

光学滤波器用超窄带光纤光栅的光谱性能研究

李璇¹, 应康^{1*}, 苏庆帅¹, 张柳欣¹, 皮浩洋¹, 王迪², 蔡海文^{1,3}, 叶青¹¹中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;²中国空间技术研究院西安分院空间微波技术国家级重点实验室, 西安 710100;³张江实验室, 上海 201210

摘要 超窄带光纤布拉格光栅作为一种重要的无源光纤器件, 可以作为优良的光学滤波器。首先在理论分析的基础上, 模拟在光纤布拉格光栅制备过程中引入不同的不均匀紫外辐照, 分析不同紫外辐照分布函数下的光栅光谱性能, 并采用逐点扫描紫外辐照法在不同的辐照不均匀条件下刻写光纤布拉格光栅。结果表明: 紫外辐照的不均匀会极大地影响光纤光栅的光谱性能(带宽、矩形度及边模抑制比等参数), 紫外辐照越不均匀, 光纤光栅的 3 dB 带宽和 25 dB 带宽都越大, 光谱矩形度变差, 边模抑制比降低, 光学滤波器的性能也更差。提出通过对切趾函数进行修正来补偿辐照不均匀的影响。采用该方法能补偿紫外光斑以及光路调整等带来的刻写误差, 使得光纤光栅的谱型得到优化, 将光纤光栅的边模抑制比提高到 30 dB 以上, 满足光学滤波器的应用需求。

关键词 光栅; 光纤器件; 光纤布拉格光栅; 光纤光栅制备; 光学滤波器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221206

1 引言

超窄带光学滤波器作为光信号处理的关键器件, 在微波光子学、相干通信和密集波分复用等领域有着重要的用途^[1-4]。随着微波光子学领域的飞速发展, 以及对光信号处理的精细化要求越来越高, 对于光学滤波器的性能参数也提出了更高的要求。为了降低主峰信号与其他信道的串扰和带宽内信号的失真, 需要超窄带光学滤波器的通带平坦度足够高, 通带的边模抑制比既要非常高(大于 30 dB)又必须陡峭, 这样才能达到最佳的使用效果^[5-6]。

光纤布拉格光栅(FBG)作为全光纤化的关键无源器件, 有体积小、插入损耗低、易与其他光纤器件连接等优点, 因此在光纤光学领域有着多种用途^[7], 同时也是一种常见的带通光学滤波器。目前, 常用的可实现光学滤波器功能的 FBG 主要有相移光纤光栅(PS FBG)^[8-10]、法布里-珀罗光纤光栅(F-P FBG)^[11]和均匀窄带 FBG。PS FBG 和 F-P FBG 在光栅反射带宽内有一个或者多个透射窗口, 这些透射窗口的带宽可达 100 MHz 以下, 因此可以得到超窄的滤波通带。均匀窄带 FBG 利用切趾技术可以获得矩形度良好的频谱响应, 同时增加栅区长度也可以得到超窄带平顶光谱, 达到高信噪比的激光滤

波效果。在过去十几年中, 科研工作者利用 FBG 设计了各种超窄带光学滤波器。王迪等^[12]采用紫外(UV)曝光后处理法, 通过精确控制激光光斑大小和曝光时间在 FBG 中引入多相移, 获得插入损耗较小、矩形度较高的窄带平顶滤波响应所需要的 PS FBG。殷宇等^[13]通过矩阵分析法, 利用常用切趾函数对 F-P FBG 滤波器的反射特性进行优化, 提高了 F-P FBG 滤波器的性能。陈鹏等^[14]将相位误差补偿技术引入取样切趾光栅实现超窄带滤波器的设计与制作过程, 利用重构等效啁啾技术将窄带光栅滤波器的相位误差从补偿前的 $\pm 1.5\pi$ 降到了补偿后的 $\pm 0.1\pi$ 以内, 得到了反射谱、透射谱对称性良好的超窄带光栅滤波器。但是, 对于超窄带光学滤波器的应用, 要得到带内平坦、带外抑制比高的矩形频谱响应, 则对 FBG 的光谱和性能参数要求极高。在 FBG 制备过程中, 无论是采用相位掩模板紫外辐照法, 还是逐点扫描法, 都对刻写光路的稳定性、紫外光斑的均匀性、切趾过程的精确性有着极高的要求^[15]。刻写误差会导致光栅光谱性能降低, 从而直接影响信号的质量。

本文利用固体激光器逐点扫描法来制备均匀窄带 FBG, 发现紫外光斑以及刻写光路的精确性和稳定性都会影响到光纤栅区受到的紫外辐照的均匀性,

收稿日期: 2022-09-02; 修回日期: 2022-10-08; 录用日期: 2022-10-17; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB0408300)、国家自然科学基金(62175246, 61805260)、上海市自然科学基金(22ZR1471100)、中国科学院青年创新促进会基金(YIPA2021244)

通信作者: *yingk0917@siom.ac.cn

因此重点分析了紫外辐照不均匀性对 FBG 光谱性能的影响。通过理论仿真对引入不同紫外辐照不均匀性的 FBG 的光谱进行了分析,并采用逐点扫描紫外辐照法在不同的辐照不均匀条件下刻写 FBG。并利用分析结果对切趾函数进行修正,达到补偿辐照不均匀性的目的,实现光栅光谱性能提升的效果。利用所提方法,通过修正切趾函数来制备 FBG,能补偿紫外光斑以及光路调整等带来的刻写误差,将光纤光栅的边模抑制比提高到了 30 dB,提升了光学滤波器的性能。

2 理论分析与实验仿真

不同切趾函数的有效性可以用传输矩阵法进行模拟。FBG 的折射率分布表示为

$$n(z) = \bar{n}(z) + \bar{n}_1 f(z) \cos(k_B z), \quad (1)$$

式中: $n(z)$ 为 FBG 沿光栅方向位置 z 处的周期性折射率分布; $\bar{n}(z)$ 为光致折射率改变的本底,它是位置 z 的慢变函数; \bar{n}_1 为光致折射率调制深度;布拉格波矢定义为 $k_B = 2\pi/\Lambda$,其中 Λ 为光栅周期;函数 $f(z)$ 表示不同的切趾函数,切趾的作用可以理解为一个以不同空间频率合成的光栅。

当光栅紫外曝光刻写过程中,由于光斑本身的不均匀性、光路的精确性等因素,紫外激光辐照不均匀是经常遇到的,这样就会引入不均匀的紫外辐照分布^[16]。由此产生的本底辐照使布拉格波长在光栅长度方向上呈现非均匀分布: $\lambda_B(z) \propto 2\bar{n}(z)\Lambda$ 。假设函数 $F(z)$ 为折射率本底辐照的不均匀分布函数,则光致折射率改变的本底变为 $\bar{n}'(z) = n_0 + \Delta n F(z)$,其中 n_0 为光纤纤芯的有效折射率, Δn 为光致折射率微扰,而光致折射率调制深度 $\bar{n}'_1 = \bar{n}_1 F(z)$ 。则当紫外激光辐照不均匀时,FBG 的折射率分布为

$$n(z) = \bar{n}(z) + \bar{n}'_1 f(z) \cos(k_B z) = n_0 + \Delta n F(z) + \bar{n}_1 F(z) f(z) \cos(k_B z), \quad (2)$$

因此,当引入紫外辐照不均匀函数 $F(z)$ 时,既会影响光致折射率本底,也会影响光致折射率调制深度。通过传输矩阵法,根据式(2)利用 MATLAB 仿真软件理论分析不同情况下的 $F(z)$ 函数分布对光栅光谱性能的影响。

设 FBG 栅区长度为 40 mm,光纤纤芯有效折射率 $n_0 = 1.45$,光致折射率微扰 Δn 设 $= 5 \times 10^{-5}$,光致折射率调制深度大小影响反射率,统一反射率约为 -20 dB,设置不同的光致折射率调制深度 \bar{n}_1 ,切趾函数 $f(z)$ 采用 sinc 函数。将 $F(z)$ 函数归一化,假设 $F(z)$ 函数在光栅长度方向上随光栅栅区位置线性变化, k 表示其线性变化的斜率值。紫外辐照不均匀分布函数 $F(z)$ 分别如图 1(a)和图 1(b)所示,采用 sinc 函数

切趾来理论模拟出的反射谱结果如图 1(c)和图 1(d)所示,其中对应 $k=0$ 的光纤光栅反射谱曲线图是理论上紫外辐照均匀的条件下采用 sinc 函数切趾补偿后的光谱图。

带宽、矩形度和边模抑制比是衡量光学滤波器的重要参数指标。根据图 1 两种 $F(z)$ 函数的分布情况,可以发现上述引入的 $F(z)$ 函数会极大地影响滤波器的带宽、矩形度和边模抑制比。本文用光栅反射谱两边边带陡峭度 N 的大小来评估光谱的矩形度,其定义为 $N = \frac{22}{(B_{25} - B_3)/2}$,其中 B_{25} 为 25 dB 带宽值, B_3 为 3 dB 带宽值,边带陡峭度 N 即代表着光纤光栅反射谱边带的斜率。边带陡峭度 N 值越大,光谱矩形度越好,即滤波器的性能越优。图 1(e)和图 1(f)分别是 $F(z)$ 函数为图 1(a)和图 1(b)两种分布时的光纤光栅反射光谱的 3 dB 带宽、25 dB 带宽以及边带陡峭度 N 的变化趋势分析图。从图中可以看出,当光栅长度保持不变,光纤光栅反射率也保持一致(约 -20 dB)时,随着紫外辐照分布函数 $F(z)$ 的不均匀程度的增大(即 $F(z)$ 函数线性斜率 k 增大),折射率调制深度 \bar{n}_1 大小误差增大,光纤光栅的 3 dB 带宽和 25 dB 带宽也增大,同时光栅的边带陡峭度 N 减小,光栅谱型的矩形度变差。当 $F(z)$ 函数为如图 1(a)所示分布时, $F(z)$ 函数线性斜率 k 从 0.005 增大到 0.025,光纤光栅的 3 dB 带宽从 41.8 pm 增大到 54 pm,25 dB 带宽从 67.1 pm 增大到 82.3 pm,边带陡峭度 N 从 1.865 dB/pm 逐渐减小到 1.555 dB/pm。当 $F(z)$ 函数为如图 1(b)所示分布时, $F(z)$ 函数线性斜率 k 从 0.01 增大到 0.05,光纤光栅的 3 dB 带宽从 44.3 pm 增大到 58.9 pm,25 dB 带宽从 69.9 pm 增大到 120.1 pm,边带陡峭度 N 从 1.76 dB/pm 逐渐减小到 0.719 dB/pm,光栅反射谱型劣化更为明显。此外,在图 1(c)和图 1(d)所示的光谱图中,随着紫外辐照分布函数 $F(z)$ 的变化,光栅的边模抑制比也受到了很大的影响,短波边和长波边均产生了较大的旁瓣,因而光栅的光谱性能变差,滤波效果也变得更差。因此,想要得到较好的光栅谱型和理想的窄带滤波效果,必须将 $F(z)$ 函数线性斜率 k 控制得越小越好。

在实际的光栅制备过程中,由于各种类型的误差存在甚至叠加,紫外辐照分布函数 $F(z)$ 并不像上述模拟的情况一样呈线性变化。理论模拟简化了 $F(z)$ 函数来比较直观地观察紫外辐照分布不均匀带来的光谱带宽和边模的变化情况。

在实际的光栅制备过程中,由于各种类型的误差存在甚至叠加,紫外辐照分布函数 $F(z)$ 并不像上述模拟的情况一样呈线性变化。理论模拟简化了 $F(z)$ 函数来比较直观地观察紫外辐照分布不均匀带来的光谱带宽和边模的变化情况。

3 实验结果与讨论

在实验中,采用固体激光器逐点扫描法刻写光纤光栅,光路系统示意图如图 2 所示。固体激光器发出

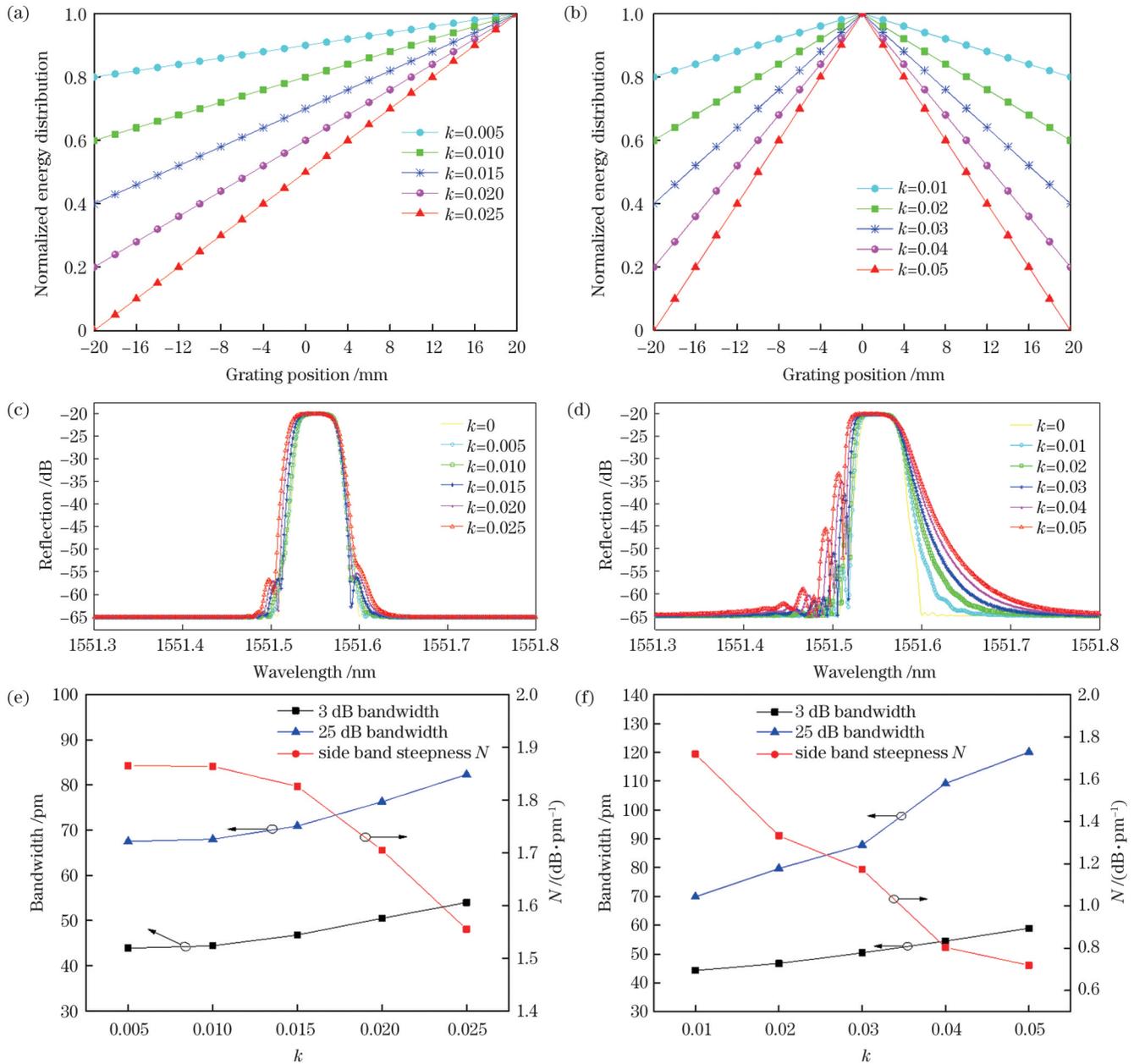


图 1 不同紫外辐照分布函数 $F(z)$ 曲线对应的的光纤光栅反射光谱图与其 3 dB 带宽、25 dB 带宽、边带陡峭度 N 变化趋势。(a), (b) 不同线性紫外辐照分布函数 $F(z)$; (c), (d) 对应 $F(z)$ 函数下模拟的光纤光栅光谱图; (e), (f) 对应 $F(z)$ 函数下的光纤光栅反射光谱的 3 dB 带宽、25 dB 带宽及边带陡峭度 N 变化趋势

Fig. 1 FBG reflection spectra corresponding to different UV irradiation distribution functions $F(z)$ and their 3 dB bandwidth, 25 dB bandwidth, side band steepness N trend analysis. (a), (b) Different linear UV irradiation distribution functions $F(z)$; (c), (d) corresponding FBG reflection spectra simulated under different $F(z)$ functions; (e), (f) corresponding change trend analysis for 3 dB bandwidth, 25 dB bandwidth and side band steepness N of FBG reflection spectra under different $F(z)$ functions

的紫外光经过直径为 $500\ \mu\text{m}$ 的小孔光阑后,再经全反射镜照射到相位掩模板后面的光纤上,光纤两端分别用夹具固定在三维调整位移台上,全反射镜安装在高精度气动位移平台上,随高精度气动位移平台沿光纤长度方向移动,如图 3(a) 所示,并且在移动过程中保持光斑都照射在光纤上。光栅刻写时采用二次曝光法,通过控制软件程序控制气动位移平台的移动速度来控制光斑的移动速度,即切趾函数为 $f(z)$,采用速度 $v_1(z)$ 进行刻写, $v_1(z) = v_0/f(z)$, v_0 为初始设置的速

度,是与刻写时间和光纤折射率调制深度有关的常量,从而实现光栅栅区规律、平滑的折射率调制。之后去掉相位掩模板,按补偿函数 $f_b(z) = 1 - f(z)$,即以速度 $v_2(z) = \frac{v_0}{f_b(z)} = v_0/[1 - f(z)]$ 再次移动位移平台进行二次曝光,移动的起始位置和结束位置与前一次相同。两次曝光结束,即完成切趾补偿的过程。经紫外光斑照射的长度即为光栅的栅区长度。紫外光斑呈高斯分布,如图 3(b) 所示。

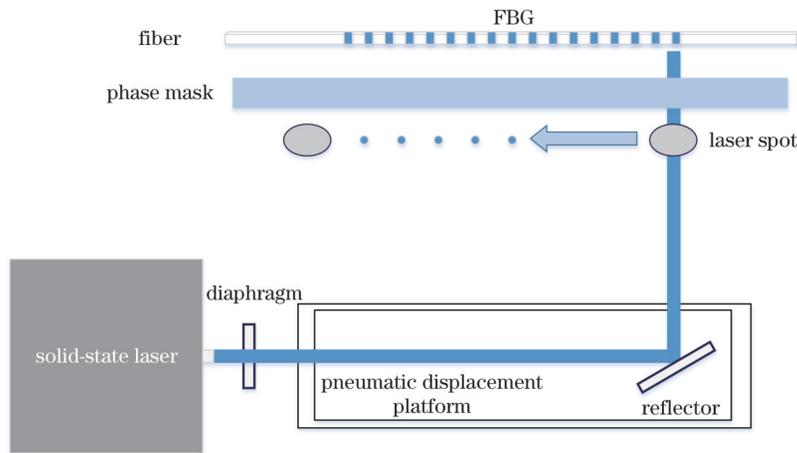


图 2 固体激光器逐点扫描法刻写 FBG

Fig. 2 Point-by-point writing of FBG by solid-state laser

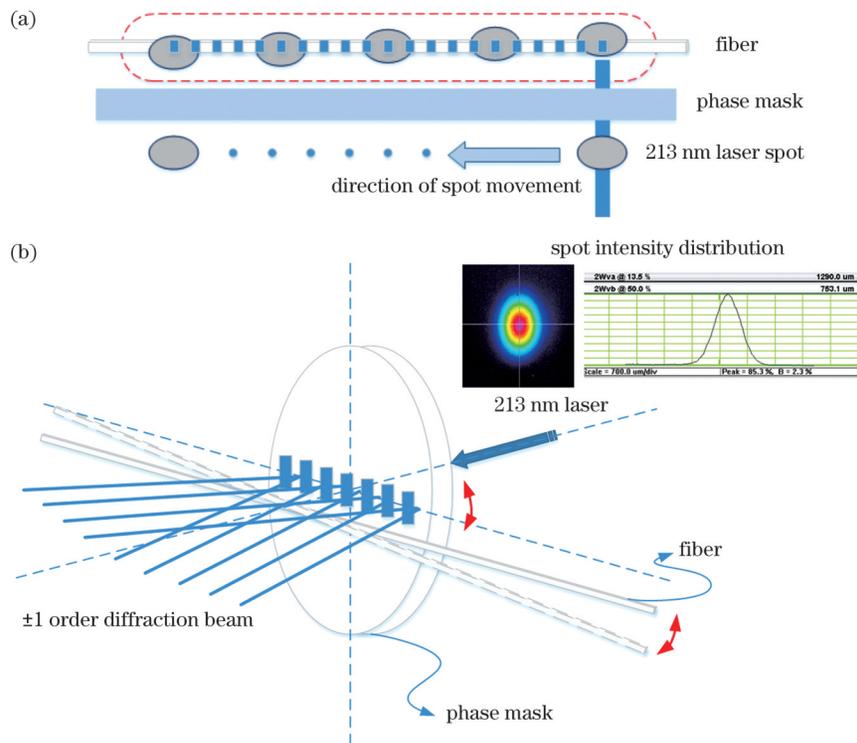


图 3 紫外辐照过程中可能出现的辐照不均匀现象。(a) 固体激光器扫描法扫描光斑移动过程中引入的辐照不均匀；(b) 光纤与相位板不平行引入的辐照不均匀

Fig. 3 Possible irradiation inhomogeneity caused during UV irradiation. (a) Irradiation inhomogeneity introduced by scanning spot in solid-state laser scanning; (b) irradiation inhomogeneity introduced by misalignment between optical fiber and phase mask

当刻写过程中,由于光路调整的精度和误差,紫外光斑沿光纤方向的移动与光纤不平行时[如图 3(a)所示],或者光纤与相位掩模板不完全平行时[如图 3(b)所示],就会造成光纤长度方向受到的紫外辐照不均匀,即引入了刻写误差,造成了光谱带宽变宽、边模抑制比降低、矩形度变差等光谱劣化现象。特别是当刻写超窄带滤波器用均匀 FBG 时,其刻写长度增加,对紫外辐照的均匀性要求更高,微小的光路误差都会造成光谱性能的劣化。

制备光栅采用的光纤是载氢后的康宁 SMF-28 光纤,固体激光器的输出波长为 213 nm,相位掩模板周

期为 1077 nm,光栅刻写长度为 40 mm,相位掩模板对于 213 nm 紫外光 ± 1 级衍射效率 $> 38\%$ 。在实验中,如图 4 所示,通过特意调整两端光纤夹具高低,让紫外光斑沿光纤长度方向的移动与光纤不完全平行,并不断增大光纤倾斜的角度来增大误差量。由于紫外光斑强度如图 3(b)所示呈高斯分布,光纤位于光斑正中心时,纤芯受到的紫外辐照强度最大,当光纤倾斜时,随着倾斜角度的增大,光纤逐渐远离光斑中心,即光纤纤芯受到的辐照强度不断变小。在光栅制备过程中,为了更好地比较光栅光谱特性,在不同的辐照不均匀条件下,改变高精度位移平台的移动速度来刻写相同反

射率(约-20 dB)的FBG,通过采用分辨率为0.12 pm (15 MHz)的光谱仪(APEX Technologies, AP-2041B)

来测试FBG的反射谱,其光源采用线宽为500 kHz的光谱仪自带光源。

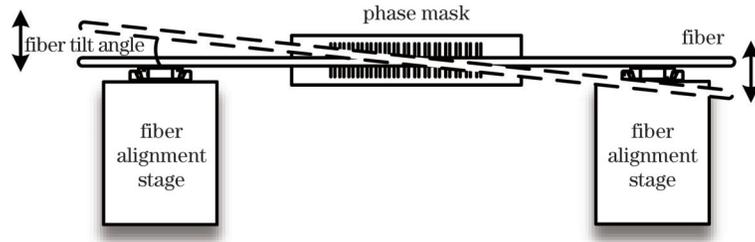


图4 光纤倾斜角度调节

Fig. 4 Adjustment of optical fiber tilt angle

实验在图1(a)所示紫外辐照分布函数条件下刻写均匀FBG,并测量反射谱。实验过程中,光栅栅区的一端(光栅某一起始点)光纤尽量一直处于紫外辐照光斑的最中心位置,即让这一端点光纤纤芯受到的辐照光强最强;光栅栅区的另一端点的光纤处于光斑的边缘位置,并不断远离中心,即让这一端点光纤纤芯受到的辐照光强不断变小。实验中引入的切趾函数 $f(z)$ 采用sinc函数。

假设光斑移动的方向为水平方向,按上述方法将光纤调倾斜,倾斜角度分别为 0.114° 、 0.229° 、 0.344° 、

0.458° 、 0.573° 。图5(a)即为光纤不同倾斜角度下刻写的光纤光栅反射谱,通过分析各个光栅反射谱的3 dB带宽值、25 dB带宽值和边带陡峭度 N [如图5(b)所示],可以看出随着光纤倾斜角度的增大,3 dB带宽从83.2 pm增大到122 pm,25 dB带宽从156 pm增大到227 pm,而光谱的边带陡峭度 N 从0.604 dB/pm减小到0.419 dB/pm,即光栅反射谱的矩形度劣化。这样不利于刻写出满足超窄带宽和高矩形度要求的光栅,刻写出的光栅作为光学滤波器的性能也会变得更差。

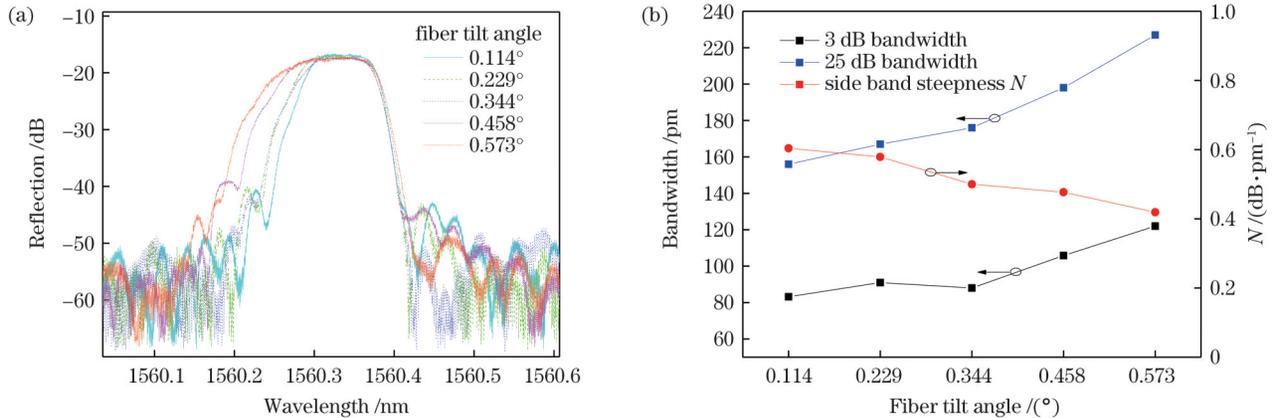


图5 在图1(a)所示紫外辐照分布函数条件下,光纤不同倾斜角度下刻写的FBG反射谱及光栅参数变化趋势。(a)光纤不同倾斜角度下刻写的光栅反射谱;(b)在不同倾斜角度下光栅反射谱的3 dB带宽、25 dB带宽及边带陡峭度 N 变化趋势

Fig. 5 Reflection spectra and change trends of grating parameters of FBGs written at different fiber tilt angles with UV irradiation distribution function shown in Fig. 1(a). (a) Reflection spectra of FBGs written at different fiber tilt angles; (b) change trends of 3 dB bandwidth, 25 dB bandwidth and side band steepness N for spectra of FBGs written at different fiber tilt angles

同样地,针对图1(b)的紫外辐照分布不均匀的情况也进行了实验验证,通过光纤倾斜让光栅栅区正中间的点受到最强的紫外辐照,而栅区两端光纤辐照逐渐减弱。光纤的倾斜角度分别为 0.114° 、 0.229° 、 0.458° 、 0.688° 、 0.916° ,刻写出的光栅反射谱图如图6(a)所示,光栅参数变化趋势分析如图6(b)所示。从图6可以看出,当光纤与光斑移动方向的倾斜角度逐渐增大,即在光斑移动过程中栅区长度方向光强差异增大时,3 dB带宽从76.3 pm增大到118.6 pm,25 dB带宽从146 pm增加到239 pm,光谱边带陡峭度 N 从0.631 dB/pm减小到0.365 dB/pm,即反射光谱的矩形度降低。并且

从光谱中可以看出,长波边带的斜率越来越大,短波边带的边模旁瓣也逐明显渐增大,与图1(d)理论模拟结果较为吻合。

由于实际刻写过程中可能存在紫外光斑分布不均匀的误差和光路及平台移动引起的相位误差,甚至刻写环境微弱变化也能造成一定的刻写误差,因此理论模拟只是一种最简化的形式,实际的刻写影响因素引起的误差要复杂得多。实验制备的光栅图谱与模拟出的光栅图谱会有一定差异,但是影响光栅整体性能的几个参数(如3 dB带宽、25 dB带宽、边模抑制比、边带陡峭度等)随着误差的变化而变化的趋势是相同的。

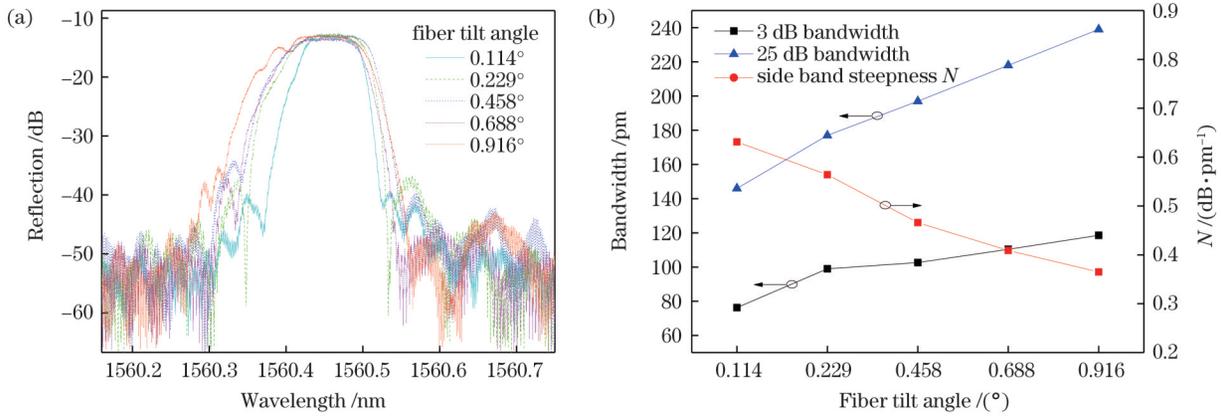


图6 在图1(b)所示紫外辐照分布函数条件下,光纤不同倾斜角度下刻写的FBG反射谱及光栅参数变化趋势。(a)光纤不同倾斜角度下刻写的光栅反射谱;(b)在不同倾斜角度下光栅反射谱的3 dB带宽、25 dB带宽及边带陡峭度 N 变化趋势
 Fig. 6 Reflection spectra and change trend of grating parameters of FBGs written at different fiber tilt angles with UV irradiation distribution function shown in Fig. 1(b). (a) Reflection spectra of FBGs written at different fiber tilt angles; (b) change trends of 3 dB bandwidth, 25 dB bandwidth and side band steepness N for spectra of FBGs written at different fiber tilt angles

光栅刻写过程中引入的误差最终都会造成光纤栅区不同位置受到的辐照能量不均匀,从而会大大影响光栅的光谱谱型,特别是针对需要超窄带宽、高矩形度和边模抑制比的光学滤波器用光纤光栅,光栅谱型的劣化会极大地影响其性能。为了进一步验证以上结果,在刻写过程中考虑紫外光斑辐照的不均匀,对切趾过程进行修正,以补偿光斑不均匀性或光路条件误差造成的影响,达到改善光栅谱型的效果。

紫外光辐照的不均匀通常是中部高的凸起状分布,它将继而引起折射率本底和折射率调制沿光栅长度方向的不均匀分布。当紫外辐照不均匀分布函数 $F(z)$ 的具体分布已知时,就可以将不均匀分布函数代入到正常的切趾函数中,形成修正后的切趾函数 $f'(z)=f(z)/F(z)$ 和修正后的补偿函数 $f'_B(z)=[1-f(z)]/F(z)$,根据修正后的切趾函数和补偿函数来得到位移平台修正后的移动速度,补偿紫外曝光不均匀带来的刻写误差。

在实验中能量计测量了紫外辐照的强度,并计算得到紫外光斑辐照不均匀函数 $F(z)$,如图7(a)所示。再根

据 $F(z)$ 得到修正后的切趾函数 $f'(z)$ 和修正后的补偿函数 $f'_B(z)$,并根据修正后的切趾函数和补偿函数得到修正后的位移平台移动速度,用于刻写光纤光栅,得到的FBG的反射光谱如图7(b)中实线所示。图7(b)中的虚线是在相同初始设置速度 v_0 的情况下用正常sinc切趾补偿函数刻写的FBG的反射光谱。在引入修正的切趾函数之前,刻写得到的光栅3 dB带宽为88.22 pm,25 dB带宽为195.41 pm,边模抑制比约13.2 dB,边带陡峭度 N 约为0.4105 dB/pm。当采用上述方法修正后,刻写得到的光栅3 dB带宽为96.22 pm,25 dB带宽为150.92 pm,边模抑制比大于30 dB,边带陡峭度 N 提升至0.8044 dB/pm。由图7(b)中曲线对比可以看出,经光斑辐照不均匀函数修正后刻写的光栅,其光谱的边模抑制比和矩形度提升较大,从而验证了前述理论与实验结果。

另外,由图7(b)可以看出,虽然修正后得到的光谱边模抑制比和矩形度提高了,但是3 dB带宽并没有减小,原因分析如下:两次刻写的初始设置速度 v_0 是相同的。当考虑紫外光斑辐照不均匀函数 $F(z)$ 时补偿

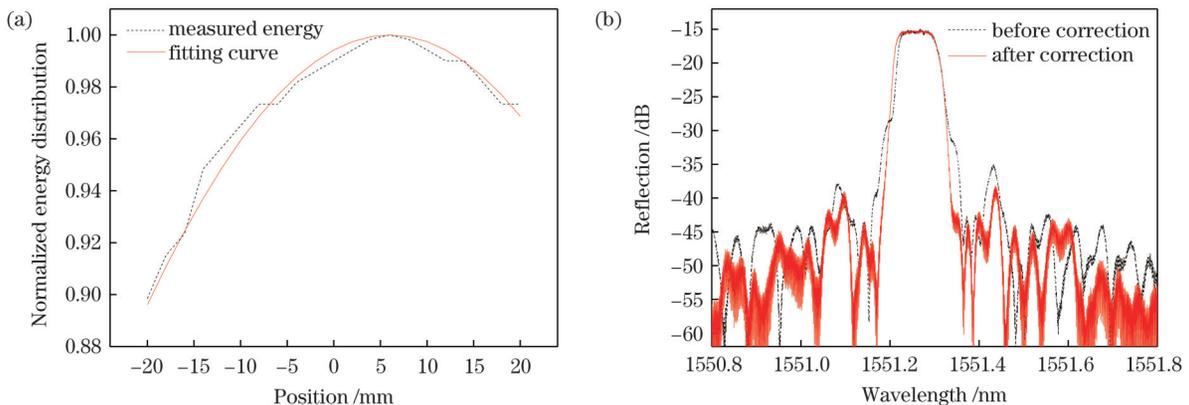


图7 实测的紫外辐照不均匀分布情况及补偿效果。(a)实测的紫外辐照不均匀分布情况及拟合的不均匀函数 $F(z)$;(b)修正前后刻写的FBG的反射谱
 Fig. 7 Measured non-uniform distribution of UV irradiation and effect of compensation. (a) Measured non-uniform distribution of UV irradiation and fitted non-uniform function $F(z)$; (b) reflection spectra of FBGs written before and after correction

了两端的曝光量,即两端相对增加曝光时间,使整个光纤在沿光纤长度方向的栅区长度上曝光量接近完美切趾时的效果。在初始速度相同的情况下,引入 $F(z)$ 函数切趾后的光栅整体曝光量增加,即折射率调制深度增加,其光栅反射率会略深,3 dB 带宽相应略微增大。

4 结 论

采用逐点扫描法制备光栅时,由于紫外光斑不均匀性或光路调整误差,造成光纤纤芯成栅过程中受到的光致折射率调制不均匀,从而导致制备的FBG的光谱出现劣化。本文根据光学滤波器用的超长超窄带FBG的刻写需求,对上述现象开展了理论与实验分析。通过测量和计算得到辐照到光纤纤芯的紫外光斑辐照不均匀分布函数,将其代入切趾过程中,利用修正后的切趾函数来补偿紫外光斑辐照不均匀或光路调整误差造成的影响,使得光纤光栅的谱型得到优化,达到光栅光谱高边模抑制比和高矩形度的要求。基于上述方法所制备的光纤光栅矩形度高,边模抑制比大于30 dB,若要进一步得到超窄带宽的FBG,只需增加光栅栅区长度即可。所提出的制备超窄带FBG的方法实现简单,能解决刻写光路难以高精度调整的问题,克服激光器本身光斑分布不均匀的影响,大大提高光学滤波器用超窄带光纤光栅的应用能力。

参 考 文 献

- [1] Ren Z B, Sun Y H, Zhang S Q, et al. Active optical switches based on polarization-tuned guided-mode resonance filters for optical communication[J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 383-387.
- [2] 张梓平, 牛晓晨, 黄杰, 等. 基于光纤环谐振腔的高性能微波光子滤波器[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2106001.
Zhang Z P, Niu X C, Huang J, et al. High-performance microwave photonic filter based on fiber ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2106001.
- [3] 游关红, 彭万敬, 邹辉. 基于光学滤波器的扫频光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 010006.
You G H, Peng W J, Zou H. Research progress of frequency-swept fiber lasers based on optical filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 010006.
- [4] Liu Z Y, Tam H Y, Htein L, et al. Microstructured optical fiber sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3425-3439.
- [5] Wang G C, Wang Y N, Ying K, et al. Robust single-sideband-modulated Raman light generation for atom interferometry by FBG-based optical rectangular filtration[J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 28658-28667.
- [6] Wei W, Yi L L, Jaouën Y, et al. Bandwidth-tunable narrowband rectangular optical filter based on stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23249-23260.
- [7] Kashyap R. *Fiber Bragg gratings*[M]. New York: Academic Press, 2012.
- [8] Wei L, Lit J W Y. Phase-shifted Bragg grating filters with symmetrical structures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1405-1410.
- [9] Bakhti F, Sansonetti P. Design and realization of multiple quarter-wave phase-shifts UV-written bandpass filters in optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1433-1437.
- [10] Poulin M, Painchaud Y, Aubé M, et al. Ultra-narrowband fiber Bragg gratings for laser linewidth reduction and RF filtering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7579: 75791C.
- [11] Xie X J, Dai Y T, Ji Y, et al. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39-GHz optical frequency comb[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 661-663.
- [12] 王迪, 应康, 李文屏, 等. 多相移光纤光栅滤波器的设计与制备[J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2206002.
Wang D, Ying K, Li W P, et al. Design and inscription of optical filters based on multi-phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2206002.
- [13] 殷宇, 余震虹. 切趾技术对光纤布拉格光栅法布里-珀罗滤波器反射特性优化的研究[J]. *光学技术*, 2017, 43(3): 256-259.
Yin Y, Yu Z H. Reflection characteristics optimization of Fabry-Perot filter based on fiber Bragg grating by apodization[J]. *Optical Technique*, 2017, 43(3): 256-259.
- [14] 陈鹏, 王荣, 蒲涛, 等. 基于相位误差补偿技术的超窄带光栅滤波器的制作[J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 2076-2082.
Chen P, Wang R, Pu T, et al. Fabrication of super-narrow bandwidth grating filter based on phase error correction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 2076-2082.
- [15] 王迪, 皮浩洋, 李璇, 等. 光纤布拉格光栅损耗特性的测量与分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0606004.
Wang D, Pi H Y, Li X, et al. Measurement and analysis of loss in fiber Bragg gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0606004.
- [16] Fang Z J, Chin K K, Qu R H, et al. *Fundamentals of optical fiber sensors*[M]. Weinheim: Wiley, 2012.

Study on Spectral Properties of Ultra-Narrow-Band Fiber Bragg Gratings for Optical Filters

Li Xuan¹, Ying Kang^{1*}, Su Qingshuai¹, Zhang Liuxin¹, Pi Haoyang¹, Wang Di², Cai Haiwen^{1,3},
Ye Qing¹

¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, CAST-Xi'an, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

³Zhangjiang Laboratory, Shanghai 201210, China

Abstract

Objective Ultra-narrow-band optical filters are key components for signal processing in the fields of microwave photonics, coherent

communication and dense wavelength-division multiplexing. The ideal ultra-narrow-band optical filter has a rectangular frequency response composed of an ultra-flat passband and a very steep edge. The flat passband has high signal fidelity and can prevent the signal from being distorted, whereas the steep edge can suppress the crosstalk between adjacent bands. Fiber Bragg gratings (FBGs) that achieve various frequency responses are commonly used in bandpass optical filters owing to their small size, low insertion loss and compatibility with other optical fiber devices and systems. However, for the application of ultra-narrow-band optical filters, the spectral and performance parameters of FBG are extremely demanded to obtain the rectangular spectral response with flat passband and high side-mode suppression ratio (SMSR). In the process of FBG fabrication, the stability of the writing optical path, the uniformity of the ultraviolet (UV) spot and the accuracy of apodization process are highly required whether the UV irradiation method of the phase mask or the point-by-point scanning method is adopted. The writing error will lead to the reduction of the spectral performance of the grating, which directly affects the quality of the signal. Therefore, the influence of UV irradiation inhomogeneity on the spectral properties of FBG is analyzed in this paper.

Methods Solid-state laser point-by-point writing method is used for the fabrication of uniform narrow-band optical FBG. The uniformity of UV spot and the accuracy and stability of the optical path will affect the optical fiber grating refractive index modulation distribution, thus affecting the performance of FBG spectrum. By theoretical simulation, the influence of different UV irradiation inhomogeneity on the spectrum of FBG is analyzed. The apodization function is modified based on the analysis results to compensate for the effect of irradiation inhomogeneity, so as to achieve the improvements of the grating spectral performance. Using the proposed method, FBG is prepared after correcting the apodization function, which can compensate the writing errors caused by UV spot and optical path adjustment, and the SMSR of FBG is increased to 30 dB, greatly improving the performance of optical filter.

Results and Discussions When the UV irradiation inhomogeneity function $F(z)$ is introduced, it will not only affect the photo-induced refractive index background, but also affect the modulation depth of the photo-induced refractive index. Through the transmission matrix method, the influence of $F(z)$ function distribution on the spectral performance of the FBG under different conditions is theoretically analyzed by MATLAB simulation software according to Eq. (2). As can be seen from Fig. 1, when the length of the grating remains unchanged and the reflectance of the FBG remains the same (about -20 dB), the error of the refractive index modulation depth \bar{n}_1 increases with the increase of the inhomogeneity, that is, the increase of the linear slope k of the $F(z)$ function. The 3 dB bandwidth and 25 dB bandwidth of the FBG also increase, the side band steepness N of the grating decreases, and the rectangularity of the reflection of the grating becomes worse. In experiments, by specifically adjusting the height of the fiber fixture on both ends (Fig. 4), UV irradiation error is introduced. Thus the FBG reflection spectra and the change trend of grating parameters are obtained for FBGs written at different fiber tilt angles. The experimental results show that with the increase of the fiber tilt angle, the 3 dB bandwidth and 25 dB bandwidth gradually increase, and the side band steepness decreases, that is, the rectangularity of the grating reflection spectrum deteriorates. This is not conducive to the writing of gratings with ultra-narrow bandwidth and high rectangularity requirements which are important performances for optical filter applications. In further experiments, the UV spot irradiation inhomogeneity function $F(z)$ is calculated according to the energy meter measurement results. By modifying the apodization function based on $F(z)$, the 3 dB bandwidth of the obtained FBG is 96.22 pm, the 25 dB bandwidth is 150.92 pm, the SMSR is greater than 30 dB, and the side band steepness N is increased to 0.8044 dB/pm. As can be seen from the comparison in Fig. 7, the SMSR and rectangularity of the grating spectrum written after the correction of spot irradiation inhomogeneity function are much improved, which also verifies the theoretical and experimental results.

Conclusions According to the requirements of ultra-narrow-band FBG used in optical filters, the inhomogeneity of refractive index modulation caused by UV spot or optical path adjustment in grating fabrication by point-by-point scanning method is analyzed theoretically and experimentally. We propose to modify the apodization function based on the UV spot irradiation inhomogeneity function $F(z)$ to compensate for the effect of irradiation inhomogeneity. The FBG fabricated by the above method has a high rectangularity and the SMSR is greater than 30 dB. To further obtain an ultra-narrow-band FBG, only the length of the grating region needs to be increased. The method of fabricating ultra-narrow-band FBG is simple, which can solve the difficulty of high-precision adjustment of the writing optical path and reduce the influence of non-uniform spot distribution of the laser itself, and greatly improve the application ability of ultra-narrow-band FBG for optical filters.

Key words gratings; fiber optic component; fiber Bragg grating; fabrication of fiber Bragg grating; optical filter