

文章编号: 0258-7025(2009)08-2076-07

# 基于相位误差补偿技术的超窄带光栅滤波器的制作

陈 鹏 王 荣 蒲 涛 卢 麟 方 涛 郑 吉 林

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 增加光栅长度是获得具有低插入损耗、高边带抑制度的超窄带光栅滤波器最佳途径,但是长光栅的制作方案会引入比较严重的相位误差,严重影响光栅滤波器的性能;取样光栅的设计制作方案具有滤波中心波长设计灵活、制作精度低和切趾技术实现容易的优点。针对利用取样光栅制作超窄带光栅滤波器的方案,分析了 3 种常见相位误差对 -1 级子光栅滤波性能的影响;利用重构等效啁啾技术(REC)成功补偿了光栅长度为 6.6 cm 的超窄带取样光栅滤波器 -1 级子光栅的相位误差,并得到了反射谱和透射谱对称性良好,3 dB 带宽为 26 pm,20 dB 带宽为 70 pm,插入损耗为 1.25 dB 和边带抑制度为 21.55 dB 的超窄带光栅滤波器。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 切趾取样光栅; 光栅滤波器; 相位误差

中图分类号 TN713 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2076

## Fabrication of Super-Narrow Bandwidth Grating Filter Based on Phase Error Correction

Chen Peng Wang Rong Pu Tao Lu Lin Fang Tao Zheng Jilin

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract** Increasing the grating length is the best way to realize super-narrow bandwidth filter with low insertion loss and high sidelobes suppression, but the phase error induced in the fabrication process of long grating deteriorates the performance of grating filter to a large extent. Sampled fiber Bragg grating (FBG) have the advantages of flexible wavelength design, low manufacture precision and easily realizable apodization. The scheme of super-narrow bandwidth filter based on sampled FBG is taken emphasis on, and the influence of three kinds phase error on the filter performance of -1<sup>st</sup> ghost grating is analyzed, which provides reliable guide for future long grating fabrication. The phase error of a fabricated sampled FBG with length of 6.6 cm is compensated using reconstruction equivalent chirp (REC), and a super-narrow filter with symmetric reflection and transmission spectrum, insertion loss of 1.25 dB, sidelobes suppression of 21.55 dB, 3 dB bandwidth of 26 pm and 20 dB bandwidth of 70 pm is obtained.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; apodized sample grating; fiber grating filter; phase error

### 1 引 言

光纤光栅(FBG)的出现使得大容量高速率光通信的进一步发展成为可能。由于光纤光栅具有全光纤结构、低插入损耗、偏振不敏感和潜在的低成本等诸多优点,使得其在光纤通信和传感系统中均有广阔的应用前景<sup>[1~3]</sup>;又因其设计的灵活性使其在窄带波长选择滤波方面的应用尤为突出,特别是在密集波分复用(DWDM)、光纤毫米波副载波通信技术

(ROF)中都得到了非常好的应用<sup>[4~7]</sup>。20 世纪 90 年代,英国的 M. Catherine 等<sup>[3]</sup>就开始对光纤光栅窄带滤波器设计制作进行研究,并提出了利用增加均匀光栅长度和插入相移两种方法来制作超窄带光纤光栅滤波器。后者已广泛应用于制作各种高频调制器和光纤激光器中<sup>[5,8]</sup>;增加均匀光栅长度的方法能得到窄带光栅滤波器,虽然均匀光栅存在着对旁瓣抑制能力较差的缺点,但是可以通过切趾技术

收稿日期: 2008-10-22; 收到修改稿日期: 2008-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(60502003)资助课题。

作者简介: 陈 鹏(1983-),男,硕士研究生。主要从事光信息处理技术等方面的研究。E-mail: bigroc.chen@163.com

导师简介: 王 荣(1962-),男,教授,博士生导师。主要从事集成光电子学和光网络等方面的研究。

E-mail: wr-njice@163.com

来提高边带抑制度。只是光栅长度的增加带来了新的制作方面的问题——相位误差。文献[9]对制作过程中的随机相位误差进行了理论分析,相位误差补偿技术也应运而生,其中最新报道的是由清华大学提出的重构等效啁啾技术(REC),并已成功补偿了基于取样光栅的宽带色散补偿器的相位误差<sup>[10,11]</sup>。取样光栅的制作方式使得滤波波长设计灵活可控,不受模板周期限制,将光栅制作精度降到了亚微米量级<sup>[12~14]</sup>。

本文将相位误差补偿技术引入取样切趾光栅实现超窄带滤波器的设计与制作过程,对基于全息曝光技术相位掩模板的实验平台存在的3种相位误差建立了理论模型,并仿真分析了它们对切趾取样光栅滤波器插入损耗、边带抑制度、3 dB和20 dB带宽4个性能指标的影响。利用重构等效啁啾技术将窄带光栅滤波器的相位误差从补偿前的 $\pm 1.5\pi$ 降到了补偿后的 $\pm 0.1\pi$ 以内,得到了反射谱、透射谱对称性良好的超窄带光栅滤波器。

## 2 基于取样切趾光栅的窄带滤波器制作方案

光纤光栅的制作采用相位掩模板法,实验原理如图1所示。光纤紧贴地放置在相位掩模板后侧,氩离子倍频激光器发出244 nm的紫外光经反射镜组照射在相位掩模板上,相位掩模板把入射的紫外光部分地衍射到 $\pm 1$ 级衍射条纹上,相邻模板周期衍射级次中的 $\pm 1$ 级产生一个干涉场,照射到放置在相位掩模板后面的光纤上,所以该方案的光栅周期实际上就等于所使用的掩模板周期的一半,同时光栅的相位误差与相位掩模板自身的误差密切相关。通过电脑控制平移台的移动来对相位掩模板不同的位置进行照射,各个取样周期内曝光时间的长短不同便形成了光栅强度的切趾分布。

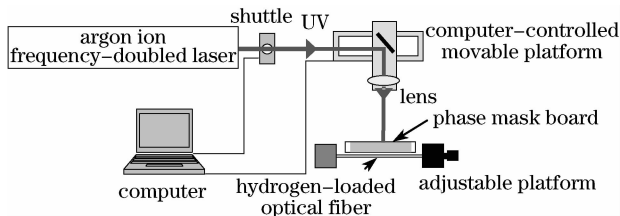


图1 光纤光栅制作原理图

Fig. 1 Experiment setup for fabricating FBG

相位掩模板一般有全息和电子束曝光两种制作方法,后者制作的相位掩模板长度很短,所以实际使用中不可避免地存在交叠和接缝,称为接缝误差。

本实验室使用的相位掩模板制作方法是全息法,其相位是连续变化的,不存在接缝误差。所以,该实验方案的相位误差主要是由两个方面的原因造成的:一是由相位掩模板引入的,包括相位掩模板制作过程中引入的随机误差、啁啾误差和放置相位掩模板时由于器具压力导致的具有一定变化规律的相位误差;二是在光栅实验制作过程中周围环境的随机扰动、光栅几何形状的不规则和介质的不均匀等给光栅带来的随机相位误差。

在不考虑直流调制的情况下,直流失谐量公式可表示为

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

可见,相位误差 $\varphi(z)$ 主要是通过改变直流失谐量来影响FBG性质的。光栅滤波器主要的性能指标有:插入损耗、边带抑制度、3 dB和20 dB带宽(如图2所示)<sup>[15]</sup>。由于相位误差主要是通过改变直流失谐量来影响光栅性能的,而直流失谐量的一个重要决定因素就是Bragg反射波长,所以相位误差会对滤波器最大反射波长附近的波长范围有一定的影响,可能会出现谐振现象<sup>[4]</sup>,导致中心波长左右两边旁瓣的不一致性。因此用边带抑制度、左右旁瓣的差值(图2中所示)、3 dB和20 dB带宽这4个参量来定性地衡量光栅滤波器的性能恶化情况。光栅制作方案引入相位误差的主要途径有相位掩模板自身的误差和周围环境的随机扰动,所以可以用3种基本的相位误差模型来进行描述:随机相位误差、光栅周期线性啁啾导致的相位误差和光栅周期非线性啁啾导致的相位误差,分别对应着周围环境的随机扰动、相位掩模板的线性啁啾和相位掩模板的非线性啁啾。

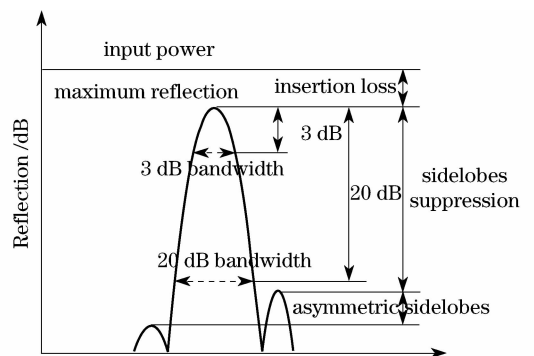


图2 窄带FBG滤波器性能参数示意图

Fig. 2 Performance parameters diagram of narrowband grating filter

### 3 随机相位误差对滤波性能的影响

随机相位误差是任何实验制作平台都有的一类误差,随机相位误差可表示为

$$\varphi(z) = \pm \theta_{\max} \cdot \text{rand}(0, 1), \quad (2)$$

其中  $\theta_{\max}$  表示最大的随机相位误差,  $\text{rand}(0, 1)$  表示 0 到 1 之间的随机数。

随机相位误差主要考虑的参量为最大的相位误差  $\theta_{\max}$ , 随着它的增大, 对光栅滤波器的影响如表 1 所示。

表 1 随机相位误差对 -1 级子光栅滤波性能的影响

Table 1 Influence of random phase error on the filter performance

	$\theta_{\max}$ /pm	3 dB bandwidth /pm	20 dB bandwidth /pm	Asymmetric sidelobes /dB	Sidelobes suppression /dB
Error free	0	25	65	0	25
Random phase error	5	25	65	1.4028	21.46
	10	25	75	4.25	19.86
	20	25	76	5.963	18.083

由表 1 可以得到两点基本结论: 1) 随机相位误差的变化范围越大, 对光栅滤波器性能的影响越严重; 2) 随机相位误差对 3 dB 和 20 dB 带宽的影响不大, 主要是会产生一定的共振现象。左右旁瓣的高

表 2 光栅周期线性啁啾引起的相位误差对滤波性能的影响

Table 2 Influence of phase error caused by linear chirp of grating period on the filter performance

	C /(pm/cm)	3 dB bandwidth /pm	20 dB bandwidth /pm	Asymmetric sidelobes /dB	Sidelobes suppression /dB
Error free	0	25	65	0	25
Phase error caused by linear chirp of grating period	1	26.5	68.1	0	24.55
	3	34.02	88.5	0	23.8
	5	43.8	115.3	0	23.78

可见, 光栅周期线性啁啾引起的相位误差主要是对滤波器的 3 dB 和 20 dB 影响非常大, 基本上没有出现任何共振现象。而对边带抑制度的影响不是特别地明显。该类相位误差是由于器件自身的缺陷所引起的, 所以只能通过补偿的方式来消除。

### 5 光栅周期非线性啁啾对滤波性能的影响

通常情况下, 相位掩模板采用的都是夹具固定的方式, 如图 3(a) 所示, 使得相位掩模板局部受力较大。由于它是精度非常高的器件, 模板周期为 1070 nm, 所以这种固定方式会对相位掩模板的周期产生一定的影响。具体的影响方式可利用相位掩

低、反射谱对称性和边带抑制度也受到了一定的影响。

引起该类误差的原因很难克服, 能做到的只是通过细化实验环节和稳定实验条件来尽可能地减小  $\theta_{\max}$  和随机相位误差的变化量。例如: 采用移动重复精度高的位移台、尽量减少人为的因素、高度稳定的实验制作平台、相对封闭的实验制作环境等。

### 4 光栅周期线性啁啾对滤波性能的影响

在相位掩模板制作过程中, 由于某些方面的原因使得它带有一定的线性啁啾量, 并被原封不动地写到了所刻制的光栅中, 于是光栅周期也带有一定的线性啁啾量, 因此该类相位误差是由于相位掩模板自身缺陷导致的, 无法被消除, 只能通过其他的技术来补偿它所带来的影响。其数学表达式为

$$\varphi(z) = \int_0^z -2\pi \frac{Cz}{\Lambda^2} dz = -\pi \frac{Cz^2}{\Lambda^2}. \quad (3)$$

它的影响等效于使用了一个啁啾量很小的相位掩模板, 所以该类误差主要会对光栅滤波器的带宽有一定的展宽作用, 具体的影响如表 2 所示。

模板周期抛物线型的变化趋势来模拟, 如果夹具固定的位置为光栅的正中心, 考虑到相位掩模板是由硬质材料制作的, 所以压力对掩模板的影响可以认为是使得掩模板局部变形, 相应的周期变化规律如图 3(b) 所示。

相应地, 光栅周期变化规律的数学描述为

$$\Lambda(z) = a(z - L/2)^2 + \Lambda_{\min}, \quad (4)$$

$$a = 4(\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min})/L^2,$$

其中  $L$  为光栅长度,  $\Lambda_{\max}$  和  $\Lambda_{\min}$  分别为最大、最小光栅周期,  $a$  为一个与夹具压力大小有关的系数, 它在数学表达式上与最大、最小光栅周期有关。同样利用相位误差与光栅周期啁啾的关系得到相位误差的数学表达式为

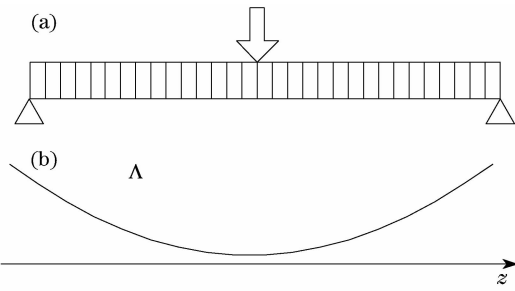


图3 夹具固定相位掩模板时导致模板周期的变化(a)夹具固定相位掩模板示意图;(b)相位模板周期变化规律

Fig. 3 Phase mask period changes with fixed clamp (a) Diagram of the fixed place of clamp; (b) profile of phase mask period

表3 光栅周期非线性啁啾引起的相位误差对滤波性能的影响

Table 3 Influence of phase error caused by nonlinear chirp of grating period on the filter performance

	$\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}$ /pm	3 dB bandwidth /pm	20 dB bandwidth /pm	Asymmetric sidelobes /dB	Sidelobes suppression /dB
Error free	0	25	65	0	25
Phase error caused by non-linear chirp of grating period	5	25	70.1	8.2547	19.61
	10	26.5	79.3	18.1435	9.45
	20	28.02	100.8	29.5312	2.01
	30	31.06	125.1	31.8902	0.18

器的性能产生一定的影响,其中光栅周期非线性啁啾影响最大,这是安装实验平台时需重点考虑的一个因素,所以应该尽可能地减少光栅周期非线性啁啾的产生。一般情况下,光栅制作平台或多或少地都会存在这3种类型的相位误差,具体的相位误差可能是这3种类型误差共同作用的结果。

## 6 相位误差的补偿及超窄带光栅滤波器的实现

在光栅实验制作平台的搭建过程中,相位误差的引入是不可避免的,例如随机相位误差、掩模板自身所带有的缺陷。所以需要利用相位误差补偿技术来消除它的影响,得到高性能的窄带光栅滤波器。目标超窄带光栅滤波器是一根长为6.6 cm,中心反射波长为1550.676 nm,3 dB带宽为25 pm,20 dB带宽为65 pm,边带抑制度为25 dB的光栅滤波器,相应的FBG参数有:光栅周期 $\Lambda$ 为534.4 nm,光斑半峰全宽80  $\mu\text{m}$ ,占空比为50%的方波采样, $\Delta n_{\text{eff}}$ 最大值为 $1 \times 10^{-4}$ ,布拉格反射波长 $\lambda_D = 1548.676$  nm。相应的采样光栅波长间隔为 $\Delta\lambda = 2$  nm,利用取样光栅理论得到取样周期 $P = \lambda_D^2 / (2n_{\text{eff}} \Delta\lambda) = 414 \mu\text{m}$ 。理想的目标反

$$\varphi(z) = \int_0^z 2\pi \left( \frac{1}{\Lambda(z)} - \frac{1}{\Lambda_{\text{average}}} \right) dz = -\frac{a}{3} z^3 + \frac{La}{2} z^2 - \frac{aL^2}{8} z, \quad (5)$$

其中 $\Lambda_{\text{average}} = (\Lambda_{\max} + \Lambda_{\min}) / 2$ 。该类相位模板啁啾引入的相位误差比较复杂,是光栅滤波器性能恶化的主要原因,具体的影响如表3所示。

光栅周期非线性啁啾引起的相位误差使得光栅滤波器各个性能指标都有一定的恶化。引起该类相位误差的主要因素是夹具固定时给相位掩模板施加了一定的压力,所以应该尽可能地减少夹具数目,夹具的夹力也应尽可能地小些。

通过分析发现:3种相位误差都会对光栅滤波

射谱和经过加窗处理后的物理可实现(Physical Realizable, PR)的反射谱(反射率幅度的平方)如图4(a)所示,利用分离剥层算法(DLP)<sup>[16,17]</sup>重构得到相应的光栅结构如图4(b)所示。

利用光栅切趾分布形状实验制作了一根取样光栅(SBG),利用光矢量分析仪(OVA)进行测量得到其反射谱和群时延谱线,其中-1级的反射谱和群时延谱线如图5所示。由于制作过程中不可控制地引入了一定的相位误差,所以反射谱的长波长方向出现了明显的谐振现象,导致反射谱有很大的展宽。利用上述的测试数据进行DLP重构得到如图6所示的光栅参数,重构得到的光栅切趾分布与设计时的形状基本一致。由于原光栅设计的相位为0,所以重构得到的相位信息就是相位误差信息,该相位误差变化趋势说明了相应的光栅周期啁啾的变化规律。利用多项式拟合的方式对相位误差曲线进行拟合,如图7(a)所示。根据相位 $\varphi(z)$ 与光栅周期 $\Lambda$ 啁啾量之间的关系

$$\Delta\Lambda(z) = -\frac{\Lambda^2}{2\pi} \frac{d\varphi(z)}{dz}, \quad (6)$$

得到相应光栅周期的啁啾量如图7(b)所示,大概在 $\pm 25$  pm以内。

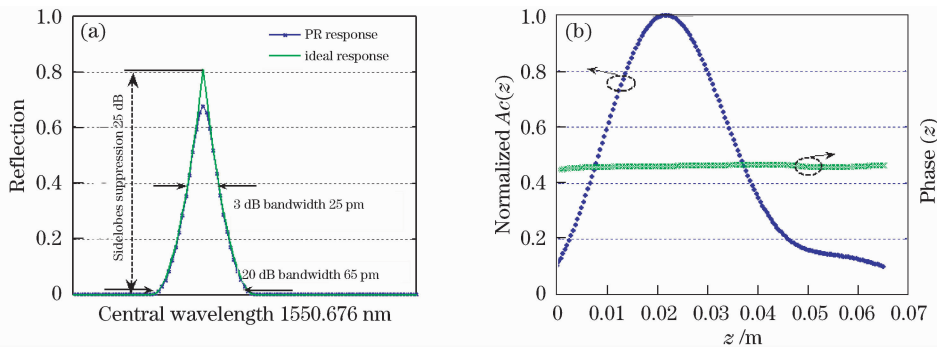


图4 窄带光栅滤波器频域响应和光栅重构结果。(a)理想与物理可实现的频域响应;(b)重构得到的光栅幅度  $A_c(z)$ 与相位分布

Fig. 4 Ideal and physical realizable response (a), the reconstructed grating  $A_c(z)$  and phase (b) of triangle shaping filter

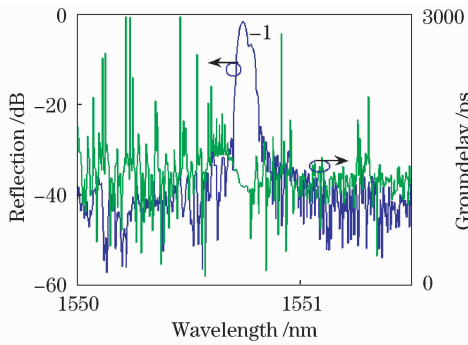


图5 光栅-1级反射谱及群时延谱线

Fig. 5 Reflection and groupdelay of measured  $-1^{\text{st}}$  ghost grating

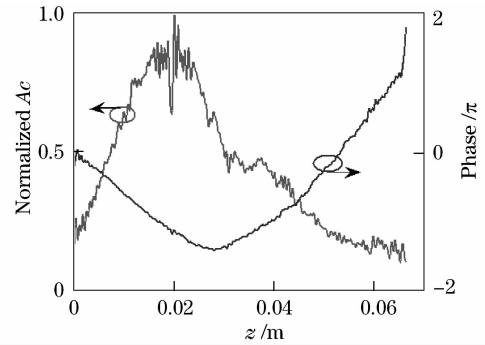


图6 重构得到的光栅幅度  $A_c$ 和相位信息

Fig. 6 Profiles of reconstructed grating  $A_c$  and phase

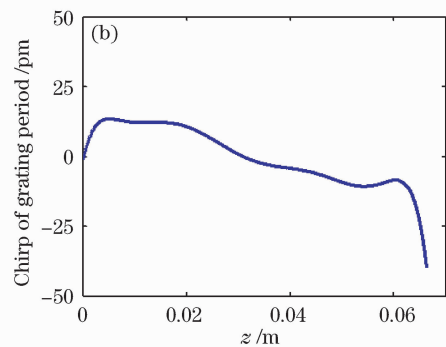
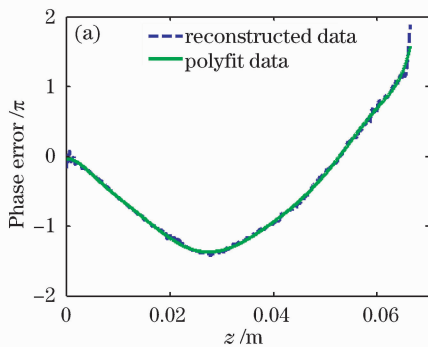


图7 (a)相位误差重构数据与拟合数据;(b)相应光栅周期的啁啾量

Fig. 7 Reconstructed and polynomial fit curve of phase error (a), and the chirp of grating period (b)

利用拟合得到的相位误差  $\varphi_{\text{error}}(z)$ 和等效啁啾原理的公式便可以得到新光栅的采样位置调整函数  $f(z)$

$$f(z) = \varphi_{\text{error}}(z) \frac{P}{2m\pi}, \quad (7)$$

其中采用补偿-1级的设计方案(也就是  $m = -1$ ),制作得到的新光栅反射谱测量结果如图8所示。新光栅的-1级反射谱与未补偿前(图5)相比,呈现出很好的对称性,谱宽也得到了很大的改善,与目标设计反射谱比较接近,相位误差从未补偿前的  $\pm 1.5\pi$

降到了补偿后的  $\pm 0.1\pi$ 以内(图8(d)与图7(a)对比可知),得到的滤波性能参数插入损耗为1.25 dB,边带抑制制度为21.55 dB,3 dB和20 dB带宽分别为26 pm和70 pm。

## 7 结 论

对光栅实验制作平台中常见的随机相位误差、光栅周期线性啁啾和光栅周期非线性啁啾引起的相位误差进行了理论建模。针对相位误差对光栅滤波

器性能的影响,提出了 4 个具体的性能恶化参数:边带抑制度、左右两边旁瓣的差值、3 dB 和 20 dB 带宽;并通过仿真分析的方法得到了三种相位误差对取样光栅-1 级反射谱滤波性能的影响。利用重构

等效啁啾技术,成功补偿了实验制作的超窄带光栅滤波器的相位误差,得到了插入损耗为 1.25 dB,边带抑制度为 21.55 dB,3 dB 和 20 dB 带宽分别为 26 pm 和 70 pm 的超窄带光纤光栅滤波器。

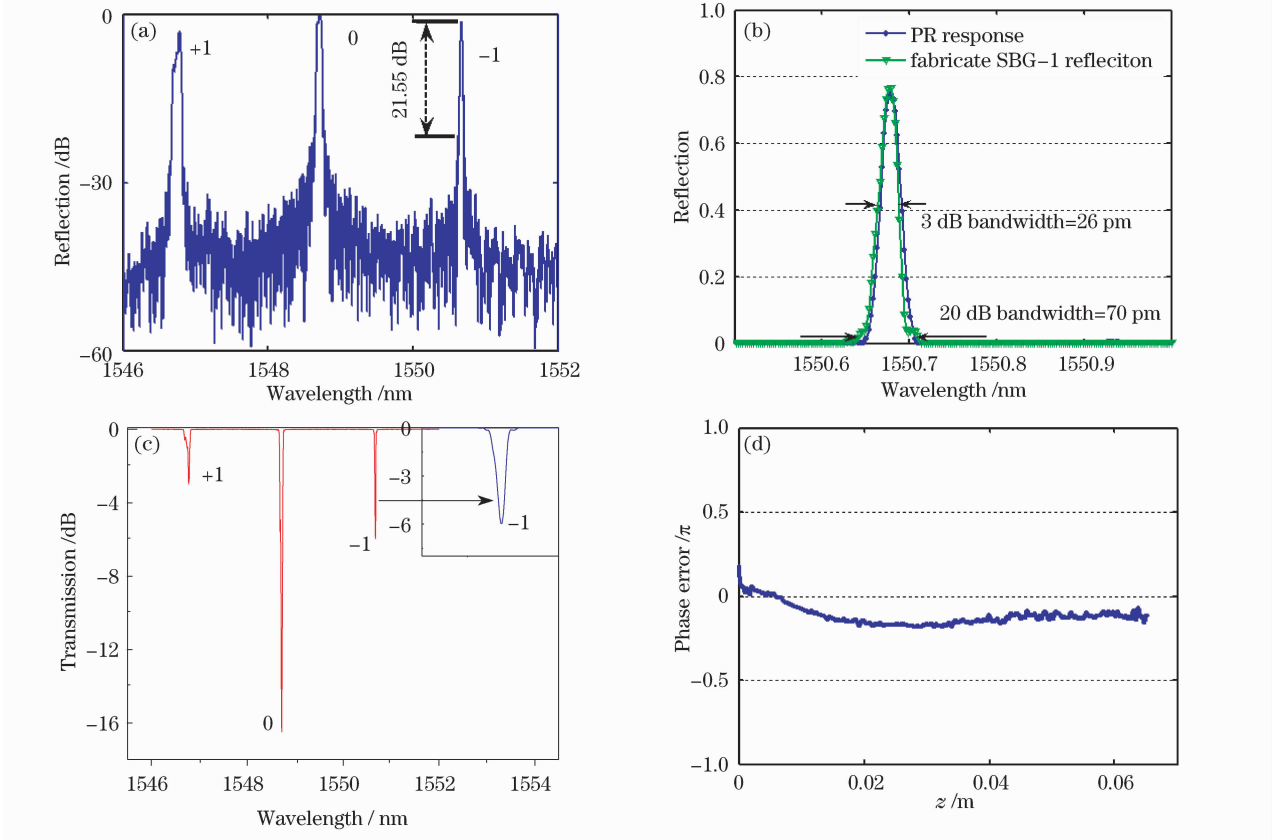


图 8 新光栅的反射谱、透射谱。(a)三级反射谱;(b)-1 级反射谱与目标反射谱幅度平方的对比图;(c)三级透射谱;(d)新光栅的相位误差曲线

Fig. 8 Reflection (a), amplitude square comparison of measured and targeted reflection of -1<sup>st</sup> ghost grating (b), transmission (c), phase error (d) of compensated SBG

参 考 文 献

- 1 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 2 C. R. Giles. Lightwave applications of fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1391~1404
- 3 M. Catherine, Douglas Reid, D. J. Robbins. Narrowband fiber grating filters [J]. *Journal Sel. Commun.*, 1990, **8**(6):1146~1150
- 4 Alejandro Carballar, Miguel A. Muriel, Jos'e Azana. Fiber grating filter for WDM system; an improved design[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6):694~696
- 5 Sebastien Blais, Jian Yao. Optical single sideband modulation using an ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21):2230~2232
- 6 Joao L., Rebola, Adolfo V. T. Cartaxo. Performance optimization of gaussian apodized fiber Bragg grating filters in WDM systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8):1537~1544
- 7 M. Lima, A. Teixeira, J. Rocha. Optimization of apodized fiber grating filters for WDM systems [C]. *IEEE LEOS Annu. Meeting*, 1999, **2**:876~877

- 8 Xiangfei Chen, Jianping Yao, Zhichao Deng. Ultranarrow dual transmission band fiber Bragg grating filter and its application in a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(16):2068~2070
- 9 Ricardo Feced, Michalis N Zervas. Effects of random phase and amplitude errors in optical fiber Bragg gratings[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **18**(1):90~101
- 10 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Yu Yao *et al.*. Correction of the repeatable errors in the fabrication of sampled Bragg gratings [C]. *OFC2005*, 2005, paper OME20
- 11 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Li Xia *et al.*. Sampled Bragg grating with desired response in one channel by use of a reconstruction algorithm and equivalent chirp[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12):1333~1335
- 12 Zou Xihua, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Reflection peak wavelengths for sampled fiber Bragg gratings without chirp[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):971~976
- 邹喜华, 潘 炜, 罗 斌等. 非啁啾取样光纤布拉格光栅反射峰值波长的分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):971~976
- 13 Huang Liqun, Huang Weiping, Chen Genxiang *et al.*

- Optimization of weakly aperiodic phase-only sampled chirp gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1099~1102  
黄力群, 黄卫平, 陈根祥等. 弱非周期性相位取样啁啾光栅的优化方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9):1099~1102
- 14 Zhu Yingxun, Wang Rong, Pu Tao. Fiber Bragg grating based time phase en/decoder with multiple wavelength channels[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1522~1526  
朱英勋, 王 荣, 蒲 涛. 具有多个波长通道的光纤光栅相位编/解码器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1522~1526
- 15 T. Komukai, K. Tamura, M. Nakazawa. An efficient 0.04-nm apodized fiber Bragg grating and its application to narrow-band spectral filtering[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7):934~936
- 16 Ricardo Feced, Michalis N. Zervas, Miguel A. Muriel. An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber Bragg gratings[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(8):1105~1115
- 17 Gao Zhipeng, Yu Zhenhong, Xing Lihua. A novel method for reconstructing strongly reflecting fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):991~996  
高志鹏, 余震虹, 邢丽华. 一种重构强反射光纤布拉格光栅的新方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):991~996