

非对称单侧曝光切趾使啁啾光纤光栅获得优化性能*

刘 艳 郑 凯 谭中伟 李 彬 陈 勇 宁提纲 简水生

(北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

(2005 年 12 月 23 日收到,2006 年 3 月 30 日收到修改稿)

利用谐振理论对啁啾光纤光栅时延纹波和反射谱边瓣的形成原因进行了分析,研究了单侧曝光切趾方式中引入的非常数直流折射率调制分量对啁啾光栅特性的影响,阐明了切趾技术提高啁啾光纤光栅性能的作用机理,提出了一种能够使啁啾光纤光栅获得优化性能的切趾方法,该方法只需对光栅进行单侧曝光,实现简单.

关键词:光纤布拉格光栅,切趾,群时延,反射谱

PACC:4280S,4280F,4281D

1. 引 言

近年来,随着密集波分复用系统(DWDM)中单信道速率的大幅提升^[1],色散对信号传输性能的限制日益突出.为了克服色散的影响,已有多种色散补偿方案被提出.在这其中,啁啾光纤光栅以其灵活的色散补偿特性在固定单信道色散补偿、多信道色散和色散斜率共同补偿以及动态可调色散补偿方面逐渐崭露头角,成为色散补偿技术的重要发展方向之一^[2,3].

尽管啁啾光纤光栅的制作技术日趋成熟,但由于光纤光栅的反射谐振特性,其特性上仍不可避免的呈现出偏离理想特性的反射谱边瓣和时延纹波.当啁啾光栅被应用于 DWDM 系统中时,反射谱边瓣会降低系统信道之间的隔离度,而带内群时延纹波会使经过光栅的信号产生波形失真和码间干扰,因此必须采取措施来抑制这些不理想特性.运用使光栅轴向交流折射率调制幅度渐变的切趾技术可以实现这个目的.本文利用谐振理论对啁啾光纤光栅反射谱边瓣和时延纹波的产生原因以及切趾技术的作用机理进行了深入分析,研究了切趾过程中引入的非常数的直流折射率调制对啁啾光栅特性的影响,并在此基础上提出了一种能够使啁啾光纤光栅获得

优化性能的简单易实现的切趾方法.

需要说明的是,啁啾光纤光栅的时延纹波除了由未切趾光栅两端折射率调制突变形成的法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)效应引起,或切趾函数及方法不理想对上述谐振效应的抑制效果不好而引起,还会由实际写入过程引入的制作误差引起.由于制作误差的随机性,它所引入的时延纹波也具有随机性,而由折射率调制突变引起的纹波具有很强的规律性,针对它的研究将对光栅的制作具有普遍意义,因此本文的讨论将专注于切趾对折射率调制突变引起纹波的抑制作用.

为了研究切趾对光栅特性的影响,先定义与切趾程度有关的参数如下.

切趾陡度因子 a_{eff} 是用来衡量不同切趾函数下降陡度的最常用参数^[4-6],定义为

$$a_{\text{eff}} = \frac{\int_0^L z \mathcal{T}(z) dz}{\int_0^L z dz}, \quad (1)$$

其中 L 为光栅长度, z 为光栅轴向坐标, $\mathcal{T}(z)$ 为切趾后光栅折射率调制幅度沿光栅轴向变化曲线所符合的函数分布,不切趾时 $a_{\text{eff}} = 1$. 一般来讲,切趾陡度因子越小,切趾函数变化越平缓,切趾作用越强(啁啾光栅时延纹波小,反射谱边瓣抑制能力强),但同时色散值、可利用带宽以及反射率都会有不同程

*北京交通大学人才基金(批准号:2005RC033),国家自然科学基金(批准号:60477017),北京市自然科学基金(批准号:4052023)资助的课题.

度的减小.对光栅进行全切趾时,由于光栅带宽损失过于严重,带内色散平坦区域过小,光栅整体性能将严重下降.对光栅采取部分切趾(即切趾时只引入光栅两端部分长度上交流折射率调制幅度的渐变,而中心部分的交流折射率调制保持不变)就可以满足要求.于是本文引入一个参数——切趾比例,即 $AR = L_{ap}/L$,用以表征光栅实际切趾长度 L_{ap} 与光栅总长度 L 的比值.切趾比例和切趾陡度因子之间呈现出很理想的线性关系,如图 1 所示.

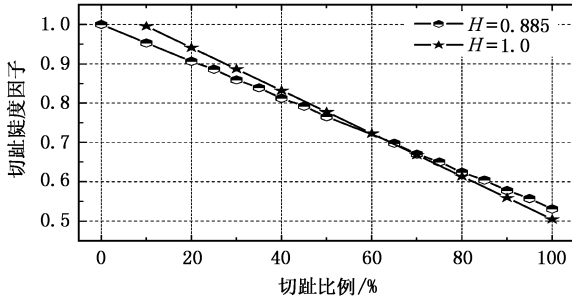


图 1 Hamming 函数(特征参数 $H = 0.885$ 和 $H = 1.0$)切趾比例与切趾陡度因子的关系

2. 切趾的作用机理及现有方法回顾

未切趾啁啾光纤光栅芯区的折射率调制可以表示为

$$n(z) = n_{\text{eff}0} + \overline{\delta_{\text{neff}}} + \delta_{\text{neff}} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda} \cdot z + \phi(z)\right], \quad (2)$$

其中 $n_{\text{eff}0}$ 为曝光前的光纤纤芯有效折射率, $\overline{\delta_{\text{neff}}}$, δ_{neff} 分别为光栅芯区的直流折射率调制和交流折射率调制, Λ 为折射率调制的周期, $\phi(z)$ 一项决定折射率调制的相位变化及局部周期性^[7].此时光栅两端交流折射率调制幅度将从零突然增加到某值,如图 2(a)所示.如果采用谐振理论^[8,9]进行解释,可以把这种折射率的突变看作两个宽带反射镜,当光入射到啁啾光栅时,光栅入射端的折射率突变和光栅中的各个布拉格反射点之间会形成一个个 F-P 腔,从而使出射光的时延呈现出振荡的纹波,而且 F-P 腔的腔长随着光向光栅尾端的传播逐渐增大,由于 F-P 腔出射光的时延振荡周期与腔长成反比,因此远离输入端的短波长处形成的时延纹波周期较小,而靠近光栅输入端的长波长时延纹波周期较大,正如图 3 中未切趾光栅所展示出的时延特性.光栅尾端反射与光栅布拉格反射点之间也可以形成上述效

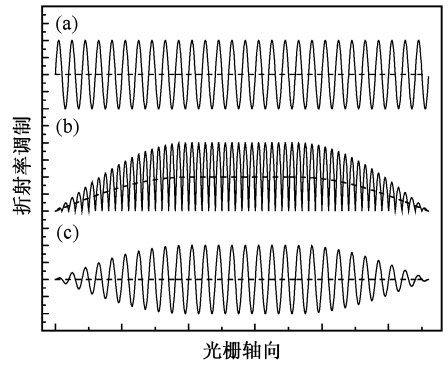


图 2 光栅轴向折射率调制分布示意图(图中虚线对应直流折射率调制)(a)未切趾(b)传统的对称单侧曝光切趾(c)直流折射率调制为常数的复杂切趾

应,但由于大部分光将在光栅上被反射回去,只有小部分光能够透过光栅传播到光栅尾端,因此相比于光栅的入射端,光栅尾端反射对时延纹波的贡献大为减弱,只有当光栅反射率较低时才能显现出来.

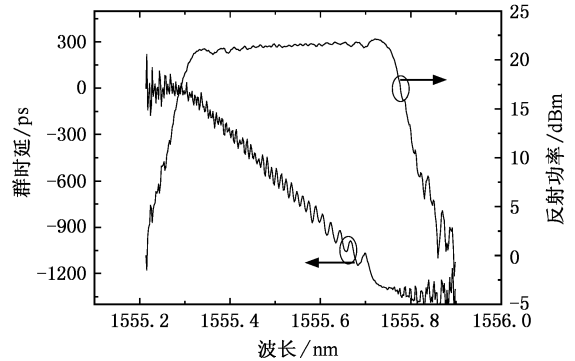


图 3 未切趾啁啾光纤光栅反射谱和时延特性的实测结果

对光栅进行切趾后,由于交流折射率调制幅度由光栅中心向两端缓慢变小,如图 2(b, c)两图所示情况,光栅的端面反射将被大大减弱,由此产生的反射谱边瓣和时延纹波都将大为降低,这就是切趾能够提高光栅性能的原因.

传统的切趾方法一般是对光栅进行两端切趾陡度相同的对称单侧曝光切趾,切趾后光栅的折射率调制可以表示为

$$\delta_n(z) = T(z) \cdot \left\{ \overline{\delta_{\text{neff}}} + \delta_{\text{neff}} \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda} \cdot z + \phi(z)\right] \right\}, \quad (3)$$

即光栅折射率调制的直流分量变为 $\overline{\delta_{\text{neff}}}(z) = T(z) \cdot \overline{\delta_{\text{neff}}}$,显然这种切趾使光栅形成了轴向折射率调制直流分量的非常数变化,如图 2(b)中虚线所示.在

均匀光栅中,这种直流分量的非常数变化将使光栅两端的布拉格反射波长发生渐变^[10],即产生了“自啁啾”效应(“啁啾”表示光栅反射波长的变化),而且由于“自啁啾”效应在光栅两端的对称性,其间会形成强烈的 F-P 效应,导致切趾后光栅反射谱在短波长端出现强烈边瓣,并且时延特性上发生非平坦变化,如图 4 所示。

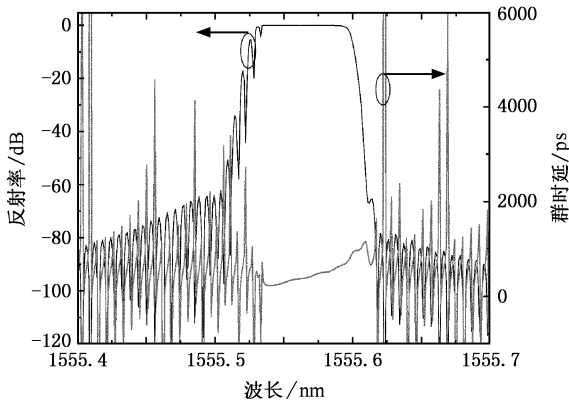


图 4 利用传统切趾方法后均匀光纤光栅的反射谱和时延特性

基于以上原因,人们开始研究使交流折射率调制幅度渐变的同时,能够保持光栅轴向直流折射率调制不变的切趾方法(预期获得的光栅轴向折射率调制分布如图 2(c)):其中利用衍射效率渐变的相位掩模版的方法^[11,12]是通过在相位掩模版上刻蚀条纹的占空比或相移进行调整来改变衍射效率,对相位掩模版的制作提出了很高要求;先后两次曝光的方法^[13]中,很难保证折射率变化曲线在前后两次曝光过程中的精确对准;掩模版或光纤相对抖动的方法^[14]需要使移动装置以 0 至几百 nm 之间的渐变幅

度抖动,对制作装置的精度要求非常高,还有一种比较吸引人的方法就是采用互补滤波在光纤前后同时对光纤进行曝光,其写入系统结构^[15]如图 5 所示,紫外光源以不同的路径分别通过互补滤波器从前后两个方向对光纤进行辐照,由于幅度补偿滤波与幅度滤波的滤光效果互补,而且这一方向的光束没有经过相位掩模版,只起到把光栅的直流折射率调制补偿为常数的作用,但这种方法对前后光路的稳定性和精确对准的要求依然非常高,如果前后向光路对不准则无法实现前后向曝光的补偿作用,而且后面光束的曝光反而会对光栅性能造成不良影响。

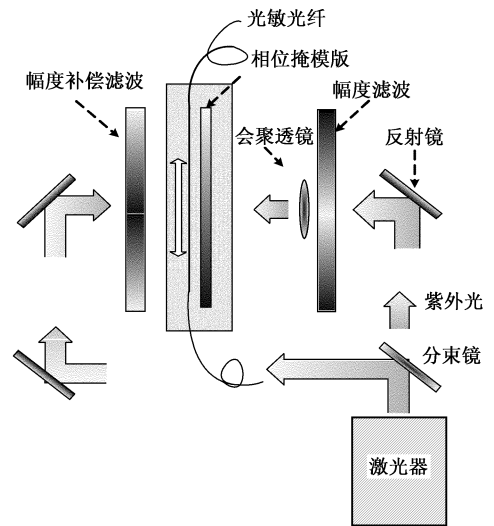


图 5 采用互补滤波切趾方法的光栅写入系统结构图

可见,现有的切趾方法中,对光纤光栅进行切趾的同时,保持其直流折射率调制的轴向均匀性都是以光栅制作系统复杂度的极大提高为代价的。

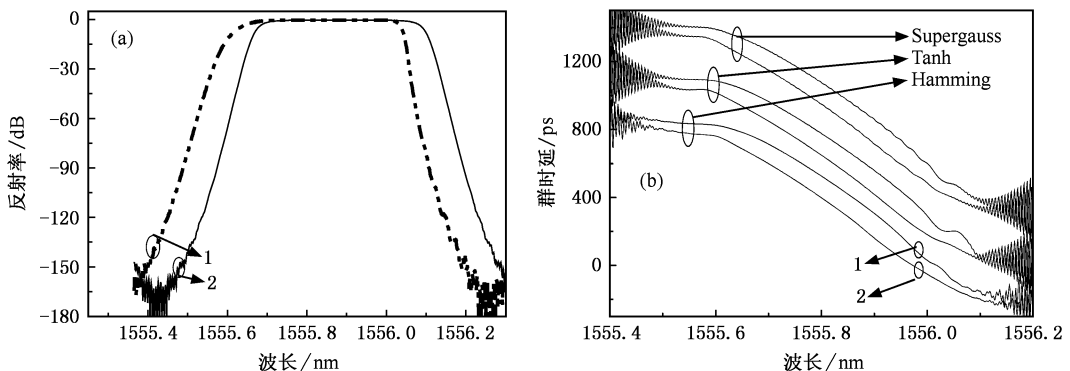


图 6 对称的单侧曝光切趾和复杂切趾对光栅反射谱和时延特性影响的对比 (a) Hamming 函数切趾后反射谱的对比(其他两种函数与此接近)(b) Supergauss, Tanh, Hamming 三种函数切趾后时延特性的对比(1. 直流折射率调制不为常数; 2. 直流折射率调制为常数)

3. 单侧曝光非对称切趾对啁啾光纤光栅时延和反射谱特性的影响

基于对光纤光栅特性的深刻认识,我们发现啁啾光栅和均匀光栅对切趾的要求大不相同.采用直流折射率调制为常数和不为常数的两种切趾情况下,光栅特性的对比如图 6 所示.从中可以看出,非常数的直流折射率调制对啁啾光栅有一定影响:使反射谱短波长端下降陡度比长波长小,而且时延曲线在长波长端出现较大纹波,但相比于均匀光栅,这种影响是比较有限的,单侧曝光的简单切趾方式可以应用于啁啾光栅.

下面来分析产生这种现象的原因.光栅的布拉格反射波长为 $\lambda_B(z) = (n_{\text{eff}0} + \overline{\delta n_{\text{eff}}(z)})\Lambda(z)$,可见当折射率调制周期 $\Lambda(z)$ 和直流折射率调制幅度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 沿光栅轴向的变化趋势相同时,二者对光栅反射波长变化的贡献是相互加强的,而当二者的变化趋势相反时,二者对光栅波长变化的贡献将相互消减.在啁啾光栅的长波长端, $\Lambda(z)$ 增大的方向与切趾引入的 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 减弱的方向相反,因此切趾将消减光栅反射波长的变化,即“消啁啾”,于是长波长端等效的切趾陡度增大;在光栅的短波长端,情况与此相反,等效的切趾陡度减小.于是对称切趾对啁啾光栅两端的作用并不对称,长波长端的切趾陡度由于啁啾的消减作用大于短波长端,而因为切趾陡度越大,切趾作用越弱,反射谱边缘将越陡峭,最终导致光栅反射谱边缘呈现出长波长端比短波长端陡峭的不对称结构.此时光栅沿轴向布拉格反射波长的变化将如图 7 所示(图中给出了四种切趾比例所对应的光栅反射波长变化情况).

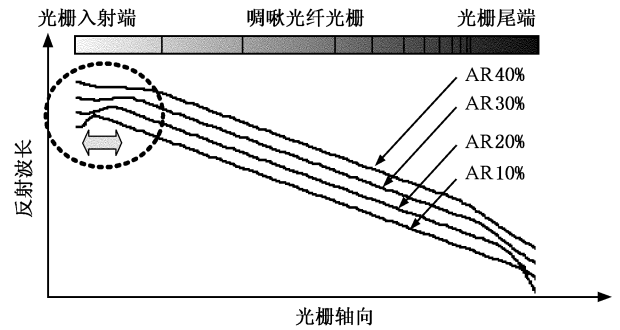
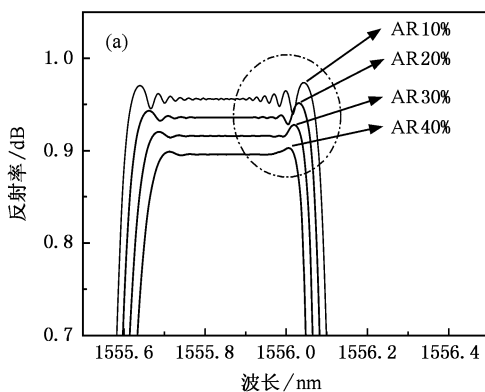


图 7 对称单侧曝光切趾后啁啾光纤光栅的反射带图

从图 7 中可以看出,这种切趾在长波长端的“消啁啾”还会使光栅在长波长端形成局部 F-P 效应(如图 7 中椭圆虚线框内所示),从而导致光栅的长波长端较短波长端具有更高的反射谱边缘尖峰以及更大的时延纹波,而且切趾比例越小,能够发生谐振的波长范围越宽,谐振的腔长越短,导致光栅反射谱和时延的长波长端呈现出振荡的波长范围越宽,振荡幅度越大、周期越小.对比不同切趾比例下光栅长波长端反射谱和时延特性的仿真结果,可以验证此结论,如图 8 所示.

采用 10% 及 20% 的切趾比例制作出啁啾光栅的实测结果与上述结论也非常相符,如图 9 所示(光栅的时延特性由 PerkinElmer 公司的 CD400 色散特性分析仪测出,测量方法为相移法,调制频率为 70MHz).因此增大光栅长波长端切趾比例对于消除长波长端的局部谐振效应是大为有利的.

同时,对比长、短波长端单独切趾后的光栅特性可以看出,由于光栅入射端和尾端对纹波产生的贡献不同,两端切趾对纹波的抑制作用也不相同,只对长波长切趾时光栅时延的波动幅度要远小于只对短波长切趾的情况,如图 10 所示,充分说明长波长端

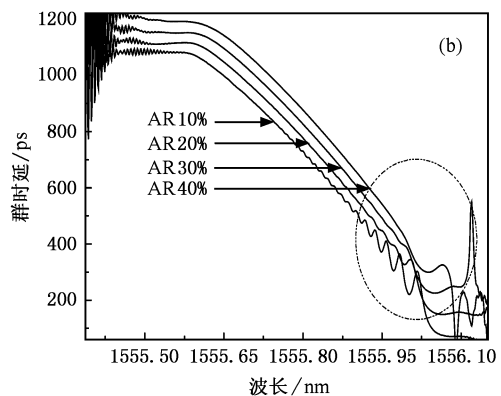


图 8 采用不同切趾比例的对称单侧曝光切趾后光栅特性的对比 (a)反射谱局部特性 (b)时延特性

切趾对于减小光栅时延纹起着更为重要的作用. 综合以上分析可知,增大长波长端的切趾比例

将使啁啾光栅获得更为理想的反射谱和时延特性,此时光栅的折射率调制分布如图 11 所示.

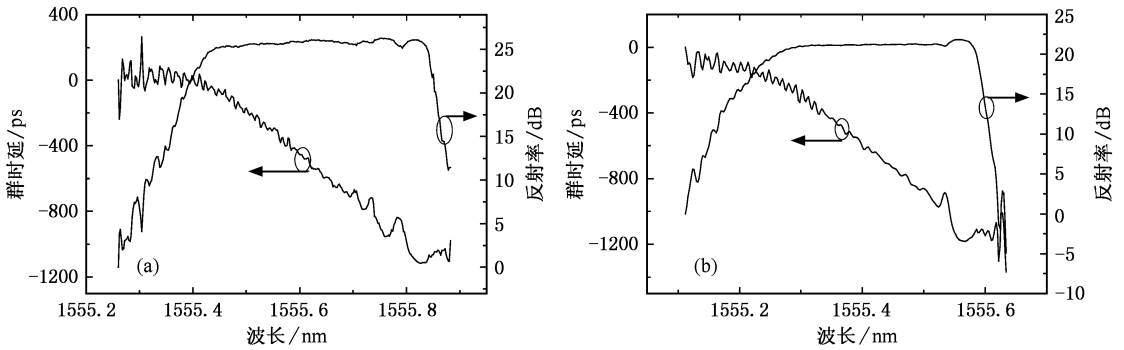


图 9 采用对称单侧曝光切趾制作光栅的实测结果 (a)AR 为 10% (b)AR 为 20%

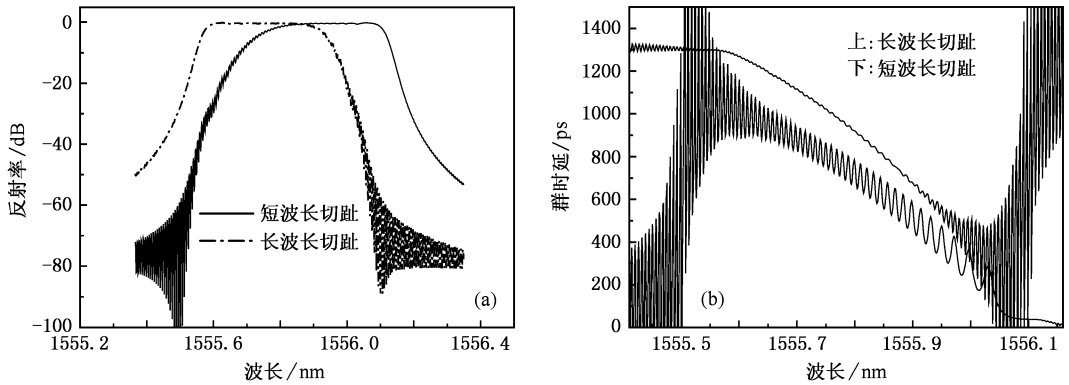


图 10 只对光栅一端进行单侧曝光切趾时光栅特性的比较 (a)反射谱 (b)时延特性

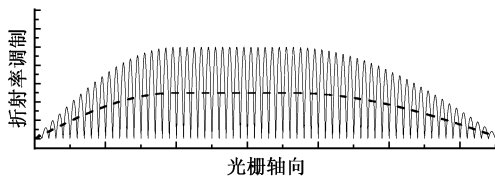


图 11 本文提出的非对称切趾方式使光栅获得的折射率调制分布图

4. 实验结果

根据上述分析结果,我们制作了非对称的幅度切趾板,只对光栅单侧的曝光能量进行控制,系统的结构如图 12 所示.可见非对称幅度切趾板的使用,使系统光路得到大幅简化,而且光路的稳定性、重复性以及制作光栅时的操作简易性都得到提高,制作出的典型光栅特性如图 13(a),其特性远好于对称切趾制作出的光栅特性(如图 13(b)所示).

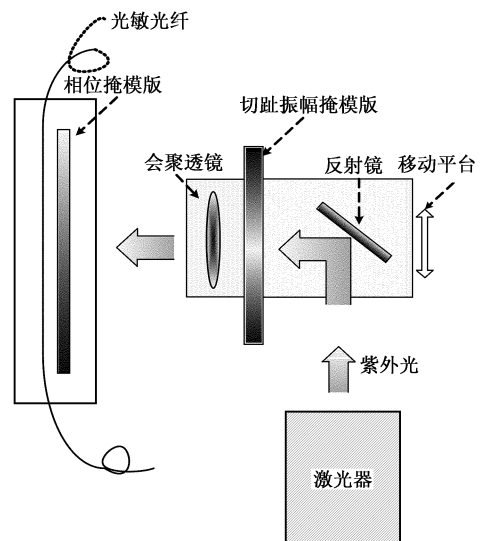


图 12 应用非对称切趾的光栅制作系统示意图

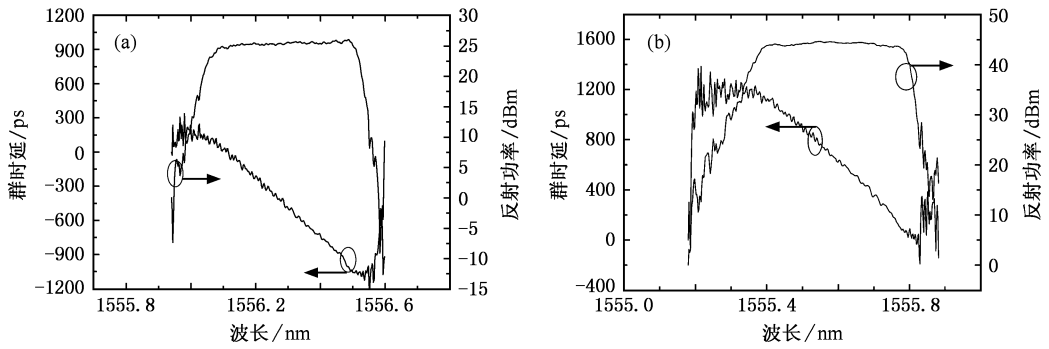


图 13 (a)非对称单侧曝光切趾制作光栅特性 (b)对称单侧曝光切趾制作光栅特性

5. 结 论

对光栅进行单侧曝光切趾时,增大长波长端的切趾比例有利于消除非常数的直流折射率调制变化引起的局部谐振效应,也有利于更好的抑制反射谱

边瓣和时延纹波,因此对啁啾光栅进行长波长端切趾比例大于短波长端的非对称单侧曝光切趾可以使其获得较为理想的反射谱和时延特性,而且实现的复杂度远低于传统方法,有利于提高切趾光栅制作的重复性,进一步推动啁啾光纤光栅的实用化.

- [1] Sauer M ,Hurley J E ,Ten S *et al* 2003 *Electron . Lett .* **39** 728
- [2] Pei L ,Ning T G ,Li T J *et al* 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 1630 (in Chinese) [裴 丽、宁提纲、李唐军等 2005 物理学报 **54** 1630]
- [3] Tan Z W ,Zheng K ,Liu Y *et al* 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 5218 (in Chinese) [谭中伟、郑 凯、刘 艳等 2005 物理学报 **54** 5218]
- [4] Cross P S ,Kolgenik H 1977 *Opt . Lett .* **1** 43
- [5] Ennsner K ,Zervas N ,Laming R L 1998 *J . Quantum Electron .* **34** 770
- [6] Zervas M N ,Ennsner K ,Laming R I 1996 *J . Lightwave Tech .* **14** 233
- [7] Feced R ,Zervas M N *et al* 1999 *J . Quantum Electron .* **35** 1105
- [8] Sumetsy M ,Eggleton B J 2002 *Opt . Exp .* **10** 332
- [9] Tan Z W ,Liu Y ,Ning T G ,Jian S S 2004 *Chin . Opt . Lett .* **2** 18
- [10] Erdogan T 1997 *J . Lightwave Tech .* **15** 1277
- [11] Albert J ,Hill K O ,Malo B *et al* 1995 *Electron . Lett .* **31** 222
- [12] Pan J J ,Shi Y 1997 *Electron . Lett .* **33** 1895
- [13] Malo B ,Theriault S ,Johnson D C *et al* 1995 *Electron . Lett .* **31** 223
- [14] Cole M J ,Loh W H ,Laming R I ,Zervas M N ,Barcelos S 1995 *Electron . Lett .* **31** 1488
- [15] Singh H , Zippin M 1998 *European Conference on Optical Communications* (September 20-24 1998 , Madrid , Spain) **1** 189

Good performance of chirped fiber Bragg gratings obtained by asymmetrically one-side exposure apodization *

Liu Yan Zheng Kai Tan Zhong-Wei Li Bin Chen Yong Ning Ti-Gang Jian Shui-Sheng

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

(Received 23 December 2005 ; revised manuscript received 30 March 2006)

Abstract

The generation of group delay ripple and reflection sideband is explained by the oscillation theory. And the effect of non-constant change of averaged index modulation induced by the one-side exposure apodization on the characteristics of chirped gratings is analyzed for the first time. The mechanism of apodization to enhance the performance of chirped fiber Bragg gratings is studied also. Based on the study, a simple apodization method to improve the performance of chirped fiber gratings is proposed, in which only one-sided exposure is needed which is easy to realize.

Keywords : fiber Bragg grating , apodization , group delay , reflection spectrum

PACC : 4280S , 4280F , 4281D

* Project supported by the Excellent Researcher Fund of Beijing Jiaotong University (Grant No. 2005RC033), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60477017), and Beijing Natural Science Foundation (Grant No. 4052023).