

光栅参数对折射率剖面非均匀取样光纤光栅的影响

徐中南, 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:利用传输矩阵法,数值分析了光栅参数对折射率剖面非均匀的均匀光纤光栅及取样光纤光栅的透射谱、偏振关系损耗和偏振模色散的影响。计算结果表明,均匀光纤光栅的光栅条纹可见度及光栅周期对其偏振关系损耗和偏振模色散影响很大;改变取样光纤光栅的取样周期及光栅段长度,透射谐振峰的幅度、偏振关系损耗和偏振模色散的最大值均随取样光纤光栅长度的增加而递增。与靠近中心波长的谐振峰相比,折射率剖面非均匀导致的双折射对取样光纤光栅远离中心波长的谐振峰的影响较小。

关键词:光纤光栅;取样光纤光栅;传输矩阵法;偏振关系损耗;偏振模色散

中图分类号:TN253

文献标识码:A

Influence of the grating parameters on the sampled fiber grating with an asymmetric refractive index profile

XU Zhong-nan, LIU Ze-jin

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Using the transfer matrix method, the influence of the grating parameters on the transmission, polarization dependent loss and polarization-mode dispersion are stimulated for the uniform fiber grating and sampled fiber grating with the asymmetric refractive index profiles. For the uniform fiber grating, the results show that the fringe visibility and the period have obvious impact on the polarization dependent loss and polarization-mode dispersion. For the sampled fiber grating, the maximums of the amplitude, polarization dependent loss and polarization-mode dispersion of all the resonance peaks increase with the increasing of the grating length, no matter what the length of the uniform fiber grating segment and the period of the sampled fiber grating are chosen. The birefringence induced by the asymmetric refractive index has stronger impact on the resonance peak close to the central wavelength than that of far away from the central wavelength.

Key words: fiber grating; sampled fiber grating; transfer matrix method; polarization dependent loss; polarization-mode dispersion

1 引 言

近些年来,光纤光栅已成为光纤通信和全光纤激光器等应用领域的研究热点,其中取样光纤光栅,由于其特殊的梳状光谱特性,在光学通信和传感等领域有许多重要的应用^[1-2]。采用相位掩模板通过侧面紫外曝光的方法已成为制备光纤光栅的标准方法,由此导致光敏纤芯折射率剖面呈非均匀分布。

这种非均匀性使得光纤在光栅区出现双折射特性,导致光纤简并的基模转换为相互正交的偏振模(x 和 y 偏振模)。实际测量中很难区分这对偏振模的透射谱,但由此导致的偏振相关损耗和偏振模色

作者简介:徐中南(1980-),男,在读博士生,主要从事光纤及光纤器件的研究。E-mail: xznwork@163.com

收稿日期:2010-06-04

散却不可忽略^[3],它们是光纤光栅在高速通信领域中的两个主要问题。实验上已对不同结构的光纤光栅的偏振相关损耗和偏振模色散做了研究,且从理论上研究了光纤光栅长度、调制幅度及全局双折射参量对光栅光学特性的影响^[3-6],但折射率调制的条纹可见度和光栅周期等参量对光栅传输特性的影响未见报道。由于取样光纤光栅在全光通信领域中的重要应用价值,使得研究折射率剖面非均匀性对其光学特性的影响具有重要意义。

本文根据均匀光栅透射谱函数,数值研究了光纤光栅的折射率调制的条纹可见度及光栅周期对均匀光纤光栅的透射谱、偏振关系损耗和偏振模色散的影响;结合传输矩阵方法,数值分析了光栅长度、取样周期及光栅段长度对取样光纤光栅的透射谱、偏振关系损耗和偏振模色散的影响。该结果对研究取样光纤光栅在通信领域中的应用具有一定的指导意义。

2 理论公式

在折射率剖面非均匀的光纤光栅的光栅区,互

$$F = \begin{bmatrix} \cosh(\alpha \cdot L) - j \frac{\sigma}{\alpha} \cdot \sinh(\alpha \cdot L) & -j \frac{\kappa}{\alpha} \cdot \sinh(\alpha \cdot L) \\ j \frac{\kappa}{\alpha} \cdot \sinh(\alpha \cdot L) & \cosh(\alpha \cdot L) + j \frac{\sigma}{\alpha} \cdot \sinh(\alpha \cdot L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-i\phi) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, L 是取样光纤光栅的均匀光栅段的长度; $\alpha = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$, $\kappa = \frac{\pi \nu \delta n_{\text{eff}}}{\lambda}$, $\sigma = \frac{\pi(n_{\text{eff}} + \delta n_{\text{eff}})}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$, $\phi = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} \Delta L$, ΔL 是无光栅区的长度。

由式(3)和式(4)可得 x 和 y 偏振模的透射谱 $t_{x(y)}(\lambda)$,并由此得到该光纤光栅的偏振相关损耗为^[3]:

$$\text{PDL}(\lambda) = 20 \cdot \left| \lg \left(\frac{|t_x(\lambda)|}{|t_y(\lambda)|} \right) \right| \quad (5)$$

以及 x 和 y 偏振模的时间延迟^[7]:

$$\tau_{x(y)}(\lambda) = -\frac{\lambda_2}{2\pi c} \frac{d}{d\lambda} [\text{phase}(t_{x(y)}(\lambda))] \quad (6)$$

由此可得其偏振模色散为^[3]:

$$\text{DGD}(\lambda) = |\tau_x(\lambda) - \tau_y(\lambda)| \quad (7)$$

3 计算结果及分析

取样光纤光栅的均匀光栅段对取样光纤光栅的光学特性具有重要影响,所以下面首先研究了光栅参数对折射率剖面非均匀的均匀光纤光栅传输特性的影响。通常,偏振模色散被用于分析双折射光纤

相正交的 x 和 y 偏振模的有效折射率为^[3]:

$$n_{\text{eff},x} = n_{\text{eff}} + \frac{\Delta n}{2}; n_{\text{eff},y} = n_{\text{eff}} - \frac{\Delta n}{2} \quad (1)$$

其中, Δn 是全局有效折射率差; n_{eff} 是忽略双折射的基模有效折射率。均匀光纤光栅的有效折射率扰动为:

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \cdot \left\{ 1 + \nu \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2)$$

其中, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 是平均折射率改变量; ν 是折射率调制的条纹可见度; ϕ 是相位角。

根据均匀光纤光栅的透射谱函数^[7],取样光纤光栅的入射和反射光场在光栅入射和出射端面可以用矩阵 F 联系起来,表示为:

$$\begin{bmatrix} R_{\text{out}} \\ S_{\text{out}} \end{bmatrix} = F^N \begin{bmatrix} R_{\text{in}} \\ S_{\text{in}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $R_{\text{in}}, S_{\text{in}}, R_{\text{out}}$ 和 S_{out} 分别表示入射光场和反射光场在光栅入射断面和反射断面的复数幅度:

光栅的传输特性,但本文认为偏振模色散比值(偏振模色散与忽略双折射的时间延迟的比值)更能反映折射率剖面非均匀性导致的双折射对其传输特性的影响。考虑到石英材料的色散^[8],计算分析了不同的条纹可见度和光栅周期情况下的均匀光纤光栅的透射谱、偏振相关损耗和偏振模色散。

图1是均匀光纤光栅在 $\nu=0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0 时的透射谱、偏振相关损耗和偏振模色散比值与归一化波长的关系。图中光栅长度 $L=10$ mm,中心波

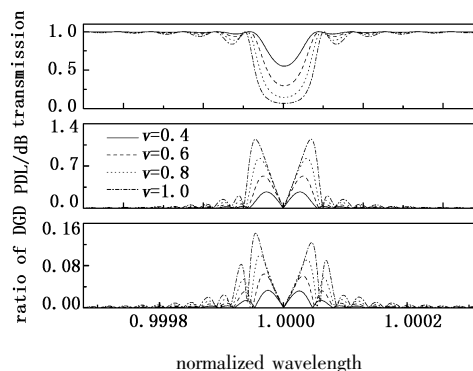


图1 均匀光纤光栅的透射谱、偏振相关损耗和偏振模色散比值与归一化波长的关系曲线, $\nu=0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0

长为 1550 nm, 取 $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 10^{-4}$, $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$ 。由图可见, 透射谐振峰的幅度随 ν 的增加而递增, 且偏振相关损耗和偏振模色散在谐振峰边缘和旁瓣之间达到最大值并随 ν 的增加而递增。当 $\nu = 0.4$ 和 1.0 时, 偏振相关损耗的最大值分别为 0.2703 dB 和 1.144 dB; 偏振模色散比值的最大值分别为 0.0329 和 0.1414。偏振相关损耗沿中心波长对称分布, 偏振相关损耗和偏振模色散比值的两个主峰之间的波长间隔也均随 ν 的增加而增大。

图 2 是 $\nu = 1$, Λ 分别为 300 nm, 400 nm, 500 nm 和 600 nm 情况下的透射谱、偏振相关损耗和偏振模色散比值与归一化波长的关系曲线。由图可见, 偏振相关损耗和偏振模色散比值均随 Λ 的增加而减小, 偏振相关损耗的最大值由 4.453 dB 减至 0.8766 dB; 偏振模色散比值的最大值由 0.5681 减至 0.101。比较图中不同 Λ 取值情况下的曲线可以发现, Λ 值分别对偏振相关损耗曲线的主峰和偏振模色散比值曲线的旁瓣影响更大。由于光栅周期与透射谱的中心波长成正比, 因此计算结果说明 x 和 y 偏振模在长波段具有较小的透射谱和时间延迟的差异。

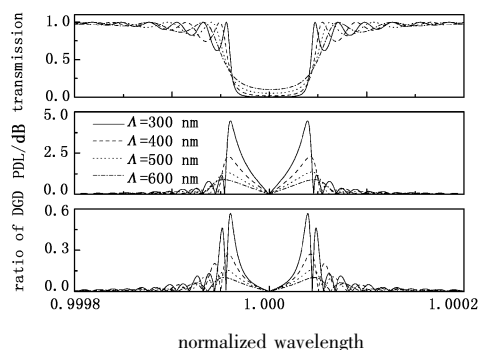
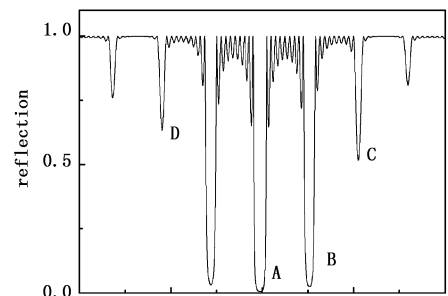


图 2 均匀光纤光栅的透射谱、偏振相关损耗和偏振模色散比值与归一化波长的关系曲线, $\Lambda = 300$ nm, 400 nm, 500 nm 和 600 nm

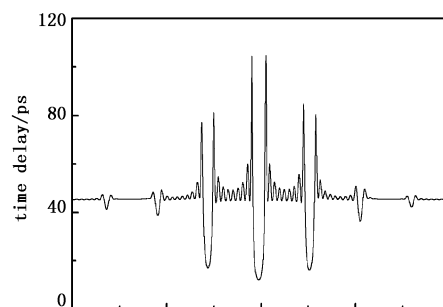
在折射率剖面非均匀的均匀光纤光栅的研究基础上, 下面计算分析了光栅长度、取样周期和均匀光栅段长度对取样光纤光栅传输特性的影响。

图 3 是取样光纤光栅的透射谱、时间延迟、偏振相关损耗和偏振模色散比值。采样光纤光栅长度 $L_{\text{Sample}} = 20$ mm, 取样周期 $\Delta z_0 = 1$ mm, 均匀光栅段长度 $\Delta z = 0.4$ mm, 中心波长为 1550 nm, $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 4 \times 10^{-4}$, $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$, $\nu = 1$ 。由图可见, 其梳状分布的透射谐振峰对应的幅度、时间延迟、偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值均由中心波长向两侧递

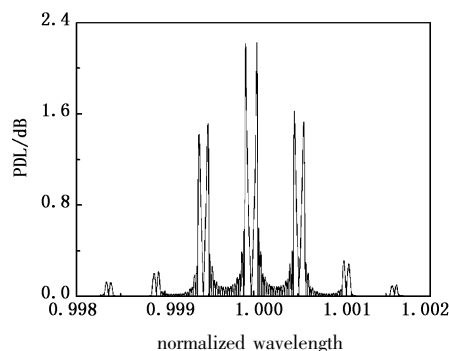
减, 且靠近中心波长的透射谐振峰有较多旁瓣。图 3(a) 中 C 和 D 峰的幅度虽约为 A 峰幅度的一半, 但其偏振相关损耗和偏振模色散比值却远远小于 A 和 B 峰(如图 3(c) 和图 3(d) 所示)。



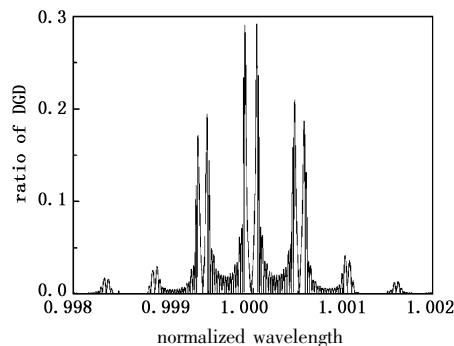
(a) 透射谱



(b) 时间延迟



(c) 偏振相关损耗



(d) 偏振模色散比值

图 3 取样光纤光栅

图 4 是在保持其他参数不变的情况下, A, B 和 C 透射谐振峰的幅度、偏振相关损耗和偏振模色散

比值的最大值与 L_{Sample} 的关系曲线。如图 4 所示,三种参量均随 L_{Sample} 的增加而递增,其中 A 和 B 峰的递增较快,C 峰相对缓慢。在 $L_{\text{Sample}} = 20 \text{ mm}$ 时,尽管 C 峰的幅度已达 0.7786,但其偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值却分别为 1.824 dB 和 0.2269,明显小于 A 和 B 峰。

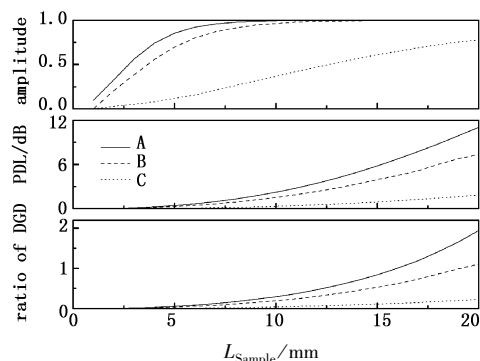
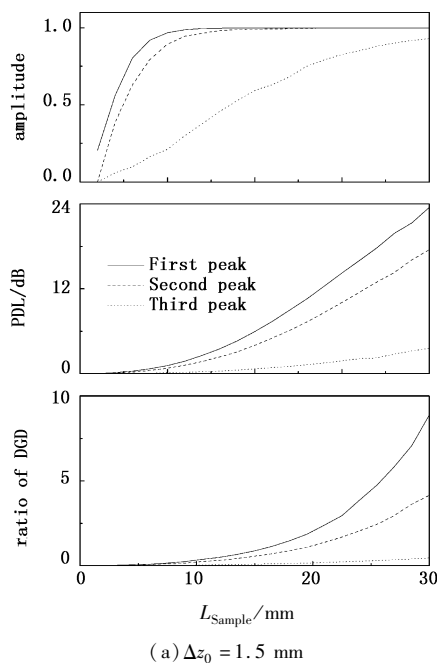
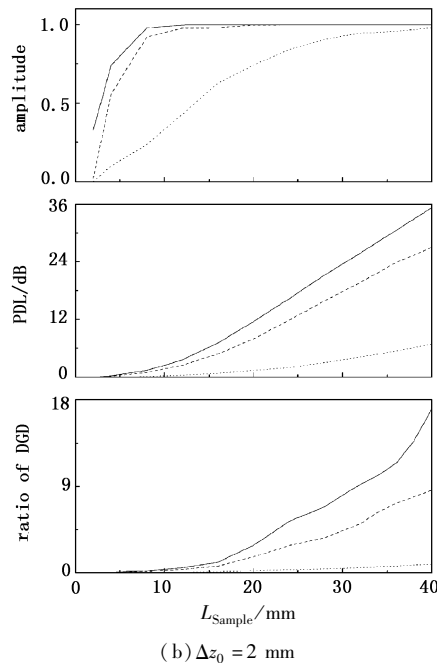


图 4 A、B 和 C 谐振峰的幅度、偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值与取样周期 L_{Sample} 的关系曲线

参量 Δz_0 和 Δz 对取样光纤光栅透射谐振峰的



(a) $\Delta z_0 = 1.5 \text{ mm}$



(b) $\Delta z_0 = 2 \text{ mm}$

图 5 第一、二和三谐振峰的幅度、偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值与 L_{Sample} 的关系曲线

4 结论

本文数值计算分析了折射率剖面非均匀引起的双折射对均匀光纤光栅和取样光纤光栅的透射谱、偏振关系损耗和偏振模色散的影响。结果表明,均匀光纤光栅的三个参量的最大值,在增加条纹可见度和光栅周期时分别增大和减小, x 和 y 偏振模在长波段具有较小的透射谱和时间延迟差异;取样光纤光栅透射谐振峰的幅度、偏振关系损耗和偏振模

对应波长和数目有很大影响^[9],所以下面以靠近中心波长的三个透射谐振峰为例,研究它们在不同的 Δz_0 和 Δz 取值情况下的幅度、偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值与 L_{Sample} 的关系。

图 5 和图 6 是取样光纤光栅靠近中心波长的三个透射谐振峰的幅度、偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值与 L_{Sample} 的关系曲线。图 5(a) 和 (b) 中 $\Delta z/\Delta z_0 = 0.4$, 取样周期分别为 $\Delta z_0 = 1.5 \text{ mm}$ 和 2 mm 。图 6(a) 和图 6(b) 中采样周期 $\Delta z_0 = 1 \text{ mm}$, $\Delta z/\Delta z_0$ 分别为 0.2 和 0.7。计算中保持 20 个取样周期不变。如图 6 所示,透射谐振峰的幅度、偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值,在任意取样周期和光栅段长度情况下,均随取样光栅长度的增加而增加,而且在均匀光栅段与取样周期之比较高时,第一和三透射谐振峰的偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值的差异非常显著。

色散比值的最大值由中心波长向两侧减小,且在不同的光栅参数取值情况下,均随取样光纤光栅长度的增加而递增。较大的均匀光栅段长度与取样周期的比值使得靠近中心波长的谐振峰与远离波长的谐振峰的偏振关系损耗和偏振模色散比值的差异更加显著。本研究结果对采样光纤光栅在通信等领域的应用具有一定的参考价值。

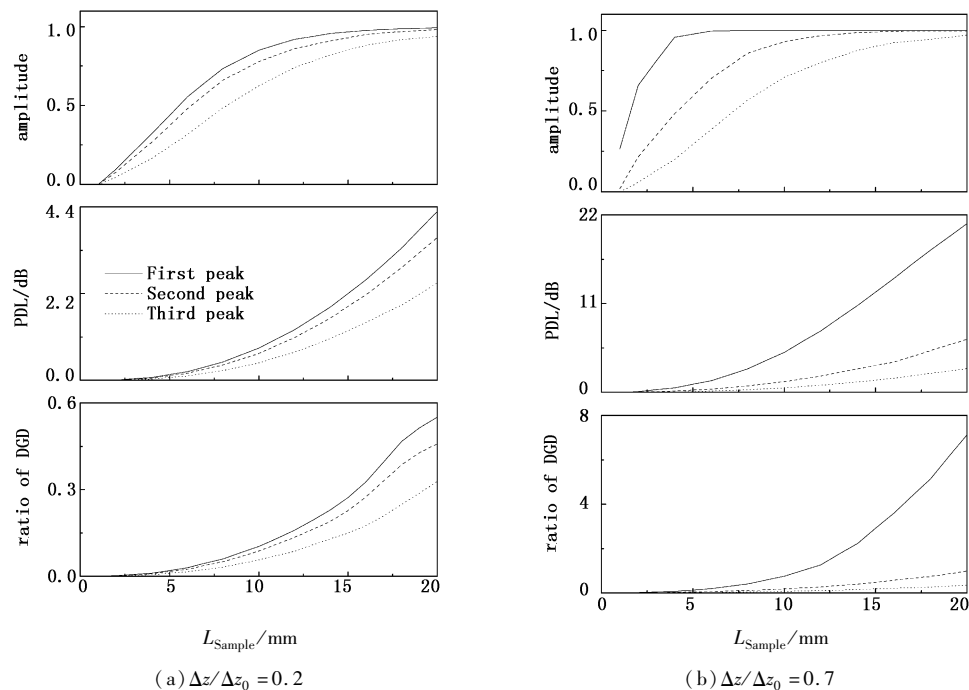


图6 第一、二和三谐振峰的幅度、偏振相关损耗和偏振模色散比值的最大值与 L_{Sample} 的关系曲线

参考文献:

- [1] M Ibsen, M K Durkin, M J Cole, et al. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10 (6): 842 – 844.
- [2] H Ishii, Y Tohmori, M Yamamoto, et al. Modified multiple-phase-shift super-structure-grating DBR lasers for broad wavelength tuning [J]. Electron. Lett., 1994, 30 (14): 1141 – 1142.
- [3] Christophe Caucheteur, Sébastien Bette, Raimundo García-Olcina, et al. Influence of the grating parameters on the polarization properties of fiber Bragg gratings [J]. J. Lightwave Tech., 2009, 27 (8): 1000 – 1010.
- [4] D Wang, M Matthews, J Brennan III. Polarization mode dispersion in chirped fiber Bragg gratings [J]. Opt. Exp., 2004, 12 (23): 5741 – 5753.
- [5] S T Oh, W T Han, U C Paek, et al. Discrimination of temperature and strain with a single FBG based on the birefringence effect [J]. Opt. Exp., 2004, 12 (4): 724 – 729.
- [6] S Bette, C Caucheteur, M Wuilpart, et al. Capmany. Spectral characterization of differential group delay in uniform fiber Bragg gratings [J]. Opt. Exp., 2005, 13 (25): 9954 – 9960.
- [7] Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. J. Lightwave Tech., 1997, 15 (8): 1277 – 1294.
- [8] G P Agrawal. Nonlinear fiber optics [M]. New York: Academic Press, 1995.
- [9] Jia bao-hua, Sheng qiu-qin, Feng dan-qin, et al. Study on the theory of super-structured fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30 (3): 247 – 251. (in Chinese)

贾宝华, 盛秋琴, 冯丹琴, 等. 超结构光纤布拉格光栅的理论研究 [J]. 中国激光, 2003, 30 (3): 247 – 251.