

高频 CO₂ 激光脉冲写入长周期光纤光栅的 弯曲特性分析*

牛永昌 饶云江 胡爱姿 朱 涛

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘 要 分析了高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅弯曲的谐振波长漂移灵敏度、谐振峰幅值变化的机理, 讨论了新型长周期光纤光栅弯曲方向相关性并进行了数值计算, 分析结果与实验结果相符.

关键词 光纤器件; 光纤传感器; 长周期光纤光栅(LPFG); 弯曲特性

中图分类号 TN252; TN253 **文献标识码** A

0 引言

长周期光纤光栅(LPFG)自 1995 年被报道以来已经产生了多种写入方法^[1], 其中 CO₂ 激光脉冲写入法, 特别是高频 CO₂ 激光脉冲写入法近年来受到了人们的重视^[2,3].

高频 CO₂ 激光脉冲写入的 LPFG 具有很高的弯曲灵敏度, 即使微弯也会使谐振波长发生很大的漂移, 从而可以灵敏地检测出弯曲量的大小^[4], 实现绝对弯曲测量. 此外, 利用该新型 LPFG 的弯曲方向相关性可以在光通讯中增益平坦器设计时选择适当的角度弯曲, 从而使在谐振波长不产生漂移的条件下实现谐振峰幅值的线性调节^[5]. 本课题组曾对 LPFG 弯曲时谐振波长和共振峰幅值的变化规律进行过一定的理论分析^[6], 但对 LPFG 的弯曲方向相关性还没有做出相应解释, 因此系统地分析新型 LPFG 的弯曲特性对指导 LPFG 的相关研究具有十分重要的意义. 本文通过建立数学模型, 系统分析了 LPFG 的谐振波长漂移灵敏度、谐振峰幅值变化规律以及其弯曲方向相关性.

1 谐振波长漂移灵敏度分析

谐振波长的漂移是由 LPFG 模场匹配关系的变化引起, 这种变化产生的最根本原因是纤芯和包层耦合模场的传输常数 β 的变化, 而 β 的变化取决于模场分布的改变.

光纤弯曲如图 1, 其中有两个坐标系, 分别为笛卡儿直角坐标系和圆柱坐标系. 在图中, 粗体 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 分别表示未弯纤芯中的模场、未弯包层中

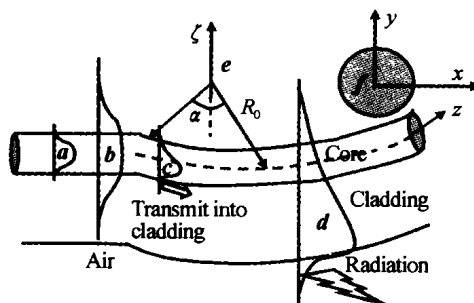


图 1 弯曲光纤、模场以及坐标系
Fig. 1 Schematic of bending fiber, mode fields and coordinates

模场、弯曲纤芯中的模场、弯曲包层中的模场、圆柱坐标系以及笛卡儿直角坐标系. 在 (R, α, ζ) 圆柱坐标系中, 建立纤芯及包层模场的标量波动方程如下

$$\frac{1}{R} \frac{\partial E}{\partial R} \left(R \frac{\partial E}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial \zeta^2} + k_0^2 n^2(R, \alpha, \zeta) E = 0 \quad (1)$$

设光纤弯曲时曲率半径为 R_0 (R_0 在 (R, α, ζ) 圆柱坐标系中). 为将圆柱坐标系化为直角坐标系, 需进行如下坐标变换

$$\begin{aligned} x &= \zeta \\ y &= R_0 \ln(R/R_0) \\ z &= R_0 \alpha \end{aligned}$$

由于模场对于 z 有 $e^{-i\beta z}$ 的关系, 将式(1)转化为

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2(x, y, z) e^{2i\beta z} - \beta^2 e^{2i\beta z}) E = 0 \quad (2)$$

式(2)和式(1)的区别在于: $n(x, y, z)$ 变为了 $n(x, y, z) e^{i\beta z}$, 传输常数 β 也变为了 $\beta e^{i\beta z}$. 当 $R_0 \rightarrow \infty$, 或 $y=0$ 时, 式(2)转化为式(1). 为了便于求解式(2)的模场分布, 将 $e^{2i\beta z}$ 展开为一阶泰勒级数 $e^{2i\beta z} = 1 + (2y/R_0)$ (这里 $y \ll R_0$), 将其带入式(2), 可得以下两个方程

$$\frac{\partial^2 E_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_0}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2(x, y, z) - \beta^2) E_0 = 0 \quad (3a)$$

* 国家杰出青年科学基金(60025515)、教育部科学技术研究重点项目(104210)和重庆市自然科学基金重点项目资助
Tel: 023-65105543 Email: azhu@china.com
收稿日期: 2004-04-20

$$\frac{\partial^2 E_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_1}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2(x, y, z) \frac{2y}{R_0} - \beta^2 \frac{2y}{R_0}) E_1 = 0 \quad (3b)$$

式(3a)为未弯曲光纤中模场的标量波动方程,而式(3b)为弯曲的模场变量波动方程,并且 $E = E_0 + E_1$,这里 E_0 为未弯光纤中的模场, E_1 为弯曲后模场的变量.对式(3a)与式(3b)进行求解,得近似解如下

$$E = E_0 [1 + (kn(x, y, z)\omega_0)^2 (y/R_0)] \quad (4)$$

式中 ω_0 为模斑半径. Corning-SMF 28 单模光纤的纤芯半径 $a_1 = 4.15 \mu\text{m}$,包层半径 $a_2 = 62.5 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_1 = 1.4618$,包层折射率 $n_2 = 1.4587$;模斑半径 $\omega_0 = a/\sqrt{2\ln V}^{[7]}$ (a 对纤芯和包层分别为 a_1, a_2),归一化频率 $V = k \sqrt{n_1^2 - n_2^2} a$,波矢 $k = 2\pi/\lambda$. 设 $\lambda = 1500 \text{ nm}$,在光纤弯曲半径与纤芯或包层半径之比为无限大、400、300 三种情况时,求导式(3a)与式(3b)可得纤芯基模分布及包层基模分布如图 2(a)、图 2(b).

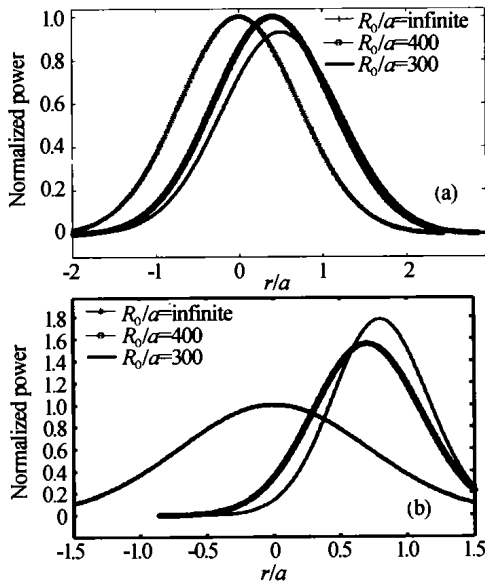


图 2 (a) 纤芯基模随弯曲的分布;(b)包层基模随弯曲的分布

Fig. 2 (a) Fundamental mode distribution in the core with bending; (b) Fundamental mode distribution in the cladding with bending

从图 2(a)可以看出,随着光纤弯曲量的增大,模场将向偏离光纤中心的方向移动,但偏离量很小,且分布区域几乎未变窄.从图 2(b)可以看出,在相同的弯曲量下,由于包层半径远大于纤芯半径,包层模场偏移也因此而远大于纤芯模场的漂移,并且包层模场的分布区域大大变窄.类似,其它各阶次模式也存在这种变化趋势.

设未弯曲光纤的某一模式的传输常数为 β_0 ,弯曲光纤相同模式的传播常数 β 可以表示为

$$\beta^2 = \frac{k_0^2 \iint_{\infty} n^2(x, y) |E|^2 dA}{\iint_{\infty} |E_0|^2 dA} \quad (5)$$

其中 E 的是弯曲条件下的光纤模场, A 为光纤横截

面积.将图 2 中的模场带入(5),可求得各种情况下的传输常数与波矢之比 β/k_0 ,即有效折射率并列于表 1.

表 1 弯曲时纤芯与包层模场的有效折射率

R_0/a	Infinite	400	300
n_{core}	1.4615	1.4613	1.4612
n_{cladding}	1.4239	1.3903	1.3867

从表 1 可以看出,在同样的弯曲下,包层模式传输常数的改变量要远远大于纤芯,因此纤芯模与包层模的传输常数之差加大,使长周期光纤光栅的谐振波长产生大的漂移.而布拉格光栅的耦合只是产生在前向纤芯基模与后向纤芯基模之间,弯曲造成两个纤芯基模的传输常数的改变量不明显,所以长周期光纤光栅弯曲时的谐振波长漂移灵敏度要远远大于布拉格光纤光栅.

2 谐振峰幅值变化分析

LPFG 弯曲如图 3,黑色区域为曝光区,曝光区轴向间距即为光栅周期 Λ . 当光栅弯曲半径为 R_0 时,每两段曝光区之间的夹角为 $\alpha_0 = (\Lambda/R_0)$,两段曝光区水平方向间距 $d_N = 2R_0 \sin(\alpha_0/2) \cos\{[(2n-1)/2]\alpha_0\}$,随着 N 的增大, d_N 在不断减小,在图中弯曲光栅的左侧, d_N 也呈现相同的变化.在一般情况下, R_0 是 Λ 的 25 到 250 倍之间,这时的 α_0 很小,使 d_N 基本为定值,因此啁啾量会很小,所以啁啾不是谐振峰幅值减小的主要原因.

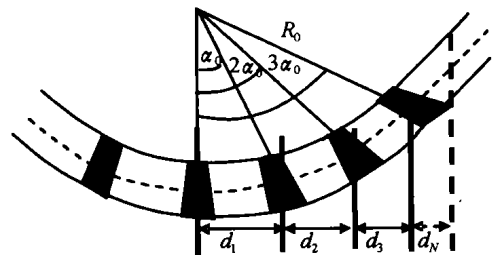


图 3 长周期光纤光栅弯曲示意图

Fig. 3 Schematic of bended LPFG

设光纤弯曲后模场分布为 $E = E(x, y, R_0/a)$, 式中的 R_0/a 即为光纤弯曲半径与纤芯或包层半径之比. 假设第 j 阶和 k 阶模式的“重叠”因子

$$\Gamma = \iint_{\infty} (n(x, y) * E_j(x, y, R_0/a) * E_k(x, y, R_0/a)) dA \quad (6)$$

表达式中的 $n(x, y)$ 是光纤横截面的折射率变化量. 在位置 z , 它们的横向耦合系数为 $K_{k,j}^t(z) = \Gamma \times (n\epsilon_0) \times (\omega/2)$, n 为光纤横截面上的折射率(近似均匀), ω 为角频率, ϵ_0 为真空介电常数,则在整个光栅长度 L 上,总的耦合系数将为 $K = \int_{L_s}^{L_s+L} K_{k,j}^t(z) dz$,其中 L_s 表示光栅的起始位置. 当光栅弯曲时,造成模场偏移, Γ 减小,使总耦合系数 K 减小,直接导致了

损耗峰幅度的减小. 设 $n(x, y)$ 为一常数, 对图 2(a) 与图 2(b) 中的基模场的“重叠”因子 Γ 进行归一化计算, 结果列于表 2. 由表中可以看出, 随着弯曲的增大, “重叠”因子 Γ 将大大减小. 同样, 此结论也适用于所有纤芯模与包层模的耦合. 实验验证, 实际 LPFG 在弯曲时, 其透射峰幅值随弯曲曲率半径的变化如图 4^[8], 与理论分析一致.

表 2 弯曲时纤芯基模与包层基模之间的“重叠”因子

R_0/a	Infinite	400	300
Γ	54.3457	5.7408	5.1308

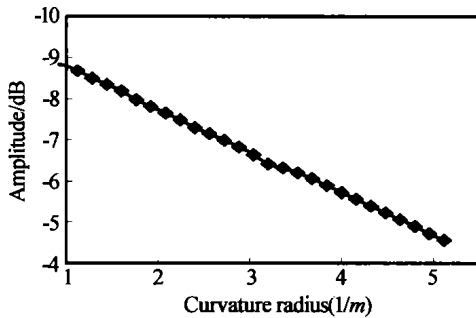


图 4 谐振峰幅值与弯曲半径的关系
Fig. 4 Relationship between the peak amplitude and curvature radius

3 弯曲方向相关性分析

光纤中残存的机械应力与热应力在高频 CO₂ 激光脉冲曝光后将导致光纤横截面折射率分布的不均匀变化, 并且在照射方向的变化要大于背光方向^[9]. 折射率分布如图 5, CO₂ 激光照射方向沿图中 y 轴方向. 弯曲装置见图 6, 长周期光纤光栅粘贴在

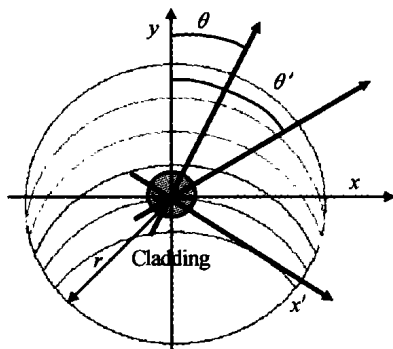


图 5 光纤横截面的折射率变化
Fig. 5 Refractive index variation on the transverse cross-section of fiber

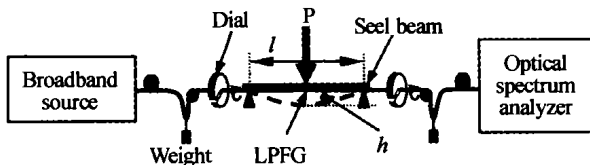


图 6 LPFG 弯曲测量装置图
Fig. 6 Experimental set-up for bend test of LPFG

钢尺的下表面, 通过在钢尺上侧施加不同的位移来提供 LPFG 的弯曲量 h .

均匀曝光的 LPFG 弯曲时由于偏振效应会产生谐振峰分离, 而高频 CO₂ 激光脉冲写入 LPFG 时由于折射率分布不均匀也可能存在谐振峰分离, 因此将高频 CO₂ 激光脉冲写入的 LPFG 等效为预先加了一个弯曲量为 d 的均匀曝光 LPFG, 具体思路如下:

- 1) 均匀 LPFG 弯曲时由于偏振作用谐振中心波长有一个大小为 $\Delta\lambda$ 的分离;
- 2) CO₂ 激光脉冲写入的 LPFG 由于横截面折射率分布不均匀, 未弯曲时即有大小为 p 的谐振波长分离;
- 3) 设 $\Delta\lambda = p$, 可求解出 LPFG 等效弯曲量 d 的大小;
- 4) 由等效弯曲量 d 与不同圆周角上的位移 h 的关系来分析弯曲的方向相关性问题的.

CO₂ 激光脉冲写入的 LPFG 谐振峰分离大小为 p (nm), 约为 1^[9]. p 均匀曝光 LPFG 弯曲谐振峰的分离计算式为 $\Delta\lambda = 2\rho_e n_{0m}^{cl} \omega_0 K_{bend} \Lambda$ ^[10], 其中 ρ_e 是光弹常量, 一般为 0.22, n_{0m}^{cl} 为 LP_{0m} 包层模的有效折射率, K_{bend} 为弯曲曲率 ($K_{bend} = 1/R_0$). 设 $p = \Delta\lambda$, 得到 $K_{bend} = p / (2\rho_e n_{0m}^{cl} \omega_0 \Lambda)$. 在图 6 中, 对于长度为 L 的光栅, 求得等效弯曲量 $d = L \times K_{bend} \times l^2 / 12$, 其中 l 为钢尺的长度.

如图 5, 设等效弯曲量 d 位于 y 方向, 光栅实际弯曲与 y 方向成 θ 角, 即在 y' 方向, d 在 y' 方向的投影分量为 $d_y = d \cos(\theta)$, 在 x' 方向的投影分量为 $d_x = d \sin(\theta)$. 由于 h 的存在, 使在 y' 方向的弯曲总量为 $h + d \cos(\theta)$, 在 x' 方向的弯曲总量为 $d \sin(\theta)$. 两个弯曲分量经计算在 $\theta' = \theta - \arctan[d \sin \theta / (h + d \cos \theta)]$ 方向合成, 得总弯曲量为 $h_{total} = \sqrt{h^2 + 2hd \cos \theta + d^2}$. 沿各个圆周角 θ 对光栅弯曲, 由于 h_{total} 中 $\cos \theta$ 的存在, 使谐振波长偏移及幅值周期性变化. 设 $p = 1, \Lambda = 437 \mu\text{m}$, 光纤为 Corning SMF-28 单模光纤, 则写入光栅的 LP₀₇ 阶模谐振峰中心波长为 1530 nm, 当光栅弯曲曲率为 1.3 m^{-1} 时, 对其谐振波长与幅值在各个圆周角进行模拟, 计算得到图 7(a)、7(b) 的结果.

实际制作一 LPFG, 谐振峰为 LP₀₇ 阶次. 在弯曲曲率为 1.3 m^{-1} 时, 实验得到谐振波长和谐振峰幅值与圆周角的关系, 分别为图 8(a)、8(b)^[4].

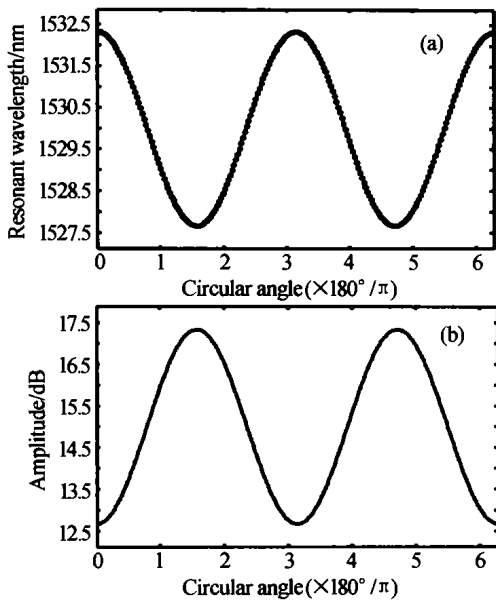


图 7 (a) $p=1$ 时, 谐振波长与圆周角的关系; (b) $p=1$ 时, 谐振峰值与圆周角的关系

Fig. 7 (a) When $p = 1$, simulated relationship between resonant wavelength and circular angle; (b) When $p = 1$, simulated relationship between amplitude of loss peak and circular angle

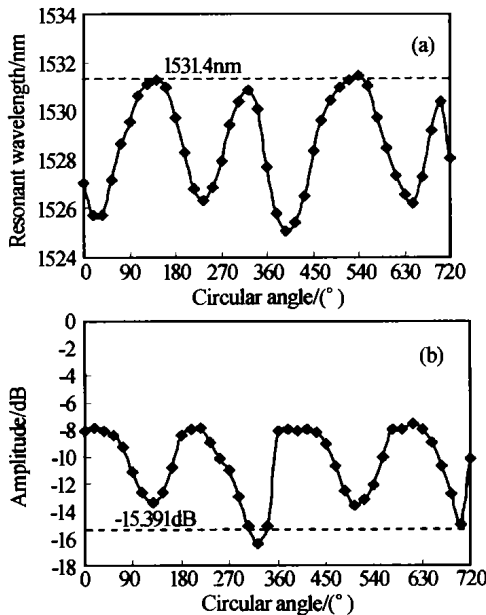


图 8 (a) 曲率为 1.3m^{-1} 时, 谐振波长与圆周角的关系; (b) 曲率为 1.3m^{-1} 时, 谐振峰值与圆周角的关系

Fig. 8 (a) Relationship between resonant wavelength and circular angle for LPFG with a curvature of 1.3m^{-1} ; (b) Relationship between peak amplitude and circular angle for LPFG with a curvature of 1.3m^{-1}

从图 7 与图 8 可以看出, 理论分析与实验结果规律基本相同, 但有一定的偏差. 这是因为: ①理论分析假定的 0° 方向与实验进行的起始 0° 方向不能完全重合; ②光栅加工与实验过程不是完全理想的. 所以在知道 p 的情况下, 可以根据以上方法精确的推导出在圆周某方向一定弯曲量下, 谐振波长与损耗峰幅值的大小.

4 结论

本文对 LPFG 的谐振波长变化对弯曲的灵敏度问题进行了理论分析. 分析表明, LPFG 弯曲时, 由于包层模的传输常数改变量远远大于纤芯模传输常数的改变量, 使纤芯模传输常数与包层模传输常数之差的改变量较大, 因而造成了 LPFG 谐振波长随弯曲的变化非常灵敏; 引入了“重叠”因子, 对 LPFG 弯曲时谐振峰幅值的减小进行了数值分析, 结果表明在 LPFG 弯曲情况下, 谐振峰幅值减小的主要原因在于包层模场的偏移; 此外, 对高频 CO_2 激光脉冲写入 LPFG 的弯曲方向相关性进行了分析, 基于等效预置弯曲, 对 Corning SMF-28 单模光纤写入的 LPFG 的弯曲方向相关性进行了模拟, 并与弯曲实验结果进行了比较, 结果相符.

参考文献

- 1 翟荣辉, 赵浩, 方祖捷. 长周期光纤光栅的制作方法和应用研究进展. 激光与光电子学进展, 1999, (12): 8~13
Qu R H, Zhao H, Fang Z J. Laser and Opto-electronics Development, 1999, (12): 8~13
- 2 Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, et al. Long period fibre grating fabrication with focused CO_2 laser pulses. Electronics Lett, 1998, 34(3): 302~303
- 3 Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, et al. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO_2 laser pulses. J of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1320~1327
- 4 王义平, 饶云江, 冉增令, 等. 对弯曲不敏感的长周期光纤光栅传感器. 光子学报, 2002, 31(6): 725~729
Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, et al. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(6): 725~729
- 5 胡爱姿, 饶云江, 牛永昌. 基于弯曲不敏感光纤的长周期光纤光栅可调谐增益均衡器. 光学学报, 2005, 25(1): 30~34
Hu A Z, Rao Y J, Niu Y C. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 30~34
- 6 王义平, 饶云江, 曾祥楷. 长周期光纤光栅弯曲特性的耦合模理论分析. 光子学报, 2002, 31(10): 1205~1208
Wang Y P, Rao Y J, Zeng X K. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(10): 1205~1208
- 7 吴重庆. 光波导理论. 北京: 清华大学出版社, 2001. 81~84
Wu C Q. Light Waveguide Theory. Beijing: Qinghua University Press, 2001. 81~84
- 8 朱涛, 饶云江, 冉增令, 等. 一种基于新型长周期光纤光栅的动态增益均衡器. 光子学报, 2003, 32(10): 283~285
Zhu T, Rao Y J, Ran Z L, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10): 283~285

- 9 Hyung Suk Yru, *et al.*, Effect of asymmetric stress relaxation on the polarization-dependent transmission characteristics of a CO₂ laser written long period fiber grating. *Optics Letters*, 2003, **28**(3); 155~157
- 10 Liu Y, Zhang L, Williams J A R, *et al.* Bend sensing by measuring the resonance splitting of long period fiber gratings. *Opt Commun*, 2001, **193**(1-6); 69~72

Bend Characteristics Analysis of Novel LPFGs Written by High-frequency CO₂ Laser Pulses

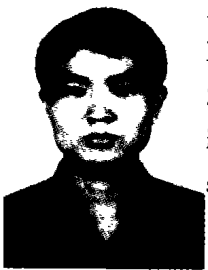
Niu Yongchang, Rao Yunjiang, Hu Aizi, Zhu Tao

Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044

Received date: 2004-04-20

Abstract LPFGs written by high-frequency CO₂ laser pulses have great potential for use in optical fiber sensing and communication. It is of importance to study the fundamental characteristics of these novel LPFGs. In this paper, a more systematic analysis is carried out to investigate the resonant wavelength-bend sensitivity of the LPFG and its bend loss of resonant peaks based on the mode field theory. It is for the first time to our knowledge, that a method is proposed for analysis of the orientation-dependence of the bend of the LPFG. The simulation is in agreement with experimental results. This paper provides a more systematic analysis for the bend characteristics analysis of the LPFG written by the high-frequency CO₂ laser pulses exposure method.

Keywords Optical fiber devices; Optical fiber sensors; Long period fiber grating (LPFG); Bend characteristics



Niu Yongchang was born on September 10, 1981 in Shandong, China. He received the Bachelor degree from Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, in 2002. Now he is a Master degree candidate at the same department. His current research interests include long period fiber gratings and their application to fiber communication and sensing.