

文章编号: 0253-2239(2009)08-2071-06

基于切趾取样光栅单信道直流平衡技术的光栅滤波器

陈 鹏 王 荣 蒲 涛 卢 麟 方 涛 朱 英 勋 郑 吉 林

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 提出了一种利用取样光栅周期的啁啾平衡切趾取样光栅单信道内直流分量的方法, 基于该方法的切趾光栅滤波器具有波长设计灵活不受限于模板周期和只需一次曝光过程、亚微米量级制作精度的优点。利用均匀光栅最大反射率测量模型和零点带宽测量模型得到了实验所使用的载氢光纤紫外光致折射率变化量与曝光时间的关系。在此基础上, 利用提出的新方法设计并实验制作了中心反射波长为 1549.84 nm, 3 dB 带宽分别为 75 pm 和 55 pm 的两根升余弦切趾光栅滤波器, 实验制作与理论设计仿真结果非常接近, 成功消除了取样光栅-1 级子光栅谱短波长方向处的法布里-珀罗共振现象, 得到的光栅滤波器反射谱和透射谱具有良好的对称性, 反射谱边带抑制制度在 20 dB 以上。

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; 直流

中图分类号 TN25 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2071

Fiber Grating Filter Based on One Channel DC-Free Design of Apodized Sampling Grating Filter

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

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

Abstract The chirp of sampling period is applied for balancing one channel's DC component of apodized sampling grating. This method has the advantages that wavelength design is flexible and unrestricted to phase mask period, and just a single exposure and a sub-micrometer precision are needed. Maximum reflectivity model and reflectivity notch bandwidth model of uniform grating are used to obtain the relation between UV photo-induced index increment of single mode hydrogen loading fiber and its dose. Based on this method, cosine apodized grating filters with central wavelength of 1549.84 nm, 3 dB bandwidth of 75 pm and 55 pm respectively, are fabricated. The results indicate that experimental and simulation data are coincided well, F-P resonance in high frequency side and the unbalance of -1st reflection and transmittance spectrum are totally eliminated, and the suppression of reflection sidelobes is beyond 20 dB.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; apodized sampling grating; fiber grating filter; DC

1 引 言

光纤光栅本质上是一个高频的滤波器件, 同时具有全光纤结构、低插入损耗、偏振不敏感、易于集成和潜在的低成本等诸多优点, 使其在现代光纤通信系统中占有非常重要的地位^[1~3]。又因其设计的灵活性使其在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)和光纤毫米波副载波通信技术(ROF)中都得到了非常好的应用^[4~9]。早期的光纤光栅滤波器采用均匀光栅的制

作方式, 其边带抑制制度不能满足应用的要求^[3]; 切趾技术的引入大大提高了光纤光栅滤波器的边带抑制制度, 但却带来了由于直流分量不平衡而引起的布拉格反射波长附近短波长方向的法布里-珀罗共振效应, 使反射谱的对称性受到了一定程度的影响。文献^[7]提出分别对光栅的正反面同时曝光的方法平衡直流分量, 其设备复杂度很高; 文献^[4]中通过改变光栅周期的方法来等效补偿直流分量的影响, 但是需要纳米级的制作精度。采用取样光栅可以制

收稿日期: 2008-08-05; 收到修改稿日期: 2009-03-02

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

作多信道滤波,且信道间隔和波长灵活可控,制作取样光栅时对各段子光栅强度进行切趾,具有不受模板周期限制、制作精度要求低的优点^[10,11]。文献[12,13]中针对切趾取样光栅提出了利用多次曝光平衡直流分量的制作方法,其制作过程比较复杂。本文结合取样光栅理论利用一块均匀相位掩模板和亚微米量级的移动平台设计制作满足不同波长通道需求的切趾光纤光栅滤波器,该设计制作方法无需多次曝光,流程简单便于量产,同时具有波长设计灵活和制作精度要求低的优点。

2 取样光栅理论及单信道直流平衡设计

2.1 取样光栅理论

光纤光栅的折射率调制可以表示为带直流分量 $n_{DC}(z)$ 的、受 $n_{AC}(z)$ 调制的正弦载波函数^[1],数学表达式为

$$\Delta n(z) = n_{DC}(z) + \left\{ n_{AC}(z) \exp \left[j \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi_g(z) \right] \right] + \text{c. c.} \right\}, \quad (1)$$

其中 Λ 为光栅周期, $\varphi_g(z)$ 为光栅周期的啁啾引起的相位调制,条纹清晰度 ν 定义为 $n_{AC}(z)/n_{DC}(z)$ 。

取样光栅可视为一系列具有不同光栅周期和相同切趾分布形状子光栅的叠加,每个子光栅都对应着一级反射峰。周期性的取样函数 $S(z)$ 按傅里叶级数形式展开如下:

$$S(z) = s(z) \sum_m \delta(z - mP) = \sum_{-\infty}^{\infty} S_m \exp \left(\frac{i2m\pi z}{P} \right), \quad (2)$$

经典的耦合模理论是处理各种微扰下光波导行为通用的方法,其传统的耦合模方程可描述为

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_+}{\partial z} &= -iR_- \sum_{m=-\infty}^{\infty} |S_m| \kappa_0(z) \times \\ &\quad \exp \left\{ i \left[-\frac{2m\pi z}{P} + \theta_m + 2\beta z - \varphi_g(z) \right] \right\}, \\ \frac{\partial R_-}{\partial z} &= iR_+ \sum_{m=-\infty}^{\infty} |S_m| \kappa_0(z) \times \\ &\quad \exp \left\{ i \left[-\frac{2m\pi z}{P} + \theta_m + 2\beta z - \varphi_g(z) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 R_+ , R_- 分别表示为前向、后向传播模式的幅度, $\beta = \pi(2n_0/\lambda - 1/\Lambda)$ 表示失谐常数, n_0 为光纤光栅有效折射率,各级子光栅具有正的耦合系数 $\kappa_0(z) = \pi n_{AC}(z)/2n_0\Lambda$, $|S_m|$, θ_m 分别表示第 m 级

子光栅的幅度和相位。各级子光栅的反射谱形状与 $|S_m| \kappa_0(z)$ 相关,所以取样光栅各级反射谱形状一致,只是有幅度上的区别(由各级傅里叶系数 $|S_m|$ 决定)。

由(3)式可知,各级子光栅对应的中心波长满足如下关系式:

$$2\beta - \frac{2m\pi}{P} = 0 \Rightarrow \lambda_m = \frac{2n_0\Lambda}{1 + m\Lambda/P} \approx 2n_0\Lambda(1 - m\Lambda/P), \quad (4)$$

于是得到波长间隔与采样周期 P 之间的关系为

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_D}{2n_0P}, \quad (5)$$

式中 $\lambda_D = 2n_0\Lambda$ 。

2.2 切趾取样光栅平衡第 m 级子光栅直流分量的设计方案与仿真

切趾取样光栅直流分量不平衡的影响表现在每一级中心反射波长附近的短波长方向都会有法布里-珀罗共振效应,折射率调制深度越大,共振越严重,光纤光栅滤波器反射谱的对称性就越差,整体平衡直流分量比较复杂一般分为两步:1)整段光栅的去直流,该步与光栅切趾函数有关,较多的做法是在去掉掩模板后做一个反切趾的曝光过程;2)单个采样周期内的去直流,与每个周期内的采样函数相关,对制作要求很高^[12,13]。对于很多光纤光栅滤波器的应用场合只需要利用取样光栅某个信道的滤波特性,所以提出一种设计方法实现一次曝光平衡取样光栅某一级子光栅的直流分量。结合直流切趾分布函数 $n_{DC}(z)$ 和(4)式,第 m 级子光栅的最大反射波长可以表示为

$$\lambda_m = 2[n_0 + n_{DC}(z)]\Lambda \left(1 - m \frac{\Lambda}{P} \right), \quad (6)$$

在 λ_m 保持恒定的前提下,取样周期 P 与直流切趾函数 $n_{DC}(z)$ 有如下关系式:

$$P(z) = \frac{m\Lambda}{1 - \lambda_m / \{ 2[n_0 + n_{DC}(z)]\Lambda \}}, \quad (7)$$

所以该方法的实质是通过取样周期的啁啾来等效补偿直流调制对某一级子光栅(除零级以外)的影响。(7)式的结论是在假设任何一个取样周期内的每个位置都具有相同直流分量的前提下得到的,如果考虑到具体的取样方式需要对(7)式做一定的修正, $n_{DC}(z)$ 应该表示为取样周期内平均的直流调制量,例如:取样方式为占空比为 R 的方波采样时,(7)式修改为

$$P(z) = \frac{m\Lambda}{1 - \lambda_m / \{ 2[n_0 + Rn_{DC}(z)]\Lambda \}}, \quad (8)$$

以升余弦切趾函数为例,相应的光栅参数如下:光栅周期 $\Lambda = 535.07 \text{ nm}$, 波长间隔 $\Delta\lambda = 1.38 \text{ nm}$, 相应的取样周期 $P = 600 \text{ }\mu\text{m}$, 采样点数 $N = 35$, 光栅长度 $L = 2.1 \text{ cm}$, 条纹清晰度 $\nu = 1$, 直流折射率调制量最大值为 2×10^{-4} , 取样方式为 50% 方波采样, 采用的归一化升余弦切趾函数[分布如图 1(a) 所示]如下:

$$n_{DC}(z) = 0.5 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi(z - L/2)}{L/1.5} \right] \right\}, \quad (9)$$

利用上述参数及(8)式便可以得到平衡-1级直流分量时对应的取样周期 P 的变化规律,如图 1(b) 所示。利用传输矩阵模型及文献[14, 15]中提出的方法对新光栅的反射谱频域响应及光栅内部场强的分布进行仿真如图 2 所示,同样对未平衡-1级直流分量时的反射谱频域响应及光栅内部场强分布进行仿真如图 3 所示。

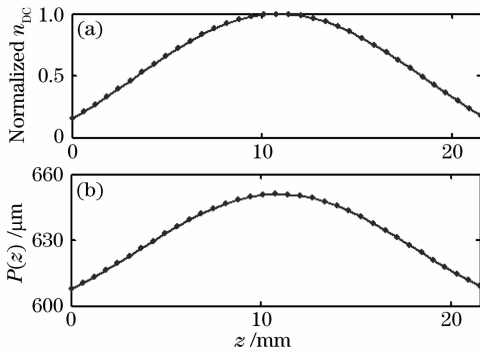


图 1 归一化直流切趾分布图(a)及平衡-1级子光栅直流分量时取样周期的变化(b)

Fig.1 Normalized DC apodized profile (a) and relative sampling period change for balancing -1st ghost grating DC (b)

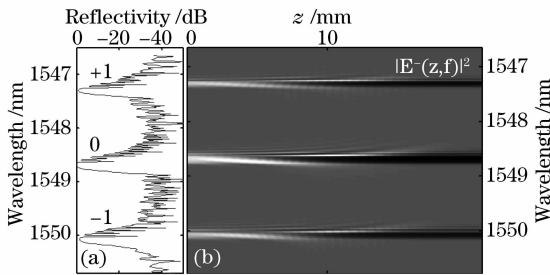


图 2 平衡-1级子光栅直流分量后的光栅反射谱(a)及不同波长沿光栅内部传播时的反向传播场强变化示意图(b)

Fig.2 Grating reflectivity (a) and internal field distribution backward propagating along the device length for every optical frequency (b) based on new structure balancing -1st DC

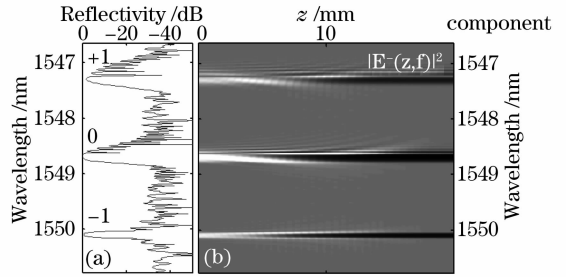


图 3 未平衡-1级子光栅直流分量的光栅反射谱(a)及不同波长沿光栅内部传播时的反向传播场强变化示意图(b)

Fig.3 Grating reflectivity (a) and internal field distribution backward propagating along the device length for every optical frequency (b) based on original structure

结构很好的平衡了-1级子光栅的直流分量,反射谱短波长方向的共振现象得到了消除,表现出良好的对称性;从反向传播的场强分布情况[图 2 和图 3 的(b)图]来看,未平衡前的光栅结构每级子光栅的布拉格反射条件都呈升余弦切趾分布,所以各级子光栅的短波长方向都有明显的共振现象;平衡后新的光栅结构-1级子光栅的布拉格反射条件保持为一常数[(7)式中 λ_m],因此共振现象得到了消除。

3 切趾光栅滤波器实验制作

3.1 载氢光纤光致折射率变化量与曝光时间的关系测量

根据 2.2 节中(8)式的结论可知,要想平衡切趾取样光栅的某一级直流分量,不仅需要知道切趾分布函数,更为重要的是要知道在制作过程中的曝光时间与刻制在光栅上形成的光致折射率变化量之间的关系。文献[16~18]中提出了一些测量方法,也得到了很多相关的结论,但是由于光纤载氢过程中,实际载入的氢气含量决定了载氢后光纤的光敏特性,其中载氢压力、载氢时间对载入氢气的含量都有很重要的影响,所以对实际使用的载氢光纤光敏性需要通过实际的测量才能得到较为准确的数据。通过实验制作光纤光栅的方式来测量所使用的载氢光纤光致折射率变化量与曝光时间之间关系。

3.1.1 均匀光栅最大反射率模型

在曝光时间较短时,采用均匀光栅最大反射率测量模型,利用光矢量分析仪(OVA)测得实际制作均匀光栅的透射谱 $t(\lambda)$,从而得到其最大反射率 $r_{max}^2 = 1 - t_{min}^2$ 和相应的最大反射波长 λ_{max} ,利用如下公式,在已知均匀光栅长度的前提下便可以得到相

对比图 2 和图 3 中的左图可以看出:新的光栅

应的交流光致折射率变化量:

$$r_{\max}^2 = \tanh^2(\kappa L), \quad (10)$$

其中 L 为均匀光栅长度, $\kappa = \pi n_{AC}/\lambda_D$, n_{AC} 的测量精度主要由 λ_D 决定:

$$\frac{dn_{AC}}{d\lambda_D} = \frac{\operatorname{artanh} r_{\max}}{\pi L}. \quad (11)$$

布拉格反射波长 λ_D 与最大反射波长间的关系为: $[\lambda_{\max} = (1 + n_{DC}/n_{\text{eff}})\lambda_D]$, 光矢量分析仪能精确测得透射谱时, r_{\max} 一般在 0.99 以下, λ_D 与 λ_{\max} 间的差值不会超过 0.2 nm, 实际制作均匀光栅长度为 1 cm, 所以由(11)式有: 此时对应的 n_{AC} 变化量约为 1×10^{-7} , 因而完全可以利用测量得到的 λ_{\max} 代替 λ_D 来较为精确的求解 n_{AC} 。

3.1.2 均匀光栅零点带宽模型

在曝光时间较长时, 此时造成的光致折射率变化量较大, 光矢量分析仪已经不能精确地测得其最小的透射率, 3.1.1 节的模型已经不再适用, 但是此时能非常准确地测得反射谱的两个零点对应的波长, 所以可以利用均匀光栅反射率零点带宽测量模型, 同样利用光矢量分析仪测量均匀光栅的反射谱得到最大反射率邻近的两个零点波长, 利用如下公式得到交流光致折射率变化量:

$$\frac{\Delta\lambda_0}{\lambda_{\max}} = \frac{n_{AC}}{n_{\text{eff}}} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_D}{n_{AC}L}\right)^2}, \quad (12)$$

同样考虑 λ_D 对 n_{AC} 的影响有

$$\frac{dn_{AC}}{d\lambda_D} = -\frac{\lambda_D}{n_{AC}L}, \quad (13)$$

实际制作均匀光栅长度为 1 cm 时, 如果 λ_D 变化 1 nm, 则对应的 n_{AC} 变化 1.5×10^{-9} , 所以利用 λ_{\max} 代替 λ_D 来求解 n_{AC} , 并不会对结果有太大的影响。

当 244 nm 氩离子倍频激光器输出光功率为 40 mW 时, 根据不同的曝光时间利用连续扫描的方式制作了 23 根长为 1 cm 的均匀光栅, 并使用光矢量分析仪测得相应的测量参数。图 4 所示为交流折射率改变量随曝光时间的变化关系, 星型和圆型的点分别表示利用模型一(均匀光栅最大反射率模型)和模型二(均匀光栅零点带宽模型)测量计算得到的结果, 实线为对整段时间内的折射率变化关系的指数拟合曲线, 从中可以得到如下的结论: 在 0 s 到 80 s 间呈现明显的指数增长, 在 80 s 到 500 s 之间线性较好, 从整段来看, 光致折射率改变量随曝光时间大致呈指数分布, 关系为 $n_{AC} = 1.632 \times 10^{-6} t^{0.76912}$, 之后随着曝光时间的继续增加, 光致折射率基本达到饱和状态, 实测数据表明: 该普通单模光纤载氢处

理后, 曝光时间在 600 s 后光致折射率基本达到饱和, 相应的光致折射率改变量最大为 4×10^{-4} 。

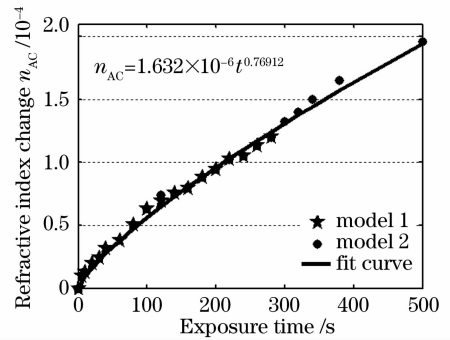


图 4 交流折射率改变量随曝光时间的变化趋势
Fig. 4 AC refractive index increment changes with exposure time dose based on experimental data

3.2 切趾光栅滤波器实验制作结果

为了验证 2.2 节中提出的利用平衡切趾取样光栅某一级子光栅直流分量的设计方案一次曝光实现切趾光栅滤波器的可行性, 分别设计并制作了两根 3 dB 带宽分别为 75 pm 和 55 pm、中心反射波长为 1549.84 nm 的窄带切趾取样光栅滤波器, 相应的光栅制作参数如下: 光栅周期为 535.07 nm, 采用平衡取样光栅的 -1 级直流分量的设计方案, 得到相应的采样周期 $P = 600 \mu\text{m}$, 每个采样周期内采用 50% 占空比的方波采样, 切趾函数如(9)式所示, 最大交流折射率调制为 2×10^{-4} , 实际测得光栅制作平台光路的条纹清晰度 ν 为 0.7, 采样点数 N 分别为 35 和 70, 对应的原始光栅长度分别为 2.1 cm 和 4.2 cm。利用(8)式和 3.1 节中得到的载氢光纤光致折射率交流变化量随曝光时间的关系, 结合光路的条纹清晰度、升余弦切趾函数和最大交流折射率调制, 得到每个取样周期的曝光起始位置和均匀曝光时间。为了比较该直流平衡设计对 -1 级反射谱的改善, 同时也制作了两根相同参数但是未做直流平衡设计的切趾取样光栅。

利用光矢量分析仪(OVA)对制作的光纤光栅反射谱和透射谱进行测量。图 5 和图 6 分别为光栅长为 2.1 cm 和 4.2 cm 的平衡 -1 级直流分量升余弦切趾取样光栅理论仿真结果(simulation data)与实测光栅数据(experimental data)的对比图, 实测数据与仿真数据比较吻合, 实测 2.1 cm 的切趾取样光栅滤波器 -1 级透射谱深度为 -10.2 dB, -3 dB 带宽为 75 pm, 反射谱的边带抑制度为 -23 dB; 实测 4.2 cm 的切趾取样光栅滤波器 -1 级透射谱深度为 -21.3 dB, -3 dB 带宽为 55 pm, 反射谱的边

带抑制制度为 -20 dB。

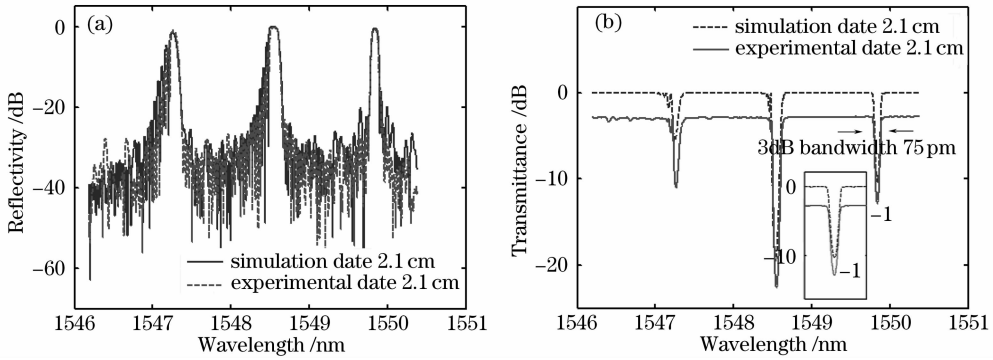


图 5 2.1 cm 平衡 -1 级子光栅直流分量的升余弦切趾取样光栅理论仿真与实测数据对比图。(a) 反射谱；(b) 透射谱
 Fig. 5 Comparison between simulation and experimental data of 2.1 cm cosine apodized sample grating for balancing -1st ghost grating DC. (a) Reflectivity; (b) transmittance

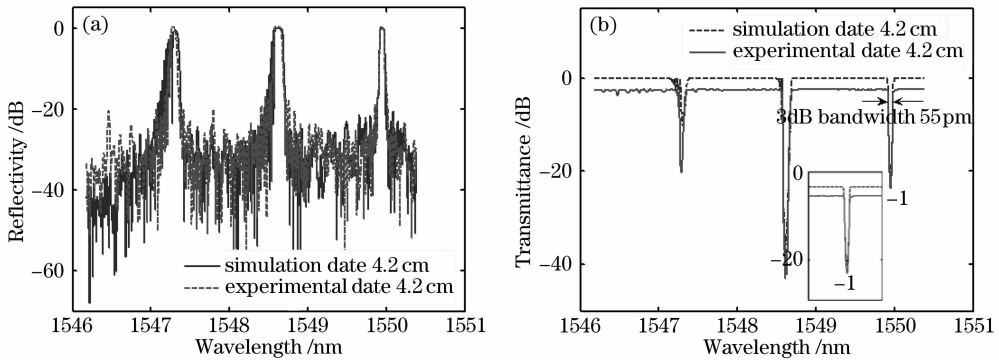


图 6 4.2 cm 平衡 -1 级子光栅直流分量的升余弦切趾取样光栅理论仿真与实测数据对比图。(a) 反射谱；(b) 透射谱
 Fig. 6 Comparison between simulation and experimental data 4.2 cm raised cosine apodized sample grating for balancing -1st ghost grating DC. (a) Reflectivity; (b) transmittance

图 7 和图 8 所示分别为实测的长为 2.1 cm 和 4.2 cm 的切趾取样光栅滤波器 -1 级反射谱平衡直流分量 (DC free) 和未平衡直流分量 (DC) 的对比

图, 可见本文提出的设计方法很好地平衡了 -1 级的直流分量, 消除了短波长方向的共振现象, 反射谱、透射谱的对称性得到明显的改善。

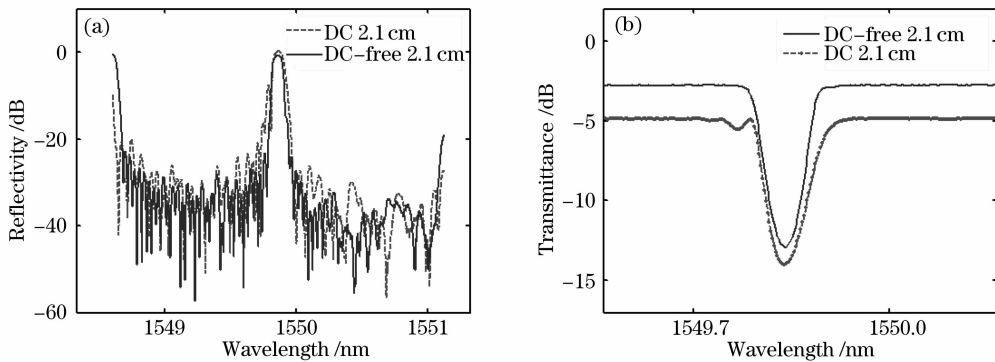


图 7 实测 2.1 cm 升余弦切趾取样光栅平衡 -1 级子光栅直流分量 (DC free) 与未平衡 (DC) -1 级子光栅直流分量的对比图。(a) 反射谱；(b) 透射谱
 Fig. 7 Comparison between -1st channel DC and DC-free 2.1 cm raised cosine apodized sample grating based on experiment. (a) Reflectivity; (b) transmittance

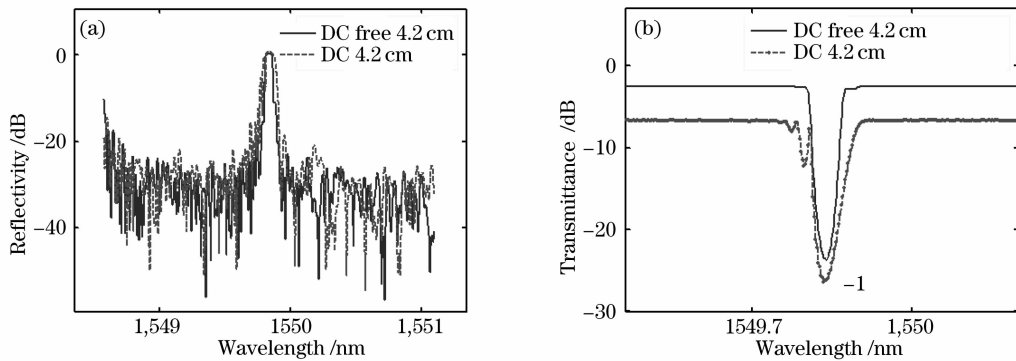


图 8 实测 4.2 cm 升余弦切趾取样光栅平衡-1 级子光栅直流分量(DC free)与未平衡(DC)-1 级子光栅直流分量的对比图。(a) 反射谱; (b) 透射谱

Fig. 8 Comparison between -1^{st} channel DC and DC-free 4.2 cm raised cosine apodized sample grating based on experiment. (a) Reflectivity; (b) transmittance

4 结 论

本文提出了一种利用取样周期的啁啾等效平衡切趾取样光栅单信道内直流分量的设计方法,该方法能平衡切趾取样光栅除了零级外的任意级子光栅的直流分量,同时具有波长通道设计灵活、制作精度要求低和只需一次曝光制作过程的优点;并通过平衡-1 级直流分量的设计方法实验制作了两根中心波长为 1549.84 nm、3 dB 带宽分别为 75 pm 和 55 pm 的升余弦切趾光栅滤波器,实验结果表明新的设计与理论仿真结果非常吻合,与未平衡直流分量的光栅滤波器对比表明:该设计方案很好地消除了切趾取样光栅滤波器-1 级中心波长附近处短波长方向的共振现象,得到的切趾光栅滤波器反射谱、透射谱的对称性及边带抑制度都有了大幅度的改善。

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 Catherine M, Douglas Reid, D. J. Robbins. Narrowband fiber grating filters[J]. *J. Sel. Commun.*, 1990, **8**(6): 1146~1150
- 4 Alejandro Carballar, Miguel A. Muriel, José Azaña. Fiber grating filter for WDM system; An improved design[J]. *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]. *Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(21): 2230~2232
- 6 João 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 Singh H, M Zippin. Apodized fiber Bragg gratings for DWDM applications using uniform phase mask[C]. *ECOC '98*, 1998. 189~190
- 8 M Lima, A Teixeira, J Rocha. Simultaneous filtering and

- dispersioncompensation in WDM systems using apodized fiber gratings[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16): 1412~1414
- 9 M Lima, A Teixeira, J Rocha. Optimization of apodized fiber grating filters for WDM systems [J]. *IEEE LEOS Annu. Meeting*, 1999, **2**: 876~877
- 10 Zhu YingXun, Wang Rong, Pu Tao. Fiber bragg grating based time phase En/Decoder with multiple wavelength channel[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
- 11 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
- 12 Yusuke Nasu, Shinji Yamashita. Densification of sampled fiber bragg gratings using multiple-phase-shift (MPS) technique[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1808~1817
- 13 Yin Yuzhe, Lin Zongqiang, Chen Xiangfei *et al.*. Apodization compensation of sampled Bragg grating fabricated by argon ion laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1368~1371
- 殷玉喆,林宗强,陈向飞等. 氩离子倍频激光器制作取样光纤光栅的切趾补偿工艺研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1368~1371
- 14 Miguel A. Muriel, Alejandro Carballar. Internal field distributions in fiber Bragg gratings[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 955~957
- 15 Miguel A. Muriel, Alejandro Carballar, José Azaña. Field distributions inside fiber gratings [J]. *J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(4): 548~558
- 16 Zhao Hao, Ding Hao, Liu Bin *et al.*. Bragg gratings photoimprinted in hydrogen loaded optical fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(4): 575~576
- 赵 浩,丁 浩,刘 斌等. 载氢光纤光致折变布拉格光栅[J]. *光学学报*, 1996, **16**(4): 575~576
- 17 Li Jianzhi, Jiang Desheng. Hydrogen loading and photolytic index changes in germanosilicate fiber [J]. *J. Inorganic Materials*, 2006, **21**(2): 345~350
- 李剑芝,姜德生. 载氢与掺锗石英光纤的光致折射率改变[J]. *无机材料学报*, 2006, **21**(2): 345~350
- 18 Lemaire P J, Atkins R M, Mizrahi V *et al.*. High pressure H loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(13): 1191~1193