

doi: 10.3788/gzxb20164503.0306004

单层结构光纤布拉格光栅光谱特性研究

赵洪霞, 丁志群, 程培红, 包蕾, 鲍吉龙, 蒋鹏, 李银杰

(宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘 要: 基于单模微纳光纤基模有效折射率色散方程和光纤布拉格光栅谐振方程, 研究单层结构光纤布拉格光栅光谱特性, 并用 FH 酸化学腐蚀法制得单层结构布拉格光栅. 理论和实验结果表明: 随着光栅半径减小, 单层结构光纤布拉格光栅谐振波长蓝移, 且谐振波长个数由 5 个减少到 1 个, 直至最后完全消失; 随着光栅外环境折射率的减小, 截止半径缩短, 当折射率降到 1 时, 截止半径减为 $0.55 \mu\text{m}$.

关键词: 单层光纤布拉格光栅; 光谱特性; 谐振波长; 光栅半径; 环境折射率

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0306004-4

Spectral Characteristics of Single Layer Fiber Bragg Grating

ZHAO Hong-xia, DING Zhi-qun, CHENG Pei-hong, BAO Lei, BAO Ji-long,
JIANG Peng, LI Yin-jie

(Electronic and Information Engineering College, Ningbo University of Technology,
Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract: The spectral characteristics of the single layer optical fiber Bragg grating was analyzed in detail based on single mode effective refractive index of micro-nano optical fiber dispersion equation and the resonance equation of the optical fiber Bragg grating. The single layer optical fiber Bragg grating obtained by FH acid etching. with the decrease of the fiber core radius, the resonance wavelength shift to the lift, and the resonant wavelength numbers are reduced from 5 to 1, until finally disappeared; With the decrease of the refractive index grating external environment at the same time, the cut-off radius reduced, and when the grating external environment refractive index dropped to 1, the cut-off radius reduced to $0.55 \mu\text{m}$.

Key words: Single layer fiber Bragg grating; Spectral characteristics; Resonant wavelength; Grating radius; Environment refractive index

OCIS Codes: 060.3735; 060.2370; 280.0280

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为新一代传感器,除具有波长绝对编码、不受电磁场干扰、安全防爆、耐腐蚀、灵敏度高、感传合一、体积小、重量轻等光纤光栅诸多优点外,同时是一种反射型无源器件、制作简单、成本低、可实现分布式感测,且带宽可达亚微米量级,感测准确度极高,成为极具应用前景的一类传感器.因此,在军事^[1-3]、航空航天^[4]、能源^[5]、生物医学^[6]、自动控制^[7,8]以及建筑施工^[9,10]等领域倍受青睐.尤其可应用于许多传统传感器难以涉足的极端

恶劣场合,并能在极限温度、腐蚀、真空和危险的环境中正常工作,成为一些特殊环境非接触的有效测量手段,已广泛用于应力、温度和压力等参量高灵敏度^[11-13]传感测量.但由于 FBG 谐振波长仅与其纤芯和包层折射率有关,对环境折射率不敏感,无法感测生化参量,如折射率等.近年来研究发现,随着 FBG 所在光纤包层半径减小,尤其只有芯层结构的单层 FBG,光栅外倏逝场大比例增强.在入射光波为 633 nm 的氧化硅光纤中,当光纤直径为 400nm 时,71.5% 的光波能量约束在微纳光纤中,而当光纤的直径降到 200nm 时,大于 90% 的能量移到了光纤外部以倏逝场的形式在光

基金项目:浙江省自然科学基金(No. Q14A040006)和宁波市自然科学基金(Nos. 2015A610115, 2015A61008)资助

第一作者:赵洪霞(1970-),女,副教授,主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email:zhx-1228@163.com

收稿日期:2015-10-08;录用日期:2015-12-15

<http://www.photon.ac.cn>

纤外部介质中传输,使得 FBG 特性参量与外界环境息息相关,可用于环境折射率等生化参量高灵敏度传感测量^[14]. 本文利用光纤布拉格光栅谐振方程和单模微纳光纤基膜有效折射率色散方程详细分析了单层 FBG 光谱特性,为单层 FBG 传感器件的应用推广提供有力的理论依据和技术参考.

1 理论分析

本文提出的单层 FBG 结构如图 1.

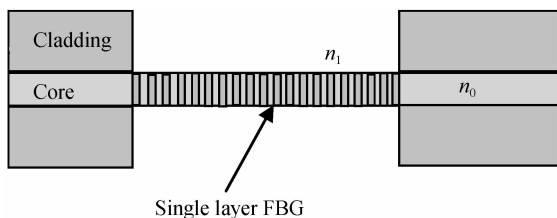


图 1 单层 FBG 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single layer fiber Bragg grating

n_0, n_1 分别为纤芯折射率和环境包层折射率.

光纤布拉格光栅的谐振波长满足公式^[15]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光栅基膜有效折射率, Λ 为光栅周期.

而根据光纤波导理论,单模微纳光纤基膜有效折射率满足公式^[16]

$$n_{\text{eff}}^2 = n_0^2 - \left(\frac{U}{V}\right)^2 (n_0^2 - n_1^2) \quad (2)$$

式中 $V = k_0 a \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$ 为光纤归一化频率, $U = a \sqrt{k_0^2 n_0^2 - \beta^2}$ 为横向传播常量,同时 U 和 V 满足光纤 LP 模式的本征方程

$$\frac{U J_{m-1}(U)}{J_m(U)} = -\frac{W K_{m-1}(W)}{K_m(W)} \quad (3)$$

式中, $W = a \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_1^2}$, a, β 和 k_0 分别为纤芯半径、相位因子和传播常量.

由式(2)可知,在纤芯折射率和入射光波长一定时,单层结构 FBG 纤芯基膜有效折射率与纤芯半径,纤芯外环境折射率密切相关,从而可用于环境参量(折射率和浓度等)的高灵敏度传感测量.

采用 Mathcad15 计算软件,在入射光波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,纤芯折射率 $n_0 = 1.44661$,作为包层的外界环境折射率 $n_1 = 1.1$,光栅周期 $\Lambda = 535 \mu\text{m}$ 时,利用式(1)和(2),得单层结构 FBG 谐振波长个数与光栅半径之间的关系,如图 2.

由图 2 可知,单层 FBG 谐振波长个数与光栅半径紧密相关.随着光栅半径减小谐振波长个数随之阶梯式减少;而当光栅半径小于 $0.63 \mu\text{m}$ 后,FBG 纤芯内传输光功率大幅度下降,致使谐振波长对应的功率微乎其微^[17].

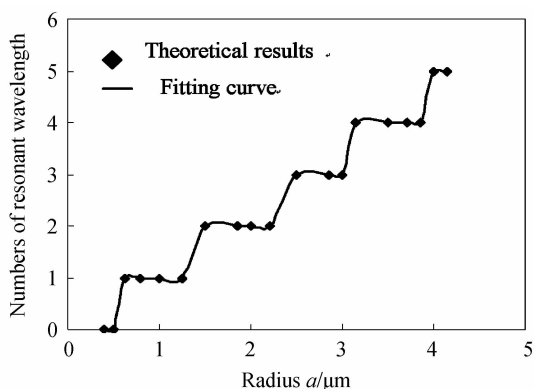


图 2 单层 FBG 谐振波长个数与半径之间关系曲线
Fig. 2 Plot of numbers of resonant wavelength of the single layer FBG vs. radius

图 3 为 $n_0 = 1.44661, n_1 = 1.1$ 各级模式在不同半径情况下,谐振波长的变化曲线.由图 3 可知,随着光栅半径减小,各级谐振波长蓝移,半径越小,波长减小越快.

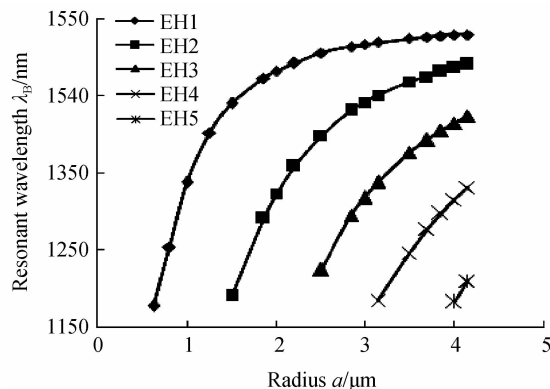


图 3 单层 FBG 各级谐振波长与半径之间的关系
Fig. 3 Plot of resonant wavelength of the single layer FBG vs. radius

图 4 为 $n_0 = 1.44661$ 时,截止光栅半径与外界环境折射率之间的关系.

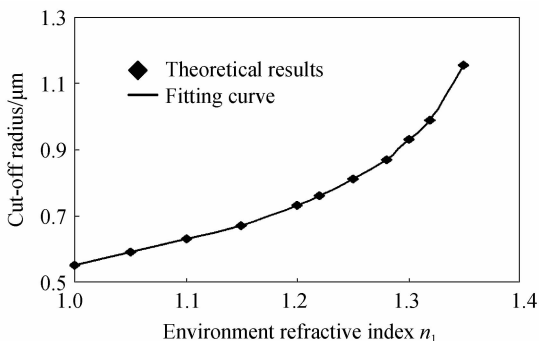


图 4 单层 FBG 截止半径与环境折射率之间的关系
Fig. 4 Plot of the cut-off radius of single layer FBG vs. the environment refractive index

由图 4 可知,随着光栅外环境折射率减小,截止半

径减小,当光栅外环境折射率降到1时,截止半径降为 $0.55\ \mu\text{m}$.

2 实验研究与分析

单层 FBG 的制备可采用相位掩膜法、熔融拉伸法和 HF 酸溶液化学腐蚀法. 由于单层 FBG 的直径为微米量级,采用相位掩膜法制作难度较大;同时课题组所在实验室没有可达 2 000 K 左右的高温热源,所以本实验采用 HF 酸溶液湿腐蚀法制备只有芯层结构的 FBG.

首先把 Corning-28e + 单模光纤经过大约 2 周 10 MPa 气压下载氢,然后利用 Compex-pro50 准分子激光器采用相位掩膜法制得 FBG,周期为 $535\ \mu\text{m}$,其反射光谱如图 5. 谐振波长和 3 dB 带宽分别为 $1536.437\ \text{nm}$ 和 $0.106\ \text{nm}$,幅值为 10 dB 左右,为了使有较好的稳定性,进行 $120\ ^\circ\text{C}$ 退火处理.

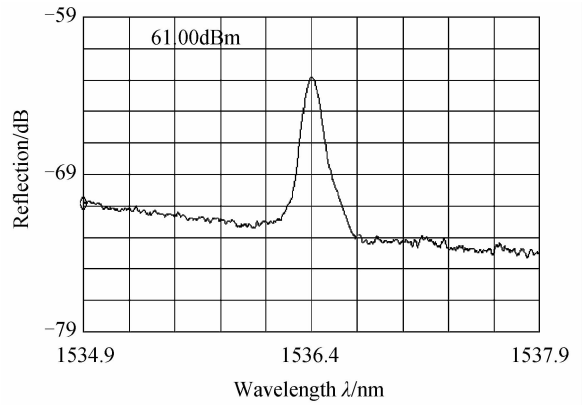


图 5 光纤 FBG 反射谱

Fig. 5 Reflection spectra of the fiber Bragg grating

把自制的 FBG 和 5 根去掉涂覆层的 Corning-28e + 单模光纤同时放入由 40% 的 HF 酸和纯净水按 1 : 5 配比得到的溶液中,腐蚀其光纤直径,同时利用 Agilent 86140B 光谱仪实时监测腐蚀过程中 FBG 反射

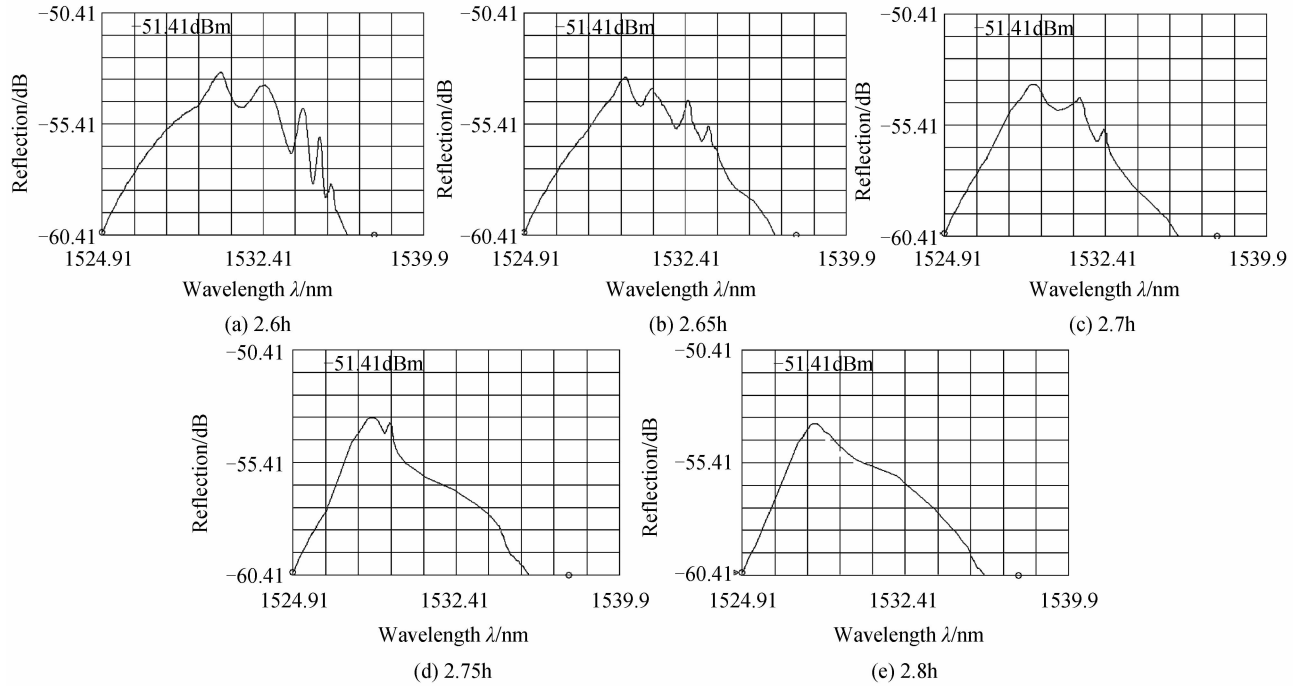


图 6 不同半径单层 FBG 反射谱

Fig. 6 The single layer FBG reflectance spectrum with different radii

谱的变化. 腐蚀 2.6、2.65、2.7、2.75 和 2.8 h 后得到 FBG 反射光谱如图 6.

将 5 根分别腐蚀 2.6、2.65、2.7、2.75 和 2.8 h 的 Corning-28e + 单模光纤,用去离子水冲洗,晒干后,放在显微镜下观察. 纤芯半径分别为 4、3.5、2、1.6 和 $0.8\ \mu\text{m}$. 由图可知,当光栅半径腐蚀到 4、3.5、2、1.6 和 $0.8\ \mu\text{m}$ 时,分别有 5、4、3、2、1 个不同的谐振波长,并随着光栅半径的减小,谐振波长蓝移,与理论分析

一致.

利用腐蚀好的 FBG 进行光栅外折射率测量. 以蔗糖的水溶液为待测液,图 7 为半径为 $0.8\ \mu\text{m}$ FBG 折射率测量曲线.

由图 7 可知,当光栅半径为 $0.8\ \mu\text{m}$ 时,作为包层的光栅外蔗糖溶液的折射率与谐振波长呈现良好的线性关系,可用于液体和气体折射率或浓度的测量.

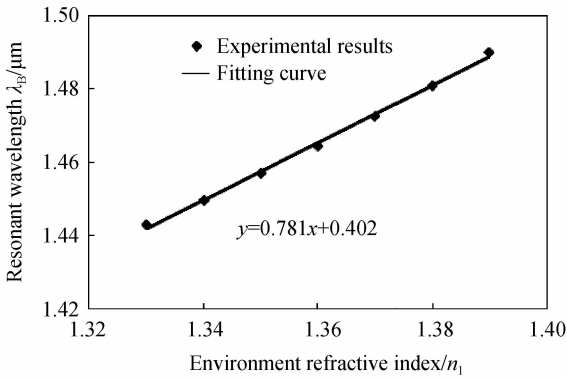


图7 单层FBG谐振波长与环境折射率之间的关系
Fig. 7 Plot of the resonant wavelength of single layer FBG vs. Environment refractive index

3 结论

利用单模微纳光纤光栅基膜有效折射率的色散方程和光纤布拉格光栅谐振方程,分析了单层结构FBG光谱特性.当纤芯折射率和入射光波长一定时,单层结构FBG谐振波长与纤芯半径,纤芯外环境折射率密切相关.随着光栅半径减小,谐振波长个数随之阶梯式减少,随着光栅外环境折射率减小,截止半径减小.当光栅外环境折射率降到1时,截止半径降为 $0.55\ \mu\text{m}$.同时实验验证了理论分析的正确性.单层结构FBG具有体积小,制作简单,可实现高灵敏度生化传感参量测量.

参考文献

- [1] JANG B W, LEE Y G, KIM J H, *et al.* Real-time impact identification algorithm for composite structures using fiber Bragg grating sensors [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2012, **50**(2): 99-103.
- [2] YU Le-wen, ZHANG Da, YU Bin, *et al.* A pole-rod type of fiber gating strain sensor [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(9): 1665-1668.
余乐文,张达,余斌,等.一种拉杆式的光纤光栅应变传感器 [J]. *光电子·激光*, 2012, **23**(9): 1665-1668.
- [3] PANG Dan-dan, SUI Qing-mei, JIANG Ming-shun, *et al.* Fiber Bragg grating high-temperature sensing system based on improved support degree matrix model [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(11): 2045-2051.
庞丹丹,隋青美,姜明顺,等.应用改进支持度矩阵模型的光纤光栅高温传感系统 [J]. *光电子·激光*, 2012, **23**(11): 2045-2051.
- [4] YU You-long, XUE Hang, WANG Yan-xiao, *et al.* Temperature distributed sensing technique for the local-area of the surface based on fiber bragg gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0506001.
余有龙,薛航,王彦晓,等.基于光纤光栅的物体表面附近温度场测量 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 0506001.

- [5] MAR V, ALAIR D O, JOSE H K, *et al.* Thermal characteristics analysis of an IGBT using a fiber Bragg grating [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(2): 99-103.
- [6] LIU R M, LIANG D K, ASUNDI A, *et al.* Small diameter fiber Bragg gratings and applications [J]. *Measurement*, 2013, **46**(9): 3440-3448.
- [7] VENGAL R P, SRI K, SAI S M, *et al.* A high sensitive FBG pressure sensor using thin metal diaphragm [J]. *Journal of Optics*, 2011, **43**(2): 117-121.
- [8] OU Qi-biao, ZENG Qing-ke, QIN Zi-xiong, *et al.* Application of coated long period fiber crating to measure the change of micro-refractive index [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(2): 323-328.
欧启标,曾庆科,秦子雄,等.应用镀膜长周期光纤光栅实现微折射率变化的测量 [J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(2): 323-328.
- [9] MI Lin, YANG De-xing, JIANG Ya-jun, *et al.* Nvestigation of FBG voltage sensor based on joule heat [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906005.
米林,杨德兴,姜亚军,等.基于焦耳热的光纤布喇格光栅电压传感器研究 [J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0906005.
- [10] WU Jun, CHEN Wei-min, SHU Yue-jie, *et al.* Embedded strain homogenized FBG sensor for smart cables [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7): 0706002.
吴俊,陈伟民,舒岳阶,等.锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(7): 0706002.
- [11] PI Hao-yang, LIU Qiong, YE Qing, *et al.* Analysis and experimental study of inner stress for metalized fiber bragg gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(3): 0305008.
皮浩洋,刘琼,叶青,等.金属化光纤光栅内应力的分析和实验研究 [J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0305008.
- [12] ZHANG D S, WEI Q, HUANG J, *et al.* A fiber bragg grating pressure sensor and its application to pipeline leakage detection [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, **13**(2): 59045.
- [13] KI S, PI T R, CU S P. Method of simultaneous measurement of two direction force and temperature using FBG sensor head [J]. *Journal of Optic*, 2015, **54**(10): 2677-2687
- [14] LIANG Rui-bing, SUN Qi-zhen, YUE Jiang-hai. Theoretical investigation on refractive index sensor based on Bragg grating in micro/nanofiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(10): 104221.
梁瑞冰,孙琪真,沃江海.微纳尺度光纤布拉格光栅折射率传感的理论研究 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(10): 104221.
- [15] BALL G A, MOREY W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(6): 420-422
- [16] 廖延彪. *光纤光学* [M]. 清华大学出版社, 200
- [17] LIU Ying-gang, CHE Fu-long, JIA Zhen-an, *et al.* Investigation on the characteristics of micro/nanofiber Bragg grating for refractive index sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(10): 104218.
刘颖刚,车伏龙,贾振安,等.微纳光纤布拉格光栅折射率传感特性研究. *物理学报* [J], 2013, **62**(10): 104218.