

红外飞秒激光逐点刻写光纤布拉格光栅的束斑优化

胡辽林 步丽娜 华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 用红外飞秒激光逐点刻写低阶光纤布拉格光栅(FBG),光束精确聚焦到光纤纤芯形成很小的光斑是至关重要的。把光纤看作柱透镜,理论分析和用 Zemax 软件仿真了单个物镜聚焦和柱透镜-物镜组合聚焦两种情况下光纤纤芯的光斑尺寸。单个物镜聚焦时光纤纤芯的光斑尺寸理论计算为 $0.67\ \mu\text{m}\times 84\ \mu\text{m}$,仿真为 $2.6\ \mu\text{m}\times 76\ \mu\text{m}$;柱透镜-物镜组合聚焦时光纤纤芯的光斑尺寸理论计算为 $3.76\ \mu\text{m}\times 0.67\ \mu\text{m}$,仿真为 $4.1\ \mu\text{m}\times 2.2\ \mu\text{m}$ 。发现利用柱透镜-物镜组合聚焦在纤芯能得到很小的光斑,光纤轴向尺寸大大缩小,这为制作低阶光纤布拉格光栅提供了可能性和基础。

关键词 激光技术;光栅;逐点;红外飞秒激光;束斑尺寸

中图分类号 TN153; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.041404

Improvement of Beam-Spot Size in Fiber Bragg Grating Inscribed Point-by-Point with Infrared Femtosecond Laser

Hu Liaolin Bu Lina Hua Dengxin

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract It is important that the light beam is focused into fiber core precisely with a small size when low-order fiber Bragg grating (FBG) is inscribed point-by-point with infrared femtosecond laser. The beam-spot size in fiber core is analyzed theoretically and simulated with Zemax software in the cases of focusing with an objective lens and focusing with an objective lens combined with a cylindrical lens separately when the optical fiber is thought as a cylindrical lens. The beam size is $0.67\ \mu\text{m}\times 84\ \mu\text{m}$ theoretically and $2.6\ \mu\text{m}\times 76\ \mu\text{m}$ simulatively separately when focusing using an objective lens, and the beam size is $3.76\ \mu\text{m}\times 0.67\ \mu\text{m}$ theoretically and $4.1\ \mu\text{m}\times 2.2\ \mu\text{m}$ simulatively separately when focusing using an objective lens combined with a cylindrical lens. It is found that the beam-spot size in the core can become very small when focusing using an objective lens combined with a cylindrical lens. This conclusion will provide possibility and basis for the fabrication of low-order FBG.

Key words laser technique; gratings; point-by-point; infrared femtosecond laser; beam-spot size

OCIS codes 140.3390; 050.2770; 220.3620

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是最近十多年来发展最为迅速的一种新型光纤无源器件。一直以来紫外激光是刻写FBG最常用的工具,但它有一定的缺陷:FBG高度依赖于光纤纤芯中掺杂材料的性质;在高温工作时,光栅中的折射率调制很容易被擦除(一般小于 $200\ ^\circ\text{C}$)^[1,2]。近年来,利用飞秒红外激光在通信光纤内刻写FBG成为研究热点^[1~10]。采用飞秒红外激光逐点刻写FBG,刻写灵活,但需要精确地将光束聚集到纤芯一点。而聚焦光斑总有一定的尺寸,如果光斑太大,制作低阶光纤光栅变得困难,还会影响成栅质量。通常用高倍显微物镜对激光束进行聚焦,由于光纤本身的圆柱形结构,在刻写过程中会出现折射现象和二次聚焦现象,使得一个方向上的束腰在纤芯处,另一个方向上的束腰不在纤芯处。文献[11]用射线方法分析了添加一个柱透镜带来的效果,但未考虑衍射极限,更未仿真。本文用理论分析和仿真比较了单个物镜聚焦和柱透

收稿日期:2013-01-05;收到修改稿日期:2013-01-10;网络出版日期:2013-03-11

基金项目:国家自然科学基金(61275185)和陕西省教育厅科学研究计划(2010JK716)资助课题。

作者简介:胡辽林(1968—),男,博士,副教授,主要从事光纤通信与传感方面的研究。E-mail: huliaolin@yahoo.com.cn

镜-物镜组合聚焦两种情况,发现利用柱透镜-物镜组合聚焦在纤芯中能得到较小的光斑,这为低阶 FBG 的制作提供了可能性。

2 飞秒激光逐点刻写 FBG 系统

飞秒逐点刻写是将一定强度的飞秒激光脉冲聚焦到光纤纤芯内,光纤沿轴向以一定速度平移,在纤芯内形成一系列沿光纤轴分布的周期性微爆区域^[11~13]。由于飞秒激光与介质的相互作用改变了该区域内的折射率,从而形成 FBG。光栅方程为

$$m\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_B 为布拉格波长, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为光纤光栅的周期, m 为光栅的阶(级)数,要制作低阶 FBG, Λ 应很小。

图 1 为飞秒红外激光逐点刻写 FBG 系统框图。理论计算和仿真时,飞秒红外激光的波长取为 800 nm,脉宽为 100 fs,重复频率为 1 kHz,飞秒激光通过快门后,由衰减器调节照射强度,并用分光镜分出一部分光由功率计监测功率。一般通信光纤去掉涂覆层后,安装在两个三维调节台上,两个三维调节台被固定在一个高精度二维移动平台上,在计算机控制下光纤随着高精度二维移动平台以特定速度精确地移动。

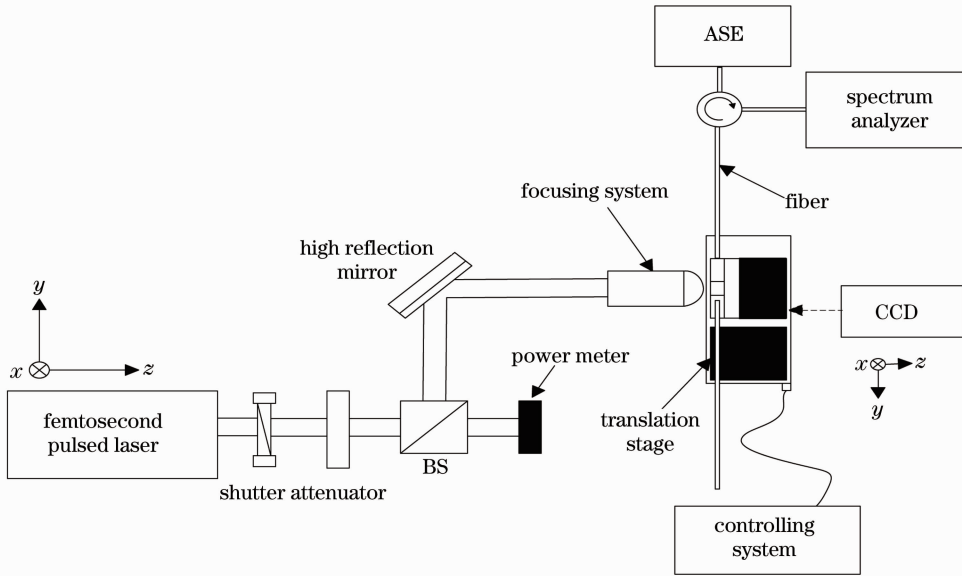


图 1 飞秒红外激光逐点刻写 FBG 系统框图

Fig. 1 System block diagram of FBG inscribed point-by-point with infrared femtosecond laser

激光束聚焦进光纤纤芯中,用两个三维调节台来调准直,仔细调节使光束焦点定位在纤芯的位置,用 CCD 来监视调准并在线监视刻写过程,用放大自发辐射(ASE)光源和光谱仪来动态监视刻写过程中光栅的反射谱。当平台以一个恒定的速度沿着光纤轴移动时,改变光纤与光束焦点接触的部位,每个脉冲在光纤纤芯产生一个光栅沟痕。光栅周期 Λ 能够通过改变平台移动速度与脉冲重复率之间的比率来设定,当平台以不同速度移动时,都能够刻写 FBG。

3 单个物镜聚焦

飞秒激光逐点刻写光纤光栅,通常用高倍显微物镜对激光束进行聚焦,由于光纤的圆柱形结构,聚焦过程中出现了折射现象和二次聚焦现象。文献[14]基于高斯光束变换,使光束的束腰在 x 方向比较容易定位在光纤纤芯,但在 y 方向束腰不在纤芯,如图 2(a)和(b)所示。

在光纤横截面方向(x 轴方向),物镜起透镜作用, x 轴方向束斑直径为

$$W = \frac{\lambda f}{\pi W_0}, \quad (2)$$

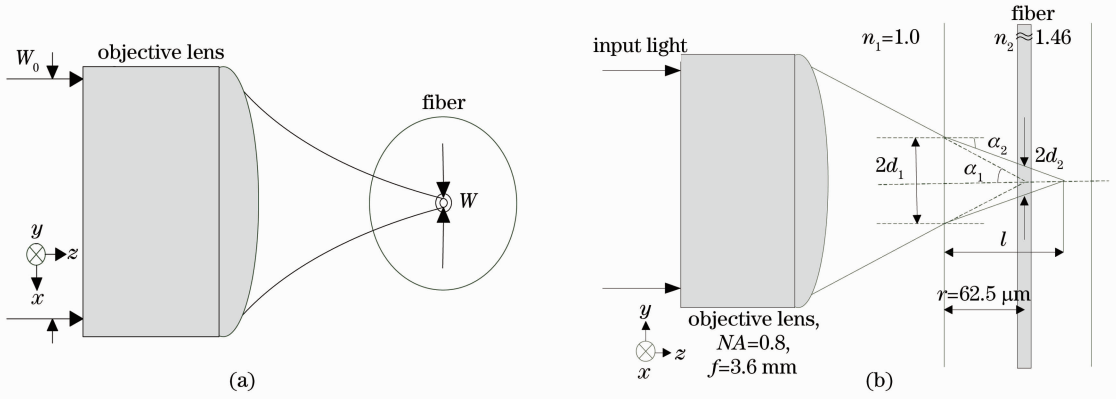


图 2 单个物镜聚焦。(a) 光纤横截面(x - z 面); (b) 光纤轴向(y - z 面)

Fig. 2 Focusing into fiber core using an objective lens. (a) Transverse section (x - z); (b) axial direction (y - z)

式中 W_0 为物镜的孔径, 取 $W_0 = 8 \text{ mm}$, f 为物镜焦距 (3.6 mm), λ 为激光波长 (800 nm)。由此得 x 轴方向的直径为 $W = 0.11 \text{ }\mu\text{m}$ 。而此时的束斑直径的衍射极限为^[15]

$$W = \frac{2\lambda}{\pi NA} = 0.67 \text{ }(\mu\text{m}), \quad (3)$$

式中 NA 为物镜的数值孔径。由高斯聚焦(2)式得到的束斑直径小于衍射极限的艾里斑[(3)式], 此时衍射效应占主导地位, 因此 x 轴方向纤芯束斑直径取为 $W = 0.67 \text{ }\mu\text{m}$ 。

而在光纤的轴方向(y 方向)孔径半角 α_1 和光纤侧面的折射角 α_2 满足

$$NA = n_1 \sin \alpha_1, \quad (4)$$

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2, \quad (5)$$

式中 n_1 为空气折射率, n_2 为光纤的折射率。光纤侧面处光斑直径 $2d_1$ 为

$$2d_1 = 2r \tan \alpha_1, \quad (6)$$

式中 r 为光纤半外径, $r = 62.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。从光纤侧面到焦点的距离 l 为

$$l = r \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2}. \quad (7)$$

由此, 在纤芯轴向束斑直径为

$$2d_2 = 2d_1(l - r)/l. \quad (8)$$

如果使用的物镜 $NA = 0.8$, 则纤芯轴向光斑直径为 $84 \text{ }\mu\text{m}$ 。

用 Zemax 仿真上述情况, 物镜采用理想透镜, 把光纤看作是一个微型柱透镜, 光束经过光纤表面时做高斯变换, 并非像理论计算那样, 光腰正好处于纤芯处。定义光强降到最大值的 $1/e^2$, 也就是降到最大值的

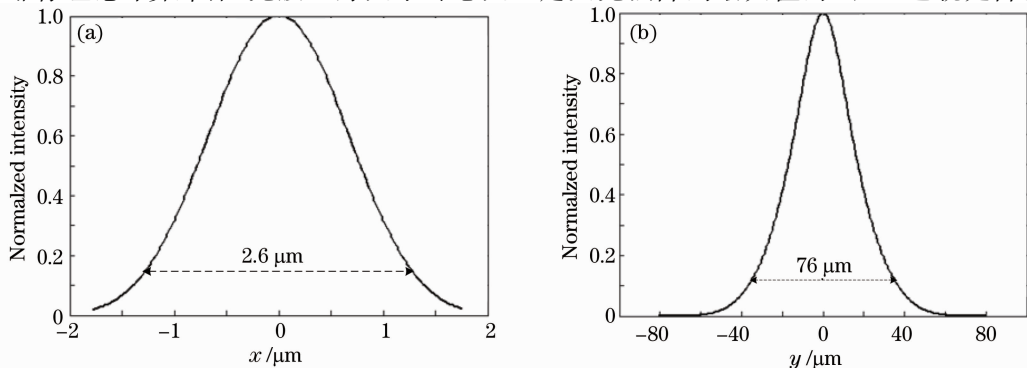


图 3 Zemax 仿真得到的单个物镜聚焦时的强度分布。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 3 Simulated intensity distribution by Zemax for focusing with an objective lens. (a) Distribution in x -direction; (b) distribution in y -direction

13.5%的宽度为束斑尺寸。仿真结果 x 方向尺寸为 $2.6 \mu\text{m}$, y 方向尺寸为 $76 \mu\text{m}$, 如图3所示。仿真值与理论值有差异, 理论值是所有光线的边界尺寸, 仿真值是按高斯光束束斑尺寸得到的。

由此可知, 使用高数值孔径物镜, 光纤柱透镜的影响是很大的。本文使用的是 $NA=0.8$ 的物镜, 纤芯的轴向束斑直径为 $76 \mu\text{m}$ 。根据光栅方程(1)式, 取 $\Lambda=76 \mu\text{m}$, $2n_{\text{eff}} \approx 3$, $\lambda_B=1.55 \mu\text{m}$, 则 $m \approx 147$ 。因此, 只能制作 147 阶以上的 FBG, 不能制作低阶 FBG。

4 柱透镜-物镜的组合聚焦

为了在光纤纤芯制作高效低阶光纤光栅, 在光纤的轴向(y 方向)的束径应很小, x 方向应适当变大。在物镜前面再加一个柱透镜构成一个组合聚焦系统, 即可得到合适的光斑, 如图4所示。将光纤看作柱透镜, 其焦距 f_F 由可表示为^[16]

$$\frac{1}{f_F} = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{D(n_2 - 1)^2}{r_1 r_2 n_2}, \quad (9)$$

式中 r_1 和 r_2 为光纤的曲率半径, D 为光纤的直径, $r_1=62.5 \mu\text{m}$, $r_2=-62.5 \mu\text{m}$, $D=125 \mu\text{m}$ 。

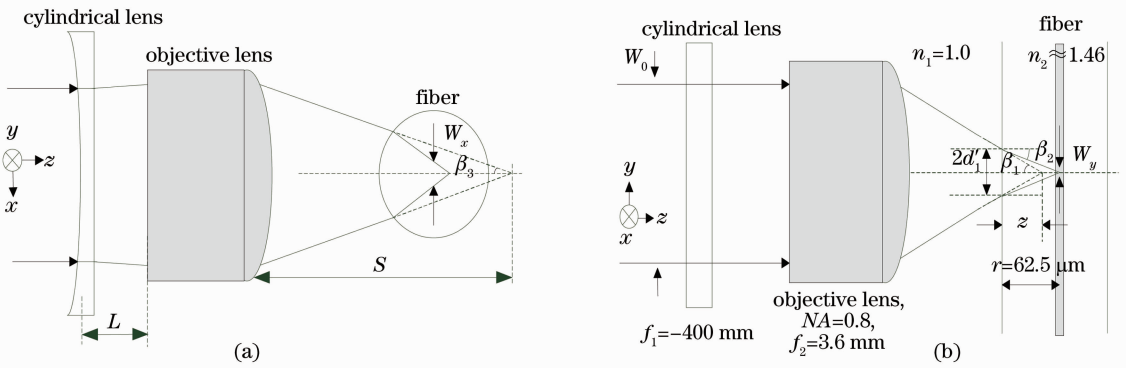


图4 物镜和柱透镜的组合聚焦。(a) 光纤横截面($x-z$ 面); (b) 光纤轴向($y-z$ 面)

Fig. 4 Focusing into fiber core using an objective lens combined with a cylindrical lens. (a) Transverse section ($x-z$); (b) axial direction ($y-z$)

在图4(b)中, β_1 为孔径半角, β_2 为光纤侧面的折射角, 分别类似于图2(b)中的 α_1 和 α_2 。光纤侧面处光斑直径 $2d'_1$ 为

$$2d'_1 = 2r \tan \beta_2. \quad (10)$$

为了使焦点位置在光纤中心, 光束应进入光纤内, 这时光束插入光纤内的距离为

$$z = d'_1 / \tan \beta_1, \quad (11)$$

由此得 $z=30 \mu\text{m}$ 。

首先, 在 $x-z$ 面上, 柱透镜和物镜的合成焦距 f 为

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{L}{f_1 f_2}, \quad (12)$$

式中 f_1 为柱透镜的焦距, f_2 为物镜的焦距, L 为两镜间的距离(100 mm)。从物镜第二主点到透镜组的焦点的距离为

$$S = \frac{f_2(f_1 - L)}{f_1 + f_2 - L}, \quad (13)$$

透镜组的孔径半角为

$$\beta_3 = \arctan\left(\frac{W_0}{2f}\right). \quad (14)$$

在没有光纤的情况下, 在焦点位置的 x 方向束斑直径为

$$\omega_x = 2(S - f_2) \tan \beta_3, \quad (15)$$

透镜组与光纤之间的距离 d 为

$$d = (f_2 - r + z) - (S - f), \quad (16)$$

而透镜组与光纤的合成焦距为

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f_F} - \frac{d}{ff_F}, \quad (17)$$

从光纤的第二主点到整个透镜组的焦点的距离为

$$S' = \frac{f_F(f-d)}{f+f_F-d}, \quad (18)$$

整个透镜组的孔径半角为

$$\beta' = \arctan \left(\frac{\frac{\omega_r}{2}}{S' + r - z} \right). \quad (19)$$

由此,纤芯处束斑直径为

$$W_x = 2S' \tan \beta'. \quad (20)$$

由(20)式得 $W_x = 3.76 \mu\text{m}$ 。

在 $y-z$ 坐标面上,柱透镜对光没有影响,仅有物镜聚焦影响。纤芯轴向束斑直径为

$$W_y = \frac{\lambda f_2}{\pi W_0}, \quad (21)$$

纤芯轴向束斑直径的衍射极限为

$$W_y = \frac{2\lambda}{\pi NA}. \quad (22)$$

由(21)式得 $W_y = 0.11 \mu\text{m}$,由(22)式得 $W_y = 0.67 \mu\text{m}$,取 $W_y = 0.67 \mu\text{m}$ 。通过计算,使用柱透镜和物镜构成的组合透镜聚焦到纤芯的光斑尺寸为 $3.76 \mu\text{m} \times 0.67 \mu\text{m}$,光纤轴方向的尺寸得到压缩,光束得到优化。

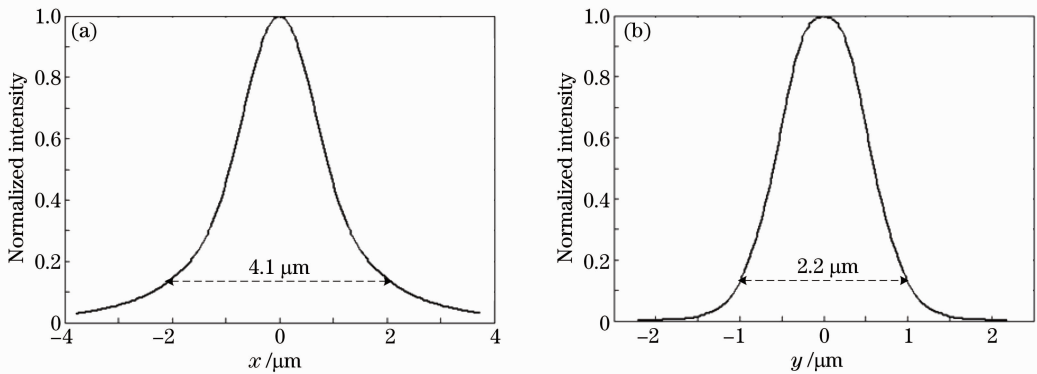


图5 Zemax 仿真得到的组合聚焦时的强度分布。(a) x 方向; (b) y 方向

Fig. 5 Simulated intensity distribution by Zemax for focusing with an objective lens combined with a cylindrical lens.

(a) Distribution in x -direction; (b) distribution in y -direction

同样用 Zemax 仿真组合聚焦情况,得到光斑尺寸大约为 $4.1 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$,如图 5 所示。与理论计算值 $3.76 \mu\text{m} \times 0.67 \mu\text{m}$ 相比, y 方向仿真的 $2.2 \mu\text{m}$ 大于理论的 $0.67 \mu\text{m}$,主要是由于光束入射到一定材质的介质中时,存在严重的像散现象,即使忽略一切像差也不可能完全聚焦于一点,仿真得到的值要大于理论计算值。图 6 比较了单个物镜和组合透镜的聚焦情况,光纤轴向束斑直径大大缩小。

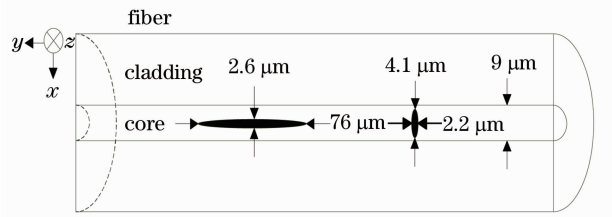


图6 单个物镜聚焦(左)和组合聚焦(右)的光斑比较

Fig. 6 Simulated beam spot comparison in fiber core between focusing using an objective lens (left) and focusing using an objective lens combined with a cylindrical lens (right)

5 结 论

分析了飞秒激光逐点刻写光纤光栅中由于光纤圆柱形结构对光束聚焦造成的影响,采用柱透镜与物镜的简单组合可弥补这一缺陷。加入柱透镜后,使光纤轴向束斑直径大大缩小,满足了小周期 FBG 的结构要求,改善了聚焦光斑的质量。用 Zemax 对聚焦系统做了仿真,束斑直径大小为 $4.1\ \mu\text{m} \times 2.2\ \mu\text{m}$,符合低阶光纤光栅结构要求。仿真时虽然没有考虑高斯光束通过介质的非线性吸收和多光子电离等物理机制对光斑尺寸的影响,但考虑了像差及像散现象,相比由理论计算所得的结果更具参考价值,为今后的实验奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 A. Martinez, I. Y. Khrushchev, I. Bennion. Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4): 224~225
- 2 A. Martinez, I. Y. Khrushchev, I. Bennion. Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11): 1603~1605
- 3 Jiang Chao, Wang Dongning. Research progress of femtosecond laser pulse inscription of fiber Bragg gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 59~66
江 超, 王东宁. 飞秒激光脉冲刻写光纤布拉格光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, **45**(6): 59~66
- 4 A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev *et al.*. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(19): 1765~1766
- 5 Kaiming Zhou, Mykhaylo Dubov, Chengbo Mou *et al.*. Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(16): 1190~1192
- 6 Zhang Ling, Miao Fei, Feng Dejun *et al.*. Exposure experiment study of fiber Bragg grating by femtosecond laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505006
张 玲, 苗 飞, 冯德军等. 飞秒激光对光纤布拉格光栅的曝光实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0505006
- 7 Wang Yuezhu, Wang Wei, Zhang Yunjun *et al.*. Theory analysis of fiber grating production using infrared femtosecond laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2978~2982
王月珠, 王 巍, 张云军等. 近红外飞秒脉冲激光制作光纤光栅的研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2978~2982
- 8 Zhang Qi, Zhang Weigang, Zhang Jian *et al.*. Microcavity fabricated by femtosecond lasers and its application in fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 713~717
张 琦, 张伟刚, 张 健等. 飞秒激光蚀刻光纤微腔及其在光纤环衰荡腔中的应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 713~717
- 9 Zhu Xuehua, Pan Yuzhai. Ytterbium fiber laser based on fiber Bragg grating inscribed point-by-point with femtosecond laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(4): 934~938
朱学华, 潘玉寨. 基于飞秒激光直写光纤光栅的掺镱光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(4): 934~938
- 10 G. D. Marshall, R. J. Williams, N. Jovanovic *et al.*. Point-by-point written fiber Bragg gratings and their application in complex grating designs[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(19): 19844~19859
- 11 平田 雄. 多点光ファイバ歪みセンサの高性能化[D]. 日本福井: 福井大学, 2007. 44~51
- 12 Gong Xiaojing, Chu Jiaru, Wang Xiang *et al.*. Application of femtosecond laser multi-focusing to parallel fabrication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 48~54
龚小竞, 褚家如, 王 翔等. 飞秒激光多次聚焦在并行加工中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(1): 48~54
- 13 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): 2396~2398
- 14 J. Thomas, E. Wikszak, T. Clausnitzer *et al.*. Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique[J]. *Appl. Phys. A*, 2007, **86**(2): 153~157
- 15 He Fei, Liao Yang, Cheng Ya. Fabrication and integration of three-dimensional micro/nano- structures inside dielectric materials using femtosecond laser direct writing[J]. *Progress in Physics*, 2012, **32**(2): 98~112
何 飞, 廖 洋, 程 亚. 利用飞秒激光直写实现透明介电材料中三维微纳结构的的制备与集成[J]. 物理学进展, 2012, **32**(2): 98~112
- 16 An Liansheng, Li Lin, Li Quanchen. Applied Optics(3rd ed.)[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007. 43~46
安连生, 李 林, 李全臣. 应用光学(第三版)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007. 43~46