

光纤布拉格光栅损耗特性的测量与分析

王迪^{1,2}, 皮浩洋¹, 李璇¹, 杨飞^{1*}, 叶青¹, 蔡海文¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出一种在线同步监测光纤布拉格光栅(FBG)损耗与折射率增长的方法,深入分析 FBG 的损耗特性在刻写时的演变过程,实验结果显示 FBG 的损耗系数 α 随耦合系数 κ 线性增长。为了优化 FBG 的损耗性能,采用损耗-耦合斜率系数 α/κ 衡量 FBG 损耗特性,结果表明:增加光纤与相位掩模板距离和使用 0 级衍射光衍射效率更强的相位掩模板均会使 FBG 的损耗-耦合斜率系数更大,这可能是与耦合系数无关的背景折射率增加所致;而且相比于载氢,采用载氘增敏方式可使 FBG 在 1550 nm 附近的损耗-耦合斜率系数下降 50%以上。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 损耗测量; 相位掩模板; 光纤增敏

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0606004

Measurement and Analysis of Loss in Fiber Bragg Gratings

Wang Di^{1,2}, Pi Haoyang¹, Li Xuan¹, Yang Fei¹, Ye Qing¹, Cai Haiwen¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An online synchronization measurement method for loss and refractive index growth of fiber Bragg grating (FBG) is demonstrated. The dynamic evolution of loss in FBG during the inscription process is studied in detail. The results show that the loss coefficient α of FBG linearly increases with its coupling coefficient κ . In order to optimize the loss performance of FBG, we propose the loss-coupling slope coefficient α/κ to evaluate the loss characteristics of FBG. The results show that we can make the FBG loss-coupling slope coefficient larger by increasing the distance between the optical fiber and the phase mask or using the phase mask with higher diffraction efficiency of 0 order diffracted light, which may be caused by the increase of the background refractive index which is independent of coupling coefficient. And loss-coupling slope coefficient α/κ of the FBG in D₂-loading fiber is 50% lower than at 1550 nm, compared with it in H₂-loading fiber.

Key words fiber optics; fiber grating; loss measurement; phase mask; fibers photosensitivity enhancement

OCIS codes 060.2340; 060.3735; 060.3738

1 引 言

自 1978 年 Hill 等^[1]首次成功刻写光纤布拉格光栅(FBG)至今,各种 FBG 的设计、制作技术均得以发展,臻于成熟。FBG 在光纤传感、光纤激光器、

FBG 外腔半导体激光器及色散补偿等方面都得到了广泛的应用^[2-7]。在这些应用中,损耗是 FBG 的重要性能指标。在 FBG 的刻写过程中,载氢和紫外(UV)曝光都可能给 FBG 引入损耗。光纤载氢后,紫外辐照使光纤中形成 Ge—OH, Si—OH, Ge—H

收稿日期: 2017-12-19; 收到修改稿日期: 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61405212, 61377062, 61405218, 61775225)

作者简介: 王迪(1991—),女,博士研究生,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: wendyyang@siom.ac.cn

导师简介: 蔡海文(1975—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事单频激光技术和光电子技术等方面的研究。

E-mail: hwcai@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: fyang@siom.ac.cn

和 Si—H 等化学键损伤、折射率失配、污染等缺陷,产生模场失配、吸收、瑞利散射等,导致光纤损耗增加^[8-11]。一般情况下,FBG 的损耗小于 0.05 dB,并不影响其性能与使用,可以不予考虑。但是在一些特殊的应用中,FBG 的损耗影响很大,不能被忽略。比如:FBG 在密集波分复用(DWDM)系统中进行多信道的色散补偿时,需要把多个 FBG 串联,共同补偿多波长的色散;在基于 FBG 的密集波分复用的波分复用/解复用器和 FBG 传感器的应用中,也需要将大量的 FBG 串联起来,此时 FBG 数目越大,最后信道的插入损耗增大越显著,限制了 FBG 的最大连接数^[12]。又比如:光纤光栅法布里珀罗腔(FBG-FP)和相移光纤光栅中(PSFBG)谐振波长处的激光可以在腔内多次往返,增加了有效光程,导致谐振波长处的损耗明显增大,0.001 mm⁻¹的损耗可以使谐振波长的透过率下降 2.52 dB,其中吸收损耗引入的热量会使谐振波长发生红移,这使得 PSFBG 和 FBG-FP 的使用受到了制约^[13-14]。基于以上原因,可以说 FBG 损耗的研究是一个非常重要的课题,但关于 FBG 损耗研究的相关文献较少。由于 FBG 的损耗非常小,为了避免光纤熔接损耗等因素的影响,以往的文献都是以刻写 FBG 前光纤的透射光谱作为参考,通过监测 FBG 刻写过程中的整个宽带光谱透过率的下降量对刻写损耗进行评估^[12,15],但是这些方法受限于光谱仪的精度,测量精度一般只能达到 0.01 dB;而刻写过程中各工艺参数对 FBG 损耗的影响还未见过报道。

本文提出了一种同步在线监测 FBG 的损耗与折射率演变的方法,分析刻写 FBG 时其损耗与耦合系数(折射率)增长趋势。实验结果表明,FBG 的损耗系数 α (mm⁻¹)随耦合系数 κ (mm⁻¹)线性增长,而此损耗-耦合斜率系数 α/κ 受到 FBG 制备过程中的各种工艺参数的影响。为了优化 FBG 的损耗性能,本文用 α/κ 衡量 FBG 损耗特性,分析了工艺参

数对 FBG 损耗性能的影响,为优化不同工艺参数得到尽可能小的损耗提供技术基础。

2 实验装置与同步测量方法

紫外激光辐照下,光纤中缺氧锗缺陷光电离会使光纤纤芯的折射率发生改变。将待刻写的光纤贴近相位掩模板后,利用 ± 1 级衍射光形成的干涉场实现正弦调制的纤芯折射率是刻写 FBG 的基本原理。但是紫外光辐照不仅能使纤芯折射率发生改变,还会引起损耗。同时测量 FBG 刻写过程中的折射率和损耗的增长曲线有助于更加全面地认识成栅过程。众所周知,折射率改变量可以由光栅的透射谱反演得出^[16],所以实验采用如图 1 所示的实验装置,实现了 FBG 刻写过程中损耗与折射率变化的测量。其中分布式反馈半导体激光器(DFB LD)和放大自发辐射光源(ASE)的光分别从一段载氢光纤的两端耦合进入,两个隔离器(ISO)用来隔离反向光保护光源。LD 经过一个分光比为 1:1 的耦合器(OC1)后被分成两路。第一路经过一个可调衰减器(VA)后被耦合进探测器(PD1),作为参考光路;第二路接入待刻写的载氢光纤,部分光被耦合进探测器(PD2)。其中 FBG2 的中心波长与 LD 激光波长相同,它与环形器构成一个带通滤波器,只有 LD 激光被耦合进 PD2,从而避免了因 FBG 反射 ASE 的光而影响损耗的测量。实验中采用的 LD 的激光波长为 1548.8 nm,线宽为 100 MHz,用波长计(Bristol 721)测量的 LD 在半个小时内的波长抖动为 2.58 pm。FBG2 的中心波长为 1548.8 nm,3 dB 带宽为 0.27 nm,环境温度的扰动引起的 FBG2 的中心波长抖动小于 20 pm。所以在实验中 LD 与 FBG2 的总波长抖动量小于 FBG2 反射带宽的 1/10,对损耗测量的影响很小。为了避免 FBG 旁瓣效应与包层模耦合效应的影响,选择相位掩模板时需注意 FBG 的中心波长应小于激光波长,而且两者差值最好大于 5 nm。

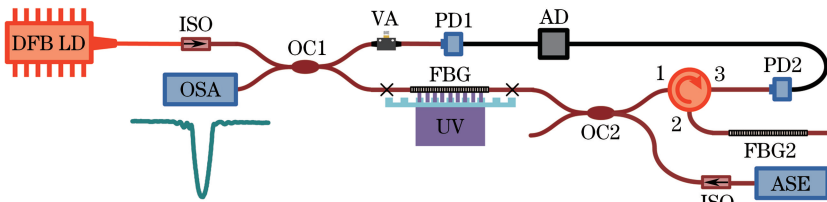


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

刻写 FBG 前,需要将剥掉涂覆层的光纤贴近相位掩模板固定好,然后调节 VA 使 PD1 和 PD2 探测

的信号一致。刻写 FBG 时,利用编写好的数据采集软件,控制光谱分析仪(OSA)与数据采集器(AD),

使它们在每辐照 100 个脉冲后记录一次数据。本实验装置中数据采集使用的 ADC 芯片分辨率为 0.3 mV, 实验中的探测光功率反映在探测器上的电压信号为 1 V, 所以实验中理想情况下的损耗测量精度极限为 0.0013 dB, 若增加激光功率或使用更高分辨率的 ADC 芯片可以进一步提高损耗测量精度, 但是实际实验中, 可能由于环境扰动等因素的影响, 实际测量精度略微偏大。

采用图 1 所示的装置, 除了从 PD1(参考光路)和 PD2(待测光路)探测的两路 LD 光功率差分得到 FBG 刻写过程中损耗系数的增长趋势, 还同时使用 ASE 和 OSA 监测了 FBG 透射谱的变化过程。OSA 测得 FBG 反射带宽以外的宽带光谱透过率的下降量也可以用来估计 FBG 的损耗。FBG 的透过率和损耗系数同时监测可用于分析 FBG 增长过程中紫外光致损耗与折射率变化量的关系。

3 数据处理

3.1 FBG 折射率变化的计算

图 2 是 FBG 中紫外光诱导折射率改变量的示意图, 其中有效折射率增量 δn_{eff} 能够使 FBG 的中心波长红移, 而折射率调制幅度 δn_{mod} 则影响 FBG 反射率(耦合系数)。理想情况下, 认为 $\delta n_{\text{eff}} = \delta n_{\text{mod}}$, 即均匀背景折射率增量 $\delta n_{\text{min}} = \delta n_{\text{eff}} - \delta n_{\text{mod}} = 0$, 但是实际刻写中各种各样参数的影响, 可能会导致这种背景折射率增量不为零。所以为了完整地表征 FBG 的折射率变化, 需要分别测量 FBG 的 δn_{eff} 和 δn_{mod} 。

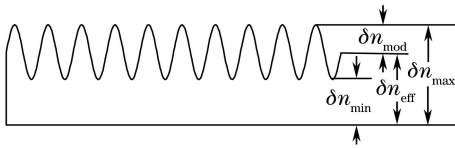


图 2 FBG 折射率分布示意图

Fig. 2 Schematic illustration of the refractive index in FBG

采用图 1 所述的方法, 刻写一根 FBG 的过程可以记录一组光谱数据, 这组数据是由每间隔 100 脉冲记录的一个透射谱数据组成。利用这组透射谱中 FBG 的波长红移量与反射率, 可以计算出 δn_{eff} 和 δn_{mod} 。 δn_{eff} 与 FBG 中心波长红移量的关系可表示为

$$\delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}(\lambda - \lambda_B) / \lambda_B. \quad (1)$$

FBG 的耦合系数 κ 和折射率调制幅度 δn_{mod} 可用反射率算出:

$$\kappa = \frac{1}{L} \operatorname{arctanh}(\sqrt{R}), \quad (2)$$

$$\delta n_{\text{mod}} = \lambda \cdot \kappa / \pi, \quad (3)$$

式中: n_{eff} 为光纤的有效折射率; λ_B 为 FBG 初始的中心波长; λ 为刻写过程中动态变化的中心波长; $L = (W - 2D \tan \theta)$ 为 FBG 长度, W 为光斑宽度, D 为光纤与相位掩模板的距离, θ 为相位掩模板 ± 1 级衍射光的衍射角。

3.2 FBG 的损耗测量

根据图 1 所述的方案可以采取两种方式测量得到 FBG 的损耗。一种是通过利用 OSA 测得 FBG 反射带宽以外的宽带光谱透过率的下降量 ΔT (dB) 估算 FBG 的损耗系数 α (mm^{-1}):

$$\alpha = \Delta T / L, \quad (4)$$

式中: ΔT 的测量精度取决于光谱仪的测量精度, 为 0.01 dB。

另一种方法是对 PD1 和 PD2 探测的两路 LD 光功率作差分运算。每间隔 100 脉冲, OSA 扫描一次光谱, 同时数据采集卡对两个探测器输出信号进行采样, 由于 OSA 扫描一次光谱需要 6 s, 所以设置数据采集卡的采样时间间隔为 0.006 s, 分别记录两路光在这 6 s 内的 1000 个光功率数据。用两个探测器测得的 LD 光功率比值可以计算出 FBG 的损耗:

$$\alpha = -10/L \lg(1 - P_2/P_1), \quad (5)$$

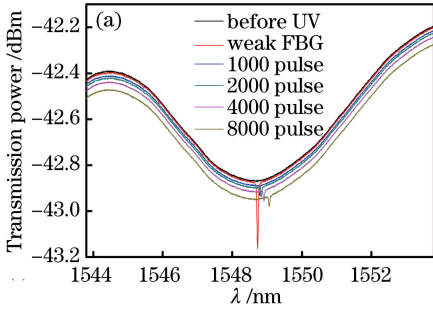
式中: P_1 为参考光路 6 s 内的平均光功率; P_2 为经过待测样品后 6 s 内的平均光功率。虽然这种方法的精度很高, 但是因环境变化引起两路光功率的抖动可能会引起额外的测量误差。在未刻写 FBG 时, 两路 LD 光功率差分得到的损耗 5 min(刻写一根光纤光栅的时间小于 5 min) 内最大抖动误差为 0.0034 dB, 即实验中损耗测量的精度值为 0.0034 dB, 比理想极限 0.0013 dB 略大。

4 实验结果与讨论

4.1 紫外激光诱导损耗 α 与折射率改变量 δn 的关系

在使用光谱仪测量损耗的方法中, 探究了紫外光均匀辐照时(此时只存在有效折射率增量 δn_{eff}), 紫外激光诱导损耗 α 与折射率改变量 δn_{eff} 的演变情况。具体操作是: 先用几个脉冲的紫外激光经过相位掩模板刻写一个长度为 2 cm 的低反射率光栅(weak FBG), 接着去掉相位掩模板, 直接均匀辐照这段 2 cm 的低反射率光栅, 每次辐照若干个脉冲后, 记录一次光谱。如图 3(a) 所示, 随着紫外激光辐照剂量的增加, 低反射率光栅的波长红移, 同时整个宽带光谱的透过率下降。将均匀辐照前的光栅光

谱作为参考点,将光栅的波长红移量 $\Delta\lambda$ 及其透过率变化量 $\Delta T(\text{dB})$,代入(1)式和(5)式可以计算出紫外光诱导折射率改变量 δn_{eff} 和损耗 α ,它们之间的变化关系见图 3(b)。可以看出,由于光谱仪精度



的限制,实测数据有几个平台区,但是 α 与 δn_{eff} 之间仍存在明显的线性关系。这表明紫外辐照光纤同时引起了光纤纤芯损耗和折射率增大,并且损耗系数 α 随着有效折射率 δn_{eff} 的增大而线性增加。

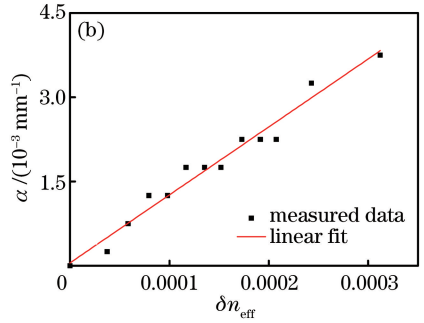


图 3 (a)均匀辐照多个脉冲数的低反射率光栅光谱;(b)紫外诱导损耗 α 与折射率改变量 δn 的关系
Fig. 3 (a) Spectra of weak FBG with dose of UV exposure; (b) UV-induced loss α varies with UV-induced refractive index change δn

4.2 FBG 的损耗系数 α 与耦合系数 κ 的关系

FBG 的耦合系数 κ 是与紫外光致折射率增量相关的参数,采用图 1 所示的测量方法,分析了在刻写 FBG 的过程中,其损耗系数与耦合系数的关系。用于刻写 FBG 的光源采用准分子激光器,相位掩模板周期为 1057.2 nm,其 ± 1 级衍射光的衍射效率为 41%,0 级衍射光的衍射效率为 3.7%,光纤是经过 120 atm(1 atm=101325 Pa)的高压载氢 3 d 后的 SM-28,实验中将激光器输出的脉冲能量设置为 75 mJ,重复频率为 12 Hz,光纤被安置在相位掩模板后约 200 μm 处,并且与聚焦透镜(焦距 $f=150\text{ mm}$)之间的距离约为 142 mm。测量结果如图 4(a)所示,刻写 FBG 时有效折射率增量 δn_{eff} 与

折射率调制幅度 δn_{mod} 同时增加,此时 $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}} \approx 0.8$ 。根据图 4(b)得到 FBG 的损耗系数 α 随耦合系数 $\kappa(\text{mm}^{-1})$ 线性增长的关系,而 $\kappa \propto \delta n_{\text{mod}}$,说明 FBG 的损耗系数与 δn_{mod} 呈正比关系,与之前的结论一致。这也说明在相同工艺参数下,刻写不同反射率的 FBG,对应的损耗系数不同,那么直接采用损耗系数评价某个工艺参数对 FBG 损耗特性的影响是片面的。如果采用 α/κ 作为评判 FBG 损耗性能的标准,分析各种工艺参数对该斜率系数的影响,优化不同工艺参数得到尽可能小的斜率系数,将有助于在尽可能排除 FBG 反射率影响的情况下降低其损耗系数。下面具体分析了几种工艺参数对 α/κ 的影响。

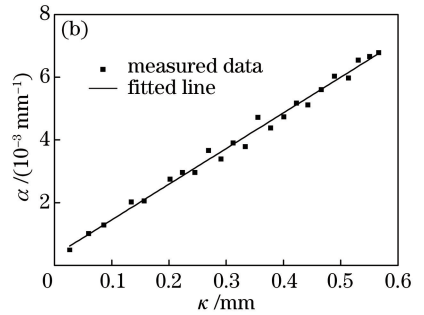
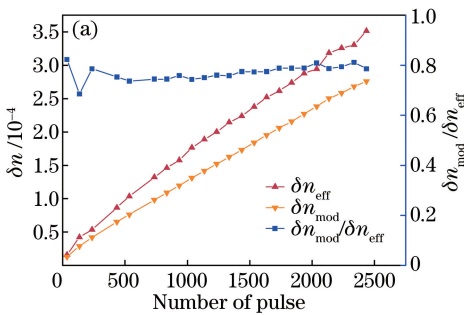


图 4 FBG 刻写过程中折射率与损耗的增长过程。(a) δn_{mod} , δn_{eff} 和 $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 随紫外光辐照脉冲数的变化;(b) FBG 损耗系数 α 与耦合系数 $\kappa(\text{mm}^{-1})$ 的关系

Fig. 4 Refractive index change and loss increasing during FBG inscription. (a) δn_{mod} , δn_{eff} and $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ varies with dose of UV exposure; (b) loss coefficient of FBG varies with its coupling coefficient

4.3 FBG 的刻写参数对损耗-耦合斜率系数 α/κ 的影响

4.3.1 光纤与相位掩模板的间距 D

进行本组实验时,采用与 4.2 节相同的相位掩

模板,FBG 的刻写条件为:脉冲能量约为 80 mJ,脉冲频率为 12 Hz,光斑长度为 9 mm,SM-28 光纤载氢时间为 6 d,光纤的预施加应力为 0.54 N,光纤距

聚焦透镜约为 142 mm。在相位掩模板后 100 ~ 2500 μm 范围内选择了几个位置夹持光纤。图 5 显示了 $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 和 α/κ 随光纤与相位掩模板距离 D 的变化趋势。图 5(a) 中的 $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 各值是刻写过程中每组 $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 数据的平均值。 D 越大, $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 越小, 即相位掩模板后的干涉光场对比度沿着

远离相位掩模板的方向逐渐降低。同时由图 5(b) 显示, 沿着远离相位掩模板的方向 α/κ 越来越大。这有可能是因为越远离相位掩模板, 干涉光场的对比度越低^[17], 对应 FBG 的 δn_{eff} 越大, 使得即使 κ 不变, FBG 的 α 也会增加。

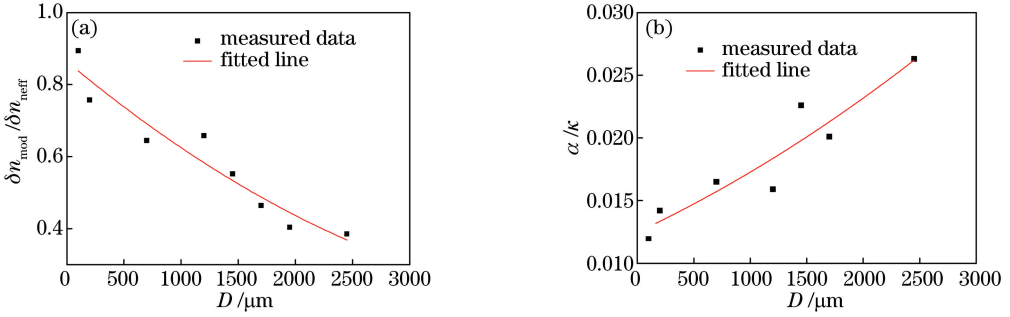


图 5 (a) $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 和 (b) α/κ 随光纤与相位掩模板距离 D 的变化

Fig. 5 (a) $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ and (b) α/κ varies with the distance between the phase mask and the fiber core

4.3.2 相位掩模板的衍射效率

为研究相位掩模板衍射光的衍射效率对 FBG 损耗系数的影响, 两块相位掩模板的参数设置如表 1 所示, 其中符号“—”表示该衍射级次的衍射光能量太小, 未能测量出。相位掩模板 A 的 0 级衍射光效率小于其 ± 1 级衍射光的 1/10, 相位掩模板 B 的 0 级衍射光效率只是略小于 ± 1 级衍射光。重复上

述实验, 结果见图 6, 两个相位掩模板的 $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 和 α/κ 沿远离相位掩模板方向的变化趋势一致, 只是相位掩模板 A 刻写的 FBG 的 $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 略高于相位掩模板 B, 而 α/κ 略低于相位掩模板 B。这可能是因为较高的 0 级衍射光造成背景折射率增加, 从而使 FBG 的损耗增加。

表 1 相位掩模板的衍射效率

Table 1 Diffraction efficiency of phase mask

Diffraction efficiency	Diffracted order				
	0	± 1	± 2	± 3	± 4
Power of phase mask A / %	3.6	41	3.9	2.3	—
Power of phase mask B / %	27.8	33.7	—	2.4	—

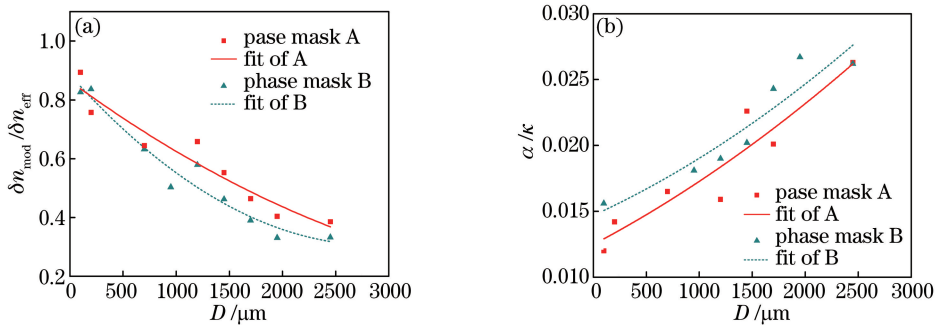


图 6 采用两个相位掩模板刻写 FBG 过程中, (a) $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ 和 (b) α/κ 随光纤与相位掩模板距离 D 的变化

Fig. 6 (a) $\delta n_{\text{mod}}/\delta n_{\text{eff}}$ and (b) α/κ vary with the distance between the phase mask and the fiber core, using the two different phase masks

4.3.3 增敏方式

最后对比载氢和载氧两种增敏方式对 FBG 损耗系数的影响。用高压载氢 4 d 和载氧 4 d 的 SM-

28 光纤在相同条件下分别刻写 FBG, 刻写条件与之前的实验相同: 脉冲能量约为 80 mJ, 脉冲频率为 12 Hz, 光斑长度为 9 mm, 光纤的预施加应力为

0.54 N, 光纤距聚焦透镜约为 142 mm, 并且固定在相位掩模后约 100 μm 的位置。为了更直观地分析增敏方式的影响, 直接列出能明确反映光纤损耗性能的斜率参数 α/κ , 如表 2 所示, 每种增敏方式分别列举了 4 个样品的测量结果。可以看出, 采用载氙的增敏方式刻写的 FBG 在 1550 nm 附近的损耗斜率比载氩的小 50% 以上。

表 2 载氩和载氙 SM-28 刻写的 FBG 的损耗测量结果

Table 2 Loss of FBG inscribed in H₂- and

D₂-loading SM-28 10^{-3}

Enhancing photosensitivity	α/k			
H ₂ -loading for 4 days	10	7.6	9.8	9.7
D ₂ -loading for 4 days	5.1	3.6	4.3	3.6

5 结 论

提出了在线同步监测 FBG 的损耗与折射率增长趋势的方法, 实验结果显示 FBG 的损耗系数 α 随耦合系数 κ 线性增长。优化不同工艺参数得到尽可能小的损耗-耦合斜率系数 α/κ , 有助于在尽可能排除 FBG 反射率影响的情况下降低其损耗系数。本文将 α/κ 作为评判 FBG 损耗性能的标准, 分析了光纤与相位掩模板间距、相位掩模板的衍射光效率和增敏方式工艺过程等对 FBG 损耗性能的影响。结果表明, 增加光纤与相位掩模板距离和使用 0 级衍射光衍射效率更强的相位掩模板都会使 FBG 的损耗系数更大, 这可能是与耦合系数无关的背景折射率增加所致, 而采用载氙的增敏方式可以使 FBG 在 1550 nm 附近的损耗斜率下降 50% 以上。

参 考 文 献

[1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647-649.

[2] Huang J T, Huang X G, Zhao H W. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensors using the interrogation of arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2067-2071.
黄景堂, 黄旭光, 赵华伟. 阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2067-2071.

[3] Liu S, Han X Y, Xiong Y C, *et al.* Distributed vibration detection system based on weak fiber Bragg grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210001.
刘胜, 韩新颖, 熊玉川, 等. 基于弱光纤光栅阵列的

分布式振动探测系统[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210001.

[4] Zhang L, Wei F, Sun G, *et al.* Thermal tunable narrow linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(4): 385-388.

[5] Jiang L Y, Wang L H, Lin Z X, *et al.* Effect of optical feedback on characteristic of the fiber grating external cavity semiconductor laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0701008.
江璐芸, 王凌华, 林中晔, 等. 光反馈对光纤光栅外腔半导体激光器特性的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701008.

[6] Wang Y X, Li T J, Zhong K P. Study and design of a novel wideband tunable dispersion compensation system of fiber Bragg grating[J]. Study on Optical Communications, 2012(1): 46-47.
王耀兴, 李唐军, 钟康平. 宽带可调谐 FBG 色散补偿器系统设计[J]. 光通信研究, 2012(1): 46-47.

[7] Zabezhaïlov M, Tomashuk A, Nikolin I, *et al.* Radiation-induced absorption in optical fibers in the near-infrared region: the effect of H₂- and D₂-loading [C]//Proceedings of the Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2001: 192-194.

[8] Kashyap R. Fiber Bragg gratings [M]. New York: Academic Press, 2009.

[9] Bernard P, Bessard J, Brochu G, *et al.* Active thermography for reliability assessment of high power fiber laser FBG reflectors [C] // Proceedings of the Fiber Laser Applications, 2011, FThE: FThE12.

[10] Dietmar J, Frank K, Hagen R, *et al.* UV-induced absorption, scattering and transition losses in UV side written fiber [C] // Optical Fiber Communication Conference, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 1999, 3: 50-52.

[11] Tan Z W, Li B, Wang Y H, *et al.* Background loss of the fiber induced by the ultraviolet light exposure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(2): 239-242.
谭中伟, 李彬, 王燕花, 等. 光纤的紫外曝光引起的背景损耗[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 239-242.

[12] Ding M, Chen D, Fang Z, *et al.* Photothermal effects in phase shifted FBG with varied light wavelength and intensity[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25370-25379.

[13] Wang D, Ding M, Pi H Y, *et al.* Influence of intracavity loss on transmission characteristics of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. Chinese Physics B, 27(2): 24207-024207.

[14] Eggleton B J, Littler I C M, Gruijic T. Photothermal

- effects in fiber Bragg gratings [J]. Applied Optics, 2006, 45(19): 4679-85.
- [15] Mahakud R, Prakash O, Nakhe S V, *et al.* Analysis on the saturation of refractive index modulation in fiber Bragg gratings (FBGs) written by partially coherent UV beams [J]. Applied Optics, 2012, 51(12): 1828-1835.
- [16] Albert J, Xiong L. Effect of writing beam spatial coherence on fiber Bragg grating modulation contrast and thermal stability [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(11): 2136-2142.