

激光与光电子学进展

折射率对倾斜光纤光栅光谱特性的影响

钟建辉¹, 冯艳^{1,2**}, 张华^{2*}, 肖佳明¹

¹南昌大学机电工程学院江西机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031;

²上海工程技术大学机械与汽车工程学院机器人研究所, 上海 201620

摘要 基于倾斜光纤光栅模式耦合理论,采用OptiGrating软件仿真分析了倾斜光纤光栅(TFBG)在不同环境折射率下的光谱特性变化。结果表明,当外界环境折射率小于包层模折射率时,TFBG的纤芯模和包层模都会存在;当外界环境折射率大于等于包层模折射率时,只有纤芯模存在,包层模会消失。在蒸馏水、无水乙醇、红花油、花生油和大豆油溶液中,TFBG的光谱特性实验结果与仿真结果一致。研究结果对装有大折射率液体的管道泄漏的实时监测具有一定的指导意义。

关键词 光栅; 倾斜光纤光栅; 折射率; 透射光谱; 包层模; 纤芯模

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1105003

Influence of Refractive Index on Spectral Characteristics of Tilted Fiber Gratings

Zhong Jianhui¹, Feng Yan^{1,2**}, Zhang Hua^{2*}, Xiao Jiaming¹

¹Jiangxi Key Laboratory of Robot and Welding Automation, School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

²Institute of Robotics, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China

Abstract Based on the mode coupling theory of a tilted fiber grating (TFBG), the spectral characteristics of a TFBG under different ambient refractive indexes are studied by the Optigrating software. The results show that when the ambient refractive index is less than the refractive index of the cladding mode, both the core mode and the cladding mode of the TFBG exist; in contrast, when the ambient refractive index is larger than or equal to the refractive index of the cladding mode, only the core mode exists and the cladding mode disappears. The experimental results of this TFBG in distilled water, anhydrous ethanol, safflower oil, peanut oil and soybean oil are consistent with the corresponding simulation results. These research results have certain guiding significance for the real-time leakage monitoring of pipelines full of liquids with larger refractive indexes.

Key words gratings; tilted fiber grating; refractive index; transmission spectrum; cladding mode; core mode

OCIS codes 050.1950; 060.2370; 060.3735

收稿日期: 2020-11-18; 修回日期: 2020-12-11; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(51665039)、江西省自然科学基金(20202BAB204018)、江西省优势科技创新团队建设计划(20171BCB24001)

*E-mail: zhanghua_phd@163.com; **E-mail: confirmfyan@163.com

1 引言

倾斜光纤光栅(TFBG)是一种特殊的光纤光栅(FBG),即在光纤光栅制作过程中,光栅平面倾斜一定角度就形成了倾斜光纤光栅。与普通光纤光栅相比,TFBG的栅平面与入射光的波矢方向存在一定的夹角,因而部分满足Bragg条件的前向传导的入射光被耦合为后向传导的纤芯模,部分被耦合为后向传导的包层模^[1-3]。因此TFBG的光谱图与普通FBG有所不同,FBG中只存在纤芯模,而TFBG中不仅存在纤芯模,还存在一系列的包层模,TFBG的包层模对外界环境特别是折射率十分敏感。近些年来,国内外学者对基于TFBG的通信和传感等进行了研究。陶洪等^[4]提出了一种基于环形长周期倾斜光纤光栅的矢量模式转换方法。田鑫等^[5]提出了一种基于倾斜光纤光栅的受激布里渊散射滤波器。杨锦民等^[6]基于45°倾斜光纤光栅和布拉格光纤光栅的线性腔结构,提出了一种可调谐线偏振掺镜激光器。戴礼龙等^[7]研究了基于TFBG的可调谐锁模激光器,取得了一定的成果。本文基于仿真和实验,研究了外界环境折射率对TFBG透射光谱特性的影响,从而为TFBG折射率传感器的制作及应用提

供一定的理论指导。

2 TFBG 折射率传感理论

TFBG的结构示意图如图1所示,光纤的轴向方向与垂直于栅格的方向的夹角为 θ ,TFBG的有效周期为 Λ_g ,TFBG的周期为 Λ ,且 $\Lambda_g = \Lambda / \cos \theta$ 。由TFBG结构可以看出,纤芯模的传输与外界环境是不接触的,故TFBG周围的外界环境不会影响纤芯模谐振峰中心波长的漂移。而包层模的情况却不一样,包层模的传输是在包层中进行的,所以当外界环境发生改变时,包层模谐振峰波长会发生相应的改变,即包层模对外界环境折射率很敏感。根据耦合模理论,对于倾角较小的TFBG,有

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda_g \frac{dn_{e,core}}{dn_w} + \frac{n_{e,core}}{\cos \theta} \frac{d\Lambda}{dn_w} \right) \Delta n_w, \quad (1)$$

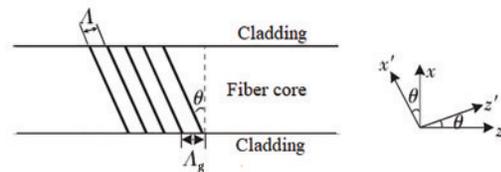


图1 TFBG的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of TFBG

$$\Delta\lambda_{c,i} = \left[\Lambda_g \frac{d(n_{e,core} + n_{e,clad,i})}{dn_w} + \frac{n_{e,core} + n_{e,clad,i}}{\cos \theta} \frac{d\Lambda}{dn_w} \right] \Delta n_w, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为纤芯模波长的漂移量; $\Delta\lambda_{c,i}$ 为第*i*阶包层模波长的漂移量; $dn_{e,core}$ 为纤芯模的有效折射率; $dn_{e,clad,i}$ 为第*i*阶包层模的有效折射率; n_w 为外界环境折射率。

由于TFBG的周期不会发生改变,纤芯模的折射率也不会改变,故 $\frac{dn_{e,core}}{dn_w}$ 与 $\frac{n_{e,core}}{\cos \theta}$ 均为0。(1)、(2)式可简化为

$$\Delta\lambda_B = 0, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_{c,i} = \frac{\Lambda}{\cos \theta} \frac{dn_{e,clad,i}}{dn_w} \Delta n_w \quad (4)$$

同理,对于倾斜角较大的TFBG^[8-9],有

$$\Delta\lambda_{c,i} = -\frac{\Lambda}{\cos \theta} \frac{dn_{e,clad,i}}{dn_w} \Delta n_w \quad (5)$$

3 TFBG 在不同折射率下的光谱特性仿真研究

采用光纤光栅的仿真软件 OptiGrating, 仿真

了不同外界环境折射率下的TFBG光谱特性。模拟的参数设置:纤芯半径为4 μm,折射率为1.46;包层半径为60 μm,折射率为1.45;倾斜角为5°,中心波长为1560 nm,光栅周期为0.5322 μm,光栅长度为20 mm,折射率调制深度为0.0005,波长范围为1.52~1.58 μm,步长为1000,外界折射率为1.333, 1.362, 1.449, 1.45, 1.466, 1.471, 1.472。仿真设置的参数与下面实验中TFBG的重要参数保持一致。得到的TFBG的透射谱如图2所示。

由图2可以发现,当外界环境折射率为1.333(包层模范围为1.547~1.558 μm),1.362(包层模范围为1.548~1.558 μm),1.449(包层模范围为1.554~1.558 μm)时,TFBG的透射光谱既有纤芯模的光谱也有包层模的光谱;当外界环境折射率达到或超过1.45,即大于等于包层模折射率时,TFBG的透射谱仅有纤芯模的光谱。另外,从图2

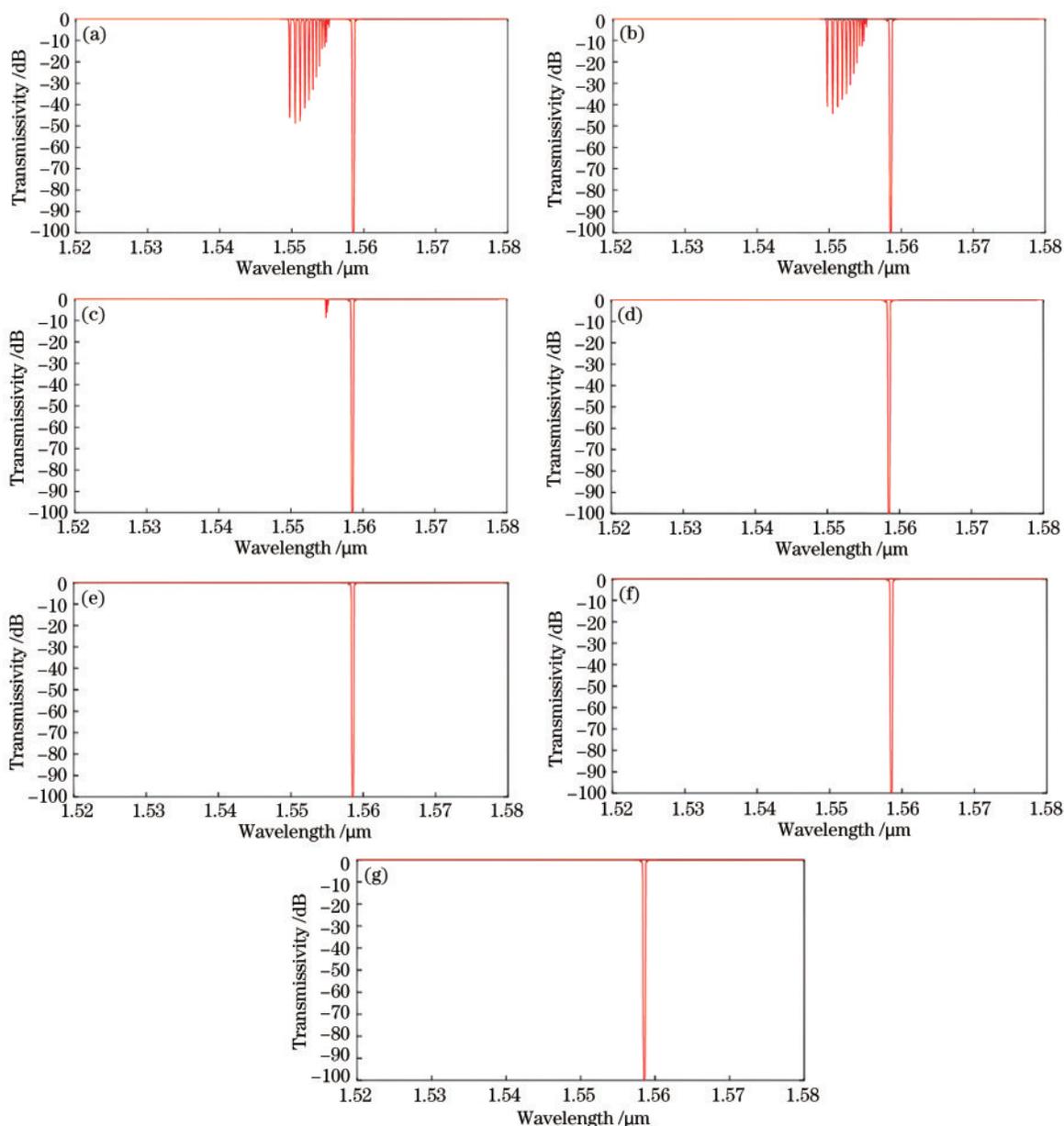


图 2 不同折射率下的 TFBG 透射光谱图。(a) 折射率为 1.333; (b) 折射率为 1.362; (c) 折射率为 1.449; (d) 折射率为 1.450; (e) 折射率为 1.466; (f) 折射率为 1.471; (g) 折射率为 1.472;

Fig. 2 Transmission spectra of TFBG with different refractive indexes. (a) Refractive index of 1.333; (b) refractive index of 1.362; (c) refractive index of 1.449; (d) refractive index of 1.450; (e) refractive index of 1.466; (f) refractive index of 1.471; (g) refractive index of 1.472

中可以看出, 纤芯模谐振峰波长没有随着外界环境折射率的改变而发生漂移, 即外界环境折射率不会影响纤芯模的波长, 这是因为纤芯模的传输不与外界环境接触。故通过仿真, 可以得出以下结论: 当外界环境折射率小于包层模折射率时, TFBG 透射谱既有包层模的光谱也有纤芯模的光谱; 当外界环境折射率等于大于包层模折射率时, TFBG 透射谱只有纤芯模的光谱, 此时包层模全部消失; TFBG

的纤芯模谐振峰波长不会随着外界环境折射率的改变而发生漂移。

4 实验研究与分析

4.1 不同折射率液体下 TFBG 透射光谱的实验研究

为了研究不同环境折射率对 TFBG 透射光谱的影响, 选取 5 种折射率不同的溶液进行了实验探

究,分别是蒸馏水、无水乙醇、红花油、花生油和大豆油。这5种溶液在20℃的折射率如表1所示。

表1 溶液折射率

Table 1 Refractive index of each solution

Experimental solution	Distilled water	Anhydrous ethanol	Safflower oil	Peanut oil	Soybean oil
Refractive index	1.333	1.362	1.466	1.471	1.472

实验开始前,为了保证实验的准确性,先用去离子水冲洗掉TFBG表面残留的灰尘等杂质,然后用乙醇溶液轻轻擦拭栅区位置。在实验过程中,一定要保证TFBG的栅区位置完全浸没在所测溶液中。在完成每次溶液测量后,为了防止上一次的残液对下一次溶液测量造成影响,必须使用去离子水反复(至少三次)清洗TFBG的栅区位置,烘干后再继续测量下一种溶液。实验所用TFBG的倾斜角为5°,中心波长为1560 nm,纤芯折射率为1.46,包层模折

射率为1.45;实验所用的放大自身辐射光源为北京佰特光通科技有限公司的PB-ASE-B-CL-GFF-13-0-FC/APC;实验所用光谱分析仪为安立有限公司的MS9740A光谱分析仪,实验装置图如图3所示。

图4是TFBG在不同溶液中的透射光谱图,可以看出,在蒸馏水(包层模范围为1534~1560 nm)和无水乙醇(包层模范围为1535~1560 nm)溶液

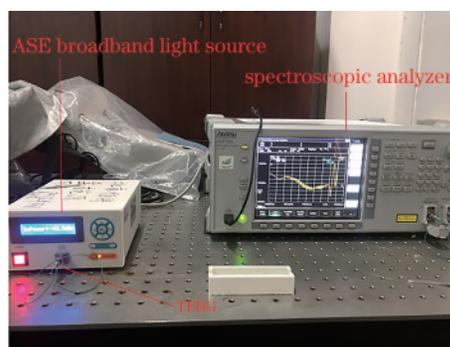


图3 TFBG测量溶液实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of solution measurement by TFBG

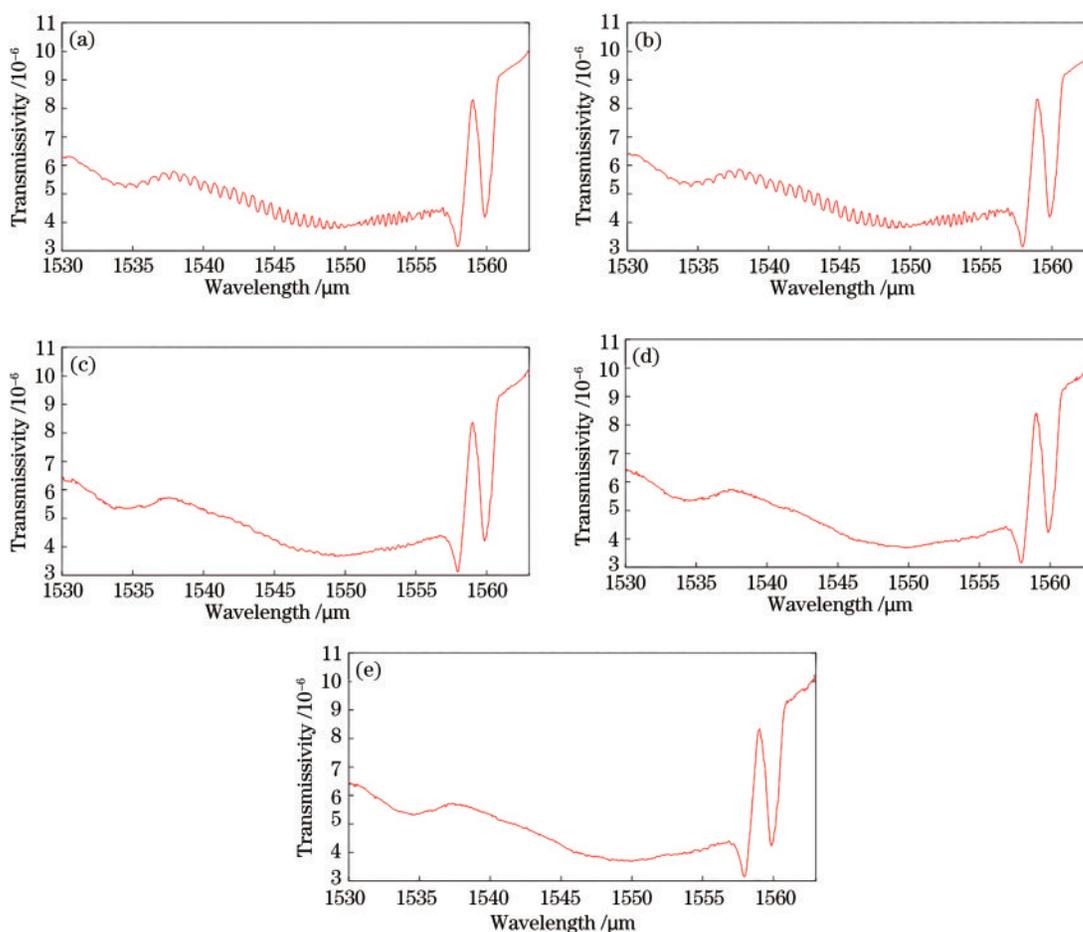


图4 不同溶液中的TFBG透射光谱图。(a)蒸馏水;(b)无水乙醇;(c)红花油;(d)花生油;(e)大豆油

Fig. 4 Transmission spectra of TFBG in different solutions. (a) Distilled water; (b) absolute ethanol; (c) safflower oil; (d) peanut oil; (e) soybean oil

中,TFBG的透射光谱中既存在纤芯模的光谱也存在很多包层模的光谱;而在红花油、花生油和大豆油这三种溶液中,只存在纤芯模的光谱,包层模全部消失了,这与仿真结果一致。

4.2 分析

蒸馏水的折射率为 1.333,无水乙醇的折射率为 1.362,都小于 TFBG 的包层模折射率(实验使用的 TFBG 包层模折射率为 1.45)。根据耦合模理论可知,当一束入射光沿光纤轴向入射时,前向传输的纤芯模被耦合为后向传输的包层模,在 TFBG 透射光谱中表现为包层模光谱。红花油的折射率为 1.466,花生油折射率为 1.471,大豆油的折射率为 1.472,都大于 TFBG 的包层模折射率,此时不满足全反射的条件。由于全反射必须满足光从光密介质(折射率较大)进入光疏介质(折射率较小),当外界环境折射率大于包层模折射率时,光从包层模射向外界环境,即光从光疏介质射向光密物质,不满足全反射条件,此时光不会反射到光纤中形成包层模,而是直接从外界环境折射出去,即被外界环境吸收了,在 TFBG 透射光谱图中就只能看到纤芯模的光谱,而包层模全部消失了。

利用管道运输折射率较高的液体时,例如食用油厂需要用管道来运输食用油,如果管道发生泄露,那么厂家的损失是巨大的。将 TFBG 封装在管道外表面,因为食用油的折射率比包层模的折射率大,一旦食用油发生泄露,TFBG 的透射光谱就没有包层模的光谱;而当食用油没有泄露时,TFBG 透射光谱中既有包层模的光谱也有纤芯模的光谱。故可以利用该方法实时监测装有折射率较大液体的管道是否发生了泄漏。

5 结 论

主要研究了外界环境折射率对 TFBG 透射光谱的影响,使用 OptiGrating 软件进行了模拟仿真。实验研究表明,当外界环境折射率大于等于包层模折射率时,TFBG 透射谱中的包层模光谱会全部消失,并且纤芯模谐振峰的波长不会随着外界环境折射率的改变而发生漂移。研究结果对实时监测装有折射率较大液体的管道泄漏情况等具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] Yang K, Liu Y G, Wang Z, et al. Fiber laser twist

sensor with hybrid few-mode tilt Bragg grating and few-mode long period grating[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(3): 161-164.

[2] Hu Z J, Ma R, Zhang X J, et al. Weak feedback assisted random fiber laser from 45°-tilted fiber Bragg grating[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3255-3263.

[3] Chen X Y, Nan Y G, Ma X Y, et al. *In situ* detection of small biomolecule interactions using a plasmonic tilted fiber grating sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2792-2799.

[4] Tao H, Mi Y A, Ren W H, et al. Vector mode conversion based on tilted long-period fiber grating written in ring fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0606002.

陶洪, 半月安, 任文华, 等. 基于环形光纤的倾斜长周期光纤光栅的矢量模式转换[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0606002.

[5] Tian X, Wang M, Wang Z F. Stimulated Brillouin scattering filters based on tilted fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1006002.

田鑫, 王蒙, 王泽锋. 基于倾斜光纤 Bragg 光栅的受激布里渊散射滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1006002.

[6] Yang J M, Lin Y L, Huang Q Q, et al. Wavelength-tunable linearly polarized Yb-doped fiber laser based on tilted fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0314003.

杨锦民, 林彦吕, 黄千千, 等. 基于倾斜光栅的可调谐线偏振掺镱光纤激光器[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0314003.

[7] Dai L L, Zou C H, Huang Q Q, et al. Continuously tunable mode-locked fiber laser based on tilted fiber grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508026.

戴礼龙, 邹传杭, 黄千千, 等. 基于倾斜光纤光栅的连续可调谐锁模激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508026.

[8] Li Z H, Ruan X K, Dai Y X. Simultaneous excitation of leaky mode resonance and surface plasmon resonance in tilted fiber Bragg grating[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(11): 112005.

[9] Shaimerdenova M, Bekmurzayeva A, Sypabekova M, et al. Interrogation of coarsely sampled tilted fiber Bragg grating (TFBG) sensors with KL.T[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33487-33496.