

直流切趾对光纤光栅特性的影响

于志辉,余重秀,王葵如,王旭,颜玢玢,陈卓,李安俭

(北京邮电大学电子工程学院,北京100876)

摘要:从模耦合方程出发,分析了直流切趾对光纤光栅特性的影响,给出了直流切趾和光栅啾啾之间的关系,提出了用线性直流切趾来实现均匀模板制作啾啾光栅和同一啾啾模板制作不同色散特性光栅的方法。实验上,用均匀模板制作了色散量为 $-2\ 126\ \text{ps}/\text{nm}$ 的啾啾光栅,并用同一啾啾模板制作出了色散量为 $-1\ 599.362\ 71\ \text{ps}/\text{nm}$ 、 $-1\ 250.4\ \text{ps}/\text{nm}$ 和 $-2\ 011.4\ \text{ps}/\text{nm}$ 的光栅。实验结果表明,理论和实验符合较好。

关键词:光纤布拉格光栅;直流切趾;啾啾

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Effect of direct current apodization on fiber Bragg gratings

YU Zhi-hui, YU Chong-xiu, WANG Kui-ru, WANG Xu, YAN Bin-bin, CHEN Zhuo, LI An-jian

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The effect of Direct Current (DC) apodization on the Fiber Bragg Gratings (FBG) was investigated with mode-coupling theory and experiment, and the relationship of the DC apodization and the grating chirp was given. Both of the uniform FBG's and chirped FBG's (CFBG) group delays were changed after linear DC apodization. A uniform period FBG with a linear dispersion $-2\ 126\ \text{ps}/\text{nm}$ was fabricated using a uniform phase mask, also the CFBGs with dispersion values of $-1\ 599.362\ 71\ \text{ps}/\text{nm}$, $-1\ 250.4\ \text{ps}/\text{nm}$ and $-2\ 011.4\ \text{ps}/\text{nm}$ were fabricated with the same chirped phase mask, respectively, which shows the experimental results agree well with those theories reported in literatures.

Key words: Fiber Bragg Grating(FBG); DC apodization; chirp

1 引言

近年来,光纤光栅(FBG)^[1]及其在光通信^[2-4]和光纤传感^[5-7]方面的应用研究引起了人们的极大关注。其中,啾啾光纤光栅(CFBG)因其特有的反射和时延特性可实现色散补偿^[3-4]和高精度光纤传感而倍受重视^[6-7]。然而,不同的应用领域

要求光栅有不同的时延特性,也就是说用相位模板法制作光纤光栅需要有不同的啾啾特性的相位模板,大大增加了光纤光栅制作的成本。本文通过分析直流切趾对光栅啾啾特性的影响,提出了一种应用简单直流切趾来改变FBG时延特性的方法,同时提出了均匀相位模板制作啾啾光栅和用同一啾啾相位模板制作有不同时延特征光栅的方案。实验上,本文采用均匀相位模板制作了CF-

BG,并用同一啁啾相位模板实现了不同色散量光纤光栅的制作。

2 理论分析

光纤光栅的折射率调制函数为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \bar{\delta} n_{\text{eff}} \left\{ 1 + \frac{v}{2} e^{i\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \phi(z)\right]} \right\}, \quad (1)$$

其中 $\bar{\delta} n_{\text{eff}}$ 是光栅的平均折射率调制深度, v 是条纹的可见度, $\phi(z)$ 是光栅相位角, Λ 是光栅周期。对于折射率调制函数为 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 的单模光纤光栅而言,其模耦合方程为^[7]:

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z), \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - i\kappa^* R(z). \quad (3)$$

该方程的各参数定义如下^[7]:

$$R(z) = A(z) \exp(i\delta z - \phi/2), \quad (4)$$

$$S(z) = B(z) \exp(-i\delta z + \phi/2), \quad (5)$$

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad (6)$$

$$\kappa = \kappa^* = \frac{v\pi}{\lambda} \bar{\delta} n_{\text{eff}}, \quad (7)$$

$$\delta = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right). \quad (8)$$

其中 $A(z)$ 和 $B(z)$ 分别是正向和反向传输模的振幅慢变化包络, $\hat{\sigma}$ 是光栅的直流自耦合系数, κ 是交流耦合系数, δ 是光栅失谐量, λ_D 是光栅的 Bragg 波长, σ 是光栅的直流耦合系数,引入光栅以外的直流切趾后其定义如下:

$$\sigma = \sigma_g + \sigma_d, \quad (9)$$

其中 $\sigma_g = \frac{2\pi}{\lambda} \bar{\delta} n_{\text{eff}}$ 为光栅本身的直流耦合系数, σ_d 为引入的与光栅无关的直流耦合系数,该系数由直流切趾造成。为方便讨论,假设直流切趾造成纤芯有效折射率变化为 $\Delta n_{\text{def}}(z)$,且为缓变函数,即忽略直流切趾对交流耦合系数的影响,则式(9)可变为:

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \bar{\delta} n_{\text{eff}} + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{def}}(z), \quad (10)$$

将式(10)代入(6)并整理得:

$$\hat{\sigma} = \delta + \frac{2\pi}{\lambda} \bar{\delta} n_{\text{eff}} - \frac{1}{2} \frac{d\left(\phi - \int_0^z \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{def}}(z) dz\right)}{dz}, \quad (11)$$

可见,直流切趾可等效为光栅啁啾。假设由直流切趾造成的光栅啁啾为 $\phi_d(z)$,则有

$$\phi_d(z) = - \int_0^z \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{def}}(z) dz, \quad (12)$$

式(12)为光栅直流切趾与光栅啁啾之间的关系。

均匀周期 FBG 有 $\phi(z) = 0$,由式(11)可知,通过选取合适的切趾函数就可使均匀光栅变为啁啾光栅;对于啁啾光栅而言,通过选取合适的直流切趾函数就可使其具有所预期的啁啾特性。

图 1 为均匀周期 FBG 经线性直流切趾后的反射和时延特性的仿真图,其直流切趾函数为: $\Delta n_{\text{def}}(z) = 9.291 \times 10^{-6} z$,光栅参数为:光栅长度 $L = 4$ cm,光栅周期 $\Lambda = 0.53552 \mu\text{m}$,纤芯有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.447$,折射率调制深度 $\bar{\delta} n_{\text{eff}} = 1 \times 10^{-4}$,为抑制时延和旁瓣,采用升余弦函数对光栅交流分量进行了切趾。此时,光纤光栅任意位置的相位由可式(12)得出 $\Delta n_{\text{def}}(z) = \frac{2\pi}{\lambda} 9.291 \times 10^{-6} z^2$,可见其相位表达式与啁啾光纤光栅的相位相同,而图 1 中的时延特性也成线性。

理论分析和图 1 的仿真结果表明,影响光栅相位的因素除光栅周期外,还有光栅的直流切趾,且线性直流切趾的 FBG 可等效为周期线性啁啾的 FBG。

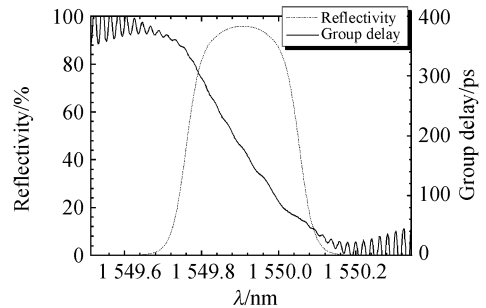


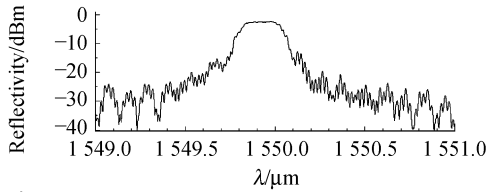
图 1 线性直流切趾后的均匀周期 FBG 的反射和时延特性

Fig. 1 Characteristics of uniform FBG with linear DC apodization

3 实验结果及讨论

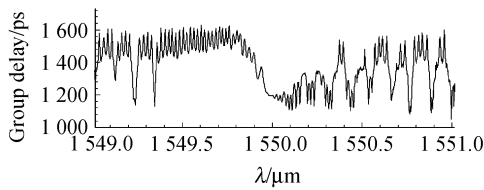
用均匀模板制作 CFBG 可分为两步:第一步是对光敏光纤进行线性直流切趾,使该段光纤的纤芯有效折射率呈线性变化;第二步是在该段光纤上刻制均匀周期的 FBG。本文采用的均匀模

板周期为 1 068.5 nm,光纤经载氢处理,测量仪器为 LUNA 公司的光矢量分析仪,光栅长度为 4 cm。图 2 为测量结果,其色散量为 $-2\ 126\ \text{ps}/\text{nm}$,图中可见在反射区域内其反射率一致性较好,且与前面的理论分析和图 1 的仿真结果中的时延特性相一致。



(a) 均匀周期 FBG 的反射特性

(a) Reflection characteristic of FBG



(b) 均匀周期 FBG 的时延特性

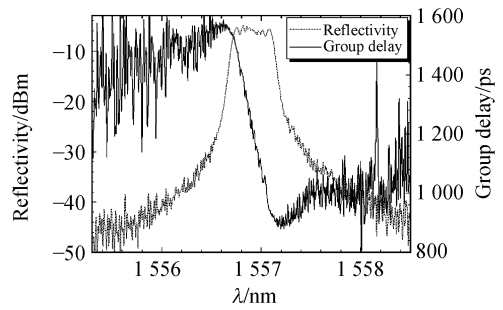
(b) Time delay characteristic of FBG

图 2 经线性直流切趾后均匀周期 FBG 的反射和时延特性

Fig. 2 Measured characteristics of uniform FBG with linear DC apodization

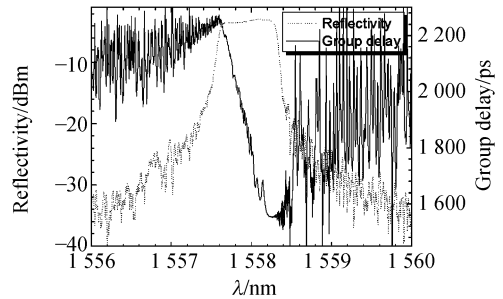
在同一啁啾模板实现不同色散量 FBG 的制作研究中,采用的啁啾相位模板周期为 1 074 nm,光栅长度为 7 cm。图 3 为测量结果,其中(a)为无任何直流切趾 CFBG 的测量结果,其色散量为 $-1\ 599.362\ 71\ \text{ps}/\text{nm}$; (b)为正向直流切趾 CFBG 的测量结果,其色散量为 $-1\ 250.4\ \text{ps}/\text{nm}$; (c)为反向直流切趾 CFBG 的测量结果,其色散量为 $-2\ 011.4\ \text{ps}/\text{nm}$ 。这里定义增加光纤光栅的啁啾量为正向切趾,反之为反向切趾。

上述实验结果表明,FBG 可以通过直流切趾来改变其啁啾特性:线性直流切趾均匀光纤光栅可使其具有啁啾光纤光栅的特性;线性直流切趾线性啁啾光纤光栅可以改变其色散量。这些实验结果为制作不同时延特性的啁啾光纤光栅提供了一种新的方式,从而可实现在均匀模板条件下制作啁啾光纤光栅和同一啁啾模板条件下制作不同色散量光栅。



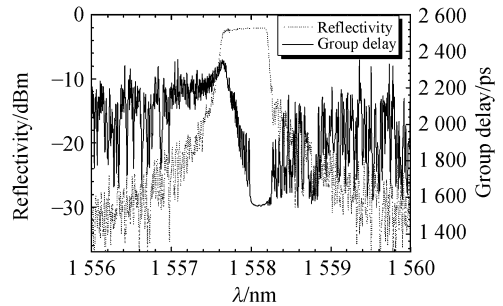
(a) 未经线性直流切趾的 CFBG

(a) CFBG without any linear DC apodization



(b) 正向线性直流切趾的 CFBG

(b) CFBG with positive linear DC apodization



(c) 反向线性直流切趾的 CFBG

(c) CFBG with negative linear DC apodization

图 3 同一啁啾相位模板制作的不同色散量的 CFBG

Fig. 3 Measured characteristics of CFBG fabricated by the same chirped phase mask

4 结 论

上述的理论和实验研究表明,光纤光栅的缓变直流切趾可等效为光纤光栅的周期啁啾,从而影响光栅的时延特性。对于均匀光纤光栅而言,线性直流切趾可使其具有啁啾光纤光栅的特性;对于啁啾光纤光栅而言,不同的线性直流切趾可使其具有不同的色散特征。

参考文献:

- [1] CHEN X F, FAN C C, LUO Y, *et al.* Novel flat multichannel filter based on strong chirped sampled fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2000,12(11):1501-1503.
- [2] 郭玉彬,葛璜. 光纤 Bragg 光栅的研究[J]. *光学精密工程*,1999,7(1):31-38.
GUO Y B, GE H. Fabrication of fiber Bragg grating [J]. *Opt. Precis. Eng.*, 1999,7(1): 31-38. (in Chinese)
- [3] NYKOLAK G, de BARROS M R X, NIELSEN T N, *et al.* All-fiber active add-drop wavelength router [J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 1997,9(5): 605-606.
- [4] PASTOR D, CAMPMANY J, ORTEGA D, *et al.* Design of apodized linearly chirped fiber gratings for dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996,14(11): 2581-2588.
- [5] 方福波. 基于单片机的光纤 Bragg 光栅传感器的解调系统[J]. *光学精密工程*,2002,10(4):383-387.
FANG F B. Application of a single chip microprocessor in the optical fiber Bragg grating sensor [J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2002,10(4):383-387. (in Chinese)
- [6] CHTCHERBAKOV A A, SWART P L. Chirped fiber-optic Bragg grating interrogator in a multiplexed Bragg grating sensor configuration[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004,22(6):1543-1547.
- [7] 于志辉,余重秀,王旭,等. 三角形谱啁啾光纤光栅在光栅传感系统中的应用[J]. *光电子·激光*,2006,17(1):54-57.
YU Z H, YU C X, WANG X, *et al.* Application of chirped fiber bragg gratings with triangular spectrum in the fiber gratings sensor system [J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2006,17(1):54-57. (in Chinese)
- [8] ERDOGANL T. Fibre grating spectra[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997,15:1227-1294.

作者简介:于志辉(1978—),男,2000年毕业于四川大学电子信息学院,目前为北京邮电大学电子工程学院博士研究生,研究方向为光纤光栅及其应用和全光网。E-mail:yzhihui@gmail.com;zhihui.yu@163.com