

大模场双包层光纤光栅的光谱特性

徐团伟 李 芳 刘育梁

(中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

摘要 在分析大模场双包层光纤的模式特性和测试光路中光功率分配的基础上,根据耦合波理论和传输矩阵法,对不同情况下大模场双包层光纤光栅的透射谱和反射谱进行数值分析,结果表明光谱形状取决于模式间的功率分配,通过基模的透射谱可以测量双包层光纤光栅的真实反射率。采用相位掩模法制作了基模反射率不低于 99.7% 的 20/400 μm 大模场双包层光纤光栅,测试了不同情况下的反射谱和透射谱,实验结果和理论分析的结论一致。

关键词 光学器件;光谱特性;耦合波理论;大模场双包层光纤光栅

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0523006

Spectral Characteristics of Fiber Bragg Gratings in Large-Mode-Area Double-Clad Fibers

Xu Tuanwei Li Fang Liu Yuliang

(*Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract Based on the analysis of large-mode-area (LMA) double-clad fiber's mode properties and optical power distribution in the measurement setup, reflection and transmission spectra of LMA fiber gratings are numerically simulated by using coupled-wave theory and transfer-matrix approach. Theoretical results indicate that the spectral shape depends on the power distribution between modes, and the reflectivity of LMA fiber grating can be calculated from the transmission spectrum of the fundamental mode. LMA fiber grating with the reflectivity of more than 99.7% has been fabricated in 20/400 μm double-clad fiber by phase mask method, the reflection and transmission spectra under different conditions are measured, and the experimental results agree well with the theoretical analysis.

Key words optical devices; spectral characteristics; coupled-wave theory; large-mode-area double-clad fiber Bragg gratings

OCIS codes 230.1480; 300.6170; 060.3735

1 引 言

相比于传统固体激光器,高功率光纤激光器在功率密度、稳定性和灵活性等方面有着明显的优势,它已成功应用于科研和工业领域^[1,2]。全光纤架构是美国 IPG 公司、英国 SPI 公司等商用高功率光纤激光器厂家普遍采用的工作方式,其中用于谐振腔的光纤光栅属于核心器件之一。随着包层抽运技术的发展,单根光纤的输出功率超过了 1 kW^[3,4],为了降低高功率密度带来的纤芯非线性效应,在光路设计时采用大模场(LMA)双包层光纤。目前利用

飞秒写入法^[5]和相位掩模法^[6]已实现了大模场双包层光纤光栅的制作,但大模场双包层光纤光栅的光谱特性与普通单模光纤光栅可能有着显著区别。对于普通光纤光栅而言,光纤中只存在单模传输,基于传统耦合波理论进行的数值模拟和实验结果吻合得很好^[7]。由于大模场光纤中存在高阶模,不同的测试条件将导致光栅反射谱存在多峰或对称/非对称凸状分布,透射谱存在阶梯分布等特征,这些都无法用单模光纤光栅理论来解释。尽管与双包层光纤光栅相关的报道很多^[8~10],但关于光谱特性的理论分

收稿日期: 2011-09-27; **收到修改稿日期**: 2012-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(61107071)和广东省中国科学院全面战略合作项目(2010A090100002)资助课题。

作者简介: 徐团伟(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事光纤光栅、窄线宽/高功率光纤激光器和光纤光栅/激光传感等方面的研究。E-mail: xutuanwei@semi.ac.cn

析较少。2010 年 Mohammed 等^[11]采用多层电磁场散射的 T 型矩阵法对大模场双包层光纤光栅的反射谱进行分析,指出低阶模的干涉导致反射谱存在起伏,同时还指出由于多个模式的存在导致无法从光栅透射谱中测量反射率。不过先前的研究中并未考虑模式的正交性,因此上述结论有待进一步澄清。

本文重点研究大模场双包层光纤光栅的光谱特性,包括反射谱和透射谱。结合大模场双包层光纤和测试光路的特性,采用传统耦合波理论和传输矩阵法进行数值模拟,从理论和实验上对比讨论光谱形状与模式间功率分配的关系,并分析基于透射谱测量反射率的可行性。

$$E_{v,x} = \begin{cases} E_0 J_v(ur) \cos(v\phi), & \text{core } (r < a) \\ E_0 \frac{J_v(ua)}{N_v(wa)} N_v(wr) \cos(v\phi), & \text{cladding } (r < a) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $v=0,1$ 分别对应 LP01 和 LP11 模式, a 为纤芯半径, $u^2 = k_0^2 n_{\text{core}}^2 - \beta^2 = k_0^2 (n_{\text{core}}^2 - n_{\text{eff}}^2)$, $w^2 = \beta^2 - k_0^2 n_{\text{clad}}^2 = k_0^2 (n_{\text{eff}}^2 - n_{\text{clad}}^2)$, J_v 为第一类贝塞尔函数, N_v 为变形第二类贝塞尔函数。(1) 式中参数 u 和 w 可通过特征方程 $u \frac{J_{v+1}(ua)}{J_v(ua)} = \pm w \frac{K_{v+1}(wa)}{K_v(wa)}$ 和关系式 $(u^2 + w^2)a^2 = V^2$ 求解。

根据参数 $a=10 \mu\text{m}$ 和 $V=3.557$, 由(1)式计算

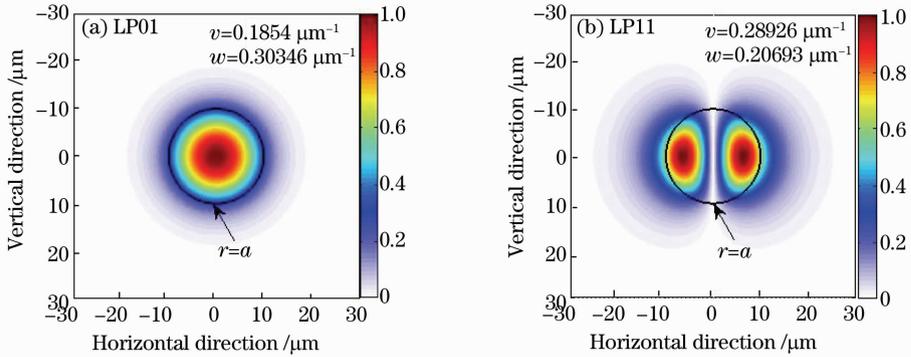


图 1 20/400 μm 大模场双包层光纤的归一化电场强度幅度分布。(a) LP01 模式; (b) LP11 模式

Fig. 1 Normalized electric-field distributions in LMA double-clad fiber with a core/cladding diameter of 20/400 μm

(a) LP01 mode; (b) LP11 mode

2.2 不同模式的光功率分配

大模场双包层光纤存在两个低阶模,测试光路中一系列因素将引起不同模式的功率损耗不同,进而会导致光纤光栅的光谱存在差异,因此在研究光谱特性之前,有必要结合测试光路对 LP01 和 LP11 的功率分配问题进行分析。

大模场双包层光纤光栅的测试光路如图 2 所

2 理论分析

2.1 大模场双包层光纤的模式特性

常规大模场双包层光纤的基本结构包括:直径为 $10\sim 40 \mu\text{m}$ 的纤芯,直径为 $125\sim 700 \mu\text{m}$ 的内包层和直径为 $245\sim 1000 \mu\text{m}$ 的外包层/涂覆层。对于百瓦级输出的光纤激光器,商用 20/400 μm 双包层光纤较为常见,它的纤芯数值孔径 $d_{\text{NA-core}}=0.06$,在 1060 nm 附近的归一化系数 $V=3.557$ 。该类型光纤满足弱波导条件,存在两个线偏振模式 LP01 和 LP11,且满足正交关系,在理想情况下不存在能量交换。它们在 x 方向的电场强度分布表示为^[12]

模式 LP01 和 LP11 的归一化电场强度幅度分布(见图 1),并给出了相应的 u 和 w 。假设包层折射率 $n_{\text{clad}}=1.45236$,通过数值孔径 $d_{\text{NA-core}}$ 和 w 值,分别得到在 1060 nm 附近的纤芯折射率为 $n_{\text{core}}=1.45360$,LP01 和 LP11 模式对应的有效折射率分别为 $n_{01,\text{eff}}=1.45326$, $n_{11,\text{eff}}=1.45278$ 。

示,1060 nm 宽带光经 3 dB 耦合器进入带有一段打弯的双包层光纤光栅,反射光经 3 dB 耦合器进入光谱仪,透射光又经过一段单模光纤后进入光谱仪。除双包层光纤外,整个光路中(包括 3 dB 耦合器)采用的光纤类型为康宁 HI 1060,其截止波长为 $(920\pm 50) \text{nm}$ 。具有平整端面的单模光纤和双包层光纤通过调整架实现光的耦合,双包层光纤打弯

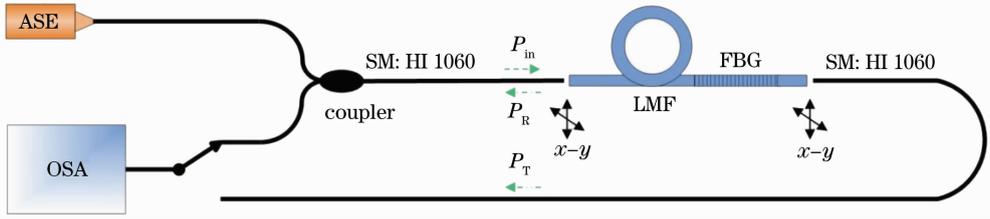


图2 大模场双包层光纤光栅光谱的测试光路示意图

Fig. 2 Schematic of the measurement setup for the spectra of fiber Bragg grating in LMA double-clad fiber

用于调节光功率损耗。该测试光路中影响 LP01 和 LP11 模式光功率的两个主要因素：不同光纤间的注入耦合因子和弯曲损耗。在忽略传输损耗且只考虑光纤间耦合和弯曲损耗对光功率的影响下，反射光和透射光中的功率分配情况如下：

$$P_R = P_{01,R} + P_{11,R} = (2\eta_{01}\alpha_{01})^2 P_{in} + (2\eta_{11}\alpha_{11})^2 P_{in}, \quad (2)$$

$$P_T = P_{01,T} + P_{11,T} = (2\eta'_{01}\alpha_{01})^2 P_{in} + (2\eta'_{11}\alpha_{11})^2 P_{in}, \quad (3)$$

式中 η 和 η' 分别表示第 1, 2 个对接处的光功率耦合因子, 2α 表示光功率的弯曲损耗, 下标 01 和 11 分别表示 LP01 和 LP11 模式。

单模光纤和大模场双包层光纤进行对接时, 不同模式的归一化光功率耦合因子表示为^[13]

$$\eta_v = \frac{\left| \iint_s E_v E_s^* ds \right|^2}{\iint_s E_v E_v^* ds \iint_s E_s E_s^* ds} \cdot t, \quad (4)$$

式中 $t = 4n_{v,eff}n_{s,eff}/(n_{v,eff} + n_{s,eff})^2 \approx 1$ 与纤芯折射率差异引起的反射有关, E_v 为大模场双包层的电场强度分布, E_s 为单模光纤的电场强度分布, 根据高斯近似 $E_s = E_0 \exp[-(r/\omega)^2]$, 康宁 HI 1060 光纤模场半径的典型值 $\omega = 3.1 \mu\text{m}$ 。通常情况下, 单模光纤和双包层光纤的中心并不重合, 耦合因子 η_v 随轴偏离的变化关系如图 3 所示, LP01 模式对应的耦合因子随轴偏离呈单调递减变化, LP11 模式对应的耦合因子在轴偏离为 $6.3 \mu\text{m}$ 时达到最大值, 在轴偏离为 $4.1 \mu\text{m}$ 时, 两者相等。与文献[11]相比, 本文采用归一化光功率耦合因子而非电场强度耦合因子, 但数值计算结果相近。

光纤弯曲对于不同模式有着不同的损耗系数, 可以利用宏弯曲实现低阶模的选择。Marcuse^[14] 给出的宏弯损耗表达式对于单模光纤有很高的精度, Schermer 等^[15] 提出一种适用性更广的改进型公式, 但需要已知光纤中的电场分布和传输矢量, 而弯曲后电场分布和传输矢量可以通过波束传输方法

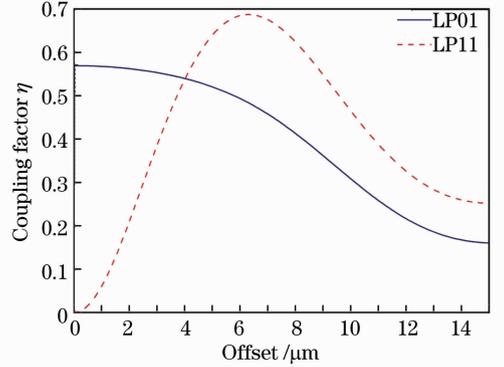


图3 LP01 和 LP11 模式的归一化光功率耦合因子随轴向偏离的变化关系

Fig. 3 Relation between normalized power coupling factor and axial offset for LP01, LP11 modes

(BPM)进行数值求解。由于大模场双包层光纤只存在两个模式, 无其他高阶模, 为简化计算, 仍采用 D. Marcuse 给出的计算公式^[14]

$$2\alpha_v = \frac{\sqrt{\pi}u^2 \exp\left[-\frac{2}{3}(\omega^3/\beta^2)r_B\right]}{e_v \omega^{-3/2} V^2 \sqrt{r_B} K_{v-1}(\omega a) K_{v+1}(\omega a)}, \quad (5)$$

式中 $2\alpha_v$ 表示不同模式的光功率损耗系数, 单位为 m^{-1} , 对于 LP01 模式 $e_v = 2$, 其他模式 $e_v = 1$, r_B 为弯曲半径, u 和 ω 同(1)式。如果弯曲损耗用单位

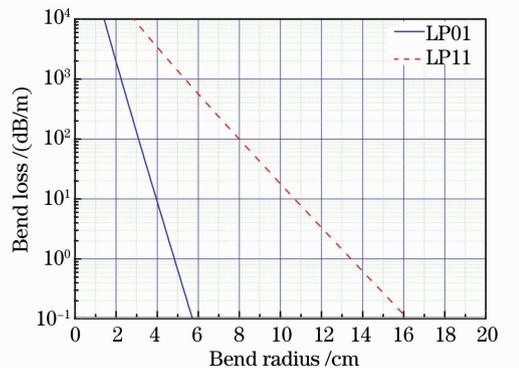


图4 大模场双包层光纤 LP01 和 LP11 模式的弯曲损耗与弯曲半径的关系

Fig. 4 Relation between bend loss and bend radius in LMA double-clad fiber for LP01, LP11 modes

dB/m 来表示,需在系数 $2\alpha_v$ 乘以 4.343。图 4 给出了大模场双包层光纤 LP01 和 LP11 模式的宏弯损耗与弯曲半径的关系。当弯曲半径较大时,LP01 模式的损耗可以忽略,通过改变弯曲半径来调整 LP11 模式的光功率。当弯曲半径较小时,可以滤除 LP11 模式,实现单模传输。

2.3 大模场双包层光纤光栅的光谱特性

大模场双包层光纤中的 LP01 和 LP11 模式满足正交关系,不存在能量的互相转换,因此光纤光栅的光谱应为两模式光谱的加权线性叠加(此光谱是基于光功率而非电场强度),而权重因子取决于光功率分配。根据测试光路(见图 2),大模场双包层光纤光栅的反射谱和透射谱表示为

$$R = c_0 R_{01} + c_1 R_{11} = (2\eta_{01}\alpha_{01})^2 R_{01} + (2\eta_{11}\alpha_{11})^2 R_{11}, \quad (6)$$

$$T = c'_0 T_{01} + c'_1 T_{11} = (2\eta_{01}\alpha_{01}\eta'_{01}) T_{01} + (2\eta_{11}\alpha_{11}\eta'_{11}) T_{11}, \quad (7)$$

式中 $R_{01}, R_{11}, T_{01}, T_{11}$ 分别为 LP01 和 LP11 模式的光功率反射谱和透射谱。采用相位掩模法制作大模场双包层光纤光栅,整个纤芯的折射率成周期性调制,除有效折射率不同外,LP01 和 LP11 模式具有相同的光学和几何参数,因此它们具有相似的光谱形状,但布拉格波长不同。

根据耦合波理论来计算光纤光栅的光谱。对于均匀光纤光栅,折射率调制沿 z 轴呈正弦或余弦变化,反射谱可以通过单一表达式来表示为^[7]

$$R = \frac{\sinh^2(\gamma L)}{\cosh^2(\gamma L) - \Delta\beta'^2/\kappa^2}, \quad (8)$$

式中 L 为栅区长度, $\Delta\beta' = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B) + 2\pi \overline{\delta n_{\text{eff}}}/\lambda = 2\pi n'_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda'_B) = \beta' - \beta'_B, \gamma^2 = \kappa^2 - \Delta\beta'^2$, 交流耦合系数 $\kappa = \pi/\lambda \overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 。对于非均匀光纤光栅,折射率调制的幅度和周期沿 z 轴变化,一般采用传输矩阵法,最后结合边界条件来计算反射谱或透射谱。在实际制作过程中,准分子激光器的光强成高斯分布,因此光纤光栅为非均匀光栅,本身具有高斯切趾的效果。图 5 插图中给出了 LP01 和 LP11 模式的反射谱,它们对应的布拉格波长分别为 1058 nm 和 1057.65 nm,光纤光栅 3 dB 带宽大于布拉格波长的间隔。所用参数包括:栅区长度 $L = 24$ mm,相位掩模板周期 $\Lambda = 728$ nm,LP01 和 LP11 的有效折射率见 2.1 节,高斯分布的半峰全宽 $f_{\text{FWHM}} = 2/3L$,有效折射率调制幅度的空间分布为

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff,max}}} \exp\left[-\left(\frac{z-L/2}{f_{\text{FWHM}}}\right)^2\right],$$

式中 $\overline{\delta n_{\text{eff,max}}} = 6 \times 10^{-4}$ 。

图 5 为根据(6)式计算得出的 3 种不同情况下的大模场双包层光纤光栅的反射谱,它们依次如下: R1 为纤芯对准且大模场双包层光纤无打弯,或大模场双包层光纤打弯半径较大,对应于只存在 LP01 模式; R2 为轴偏离 $4.1 \mu\text{m}$ 且大模场双包层光纤无打弯,或轴偏离小于 $4.1 \mu\text{m}$ 且大模场双包层光纤具有一定打弯,对应于 LP01 和 LP11 模式功率相等; R3 为轴偏离 $6.3 \mu\text{m}$ 且大模场双包层光纤无打弯,对应于 LP11 模式为主。LP01 为高功率光纤激光器单模工作的模式,从 R1 中可以得到光纤光栅基模对应的中心波长和带宽。

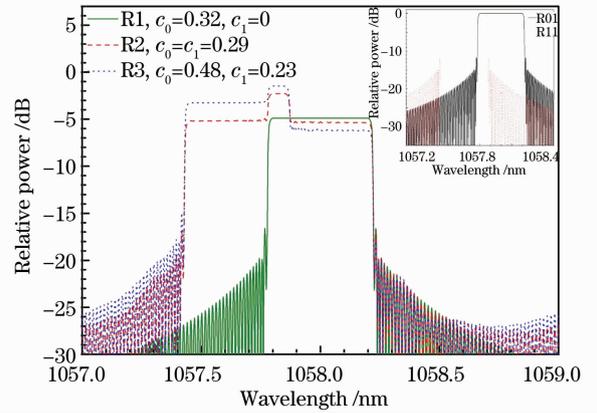


图 5 大模场双包层光纤光栅的反射谱

Fig. 5 Reflection spectra of fiber Bragg grating in LMA double-clad fiber

对比参考文献[11]中定义的大模场双包层光纤光栅反射率,图 6 给出了在相同参数下采用不同公式计算得到的反射谱,其中参数和图 5 中的 R2 一致。由于 Mohammed 等^[11]采用电场强度的线性叠

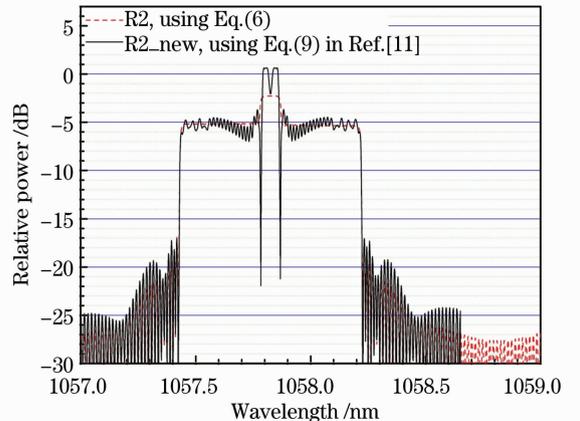


图 6 大模场双包层光纤光栅的反射谱

Fig. 6 Reflection spectra of fiber Bragg grating in LMA double-clad fiber

加,反射功率存在相干耦合,在 LP01 和 LP11 模式的波长重叠部分,出现了凹陷且峰值反射功率比单独 LP01 或 LP11 模式的最高功率高出 6 dB,而在重叠部分两侧的反射率则小于 1% (小于 -20 dB)。基于光功率线性叠加得到的反射谱,在 LP01 和 LP11 模式的波长重叠部分,峰值反射功率则比单独模式高出 3 dB,在重叠部分两侧并不存在显著的低反射率。

图 7 为根据(7)式计算得出的 4 种不同情况下的大模场双包层光纤光栅的透射谱,插图为 LP01 和 LP11 模式的透射谱。其中 T1 和 R1, T2 和 R2 的条件相同, T3 和 T4 为在 T2 情况下,通过打弯来增加 LP11 模式损耗分别为 10 dB 和 30 dB 时的透射谱。由于双包层光纤光栅透射谱随着光功率的分配情况而发生变化,所以不能任意地根据某一透射谱来计算反射率。该问题产生的原因: LP01 和 LP11 具有独立的“传输通道”,当其中某一模式在其布拉格波长附近有着非常低的透过率时,而另一模式在该波长附近则几乎无损耗地通过,传输光功率几乎为该模式的最大透射光功率,所以传统基于透射谱测量反射率的方法并不一定能真实反映实际值。另外,大多数情况下的透射谱还会误导最大反射率所对应的波长,如 T2~T4 最大反射率对应的波长位于 1057.8 nm 附近,而实际上则对应于 LP01 和 LP11 模式的布拉格波长。不过,随着 LP11 模式的损耗的增加,LP01 模式逐渐占主导,透射谱逐渐接近 T1 (即 LP01 的透射谱 T01)。由于 T1 为单一模式的透射谱,类似于单模光纤光栅的透射谱,因此根据 T1 可以计算大模场双包层光栅基模的反射率。

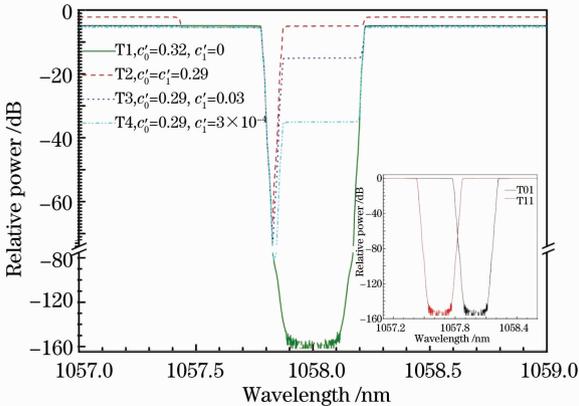


图 7 大模场双包层光纤光栅的透射谱

Fig. 7 Transmission spectra of fiber Bragg grating in LMA double-clad fiber

3 实验结果和讨论

采用相位掩模法在大模场双包层光纤上制作光纤光栅。光纤内包层为圆形,纤芯和包层直径分别为 20 μm 和 400 μm ,纤芯和包层数值孔径分别为 0.06 和 0.46,相位掩模板周期为 728 nm,准分子激光器(ComPex 150T)工作波长为 248 nm,矩形光斑的光功率呈高斯分布,栅区长度为 24 mm。

图 8 为实测的大模场双包层光纤光栅的反射谱(测试光路见图 2)。当存在 LP01 和 LP11 模式且两者光功率相近时,反射谱近似呈“凸”状。随着打弯半径的减小,LP11 模式光功率逐渐减小,当打弯半径小于 8 cm 时,反射谱形状保持不变,即 LP01 模式的反射谱,中心波长为 1057.99 nm,3 dB 带宽为 0.70 nm。假设 LP11 模式的反射谱由 LP01 模式横向平移 0.48 nm 获得,然后根据(6)式计算得到 LP01+LP11 的反射谱,其中 $c_0 = c_1 = 1$ 。通过对比看出,实测和计算得到的光谱形状相似,但后者的本底高于前者约 3 dB。这是由于实测反射谱的本底并非来自于光纤光栅,而是由测试光路中器件的反射导致的。此外,实测 LP01 和 LP11 模式同时存在时的反射谱中峰值反射功率比单一 LP01 模式的最高反射率高约 3 dB,进而证明了基于光功率线性叠加计算大模场双包层光纤光栅反射率的正确性。

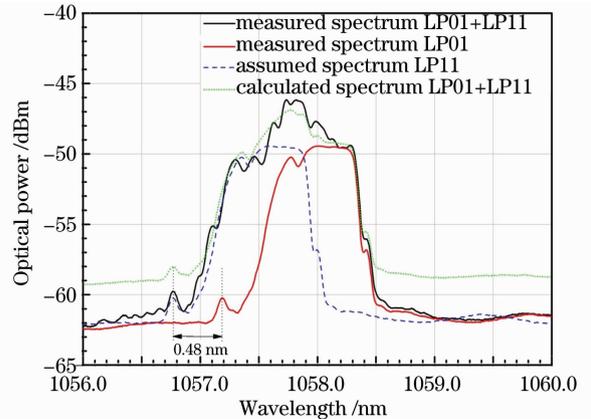


图 8 实测的大模场双包层光纤光栅反射谱

Fig. 8 Measured reflection spectra of fiber Bragg grating in LMA double-clad fiber

图 9 为实测的大模场双包层光纤光栅的透射谱, T1 对应于双包层光纤未打弯, T2-T3 对应于弯曲半径逐渐减小。在 T1 情况下, LP01 和 LP11 模式同时存在,可能由于 LP01 模式光功率较高,导致 LP11 模式在其布拉格波长附近的反射率极低,而在两模式的重叠部分(即图 8 中凸起区域)保持很高的

反射率。从 T1~T3, LP11 模式的光功率随弯曲半径的减小而减小,透射谱逐渐向 LP01 模式接近,由于光谱仪灵敏度有限,无法获得基模的透射谱。从 T3 中可以看出,反射率最大值仍对应于 LP01 模式的布拉格波长,即 1058 nm 附近,而并非 T1 给出的两模式重叠部分。尽管无法基于 LP01 模式的透射谱得到真实反射率,但通过 T3 计算得到在 1058 nm 附近的反射率约 99.7%,而该反射率则用来表征 LP01 模式反射率的最小值,即大模场双包层光纤光栅基模的反射率不低于该值,这对于高反光纤光栅在高功率光纤激光器的应用中具有实际的意义,因为该值可用来判断双包层光纤光栅的反射率是否达到了指标设计要求。

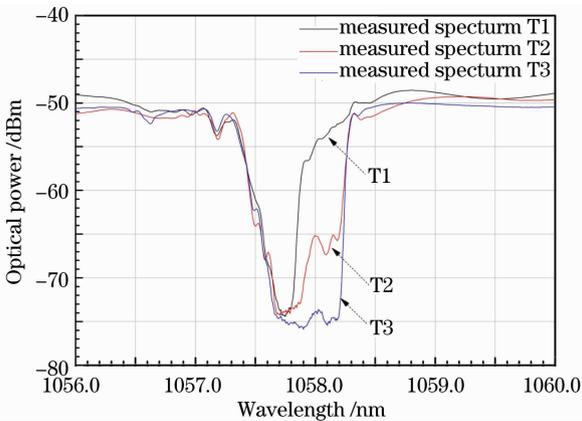


图 9 实测的大模场双包层光纤光栅透射谱

Fig. 9 Measured transmission spectra of fiber Bragg grating in LMA double-clad fiber

通过对比,实验结果和理论分析在光纤光栅光谱形状上得到的结论是一致的,但实际制作的大模场双包层光纤光栅 LP01 和 LP11 模式的波长间隔,3 dB 带宽和反射率都与理论计算值存在偏差,这可能与非理想曝光光路和折射率调制饱和现象有关。另外,理论分析只讨论了光谱带宽大于布拉格波长间隔的情况,而带宽小于或等于波长间隔情况下光谱同样存在各种不同的分布特征,有待进一步讨论。

4 结 论

结合光纤和测试光路的特性,根据耦合波理论和传输矩阵法分析了 20/400 μm 大模场双包层光纤光栅在不同光功率分配情况下的反射谱和透射谱,并得出了基于透射谱测试反射率是可行的结论。采用相位掩模法制作了基模反射率不低于 99.7% 的大模场双包层光纤光栅,测试了不同情况下的反射谱和透射谱,实验结果和理论分析的结论一致。

通过对大模场双包层光纤光栅的光谱分析,有助于认识光谱多样性产生的原因,有助于测量光谱的真实反射率和 3 dB 带宽等光学参数,为光纤激光器的模式选择提供另外一种可行的思路,如通过选择与 LP01 模式相匹配的低反射率光纤光栅可能实现基模激射,而通过选择与 LP11 模式相匹配的光纤光栅则可能实现轴对称偏振光的输出^[16]。

致谢 感谢刘元辉和张运方对制作大模场双包层光纤光栅的帮助和中国科学院上海光学精密机械研究所范元媛的支持。

参 考 文 献

- 1 J. Nilsson, D. N. Payne. High-power fiber lasers [J]. *Science*, 2011, **332**(6032): 921~922
- 2 J. Gabzdyl. Materials processing: fiber laser make their mark [J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(1): 21~23
- 3 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 4 赵 鸿,周寿桓,朱 辰等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW [J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1359
- 5 Zhang Yunjun, Wang Wei, Zhou Renlai *et al.*. Narrow linewidth Tm^{3+} -doped large core fiber laser based on a femtosecond written fiber Bragg grating [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(7): 074214
- 6 Fan Yuanyuan, Zhou Jun, He Bing *et al.*. Preparation and high-power fiber laser experimentation of double-clad fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2395~2399
- 7 范元媛,周 军,何 兵等. 双包层光纤光栅的制备及其高功率光纤激光实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2395~2399
- 8 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 9 L. L. Jun, L. Y. Ge, Y. S. Zhong *et al.*. Bragg gratings written in rare-earth-doped double-clad fiber: investigation of photosensitivity and thermal decay [C]. *SPIE*, 2005, **6019**: 578~581
- 10 L. L. Jun, L. Y. Ge, Y. S. Zhong *et al.*. Study on temperature and stress characteristics of double-clad fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2006, **6351**: 63513K
- 11 Shi Jiawei, Li Yuhua, Liu Shuhui *et al.*. Bandwidth-narrowed Bragg gratings inscribed in double-cladding fiber by femtosecond laser [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 1734~1742
- 12 W. Mohammed, X. J. Gu. Fiber Bragg grating in large-mode-area fiber for high power fiber laser applications [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(28): 5297~5301
- 13 O. Solgaard. Photonic Microsystems: Optical Fibers and Waveguides [M]. New York: Springer, 2009
- 14 O. Solgaard. Photonic Microsystems: Fiber and Waveguide Devices [M]. New York: Springer, 2009
- 15 D. Marcuse. Curvature loss formula for optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 216~220
- 16 R. T. Schermer, J. H. Cole. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(9-10): 899~909
- 17 Zhan Qiwen. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2009, **1**(1): 1~57

栏目编辑: 宋梅梅