

# 折射率直流分量调制对光纤 Bragg 光栅的影响\*

颜纷纷, 余重秀, 王葵如, 桑新柱, 忻向军, 徐大雄

(北京邮电大学 光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:**从耦合模理论出发, 推导了折射率直流分量调制函数与光纤 Bragg 光栅相位之间的关系式, 分析了折射率直流分量调制对光纤 Bragg 光栅时延特性的影响. 利用传输矩阵法进行了数值仿真, 仿真结果与理论分析一致. 在理论分析基础上, 提出采用同一块均匀相位掩膜版灵活制作具有不同线性或非线性时延特性的啁啾光纤光栅的方法, 可用于高速光通信系统中不同色散和色散斜率的补偿.

**关键词:**光纤 Bragg 光栅; 折射率直流分量调制; 时延; 啁啾; 色散补偿

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)10-1962-4

## 0 引言

自 1978 年制作出世界上第一根光纤光栅以来<sup>[1-2]</sup>, 光纤光栅技术取得了很大发展. 它作为一种新型的光无源器件, 已渗透到光纤通信系统的各个角落, 得到了广泛的应用<sup>[3-5]</sup>. 可以说, 光纤光栅的应用大大地推动了高速光通信及相关领域的发展, 在未来的光通信和其它光电子领域中将扮演越来越重要的角色.

光纤 Bragg 光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 按照周期结构划分, 主要包括均匀 FBG、啁啾 FBG 和取样 FBG. 其中, 啁啾光纤 Bragg 光栅 (Chirped Fiber Bragg Grating, CFBG) 因其特有的反射与时延特性, 使得不同波长的光波在光栅的不同位置产生反射, 可对长距离的高速光信号实现色散补偿<sup>[6-10]</sup>. 但是不同的通信系统需要不同量的色散以及色散斜率补偿, 因此就需要制作出不同时延特性的啁啾光纤光栅. 使用相位掩膜版法制作不同特性的啁啾光栅, 就需要不同参量的啁啾相位掩膜版, 其制作成本很高. 本文从耦合模理论出发, 得出折射率直流分量 (Refractive Index Direct Current Component, RIDCC) 调制函数与光纤光栅啁啾量的关系, 提出用不同 RIDCC 调制函数使 FBG 产生不同时延特性的方法. 利用该方法, 可使用同一块均匀相位掩膜版制作出具有不同时延特性的啁啾光栅, 能够用于高速光通信系统中不同的色散和色散斜率的补偿. 对于线性 RIDCC 调制, 通过优化参量, 可以得到线性度极佳的时延特性. 特别是利用这种方法,

可以制作出具有非线性时延特性的啁啾 FBG, 可实现色散与色散斜率的同时补偿.

## 1 RIDCC 调制函数与光栅相位关系的理论推导

光纤纤芯折射率沿轴向为一常量, 如果制作光栅之前, 先对光纤进行折射率直流分量调制, 光纤纤芯折射率不再是一个常量, 而是附加上一个纤芯折射率微扰, 该微扰函数取决于 RIDCC 调制函数.

经过 RIDCC 调制的光纤光栅纤芯折射率调制方程为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \Delta n_{\text{eff}}(z) + \bar{\delta} n_{\text{eff}} \{1 + v \cos [(2\pi/\Lambda_0)z + \varphi(z)]\} \quad (1)$$

式中  $\Delta n_{\text{eff}}(z)$  是 RIDCC 调制项, 其变化周期远大于光栅的折射率交流调制周期;  $\bar{\delta} n_{\text{eff}}$  是光栅初始位置 ( $z=0$ ) 平均折射率调制系数, 又称为光栅调制深度, 为一常量;  $v$  是条纹的可见度;  $\varphi(z)$  是光栅啁啾, 又称光栅相位角;  $\Lambda_0$  是光栅折射率交流调制周期. FBG 耦合模方程组为<sup>[3]</sup>

$$dR/dz = -i\delta R - i\kappa^* S \quad (2)$$

$$dS/dz = i\delta S + i\kappa R \quad (3)$$

引入 RIDCC 调制项的耦合模方程可写为

$$dR/dz = -i\delta R - i\kappa_{\text{gac}}^* S \quad (4)$$

$$dS/dz = i\delta S + i\kappa_{\text{gac}} R \quad (5)$$

$$\delta = \kappa_{\text{fdc}} + \kappa_{\text{gdc}} + \frac{1}{2} [\delta\beta - \frac{d\varphi_{\Lambda}(z)}{dz}] \quad (6)$$

式中,  $R$  和  $S$  分别代表前向和反向传输模式,  $\kappa_{\text{gdc}}$  和  $\kappa_{\text{gac}}$  分别是光栅的“直流”和“交流”耦合系数,  $\kappa_{\text{fdc}}$  是由于光纤本身引入 RIDCC 调制而造成的光纤“直流”耦合系数,  $\frac{1}{2} \frac{d\varphi_{\Lambda}(z)}{dz}$  表征光栅周期的啁啾系数.

对于单模光纤中前向和反向模式间的耦合, 可以将模耦合方程中的各项系数简化为

\* 国家自然科学基金 (60677003)、教育部科学技术研究重点项目 (107011) 和北京邮电大学 2006 年研究生创新基金资助  
Tel: 010-62283520 Email: yanbinbinhe@gmail.com  
收稿日期: 2007-06-15

$$\hat{\sigma} = \kappa_{\text{gdc}} + \kappa_{\text{fdc}} = \frac{2\pi\bar{\delta}_{\text{eff}}}{\lambda} + \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}(z)}{\lambda} = \hat{\sigma}_0 + 2\pi\Delta n_{\text{eff}}(z)/\lambda \quad (7)$$

$$\kappa = \kappa_{\text{gac}} = \kappa_{\text{gac}}^* = (\nu/2)\hat{\sigma} \quad (8)$$

$$\sigma = 2^{-1}\delta\beta = 2\pi n_{\text{eff}}(\lambda^{-1} - \lambda_{\text{Bragg}}^{-1}) \quad (9)$$

$$\delta = \hat{\sigma}_0 + \sigma - \left[ \frac{1}{2} \frac{d\varphi_{\Lambda}(z)}{dz} - \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}(z)}{\lambda} \right] = \hat{\sigma}_0 + \sigma - 2^{-1}(d\varphi(z)/dz) \quad (10)$$

式中,  $\hat{\sigma}$  是直流耦合系数,  $\kappa$  是交流耦合系数,  $\sigma$  为光栅的失谐量,  $\lambda_{\text{Bragg}}$  为光栅的 Bragg 波长, 又称设计波长, 其定义由相位匹配条件得出, 满足

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda_0 \quad (11)$$

引入的 RIDCC 调制项  $\Delta n_{\text{eff}}(z)$  的变化周期远大于光栅的周期, 且为缓变函数, 可忽略  $\kappa_{\text{fdc}}$  对  $\kappa$  的影响, 即

$$\kappa = \kappa_{\text{gac}} = \kappa_{\text{gac}}^* = \frac{\nu}{2} \frac{2\pi\bar{\delta}_{\text{eff}}}{\lambda} = \frac{\nu\pi\bar{\delta}_{\text{eff}}}{\lambda} \quad (12)$$

由式(10)可得

$$\frac{1}{2} \frac{d\varphi(z)}{dz} = \frac{1}{2} \frac{d\varphi_{\Lambda}(z)}{dz} - \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}(z)}{\lambda} \quad (13)$$

令  $\varphi(z) = \varphi_{\Lambda}(z) + \varphi_d(z)$ , 其中,  $\varphi_d(z)$  表示光纤 RIDCC 调制产生的啁啾, 有

$$\varphi_d(z) = -\int_0^z \frac{4\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}}(z) dz \quad (14)$$

由于均匀周期光纤 Bragg 光栅的  $\varphi_{\Lambda}(z) = 0$ , 所以通过选取恰当的 RIDCC 调制函数就可以使均匀周期的光纤 Bragg 光栅产生相位啁啾, 形成啁啾光栅。

## 2 数值仿真研究

采用传输矩阵法, 基于耦合模方程仿真分析不同

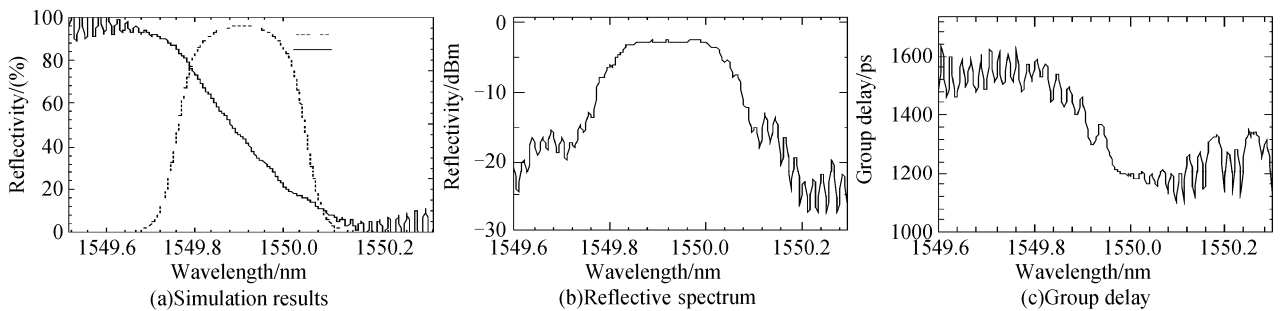


图 2 线性 RIDCC 调制的 FBG 反射谱和时延

Fig. 2 Reflective spectra and group delays with linear RIDCC modulation

对线性 RIDCC 调制函数的线性系数进行优化, 可以得到线性度更好的时延特性, 如图 3, 此时 RIDCC 调制函数为  $\Delta n_{\text{eff}}(z) = 4.9338 \times 10^{-4}(1 -$

RIDCC 调制函数对 FBG 反射谱和时延特性的影响. 光栅长度为  $L = 4 \text{ cm}$ , 光栅周期为  $\Lambda = 0.53552 \mu\text{m}$ , 纤芯有效折射率为  $n_{\text{eff}} = 1.447$ , 折射率调制深度为  $\bar{\delta}_{\text{neff}} = 1 \times 10^{-4}$ , 采用升余弦函数对交流分量进行切趾, 抑制时延抖动和反射谱旁瓣。

当  $\Delta n_{\text{eff}}(z) = 0$ , 也就是没有进行 RIDCC 调制时, FBG 的反射谱和时延特性如图 1, 其时延曲线表现为滤波器特征。

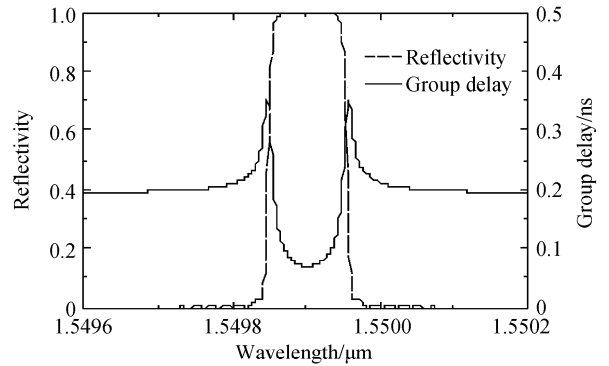


图 1 未进行 RIDCC 调制的 FBG 反射谱和时延

Fig. 1 Reflective spectrum and group delay without RIDCC modulation

### 2.1 线性 RIDCC 调制研究

对于线性 RIDCC 调制, 已经做过初步理论和实验研究<sup>[11]</sup>, 当取  $\Delta n_{\text{eff}}(z) = 9.291 \times 10^{-6}(1 - L^{-1}z)$  时, 仿真得到的 FBG 反射谱和时延特性如图 2(a), 实验得到的 FBG 反射谱和时延特性如图 2(b), (c). 可见, 图 2(b), (c) 中的实验结果与图 2(a) 仿真结果相一致. 所以, 对均匀光栅预先进行线性 RIDCC 调制可以使光栅具有线性啁啾光纤光栅的特性。

$L^{-1}z)$ ,  $0 < z < L$ . 从图中可以看到, 优化选择参量后, 线性直流调制可以使 FBG 具有极佳的线性时延特性, 非常适用于高速光通信系统的色散补偿。

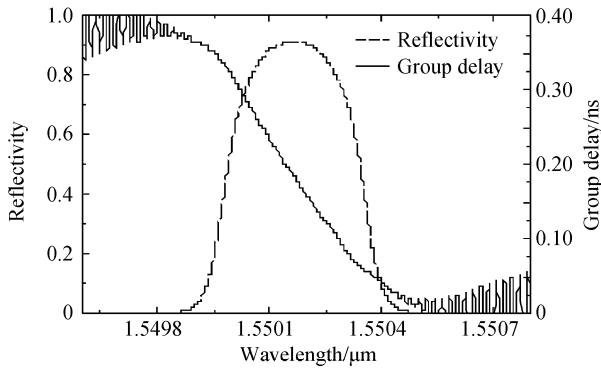


图3 优化的线性RIDCC调制的FBG反射谱和时延特性  
Fig. 3 Reflective spectrum and group delay with optimal linear RIDCC modulation

## 2.2 非线性RIDCC调制研究

当RIDCC调制函数为非线性函数时,通过计算仿真,可得:

1)RIDCC调制函数为余弦函数,即  $\Delta n_{\text{eff}}(z) = 1.9735 \times 10^{-4} \cos(z\pi/L)$ ,  $0 < z < L$  时,可得到图4的反射谱和时延特性.可以看到,时延特性不再为线性.

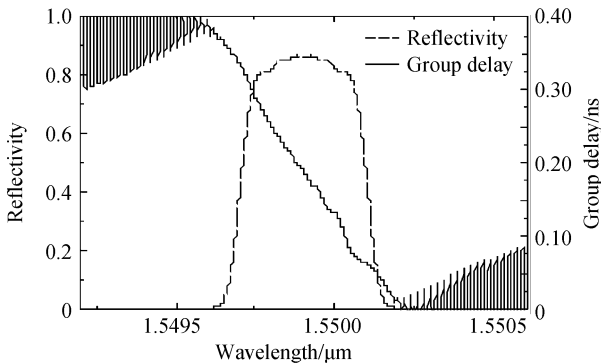
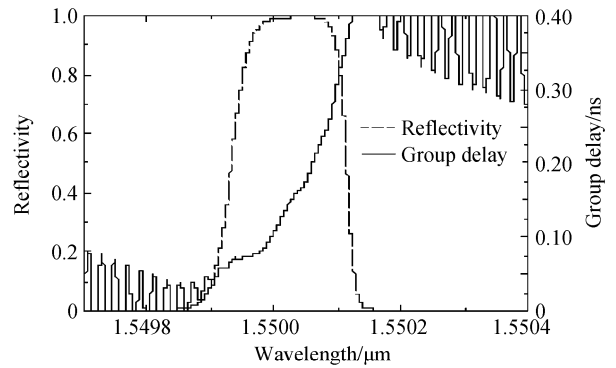


图4 RIDCC调制函数为余弦函数的FBG反射谱和时延特性  
Fig. 4 Reflective spectrum and group delay with non-linear RIDCC modulation (cosine function)

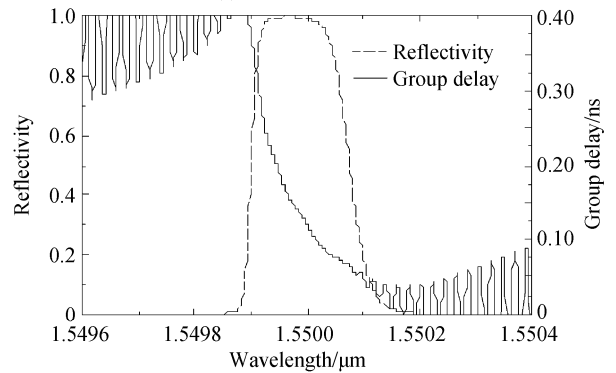
2)RIDCC调制函数为升余弦函数,即  $\Delta n_{\text{eff}}(z) = 1.7277 \times 10^{-4} \cos(3\pi/2 + z\pi/2L)$ ,  $0 < z < L$  时,可得到如图5(a)的反射谱和时延特性,其时延特性已经表现为较明显的非线性特性.

3)RIDCC调制函数取e指数函数,即  $\Delta n_{\text{eff}}(z) = 2.2172 \times 10^{-4} \exp(-8 \ln 2 \frac{z}{L})$ ,  $0 < z < L$  时,可得到如图5(b)的反射谱和时延特性,此时,时延特性为较光滑的非线性曲线,非常适合于高速光通信系统中的色散以及色散斜率同时补偿.

从图4~5中可以看到,当使用非线性RIDCC调制函数时,FBG的时延曲线也为非线性.因此,通过不同的RIDCC调制,采用均匀的相位掩膜版就可以得到不同啁啾特性的FBG.



(a) Raise cosine function



(b) Exponential function

图5 RIDCC调制函数和e指数函数为升余弦函数的FBG反射谱和时延特性

Fig. 5 Reflective spectra and group delays with non-linear RIDCC modulation (raise cosine function and exponential function)

## 3 结论

通过理论和仿真研究,RIDCC调制可以改变均匀FBG的时延特性,产生相位啁啾,从而使FBG表现为啁啾光栅的特性.对于线性RIDCC调制,通过优化RIDCC调制函数的线性系数,可以得到线性度极好的时延特性,而且不同的线性RIDCC调制系数可以得到不同的时延曲线,从而得到不同的色散补偿量.对于非线性RIDCC调制,可以得到非线性特性的时延曲线,且不同的非线性RIDCC调制函数可以获得不同的非线性时延特征.所以,为了适合高速光通信系统中不同的色散以及色散斜率同时补偿,只需恰当设置RIDCC调制函数,就可以使用同一块均匀相位掩膜版制作出各种啁啾特性的光纤Bragg光栅,该啁啾量取决于RIDCC调制函数.这种方法比较灵活,适用性强,且可大大降低制作成本.

### 参考文献

- [1] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Appl Phys Lett*, 1978, **32**(10): 647-649.
- [2] KAWASAKI B S, HILL K O, JOHNSON D C, *et al.* Narrow-

- band Bragg reflectors in optical fibers[J]. *Opt Lett*, 1978, **3**(1):66-68.
- [3] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1277-1294.
- [4] HILL K O, MELTZ G. Fiber bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1263-1276.
- [5] GILES C R. Lightwave applications of fiber bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1391-1404.
- [6] HILL K O, BILODEAU F, MALO B, *et al.* Chirped in fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion[J]. *Opt Lett*, 1994, **19**(17):1314-1316.
- [7] LOH W H, LAMING R I, ELLIS A D, *et al.* 10 Gb/s transmission over 700 km of standard single-mode fiber with 10 cm chirped fiber grating compensator and duobinary transmitter[J]. *Photon Technol Lett*, 1996, **8**(9):1258-1260.
- [8] YU Zhi-hui, YU Chong-xiu, WU Qiang, *et al.* Multichannel dispersion compensator fabricated by interleaving several sampled fiber bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8):1234-1237.
- [9] LIU Yu-min, YU Zhong-yuan, YANG Hong-bo, *et al.* Application of dispersion and dispersion slope compensation based on optimization of binary phase-sampled fiber bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1701-1705. 刘玉敏,俞重远,杨红波,等. 优化二元相位取样光纤布喇格光栅及对色散和色散斜率补偿的应用[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1701-1705.
- [10] WU Qiang, YU Chong-xiu, XIN Yu, *et al.* Performance research of  $16 \times 10$  Gb/s system compensated by chirped FBG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):451-454. 吴强,余重秀,辛雨,等.  $16 \times 10$  Gb/s 啁啾光纤光栅色散补偿系统性能研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(4):451-454.
- [11] YU Zhi-hui, YU Chong-xiu, WANG Kui-ru, *et al.* Effect of direct current apodization on fiber Bragg gratings[J]. *Opt and Precision Eng*, 2006, **14**(6):935-938. 于志辉,余重秀,王葵如,等. 直流切趾对光纤光栅特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6):935-938.

## Effect of Refractive Index Direct Current Component Modulation on Fiber Bragg Gratings

YAN Bin-bin, YU Chong-xiu, WANG Kui-ru, SANG Xin-zhu, XIN Xiang-jun, XU Da-xiong

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies (Ministry of Education),

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

Received date: 2007-06-11

**Abstract:** The relationship of refractive index direct current component modulation function and phase of fiber Bragg grating was deduced using coupled-mode theory, and the effect of refractive index direct current modulation on fiber Bragg gratings was analyzed and the numerical simulation investigation with Transmission Matrix Method was also given. The simulation results agree with those theories reported in literatures. Based on the theoretical analyses, by properly controlling the RIDCC modulation, using the same uniform phase mask can fabricate fiber Bragg gratings with different linear or non-linear group delay characteristics. These gratings can be used for different dispersion compensation and dispersion slope compensation in high-speed optical communication systems.

**Key words:** FBG; RIDCC modulation; Group delay; Chirp; dispersion compensation



**YAN Bin-bin** was born in 1981. She received her B. S. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2003. Now she is pursuing her Ph. D. degree at Beijing University of posts and Telecommunications. Her current research interests focus on optical fiber communication, photoelectronic device and nonlinear optics.