

π 相移光纤光栅制作方法的比较研究

宋志强¹ 祁海峰¹ 倪家升¹ 张晓磊¹ 王 昌¹ 彭刚定²

(¹山东省科学院激光研究所山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014)
²新南威尔士大学电子工程与通信学院, 澳大利亚 悉尼 2052)

摘要 介绍了目前最常用的两种制作相移光纤光栅的方法,即分步曝光法(或遮挡法)和相位掩模板移动法,对比分析了两种方法引入相移的物理机制,并利用传输矩阵法理论模型,数值模拟了两种制作方法下的相移光纤光栅透射谱,并分别进行了分布反馈光纤激光器(DFB-FL)的对比实验。结果表明,分步曝光法制作相移光纤光栅时,相移量与光栅中无曝光段的长度及纤芯折射率调制量均有关,难以精确控制相移量的大小,并且存在偏振模竞争问题;而相位掩模板移动法通过压电陶瓷直线微动台控制掩模板和光纤相对位移,在光栅中引入相位变换,可以将相移量控制在 $0\sim 2\pi$ 范围之内,更容易实现 π 相移光栅的制作。

关键词 光栅;分布反馈光纤激光器; π 相移光纤光栅;相位掩模板

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s105002

Comparison Study on π Phase-Shifted FBG's Fabrication Methods

Song Zhiqiang¹ Qi Haifeng¹ Ni Jiasheng¹ Zhang Xiaolei¹

Wang Chang¹ Peng Gangding²

¹Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong, Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China
²School of Electrical Engineering and Telecommunications, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia

Abstract The two most commonly used fabrication methods of phase-shifted fiber Bragg grating, namely the stepped exposure method (or shielded method) and the phase mask moving method are described. Physical mechanisms of the two methods to introduce phase shift are comparatively analyzed. Using the theoretical model of transfer matrix method numerical simulation of the transmission spectra of phase shift fiber Bragg grating is done, and cross-reference experiments are carried out. The results show that the phase shift of the grating is related to the non-exposed segments of length and core refractive index modulation amount and it's hard to accurately control in stepped method. While the phase shift is controlled in an amount of $0\sim 2\pi$ range and easier to achieve π phase shift grating production in phase mask moving method using Piezo nano-positioning system.

Key words gratings; distributed feedback fiber laser; phase-shifted fiber Bragg grating; phase mask

OCIS codes 060.2340; 060.3735; 060.3510

1 引 言

分布反馈光纤激光器(DFB-FL)是一种易于实现单纵模、单偏振、低强度噪声和低相位噪声的新型光纤器件^[1,2],在高精度的光学测量和光纤传感等方面有着广阔的应用前景。有源光纤 π 相移光栅是

DFB-FL 的核心关键器件,同时起着谐振腔和增益介质的作用,通过在光纤光栅反射带布拉格波长处打开一个极窄的透射窗口来优化激光的模式和线宽。目前,人们已提出了二次曝光法^[3]、热梯度法^[4]、遮挡法^[5]和相位掩模板(PM)移动法^[6]等实现

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-15

基金项目: 国家国际科技合作项目(OS2012Z10286)和山东省自然科学基金(ZR2010FM039)资助课题。

作者简介: 宋志强(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤激光传感技术等方面的研究。

E-mail: zhiqiangs@gmail.com

相移光纤光栅制作的方法,其中二次曝光法和热梯度法都是光纤光栅的后处理方法,会导致光栅布拉格波长的变化,并且无法精确控制相移量的大小,近几年相关研究已很少。分析比较了目前常用的分步曝光法(遮挡法)和相位掩模板移动法,分别采用数值模拟和实验方法进行对比研究,在此基础上选择了一种更优的技术手段。

2 相移引入机理

2.1 分步曝光法

固定相位掩模板和光敏光纤,通过控制紫外激光光斑的移动,使其垂直地扫描经过相位掩模板和光敏光纤,可以制作不同参数的光纤光栅。在此过程中,随着激光光斑扫描光纤长度的增加,光栅长度和反射率都会增长,当光栅长度和反射率均达到所设定的值时,暂停曝光并将光斑位置向前移动 d 后继续以相同的参数曝光一定长度,由此形成反射带中存在透射窗的相移光纤光栅,这种方法可以称为分步曝光法。有文献报道^[5]在相位掩模板前适当位置放置长度为 d 的遮挡物,避免激光光斑经过时光纤曝光,从而形成相移光纤光栅,此方法即遮挡法。这两种制作方法的示意图如图 1(a)所示。

上述两种曝光法下光纤纤芯上折射率调制分布的情况如图 1(b)所示,整个光栅的折射率调制函数是不连续的,长度为 d 的无曝光区的折射率无交流调制,并且其折射率为光纤纤芯的有效折射率 n_0 。当波长 λ_B 的光束传输经过此段光纤时,光的相位变化为 $\varphi = \frac{2\pi n_0 d}{\lambda_B}$,其中 $\lambda_B = 2(n_0 + \Delta n_{\text{eff}})\Lambda$, Λ 为光栅

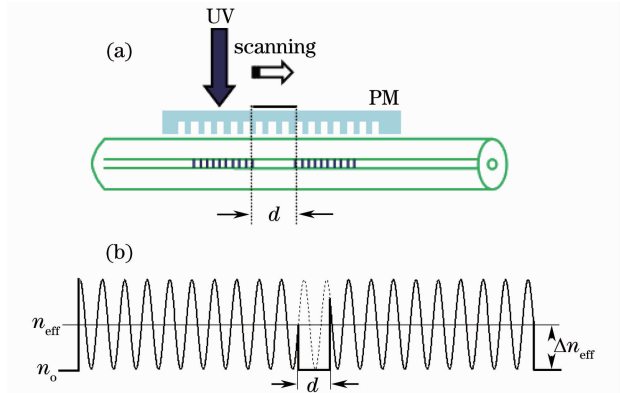


图 1 分步曝光法(遮挡法)制作原理及折射率分布。

(a)制作原理;(b)折射率分布

Fig. 1 Schematic diagram and refractive index profile of stepped method (or shielded method). (a) Schematic diagram; (b) refractive index profile

周期,近似为掩模板周期的一半。可见,分步曝光法或遮挡法制作相移光纤光栅时,相移量与光纤无曝光段的长度 d 和光栅折射率调制量 Δn_{eff} 均有关。由于无法确定光栅中无曝光段两端的相位,因此相移量的精度主要由 d 的控制精度决定。

2.2 相位掩模板移动法

在扫描曝光制作光纤光栅的过程中,当光栅长度和反射率均达到设定值时,控制相位掩模板与光纤发生沿光纤轴向的相对运动(一般是移动掩模板),继续曝光一定的长度。这样由于相位掩模板位置的变化,使前后制作的两段光栅在连接位置产生相位的跃变,形成相移光纤光栅,因此该方法称作相位掩模板移动法,如图 2(a)所示。由于模板掩模条纹的周期性,这种方法产生的相移量只会 $0 \sim 2\pi$ 之内变化,通过精确控制相位掩模板和光纤的相对运动距离,可以使相移量精确控制在 π 左右,并且相移量的精度与光栅曝光参数等条件无关,仅与相位掩模板和光纤相对移动的精度有关。

相位掩模板移动法制作的相移光纤光栅的折射率调制分布如图 2(b)所示,由于这种方法中在光纤上的曝光是连续的,不存在折射率调制函数无交流量的区域,而仅存在一个相位差可通过相对移动距离精确控制的跃变点,是严格意义上的相移光栅。

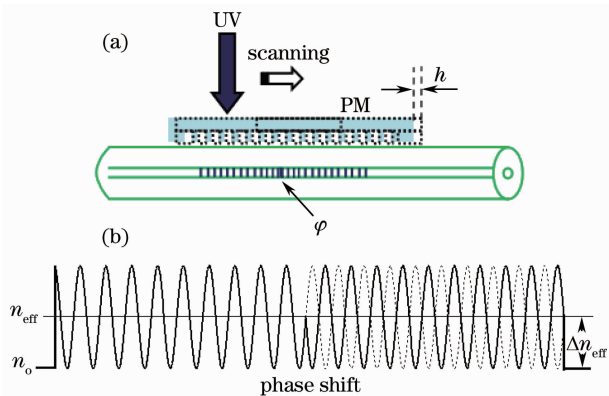


图 2 相位掩模板移动法制作原理及折射率分布。

(a)制作原理;(b)折射率分布

Fig. 2 Schematic diagram and refractive index profile of PM moving method. (a) Schematic diagram; (b) refractive index profile

3 数值模拟

光纤光栅的理论分析方法有多种,传输矩阵法更适用于非均匀光纤光栅的分析模拟^[7]。如图 3 所示,将相移光纤光栅分为长度为 L_1 、 L_2 和相移量为 φ 的 3 部分,由耦合模理论^[8,9]知,相移光纤光栅的

反射率 R 和透射率 T 可表示为

$$R = \left| \frac{b_0}{a_0} \right|^2 = \left| \frac{B_1^* A_2 \exp(-j\varphi) + A_1^* B_2^*}{A_1 A_2 \exp(-j\varphi) + B_1 B_2^*} \right|^2, \quad (1)$$

$$T = \left| \frac{a_1}{a_0} \right|^2 = \left| \frac{1}{A_1 A_2 \exp(-j\varphi/2) + B_1 B_2^* \exp(j\varphi/2)} \right|^2. \quad (2)$$

采用分步曝光法或遮挡法制作 π 相移光纤光栅时, 相移量

$$\varphi = \frac{n_0 d}{(n_0 + \Delta n_{\text{eff}}) \Lambda} \pi, \quad (3)$$

而采用相位掩模板移动法制作 π 相移的光纤光栅时, 取 $d=0, \varphi=\pi$ 。

采用 Matlab 软件对 (1)~(3) 式编程, 根据相

移引入机理, 模拟在光栅中间位置引入 π 相移的光谱情况。结合实际实验制作情况, 两种方法下数值模拟所用参数设定如表 1 所示, 其中, 在分步曝光法中, 以对应 π 相位的非曝光长度量代替相移量进行计算。

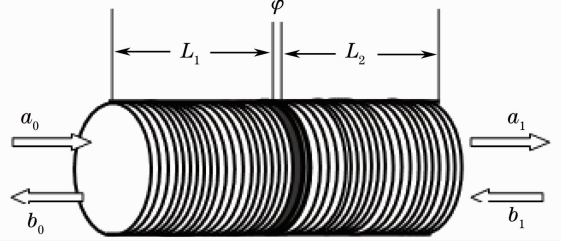


图 3 相移光纤光栅理论分析模型

Fig. 3 Illustration of model for phase-shifted fiber grating

表 1 模拟计算采用参数

Table 1 Simulation parameters of the gratings

	Λ /nm	n_{eff}	Δn	L_1 /mm	L_2 /mm	Phase-shift	v
Stepped exposed method	539	1.45	5×10^{-5}	20	20	539.037 nm	1
PM moving method	527.4	1.45	5×10^{-5}	20	20	π	1

在基本相同的光栅参数下, 模拟得到分步曝光法和相位掩模板移动法制作的相移光纤光栅的透射谱如图 4 所示。由图 4 可知, 分步曝光法或遮挡法中, 当光纤无曝光段的长度 d 正好对应 π 的相移量时, 其结果与相位掩模板移动法制作的严格意义的 π 相移光纤光栅的光谱一致, 都在光栅布拉格波长

处打开了一个窄带的透射窗口, 甚至分步曝光法下的透射窗口深度高于相位掩模板移动法。这说明, 理论上两种方法制作 π 相移的光纤光栅具有同样的可行性。同时, 进一步模拟发现, 当 $d=500$ nm 时, 光栅透射窗的位置会严重地偏离布拉格波长位置, 如图 4(c) 所示。

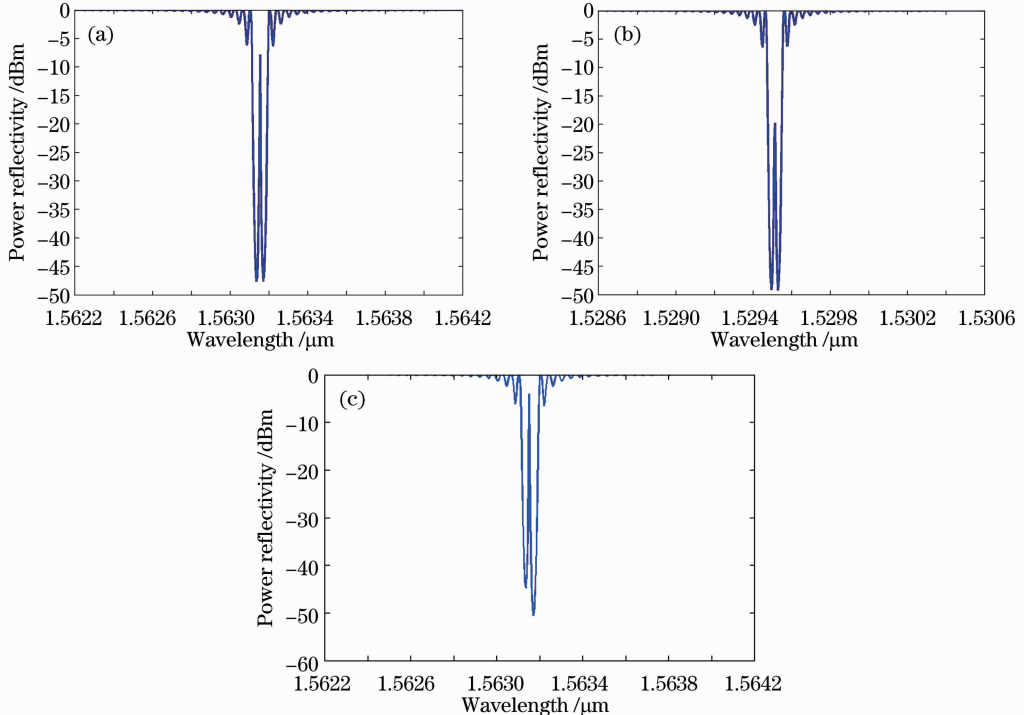


图 4 π 相移光栅数值模拟图。(a)分步曝光法;(b)相位掩模板移动法;(c) $d=500$ nm

Fig. 4 Simulation spectra of π phase-shifted FBG. (a) Stepped method; (b) PM moving method; (c) $d=500$ nm

4 实验结果与分析

在国内实验室使用相干公司 BraggStar industrial 准分子激光器系统,采用分步曝光法进行了相移光纤光栅的制作实验。在实际实验中,由于紫外激光的光斑本身具有不可忽略的宽度,而从数值模拟的结论中看到,对应 π 相移的 d 的取值精度要求很高,因此很难严格按照模拟计算中的参数来设定。可以采用的方法是,在完成前半段光栅的制作后,近似设定间隔值,在后半段光栅的制作过程中观察光栅透射谱,以此制作光谱结构良好的相移光栅。

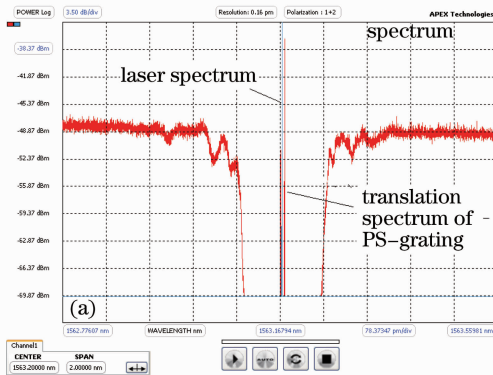


图 5(a)为实验得到的掺铒光纤相移光栅的透射谱及采用 10 mW、980 nm 激光二极管(LD)抽运下的DFB-FL 激光光谱。

使用澳大利亚新南威尔士大学的 InnoVa MotoFred 倍频氩离子激光器光纤光栅制作系统,利用PI的PZT直线微动台控制相位掩模板移动制作了 π 相移的掺铒光纤光栅,其透射谱及相同抽运条件下构成的DFB-FL 激光光谱如图 5(b)所示。两种方法中所用的掺铒光纤均为 Nufern PS-ESF-3/125 光纤。

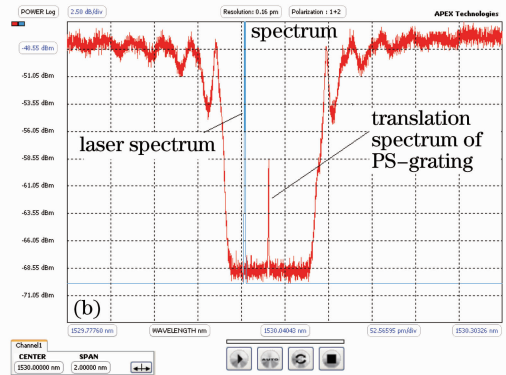


图 5 两种方法制作的光栅的透射光谱和激光光谱图。(a)分步曝光法;(b)相位掩模板移动法
Fig. 5 Diagram of translation spectrum and laser spectrum of gratings fabricated by different methods.

(a) Stepped method; (b) PM moving method

图 5 分别给出了两种制作方法下的光栅透射谱和抽运后的激光光谱,由于所制作的光栅强度比较大,其在布拉格波长处出现的透射窗口的实际线宽非常窄^[10],无法在普通光谱仪下分辨光栅谱形,因此采用分辨率为 0.16 pm 的 Apex AP2050A 光谱仪和掺铒光纤 ASE 光源对其精细谱进行了测量。由图 5 可知,尽管受宽带光源功率限制,透射谱底部的谱线被噪声淹没,未能完整地测量出光栅的透射谱,但从透射窗口在光栅阻带上的位置看,两种制作方法都基本实现了 π 相移光纤光栅的制作,并且相移光栅完全可以构成 DFB-FL 实现单纵模的激光输出。但进一步研究发现,采用分步曝光法制作的相移光栅,其透射窗口为 2 条,并且每次扫描后两条谱线高度会有变化。分析认为,原因是这种制作方式下,无法严格控制相移量和相移位置,并且采用的是光束质量较差的准分子激光器曝光,导致光栅透射波长存在两个偏振态,并存在偏振模竞争现象,而在相位掩模板移动法的实验结果中,只在光栅阻带的中间形成了一条稳定的透射窗口。需要说明的是,图 5 中的激光波长未与透射窗(即布拉格波长)重合^[11],是由于光栅未固定受到测试环境的影响,不

能说明激光波长偏离了光栅布拉格波长。

5 结 论

对目前最常用的制作相移光纤光栅的两种方法,即分布曝光法和相位掩模板移动法,从相移形成机理、数值模拟结果和实验对照等方面进行了对比研究,结果说明两种方法都可实现相移光纤光栅的制作,并有效构成了 DFB-FL。对比发现相位掩模板移动法在相移位置和相移量的精确控制上优于分步曝光法(遮挡法),并容易实现单纵模单偏振的窄线宽激光输出,而相位掩模板移动法需要具有极高精度和稳定性的微位移平台,使相位掩模板沿光纤轴向移动,而不能影响光栅制作的均匀性和一致性。两种方法都具有一定的适用性,可据此选择更优的技术手段。

参 考 文 献

- 1 Kuthan Yelen, L. M. B. Hickey, Mikhail N. Zervas. A new design approach for fiber DFB lasers with improved efficiency[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 711~720
- 2 G. A. Cranch, G. M. H. Flockhart, C. K. Kirkendall. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1161~1172

- 3 Chen Jialin, Liang Liping, Chen Bai *et al.*. Study on postprocess of phase-shifted DFB Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 581~584
陈嘉琳, 梁丽萍, 陈柏等. 掺Yb相移分布反馈光纤激光器的后期制作与研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(7): 581~584
- 4 Zhou Ciming, Chen Liuyong, Jiang Desheng. Fabrication Method of Phase-Shifted Fiber Grating by Local Temperature Modulation [P]. China, 101187715A, 2008-5-28
周次明, 陈留勇, 姜德生. 光纤局部温度调制制作相移光纤光栅的方法专利[P]. 中国, 101187715A. 2008-5-28
- 5 Wang Li, Chen Bai, Chen Jialin *et al.*. Fabrication of Yb-doped phase-shifted fiber grating laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1617~1620
王利, 陈柏, 陈嘉琳等. 一种制作掺Yb相移光纤光栅激光器的实验方案[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1617~1620
- 6 Zhu Qing, Chen Xiaobao, Chen Jianping *et al.*. DFB fiber laser fabrication by moving phase mask[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2006, **1**: 17~21
朱清, 陈小宝, 陈建平. 相位掩模板移动法制作DFB光纤激光器[J]. 光纤与光缆及其应用技术, 2006, **1**: 17~21
- 7 Cai Lulu, Wu Fei, Wang Yutian. Analysis for the reflective spectrum characteristics of phase-shifted fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2071~2076
蔡璐璐, 吴飞, 王玉田. 相移光纤光栅的反射谱特性分析[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2071~2076
- 8 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 9 Liao Bangquan, Zhao Qida, Feng Dejun *et al.*. Coupled-mode theory for optical fiber and its application to fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1340~1344
廖帮全, 赵启大, 冯德军等. 光纤耦合模理论及其在光纤布拉格光栅上的应用[J]. 光学学报, 2002, **22**(11): 1340~1344
- 10 Cai Xiaofeng, Zhao Yan. Optimization analysis on the phase-shift grating of DFB fiber laser[J]. *Journal of CAE IE*, 2010, **5**(1): 53~56
蔡晓锋, 赵岩. DFB光纤激光器中相移光栅优化分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, **5**(1): 53~56
- 11 Xu Tuanwei, Li Fang, Liu Yuliang *et al.*. Characteristic mode analysis of distributed feedback fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1358~1362
徐团伟, 李芳, 刘育梁等. 分布反馈光纤激光器模式特性分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1358~1362

栏目编辑:殷建芳