

# 大模场面积双包层光纤光栅模式特性研究

刘 刚 杨 飞 叶 青 刘 琼 蔡海文 瞿荣辉 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 分析了在大模场面积双包层光纤(LMA-DCF)上刻写光栅的技术要求和难点,采用相位掩模法在 $20/400\ \mu\text{m}$ 的LMA-DCF上刻写了高反射率光纤布拉格光栅。针对大模场光纤中存在高阶模的可能性,通过调整单模光纤(SMF)入射光场和LMA-DCF芯径的相对偏移量,对LMA-DCF光栅中的传输模式特性进行了理论分析和模拟计算,并在实验研究中测量了偏移量不同时光栅的反射谱,观测到了相应的 $\text{LP}_{01}$ 模和 $\text{LP}_{11}$ 模的模场光斑分布。对LMA-DCF光栅的几种光谱测试方法进行了对比研究,分析了各种方法的优缺点。研究结果将为LMA-DCF光栅在高功率激光系统中的应用提供依据和参考。

**关键词** 光栅;大模场面积双包层光纤光栅;模式特性;传输矩阵;高功率光纤激光器

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0605002

## Study of Mode Characteristics for Large-Mode-Area Double-Clad Fiber Gratings

Liu Gang Yang Fei Ye Qing Liu Qiong Cai Haiwen Qu Ronghui Fang Zujie

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** High-reflectivity fiber Bragg grating (FBG) is successfully inscribed on the  $20/400\ \mu\text{m}$  large-mode-area double-clad fiber (LMA-DCF) by the phase-mask method, and the relevant technical requirements and difficulty of the inscription technology are analyzed. Considering the possibility of existence of the high-order mode in LMA-DCF, the mode characteristics are theoretically simulated by altering the relative displacement between the fiber core of SMF and LMA-DCF. The grating reflection spectra of different relative displacements are experimentally measured and the corresponding light spots are obtained. Besides, the frequently-used measuring methods of spectrum of LMA-DCF Bragg grating are compared and their respective characteristics are analyzed. Research results will provide theoretical and experimental basis for the application of LMA-DCF in high-power laser systems.

**Key words** gratings; large-mode-area double-clad-fiber grating; mode characteristics; transmission matrix; high-power fiber laser

**OCIS codes** 060.3735; 030.4070; 140.3510

## 1 引 言

双包层光纤自从1988年由Sintzer等<sup>[1]</sup>提出以来,由于其出色的传输光的能力和包层抽运技术的应用,在高功率光纤激光器方面表现出极大的优势<sup>[2~4]</sup>。双包层光纤由于具有较大的芯径,可以有效降低传输高功率激光时在纤芯中引起的非线性效应,成为了高功率光纤激光器发展的重要途径之一。

在双包层光纤上刻写光栅,则可以避免光纤激光器的端面熔接耦合,大大降低插入损耗,并易于与其他光纤器件连接。光纤光栅作为一种低损耗器件,具有非常好的波长选择特性,采用光纤光栅做谐振腔大大简化了激光器的结构同时提高了激光器的信噪比和可靠性,有利于获得窄线宽、高光束质量的光纤激光器<sup>[5~7]</sup>。光纤光栅以其使用灵活、成本较低、易

收稿日期: 2012-02-20; 收到修改稿日期: 2012-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(NSAF联合)基金(11076028,60908011)和国家科学技术重大专项(2010ZX04013)资助课题。

作者简介: 刘 刚(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅技术方面的研究。E-mail: gangliu101@163.com

导师简介: 蔡海文(1975—),男,研究员,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: hwcai@siom.ac.cn

于选频等优点,成为高功率光纤激光器首选谐振腔<sup>[8]</sup>。

但是,一般大芯径双包层光纤的芯径大于单模的芯径限制,存在高阶模式激发的可能性,如 LP<sub>11</sub>、LP<sub>21</sub>模等,其光栅的反射光谱所包含的模式比较复杂。因此,研究不同的激发条件对双包层光纤中传输模式的影响是非常必要的,特别是在高功率激光中的应用。双包层光纤中的模式问题已有不少文献做了报道,如 Iho 等<sup>[9]</sup>报道了光纤的弯曲对双包层光纤中模场分布的影响;Mohammed 等<sup>[10]</sup>也对双包层光纤光栅中的模式分布进行了初步的探讨。但鲜有文章对双包层光纤光栅的模式特性和模场光斑对应关系进行较为深入的研究和报道。本文采用传输矩阵方法,在耦合系数的计算中考虑入射光束相对于光纤中心的偏离度,对大模场面积双包层光纤(LMA-DCF)光栅中的传输模式特性进行了理论分析和模拟计算。利用相位掩模法在 20/400 μm 的 LMA-DCF 上实现了高反射率光纤布拉格光栅(FBG)的制备。在实验研究中,通过调整单模光纤(SMF)入射光场相对于 LMA-DCF 的偏移量,对 LMA-DCF 光栅中的传输光谱进行了测量,并利用 CCD 观测了从 LMA-DCF 出射光束的光斑分布,得到了在不同偏移量下对应的 LP<sub>01</sub>模和 LP<sub>11</sub>模的反射光谱。实验结果与理论分析计算结果符合良好。此外,还对 LMA-DCF 光栅的光谱测试方法进行了比较,分析了各种方法的优缺点。本文的研究结果将为 LMA-DCF 光栅在高功率激光系统中的应用从理论和实验上提供依据和参考。

## 2 双包层光纤光栅制备技术

大模场双包层光纤光栅的制备工艺采用相位掩模板下准分子紫外激光辐照的方法,与单模 FBG 的制备基本相同。但由于双包层光纤的芯径比常规单模光纤的芯径大得多,因此,在双包层光纤的准备和制备过程中也存在一定的差别。主要需考虑以下因素。

1) 载氢增敏:由于大芯径双包层光纤的包层直径比常规光纤大得多,因此载氢敏化的时间要大大延长。根据粒子扩散的斐克定律<sup>[11]</sup>,扩散浓度决定于参量  $r/\sqrt{2Dt}$ ,式中  $r$  为扩散深度, $D$  为氢气在石英中的扩散系数, $t$  为扩散时间。因而,同样浓度要求的扩散时间正比于深度的平方。以 400 μm 粗光纤为例,与常规光纤相比,扩散时间需要延长到  $(400/125)^2 \approx 10$  倍。一般单模光纤的载氢时间为 1~2 星期,对于粗光纤就需要 2.5~5 个月。为了提高载氢增敏的效率,有必要提高载氢装置的温度。

2) 紫外辐照的时间:与常规单模光纤相比,大芯径光纤需要更大累计剂量的紫外光照来实现纤芯材料的光折变。要获得同样反射率的光纤光栅,双包层光纤紫外辐照的时间需要大大的增长。

3) 波长的调整:在单模光纤光栅的制作中,利用光纤的轴向拉伸应变,可以在相同相位掩模板下实现中心波长的调整。由于单模光纤具有很好的柔韧性,可以架在滑轮上用砝码的重力精确控制拉力,但粗光纤很容易被折断,因此就需要采用比较复杂的机械装置。

4) 光栅的退火:退火是光纤光栅制备必须进行的工序,其作用是在高温下加速未被紫外激光作用氢气的外扩散,使光纤材料的折射率尽快回到稳定值,同时也通过退火消除工艺中产生的其他缺陷。显然,要获得同样的退火效果,粗光纤需要长得多的时间。此外双包层光纤的外包层一般采用聚合物材料,它对退火温度也提出了限制,一般不能超过 120℃,更高的温度将会使光纤外包层变黄。

5) 成栅在线监测技术:由于与单模光纤芯径和模场存在不匹配现象,光纤成栅过程的在线监测也是需要解决的关键问题。通常需要采用专用的模式匹配器,连接到单模光纤上用标准的光谱分析仪进行测量。

此外,由于双包层光纤光栅需要应用于高功率激光系统中,因此对光栅制备过程中涂覆层的处理(剥离技术)也提出了很高的要求,要求尽可能不要

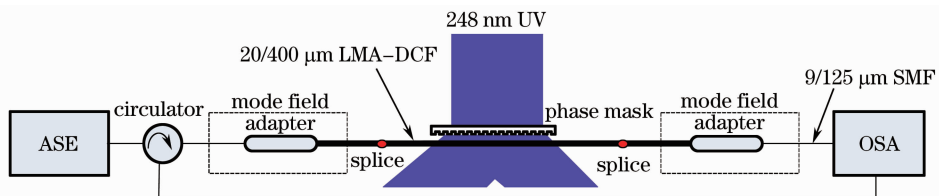


图 1 大芯径双包层光纤光栅制备技术结构示意图  
Fig. 1 Schematic of fabrication of FBG in LMA-DCF

损伤光栅的包层,从而增加光栅的使用寿命和强度。图1为大芯径双包层光纤光栅制备技术结构示意图,一对模式匹配器被用来进行不同芯径光纤中模式的耦合,环形器的一个端口接放大自发辐射(ASE)宽带光源,另外两个端口可经过光谱仪(OSA)分别用于测量光栅的透射谱和反射谱。

### 3 双包层光纤光栅模式特性

#### 3.1 传输矩阵法理论分析

双包层光纤光栅在刻写的过程中通常采用切趾的方法以消除反射谱的旁瓣,切趾相当于使光栅的折射率调制幅度不再恒定,而是沿着光栅长度方向按一定的函数关系变化。常用的切趾函数<sup>[12]</sup>有高斯函数、升余弦函数、Blackman 函数、tanh 函数、Cauchy 函数以及 sinc 函数等,不同的切趾方式对光纤光栅的群时延特性和色散曲线影响较大<sup>[13]</sup>,但对光栅反射谱带宽的影响并无显著差别,以上切趾方式均可起到良好的抑制光栅反射谱旁瓣的作用。这里采用 sinc 函数的切趾形式,纤芯的折射率分布形式为

$$n(z) = n_c + \frac{\Delta n_0}{2} + \frac{\Delta n_0}{2} \text{sinc} \frac{\pi z}{L} \cos \frac{2\pi z}{\Lambda}, \quad (1)$$

式中  $n_c$  为纤芯折射率,  $\Delta n_0$  为折射率改变量,  $L$  为光栅区长度,  $\Lambda$  为光栅周期。传输矩阵法<sup>[14,15]</sup>是模拟光栅谱线的一种最常用的方法,它的矩阵元可以通过解光栅的耦合模方程得出。在模拟中,光栅所取的参数如下:平均折射率调制度  $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 3.0 \times 10^{-4}$ ,光栅周期  $\Lambda = 0.3723 \mu\text{m}$ ,光栅长度  $L = 5 \text{ mm}$ ,光栅分割的段数  $N = 1000$ 。相应的每段子光栅的传输矩阵元为

$$\begin{aligned} T_i(1,1) &= \left\{ \cosh[s(z_{i+1} - z_i)] - j \frac{\delta}{s} \times \right. \\ &\quad \left. \sinh[s(z_{i+1} - z_i)] \right\} \exp\left[-j \frac{\pi}{\Lambda} (z_{i+1} - z_i)\right], \\ T_i(1,2) &= \frac{\kappa^*}{s} \sinh[s(z_{i+1} - z_i)] \exp\left[-j \frac{\pi}{\Lambda} (z_{i+1} + z_i)\right], \\ T_i(2,1) &= \frac{\kappa}{s} \sinh[s(z_{i+1} - z_i)] \exp\left[j \frac{\pi}{\Lambda} (z_{i+1} + z_i)\right], \\ T_i(2,2) &= \exp\left[j \frac{\pi}{\Lambda} (z_{i+1} - z_i)\right] \left\{ j \frac{\delta}{s} \times \right. \\ &\quad \left. \sinh[s(z_{i+1} - z_i)] + \cosh[s(z_{i+1} - z_i)] \right\}, \\ i &= 1, 2, 3, \dots, 1000 \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$ ,  $\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \overline{\delta n_{\text{eff}}} = \frac{\pi}{2n_{\text{eff}}\Lambda} \cdot \overline{\delta n_{\text{eff}}}$ ,  $s =$

$\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}$ 。由于光栅在刻写过程中引入了 sinc 函数进行变迹,并且  $\text{LP}_{01}$  模和  $\text{LP}_{11}$  模的有效折射率不同,有效折射率需要在线偏振近似下求解光纤中模式的本征方程<sup>[16~18]</sup>来得出。这样同一模式下每段光栅的  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  是不同的,同一段光栅在不同的模式下  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  也是不同的。然后将每一段光栅对应的传输矩阵相乘,总的传输矩阵为  $\mathbf{T} = \mathbf{T}_{1000} \cdot \mathbf{T}_{999} \cdots \mathbf{T}_i \cdots \mathbf{T}_1$ ,再乘以归一化的入射矢量  $[1 \ 0]^T$ ,则整段光栅的输入和输出光场之间的关系为

$$\begin{bmatrix} A(z_N) \\ B(z_N) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

这样就能得到两种模式各自的振幅反射系数  $r = -T_{21}/T_{22}$ 。

为了研究不同模式的反射光谱,实验中采用单模光纤端面的输出去激发双包层光纤中的模式。所采用的长飞 Hi1060 单模光纤的芯径约  $6 \mu\text{m}$ 。当用调整架调节单模光纤和双包层光纤的纤芯对准,在双包层光纤中可以只激发  $\text{LP}_{01}$  模。而随着激发光场的单模光纤和双包层光纤纤芯偏移量的增加,光场的能量将逐渐由  $\text{LP}_{01}$  模向  $\text{LP}_{11}$  模发生转移。模场激发的耦合系数表示为<sup>[19,20]</sup>

$$c_v = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E_s(r) \Psi_v^*(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |\Psi_v(r, \theta)|^2 r dr d\theta}, \quad (4)$$

式中  $E_s(r) = \exp[-(r^2/\bar{\omega}^2) \exp(-i\beta_0 z)]$  为单模光纤输出的高斯光束近似,  $\Psi_v(r)$  为大模场光纤中第  $v$  阶模场数。双包层光纤中  $\text{LP}_{01}$  模和  $\text{LP}_{11}$  模对应的耦合系数记为  $c_{01}$  和  $c_{11}$ 。当单模光场的激发点偏离双包层光纤的中心位置时,偏移量为  $d$ ,  $E_s(r)$  应改写为

$$\begin{aligned} E_s(r, d) &= \exp\left[-\frac{(x-d)^2 + y^2}{\bar{\omega}^2}\right] \exp(-i\beta_0 z) = \\ &= \exp\left(-\frac{r^2 + d^2 - 2dr \cos \theta}{\bar{\omega}^2}\right) \exp(-i\beta_0 z), \end{aligned} \quad (5)$$

将(4)式中的  $E_s(r)$  替换为  $E_s(r, d)$ , 考虑基模和一阶模,可以得到反射光的强度:

$$I(\lambda) = |c_{01} r_{\text{LP}_{01}}(\lambda) + c_{11} r_{\text{LP}_{11}}(\lambda)|^2. \quad (6)$$

实际模拟中通过求解光栅的耦合模方程,得到  $\text{LP}_{01}$  模和  $\text{LP}_{11}$  模的有效折射率分别为 1.4522 和 1.4517,耦合系数  $c_v$  的取值直接源于文献[10]。基于上面的理论分析,利用传输矩阵法对双包层光纤光栅不同模式对应的反射谱线进行了数值模拟分析,图2是不同的偏移量  $d$  激发时模拟出来的反射

谱。可以看出当纤芯完全对准时( $d=0$ ),双包层光纤只有  $LP_{01}$  模传输,反射谱如图 2(a)所示。随着位置偏移量  $d$  的加大, $LP_{11}$  模逐渐激发出来, $LP_{01}$  模的强度开始减小,此时  $c_{01} > c_{11}$ ,  $LP_{01}$  模仍然占优势。直到纤芯偏移量为  $d=4 \mu\text{m}$  时, $c_{01} \approx c_{11}$ , 2 个模式均等激发,反射谱如图 2(b)所示。当纤芯偏移量  $d > 4 \mu\text{m}$  时,有  $c_{01} < c_{11}$ , 此时  $LP_{11}$  模占优势。图 2(c)为对应于偏移量为  $d=8 \mu\text{m}$  的光栅反射谱线。随着偏移量  $d$  的进一步增加, $LP_{11}$  模的强度将会减小,而  $LP_{01}$  模将从光谱上分辨不出来。

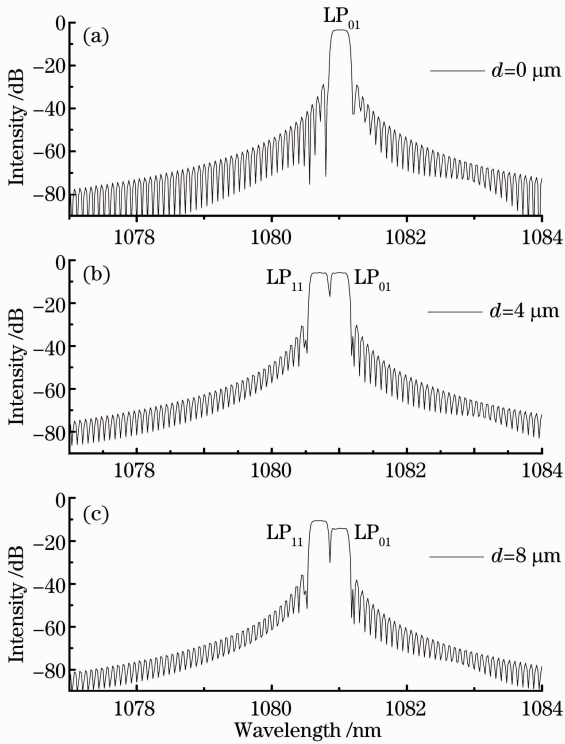


图 2 双包层光纤光栅不同模式的反射谱线随单模光纤激发场偏移量变化的数值模拟

Fig. 2 Simulated FBG reflection spectra under different shift distances of the SMF exciting field

相对于文献中报道的双包层光纤光栅多层膜模拟方法<sup>[10]</sup>,所用传输矩阵法大大缩短了程序的执行时间,在计算中把 5 mm 的光栅分为 1000 小段时的计算结果已相当精确,而多层膜法<sup>[21,22]</sup>至少要把光栅的每个周期分为 10 段左右才能降低计算误差,这样总的光栅分段数将达  $2^{18}$  左右,因此传输矩阵法要比多层膜法在相同的模拟精度下具有更高的效率。此外,因传输矩阵是由耦合模方程得来的,模拟出的谱线遵循布拉格关系  $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ , 光谱计算和测量与模式分析的对应关系十分直观。

### 3.2 光纤光栅反射谱测试和模场观察

实验中,选用 Nufern 公司生产的 LMA-DCF-

20/400 双包层光纤来进行 FBG 的制备。该光纤的内包层为圆形,纤芯和包层的直径分别为  $20 \mu\text{m}$  和  $400 \mu\text{m}$ ,数值孔径分别为 0.06 和 0.46。光栅制备过程中的在线测试的监测装置如图 1 所示。由于模式匹配器采用了熔接的方式,因此输入单模光纤的中心和双包层光纤中心是对准的,此时仅有  $LP_{01}$  模存在, $LP_{11}$  模将不会被激发。图 3 显示了双包层光纤光栅的反射谱线,中心波长为 1081.44 nm,反射谱线的对比度大于 18.6 dB,反射率大于 98%,完全可满足高功率光纤激光器中谐振腔的应用要求。

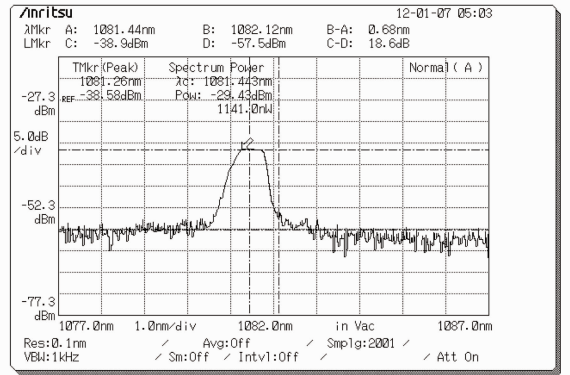


图 3 双包层光纤光栅的  $LP_{01}$  模的反射谱线

Fig. 3 Reflection spectrum of double-clad fiber grating when  $LP_{01}$  mode is dominant

为了进一步研究双包层光纤光栅的模式特性,采用了单模光纤和双包层光纤直接调整架对准的方式,然后通过调整架调整二者纤芯的相对偏移量,如图 4 所示。在实验的过程中,为了获得较好的光谱特性和透射光斑场,单模光纤和双包层光纤的端面首先要切割成  $0^\circ$  角,在光场的耦合端需要涂折射率匹配液来消除端面的菲涅耳反射。透射光斑场需要通过超声清洗清除端面的污渍来获得清晰的光斑场。透射的光斑场通过一个显示光屏和 CCD 相机接收。图 5 显示了实验测得双包层光纤光栅在不同偏移量时的反射谱线和对应的透射光斑场。当单模光纤和双包层光纤完全对准,光栅的反射谱线和透射光斑场均只有  $LP_{01}$  模存在,光纤中的高阶模式并没有激发,相应的光斑场为圆形。随着单模光纤激发场和双包层光纤相对偏移量的增加,光纤中的高阶模式将被激发,当偏移量为  $4 \mu\text{m}$  时, $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模将同时存在,幅度也大致相等,相应的透射光斑场也分裂成两瓣,这一点也充分证明双包层光纤中的高阶模式已被激发。当进一步增加偏移量时, $LP_{11}$  模的幅度将大于  $LP_{01}$  模,对应的透射光斑场将由两瓣逐渐地转化为圆形光斑场。实验所用双包层



光纤的归一化频率  $V \approx 3.56$ , 通过求解线偏振下  $LP_{lm}$  模的本征方程可求出此双包层光纤中的模式只有

$LP_{01}$ 、 $LP_{11}$  两种, 这也恰和实验中只观测到了  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模的光谱以及光斑分布的情况相吻合。

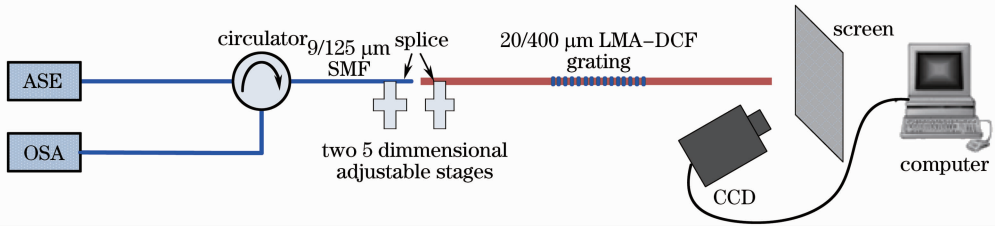


图 4 大芯径双包层光纤光栅不同模式测试结构示意图

Fig. 4 Schematic of measuring different modes in LMA-DCF grating

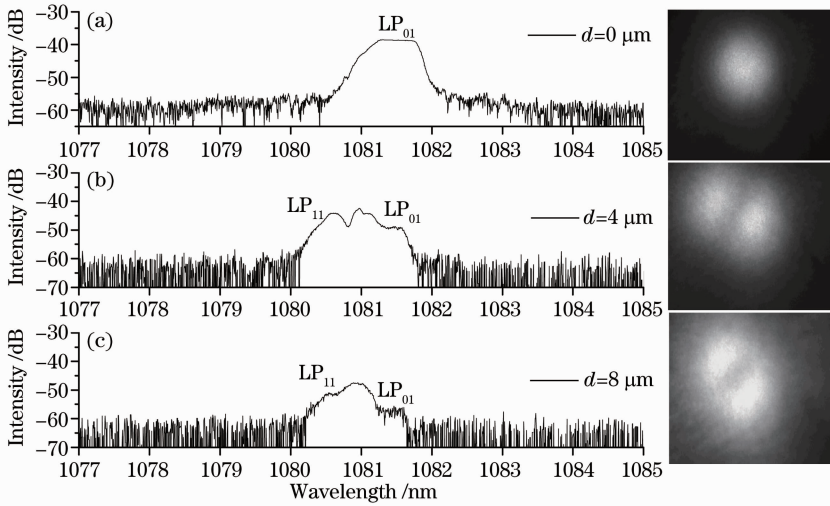


图 5 双包层光纤光栅不同模式的反射谱线随单模光纤激发场偏移量变化的实验测量结果 (右图为相应的透射光斑场照片)

Fig. 5 Experimental results of FBG reflection spectra under different shift distances of the SMF exciting field and the corresponding light spots

### 3.3 测试方法分析和讨论

由于常规光纤元件和测试仪器大多用单模光纤作为输入输出的接口, 而双包层光纤的芯径很粗, 与单模尾纤直接连接时将引入很大的插入损耗和回波, 不仅影响测试的精度, 而且对使用性能带来很多干扰。现在已有商品化的模场适配器, 一端为标准单模光纤, 另一端为相应的双包层光纤, 其间用一个低坡度的锥形光纤熔接, 提供了低插入损耗和低回波的连接手段。实际上, 模式匹配器滤掉了大模场光纤中传输的高阶模, 它有利于光纤光栅器件在高功率光纤激光器中的应用。但是, 如果要测量研究大模场光纤的高阶模特性, 就需要用光学调整架等装置。

通常来说, 对大芯径双包层光纤光栅不同模式的反射谱线的测量方法有许多种, 归纳起来包括模式匹配器法、调整架对准法、V 型槽法和陶瓷插芯对准法等, 如表 1 所示。一般来说, 模式匹配器法是一

种最直接有效的方法, 它可以比较准确地对双包层光纤光栅的基模进行准确的测量, 并且具有很好的重复性和稳定性, 但是这种方法需要使用相对昂贵的模式匹配器, 不同规格的双包层光纤都需要有严格对应的模式匹配器, 限制了应用的灵活性; 此外每次光栅的刻写都需要熔接, 给实验的操作带来一定的复杂性。调整架对准法具有较大的灵活性, 但是需要使用精度较高的调整架, 使用过程较为复杂。V 型槽法和陶瓷插芯对准法对支架器件的加工精度有较高的要求。因此, 在实际大芯径双包层光纤光栅的模式特性研究过程中, 需要根据应用的需要选择合理的测量方案。

## 4 结 论

利用相位掩模法在  $20/400 \mu\text{m}$  的 LMA-DCF 上实现了高反射率 FBG 的制备。阐述了大芯径双包层光纤光栅在制备过程中需要注意的问题。通过

表 1 大芯径双包层光纤光栅谱线特性的测试

Table 1 Measurement of mode characteristics for LMA-DCF gratings

Testing method	End cutting	Fusion splice	Operation simplicity (1 for the simplest)	Fundamental mode test	Higher mode test	Test stability	Test repeatability
Mode field adapter method	Yes	Yes	3	Yes	No	High	High
Adjustment frame method	Yes	No	5	Yes	Yes	High	High
V-groove method	Yes	No	2	Yes	No	High	High
Ceramic ferrule alignment method	Yes	No	1	Depending on machining precision	No	Low	Low

调整单模光纤入射光场和 LMA-DCF 的相对偏移量,对 LMA-DCF 光栅中的模式特性进行了详细的研究,得到了不同偏移量时光栅中的 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的反射光谱以及相应模场光斑的分布,并通过传输矩阵法对双包层光纤光栅在不同偏移量下的反射谱做了模拟计算,模拟结果与实验研究符合得很好。对 LMA-DCF 光栅的光谱测试方法进行了对比研究,分析了各种方法的优缺点。

参 考 文 献

1 E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi *et al.*. Double-clad, offset core Nd fiber laser[C]. Digest of Conference on Optical Fiber Sensors, 1988, PD5

2 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  
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

3 T. Weber, W. Luthy, H. P. Weber *et al.*. Cladding-pumped fiber laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(2): 326~329

4 Zhang Jun. The Study of High Power Fiber Laser [D]. Changchun: Jilin University, 2004. 17~21  
张 军. 高功率光纤激光器实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004. 17~21

5 Kuo Li, Zhen'an Zhou, Aichun Liu. A high sensitive fiber Bragg grating cryogenic temperature sensor [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 121~123

6 Yongqing Lei, Jue Wei, Xiaofeng Xu *et al.*. Analysis of sampled fiber Bragg gratings in polarization-maintaining fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(7): 479~482

7 Huang Bangcai. Study of the Key-Problems of the High Power Double-Clad Fiber Lasers and Amplifiers [D]. Tianjin: Nankai University, 2008. 52~55  
黄榜才. 高功率全光纤激光器及放大器中关键问题的研究[D]. 天津: 南开大学, 2008. 52~55

8 Zhang Jun, Pan Yuzhai, Hu Guijun *et al.*. Output characteristics of Yb<sup>3+</sup> doped double-clad fiber grating laser [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2): 173~176  
张 军,潘玉寨,胡贵军等. 掺镱双包层光纤光栅激光器输出特性的研究[J]. *激光技术*, 2004, **28**(2): 173~176

9 A. Iho, A. Tervonen, K. Ylä-Jarkko *et al.*. Characterization of modal coupling of Bragg gratings in large mode-area fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(13): 2031~2038

10 W. Mohammed, Xijia Gu. Fiber Bragg grating in large-mode-area fiber for high power fiber laser applications[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(28): 5297~5301

11 J. L. Lebowitz, H. Spohn. Microscopic basis for Fick's law for self-diffusion[J]. *J. Statistical Physics*, 1982, **28**(3): 539~556

12 D. Pastor, J. C. Capmany, D. Ortega *et al.*. Design of apodized linearly chirped fiber gratings for dispersion compensation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(11): 2581~2588

13 Huang Wen, Han Shi, He Sailing. A study on the optimal apodization function for a fiber Bragg grating [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(12): 1247~1251  
黄 雯,韩 石,何赛灵. 光纤光栅最佳切趾函数的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(12): 1247~1251

14 M. McCall. On the application of coupled mode theory for modeling fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(2): 236~242

15 Lü Changgui. Theoretical Analysis of Transmission Characteristics of Fiber Bragg Gratings and Their Experimental Study [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. 39~45  
吕昌贵. 光纤布拉格光栅传输特性理论分析及其实验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005. 39~45

16 K. Okamoto. Fundamentals of Optical Waveguides [M]. New York: Academic, 2006. 71~77

17 A. W. Snyder. Coupled-mode theory for optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(11): 1267~1277

18 A. Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **9**(9): 919~933

19 W. S. Mohammed, A. Mehta, E. G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 469~477

20 M. E. Fermann. Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(1): 52~54

21 Zhang Zijia. Theoretical Basis and Sensor Technology of Fiber Bragg Grating [M]. Beijing: Science Press, 2009. 100~105  
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 100~105

22 Xiang Yanrong. Study on the Theory and Fabrication Technology of Fiber Bragg Grating [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005. 49~54  
相艳荣. 光纤光栅的理论和制作工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005. 49~54