

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.14

倾斜切趾光纤光栅的理论实验研究

张鹏浩, 陈爽, 武洪波

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对飞秒激光刻写均匀光纤布拉格光栅的反射主峰存在较高旁瓣, 容易对主峰形成串扰的问题, 开展基于倾斜切趾光纤光栅的理论实验研究。根据飞秒激光诱导产生的折射率特点, 修正耦合模模型中的交流耦合系数, 并利用有限元仿真的形式, 验证了倾斜切趾法的切趾类型为高斯型。之后对影响切趾效果的关键参数进行实验研究, 结果表明: 实验结果与仿真计算基本一致; 初始横向位移为 $5\sim 10\ \mu\text{m}$, 且不对称偏移量小于 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 时, 边模抑制比可提高到 15 dB。研究成果为提高光纤光栅边模抑制比提供了重要理论支撑与实践指导, 对于推动光纤光栅制备工艺技术发展具有重要意义。

关键词: 飞秒激光; 切趾光纤光栅; 边模抑制比

中图分类号: TB96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)05-0119-06

Theoretical and experimental study on oblique apodized fiber Bragg gratings

ZHANG Penghao, CHEN Shuang, WU Hongbo

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The theoretical and experimental research based on the oblique apodized fiber Bragg gratings (FBG) is carried out, in order to solve the crosstalk to the main peak from the high reflected sidelobe of the uniform fiber Bragg gratings written by femtosecond laser point-by-point. According to the characteristics of the refractive index induced by femtosecond laser, the AC coupling coefficient in the coupled mode model is modified. The apodization type of the oblique apodization method is verified to be Gaussian by finite element simulation. Then the key parameters affecting the apodization effect are studied experimentally. The results show that the experimental results are basically consistent with the simulation results, and when the initial lateral displacement is between $5\ \mu\text{m}$ and $10\ \mu\text{m}$ and the asymmetric offset is less than $\pm 2\ \mu\text{m}$, the side mode suppression ratio can be improved to 15 dB. The research results provide important theoretical support and practical guidance for improving the side mode suppression ratio, and are of great significance for promoting the development of fabrication technology of FBG.

Key words: femtosecond laser; apodized fiber Bragg grating; side mode suppression ratio

0 引言

光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高和抗电磁干扰等优点^[1-3]。光纤布拉格光栅是一种常见的光纤传感器敏感结构形式, 在航空航天、土木工程和生命健康等领域获得了广泛应用^[4-7]。飞秒激光具有脉冲极短、峰值功率极高的特点,

使用飞秒激光照射光纤材料, 当激光能量高于光纤材料的损伤阈值时, 在飞秒激光曝光的区域, 光纤材料会熔化, 随后迅速凝固收缩, 形成永久性的折射率调制。基于飞秒激光逐点法刻写制备光纤光栅的技术具有易操作、灵活性高等特点, 已成为研究的重点。深圳大学的王义平等利用飞秒激光逐点法, 在 $1510\sim 1590\ \text{nm}$ 波长范围内制

收稿日期: 2022-09-25; 修回日期: 2022-10-11

引用格式: 张鹏浩, 陈爽, 武洪波. 倾斜切趾光纤光栅的理论实验研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 119-124.

Citation: ZHANG P H, CHEN S, WU H B. Theoretical and experimental study on oblique apodized fiber Bragg gratings [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 119-124.



备了9个不同波长的光纤布拉格光栅高温传感器阵列,在700℃的高温环境下,温度测量误差不高于 $\pm 1.8^\circ\text{C}$ [8]。西班牙坎塔布里亚大学的P. Rold'an-Varona等人利用狭缝将飞秒激光进行整形,以逐平面的形式刻写光纤布拉格光栅,优化了光栅损耗、反射率和3 dB带宽等关键指标 [9]。英国南安普顿大学的A. Donko等人研究了飞秒激光刻写的高浓度掺杂锗元素的光纤光栅的温度特性,实验表明该光栅可在800℃的环境下保持30 min稳定 [10]。英国牛津大学的Julian A. J. Fells等人基于多层抑制包层设计技术,利用飞秒激光在蓝宝石光纤中刻写了单模布拉格光栅 [11]。

在实际使用过程中,均匀光纤布拉格光栅的主反射峰附近往往存在较高的旁瓣,旁瓣过高会引起诸多问题,例如在波分复用系统中引起信号串扰,在调Q激光器中引起系统不稳定,在光纤激光器中导致线宽展宽 [12]。对光纤光栅进行切趾,以提高边模抑制比,是消除旁瓣影响的有效方法。采用切趾相位掩模板是制备切趾光纤光栅的传统方法 [13],这种方法相对简单,但切趾相位掩模板制作难度较大,且不同的切趾光栅需要不同的相位掩模板,成本较高。基于逐点法的切趾技术具有灵活性高、重复性好等优点,目前主要有两种实现方法:调整飞秒激光能量法与倾斜切趾法。由于飞秒激光与透明物质之间的相互作用呈现高度非线性,调整飞秒激光能量法难以精确控制折射率调制幅度,限制了该方法的切趾效果 [14]。倾斜切趾法通过改变折射率调制区域的横向位置,将刻写路径调整为横跨纤芯的一条斜线,实现高斯型切趾 [12, 15]。倾斜切趾法由澳大利亚麦考瑞大学的Robert J. Williams等人首次提出,但是他们并未清晰阐述高斯型切趾的形成机理,也未对影响切趾效果的关键参数作出必要说明。

针对倾斜切趾法形成机理不清晰,以及关键参数的影响不明确的问题,开展倾斜切趾光纤光栅的理论与实验研究。针对飞秒激光制备光纤光栅的折射率分布特点,基于耦合模理论仿真研究交流耦合系数沿光纤轴向的强度分布,对倾斜路径刻写光栅的切趾类型进行验证。之后对初始横向位移和不对称偏移量两个关键参数对切趾效果的影响进行分析与研究,并仿真计算及实验验证。

1 理论模型

光纤光栅是一种具有规律性折射率扰动的光学结构,沿 z 轴向的折射率分布 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 可表示为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{co}}}(z) \left[1 + v \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} + \varphi(z)\right) \right] \quad (1)$$

式中: $\overline{\delta n_{\text{co}}}(z)$ 为飞秒激光诱导的折射率包络函数; v 为条纹可见度; Λ 为光栅的栅格周期; $\varphi(z)$ 为光栅的啁啾量。倾斜切趾光纤光栅的折射率调制区域分布如图1所示,飞秒激光诱导形成的折射率调制呈圆柱形,在光纤横截面内为椭圆形。

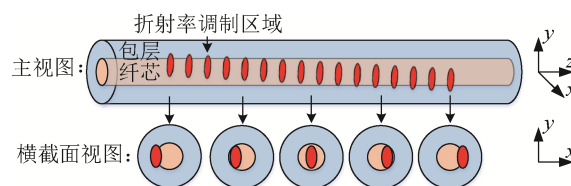


图1 倾斜切趾法折射率调制区域

Fig.1 Refractive index modulation region of oblique apodization method

耦合模理论是研究光纤光栅最常用的理论,它利用可求解的光波导的解来研究受微扰的光波导,基于规则光波导的模式正交性,将受微扰的光纤模式的解展开为未受微扰时光纤本征模的线性叠加,由耦合模方程可获得光栅的光谱特性。在耦合模理论中,光纤光栅的耦合强度主要取决于交流耦合系数 $\kappa_{\text{ac}}(z)$ [16],即

$$\kappa_{\text{ac}}(z) = \frac{v\omega n_{\text{co}}}{4} \overline{\delta n_{\text{co}}}(z) \iint \vec{e}_{kj}(x,y) \cdot \vec{e}_{kj}^*(x,y) dx dy \quad (2)$$

式中: ω 为入射光角频率; n_{co} 为纤芯折射率; $\vec{e}_{kj}(x,y)$ 和 $\vec{e}_{kj}^*(x,y)$ 分别为第 k 阶和第 j 阶模式在 x - y 平面内的横向电场分布。

相较传统的紫外光纤光栅,倾斜切趾光纤光栅的折射率调制区域呈现出两个显著特点:①折射率调制幅值包络沿 z 轴方向为定值,不随 z 轴变化,即 $\overline{\delta n_{\text{co}}}(z) = 1$;②光纤横截面内折射率调制区域 $\sigma(x,y)$ 不再局限于纤芯内,在光栅两端已经涵盖了部分包层,只有栅区中间部分的折射率调制区域仍完全位于纤芯内,即 $\sigma(x,y)$ 参与式(2)中第 k 和第 j 阶模式的积分。因此,倾斜切趾光纤光栅的交流耦合系数修正为

$$\kappa_{\text{ac}}(z) = \frac{v\omega n_{\text{co}}}{4} \iint \sigma(x,y) \cdot \vec{e}_{kj}(x,y) \cdot \vec{e}_{kj}^*(x,y) dx dy \quad (3)$$

单模光纤中仅有纤芯基模可以稳定传输,因

此式(3)中第 k 和第 j 阶模式分别为前向和背向传输的纤芯基模。利用COMSOL Multiphysic有限元软件求解标准石英单模光纤的基模电场分布,求解参数如表1所示。求解获得 x - y 平面内的横向电场场强分布(如图2),绝大部分基模电场能量集中在纤芯附近;距离纤芯正中超过 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的区域电场强度几乎为0,其与折射率调制的耦合可忽略不计,因此计算交流耦合系数时也不再考虑该区域。

表1 单模光纤基模电场求解参数

Tab.1 Parameters of single-mode fiber for solving electric field of fundamental mode

纤芯半径/ μm	包层半径/ μm	纤芯折射率	包层折射率	波长/nm
4.5	62.5	1.4683	1.4628	1550

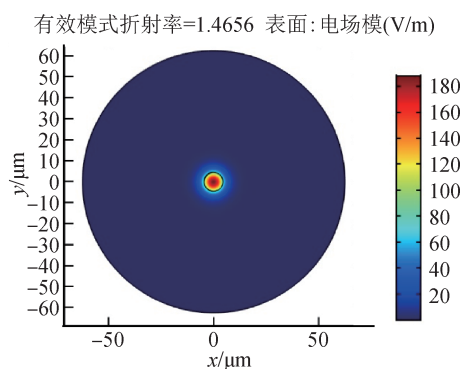


图2 单模光纤基模电场强度分布

Fig.2 Distribution of fundamental mode electric field intensity in single mode fiber

在光纤横截面内的椭圆形折射率分布 $\sigma(x, y)$ 定义为

$$\sigma(x, y) = \begin{cases} 1 \times 10^{-4}, & \frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_0 和 y_0 分别为椭圆中心的初始坐标; a 和 b 分别为椭圆的短轴、长轴长度。折射率调制时椭圆的短轴、长轴长度分别为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.5\text{ }\mu\text{m}$,初始位置 $(x, y) = (-15, 0)$ 。由于光栅沿 z 轴各栅点的折射率调制幅度一致,只是调制区域位于横截面的不同位置,只需要改变横坐标 x ,即可表征 z 轴上不同点的耦合强度。因此,令椭圆的积分位置由 $(x, y) = (-15, 0)$ 逐渐过渡至 $(x, y) = (15, 0)$,即为 z 轴方向耦合系数。积分区域路径如图3所示。

交流耦合系数的计算结果如图4所示。交流耦合系数大小沿 x 轴呈中间大两端小的形态,该形态

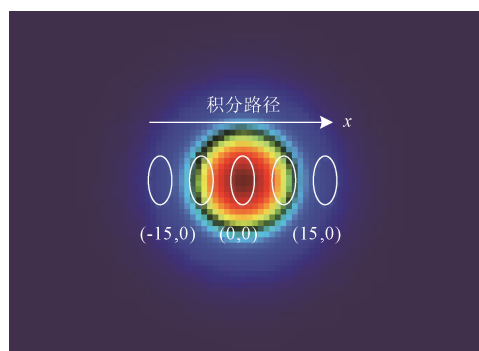


图3 交流耦合系数积分路径

Fig.3 Integration path of AC coupling coefficient

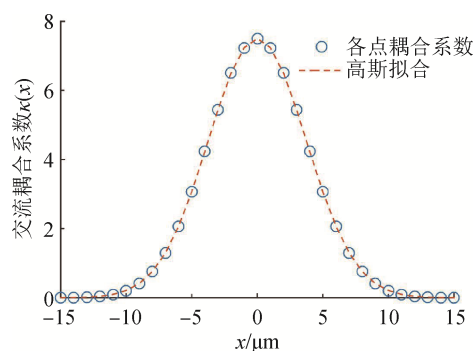


图4 交流耦合系数随 x 轴的变化

Fig.4 Variation of AC coupling coefficient with x axis

与高斯函数趋势较吻合,因此采用高斯拟合得到

$$\kappa(x) = 7.5e^{-\left(\frac{x + 8.8 \times 10^{-12}}{5.3}\right)^2}, R^2 = 1 \quad (5)$$

式中: $\kappa(x)$ 为沿 x 轴向的交流耦合系数; R 为拟合优度。拟合结果的 $R^2 = 1$,表明 $\kappa(x)$ 与 x 轴之间满足高斯分布。由图1可以看出,每个折射率调制区域都由一组 (x, y, z) 三维坐标确定空间位置,由于刻写路径为斜线,每个折射率调制区域在 x 轴上的坐标可以线性对应到 z 轴上,表明沿 z 轴方向的交流耦合系数 $\kappa(z)$ 也满足高斯分布。因此,仿真结果验证倾斜切趾法为高斯型切趾。

飞秒激光逐点法可以诱导产生很强的反射模式耦合,根据Robert J. Williams等人对切趾光纤光栅去谐的分析,反射光谱的长波长带边比短波长带边更陡,表明平均的背景折射率调制为很小的负值^[15]。因此,直流耦合系数定义为 $\kappa_{dc}(z) = -0.5|\kappa_{ac}(z)|$ 。

利用修正前、后的耦合模模型分别仿真相同切趾幅度的反射光谱,并与均匀光纤光栅对比,结果如图5所示。相较均匀光纤光栅,修正前的切趾光纤光栅的反射光谱虽然反射峰右侧的边模显著降低,反射峰左侧的边模略微抬高,边模抑制比总体上仍然是降低的。修正后的反射光谱左右

两侧边模同时下降,提高了光纤光栅的边模抑制比,获得了较好的切趾效果。

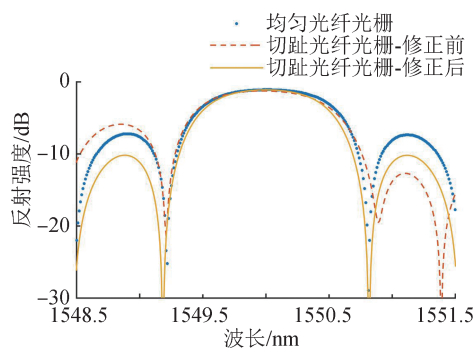


图5 耦合模模型仿真的反射光谱

Fig.5 Reflection spectra simulated by coupled mode model

2 实验研究

光栅切趾效果受两项关键参数的影响:初始横向位移和不对称偏移量,如图6所示。初始横向位移的定义为光栅最边缘条纹中心到纤芯轴向中心之间的距离。初始横向位移越大,则切趾幅度越大。理论上倾斜切趾法刻写路径在纤芯两侧对称,但实验中受平台位移精度和人眼定位误差等因素影响,刻写路径很容易偏向某一侧,因此定义不对称偏移量,对其影响进行研究。

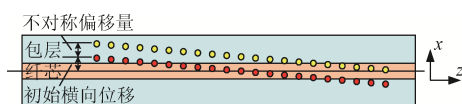


图6 初始横向位移和不对称偏移量

Fig.6 Initial lateral displacement and asymmetric offset

刻写光纤光栅所用飞秒激光光源为 Spectra-Physics 研制的钛蓝宝石再生放大系统,其工作波长为 800 nm,脉冲宽度为 120 fs,重复频率为 1 kHz。聚焦物镜的放大倍数为 40 倍,数值孔径为 0.75。测试反射光谱时,光源发出的光经环形器进入光纤光栅,光纤光栅反射的光经环形器进入 MicronOptics 研制的 Si720 型光纤光栅光谱分析仪。

设定初始横向位移以 1 μm 步进,逐步从 0 μm 增大至 15 μm ,不对称偏移量为 0 μm ,分别制备 3 mm 长的二阶光栅。不同初始横向位移的光栅边模抑制比如图 7 所示。理论仿真结果与实验结果基本一致,随着初始横向位移增大,边模抑制比由 4 dB 不断增大至 18 dB 左右,当初始横向位移为 5 μm 时,边模抑制比可达 15 dB,当初始横向位移为 9 μm 时,边模抑制比达到最大值 21 dB。实验结

果表明倾斜切趾法可有效增大光栅的边模抑制比。当初始横向位移超过 10 μm 时,边模抑制比基本保持恒定,不再继续增大,这是因为初始横向位移过大时,光栅整体的耦合强度会大幅下降,导致主峰未能产生远超旁瓣的尖锐谐振。

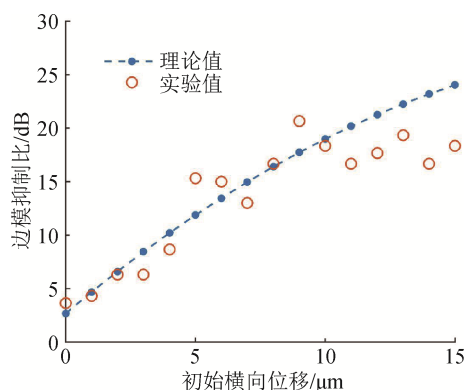


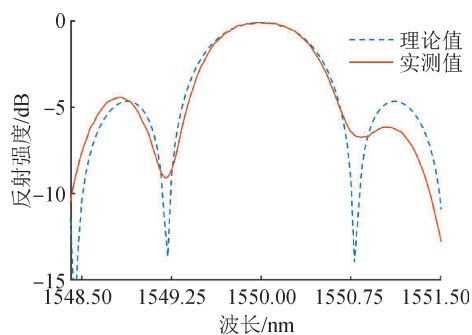
图7 初始横向位移对边模抑制比的影响

Fig.7 Effect of initial lateral displacement on side mode suppression ratio

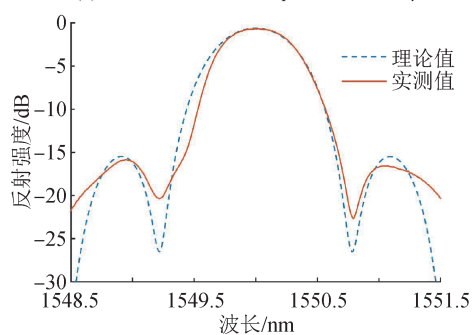
初始横向位移为 0 μm 和 6 μm 的光栅的仿真与实测光谱对比如图 8 所示。理论与实测的光谱形态基本一致,峰顶都呈较平滑的高斯型。相较初始横向位移为 0 μm 的均匀光纤光栅,初始横向位移为 6 μm 的切趾光纤光栅的边模抑制比明显提高。由于直流耦合系数幅值较小,并未在光栅区域内引起显著的 Fabry-Perot 腔效应,左右旁瓣基本呈对称分布。

不同初始横向位移的光栅反射率如图 9 所示。初始横向位移越大,反射率越低。实验结果表明,当初始横向位移为 0 μm 时,刻写得到反射率为 74.6% 的均匀光纤光栅;当始横向位移增大至 15 μm 时,虽然所用激光能量未发生变化,但光纤光栅的反射率降低至 67.8%。产生此现象的原因是:均匀光纤光栅沿光纤轴向的交流耦合系数呈均匀分布,而切趾光纤光栅沿光纤轴向的交流耦合系数呈高斯分布,在一定程度上降低了光纤光栅整体的耦合效率,导致光栅反射率下降。

设定初始横向位移为 6 μm ,不对称偏移量以 1 μm 步进,逐步从 -5 μm 增大至 5 μm ,分别制备 3 mm 长的二阶光栅。不同不对称偏移量的光栅边模抑制比如图 10 所示。实验测得的边模抑制比与理论计算值基本一致。边模抑制比随不对称偏移量的绝对值增大逐渐减小。受光纤本质呈圆柱对称结构影响,以不对称偏移量 0 μm 为对称轴,边



(a) 初始横向位移为0 μm
(a) The initial lateral displacement is 0 μm



(b) 初始横向位移为6 μm
(b) The initial lateral displacement is 6 μm

图8 仿真与实测反射光谱对比

Fig.8 Comparison between simulated and measured reflected spectra

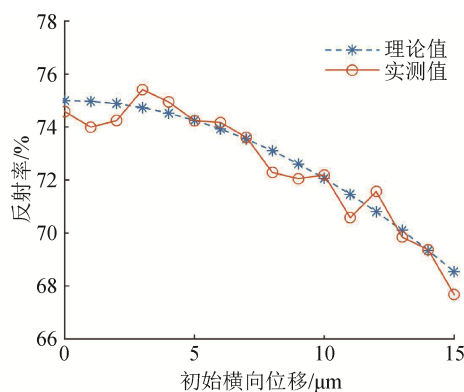


图9 初始横向位移对反射率的影响

Fig.9 Effect of initial lateral displacement on reflectivity

模抑制比呈较好的对称性。当不对称偏移量在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内时,边模抑制比仍在13 dB以上,且波动较小。随着不对称偏移量继续增大,边模抑制比快速下降,当不对称偏移量达到 $\pm 5 \mu\text{m}$ 时,边模抑制比降低至6 dB左右,与均匀光纤光栅处于同一水平。产生此现象的原因是:不对称偏移量增大导致光谱发生畸变,不对称偏移量为5 μm 时的反射光谱如图11所示,此时光谱左侧旁瓣升高,右侧旁瓣下降,使整体边模抑制比降低。在实际制

备过程中,应精确定位,将不对称偏移量控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内,以避免边模抑制比下降。

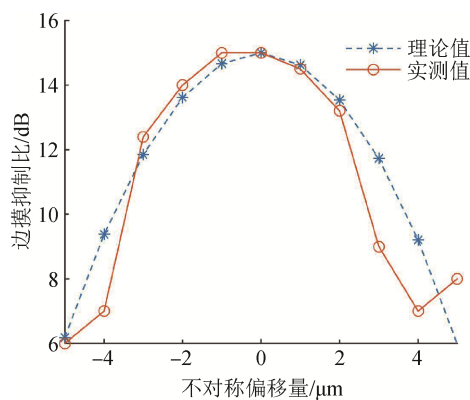


图10 不对称偏移量对边模抑制比的影响

Fig.10 Effect of asymmetric offset on side mode suppression ratio

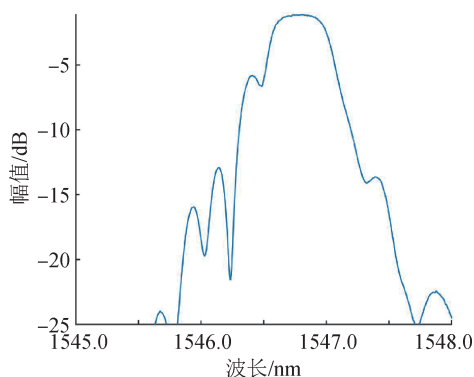


图11 不对称偏移量为5 μm 时的反射光谱

Fig.11 Reflected spectrum at an asymmetric offset of 5 μm

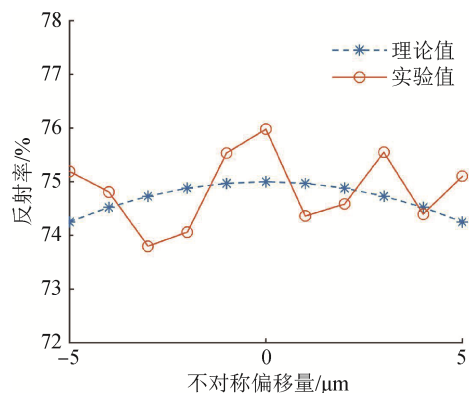


图12 不对称偏移量对反射率的影响

Fig.12 Effect of asymmetric offset on reflectivity

不同不对称偏移量的光栅反射率如图12所示。随着不对称偏移量的绝对值增大,光栅的反射率略微下降。理论仿真结果表明,当不对称偏移量在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内时,反射率仅产生不足2%的波动。实验值与理论值呈相近趋势,但实验测得的反射

率存在接近4%的波动,产生此现象的原因是:逐点法刻写技术本身不稳定性引起的反射率波动已经超过不对称偏移量引起的反射率波动。实验结果表明,交流耦合系数 $\kappa(z)$ 沿光纤轴向的分布未受到不对称偏移量的显著影响,不对称偏移量对反射率的影响可忽略不计。

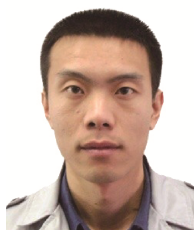
3 结论

对倾斜切趾法刻制的光纤光栅的耦合模理论与关键影响参数进行了理论分析与实验研究。利用有限元仿真的方法,验证了倾斜切趾法的交流耦合强度沿光纤轴向呈高斯型分布,切趾类型为高斯型。实验结果表明:将初始横向位移设置在5~10 μm 范围内,可获得15 dB的边模抑制比;不对称偏移量小于 $\pm 2 \mu\text{m}$ 时,边模抑制比不会受到显著影响。本文研究成果对制备高边模抑制比光纤光栅具有重要指导意义,有利于进一步扩展飞秒激光光栅在传感以及光纤激光器等领域的工程应用。

参考文献

- [1] 张慧君. 膜片式光纤动态压力传感器的研制[J]. 计测技术, 2022, 42(3): 30-35.
ZHANG H J. Development of diaphragm type optical fiber dynamic pressure sensors [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(3): 30-35. (in Chinese)
- [2] 韩冰. 基于光纤光栅传感器的弓网状态监测方案及其验证试验[J]. 计测技术, 2020, 40(1): 27-31.
HAN B. Monitoring scheme of pantograph based on fiber grating sensor and its verification test [J]. Metrology and measurement technology, 2020, 40(1): 27-31. (in Chinese)
- [3] 张欣颖, 陈爽. 石英套管封装光纤光栅温度传感器[J]. 计测技术, 2018, 38(6): 11-14.
ZHANG X Y, CHEN S. Quartz sleeve encapsulates fiber Bragg grating temperature sensor [J]. Metrology and measurement technology, 2018, 38(6): 11-14. (in Chinese)
- [4] XU D S, SU Z Q, LALIT B, et al. A hybrid FBG-based load and vibration transducer with a 3D fused deposition modelling approach [J]. Measurement science and technology, 2022, 33(6): 65106.
- [5] TENG Y, WANG Y, TANG Y, et al. A new L-shaped rigid beam FBG acceleration sensor [J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 12511.
- [6] PALMA P D, VITA E D, IADICICCO A, et al. 3D shape sensing with FBG-based patch: from the idea to the device [J]. IEEE sensors journal, 2022, 22(2): 1338-1345.
- [7] ZHANG P H, ZHANG L, WANG Z Y, et al. A strain-transfer model of surface-bonded sapphire-derived Fiber Bragg grating sensors [J]. Applied sciences, 2020, 10(12): 4399.
- [8] 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列 [J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306002.
CHEN Z Y, HE J, XU X Z. Fabrication of fiber Bragg grating high temperature sensor array by femtosecond laser point by point [J]. Acta optica sinica, 2021, 41(13): 1306002. (in Chinese)
- [9] ROLDÁN P, PALLARÉS D, RODRÍGUEZ L, et al. Slit beam shaping technique for femtosecond laser inscription of enhanced plane-by-plane FBGs [J]. Journal of light-wave technology, 2020, 38(16): 4526-4532.
- [10] DONKO A, NUEZ M, BARUA P, et al. Femtosecond inscription and thermal testing of Bragg gratings in high concentration (40 mol%) germania-doped optical fibre [J]. Optics express, 2017, 25(26): 32879-32866.
- [11] WANG M, SALTER P S, PAYNE F P, et al. Single-mode sapphire fiber Bragg grating [J]. Optics express, 2021, 30(9): 15482-15494.
- [12] TÜNNERMANN A, VOIGTLÄNDER C, MARSHALL G D, et al. Point-by-point inscription of apodized fiber Bragg gratings [J]. Optics letters, 2011, 36(15): 2988-2990.
- [13] TIAN K, CHEN G X, SONG Q Y. A two-step scanning-mask exposure method for the fabrication of arbitrary apodized fiber gratings [J]. Optik, 2017, 141: 24-31.
- [14] GUO Q, ZHENG Z, WANG B, et al. Femtosecond laser fabricated apodized Fiber Bragg gratings based on energy regulation [J]. Photonics, 2021, 8(4): 110.
- [15] WILLIAMS R J, KRAMER R G, NOLTE S, et al. Detuning in apodized point-by-point fiber Bragg gratings: insights into the grating morphology [J]. Optics express, 2013, 21(22): 26854-26867.
- [16] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. Journal of light-wave technology, 1997, 15(8): 1277-1294.

(本文编辑:刘圣晨)



第一作者: 张鹏浩 (1990—), 男, 博士, 航空工业北京长城计量测试技术研究所站博士后, 主要研究方向为光纤传感技术。