

文章编号: 0253-2239(2007)06-0971-6

非啁啾取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的分析*

邹喜华 潘 炜 罗 斌 王梦遥 李海涛 张伟利

(西南交通大学信息科学与技术学院光通信与光器件研究所, 成都 610031)

摘要: 推导并验证了非啁啾取样光纤布拉格光栅(SFBG)反射谱中反射峰值波长的表达式。基于种子光栅中心波长对应的折射率调制深度和取样光纤布拉格光栅折射率调制函数的傅里叶级数展开式, 提炼出取样光纤布拉格光栅的折射率调制深度和各阶光栅周期, 从而导出其反射峰值波长的表达式。由于考虑了占空比、取样周期等取样光纤布拉格光栅的结构参量, 因而表达式能够描述反射峰的分布。仿真实验中, 不同占空比或取样周期下计算出的反射峰值波长、信道间隔符合数值反射谱。该表达式既适用于均匀取样光纤布拉格光栅, 也适用于交流切趾和交直流切趾取样光纤布拉格光栅。

关键词: 光纤光学; 取样光纤布拉格光栅; 反射峰值波长; 切趾

中图分类号: TN253; TN929.11 文献标识码: A

Reflection Peak Wavelengths for Sampled Fiber Bragg Gratings Without Chirp

Zou Xihua Pan Wei Luo Bin Wang Mengyao Li Haitao Zhang Weili

(*Institute of Optical Communication and Optical Devices, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031*)

Abstract: Analytic expression for the reflection peak wavelengths (RPWs) of sampled fiber Bragg grating (SFBG) without chirp is derived and confirmed. Firstly, the refractive-index modulation depth, corresponding to center wavelength, of seeding grating and Fourier series of sampled fiber Bragg grating's refractive-index modulation are obtained. Then the refractive-index modulation depth and local grating periods of sampled fiber Bragg grating are derived. Aided with them, the expression for reflection peak wavelengths of sampled fiber Bragg grating is achieved. Since the duty cycle and the sampling period are involved, the expression guarantees the accuracy of calculated reflection peak wavelengths. In the simulations, with different duty cycle or sampling period, there are agreements between the calculated reflection peak wavelengths (or channel spacing) and numerical reflection spectra. Moreover, this expression is not only available for uniform sampled fiber Bragg grating, but also for AC-apodized and AC-DC-apodized sampled fiber Bragg grating.

Key words: fiber optics; sampled fiber Bragg grating; reflection peak wavelengths; apodization

1 引 言

目前, 取样光纤布拉格光栅(SFBG)因具有梳状反射谱(或透射谱)而被广泛应用于多信道滤波器^[1~9]、色散补偿器^[10~14]、光码分多址^[15]等。国内外先后报道了取样光纤布拉格光栅的多种分析方法

和制作方案。幅度取样是最直接的形式^[2,3], 相位取样技术及多相移技术^[5,6,10]能以高光纤利用率和低折射率调制深度实现多信道滤波; 此外, 啁啾型取样光纤布拉格光栅的研制也取得了长足的进步^[7~9,12,13]。

* 国家自然科学基金(10174057, 90201011)、教育部科学技术研究重点项目(105148)、宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室开放基金(KF2006)资助课题。

作者简介: 邹喜华(1981—), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, 主要从事光纤光栅、光器件与光通信方面的研究。

E-mail: zouxihua@126.com

导师简介: 潘 炜(1959—), 男, 湖南岳阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体激光器、光器件与光通信的研究。

E-mail: wpan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-08-22; 收到修改稿日期: 2006-10-26

- 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
- 3 X. H. Zou, W. Pan, B. Luo *et al.*. Accurate analytical expression for reflection-peak wavelengths of sampled Bragg grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(3): 529~531
- 4 Cao Hui, Sun Junqiang, Zhang Xingliang *et al.*. A novel design methodology for superstructure fiber Bragg grating comb-filter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9): 3077~3082 (in Chinese)
曹辉, 孙军强, 张新亮等. 一种新颖的超结构光纤 Bragg 光栅梳状滤波器的设计[J]. *物理学报*, 2004, **53**(9): 3077~3082
- 5 Xu Wang, Chongxiu Yu, Zhihui Yu *et al.*. Sampled phase-shift fiber Bragg gratings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 190~191
- 6 Y. Nasu, S. Yamashita. Densification of sampled fiber Bragg gratings using multiple phase shift (MPS) technique [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1808~1817
- 7 C. Wang, J. Azaña, L. R. Chen. Efficient technique for increasing the channel density in multiwavelength sampled fiber Bragg grating filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(8): 1867~1869
- 8 J. Azaña, C. Wang, L. R. Chen. Spectral self-imaging phenomena in sampled Bragg gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(9): 1829~1841
- 9 X. H. Zou, W. Pan, B. Luo *et al.*. Periodically chirped sampled fiber Bragg gratings for multichannel comb filters [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(12): 1371~1373
- 10 H. Li, Y. Sheng, Y. Li *et al.*. Phased-only sampled fiber Bragg gratings for high-channel-count chromatic dispersion compensation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 2074~2083
- 11 F. Ouellette, P. A. Krug, T. Stephens *et al.*. Broadband and WDM dispersion compensation using chirped sampled fiber Bragg gratings[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(11): 899~901
- 12 X.-F. Chen, Y. Luo, C.-C. Fan *et al.*. Analytical expression of sampled Bragg gratings with chirp in the sampling period and its application in dispersion management design in a WDM system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(8): 1013~1015
- 13 Y. T. Dai, X. F. Chen, J. Sun *et al.*. Wideband multichannel dispersion compensation based on a strongly chirped sampled Bragg grating and phase shifts[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 311~313
- 14 Liu Yumin, Yu Zhongyuan, Yang Hongbo *et al.*. Application of dispersion and dispersion slope compensation based on optimization of binary phase sampled fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1701~1705 (in Chinese)
刘玉敏, 俞重远, 杨红波等. 优化二元相位取样光纤布拉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
- 15 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 221~224 (in Chinese)
燕萌, 姚敏玉, 张洪明等. 基于等效相移光栅的光码分多址编/解码实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 221~224
- 16 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 17 L. Poladian. Graphical and WKB analysis of nonuniform Bragg gratings[J]. *Phys. Rev. E*, 1993, **48**(6): 4758~4767
- 18 Lu Changgui, Xu Xinhua, Cui Yiping. A new fabricating method for apodised fiber Bragg gratings without self-induced chirp and its mechanism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1049~1052 (in Chinese)
吕昌贵, 徐新华, 崔一平. 无自致啾啾布拉格光纤光栅的制作方法及其原理[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1049~1052
- 19 J. J. Pan, Y. Shi. Steep skirt fiber Bragg grating fabrication using a new apodised phase mask [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(22): 1895~1896

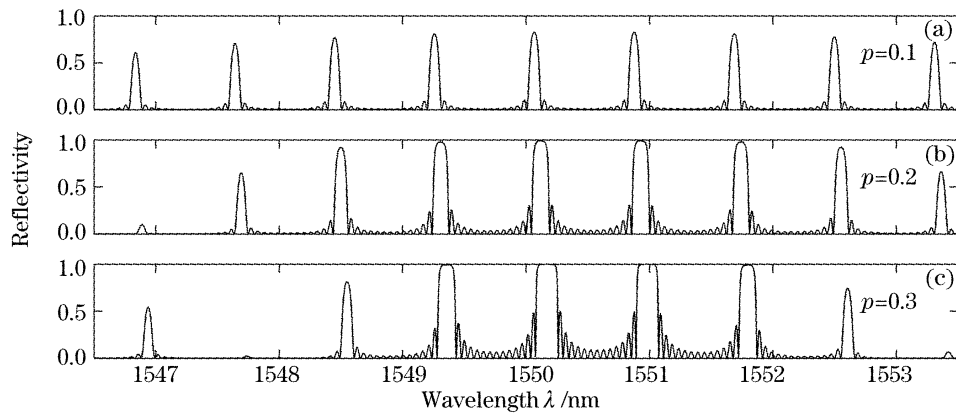


图 2 不同占空比下均匀取样光纤布拉格光栅的反射谱

Fig. 2 Reflection spectra of uniform sampled fiber Bragg grating with different duty cycle

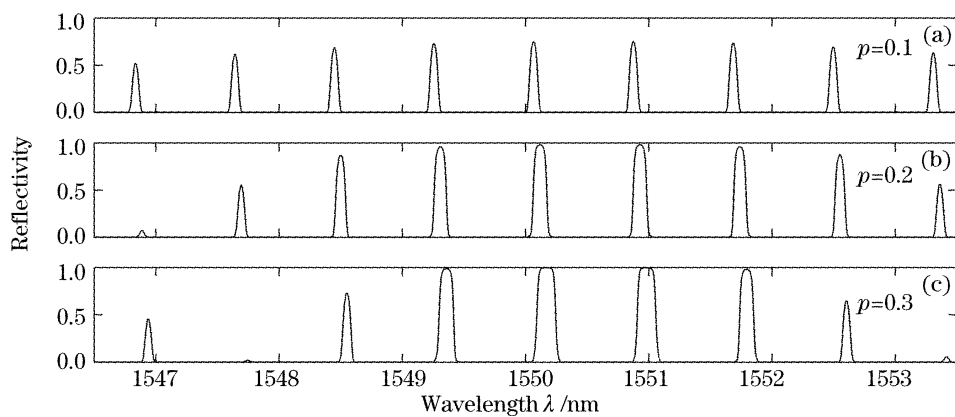


图 3 不同占空比下高斯交流切趾取样光纤布拉格光栅的反射谱

Fig. 3 Reflection spectra of Gaussian AC-apodized sampled fiber Bragg grating with different duty cycle

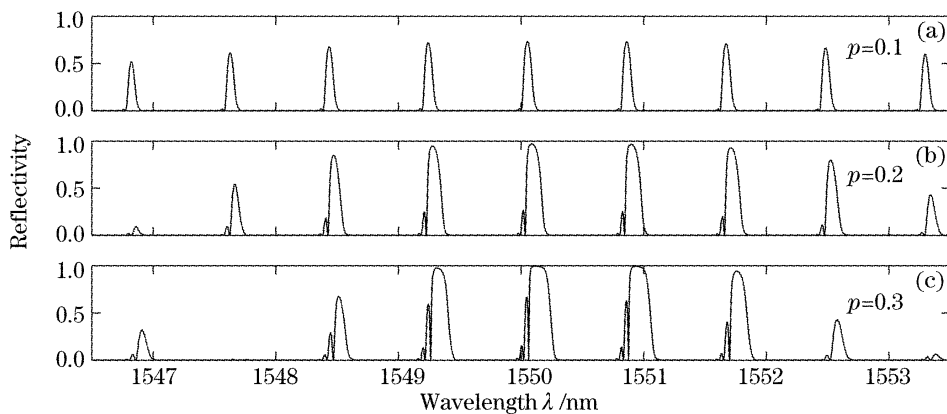


图 4 不同占空比下高斯交直流切趾取样光纤布拉格光栅的反射谱

Fig. 4 Reflection spectra of Gaussian AC-DC-apodized sampled fiber Bragg grating with different duty cycle

进一步分析表 2 中的数据和图 2~图 4 中的反射峰,发现各阶反射峰值波长随占空比增加而增大,直观地体现了占空比在(8)式中的加权作用。由于占空比不大于 1, ΔN 也就不大于 Δn ,因而取样光纤布拉格光栅的反射峰向长波长方向移动的趋势小于布拉格光栅。这正是(2)式不能直接用于取样光纤布拉格光栅的原因之一,反向印证了占空比在计算反射峰值波长中的重要作用。

3.2 取样周期对反射峰值波长的影响

占空比保持恒定($p=0.1$),取样周期分别取

1 mm [$b=1916\Lambda(0)$, $a=192\Lambda(0)$], 2 mm [$b=3832\Lambda(0)$, $a=383\Lambda(0)$], 3 mm [$b=5748\Lambda(0)$, $a=575\Lambda(0)$]。类似地,可以用数值反射谱来检验计算结果。由于取样周期决定信道间隔,即信道间隔随取样周期增大而减小。所以,下面从信道间隔的角度来考察取样周期在(9)式中的作用。

根据取样光纤布拉格光栅的信道间隔计算公式^[2],三种取样周期下的信道间隔分别为:0.809 nm, 0.404 nm 和 0.270 nm。那么,(9)式导出的信道间隔理应与此组值相差无几。针对三种取样光纤布拉

格光栅,图 5 以统一的形式描述了(9)式对应的信道间隔随取样周期改变而变化的情况。显然,图中的信道间隔与取样光纤布拉格光栅信道间隔计算公式得到的值一致,体现了取样周期对反射峰值波长的作用。

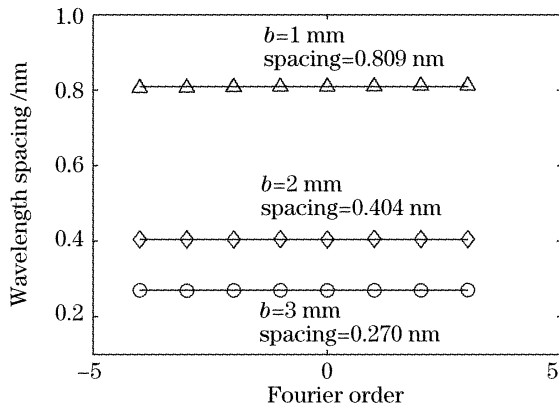


图 5 不同取样周期下三种取样光纤布拉格光栅基本一致的信道间隔分布

Fig. 5 Wavelength spacing of three sampled fiber Bragg gratings with different sampling period

至此,通过数值仿真在三种取样光纤布拉格光栅中分析了占空比和取样周期对反射峰值波长的影响,即(9)式。在整个过程中,采用了较小的折射率调制深度以吻合推导过程中的弱光栅条件。同时,还结合了这样一种思路^[8]:理论推导是在弱光栅限制下进行的,但其结论也可以适度用于分析强光栅(通过数值仿真或实验验证结论成立与否),这也便于开展后续工作。

4 相位匹配条件

上文从两个方面验证了反射峰值波长表达式。需要指出的是:无论是均匀取样光纤布拉格光栅,还是切趾取样光纤布拉格光栅,都满足相同的相位匹配条件:

$$\frac{\theta}{2} \approx \frac{2n_{\text{eff}}(b-a)}{\lambda(0)}\pi, \quad (10)$$

由(10)式不难发现:相位匹配条件下, θ 是整数倍 2π ;否则,定义一个额外相位因子 θ' ($-\pi \leq \theta' \leq \pi$), θ 为整数倍 2π 与 θ' 之和。将 θ' 视为波长 $\lambda(0)$ 处的常相移因子,根据文献^[6]附录 A 中的(11)式,偏移的反射峰值波长 $\lambda'(0)$ 为

$$\frac{1}{\lambda'(0)} = \frac{1}{\lambda(0)} + \frac{\theta'}{4n_{\text{eff}}\pi b}. \quad (11)$$

若固定取样长度 $a = 192\Lambda(0)$,不断对取样周期作微小的调整: $b = 1916\Lambda(0), 1915.8\Lambda(0), 1915.5\Lambda(0), 1915.2\Lambda(0), 1915\Lambda(0)$;多次计算表明

这些微调几乎不影响(9)式的结果。在图 6 中,重点关注零级反射峰值波长。无论是均匀取样光纤布拉格光栅,还是切趾取样光纤布拉格光栅,反射峰值波长的数值仿真值与表达式计算值在 $1915\Lambda(0)$ 和处保持一致,此时 $\theta' = 0$ 满足相位匹配条件;而在 $1915.5\Lambda(0)$ 处,两者之间相差约 0.4 nm ,此时 $\theta' = \pi$ 。可见,若相位匹配条件满足,(9)式可直接用于计算反射峰值波长;否则需要引入一个波长偏移量来修正结果。

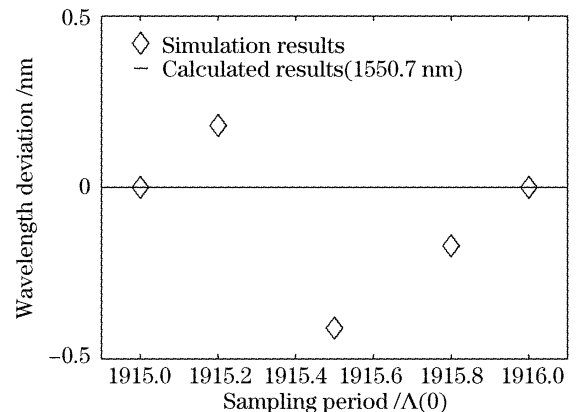


图 6 不同相位条件下的零级反射峰值波长分布

Fig. 6 The zeroth order reflection peak wavelength under different phase conditions

5 结 论

在弱光栅条件下推导出了计算取样光纤布拉格光栅(非啁啾型)反射峰值波长的表达式。该表达式之所以能适用于取样光纤布拉格光栅,关键在于考虑了占空比、取样周期等结构参量。针对均匀取样光纤布拉格光栅和交流、交直流切趾取样光纤布拉格光栅,在不同的占空比或取样周期下,由表达式计算得到的反射峰值波长、信道间隔与数值反射谱一致。同时,应满足相位匹配条件以避免反射峰偏移,从而直接获得取样光纤布拉格光栅的反射峰值波长。

致谢 作者衷心感谢清华大学电子工程系陈向飞副教授[现为南京大学微结构国家实验室(筹)教授]的热心帮助。

参 考 文 献

- 1 Cai Haiwen, Huang Rui, Qu Ronghui *et al.*. All-fiber interleaved filter using Mach-Zehnder based sampled fiber gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(3): 243~246 (in Chinese)
蔡海文, 黄锐, 瞿荣辉等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 243~246
- 2 Jia Baohua, Sheng Qiuqin, Feng Danqin *et al.*. Study on the theory of super-structured fiber Bragg grating[J]. *Chin. J.*

但这些对取样光纤布拉格光栅的性能研究多集中在信道数目、滤波通带或阻带的平坦性、多信道色散补偿上。需指出的是:能否准确定位取样光纤布拉格光栅各反射峰亦是十分重要的内容,因为这将直接影响密集型多信道通信系统的性能或光栅传感的精度。据了解,现有的布拉格光栅(BG)中心波长计算公式^[16]不能直接推广到取样光纤布拉格光栅中。因此,本文首先根据均匀、切趾布拉格光栅的反射谱导出中心波长对应的折射率调制深度;再将取样光纤布拉格光栅(以布拉格光栅为种子光栅)的折射率调制函数展成傅里叶级数,得到取样光纤布拉格光栅的折射率调制深度和各阶光栅周期,进而推导出计算各阶反射峰值波长的表达式。相比较而言,表达式中考虑了占空比、取样周期等结构参量的作用,而布拉格光栅的中心波长计算公式只能视为它的一种特例(布拉格光栅中占空比为1)。

2 反射峰值波长表达式的推导

取样光纤布拉格光栅是一类特殊结构的光栅,其种子光栅为布拉格光栅。因而,计算取样光纤布拉格光栅的各阶反射峰值波长分两步进行:1)从布拉格光栅入手,分析布拉格光栅中心波长与折射率调制函数的关系;2)结合取样光纤布拉格光栅的结构特点,以布拉格光栅中心波长的计算公式为特例,导出取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的表达式。本文仅考虑非啁啾型取样光纤布拉格光栅(以下布拉格光栅和取样光纤布拉格光栅所指为非啁啾型),啁啾型取样光纤布拉格光栅的相关工作将另文报道。

2.1 布拉格光栅的中心波长

以 Δn 为折射率调制深度, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, $\Lambda(0)$ 为布拉格周期,则布拉格光栅的折射率调制函数 $\Delta n(z)$ 可表示为

$$\Delta n(z) = \Delta n \times \left[\text{DC}(z) + \text{AC}(z) \cos \frac{2\pi z}{\Lambda(0)} \right], \quad (1)$$

其中 $\text{DC}(z)$ 和 $\text{AC}(z)$ 分别表示直流和交流切趾函数。按照它们的数学形式可将布拉格光栅划化为分为三种类型,见表1。交直流切趾能抑制反射峰长波长侧的旁瓣,但在反射峰短波长侧还存在振荡的旁瓣^[17,18];而交流切趾能同时抑制反射峰两侧的旁瓣,使得反射谱仍具有较好的对称性^[19]。

表1 切趾布拉格光栅的分类

Table 1 Different types of apodized Bragg grating

| | Uniform | AC apodized | AC-DC apodized |
|-------|---------|---------------------|---------------------|
| DC(z) | 1 | 1 | Normalized function |
| AC(z) | 1 | Normalized function | Normalized function |

在折射率调制深度趋于0的弱光栅条件下^[16](以下的推导都是在弱光栅条件下进行的),均匀布拉格光栅反射谱的中心波长为

$$\lambda_0 = 2\Lambda(0)(n_{\text{eff}} + \Delta n), \quad (2)$$

而对于切趾布拉格光栅,则依据WKB方法和有效介质理论^[17,18]来推导 λ_0 。此时波长偏移量 ξ 和失谐量 δ 的对应关系如下:

$$\xi = \frac{\delta}{\pi \Delta n} \lambda, \quad (3)$$

其中 $\delta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda - \pi/\Lambda(0)$, λ 为真空中波长。当采用交流切趾时, $-3 < \xi < -1$ 对应高反射区,从而 $\xi = -2$ 处对应 λ_0 。当交直流切趾时, $-3 < \xi < -1$ 对应高反射区, $-1 < \xi < 0$ 为振荡旁瓣区。此时, $\xi = -1.5$ 处对应反射谱包络的中心;由于振荡旁瓣会导致滤波性能劣化,所以从应用的角度来分析, λ_0 仍位于 $\xi = -2$ 处。因此,均匀、切趾布拉格光栅的中心波长都可以用(2)式来描述。以常见的高斯函数 $G(z) = \exp[-4\ln^2(z/\Delta)^2]$ (Δ 为高斯分布的半峰全宽)为例,三种布拉格光栅的反射峰中心波长(箭头所指)可在图1中加以对比。

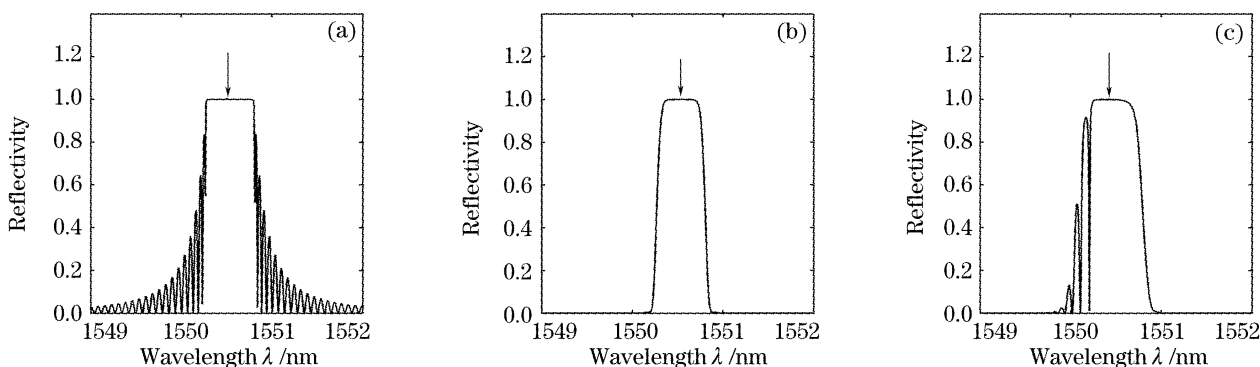


图1 (a)均匀布拉格光栅,(b)高斯交流切趾布拉格光栅,(c)高斯交直流切趾布拉格光栅的反射谱

Fig. 1 Reflection spectra of (a) uniform Bragg grating, (b) Gaussian AC-apodized Bragg grating, (c) Gaussian AC-DC-apodized Bragg grating

2.2 取样光纤布拉格光栅的反射峰值波长

布拉格光栅在取样函数的作用下被分隔成多段取样周期,就构成了取样光纤布拉格光栅。取样周期分为光栅区(即取样长度)和非光栅区两段。设取样函数为 $f(z)$,取样长度为 a ,取样周期为 b ,则非光栅区为 $b-a$,占空比为 $p=a/b$ 。基于布拉格光栅的 $\Delta n(z)$,将取样光纤布拉格光栅的折射率调制函数 $\Delta N(z)$ 表示为:

$$\Delta N(z) = \Delta n(z) \sum_k f(z - kb), \quad (4)$$

$$f(z) = \begin{cases} 1, & -a/2 \leq z \leq a/2 \\ 0, & z > 1/2 \text{ or } z < -a/2 \end{cases} \quad (5)$$

显然,取样光纤布拉格光栅区别于布拉格光栅在于其增加了占空比和取样周期等结构参量,可以预测它们对反射峰的分布有着重要影响。然而(2)式中并没有体现取样光纤布拉格光栅的占空比、取样周期等因素。下面我们来推导取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的表达式。由(4)式的内在周期性,不难将它展开成傅里叶级数形式:

$$\begin{aligned} \Delta N(z) = & \left[\frac{a}{b} + \frac{2a}{b} \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc} \frac{ka}{b} \cos \frac{2k\pi z}{b} \right] \times \Delta n \left[\text{DC}(z) + \text{AC}(z) \cos \frac{2\pi z}{\Lambda(0)} \right] = \\ & p\Delta n \text{DC}(z) + p\Delta n \text{AC}(z) \cos \frac{2\pi z}{\Lambda(0)} + 2p\Delta n \text{DC}(z) \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}(kp) \cos \frac{2k\pi z}{b} + \\ & p\Delta n \text{AC}(z) \sum_{k=1}^{\infty} \text{sinc}(kp) \left[\cos \frac{2\pi z}{\Lambda(+k)} + \cos \frac{2\pi z}{\Lambda(-k)} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Lambda(\pm k) = b\Lambda(0) / [b \mp k\Lambda(0)], \quad (7)$$

其中 $\text{sinc } x = \sin(\pi x) / \pi x$, $\Lambda(\pm k)$ 分别表示 $\pm k$ 阶光栅周期。(6)式的一个显著特点是以占空比 p 为系数对 Δn 进行了加权。在计算反射峰值波长时可认为,取样光纤布拉格光栅的折射率调制深度 ΔN 就是在布拉格光栅的 Δn 上加权一个占空比:

$$\Delta N = p\Delta n, \quad (8)$$

此时,将取样光纤布拉格光栅的 ΔN 和 $\Lambda(\pm k)$ 直接类比于布拉格光栅的 Δn 和 $\Lambda(0)$,即把(7)式、(8)式代入(2)式,推导出各反射峰值波长 $\lambda(\pm k)$ 的表达式:

$$\lambda(\pm k) = 2\Lambda(\pm k)(n_{\text{eff}} + \Delta N), \quad (9)$$

对比(2)式和(9)式,前者仅考虑了种子光栅的折射率调制深度、布拉格周期;而后者还纳入了取样光纤布拉格光栅的结构参量(占空比、取样周期可灵活地调整)用于计算反射峰值波长。这就是(9)式适用于计算取样光纤布拉格光栅的反射峰值波长的基本物理机理。

3 仿真与验证

下面将基于传输矩阵法^[16]得出数值反射谱,以讨论由(9)式得到的反射峰值波长是否准确。选用的仿真参量为: $n = 1.485$, $\Lambda_0 = 521.89 \text{ nm}$, $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$,均匀取样光纤布拉格光栅的取样周期数目为 15。切趾取样光纤布拉格光栅中 $\text{DC}(z)$ 和 $\text{AC}(z)$ 采用同一高斯函数,取样周期的数目为 25(以保持足够的反射率)。这里着重分析占空比和取样周期对取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的作用。

3.1 占空比对反射峰值波长的作用

保持取样周期恒定 [$b = 1916\Lambda(0)$, 约 1 mm], 占空比分别取 $p = 0.1$ [$a = 192\Lambda(0)$, 约 0.1 mm], 0.2 [$a = 383\Lambda(0)$, 约 0.2 mm] 及 0.3 [$a = 575\Lambda(0)$, 约 0.3 mm]。根据(9)式,三种取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的计算结果见表 2。相应的数值反射谱如图 2~图 4 所示,计算结果都能很好地与数值反射谱吻合。

表 2 不同占空比下计算得到的取样光纤布拉格光栅的反射峰值波长

Table 2 Calculated reflection peak wavelengths of sampled fiber Bragg gratings with different duty cycle

| Duty cycle | Reflection peak wavelength / nm | | | | | | | | |
|------------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | +4 |
| 0.1 | 1546.836 | 1547.642 | 1548.449 | 1549.257 | 1550.066 | 1550.875 | 1551.685 | 1552.496 | 1553.308 |
| 0.2 | 1546.888 | 1547.694 | 1548.501 | 1549.309 | 1550.118 | 1550.927 | 1551.737 | 1552.549 | 1553.360 |
| 0.3 | 1546.940 | 1547.747 | 1548.553 | 1549.361 | 1550.170 | 1550.979 | 1551.790 | 1552.601 | 1553.413 |