

少模光纤布喇格光栅的光谱特性研究

聂鹏程, 余先伦*, 刘嘉伟

(重庆三峡学院 电子与信息工程学院, 重庆 404020)

摘要: 相较于传统的单模光纤布喇格光栅(FBG)传感器, 少模FBG传感器在测量时不易受到外界无关参量的影响, 精度更高, 但其在光栅参数设计上缺乏相应的理论依据。针对此问题, 基于FBG耦合模理论, 利用OptiGrating和Matlab软件模拟分析了纤芯中存在 LP_{01} 模、 LP_{11} 模的少模FBG的反射谱。仿真结果表明: 区别于传统单模FBG的单峰结构, 少模FBG的反射谱具有三峰结构, 光栅周期、光栅长度和折射率调制深度的变化会对各波峰的反射率及中心波长产生规律性的影响。

关键词: 光纤布喇格光栅; 光栅参数; 耦合模理论; 反射率; 中心波长

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)01-0016-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on spectral characteristics of few-mode fiber Bragg grating

NIE Pengcheng, YU Xianlun*, LIU Jiawei

(School of Electronic and Information Engineering, Chongqing Three Gorges College, Chongqing 404020, China)

Abstract: Compared with the traditional single-mode fiber Bragg Grating (FBG) sensor, the few-mode FBG sensor is less susceptible to the influence of external independent parameters, and has better precision. However, there is no corresponding theoretical basis for the design of grating parameters. For this problem, based on FBG coupled mode theory, the reflection spectrum of the few-mode FBG with LP_{01} mode and LP_{11} mode in the fiber core is simulated and analyzed by using OptiGrating and Matlab software. The simulation results show that the reflection spectrum of the few-mode FBG has a three peaks structure which is different from the single peak structure of the traditional single-mode FBG. The changes of grating period, grating length and refractive index modulation depth will have a regular effect on the reflectivity and central wavelength of each peak.

Key words: fiber Bragg grating, grating parameters, coupled mode theory, reflectivity, central wavelength

0 引言

随着光纤传感技术的发展, 相较于传统的电传感器, 光纤布喇格光栅(FBG)传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、长期稳定工作和对测量参数能够快速响应等优点, 在建筑、化工和航天等领域得到了广泛的应用^[1-4]。BANG H J等人^[5]设计了一种基于FBG的阵列式传感器, 能够监测塔架结构的曲率, 但是由

于测量结构暴露在空气中, 易受到环境温度变化干扰, 影响待测参量的精度。韩笑笑等人^[6]设计了一种超磁致伸缩材料(GMM)结合FBG的光纤电流传感器, 通过设计一个独特的十字探头实现对温度的补偿, 使电流测量更加精确, 但其设计结构相对复杂, 对封装材料要求较高。上述FBG传感器是通过在单模光纤内刻写一段FBG制成, FBG反射谱中只有一个波峰, 在测量时往往会受到温度、应力等外界无关参量的影响, 传感器的测量精度不高^[7-8]。而在少模光纤中刻写一段FBG制成的传感器, 其模式数量不止一个, 因此FBG反射谱中可以产生多个反射峰。反射峰的中心波长由纤芯中的模式决定, 不同模式对外界响应程度不同, 通过监测波长的变化即可知道外界环境的变化, 解决了待测参量与外界无关参量之间的交叉敏感问题。相较于传统的单模FBG传感器, 少模FBG传感器

收稿日期: 2021-06-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.U2030116)资助。

作者简介: 聂鹏程(1998—), 男, 重庆长寿人, 硕士研究生, 2020年本科毕业于重庆邮电大学, 现就读于重庆三峡学院电子与信息工程学院电磁场与微波技术专业, 主要研究方向为光纤传感, 曾参与2次市级科研项目及多次数模比赛。

*通信作者: 余先伦(1967—), 男, 教授, 主要研究方向为光纤传感、全光网络和光子晶体光纤。



大大提高了灵敏度和稳定性^[9-12]。

少模 FBG 传感器的市场应用价值巨大,但在光栅参数设计时缺少相应的理论依据,基于此,本文从 FBG 耦合模式理论出发,对少模 FBG 的光谱特性进行分析研究,为今后少模 FBG 传感器的实际应用提供一定理论支撑。

1 少模 FBG 结构特征

少模 FBG 结构图及截面图如图 1 所示。纤芯直径 $d=14\ \mu\text{m}$,包层直径 $D=125\ \mu\text{m}$ 。区别于传统的单模光纤,少模光纤纤芯中存在 LP_{01} 模、 LP_{11} 模 2 种模式。在纤芯上刻写一段 FBG,当入射光进入纤芯中 FBG 时,满足布喇格反射条件的光将被反射,在光谱上形成特定的波峰结构。

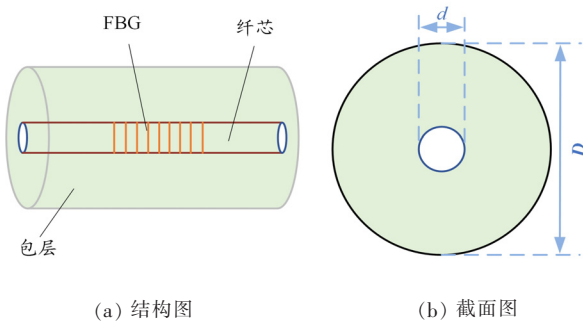


图 1 少模 FBG 结构图及截面图

2 理论分析

光纤归一化截止频率 V_c 表示为:

$$V_c = 2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / \lambda \quad (1)$$

其中, n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率, a 为纤芯半径, λ 为光波中心波长,归一化截止频率的值决定了纤芯中模式的数量。对于单模光纤, V_c 不超过 2.405。当 $2.405 < V_c < 3.832$ 时,正好满足双模光纤的传输条件。而不同的纤芯直径 d 也影响着纤芯中模式的种类和数量,当 $12\ \mu\text{m} < d < 15\ \mu\text{m}$ 时,正好得到了具有 LP_{01} 模、 LP_{11} 模 2 种模式的少模光纤,此时在纤芯中刻写 FBG,形成少模 FBG 结构。

结合耦合模理论分析可知,FBG 有效折射率沿 z 轴的变化^[13-15]为:

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

其中, $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 为纤芯有效折射率调制量, v 为折射率条纹可见度, Λ 为光栅周期。

横向耦合系数 K_{pq} ^[16]可表示为:

$$K_{pq} = \kappa_{pq} \left[1 + v \cos \left(\frac{2\pi z}{\Lambda} \right) \right] \quad (3)$$

其中, p 、 q 为在纤芯中传输的模式; κ_{pq} 为互耦合系数,定义为 p 、 q 模式之间的耦合强度。

少模 FBG 耦合模方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{dA_{01}}{dz} = iA(z)\kappa_{01} + i\frac{v}{2}B(z)\kappa_{01}\exp(-i2\beta_{01}z) \\ \frac{dB_{01}}{dz} = -iB(z)\kappa_{01} - i\frac{v}{2}A(z)\kappa_{01}\exp(i2\beta_{01}z) \\ \frac{dA_{11}}{dz} = iA(z)\kappa_{11} + i\frac{v}{2}B(z)\kappa_{11}\exp(-i2\beta_{11}z) \\ \frac{dB_{11}}{dz} = iB(z)\kappa_{11} - i\frac{v}{2}A(z)\kappa_{11}\exp(i2\beta_{11}z) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $A(z)$ 、 $B(z)$ 分别表示前向和后向传输的电场振幅沿 z 轴的大小, A_{01} 、 B_{01} 分别为 LP_{01} 模前向和后向传输的电场振幅大小, A_{11} 、 B_{11} 分别为 LP_{11} 模前向和后向传输的电场振幅大小; κ_{01} 、 κ_{11} 分别为 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的自耦合系数, β_{01} 、 β_{11} 分别为 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的传播常数。反射率 R 可表示为:

$$R = \frac{\kappa^2 \sinh^2(sL)}{\delta^2 \sinh^2(sL) + s^2 \cosh^2(sL)} \quad (5)$$

其中, $\kappa = v\kappa_{pq}/2$, $s^2 = \kappa^2 - \delta^2$, δ 为模式失谐量, L 是 FBG 的长度。当 $\delta=0$ 时,可得到最大反射率 $R_{\text{max}} = \tanh^2(\kappa L)$ 。

由于单模光纤纤芯内只存在一种模式,刻写 FBG 后观察其反射谱只有一个波峰。而少模光纤中存在 LP_{01} 模和 LP_{11} 模 2 种模式,FBG 反射谱中会产生 3 个波峰,分别记为 peak1、peak2 和 peak3。peak1 和 peak3 分别由 LP_{11} 模和 LP_{01} 模模间自耦和产生, peak2 耦合模传播常数正好是 β_{01} 和 β_{11} 的中间值,故 peak2 位于 peak1 和 peak3 之间。三波峰对应的中心波长分别为:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{peak1}} = 2n_{11}\Lambda \\ \lambda_{\text{peak2}} = (\lambda_{\text{peak1}} + \lambda_{\text{peak3}}) / 2 \\ \lambda_{\text{peak3}} = 2n_{01}\Lambda \end{cases} \quad (6)$$

其中, n_{01} 为 LP_{01} 模的有效折射率, n_{11} 为 LP_{11} 模的有效折射率。

3 仿真结果及分析

影响反射谱的光栅参数主要包括光栅周期、光栅长度和折射率调制深度,任一参数的改变将对少模 FBG 的反射光谱产生影响。本文设置初始参数值,利用 OptiGrating 及 Matlab 软件对反射谱进行仿真分析,观察光谱分布情况(是否存在三峰结构),再探究各参数对 FBG 反射谱的特性影响。

3.1 少模 FBG 反射光谱

设置光纤纤芯直径 $d=14\text{ }\mu\text{m}$, 包层直径 $D=125\text{ }\mu\text{m}$, $n_{11}=1.4452$, $n_{01}=1.4475$, 光栅周期 $\Lambda=535\text{ nm}$, 光栅长度 $L=20\text{ mm}$, 折射率调制深度 δ_n (定义为光栅折射率变化量) 为 0.00025, 少模 FBG 反射光谱如图 2 所示。可以看出, 反射谱中有 3 个不同的波峰 peak1、peak2 和 peak3, 其中心波长 λ 分别为 1546.42 nm、1547.64 nm 和 1548.85 nm。仿真结果与理论分析吻合, 光谱分布效果良好。

3.2 不同参数下的光谱特性

由式(6)可知, 光栅周期变化可直接导致布喇格波长产生漂移。本文对光栅周期 Λ 分别为 534 nm、536 nm 和 537 nm 时进行仿真, 其余参数与初始值一致, FBG 反射光谱随变化曲线如图 3 所示。由图 3(a) 可以看出, 光栅周期 Λ 小于 535 nm 时, 反射谱 3 个波峰 peak1、peak2 和 peak3 的中心波长均会向短波长方向移动, 光栅周期 Λ 大于 535 nm 时, 各波峰中心波长 λ 均会向长波长方向移动; 由图 3(b) 可以看出, 光栅周期 Λ 从 534 nm 增加到 537 nm 时, peak1 的中心波长 λ 从 1543.52 nm 增加到 1552.20 nm, peak2 的中心波长 λ 从 1544.74 nm 增加到 1553.43 nm, peak3 的中心波长 λ 从 1545.96 nm 增加到 1554.63 nm, 分别增加了 8.68 nm、8.69 nm 和 8.67 nm, 各波峰中心波长漂移量基本一致。

光栅长度对于传感性能起着重要作用。本文对光栅长度 L 分别取 10 mm、15 mm 和 20 mm 时进行仿真, 其余参数与初始值一致, 光栅长度 L 变化对反射谱的影响如图 4 所示。由图 4(a) 可以看出, 随着光栅长 L 的增加, peak1、peak2 和 peak3 的反射率都逐渐增大, 旁瓣数量明显增加, 各波峰半高宽度逐渐变窄, 但各波峰对应中心波长不变; 由图 4(b) 可以看出, 随着光栅长度 L 的增加, peak1 的反射率从 0.40

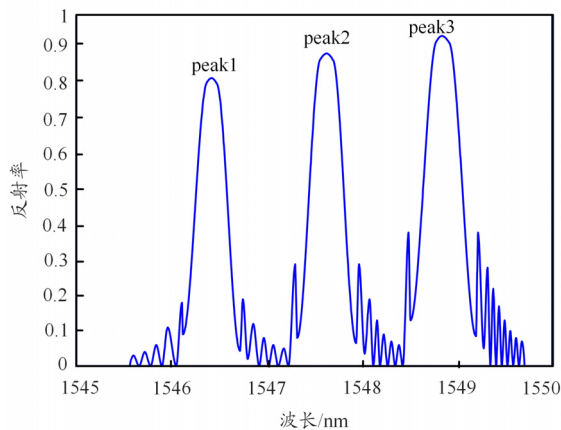
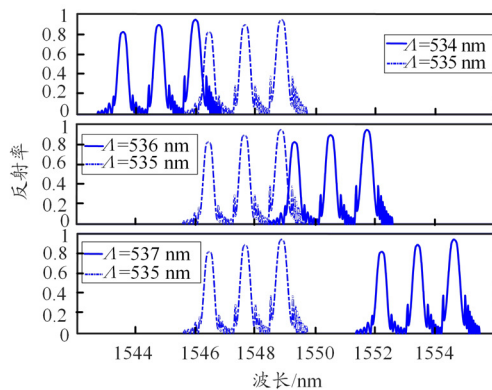


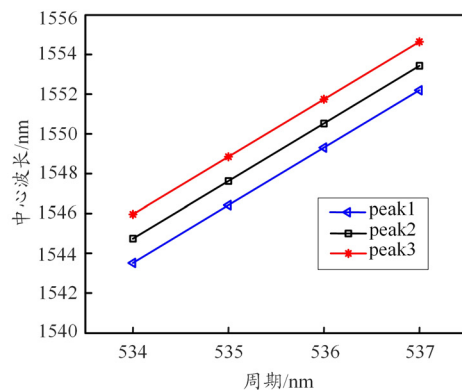
图2 初始参数的 FBG 反射谱

增加到 0.82, peak2 的反射率从 0.45 增加到 0.89, peak3 的反射率从 0.53 增加到 0.94, 3 个波峰反射率分别增加了 0.42、0.44 和 0.41; peak1、peak2 和 peak3 的中心波长 λ 分别保持在 1546.42 nm、1547.64 nm 和 1548.85 nm 不变, 这是因为光栅长度的变化并未导致折射率和周期产生变化, 故不会导致中心波长发生移动。

本文对调制深度 δ_n 分别取值 0.00015、0.00020、

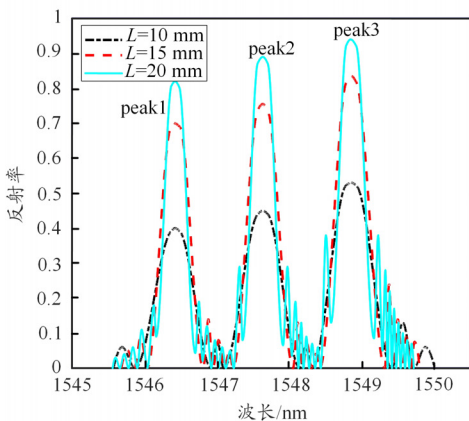


(a) 不同光栅周期 Λ 下的 FBG 反射谱

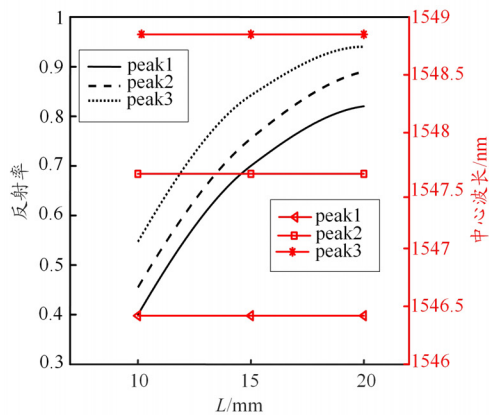


(b) 中心波长随光栅周期 Λ 的变化曲线

图3 反射谱随光栅周期变化曲线



(a) 不同光栅长度 L 下的 FBG 反射谱



(b) 反射率与中心波长随光栅长度 L 的变化曲线

图4 反射谱随光栅长度变化曲线

0.00025 和 0.00030 时进行仿真,其余参数与初始值一致,FBG 反射谱随调制深度的变化情况如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,随着调制深度的增加,peak1、peak2 和 peak3 的反射率都会增加,各波峰半高宽度逐渐展宽且中心波长均发生漂移;由图 5(b)可以看出,随着调制深度的增加,peak1 的反射率从 0.57 增加到 0.86, peak2 的反射率从 0.72 增加到 0.92, peak3 的反射率从

0.81 增加到 0.96,3 个波峰的反射率增加趋势都逐渐平缓;peak1、peak2 和 peak3 的中心波长分别线性增加了 0.32 nm、0.31 nm 和 0.33 nm,这是因为调制深度的增加会使有效折射率跟着增加,从而使各波峰中心波长向长波长方向漂移。

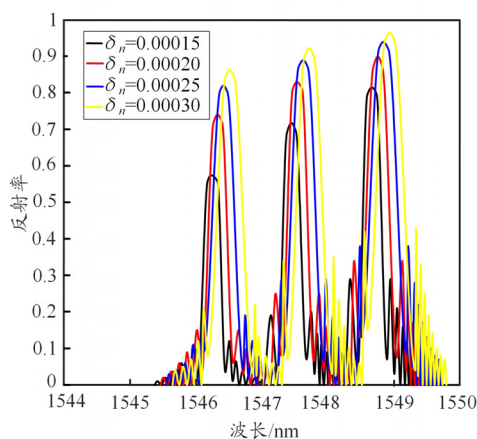
基于上述仿真结果可知,少模 FBG 光谱特性与理论分析一致,这为光栅刻写过程及其应用提供了相应的理论参数依据。

4 结束语

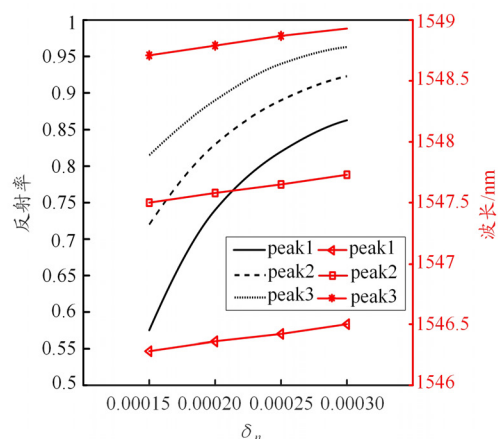
本文从耦合模理论出发,对少模 FBG 的反射谱进行仿真研究,改变各光栅参数观察 FBG 反射谱的变化。仿真结果表明:少模 FBG 反射谱具有三峰结构,周期增加时,3 个波峰的中心波长将会线性增加,向长波长方向漂移;光栅长度增加时,3 个波峰的反射率都逐渐增加,但各波峰的中心波长均保持不变;调制深度增加时,3 个波峰的反射率都逐渐增加且增加趋势逐渐平缓,各波峰中心波长均线性增加。因此,光栅参数的改变会对 FBG 反射谱产生一定规律的影响,该研究对于少模 FBG 的高精度刻写和实际应用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] JIN Y, CHAN C, DONG X, et al. Temperature independent bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber [J]. Optics Communication, 2009, 282(19): 3905–3907.
- [2] 龙剑. 基于光纤光栅传感器的变压器卷铁心温度监测方法研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(6): 11–13.
- [3] LIU S, DING L Y, GUO H Y, et al. Thermal stability of drawing-lower



(a) 不同调制深度 δ_n 下的 FBG 反射谱



(b) 反射率与中心波长随调制深度 δ_n 的变化曲线

图 5 反射谱随调制深度 δ_n 的变化曲线

grating written in a single mode fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3073–3077.

[4] DZIUDA L. Monitoring respiration and cardiac activity using fiber bragg grating-based sensor [J]. IEEE transactions on bio-medical engineering, 2012, 59(7): 1934–1942.

[5] BANG H J, KIM H L, LEE K S. Measurement of strain and bending deflection of a wind turbine tower using arrayed FBG sensors [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13 (12): 2121–2126.

[6] 韩笑笑, 荆雅洁, 杨濠琨, 等. GMM-FBG 光纤电流传感器温度补偿研究 [J]. 光电子·激光, 2020, 31(8): 787–793.

[7] COOK K, SHAO L Y, CANNING J. Regenerated and helium: regenerating Bragg grating in helium-loaded germanosilicate optical fiber [J]. Optical Materials Express, 2012, 2(12): 1733–1740.

[8] WANG J, TAO K Y, ZHU W S, et al. A FBG-OCT catheter to reconstruct vascular shape in intravascular optical coherence tomography [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(9): 701–704.

[9] 申莎莎. 少模光纤光栅的飞秒激光制备及其特性 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38(8): 18–20.

[10] 顾昌晨, 陈婕, 刘心宇, 等. 倾斜少模光纤光栅扭转传感研究 [J]. 光通信技术, 2017, 41(8): 25–28.

[11] 杨思玉, 万生鹏, 王浩宇, 等. 单点相移光纤光栅光谱特性的研究与应用 [J]. 应用光学, 2019, 40(2): 349–355.

[12] 孙蜜雪. 光纤布喇格光栅结构设计、刻制及性能研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.

[13] 吴入军, 郑百林, 贺鹏飞, 等. 埋入式光纤布喇格光栅传感器封装结构对测量应变的影响 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 24–30.

[14] 陈勇, 杨凯, 刘焕淋. 多峰光纤布喇格光栅传感信号的自适应寻峰处理 [J]. 中国激光, 2015, 42(8): 192–197.

[15] 姚琳琳, 谢涛, 景燕敏, 等. 光纤 Bragg 光栅折射率调制特性研究 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35(7): 16–18.

[16] 薛艳茹, 田朋飞, 赵能, 等. 基于少模长周期光纤叠栅的模式转换器 [J]. 物理学报, 2019, 68(5): 141–147.