个模式的反射, $\beta_1 = -\beta_2 = \beta$, 所以相位匹配条件可以简单的写成: $\beta = \pi/\Lambda$. 对于我们所用的阶跃型光敏光纤,其传输的模数可由下式计算

$$M = a^2 k^2 n_1^2 \Delta \quad (1)$$

式中 a 为纤芯半径, k 为波数, n_1 为纤芯折射率, Δ 为相对折射率差. 通过计算可知,光敏光纤传输的模式数在 $1.06 \mu\text{m}$ 处为 3,这与实验中现象一致. 在所写的光纤光栅中,其透射峰最多只有三个,如图 2 所示. 而有些光纤光栅的透射谱只有二个峰,我们认为这是由于光栅在制作过程中的调整与曝光量的控制和光敏光纤局部的不均匀,导致一些模式没有

被激发.

在具有少模光纤中具有相同的 β 值的模式定义为同一主模,光纤中第 N 阶主模的传输常数近似为^[2]:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sqrt{1 - 4\Delta \frac{N+1}{V}} \quad (2)$$

式中, $V = 2\pi a NA/\lambda$, 为光纤的归一化频率, NA 为光纤的数值孔径,对于阶跃型光纤,归一化的传输常数 b 与第 N 阶主模的光纤归一化频率 V 之间的关系为^[6]:

$$V = \sqrt{1-b} \left(\frac{N}{2} \pi + \frac{\pi}{4} + \arctan \sqrt{\frac{b}{1-b}} \right) \quad (3)$$

由式(3),通过 N 和 V 可以计算出 b , 这样可以得到传输常数 β

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \left[\left\{ 1 - (1-\Delta)^2 \right\} b + (1-\Delta)^2 \right] \quad (4)$$

通过传输常数的值和光纤中的调制周期之间的关系可以求出布喇格反射波长,即光纤光栅的透射或反射峰波长.

我们使用的相位掩模板的周期为 $\Lambda = 724.86 \text{ nm}$, 光敏光纤的纤芯折射率为 1.463,所以在光敏光纤中的布喇格中心波长约为 1060 nm ,根据式(2)、(3)和(4)进行数值模拟,得到同一主模下的光纤布喇格光栅波长位置. 由于实验中在写光栅的过程中,给光敏光纤施加了一预应力,少模光纤光栅的布喇格波长比理论值小一些,因此我们认为理论与实验结合的很好(见图 4).

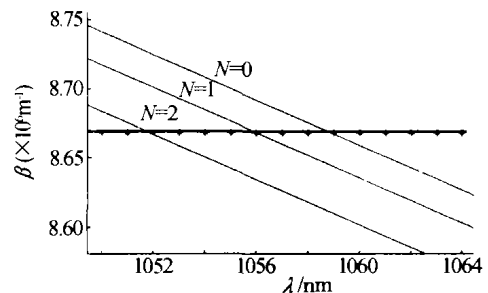


图 4 数值模拟得到的光纤中三个模式对应的布喇格中心波长位置图,交点为对应的布喇格中心波长

Fig. 4 Mode diagram of few-mode fiber Bragg grating

在少模光纤中,其温度特性可以通过式(2)得到,考虑 $4\Delta \frac{N+1}{V}$ 远小于 1, 并且数值孔径 $NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$, 对此式两边作微分可以得到布喇格波长与温度的对应变化关系,即

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{\lambda^2}{2n_1 \Lambda^2} \frac{d\Lambda}{dT} + \left[\frac{\lambda^2}{2n_1^2 \Lambda} - \frac{\lambda^2 (N+1) (3n_2 - 2n_1)}{2\pi a n_1^2 \sqrt{2n_1 (n_1 - n_2)}} \right] \cdot \left(\frac{dn_1}{dT} + \frac{\lambda^2 (N+1)}{2\pi a n_1 \sqrt{2n_1 (n_1 - n_2)}} \frac{dn_2}{dT} \right) \quad (5)$$

对于我们使用的光敏光纤,可以通过一些文献给出

的参量近似的进行分析,式(5)的第一项中含有 $\frac{d\lambda}{\lambda dT}$,为掺锗纤芯的热膨胀系数,在1550 nm处的近似值为 0.55×10^{-6} [6], $\frac{dn_1}{dT}$ 、 $\frac{dn_2}{dT}$ 为光敏光纤的纤芯和包层的折射率对温度的变化,它们的值基本相同,其值在589 nm处约为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,可以看出上式的第一项比后两项小一个数量级。 N 的取值对 $\frac{d\lambda}{dT}$ 的影响很小,所以少模光纤光栅的透射峰具有相同的温度依赖性。经过近似计算,光纤光栅的温度灵敏度为 $8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,这与实验结果基本相符。单模光纤中布喇格光栅的温度灵敏度在 $0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 处分别为 6.8 、 10 、 $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ [5],而我们的实验结果与之基本相同,所以少模光纤光栅同样可以用于温度传感,并且是多个布喇格波长同时变化,这样使光纤光栅传感更加灵活方便。

3 结论

利用光敏光纤在波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 处,采用相位掩模技术制作出了少模光纤布喇格光栅,对其透射光谱的测量可知,特征峰最多有三个。理论上计算可知,在此波长范围光的传输模式有3个,实验和理论相符。对光纤光栅的温度特性进行了实验研究,

得到光栅的温度敏感度为 $9 \sim 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,并且多个峰的特性一致性很好。将这种光纤光栅用于光纤激光器选频,获得了稳定的激光输出,并具有不同于一般布喇格光纤光栅选频的激光输出特性。另外这种少模光纤光栅在传感领域可能有比单模光纤光栅更具诱人的特性。

参考文献

- 1 Meltz G, Morey W W, Glem W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt Lett*, 1989, **14**(15):823 ~ 825
- 2 Torn, Mizunami, Djambova T V, et al. Bragg Gratings in Multimode and Few-Mode Optical Fibers. *J Lightwave Technology*, 2000, **18**(2):230 ~ 235
- 3 Morey W W, Meltz G, Love J D, et al. Mode-coupling characteristics of UV-written Bragg gratings in depressed-cladding fiber. *Electron Lett*, 1994, **30**(9):730 ~ 732
- 4 Kumar A, Goel N K, Varshney R K. Studies on a few-mode fiber-optic strain sensor based on LP_{01} - LP_{02} mode interference. *J Lightwave Technology*, 2001, **19**(3):358 ~ 362
- 5 Rao Yunjiang. In-fibre Bragg grating sensors. *Meas Sci Technol*, 1997, **8**(4):355 ~ 375
- 6 Meltz G, Morey W W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity. *Proc of SPIE*, 1992, **1516**:185 ~ 199

Formation of Bragg Gratings in Few-mode Optic Fibers by Photosensitive Fibers

Fan Wande^{1,2}, Xiang Yang¹, Xu Zhaowen¹, Zhang Hao¹, Ning Ding³, Yuan Shuzhong¹, Dong Xiaoyi¹

¹ Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

² College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

³ The 46th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220

Received date: 2003-06-12

Abstract Bragg gratings in few-mode fibers have been formed, written in photosensitive fibers by the phase-mask method. Bragg gratings in few-mode fibers show 2 ~ 3 transmission dips in the transmission spectra at about $1.06 \mu\text{m}$. The reflectivities are 50% ~ 70%. The characteristics of Bragg gratings in few-mode fibers are analyzed experimentally and theoretically. The temperature sensitivity of the Bragg gratings in few-mode fibers is obtained experimentally about $9 \sim 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ as an average from 25°C to 95°C .

Keywords Fiber Bragg Gratings (FBG's); Phase Mask Method; Few-mode fiber; Temperature Sensitivity



Fan Wande received the B. S. and M. S. degrees at the Department of Physics, Nankai University in 1988 and 1993 respectively. He is currently working toward the Ph. D. degree in the Institute of Modern Optics, Nankai University. His research interests include fiber laser and all-fiber communication.