

基于飞秒激光微纳加工技术制备的光纤 布拉格光栅的带宽特性

严 飞 陈 涛* 崔 巍 司金海

(西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 理论和实验上研究了利用飞秒激光微纳加工技术制备的广义高斯切趾光纤布拉格光栅(FBG)的带宽特性。模拟结果表明,FBG 带宽随着折射率调制度的增大而增大,随着光栅长度的增大先减小后趋于饱和。利用飞秒激光相位掩模法制备 FBG 的实验结果表明,当飞秒激光功率较小时,随着激光功率的增加,FBG 带宽基本不变;激光功率超过一定阈值,FBG 带宽随着激光功率的增大而逐渐增大。曝光时间较短时,FBG 带宽随曝光时间的增加而急剧增大;随着曝光时间的继续增加,FBG 带宽逐渐趋近于饱和。FBG 带宽随着飞秒激光功率和曝光时间的变化可以归因于飞秒激光诱导 FBG 折射率调制度和光栅长度的变化。这些规律为调控利用飞秒激光微纳加工技术制备 FBG 带宽提供了参考。

关键词 激光光学;带宽;飞秒激光微加工;光纤布拉格光栅

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1105001

Bandwidth Characteristics of Fiber Bragg Grating Fabricated with Femtosecond Laser Radiation

Yan Fei Chen Tao Cui Wei Si Jinhai

(School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract The bandwidth characteristics of fiber Bragg grating (FBG) made with femtosecond laser radiation are studied theoretically and experimentally. The simulation results show that the FBG bandwidth increases with refractive index modulation increasing, while it decreases dramatically and then saturates with grating length increasing. FBGs are fabricated in silica fiber with femtosecond laser radiation and a phase mask and then characterized by spectral analyser. FBG bandwidth remains constant when the laser power is low. However, when the laser power is large enough, FBG bandwidth increases with laser power increasing. With the exposure time increasing, FBG bandwidth increases initially and then become saturated. These results can be attributed to the change of the refractive index modulation and the grating length with femtosecond radiation.

Key words laser optics; bandwidth; femtosecond laser micromachining; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.3735; 320.2250; 350.3390

1 引 言

1989 年, Meltz 等^[1]首次以紫外激光作为光源,采用全息干涉法制作了光纤布拉格光栅(FBG),给现代光纤技术带来了深刻变革。近些年,FBG 已在

光纤通信和传感领域得到了广泛应用^[2]。随着飞秒激光微纳加工技术的发展,利用飞秒激光制备 FBG 引起了人们的广泛关注。相对于传统的紫外激光,利用飞秒激光写入 FBG,不仅适用于各种光纤,而

收稿日期: 2013-05-27; **收到修改稿日期**: 2013-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(11204236)、国家 973 计划(2012CB921804)、中央高校基本科研业务费专项资金(xjj2012024)

作者简介: 严 飞(1988—),女,硕士研究生,主要从事飞秒激光微纳加工方面的研究。E-mail: yan_fei@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 司金海(1960—),男,博士,教授,主要从事超快非线性光学和超快成像、飞秒激光微纳加工等方面的研究。

E-mail: jinhaisi@mail.xjtu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: Tchen@mail.xjtu.edu.cn

且无需去除光纤涂层和对光纤进行光敏处理^[3]。目前,利用飞秒激光微纳加工技术已经在蓝宝石光纤、ZBLAN(ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₂-NaF)光纤、光子晶体光纤等光纤中制备出了FBG^[4-6]。此外利用飞秒激光微纳加工技术也成功制备了不同类型的FBG,如相移布拉格光栅、双折射布拉格光栅等^[7-8]。利用飞秒激光微纳加工技术制备FBG的主要方法有直写法和相位掩模法,直写法可以灵活控制刻写FBG的周期和类型,而相位掩模法写入效率高,稳定性和重复性好。通常利用飞秒激光相位掩模法制备的FBG为广义高斯切趾FBG。

带宽是FBG的重要参数之一,在不同的应用领域对FBG带宽有着不同的要求。在现代工业生产中,FBG传感器广泛应用于温度^[9-10]、应力^[11-12]、折射率^[13]等传感测量。FBG传感器是通过测量上述待测对象引起的布拉格波长偏移量来实现的。为了获得高的传感灵敏度,FBG的带宽应尽可能小。此外,在其他一些应用领域则需要宽带宽的FBG。近年来,基于慢光效应的全光路由成为实现全光通

信的关键技术。在产生慢光的各种方法中,相比于利用电磁诱导透明^[14]、相干布居振荡^[15-18]和受激布里渊散射^[19]等效应,利用FBG产生慢光不仅支持吉赫兹以上的带宽,而且结构简单,成为慢光缓存器件中一个极具吸引力的选择^[20]。然而,目前对利用飞秒激光微纳加工技术制备FBG的研究主要集中于不同光纤材料、不同类型的FBG的制备,而对FBG带宽特性的研究较少。

本文研究了利用飞秒激光微纳加工技术制备FBG的带宽特性,通过模拟研究了广义高斯切趾FBG的带宽对折射率调制度和光栅长度的依赖特性,利用飞秒激光和相位掩模板在SMF-28石英光纤中制备了FBG,并研究了加工条件对FBG带宽特性的影响。实验结果对调控利用飞秒激光微纳加工技术制备FBG的带宽具有重要意义。

2 理论基础

耦合理论是分析FBG特性的最基本方法。对于FBG,有如下耦合模方程^[21]:

$$\frac{\partial A_\mu}{\partial z} = j \sum_v A_v (K_{\nu\mu}^t + K_{\nu\mu}^z) \exp[-j(\beta_v - \beta_\mu)z] + j \sum_v B_v (K_{\nu\mu}^t - K_{\nu\mu}^z) \exp[-j(\beta_v + \beta_\mu)z], \quad (1)$$

$$\frac{\partial B_\mu}{\partial z} = -j \sum_v A_v (K_{\nu\mu}^t - K_{\nu\mu}^z) \exp[j(\beta_v + \beta_\mu)z] - j \sum_v B_v (K_{\nu\mu}^t + K_{\nu\mu}^z) \exp[-j(\beta_v - \beta_\mu)z], \quad (2)$$

式中 A_μ 和 B_μ 为模式 μ 的前向与后向传输的横向模场分量的幅值, β_v 和 β_μ 为模式 v 和模式 μ 的传播常数。 $K_{\nu\mu}^t$ 和 $K_{\nu\mu}^z$ 是两个模式之间横向和纵向分量的耦合系数, z 为沿FBG轴向的距离。对于FBG来说, $K_{\nu\mu}^z$ 比 $K_{\nu\mu}^t$ 要小得多,通常情况下可以忽略:

$$K_{\nu\mu}^z = \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} \Delta\epsilon \mathbf{e}_\nu \mathbf{e}_\mu^* dx dy \approx \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} 2\epsilon_0 n \Delta n(z) \mathbf{e}_\nu \mathbf{e}_\mu^* dx dy = \frac{\omega\epsilon_0}{2} \iint_{\infty} n \Delta n(z) \mathbf{e}_\nu \mathbf{e}_\mu^* dx dy, \quad (3)$$

式中 ω 为入射光电场的角频率, $\Delta\epsilon$ 为光波导扰动引起的介电常数的改变量, \mathbf{e}_ν 为模式 ν 的横向电场单位矢量, \mathbf{e}_μ 为模式 μ 的横向电场单位矢量。 n 为正常情况下的折射率, $\Delta n(z)$ 为折射率的改变量。

对于均匀正弦的FBG,折射率变化量可以表示为

$$\Delta n(z) = \Delta n_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_g} z\right) \right], \quad (4)$$

式中 Δn_0 为折射率变化的平均值,为常数; Λ_g 为光栅周期。

将(4)式代入耦合模方程,利用解析法求出其解析解,可以计算出带宽,可表示为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_{\text{Bragg}} \Delta n_0}{L} \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa L}{\pi}\right)^2}, \quad (5)$$

式中 λ_{Bragg} 为布拉格波长; L 为光栅长度; $\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}}$

为耦合系数。

在利用飞秒激光相位掩模法制备FBG的实验中,由于使用的飞秒激光通常为高斯光束,因此掩模板后干涉场为两个高斯分布光场的叠加。这种叠加光场所形成的FBG通常为广义高斯切趾光栅,其沿光纤轴向的折射率调制度包络分布可表示为如下的广义高斯函数^[22]:

$$\Delta n(z) = \Delta n_{\text{max}} \exp[-|a(z/L - 0.5)|^b], \quad (6)$$

式中 Δn_{max} 为最大折射率调制度,下文所提到的折射率调制度都为 Δn_{max} , a 和 b 的值控制切趾形貌的宽度和平顶情况。在模拟中,参数 a 和 L 的作用相同,它们决定了折射率调制包络的宽度。 b 影响切趾形貌的平顶情况,如图1所示,随着 b 的增加广义高斯函数更趋近于矩形函数。对于折射率调制包络为

上述函数形式的 FBG, 无法得到其耦合模方程的解析解, 通常采用数值算法来进行计算。

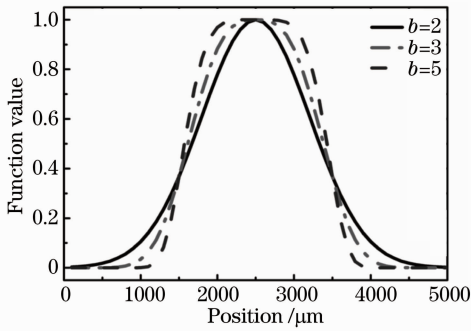


图 1 不同 b 值时的广义高斯函数

Fig. 1 Generalized Gaussian function curves for different b

本实验中, 利用 Optigrating 软件对上述广义高斯切趾 FBG 的传输特性进行分析。Optigrating 软件是分析 FBG 特性的科学软件, 它采用传输矩阵算法计算 FBG 的传输特性。对于给定纤芯折射率、光栅周期、折射率调制度等结构参数的 FBG, 利用该软件可模拟其反射谱、透射谱、群延迟谱等。

3 实验装置

利用飞秒激光相位掩模法制备 FBG 的实验装置示意图如图 2 所示。实验中使用的光源为钛宝石飞秒激光放大器 (Libra-USP-HE, Coherent Inc.), 光纤光源为 C+L 波段放大自发辐射 (ASE) 光源。该激光器输出的飞秒激光脉冲中心波长为 800 nm, 脉冲宽度为 50 fs, 重复频率为 1 kHz, 最大脉冲能量为 4 mJ。飞秒激光脉冲经过光束整形、可变衰减器后, 由焦距为 25 mm 平凸柱面镜聚焦, 垂直入射到周期为 2142 nm 的相位掩模板。

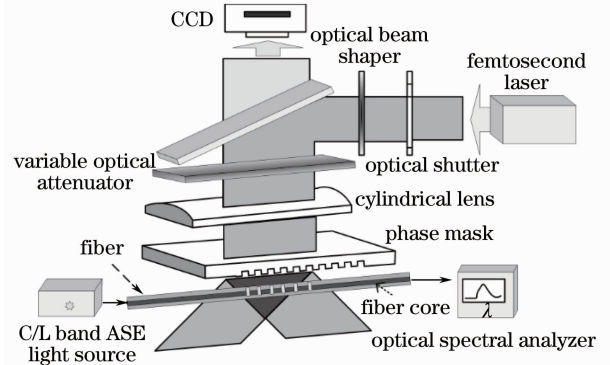


图 2 飞秒激光相位掩模法制备 FBG 的装置图

Fig. 2 Experimental setup for the fabrication of FBG with femtosecond laser radiation and a phase mask

根据菲涅耳近场分布计算可知, 光经过具有一定空间周期分布的相位掩模后可形成 0 阶与 ± 1 阶等高阶衍射。各级的衍射光在交叠区域内相互干涉, 形成干涉条纹。当光纤放置于干涉区域时, 干涉条纹写入光纤中, 形成光栅结构。本实验中使用的掩模板针对 800 nm 入射光设计, 当激光垂直入射到掩模板时, 0 阶衍射效率小于 4%, ± 1 阶的衍射效率约为 35%, 利用 ± 1 阶衍射光干涉在光纤中刻写出周期为 1071 nm 的光栅结构。由于 0 阶与 ± 1 阶仍然有部分衍射能量存在, 光纤放置在距离相位掩模板大约 3 mm 的位置, 利用掩模板后飞秒激光的 Walk-off 效应在时间上将 ± 1 阶、0 阶及 ± 2 阶衍射光完全分开^[23]。

FBG 的光谱测量装置如图 3 所示。ASE-CL 宽带光源发出的光由环形器端口 1 输入并经端口 2 进入 FBG, 被 FBG 反射后自环形器端口 3 输出, 并由光谱分析仪 (AQ6370B) 测量其反射谱。在 FBG 的刻写中, 上述测量装置也用于监测 FBG 的写入情况。

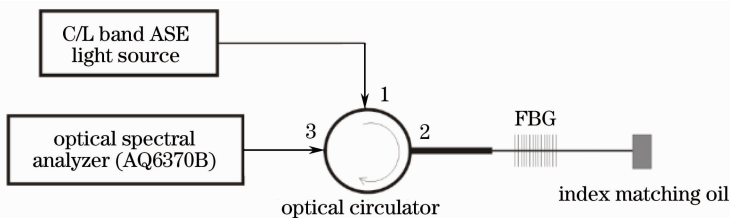


图 3 FBG 测量装置图

Fig. 3 Schematic description of FBG spectral measurement setup

4 结果与讨论

4.1 理论模拟

在理论研究中, 选择光纤纤芯直径为 8.2 μm , 纤芯折射率 1.46, 包层直径为 125 μm , 包层折射率

为 1.45, FBG 周期为 1071 nm。

首先, 研究了折射率调制度对 FBG 带宽的影响。取光栅长度为 5 mm, a 为 5^[22], 对 $b=2, 3$ 和 5 的 3 种不同切趾形貌的 FBG 进行模拟。由于飞秒激光在光

纤中诱导的折射率调制度可达 10^{-3} 量级,模拟中折射率调制度范围选取为 $0.00001 \sim 0.002$ 。由以上参数得到的广义高斯切趾 FBG 随折射率调制度的变化曲线如图 4 所示。由模拟结果可知,对于 $b=2,3$ 和 5 的 3 种光栅,带宽均随着折射率调制度的增大而增大,折射率调制度在 $0.0005 \sim 0.002$ 范围内变化时,带宽对折射率调制度的依赖特性几乎呈线性。而且,随着 b 的增大,FBG 的带宽也增大。

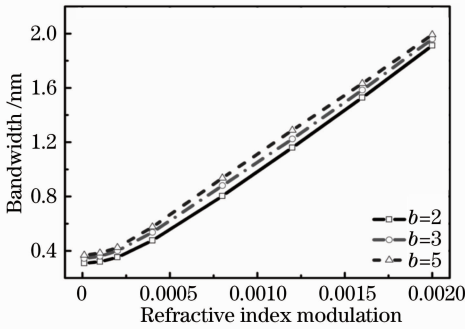


图 4 FBG 带宽随折射率调制的变化

Fig. 4 Simulated FBG bandwidths for different refractive index modulations of FBGs

其次,研究了光栅长度对 FBG 带宽的影响。对折射率调制度分别为 10^{-5} 、 10^{-4} 和 10^{-3} 的 FBG,带宽随光栅长度的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出,对不同 b 值的光栅,带宽对光栅长度具有相似

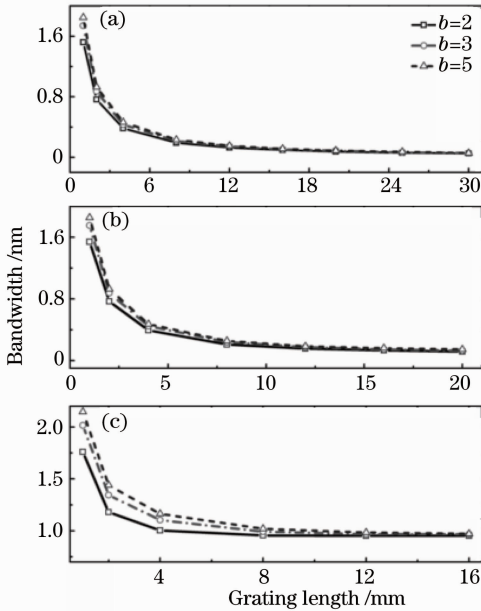


图 5 FBG 带宽随光栅长度的变化。折射率调制度分别为 (a) 0.00001 , (b) 0.0001 , (c) 0.001

Fig. 5 Simulated FBG bandwidths for different grating lengths. Refractive index modulations are (a) 0.00001 , (b) 0.0001 , (c) 0.001 , respectively

的依赖特性。当光栅长度较小时,FBG 带宽随着光栅长度的增大而急剧减小;随着光栅长度继续增加,FBG 带宽随着光栅长度的变化量逐渐减小,并最终达到饱和。当折射率调制度为 10^{-5} 、 10^{-4} 和 10^{-3} 时,带宽达到饱和的相应的光栅长度分别约为 25 、 16 和 8 mm。即随着折射率调制度的增加,带宽达到饱和的光栅长度逐渐减小。

由以上模拟结果可知,当光栅长度较小时,广义高斯切趾 FBG 的带宽由其折射率调制度和长度共同决定;而当光栅长度增加到一种程度时,FBG 带宽取决于折射率调制度。

4.2 实验结果

4.2.1 FBG 带宽随激光功率的变化

在利用飞秒激光刻写 FBG 的实验中,首先研究飞秒激光功率对 FBG 带宽的影响。选取曝光时间为 2 min,FBG 带宽随着激光功率的变化曲线如图 6 所示。当激光功率较小时,带宽在 0.25 nm 左右,随着飞秒激光功率的增加变化不大。当激光功率增大到 800 mW 后,带宽随激光功率的增大而迅速增大。飞秒激光功率为 1000 mW 时,制备的 FBG 带宽增加到 0.525 nm。

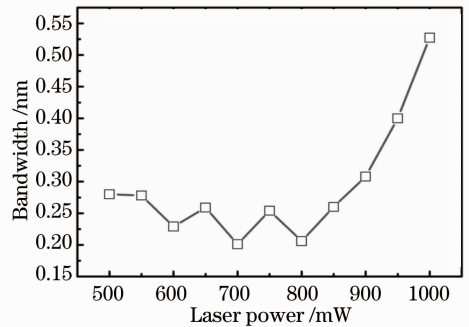


图 6 FBG 带宽随飞秒激光功率的变化

Fig. 6 Measured bandwidths of FBGs fabricated at different femtosecond laser powers

飞秒激光制备 FBG 的带宽随激光功率的变化规律,可以由飞秒激光引起 FBG 折射率调制度 Δn_{\max} 和光栅长度 L 的变化来解释。当激光功率较小时,随着激光功率的增大,折射率调制度不断增大;同时在干涉区域内达到可诱导出光栅的功率密度阈值的范围也增大,从而导致光栅长度的增加。由前面模拟结果可知,折射率调制度增加导致 FBG 带宽的增加;而光栅长度较小时,FBG 带宽随着光栅长度的增加而减小,两个方面共同作用使 FBG 带宽随激光功率增加变化不大。

随着激光功率继续增加,带宽随激光功率的增

大而迅速增大。这是由于受到衍射光干涉区域大小的限制,FBG 的长度随着飞秒激光功率的继续增加变化很小,逐渐接近所能加工出的最大长度。因此,FBG 带宽此时主要受折射率调制度的影响,随着激光功率的增大而不断增大。

在激光功率大于 900 mW 时,可测得 FBG 长度

大约为 4 mm;其他条件下由于 FBG 折射率调制度较低,很难测量出 FBG 长度值。由理论模拟可知,FBG 反射谱主要与折射率调制度 Δn_{\max} 、切趾形貌的宽度 a/L 和平顶情况 b 有关。因此,可以模拟估算不同激光功率下的 FBG 折射率调制度,其值如表 1 所示。

表 1 不同激光功率下制备的 FBG 的折射率调制度

Table 1 Refractive index modulation of FBGs fabricated at different laser powers

Laser power /mW	500	550	600	650	700	750
Refractive index modulation / 10^{-5}	0.2	0.4	2.4	2.8	4	10
Laser power /mW	800	850	900	950	1000	
Refractive index modulation / 10^{-4}	0.5	0.95	1.7	2.8	4.5	

4.2.2 FBG 带宽随曝光时间的变化

下面研究了曝光时间对制备的 FBG 带宽的影响。选取激光功率为 800 mW,曝光时间从 30 s 到 30 min 变化。不同曝光时间条件下所制备的 FBG 的带宽如图 7 所示。当曝光时间小于 1 min 时,带宽变化很小。随着曝光时间的增加,FBG 带宽随着曝光时间的增加迅速增大。而当曝光时间增大到

10 min 时,随着曝光时间的增加,带宽的增加量逐渐减小,最终趋于饱和。

当曝光时间小于 1 min 时,由于飞秒激光诱导 FBG 的折射率调制度和光栅长度逐渐增加,两者的共同作用使 FBG 的带宽基本保持不变。由图 6 可知,在 800 mW 激光功率照射下,曝光 2 min 时,光栅长度已不再对带宽的变化有影响。因此,从图 7 可以看出,当曝光时间大于 2 min 时,FBG 的带宽的变化主要由折射率调制度决定。当曝光时间较短时,曝光时间的增加导致折射率调制度迅速增大,因此带宽随曝光时间的增加增大得较快。而当曝光时间增到 10 min 后,折射率调制度的增长率随曝光时间的增加逐渐较小,并最终达到饱和。因此带宽随曝光时间的增加也逐渐达到饱和。

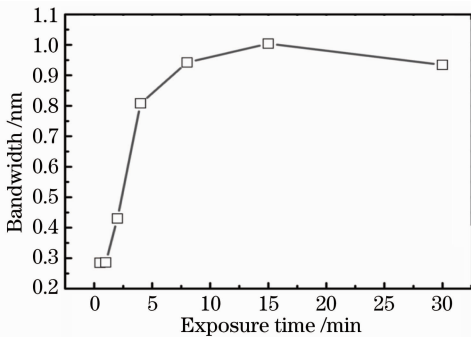


图 7 FBG 带宽随飞秒激光曝光时间的变化

Fig. 7 Measured bandwidths of FBGs fabricated at different exposure time

当曝光时间大于 5 min 时,可测得制备的 FBG 长度大约为 4 mm;其他条件下由于 FBG 折射率调制度较低,很难测量 FBG 长度。但是可以模拟估算不同曝光时间下的 FBG 折射率调制度,其值如表 2 所示。

表 2 不同曝光时间下制备的 FBG 的折射率调制度

Table 2 Refractive index modulation of FBGs fabricated at different exposure time

Exposure time /min	0.5	1	2	5	8	15	30
Refractive index modulation / 10^{-4}	0.1	0.2	3.5	8	9.4	10	9.4

5 结 论

从理论和实验方面研究了利用飞秒激光微纳加工技术制备广义高斯切趾 FBG 的带宽特性。理论研究表明,FBG 带宽随着折射率调制度的增大而不断增大,随着光栅长度的增大先减小后达到饱和。利用飞秒激光相位掩模法制备 FBG 的实验结果表明,飞秒激光功率较小时,由于 FBG 的长度和折射率调制度同时增加,带宽随着激光功率的增加基本

不变;当飞秒激光功率增加到一定程度时,光栅长度随功率的增大基本不再变化,折射率调制度对 FBG 带宽的影响成为主要因素,因此带宽随着激光功率的增大而不断增大。在固定功率的飞秒激光照射下,曝光时间较短时,带宽随曝光时间的增加而增大;随着曝光时间的增加,飞秒激光诱导的折射率调制度逐渐趋于饱和,从而 FBG 带宽逐渐达到饱和。这些规律为调控利用飞秒激光微纳加工技术制备

FBG 的带宽提供了参考。在适当的相对较小的激光功率下选择更短的曝光时间有助于制备带宽更窄的 FBG,而在适当的相对较长的曝光时间下选择更大的激光功率可以制备带宽更宽的 FBG。

参 考 文 献

- 1 G Meltz, W W Morey, W H Glenn. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Opt Lett*, 1989, 14(15): 823–825.
- 2 N Matuschek, F X Kartner, U Keller. Exact coupled-mode theories for multilayer interference coatings with arbitrary strong index modulations[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(3): 295–302.
- 3 S J Mihailov, C W Smelser, P Lu, *et al.*. Fibre Bragg gratings made with a phase mask and 800 nm femtosecond radiation[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(12): 995–997.
- 4 D Grobncic, S J Mihailov, C W Smelser, *et al.*. Sapphire fibre Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature application [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(11): 2505–2507.
- 5 M Bernier, D Faucher, R Vallee, *et al.*. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibres by femtosecond pulses at 800 nm [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(5): 454–456.
- 6 Y Li, D N Wang, J Jin. Single-mode grating reflection in all-solid photonic bandgap fibers inscribed by use of femtosecond laser pulse irradiation through a phase mask[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(8): 1264–1266.
- 7 J R Grenier, L A Fernandes, J S Aitchison, *et al.*. Femtosecond laser fabrication of phase-shifted Bragg grating waveguides in fused silica[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(12): 2289–2291.
- 8 K Chah, D Kinet, M Wuilpart, *et al.*. Femtosecond-laser-induced highly birefringent Bragg gratings in standard optical fiber[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 594–596.
- 9 S L Tsao, J Wu, B C Yeh. High-resolution neural temperature sensor using fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1999, 35(11): 1590–1596.
- 10 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, *et al.*. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0405005. 杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0405005.
- 11 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun, *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 89–91. 张 颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 89–91.
- 12 Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. Transverse pressure sensor based on the polarization properties of fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0405004. 汪戈平, 王 鸣, 黄晓琴. 基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0405004.
- 13 A Iadicicco, S Campopiano, A Cutolo, *et al.*. Refractive index sensor based on microstructured fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(6): 1250–1252.
- 14 L V Hau, S E Harris, Z Dutton, *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. *Nature*, 1999, 397(6720): 594–598.
- 15 M S Bigelow, N N Lepeshkin, R W Boyd. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(11): 113903.
- 16 M S Bigelow, N N Lepeshkin, R W Boyd. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid[J]. *Science*, 2003, 301(5630): 200–202.
- 17 P C Ku, F Sedgwick, C J Chang-Hasnain, *et al.*. Slow light in semiconductor quantum wells [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(19): 2291–2293.
- 18 A Schweinsberg, N N Lepeshkin, M S Bigelow, *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber[J]. *Europhys Lett*, 2006, 73(2): 218–224.
- 19 K Y Song, K Hotate. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(3): 217–219.
- 20 Wang Kuiru, Cheng Jieli, Chen Gong, *et al.*. Research on time-delay characteristics of solitons in fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0219001. 王葵如, 程洁琳, 陈 功, 等. 光纤光栅中孤子时延特性研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0219001.
- 21 Zhang Zijia. *Fiber Bragg Grating Theory Foundation and Sensing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2009. 45–51. 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. 45–51.
- 22 S J Mihailov, C W Smelser, D Grobncic, *et al.*. Bragg gratings written in Al-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800 nm femtosecond radiation and a phase mask [J]. *J Lightwave Technol*, 2004, 22(1): 94–100.
- 23 S J Mihailov, D Grobncic, C W Smelser, *et al.*. Induced Bragg gratings in optical fibers and waveguides using an ultrafast infrared laser and a phase mask[J]. *Laser Chem*, 2008, 2008. 416251.

栏目编辑: 宋梅梅