

文章编号: 0253-2239(2007)04-0587-6

非对称切趾对啾啾光纤光栅特性优化的分析

王 琳 延凤平 李一凡 龚桃荣 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 基于对啾啾光纤布拉格光栅反射谱和时延曲线的分析, 引入非对称切趾技术。综合时延曲线纹波和反射谱纹波平滑两方面考虑, 将对称切趾技术的最佳切趾比例、左移和右移两种非对称切趾技术以及采用不同切趾函数对光纤光栅特性参量的优化效果进行了分析和比较。结果表明, 与对称切趾相比, 左移非对称切趾可避免对称切趾中为增大反射谱带宽而减小切趾比例使时延纹波增大的缺点, 在保持反射谱纹波基本不变的前提下将时延曲线纹波降低了 43.5% (与实验结果 39.9% 相吻合)。此外, 与仅用汉明函数切趾相比, 光纤光栅左端采用超高斯函数、右端采用汉明函数的非对称切趾方式使反射谱平坦部分纹波减小了 89.3%, 对应的时延曲线拟合误差减小了 16.7%, 获得了更好的优化效果。

关键词: 光纤光学; 啾啾布拉格光纤光栅; 非对称切趾; 时延纹波; 反射谱纹波

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Optimization of Chirped Fiber Bragg Gratings by Asymmetrically Apodization Method

Wang Lin Yan Fengping Li Yifan Gong Taorong Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Asymmetrical apodization method is introduced to optimize chirped fiber Bragg gratings based on the analysis of its reflectivity spectrum and time delay response. The optimization effects for grating parameters, by the optimum apodization ratio of the symmetrical apodization, the left-shifted and right-shifted asymmetrical apodization methods and different apodization functions, are analyzed and compared. The results show that, compared with symmetrical apodization method, the asymmetrical apodization method can avoid the disadvantage of the former method that widens the reflectivity bandwidth by reduction of apodization ratio, which meanwhile increases the time delay ripple. The left-shifted apodization method can reduced the time delay ripple by 43.5%, adjacent with the experimental result of 39.9%, while the reflectivity spectrum is nearly unchanged. Furthermore, better performance can be obtained with super-Gaussian function on left-side and Hamming function on right-side of chirped fiber Bragg gratings than Hamming function on both sides. The plain part of the reflectivity ripple is reduced 89.3%, as well as fitting error of group delay ripple 16.7%.

Key words: fiber optics; chirped fiber Bragg gratings; asymmetrically apodised method; time delay ripple; reflectivity ripple

1 引 言

随着光纤通信在信息领域的快速发展, 光纤的损耗和色散已成为影响光纤传输能力的两个重要因素。光纤光栅因其具有体积小、价格低、与光纤的兼容性好、参量易调整以及插入损耗小等优点被广泛应用在分布式传感、光放大、光通信等领域。特别是线性啾啾光纤光栅因其近似线性的时延特性而广泛

应用于光纤的色散补偿^[1,2]。但是由于光栅两端折射率调制突变形成的法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 效应, 光纤光栅反射谱存在很多旁瓣且时延曲线存在较大的波动, 严重影响了色散补偿效果。这种波动可通过使光栅的折射率调制深度 Δn_1 沿光栅轴向按一定切趾函数由两端到中间逐渐变大的技术加以平滑, 即切趾技术^[3~6]。但是, 迄今为止报道

作者简介: 王 琳(1982-), 女, 甘肃白银人, 博士研究生, 主要从事光纤制作、光纤传感、全光网络及关键器件方面的研究。E-mail: linda_wl@163.com

导师简介: 延凤平(1966-), 男, 山西人, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信、光纤传感及光纤器件方面的研究。E-mail: fpyan@center.njtu.edu.cn

收稿日期: 2006-06-01; 收到修改稿日期: 2006-11-06

的切趾技术通常选择一种切趾函数在啁啾光纤光栅两端(中间有一段未切趾)或全长度范围内进行切趾,这样要么限制了时延纹波的平滑能力,要么减小了反射谱带宽,不能满足特殊应用场合的需求。

本文基于对光纤光栅反射谱和时延曲线的分析,引入非对称切趾技术对光纤光栅的特性参量进行优化设计。综合时延曲线纹波和反射谱纹波平滑两方面考虑,将对称切趾技术的最佳切趾比例、左移和右移两种非对称切趾技术以及采用不同切趾函数对光纤光栅特性参量的优化效果进行了分析和比较,得出了一些有意义的结论,这对啁啾光纤光栅的制作及其在特殊场合中的应用具有一定的指导作用和实用价值。

2 对称切趾技术

考虑芯区和包层折射率分别为 n_1 和 n_2 的光纤。根据耦合模理论,在不考虑前向基模到包层模之间耦合的情况下,基模耦合模可写为^[9]

$$\begin{aligned} R'(z) - j\delta(z)R(z) &= -jk(z)S(z), \\ S'(z) + j\delta(z)S(z) &= jk(z)R(z), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $R(z)$ 和 $S(z)$ 分别为正反向基模的振幅, $\delta(z)$ 和 $k(z)$ 分别为相位失配和耦合系数。线性啁啾光纤光栅的周期是沿着光栅长度 L 方向线性变化的,如果忽略光致折射率调制在光纤横向上的变化,则光

栅芯区的折射率调制为

$$\begin{aligned} \Delta n(z) &= \Delta n_0(z) + \Delta n_1(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0}z + 2\int_0^z \varphi(\xi) d\xi\right), \\ \varphi(\xi) &= \frac{2\pi C}{\Lambda_0} \frac{\xi}{L}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 Λ_0 为光栅中心($z=0$)处的周期, C 为一无量纲啁啾参量,对于啁啾光栅,耦合方程一般无解析解,只能用数值方法进行分析。

所谓切趾是指使光栅的折射率调制深度 Δn_1 沿光栅轴向按一定切趾函数由两端到中间逐渐变大。汉明函数和高斯函数是常用的两种切趾函数,其表达式分别为

$$\text{汉明: } f_H(z) = \frac{1 + H\cos(2\pi z/L)}{1 + H}, \quad (3)$$

$$\text{高斯: } f_G(z) = \exp[-G(z/L)^{2m}], \quad (4)$$

其中 L 为光栅长度, H 和 G 为常量,可根据需要进行改变。

在数学上,若切趾函数为 $f(z)$,则切趾后, $\Delta n_1 = \Delta n_0 f(z)$ 。图 1 为切趾前后线性啁啾光栅反射谱和时延曲线的比较,其中 n_{eff} 和 $\Delta\Lambda$ 分别为光栅的有效折射率和周期改变量。由图可见,切趾调制后边模抑制比得到了明显的提高,且反射率保持很高。但由于切趾减小光栅的有效长度,使补偿带宽相应变窄^[10]。

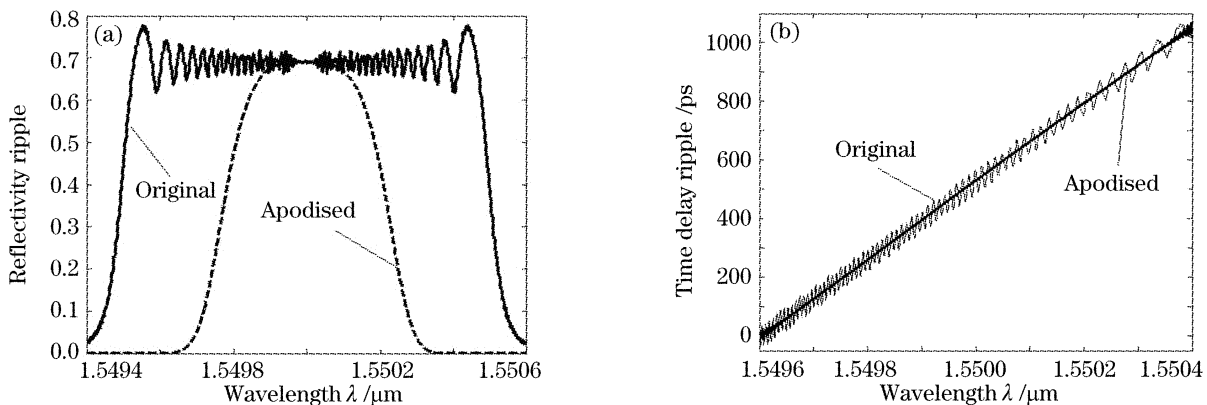


图 1 切趾前后线性啁啾光栅反射谱(a)和时延曲线(b)的比较

$$(\Delta n_0 = 10^{-4}, L = 140 \text{ mm}, n_{\text{eff}} = 1.446, \Delta\Lambda = 0.35 \text{ nm})$$

Fig. 1 Comparison between original and apodised fiber Bragg gratings on reflectivity spectrum (a) and time delay response (b). ($\Delta n_0 = 10^{-4}, L = 140 \text{ mm}, n_{\text{eff}} = 1.446, \Delta\Lambda = 0.35 \text{ nm}$)

为了解决在光纤光栅整个长度上实施切趾使反射谱带宽减小的问题,引入对称切趾技术,即在光栅两端利用汉明函数切趾,而在中间部分不切趾。所谓对称,是指反射谱两端的切趾长度相同。对称切趾函数曲线如图 2 所示。

引入切趾比例参量,即 $A = L_{\text{ap}}/L$,用以表征光

栅实际切趾长度 L_{ap} 与光栅总长度 L 的比值。图 3 所示的是针对 0.5 dB 带宽,切趾比例分别为 75%、60%、50% 时,对称切趾后反射谱平坦部分纹波和时延曲线拟合后的误差比较。由图可见,随着切趾比例的减小,反射谱平坦部分纹波越小,有效地增加了反射谱带宽,但时延曲线的线性度越差(拟合误差

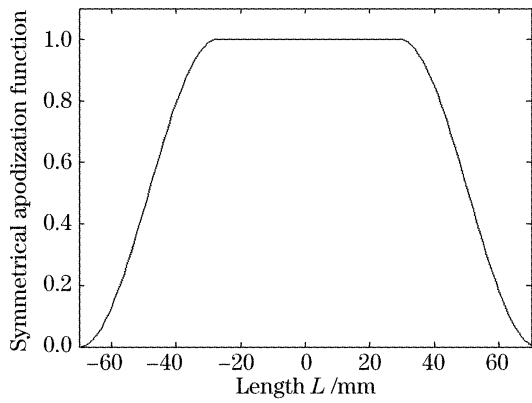


图 2 对称切趾函数曲线

Fig. 2 Symmetrical apodization function

越大)。兼顾这两个方面,选择切趾比例为 60% 左右的对称切趾较为理想(即所谓黄金分割 0.618),可在保持时延曲线线性度误差在 ± 1.5 ps 的前提下使反射谱平坦部分纹波下降到 0.05% 以内。

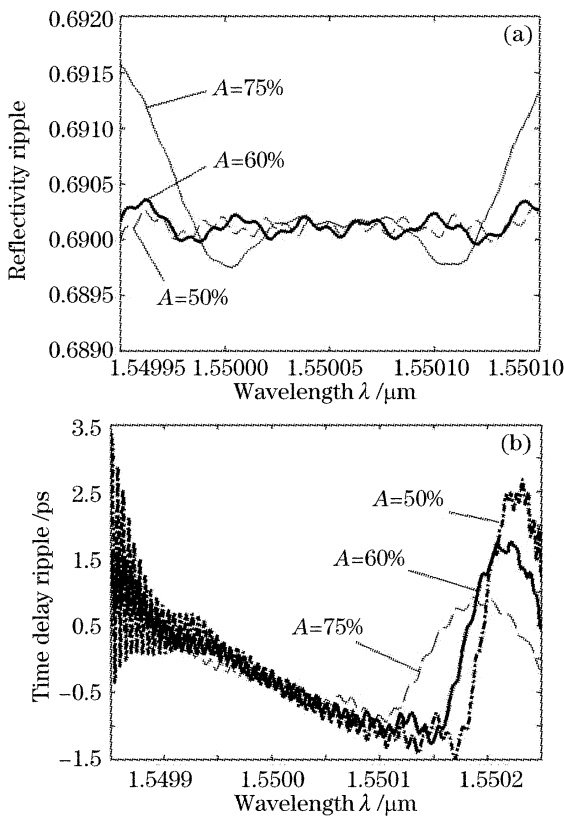


图 3 不同比例的对称切趾对光栅的优化效果。

(a) 反射谱平坦部分纹波, (b) 时延曲线拟合误差

Fig. 3 Optimization effects on gratings with different apodization ratios. (a) Reflectivity ripple, (b) time delay ripple

3 非对称切趾技术的仿真分析及实验结果

由上述分析可见,减小切趾比例可有效地增大反射谱带宽。但是,利用这种对称切趾来增大反射

谱带宽是以增大时延纹波为代价的。此外,在啁啾光栅长波长端,由于折射率调制周期越来越大,这种啁啾效应,反而在短波长端增强了切趾效果,使得长波长端的时延曲线纹波增大。因此,为了减小时延纹波,在保持切趾比例不变的情况下,采用在短波长端减小切趾长度,长波长端增大切趾长度的切趾方法,称之为左移非对称切趾(如图 4 所示)。这种切趾使两端的切趾效果相同,从而使光纤光栅同时具有更宽的反射谱带宽和更好的色散补偿效果(更小的时延纹波)。为了验证这种左移非对称切趾方法的优化效果,将其与传统的对称切趾和右移非对称切趾在短波长端增大切趾长度,长波长端减小切趾长度(如图 4 所示)进行比较,三种切趾方法的反射谱平坦部分纹波和时延曲线拟合后的误差比较如图 5 所示,其中固定切趾比例为 60%,带宽为 0.5 dB,中心波长 λ_0 为 1550.04 nm。

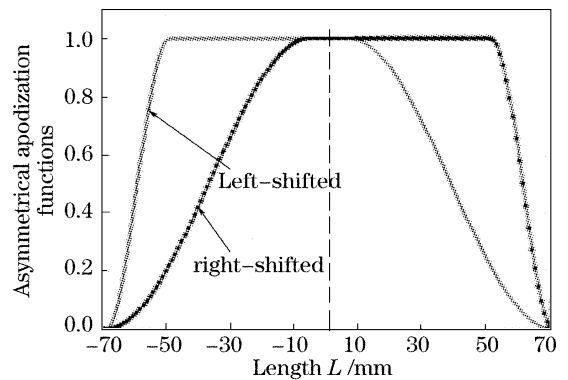


图 4 非对称切趾函数曲线

Fig. 4 Asymmetrical apodization functions

由图 5 可见,与对称切趾和右移非对称切趾相比,利用这种左移非对称切趾可在保持反射谱纹波基本不变的前提下将时延曲线纹波由 3.15 ps 减小到 1.78 ps,其纹波范围降低了 43.5%。根据以上结论和分析,在实验中制作出三块长度为 100 mm 的切趾掩模板,分别对应对称切趾、左移非对称切趾和右移非对称切趾,采用汉明切趾函数(参量 $H = 0.97$),切趾比例为 60%,中心波长 λ_0 为 1554.947 nm。具体参量由表 1 列出。光栅的反射谱和时延特性由 PerkinElmer 公司的 CD400 色散特性分析仪测出,其实验结果如图 6 所示。其中上部分图为光纤光栅切趾后的反射谱与时延曲线,下部分图为时延曲线纹波及利用三点滑动平滑后的平滑纹波,色散值、纹波和平滑纹波值均已给出。由图 6 可见,与对称切趾相比,右移非对称切趾使平滑纹波增大,而左移非对称切趾使平滑纹波由 2.2346 ps

减小为 1.3614 ps,降低了 39.9%。因此,利用这种左移非对称切趾,可以避免对称切趾中为增大反射谱带宽而减小切趾比例使时延纹波增大的缺点,同时获得较宽的反射谱带宽和较小的时延纹波,从而达到更好的色散补偿效果。对于超宽带长距离光纤系统和光栅级联系统,这种左移非对称切趾的优化效果将更加明显。

表 1 切趾掩模板参量

Table 1 Parameters of apodised mask
($L=100\text{ mm}, \lambda_0=1554.947\text{ nm}, A=60\%, H=0.97$)

Mask parameters	Length for	
	short-wave	long-wave
Symmetrically apodised mask /mm	30	30
Left-shifted apodised mask /mm	23	37
Right-shifted apodised mask /mm	37	23

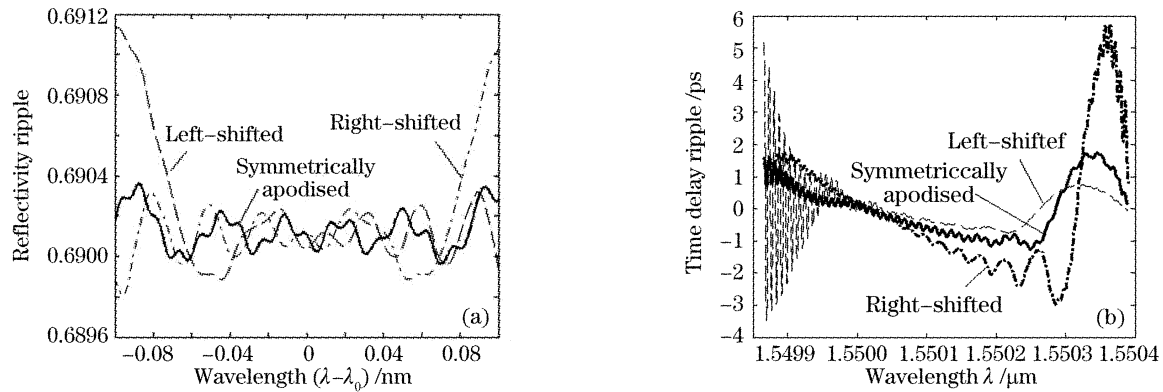
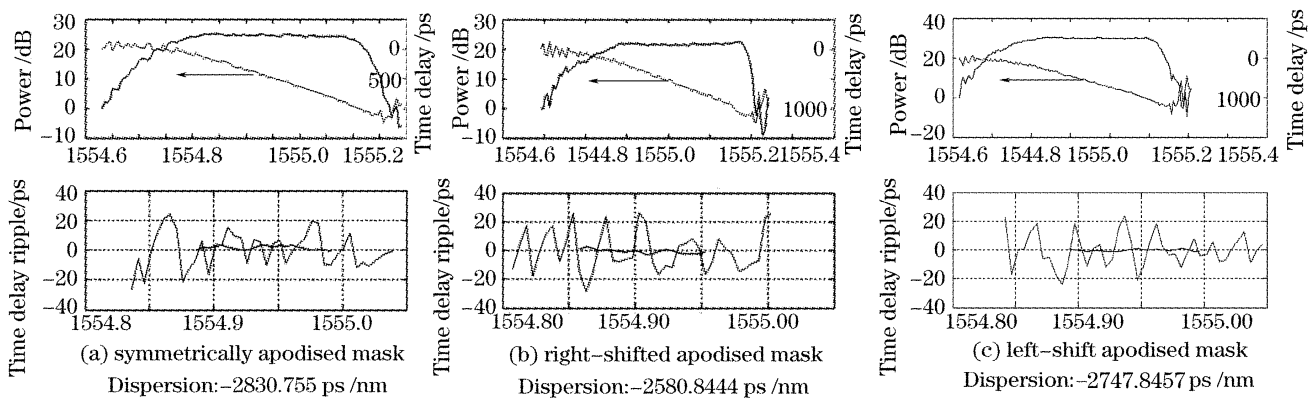


图 5 与对称切趾相比,左移、右移两种非对称切趾对光栅的优化效果(切趾比例为 60%), (a) 反射谱平坦部分纹波, (b) 时延曲线拟合误差

Fig. 5 Optimization effects of right-shifted and left-shifted asymmetrical apodization methods on the grating compared with symmetrical apodization method ($A=60\%$), (a) reflectivity ripple, (b) time delay ripple



Ripple:26.3578 ps, smmethed ripple:2.2346 ps, ripple:28.436 ps, smmethed ripple:2.9958 ps, ripple:238757 ps, smmethed ripple:1.3614 ps

图 6 不同切趾函数对光纤光栅色散特性的影响。(a) 对称切趾, (b) 右移非对称切趾, (c) 左移非对称切趾

Fig. 6 Effect of different apodization functions on dispersion of fiber gratings. (a) Symmetrically apodised mask, (b) right-shifted apodised mask, (c) left-shift apodised mask

4 不同切趾函数的非对称切趾对光纤光栅的优化效果

对啁啾光纤光栅两端实施不同的切趾函数,例如,在光栅左右两端分别利用超高斯切趾函数和汉明切趾函数,如图 7 所示。

表 2 图 8 相关数据比较

Table 2 Data comparison of Fig. 8

Apodization function	Reflectivity ripple		Time delay ripple /ps	
	Left side / 10^{-3}	Right side / 10^{-3}	Left side	Right side
Only Hamming	0.56	1.62	0.6	1.4
Left-Gaussian and right-Hamming	0.06	1.58	0.5	1.4
Left-Hamming and right-Gaussian	0.61	0.11	0.4	2.3

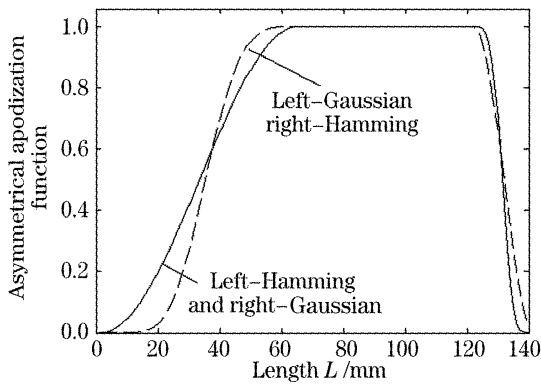


图 7 利用不同切趾函数的非对称切趾函数曲线
Fig. 7 Asymmetrically apodised methods using different apodised function

图 8 所示是在左移非对称切趾情况下,与仅利用汉明切趾相比,光栅左右两端分别利用超高斯切

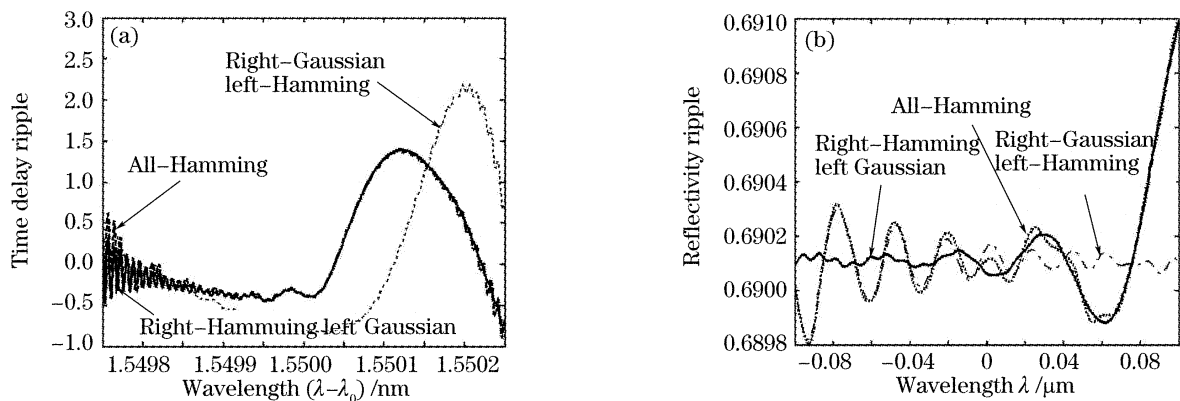


图 8 利用不同函数的左移非对称切趾对光栅的优化效果。(a)反射谱平坦部分纹波,(b)时延曲线拟合误差

Fig. 8 Optimization effect on the grating by left-shifted asymmetrically apodization method with different apodization functions. (a) Reflectivity ripple, (b) time delay ripple

5 结 论

为克服对称切趾中为增大反射谱带宽而减小切趾比例使时延纹波增大的缺点,引入左移和右移两种非对称切趾技术。仿真和实验结果表明,与对称切趾相比,利用左移非对称切趾可同时获得较宽的反射谱带宽和较小的时延纹波。此外,与仅用汉明函数的非对称切趾相比,左端超高斯函数、右端汉明函数切趾的非对称切趾可获得更好的优化效果。这对啾啾光纤光栅的制作及其在特殊场合中的应用(如超宽带长距离光纤通信系统和光栅级联系统)具有一定的指导作用和实用价值。后续研究将通过实验对不同切趾函数的非对称切趾对光纤光栅的优化效果进行深入分析和验证。

参 考 文 献

1 Pei Li, Ning Tigang, Li Tangjun *et al.*. Studies on the dispersion compensation of fiber Bragg grating in high speed optical communication system[J]. *Chin. Phys. Soc.*, 2005, **54**(4):

趾函数和汉明切趾函数切趾后的反射谱平坦部分纹波和时延曲线拟合后的误差比较,相关数据见表 2,中心波长 λ_0 为 1549.94 nm。由此可见,与仅用汉明函数的非对称切趾相比,左端汉明函数、右端超高斯函数切趾的非对称切趾的反射谱平坦部分纹波略有减小(由 0.162%减小到 1.11%,降低了 32.1%),但时延曲线纹波却明显增大(由 1.4 ps 增大到 2.3 ps)。与此相反,左端超高斯、右端汉明函数切趾的非对称切趾的反射谱平坦部分纹波明显减小(由 0.056%减小到 0.06%,降低了 89.3%),时延曲线纹波略有减小(由 0.6 ps 减小到 0.5 ps,降低了 16.7%)。由此可见,与仅利用汉明切趾相比,利用左端超高斯函数、右端汉明函数切趾的非对称切趾可获得更好的优化效果。

1630~1635 (in Chinese)

裴 丽,宁提纲,李唐军等. 高速光通信系统中光纤光栅色散补偿研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(4): 1630~1635

2 Tan Zhongwei, Zheng Kai, Liu Yan *et al.*. Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-hual DWDM system[J]. *Chin. Phys. Soc.*, 2005, **54**(11): 5218~5223 (in Chinese)

谭中伟,郑 凯,刘 艳等. 基于啾啾光纤光栅的色散补偿器在超长距离密集波分复用系统中的应用[J]. *物理学报*, 2005, **54**(11): 5218~5223

3 Jozef Ciosmak, Marian Marciniak. Impact of apodisation on fiber Bragg grating reflection and phase responses[J]. *ICTON*, 2001, (We. P. 19): 287~290

4 P. Fernández, J. C. Aguado, J. Blas *et al.*. Analysis and optimisation of the apodisation sharpness for linearly chirped dispersion compensating gratings[J]. *IEE Proc. -Optoelectron.*, 2004, **151**(2): 69~73

5 Wei Zhanxiong, Li Huiping, Qin Li *et al.*. Fabrication of apodized linearly chirped fiber grating and the grating's dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(Z1): 441~443 (in Chinese)
韦占雄,李惠萍,秦 莉等. 切趾线性 chirped 光纤光栅的制作及其色散特性[J]. *光子学报*, 2000, **29**(Z1): 441~443

6 J. Azana, R. Slavik, P Kockaert *et al.*. Generation of ultra-high repetition rate optical pulse bursts by means of fibre Bragg gratings operating in transmission[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(24): 1555~1556

- 7 Li Huiping, Wang Qingya, Qin Li *et al.*. Analysis for the character of fiber gratings[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(1): 26~29 (in Chinese)
李惠萍, 王庆亚, 秦莉等. 光纤光栅特性分析[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(1): 26~29
- 8 Ning Tigang, Jiang Zhongao, Pei Li *et al.*. Dispersion characteristics of cascaded chirped FBG; disturbed in each other delay[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(4): 45~46 (in Chinese)
宁提纲, 江中澳, 裴丽等. WDM系统中啁啾光纤光栅带外色散的影响[J]. 激光杂志, 2002, **23**(4): 45~46
- 9 Chen Genxiang, Jian Shuisheng. *Lightwave Technology* [M]. Beijing: China Railway Press, 2000. 249~251 (in Chinese)
陈根祥, 简水生. 光波技术基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. 249~251
- 10 Hu Haiying, Chen Heming. A study on the optimum apodization function of linear chirped fiber gratings used for dispersion compensation [J]. *J. Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2001, **21**(1): 23~27 (in Chinese)
胡海英, 陈鹤鸣. 用于色散补偿的线性啁啾光纤光栅的最佳切趾包络函数的研究[J]. 南京邮电学院学报(自然科学版), 2001, **21**(1): 23~27

• 新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近30年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16开,定价:25元。

联系人:郑京华

地址:北京理工大学出版社人文社科事业部

邮编:100081

手机:13810624594

办公电话:010-68945381

电子邮件:caizhengjinghua@126.com

