

# 多重曝光诱导光纤布拉格光栅折射率变化研究

毕卫红<sup>1,2</sup> 江 鹏<sup>1</sup> 武 洋<sup>1</sup> 刘 强<sup>1</sup> 齐跃峰<sup>1,2</sup> 付兴虎<sup>1,2</sup> 付广伟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>燕山大学信息科学与工程学院,河北 秦皇岛,066004

<sup>2</sup>河北省特种光纤与光纤传感重点实验室,河北 秦皇岛,066004

**摘要** 研究了多重曝光诱导载氢光纤布拉格光栅折射率变化的机理及规律。基于二步法的光敏模型分析了多重曝光下载氢光纤光栅的折射率变化,得到了不同初始折射率分布下多重曝光量增长与光栅折射率变化的关系,建立了光纤光栅平均折变量和调制折变量变化数学模型;采用193 nm紫外激光实验研究了布拉格光栅在多重曝光过程中波长、反射率的变化特性。研究表明,多重曝光下光栅中心波长红移,红移量与再曝光条件有关;光栅反射率先增大后趋于稳定,反射率增长速度与再曝光条件有关,趋于稳定的极值由光栅初始曝光分布决定。

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅; 二步法光敏模型; 重叠光栅

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0906005

## Research on Refractive Index Changes of Fiber Bragg Grating Induced by Multiple Post-Exposure

Bi Weihong<sup>1,2</sup> Jiang Peng<sup>1</sup> Wu Yang<sup>1</sup> Liu Qiang<sup>1</sup>

Qi Yuefeng<sup>1,2</sup> Fu Xinghu<sup>1,2</sup> Fu Guangwei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Especial Optical Fiber and Fiber Sensor (Hebei Province), Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** Refractive index changes of hydrogen loaded fiber Bragg grating induced by multiple post-exposure are researched. Changes of fiber grating refractive index induced by multiple post-exposure are analyzed based on the two-step process photosensitive model. The relationship between grating refractive index and multiple post-exposure is obtained under different initial refractive index distribution, and the mathematical models about mean refractive index and modulation refractive index of fiber grating are built up. Furthermore, variation characteristics of fiber Bragg grating wavelength and refractive index under multiple post-exposure are experimentally studied using 193 nm UV laser. The results show that, under multiple post-exposure, the grating wavelength gets red shifted and the shift quantity is related to post-exposure conditions. The grating refractive index increases firstly and then tends to be stable. The growth rate is related to post-exposure conditions and the maximum value is determined by the initial refractive index distribution of fiber Bragg grating.

**Key words** fiber optics; fiber grating; two-step process photosensitive model; superimposed grating

**OCIS codes** 060.2310; 060.2340; 050.2770

## 1 引言

光纤光栅的出现,极大地推动了光纤光学领域的发展,随着其在通信、传感、光信息处理等众多方面应用的深入<sup>[1,2]</sup>,探索新型光纤光栅、进一步提升光纤光栅器件性能,一直是国内外的研究热点。光纤重叠光栅简称叠栅是在同一段光纤区域内完全或部分重叠地写入多个子光栅形成的一种特殊结构的光栅,由相同或不同光栅重叠构成的叠栅不仅兼有部分原光栅的特点,还具备了一些新的特性,如基于多个布拉格光栅(FBG)的叠栅具有幅值、带宽和波长间隔可灵活定制的滤波特性<sup>[3]</sup>,基于啁啾光栅的叠栅具有色散补偿和周

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61475133、61275093)、河北省自然科学基金(F2015203277)

作者简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: bwhong@ysu.edu.cn

期性的宽带滤波特性<sup>[4]</sup>,基于长周期光栅的叠栅可以改变光在光纤中的传输模式<sup>[5]</sup>,基于取样光栅与布拉格光栅的重叠可以调整传输光的相位<sup>[6]</sup>,基于不同光栅的重叠也可用于多维传感<sup>[7-9]</sup>等。重叠光栅丰富的特性使得其在光纤通信、光纤传感等领域有着众多的应用。

在叠栅研制过程中,后续子光栅写入的多重曝光会对已写入的光栅造成影响,这将严重影响叠栅性能参数的精确控制;已有文献[10]对光栅叠栅制备及光栅的多重曝光进行报道,但多为实验现象的描述,鲜有对其变化规律和数学模型的研究报道。

本文以布拉格光栅为对象,从载氢光纤光敏性机理出发,研究光栅折射率分布在多重曝光下的变化规律,以及多重曝光对光栅反射率、波长等的影响,这对光纤光栅的成栅机理探究和高质量叠栅的制作具有重要意义。

## 2 多重曝光光栅折变规律数学模型

光敏机理的二步法模型将光纤曝光的化学反应过程分为两个步骤<sup>[11]</sup>,即



式中  $k_1$ 、 $k_2$  表示反应速度 ( $k_1 \gg k_2$ ), A 为载氢光纤中的初始物质, B 为中间的生成物质, C 为导致折射率改变的最终物质, A、B 和 C 分别被认为是原子团 GeODC(II)、GeH 和 GeE'。

激光经过相位掩模板对光纤纤芯曝光时,光场分布为<sup>[12]</sup>

$$I(x, z) = I_0 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=0}^m 4 \sqrt{I_i I_j} \cos(kz \sin J_i) \cdot \cos(kz \sin J_j) \cdot \cos(kx \cos J_i - kx \cos J_j), \quad (2)$$

式中  $x$  为沿激光方向坐标,  $z$  为沿光纤方向坐标,  $I_0$ 、 $I_i$ 、 $I_j$  分别为模板 0、 $i$ 、 $j$  级衍射效率,  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $J_i$  为各级衍射光束的衍射角,当激光垂直入射时,  $\sin J_i = i\lambda/a\Lambda$ , 掩模板周期为  $2\Lambda$ 。

光敏光纤中的光栅主要由相位掩模板  $\pm 1$  级衍射光束之间的近场干涉光场写入,曝光在光纤纤芯形成的折射率变化可以用傅里叶级数的形式来表示

$$\Delta n(z) = \Delta n_0 + \Delta n_1 \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) + \dots, \quad (3)$$

式中  $\Delta n_0$ 、 $\Delta n_1$  为傅里叶系数。为讨论方便,取近似  $\Delta n_0 = \Delta n_{\text{mean}} \approx \Delta n_{\text{eff}}$ ,  $\Delta n_1 \approx \Delta n_{\text{mod}}$ , 其中  $\Delta n_{\text{mean}}$  为光栅平均折变量,  $\Delta n_{\text{eff}}$  为光栅有效折变量,  $\Delta n_{\text{mod}}$  为光栅调制折变量,且由布拉格光栅耦合理论可得<sup>[13-14]</sup>

$$\Delta n_{\text{mean}} \approx \Delta n_{\text{eff}} = \frac{\Delta \lambda}{2\Lambda}, \quad (4)$$

$$\Delta n_{\text{mod}} = \frac{\lambda \tanh^{-1}(\sqrt{R})}{\pi L}. \quad (5)$$

由二步法光敏模型可知,曝光写入光栅后光纤中存在未完全反应的中间物质 B,对其继续曝光可转化为物质 C,引起光栅平均折变量和调制折变量的进一步变化。令光栅的写入为第 0 次曝光,假设第 1, 2, ...,  $i$  次曝光的光场未对初始光栅引入新的折射率调制;记光栅初始折变量为  $\Delta n_0(z)$ , 经过  $i$  次曝光后的曝光量为  $N_i$ 、折变量为  $\Delta n_i(z)$ , 折变量差  $\Delta n_i^{\text{vary}}(z) = \Delta n_i(z) - \Delta n_0(z)$ , 计算  $\Delta n_i^{\text{vary}}(z)$  的傅里叶系数可得光栅平均折变量和调制折变量

$$\Delta n_{\text{mean}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \frac{1}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \Delta n_i^{\text{vary}}(N_i, z) dz, \quad (6)$$

$$\Delta n_{\text{mod}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \frac{2}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \Delta n_i^{\text{vary}}(N_i, z) \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) dz. \quad (7)$$

由于光纤折射率改变由最终生成物 C 引起,可令  $\Delta n_i^{\text{vary}}(N_i, z) = \phi \cdot \Delta[C_i^{\text{vary}}(N_i, z)]$ , 其中  $\Delta[C_i^{\text{vary}}]$  为后曝光物质 C 含量的改变量,  $\phi$  为物质 C 含量与折变量之间的系数因子。 $\Delta n_{\text{mean}-i}^{\text{vary}}(N_i)$  可进一步写为

$$\Delta n_{\text{mean}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \frac{1}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \phi \cdot \Delta[C_i^{\text{vary}}(N_i, z)] dz. \quad (8)$$

由二步法光敏模型可得

$$\Delta[C_i^{\text{vary}}(N_i, z)] = [C(z, N_i)] - [C(z, N_0)] = [A_{\text{ini}}] \frac{k_2(z)\{1 - \exp[-k_1(z)(N_i + N_0)]\} - k_1(z)\{1 - \exp[-k_2(z)(N_i + N_0)]\}}{k_2(z) - k_1(z)} - [A_{\text{ini}}] \frac{k_2(z)\{1 - \exp[-k_1(z)N_0]\} - k_1(z)\{1 - \exp[-k_2(z)N_0]\}}{k_2(z) - k_1(z)} \quad (9)$$

式中  $[A_{\text{ini}}]$  为物质 A 的初始含量,  $k_1$ 、 $k_2$  主要受光纤曝光光场和光敏光纤(含锗量、含氢浓度)影响, 可写为  $k_1 = \sigma_1 I(z)$ ,  $k_2 = \sigma_2 I^2(z)$ <sup>[15]</sup>, 其中  $I(z)$  为曝光光场分布,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为光纤光敏反应系数。将(9)式代入得

$$\Delta n_{\text{mean}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \frac{1}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \phi \cdot \left\{ [A_{\text{ini}}] \frac{k_2(z)\{1 - \exp[-k_1(z)(N_i + N_0)]\} - k_1(z)\{1 - \exp[-k_2(z)(N_i + N_0)]\}}{k_2(z) - k_1(z)} - [A_{\text{ini}}] \frac{k_2(z)\{1 - \exp[-k_1(z)N_0]\} - k_1(z)\{1 - \exp[-k_2(z)N_0]\}}{k_2(z) - k_1(z)} \right\} dz. \quad (10)$$

由此, 得到了多重曝光下光栅平均折变量变化模型。同理,  $\Delta n_{\text{mod}-i}^{\text{vary}}(N_i)$  可进一步写为

$$\Delta n_{\text{mod}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \frac{2}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \phi \cdot \Delta[C_i^{\text{vary}}(N_i, z)] \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) dz, \quad (11)$$

又假设重叠曝光的光场未对初始光栅引入新的折射率调制, 可得

$$\Delta n_{\text{mod}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \frac{2}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \int_{N_1}^{N_i} -\phi \cdot k_2(z) \cdot [B_0(N_0, z)] \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) dN dz, \quad (12)$$

其中

$$[B_0(N_0, z)] = [A_{\text{ini}}] \cdot k_1(z) \frac{\exp[-k_1(z)N_0] - \exp[-k_2(z)N_0]}{k_2(z) - k_1(z)}. \quad (13)$$

将(13)式代入得

$$\Delta n_{\text{mod}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \frac{2}{\Lambda} \int_0^{\Lambda} \int_{N_1}^{N_i} -\phi \cdot k_2(z) \cdot [A_{\text{ini}}] \cdot k_1(z) \frac{\exp[-k_1(z)N_0] - \exp[-k_2(z)N_0]}{k_2(z) - k_1(z)} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) dN dz.$$

假设光纤中物质 B 完全转化为 C 时调制折变量取最大值  $\Delta n_{\text{mod}}^{\text{max}}$ , 有

$$\Delta n_{\text{mod}}^{\text{max}} = \frac{2}{\Lambda_0} \int_0^{\Lambda} \phi \cdot [B_0(z)] \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) dz. \quad (14)$$

由(11)式、(14)式得

$$\Delta n_{\text{mod}-i}^{\text{vary}}(N_i) = \Delta n_{\text{mod}}^{\text{max}} \{1 - \exp[-k_2(N_i - N_0)]\}, \quad (15)$$

其中  $\Delta n_{\text{mod}}^{\text{max}}$  与光栅初始写入曝光量分布有关。当  $k_1 = 10k_2$  时, 由(10)式得到 FBG 平均折变量变化  $\Delta n_{\text{mean}}^{\text{vary}}$  随曝光量增长的曲线, 如图 1(a)所示,  $\Delta n_{\text{mean}}^{\text{vary}}$  的增长速度受  $k_1$ 、 $k_2$  影响, 即受多重曝光光场和光敏光纤(含锗量、含氢浓度)等因素影响; 由(15)式得到的 FBG 调制折变量变化  $\Delta n_{\text{mod}}^{\text{vary}}$  曲线如图 1(b)所示,  $\Delta n_{\text{mod}}^{\text{vary}}$  先增大后趋于平稳, 增长速度与  $k_2$  有关, 趋于平稳的最大值由光栅初始曝光分布决定。

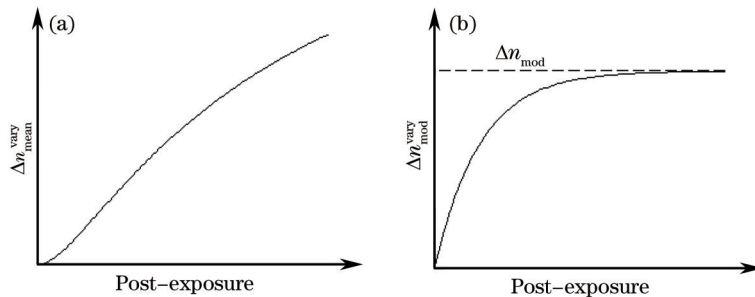


图 1 光栅折变量随曝光量变化曲线。(a)平均折变量; (b)调制折变量

Fig.1 Grating refractive index changes with post-exposure. (a) Mean refractive index; (b) modulation refractive index

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 实验系统

实验系统如图 2 所示。所用光纤为 Corning SMF28 单模光纤, 经过 9 MPa、60 ℃ 的条件下载氢 7 天敏化处

理。光纤光栅的写入采用相位掩模法,写入光栅所用相位掩模版周期  $\Lambda$  为 1077.74 nm,+1、-1 和 0 级的衍射效率分别为 35%、35%、5%。成栅光源和后曝光光源为 193 nm 的准分子激光,利用柱面透镜对激光光束进行聚焦,聚焦后的曝光能量密度为 285 mJ/cm<sup>2</sup>。用宽谱光源和光谱分析仪全程监测光纤光栅的光谱参数。

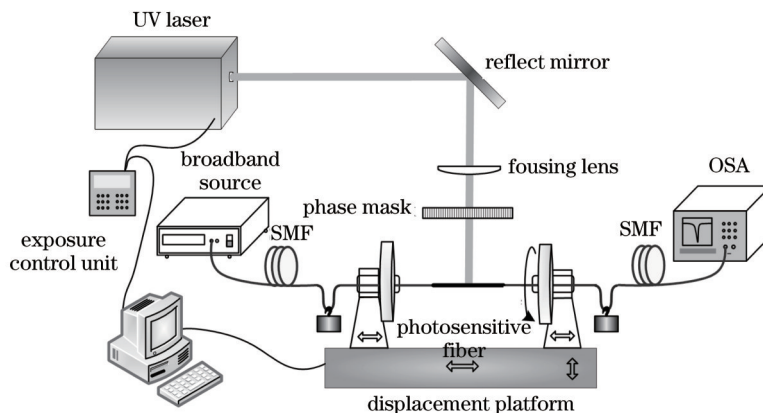


图 2 光纤光栅写入及多重曝光系统

Fig.2 Experimental set-up for FBG writing and post-exposure

### 3.2 多重曝光下布拉格光栅平均和调制折变量变化规律

为研究光栅在多重曝光下的折变规律,利用 3.1 中所述实验条件分别对初始反射率为 17%、44%、76% 的 FBG (栅长  $L=20$  mm) 进行多次无掩模版的均匀再曝光,随着曝光次数(曝光量)的增多,光纤光栅中心波长向长波方向移动,反射率先迅速提升后趋于稳定,光栅带宽随着反射率的增大有所展宽。如图 3 所示,经过 18 次曝光(单位栅长上经过 22000 个曝光脉冲)后,FBG 反射率增为 64%、90%、99%,FBG 中心波长漂移分别为 1.52、1.49、1.54 nm。

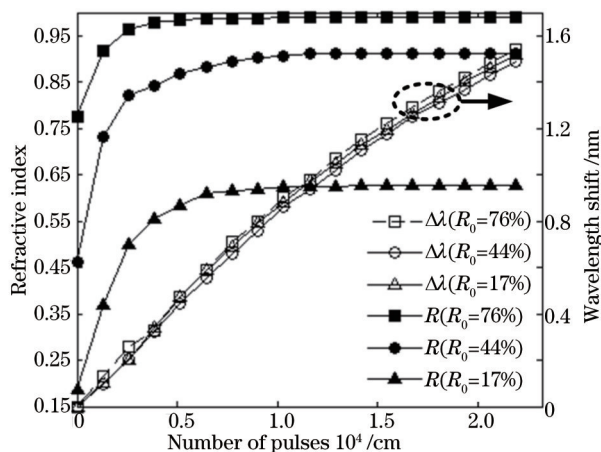


图 3 再曝光下 FBG 波长和反射率的变化

Fig.3 Changes of FBG wavelength and refractive index under post-exposure

根据(4)和(5)式对光栅光谱数据进行处理,可得到重叠曝光下 FBG 的平均折变量变化  $\Delta n_{\text{mean}}^{\text{vary}}$  和调制折变量变化  $\Delta n_{\text{mod}}^{\text{vary}}$ ,如图 4 所示。由图 4(a)可以看出相同的载氢和曝光条件下,引起的  $\Delta n_{\text{mean}}^{\text{vary}}$  相近,在图 4(b)中

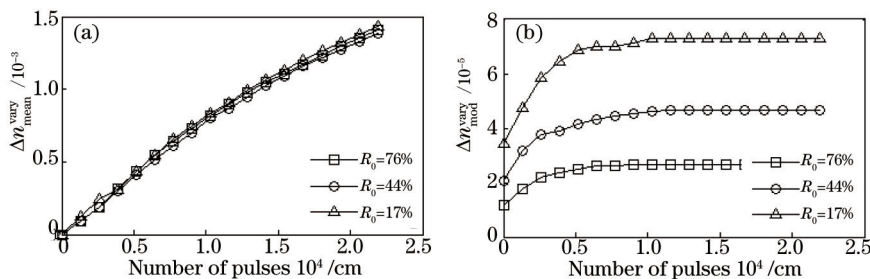


图 4 再曝光下 FBG 折变量变化。(a) 平均折变量; (b) 调制折变量

Fig.4 Changes of FBG refractive index under post-exposure. (a) Mean refractive index; (b) modulation refractive index

初始反射率不同的光栅  $\Delta n_{\text{mod}}^{\text{vary}}$  最终值相差较大,但变化的趋势相近,这与理论模型中的讨论相吻合。

### 3.3 多重曝光下布拉格光栅调制折变量极值研究

为进一步研究光栅初始调制折变量  $\Delta n_{\text{mod}-0}$  与最大调制折变量  $\Delta n_{\text{mod}}^{\text{max}}$  的关系,分别对栅长  $L$  为 20、10 和 2.5 mm 的光栅进行再曝光,典型的反射率变化如图 5 所示。

不同栅长 FBG 经过 22000 个曝光脉冲后的最终反射率  $R_{\text{fin}}$  与初始反射率  $R_{\text{int}}$  的对应关系如图 6 所示。

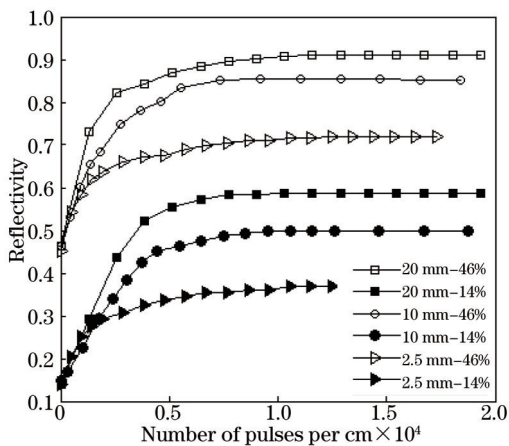


图 5 不同栅长 FBG 再曝光反射率变化

Fig.5 Changes of FBG reflectivity under post-exposure with different grating lengths

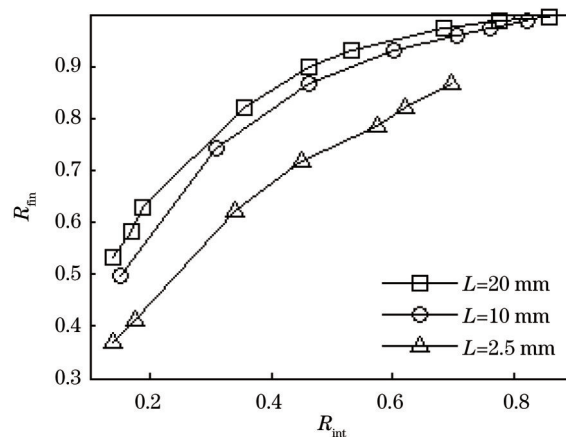


图 6 不同栅长 FBG 再曝光始末反射率变化趋势

Fig.6 Change tendencies of initial and final FBG reflectivities under post-exposure with different grating lengths

根据 (5) 式对光栅反射率数据进行处理,可得到 Bragg 光栅在多重曝光中调制折变量变化率  $\Delta n_{\text{mod-fin}}/\Delta n_{\text{mod-int}}$  与初始调制折变量  $\Delta n_{\text{mod-int}}$  的关系,如图 7 所示,从图中可以看到不同栅长 FBG,在不同  $\Delta n_{\text{mod-int}}$  下得到的  $\Delta n_{\text{mod-fin}}/\Delta n_{\text{mod-int}}$  重合或连续,这说明光纤光栅在再曝光中调制折变量的改变受光栅初始折射率分布影响,与栅长无关,这与理论模型中的讨论吻合,且随  $\Delta n_{\text{mod-int}}$  的增大,  $\Delta n_{\text{mod-fin}}/\Delta n_{\text{mod-int}}$  减小。

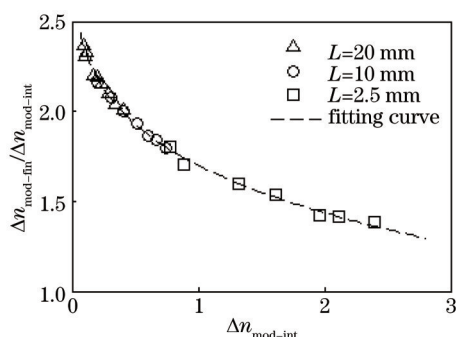


图 7 光栅初始调制折变量与调制折变量增长率的关系

Fig.7 Relationship between initial modulation refractive index and its change rate

## 4 结 论

基于二步法的光敏模型分析了载氢光纤光栅在多重曝光下折射率的变化规律,建立了光栅调制折变量和平均折变量随多重曝光变化的数学模型,并采用 193 nm 激光实验研究了紫外激光对载氢光纤光栅重叠曝光的影响。研究结果表明,多重曝光下光栅中心波长红移,红移量与再曝光条件有关;光栅反射率先增大后趋于稳定,反射率增长速度与再曝光条件有关,趋于稳定的极值由光栅初始折射率分布决定。

### 参 考 文 献

1 Wang Zhaokun, Du Songtao, Wang Ziwei, et al.. Passive mode-locked Yb3+-doped laser based on chired fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41 (8): 0802002.  
王兆坤, 杜松涛, 王子薇, 等. 基于啁啾光纤光栅的被动锁模掺 Yb3+ 激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802002.



- 2 Gu Zhengtian, Lan Jinlong. Design optimization of coated long-period fiber grating based on mode transition[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105007.  
顾铮先, 蓝锦龙. 基于模式转换的镀膜长周期光纤光栅传感器的结构优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105007.
- 3 Y C Ma, H Y Liu, *et al.*. Additive non-uniform random sampling in superimposed fiber Bragg grating strain gauge[J]. Meas Sci Technol, 2013, 24(5): 055201.
- 4 D M Meghavorian, A V Daryan. Superimposed fiber bragg grating simulation by the method of single expression for optical CDMA systems[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(11): 1546-1548.
- 5 M Sumetsky, S Ramachandran. Multiple mode conversion and beam shaping with superimposed long period gratings[J]. Opt Express, 2008, 16(1): 402-412
- 6 J L Zheng, R Wang, T Pu, *et al.*. Phase-controlled superimposed FBGs and their applications in spectral-phase en/decoding[J]. Opt Express, 2011, 19(9): 8580-8595.
- 7 C L Tien, H W Chen, W F Liu, *et al.*. Hydrogen sensor based on side-polished fiber Bragg gratings coated with thin palladium film[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(16): 5360-5363.
- 8 S Triollet, L Robert, E Marin, *et al.*. Discriminated measures of strain and temperature in metallic specimen with embedded superimposed long and short fibre Bragg gratings[J]. Meas Sci Tech, 2011, 22(1): 015202.
- 9 T Li, X Dong, C C Chan, *et al.*. Power-referenced optical fiber refractometer based on a hybrid fiber grating[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2011, 23(22): 1706-1708.
- 10 Liu Yan, Ning Tigang, Tan Zhongwei, *et al.*. Fiber gratings comb filter and its applications in bovel wavelength selectable fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24 (6): 763-766.  
刘 艳, 宁提纲, 谭中伟, 等. 光纤光栅梳状滤波器及其在新型可选波长激光器中的应用[J]. 光学学报, 2004, 24 (6): 763-766.
- 11 John Canning. Photosensitization and photostabilization of laser-induced index changes in optical fibers[J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6(3): 275-289.
- 12 P E Dyer, R J Faley, R Giedl, *et al.*. Analysis of grating formation with excimer laser irradiated phased masks[J]. Opt Communications, 1995, 115(3-4): 327-334.
- 13 N K Viswanathan, J F Brennan. Indication of re-circulating catalysts in photosensitive reactions with H<sub>2</sub>-saturated silica fibers[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2002: TUQ1.
- 14 M Lancry, P Niay, M Douay, *et al.*. Isochronal annealing of BG written either in H<sub>2</sub>-loaded, UV hypersensitized or in OH-flooded standard telecommunication fibers using ArF laser[J]. Lightwave Technol, 2006, 24(3): 1376-1387.
- 15 M Lancry, B Poumellec. UV laser processing and multiphoton absorption processes in optical telecommunication fiber materials[J]. Physics Reports, 2013, 523(4): 207-229.

栏目编辑: 刘丰瑞