

文章编号: 0253-2239(2010)12-3391-07

# 基于双芯光纤的长周期光纤光栅及其耦合特性

王 雪 路密芳 杨 军 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 报道了一种基于偏芯结构的双芯光纤制作的长周期光纤光栅,研究了在这种双芯光纤中写入相同结构的长周期光纤光栅的模式耦合特性,这种双芯结构能够将两个平行的长周期光纤光栅集成在一根光纤中。通过模拟计算发现在光纤圆周横截面不同方位进行曝光,可获得不同的光栅透射谱,通过利用 CO<sub>2</sub> 激光脉冲曝光方法实现其制备,实验得出了采用单侧曝光方法在偏芯结构的双芯光纤上制备长周期光纤光栅的最佳写入方式。通过理论分析和实验的对比,结果表明,双芯长周期光纤光栅透射谱依赖于在双芯光纤圆周上的曝光方向。

**关键词** 光栅;长周期光纤光栅;双芯光纤;CO<sub>2</sub> 激光;耦合模理论;透射谱

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103012.3391

## Twin-Core Fiber-Based Long-Period Fiber Grating and Its Coupling Characteristics

Wang Xue Lu Mifang Yang Jun Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** A twin-core fiber-based long period fiber grating has been proposed. It makes two long-period gratings in parallel and integrates the two components in one fiber. The mode coupling between two same pattern long-period fiber gratings in this twin-core fiber is also investigated. Simulation results show that different transmission spectrum with three different exposure directions on circular cross section of the fiber can be obtained. The twin-core long-period fiber grating is fabricated by using CO<sub>2</sub> laser pulse exposure approach. The best way to achieve this twin-core long period fiber grating is also given by experiment. It is shown that the transmission spectrum characteristics of the two long-period gratings written in the twin-core fiber depend on the CO<sub>2</sub> laser pulses exposure direction on the fiber circumference.

**Key words** gratings; long-period fiber grating (LPFG); twin-core fiber; CO<sub>2</sub> laser; coupled-mode theory; transmission spectrum

### 1 引 言

在过去的 20 多年里,长周期光纤光栅(LPFG)发展得到了广泛的关注和研究,在光纤通信和光纤传感领域内都有着重要的应用<sup>[1~4]</sup>。长周期光纤光栅主要是由于光纤中残余应力的释放而形成的<sup>[5~7]</sup>,由于其应用需求的多样化,长周期光纤光栅的制备方法也非常多<sup>[8,9]</sup>。采用两个并排平行排列

的长周期光纤光栅,通过两个独立包层倏逝场的耦合能够实现 LPFG 的耦合<sup>[10,11]</sup>,但是这种排列方法对于两个光纤的位置精度要求很高,且不易于操作。如果采用双芯光纤实现上述结构,不但结构简单,而且可以避免两个单独光纤的 LPFG 因微小错位带来的影响。本文采用 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在一种特殊的双芯结构光纤的两个纤芯上写入相同结构的长周期

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(60877046,60707013,60807032)资助课题。

作者简介: 王 雪(1981—),女,博士研究生,主要从事光纤传感技术及应用等方面的研究。

E-mail: wangxue0325@126.com

导师简介: 苑立波(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传输理论、光纤器件、光纤传感技术及应用等方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com(通信联系人)

本文电子版彩色效果详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)相关文章。

光纤光栅,建立了集成在一根光纤中的两个长周期光纤光栅之间的耦合模理论模型,并进一步分析了其传输谱特性。

## 2 理论分析

一种特殊结构的非对称双芯光纤结构示意图如图 1(a) 所示,该双芯光纤的两个纤芯共用一个包层,每个纤芯都可作为一个独立的导模。两个纤芯

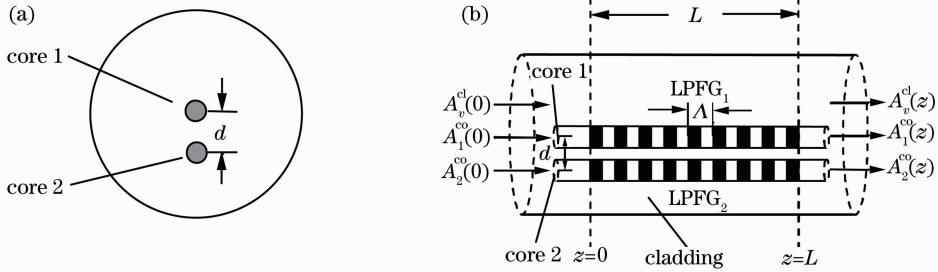


图 1 基于非对称双芯光纤制作的长周期光纤光栅示意图 (a) 非对称双芯光纤; (b) CO<sub>2</sub> 激光写入的两个长周期光纤光栅

Fig. 1 Schematic diagram of LPFG based on unsymmetrical twin-core fiber. (a) Special designed unsymmetrical twin-core fiber, (b) two LPFG written by CO<sub>2</sub> laser

在图 1(b) 所示的坐标系中,  $z=0$  时, 光源的光注入到纤芯 1 的 LP<sub>01</sub> 模中, LPFG<sub>1</sub> 使光从纤芯 1 的 LP<sub>01</sub> 模耦合到包层模中, 同时, 在 LPFG<sub>2</sub> 的作用下, 包层模中的能量直接耦合到纤芯 2 的 LP<sub>01</sub> 模中, 与两根平行 LPFG 通过倏逝场来实现两个包层模间的耦合<sup>[11]</sup> 相比, 其模式间能量转换的物理过程更为直接。双芯 LPFG 的模式耦合包括两个纤芯导模间的互相耦合, 两个纤芯导模分别与包层模间的耦合, 两个纤芯导模的自耦合以及包层模与包层模间的耦合。为了简化计算, 在双芯 LPFG 的所有模式中, 作为近似, 仅考虑起主要作用的两个纤芯导模与一阶  $\nu$  次包层模这三类模式间的耦合。在计算其中一个纤芯导模与包层模耦合时, 将另一个纤芯与包层视为一体。将双芯 LPFG 的耦合看作几种独立耦合效应的叠加。根据耦合模理论, 建立如下双芯 LPFG 的耦合模方程的简化模型:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_\nu(z) \end{bmatrix} - j \begin{bmatrix} \beta_1 a_1(z) \\ \beta_2 a_2(z) \\ \beta_\nu a_\nu(z) \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{1\nu} \\ K_{21} & K_{22} & K_{2\nu} \\ K_{\nu 1} & K_{\nu 2} & K_{\nu\nu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(z) \\ a_2(z) \\ a_\nu(z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $K_{11}$  和  $K_{22}$  分别为两个纤芯 LP<sub>01</sub> 模的自耦合系数, 假设该双芯光纤的两个纤芯具有相同的物理参数, 则有  $K_{11} = K_{22} = K_{01-01}^{\text{co-co}}$ ;  $K_{12}$  和  $K_{21}$  分别为两个纤

在光纤横截面呈非对称分布, 其中一个纤芯位于圆心, 定义为纤芯 1, 另一个纤芯位于圆心旁, 定义为纤芯 2, 设两个纤芯之间的距离为  $d$ , 两个纤芯半径均为  $a_1$ , 折射率均为  $n_1$ , 包层半径和折射率分别为  $a_2$  和  $n_2$ 。采用 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在该双芯光纤的两个纤芯上写入相同周期  $\Lambda$ 、相同长度  $L$  的长周期光纤光栅分别为 LPFG<sub>1</sub> 和 LPFG<sub>2</sub>, 如图 1(b) 所示。

芯导模之间的互耦合系数, 设  $K_{12} = K_{21} = \kappa$ ;  $K_{mm}$  ( $m=1, 2, n=\nu$ , 或  $m=\nu, n=1, 2$ ) 表示两个纤芯导模与一阶  $\nu$  次包层模之间的互耦合系数, 令  $K_{1\nu} = K_{\nu 1} = K_{1\nu-01}^{\text{cl-co}}$ ;  $K_{2\nu} = K_{\nu 2} = K_{2\nu-01}^{\text{cl-co}}$ ;  $K_{\nu\nu}$  为包层模与包层模之间的耦合系数;  $\beta_i$  ( $i=1, 2, \nu$ ) 为双芯光纤中的传播常数.  $a_i(z)$  ( $i=1, 2, \nu$ ) 为双芯光纤中的模式分量, 则可进一步表示为

$$a_1(z) = A_1^{\text{co}} \exp(j\beta_1^{\text{co}} z), \quad (2)$$

$$a_2(z) = A_2^{\text{co}} \exp(j\beta_2^{\text{co}} z), \quad (3)$$

$$a_\nu(z) = A_\nu^{\text{cl}} \exp(j\beta_\nu^{\text{cl}} z), \quad (4)$$

式中  $A_i^{\text{co}}(z)$  ( $i=1, 2$ ) 和  $A_\nu^{\text{cl}}(z)$  分别表示两个纤芯 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>0m</sub> 模的振幅;  $\beta_1^{\text{co}}$  和  $\beta_2^{\text{co}}$  分别为纤芯 1 和纤芯 2 的传播常数,  $\beta_\nu^{\text{cl}}$  为包层的传播常数, 假设两个纤芯具有相同的传播常数, 即  $\beta_1^{\text{co}} = \beta_2^{\text{co}} = \beta_0^{\text{co}}$ 。将 (2)~(4) 式代入 (1) 式并整理可得

$$\frac{dA_1^{\text{co}}}{dz} = jK_{01-01}^{\text{co-co}} A_1^{\text{co}} + j\kappa A_2^{\text{co}} + jK_{1\nu-01}^{\text{cl-co}} A_\nu^{\text{cl}} \exp[j(\beta_\nu^{\text{cl}} - \beta_0^{\text{co}}) z], \quad (5)$$

$$\frac{dA_2^{\text{co}}}{dz} = j\kappa A_1^{\text{co}} + jK_{01-01}^{\text{co-co}} A_2^{\text{co}} + jK_{2\nu-01}^{\text{cl-co}} A_\nu^{\text{cl}} \exp[j(\beta_\nu^{\text{cl}} - \beta_0^{\text{co}}) z], \quad (6)$$

$$\frac{dA_\nu^{\text{cl}}}{dz} = jK_{1\nu-01}^{\text{cl-co}} A_1^{\text{co}} \exp[j(\beta_0^{\text{co}} - \beta_\nu^{\text{cl}}) z] + jK_{2\nu-01}^{\text{cl-co}} A_2^{\text{co}} \exp[j(\beta_0^{\text{co}} - \beta_\nu^{\text{cl}}) z] + jK_{\nu\nu} A_\nu^{\text{cl}}, \quad (7)$$

(5)~(7) 式即为双芯长周期光纤光栅耦合模方程组的表达式, 由于包层模与包层模间的耦合较弱, 所以

忽略了  $K_{\nu\nu}$ ；同时，模式间的轴向耦合系数  $K_{\nu\mu}^z(z)$  远小于模式间的横向耦合系数  $K_{\nu\mu}^t(z)$ ，因此也略去了  $K_{\nu\mu}^z(z)$ 。于是(5)~(7)式的所有耦合系数均为横向耦合系数，可表示为<sup>[12]</sup>

$$K_{\nu\mu}^t(z) = \frac{\omega}{4} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty r dr \Delta\epsilon(r, z) E_\nu^t(r, \varphi) \cdot E_\mu^{t*}(r, \varphi), \quad (8)$$

式中  $\Delta\epsilon$  为电常量的微扰,  $E_\nu^t$  和  $E_\mu^{t*}$  分别为第  $\nu$  阶和第  $\mu$  阶模的电场分量, \* 表示共轭。

进一步定义模式间的耦合常数  $\kappa_{\nu\mu}(z)$ ，它表示光栅一个周期内的平均耦合系数<sup>[2]</sup>

$$K_{\nu\mu}^t(z) = \kappa_{\nu\mu}(z) \left(1 + m \cos \frac{2\pi}{\Lambda}\right), \quad (9)$$

式中  $m$  为折射率调制的条纹可见度, 且  $0 \leq m \leq 1$ ,  $\Lambda$  为光栅周期, 则两个纤芯导模的自耦合系数均可表示为

$$K_{01-01}^{\text{co-co}}(z) = \kappa_{01-01}^{\text{co-co}}(z) \left(1 + m \cos \frac{2\pi}{\Lambda}\right), \quad (10)$$

式中  $\kappa_{01-01}^{\text{co-co}}(z)$  为纤芯导模与纤芯导模之间的耦合常数, 其表达式为<sup>[6]</sup>

$$\kappa_{01-01}^{\text{co-co}}(z) = \sigma(z) \frac{2\pi n_1^2 b}{\lambda n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \left[1 + \frac{J_0^2(V \sqrt{1-b})}{J_1^2(V \sqrt{1-b})}\right], \quad (11)$$

式中  $\sigma(z)$  为光栅折射率沿  $z$  方向缓慢变化的包络;  $V = (2\pi/\lambda)a_1(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$  为归一化频率;  $b = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$  为模式的归一化有效折射率;  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  为纤芯导模有效折射率;  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$  为光纤的归一化纤芯与包层的折射率差;  $J_0$  和  $J_1$  分别为 0 阶和 1 阶第一类贝塞尔函数。

由于纤芯 1 位于圆心, 纤芯 1 的导模与包层模之间的耦合可以等效于单芯光纤 LPFG 的导模与包层模间的耦合, 其耦合常数可表示为<sup>[2]</sup>

$$\kappa_{1\nu-01}^{\text{cl-co}}(z) = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\pi b}{Z_0 n_2 \sqrt{1+2b\Delta}}\right)^{1/2} \frac{n_1^2 u_1}{u_1^2 - V^2(1-b)/a_1^2} \left(1 + \frac{\sigma_2 \xi_0}{n_1^2}\right) E_{1\nu}^{\text{cl}} \times \left[\frac{u_1 J_1(u_1 a_1) J_0(V \sqrt{1-b})}{J_1(V \sqrt{1-b})} - \frac{V \sqrt{1-b} J_0(u_1 a_1)}{a_1}\right], \quad (12)$$

式中  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$  为真空中的电磁阻抗; 其余参数取自参考文献[2], 将(12)式代入(9)式即可求得纤芯 1 与一阶  $\nu$  次包层模之间的互耦合系数  $\kappa_{1\nu-01}^{\text{cl-co}}$ 。

根据弱导近似理论, 两个纤芯导模间的耦合即紧邻耦合系数  $K_{12} = K_{21} = \kappa$  可表示为<sup>[12]</sup>

$$\kappa = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \frac{U^2}{a_1^2 V^2} \frac{K_0(Wd/a_1)}{K_1^2(W)}, \quad (13)$$

式中  $U = (2\pi/\lambda)a_1 \sqrt{n_1^2 - (n_{\text{eff}}^{\text{co}})^2}$ ,  $W = (2\pi/\lambda)a_1 \sqrt{(n_{\text{eff}}^{\text{co}})^2 - n_2^2}$ ,

$K_0$  和  $K_1$  分别为 0 阶和 1 阶第二类修正贝塞尔函数。两个纤芯间的耦合依赖于纤芯间距  $d$ , 通常当  $d > 4.5 \mu\text{m}$  时, 两个纤芯间的耦合将很弱, 近似为零, 此时可忽略紧邻耦合系数  $\kappa$ , 即光波在各纤芯中独立传播, 互不影响。

由于纤芯 2 位于圆心旁, 其周围包层模场分布不均匀。纤芯 2 导模与包层模之间的耦合与  $\text{CO}_2$  激光在横截面圆周照射的位置有关(图 2)。  $\text{CO}_2$  激光单侧曝光时, 沿激光照射方向光纤接受到的能量逐渐减小使

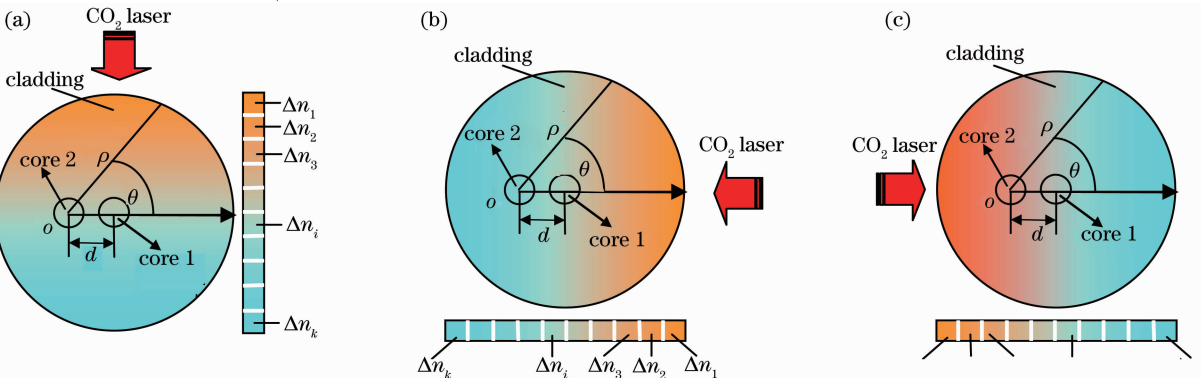


图 2 不同曝光方向下双芯光纤极坐标系。(a)两个纤芯同时被激光照射, (b)纤芯 1 先被照射, (c)纤芯 2 先被照射  
Fig. 2 Polar coordinates of two-core fiber with three different exposure directions. (a) Two cores were irradiated synchronously, (b) core 1 was irradiated firstly, (c) core 2 was irradiated firstly

得横截面折射率的变化量也逐渐减小,如图 2 所示,沿  $\text{CO}_2$  激光入射方向将折射率的变化划分成  $k$  个等值面,则有  $\Delta n_1 > \Delta n_2 > \Delta n_3 > \dots > \Delta n_i > \dots > \Delta n_k$ ,其中面向激光入射一侧的黄色  $\Delta n_1$  为折射率改变最大区域,背离激光入射一侧的蓝色  $\Delta n_k$  为折射率变化最小区域。可见,纤芯 1 在图 2 所示的三种情况下均位于同一个折射率变化等值面上,其折射率变化相同,而纤芯 2 在这三种情况下,分别位于横截面折射率分布的不同等值面上,其折射率变化也不同。以纤芯 2 作为极点在图 2 所示的三种情况下的极坐标系中,包层模边界  $\rho$  可表示为

$$\rho = d \cos \theta + \sqrt{a_2^2 - d^2 \sin^2 \theta} \quad (14)$$

式中  $\theta$  为  $\text{CO}_2$  激光照射方向,与图 2 对应  $\theta$  值分别取  $90^\circ, 0^\circ$  和  $180^\circ$ 。将(14)式代入(8)式中替换  $r$  可得到芯 2 导模与包层模之间的耦合系数  $K_{1v-01}^{cl-co_2}$ ,该耦合系数的计算过程十分复杂,在此通过 Matlab 7.0 软件完成其计算,此处仅给出该耦合系数的计算方法。根据边界条件  $A_1^{co}(0) = 1, A_2^{co}(0) = 0$  和  $A_1^{cl}(0) = 0$ ,求解(5)~(7)式方程可得到每个纤芯中 LPFG 的耦合效率,其表达式分别为

$$\eta_1 = |A_1^{co}(L)|^2 / |A_1^{co}(0)|^2, \quad (15)$$

$$\eta_2 = |A_2^{co}(L)|^2 / |A_1^{co}(0)|^2, \quad (16)$$

假设在双芯光纤中写入均匀的长周期光纤光栅,其参数为  $a_1 = 4.15 \mu\text{m}, a_2 = 62.5 \mu\text{m}, d = 20 \mu\text{m}, n_1 = 1.458, n_2 = 1.45, \Lambda = 635 \mu\text{m}$ ,周期数  $N = 40$ ,光栅折射率调制的条纹可见度  $m = 1$ 。图 3 为用 Matlab 7.0

模拟计算的双芯长周期光纤光栅中纤芯 1 的透射谱,在图 2 所示的三种写入方式中,纤芯 1 位于相同折射率变化等值面上,所以纤芯 1 的透射谱相同,在波长  $1500 \sim 1600 \text{ nm}$  范围内,存在两个谐振峰。

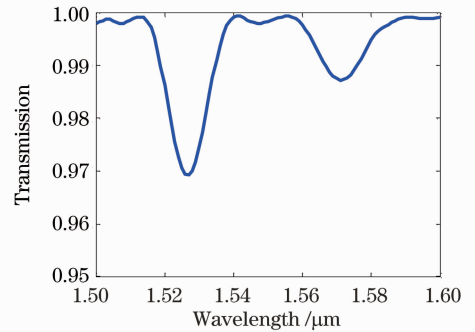


图 3 双芯 LPFG 纤芯 1 的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of core 1 of the twin-core LPFG

纤芯 2 中光栅的透射谱如图 4 所示,三个透射谱分别对应图 2 所示的三种写入位置,从图中可以定性分析三种曝光方式对两个纤芯中光栅透射谱的影响。纤芯 2 与  $\text{CO}_2$  激光入射的位置不同导致了纤芯 2 中光栅谐振波长的漂移,谐振峰的个数和位置也会受到影响。如图 4(a)所示,右侧谐振峰有微弱分裂趋势,两个峰间距离较大,图 4(b)中,当纤芯 1 先被照射时,纤芯 2 中光栅透射谱的左侧谐振峰较明显地分裂成为两个峰,而图 4(c)所示的纤芯 2 先被照射的情况则没有谐振峰分裂的现象。

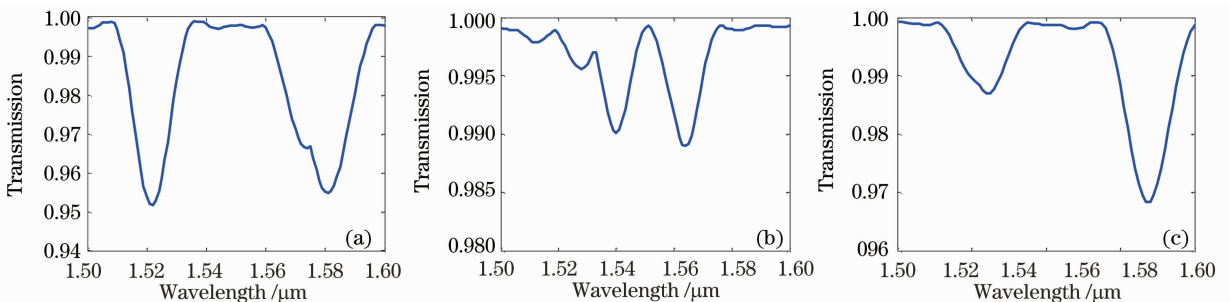


图 4 双芯 LPFG 纤芯 2 的透射谱。(a)两个纤芯同时被激光照射;(b)纤芯 1 先被照射;(c)纤芯 2 先被照射

Fig. 4 Transmission spectra of core 2 of the twin-core LPFG with three exposure directions. (a) Two cores were irradiated synchronously; (b) core 1 was irradiated firstly; (c) core 2 was irradiated firstly

### 3 实验及分析

实验中选用课题组自行设计制作的非对称结构双芯光纤,其横截面示意图如图 5 所示,纤芯间距  $d = 35.6 \mu\text{m}$ ,两个纤芯半径均为  $a_1 = 3.85 \mu\text{m}$ ,折射率均为  $n_1 = 1.4533$ ,包层半径  $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,折射率  $n_2 = 1.45$ 。

在双芯 LPFG 制作前,首先要判断两个纤芯的位置与  $\text{CO}_2$  激光入射方向的关系。采用图 6 所示的实验装置实现对两个纤芯位置关系的判别。该装置有两个可三维调节的旋转盘分别由步进电机控制,可以分别实现同步、异步转动,最小刻度为  $1^\circ$ ,圆盘两侧分别装有一个 V 型槽用来固定光纤。由

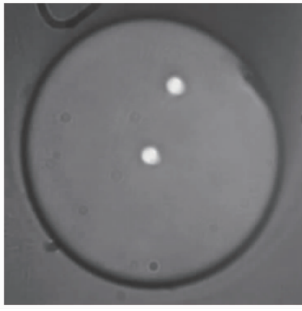


图 5 双芯光纤横截面

Fig. 5 Cross section of twin-core fiber

波长 650 nm 的激光二极管 (LD) 光源发出的光, 经过一段单模光纤由光纤熔接机 (OFFS) 将光耦合到双芯光纤的纤芯 1 中, 双芯光纤的出射光场由一台与计算机相连的 CCD 实时采集。

首先将待曝光的双芯光纤固定在两个圆盘的 V 型槽上, 双芯光纤的一端通过 OFFS 与单芯光纤进行耦合, 另一端连接到 CCD 采集系统。LD 光源发出的光注入到单芯光纤中, 然后手动调节 OFFS 改变单芯光纤位置, 光注入到双芯光纤的纤芯 1 中, 然后拉大两光纤端面的距离, 使两个纤芯均通光。

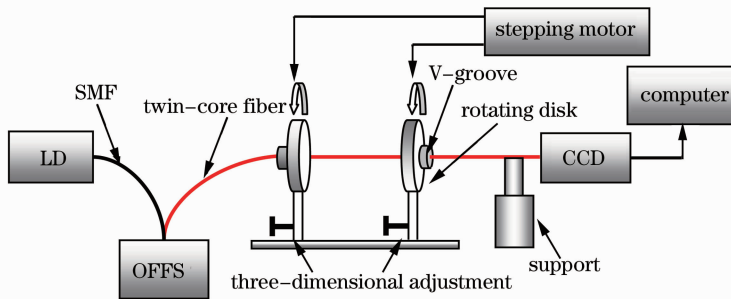


图 6 纤芯位置检测系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of core location detection system

双芯长周期光纤光栅制作装置图如图 7 所示, 实验所用的光源为放大自发辐射 (ASE) 光源, 其中心波长约为 1550 nm, 工作波长范围为 1520 ~ 1570 nm。高频 CO<sub>2</sub> 激光器由计算机控制, 波长为 10.6 μm, 全功率为 10 W, 典型的工作频率为 5 kHz, CO<sub>2</sub> 激光光束聚焦光斑直径为 0.04 mm。将调整好写入位置的双芯光纤两端分别通过 OFFS 与单芯光纤进行耦合并分别接入 ASE 光源和光谱

分析仪 (OSA)。在右侧旋转盘与支架中间悬挂一个 10 g 的砝码以保持光纤处于拉直状态, 通过两侧三维调节架将双芯光纤调节至 CO<sub>2</sub> 激光的焦平面上。通过计算机控制激光的能量, 在光纤上写入长周期光纤光栅的周期为  $\Lambda = 635 \mu\text{m}$ , 光栅长度为  $L = 25.4 \text{ mm}$ 。在 LPFG 制作过程中, 通过光谱分析仪 (型号: AQ6317B) 对纤芯 1 的透射谱进行实时监测。

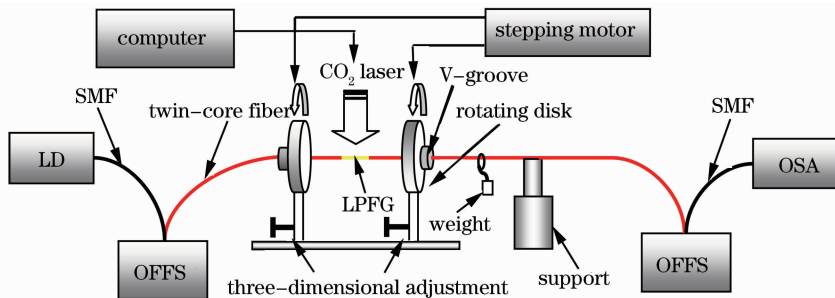


图 7 双芯 LPFG 制备实验系统装置

Fig. 7 Experimental setup of the twin-core LPFG fabrication system

在采集纤芯 2 中光栅的透射谱之前, 首先调节图 7 中右侧 OFFS, 将纤芯 2 的光耦合到右侧单芯光纤中, 再通过 OSA 采集透射谱。在图 2(a) 和 (b) 中, 两个纤芯同时被照射和纤芯 1 先被照射两种情况下, CO<sub>2</sub> 激光都是直接照射到纤芯 1 上, 而在图 2(c) 中, 纤芯 1 受到 CO<sub>2</sub> 激光照射晚于纤芯 2,

能量在经过纤芯 2 后到达纤芯 1, 与直接到达纤芯 1 不同, CO<sub>2</sub> 激光照射到光纤表面时会同时发生反射和透射效应, 且反射效应较大, 只有 20% 的激光透射到光纤中<sup>[13]</sup>, 由于二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 对波长为 10.6 μm 的光吸收较强, 激光能量沿入射方向逐渐减弱。此外, 当激光先后照射到两个纤芯时, 前一个



纤芯对激光的衍射以及吸收的作用,使得激光到达第二个纤芯时的激光强度大大降低,此时纤芯 1 接收到  $\text{CO}_2$  激光能量较少。

图 8 为在三种曝光方向制作的双芯 LPFG 的两个纤芯中的透射谱。图 8(a)和(b)所示纤芯 1 中光栅的透射基本相同,图 8(c)所示的纤芯 1 中光栅的透射谱与前两种情况相比向短波方向漂移,且插入损耗较大。图 8 所示的三种情况下纤芯 2 中光栅透射谱与图 2 所示的模拟计算结果基本一致,图 8(a)中纤芯 2 光栅的透射谱虽然出现了三个谐振峰,但耦合到纤芯 2 中的能量较低;图 8(b)和(c)中,芯 2 中耦合入的能量明显增多,但图 8(c)所示的情况插入损耗比较大。通过上述三种实验结果比较可以看出,两个纤芯先后接收到激光照射时,纤芯 2 更易于被耦合入光能量,但是纤芯 2 先被照射时会使两个纤芯都引入较大的插入损耗。 $\text{CO}_2$  激光照射到光纤表面时发生的折射效应,使得激光聚焦到纤芯上的光斑直径小于  $40 \mu\text{m}$ (激光初始聚焦光斑直

径),两个纤芯之间的距离与纤芯直径的总和为  $43.3 \mu\text{m}$ ,经过折射作用后的聚焦光斑尚不能实现同时覆盖两个纤芯的目的,因此采用通常的做法使两个纤芯同时被照射的方法,无法同时在两个纤芯中获得较好的光谱,这也是图 8(a)所示的纤芯 2 中耦合入光能量较少的原因之一。由于实验所用的双芯光纤为课题组自行研制的光纤,光纤的一些特性还不是很完善,这也是导致纤芯 2 中耦合效率较低的另一个原因所在。因此,根据现有的实验条件在这种双芯光纤上制作 LPFG 的最优方式是纤芯 1 先被照射,在该位置写入不但可以使纤芯 2 获得更多的光能量,还能减小插入损耗的引入。对于提高纤芯 2 的耦合效率、减小纤芯 2 中 LPFG 的损耗的问题,课题组正在对其理论分析及实现方法进行深入的研究工作,完善双芯光纤的基本特性和采用改进方法(提出一种采用加扭转预应力的制备方法),都能够一定程度上改善上述缺陷。

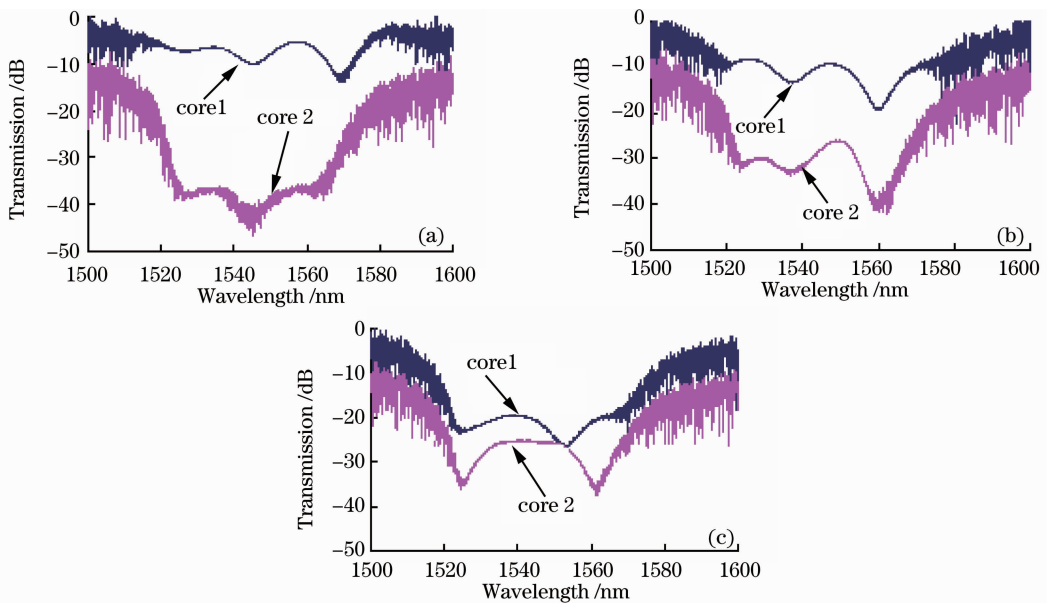


图 8 双芯 LPFG 三种曝光情况下透射谱实验结果。(a)两个纤芯同时被激光照射,  
(b)纤芯 1 先被照射,(c)纤芯 2 先被照射

Fig. 8 Experimental results of transmission spectrums of twin-core fiber LPFG with three exposure states. (a) Two cores were irradiated simultaneously, (b) core 1 was irradiated firstly, (c) core 2 was irradiated firstly

## 4 结 论

提出了一种基于特殊结构双芯光纤制作的双芯长周期光纤光栅,并进行了理论分析和实验验证。这种双芯长周期光纤光栅采用高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲曝光方法制备而成,由于在 LPFG2 的作用下,包层模中的能量直接耦合到纤芯 2 形成纤芯 2 中的

$\text{LP}_{01}$  模,与两根平行 LPFG 通过倏逝场来实现两个包层模间的耦合<sup>[10]</sup>相比,这种同在一个包层中的两个芯的模式间能量转换更直接有效,因此可将这种结构的光栅直接用于制作波长选择器,体积小且更易于实现,同时还能避免两根平行光纤匹配时需要精确调节的麻烦。双芯 LPFG 在光纤通信和光纤

传感领域<sup>[14,15]</sup>具有广泛的应用前景。理论模拟计算结果表明,在光纤横截面圆周不同位置进行曝光,获得的光栅透射谱也不同,实验结果也验证了该理论分析结果。将实验与理论结果进行比较,可以看出两者存在一定的差别,这是由于在理论分析过程中,进行了一系列近似简化所致。

### 参 考 文 献

- 1 Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjing *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation [J]. *Chinese J. Lasers.*, 2009, **36**(5): 1129~1133  
宋 韵, 朱 涛, 饶云江 等. 旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1129~1133
- 2 T. Erdogan. Cladding-mode resonances in short-and long period fiber grating filters[J]. *J. Opt. Soc. Amer. A.*, 1997, **14**(8): 1760~1773
- 3 Miao Yinping, Liu Bo, Zhao Qida *et al.*. Simultaneous measurement of bending-curvature and temperature using single tilted fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers.*, 2009, **36**(9): 2338~2392  
苗银萍, 刘 波, 赵启大 等. 用单一倾斜光纤光栅实现曲率和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2338~2392
- 4 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive index characteristic for edge-written long-period fiber gratings induced by CO<sub>2</sub> laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1730~1734  
王久玲, 饶云江, 朱 涛 等. CO<sub>2</sub> 激光脉冲边缘写入的长周期光纤光栅折射率特性研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1730~1734
- 5 T. Enomoto, M. Shigehara, S. Ishikawa *et al.*. Long-period fiber grating in a pure-silica-core fiber written by residual stress relaxation [C]. Proc. Optical Fiber Communication (OFC), 1998, 277~278
- 6 Y. Pack, T. J. Ahn, Y. H. Kim *et al.*. Novel technique for measuring the residual stress and the photoelastic effect profile of an optical fiber[C]. Proc. Optical Fiber Communication (OFC), 2001, 2: TuM4-1~TuM4-3
- 7 Y. Park, K. Oh, U. C. Pack *et al.*. Residual stress in a doubly clad fiber with depressed inner cladding (DIC)[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(10): 1823~1834
- 8 V. Grubsky, J. Feinberg. Fabrication of axially symmetric long-period fiber gratings with a carbon dioxide laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2296~2298
- 9 Y. Ishii, S. Okude, K. Nishide *et al.*. PDL reduction of long-period fiber grating by rotating exposure method[C]. Proc. 27th Eur. Conf. on Opt. Commun., 2001, 3: 354~355
- 10 V. Grubsky, D. S. Starodubov, J. Feinberg. Wavelength-selective coupler and add-drop multiplexer using long-period fiber gratings[C]. Optical Fiber Communication Conf. Tech. Dig., 2000, **4**: 28~30
- 11 K. S. Chiang, F. Y. M. Chan, M. N. Ng. Analysis of two parallel long-period fiber gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**: 1358~1366
- 12 A. W. Snyder. Coupled-mode theory for optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(11): 1267~1277
- 13 G. D. van Wiggeren, T. K. Gaylord, D. D. Davis *et al.*. Axial rotation dependence of resonances in curved CO<sub>2</sub>-laser-induced long-period fibre gratings[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16): 1354~1355
- 14 A. Fender, E. J. Rigg, R. R. J. Maier *et al.*. Dynamic two-axis curvature measurement using multicore fiber Bragg gratings interrogated by arrayed waveguide gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(36): 9041~9048
- 15 W. N. MacPherson, G. M. H. Flockhart, R. R. J. Maier *et al.*. Pitch and roll sensing using fibre Bragg gratings in multicore fibre[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**: 1642~1646