

微纳光纤布拉格光栅折射率传感特性研究*

刘颖刚[†] 车伏龙 贾振安 傅海威 王宏亮 邵敏

(西安石油大学, 陕西省光电传感测井重点实验室, 西安 710065)

(2012年11月16日收到; 2012年12月12日收到修改稿)

利用光纤布拉格光栅方程和光纤基模有效折射率随纤芯半径和环境折射率的函数关系, 建立了微纳光纤布拉格光栅 (MNFBG) 反射波长随环境折射率变化的数学模型, 给出了波长灵敏度函数, 并指出 MNFBG 反射波长的变化规律决定于有效折射率随纤芯半径和环境折射率变化的关系. 详细探究了有效折射率及其灵敏度的变化规律, 结果表明: 有效折射率随纤芯半径和环境折射率的减小而非线性减小, 其对环境折射率变化的灵敏度随环境折射率的增大而非线性增加, 而且随纤芯半径减小, 有效折射率的灵敏度、线性度以及线性响应范围均呈递增规律. 通过对纤芯半径为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 MNFBG 在 $1.20\text{—}1.30$ 和 $1.33\text{—}1.43$ 环境折射率范围内的波长响应关系拟合, 分别获得了 $477.33\ \text{nm}/\text{RIU}$ 和 $856.30\ \text{nm}/\text{RIU}$ 的波长灵敏度以及 99.58% 和 99.7% 的高线性度, 论证了分析结论以及折射率区间划分测量方案的正确性, 为 MNFBG 折射率传感器的设计、优化以及应用提供了参考依据.

关键词: 微纳光纤, 光纤布拉格光栅, 折射率传感, 数值模拟

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Pa, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.62.104218

1 引言

折射率是材料物质的一个基本光学参数^[1], 在物理、化学以及生化领域有着重要的应用价值, 而光纤传感技术的发展, 为不同物质折射率的准确测量提供了新的方法, 特别是微纳光纤技术与光纤光栅传感技术的有效结合, 使光纤光栅折射率传感成为可能. 微纳光纤布拉格光栅 (micro/nanofiber Bragg grating, MNFBG) 是一种直径在微米或纳米量级的新型光波导器件, 结合了微纳光纤倏逝场传输和光纤布拉格光栅强波长选择的光学特性^[2-4], 被用作传感器不但具备体积小、响应速度快、可靠性强、不受电磁干扰以及在易燃易爆环境中安全工作等优点外, 还具有倏逝场传播易受环境折射率变化影响的特点^[4,5], 可将外界环境折射率变化信息转化为波长的变化, 因此可被应用于气体或液体折射率传感测量^[6-10], 在生物化学、环境监测以及食品加工等领域具有潜在应用价值. 文献^[11]报道了将微纳光纤布拉格光栅应用于不同温度纯

水折射率的测量, 在 $25\ ^\circ\text{C}\text{—}60\ ^\circ\text{C}$ 范围内, 获得了小于 0.5% 的测量误差, 验证了进行液体折射率传感的可行性. 而且测量过程中所具有的单反射峰和窄线宽特性, 相对于长周期光纤光栅折射率传感器, 不仅能提高测量的准确性, 而且易于实现多传感器的网络化复用. 有关 MNFBG 应用于不同物质环境折射率测量理论与技术已经成为国内外光纤传感领域的研究热点^[2,3,11-14], 先后提出了微纳光纤紫外光刻写、化学腐蚀以及飞秒激光器加工等多种制作 MNFBG 的方法^[7,12-16]. 由于诸多文献并未对 MNFBG 的折射率传感特性进行系统研究, 我们通过光纤波导理论, 在基模传输特征方程基础上, 利用 Gauss 场近似模型, 得到了无包层纤芯外漏的 MNFBG 导模有效折射率与纤芯半径和充当包层的环境物质折射率的关系, 数值分析了 MNFBG 反射波长对环境折射率的响应特性, 包括 MNFBG 折射率传感中的灵敏度、测量线性关系以及线性响应范围等, 研究结论可为微纳光纤布拉格折射率传感研究提供参考.

* 国家自然科学基金 (批准号: 60727004) 和教育部重大项目基金 (批准号: 708087) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: ygliu@xsyu.edu.cn

2 理论模型

MNFBG 具有大比例倏逝场传输的光学特性, 直径越小倏逝场的比例就越大, 与外界环境物质作用时, 也就越容易受到环境物质折射率变化的影响, 致使其导模折射率发生变化, 从而使光栅的反射波长发生漂移. 因此, 在恒温条件下, 布拉格波长的变化仅由外界折射率变化导致的导模有效折射率变化决定, 根据光纤光栅布拉格方程 $\lambda_B = 2n\Lambda$ 则有:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n, \quad (1)$$

其中, Δn 是纤芯导模有效折射率的变化量, Λ 光纤布拉格光栅的周期. 又根据光纤波导理论, 单模微纳光纤基模的有效折射率可以表示为^[17]

$$n^2 = n_1^2 - \left(\frac{U}{V}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2), \quad (2)$$

式中 $V = k_0 r \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 为光纤归一化频率, 横向传播常数为 $U = r \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$, U 和 V 满足光纤 LP 模式的本征方程: $\frac{U J_{m-1}(U)}{J_m(U)} = -\frac{W K_{m-1}(W)}{K_m(W)}$ ($m = 1$

对应 LP₀₁ 基模), $W = r \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2}$, 其中 r , n_1 , n_2 , β 和 k_0 分别为纤芯半径、纤芯折射率、环境包层折射率、相位因子和传播常数. 采用 Gauss 场近似对本征方程化简^[17], 对于单模光纤 LP₀₁ 基模则有 $U = \frac{(1+\sqrt{2})V}{1+(4+V^4)^{\frac{1}{4}}}$, 将该函数关系对应的 U - V 关系

曲线与本征方程数值模拟精确解得的 U - V 曲线^[17] 相比, 其符合程度较好, 在 $V < 4$ 的范围内误差不超过 3%. 因此, 当环境包层折射率 n_2 与芯层折射率 n_1 相近即满足弱导条件时, 由于 V 较小, 得到的横向传播常数 U 具有较好的近似度. 当环境包层折射率与芯层折射率相差较大时, 由于所研究光纤芯径较小, 则会使归一化频率 V 减小到使 U 存在允许误差的范围内, 特别是对于 r 小于 $1 \mu\text{m}$ 且 n_2 大于 1.2 的情况, 下文计算得到的 V 不超过 3.5, 所以上述近似方法完全可行.

然后, 将上述横向传播常数与归一化频率的关系式带入 (2) 式, 则微纳光纤导模折射率函数可写成:

$$n^2(n_2, r) = n_1^2 - \left(\frac{(1+\sqrt{2})}{1+(4+V^4)^{\frac{1}{4}}}\right)^2 (n_1^2 - n_2^2), \quad (3)$$

可见, 有效折射率 n 是纤芯半径 r 和环境包层折射率 n_2 的函数. 将 (3) 式关于包层折射率 n_2 求导, 即

可得有效折射率 n 随环境包层折射率 n_2 变化的灵敏度 k_n , 则有:

$$k_n(r, n_2) = \frac{\partial n}{\partial n_2} = \frac{n_2(1+\sqrt{2})^2}{n[1+(4+V^4)^{1/4}]^3} \times \left[1+(4+V^4)^{1/4} - \frac{V^4(n_1^2 - n_2^2)}{(4+V^4)^{3/4}}\right]. \quad (4)$$

又根据 (1) 式, 布拉格波长随环境折射率的变化可以表示为

$$\Delta\lambda = 2\Lambda k_n \Delta n_2 = K \Delta n_2, \quad (5)$$

由 (5) 式可见, 布拉格波长随环境折射率变化的灵敏度 K 是光纤光栅周期 Λ 和有效折射率随环境折射率变化的灵敏度 k_n 的函数, 而纤芯半径 r 和环境包层折射率 n_2 又是有效折射率灵敏度 k_n 的两个决定因素. 因此, 在折射率传感应用中, 若忽略热膨胀效应引起的纤芯尺寸和光纤光栅周期变化, 则有效折射率 n 随环境折射率 n_2 的变化规律即为 MNFBG 的布拉格波长随环境折射率的变化规律, 但这种变化规律并非是理想的线性关系, 这主要源于 k_n 是环境包层折射率 n_2 以及纤芯半径 r 的非线性函数. 因此, 研究这一非线性规律将有助于利用该规律进行 MNFBG 折射率传感器的设计与优化, 实现高灵敏度与大范围折射率的传感测量.

3 数值模拟与分析

对于 SMF-28e 型应用于刻写光栅的光纤, 其纤芯折射率取 $n_1 = 1.4682$, 光纤光栅的周期取 $\Lambda = 529.04 \text{ nm}$, 1550 nm 光的波数 $k_0 = 2\pi/1550 \text{ nm}^{-1}$, 光纤中传输光的有效折射率 n 可依据 (3) 式计算, 有效折射率随环境折射率变化的灵敏度 k_n 可依据 (4) 式计算, 它们均是纤芯半径 r 和环境折射率 n_2 的函数. 为了研究布拉格波长随环境折射率变化的规律, 分别研究讨论了不同纤芯半径和不同折射率环境下的有效折射率及其随环境折射率变化的灵敏度的变化规律. 由于纤芯半径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 纤芯内传输光功率已经降至大约 3% 以下^[5], 光栅反射波长对应功率微乎其微, 故文中对 $0.1 \mu\text{m}$ 以下的情况不做讨论.

图 1 是数值模拟的有效折射率随纤芯半径变化的关系曲线, 曲线自上而下分别对应 1.45, 1.40, 1.35, 1.30, 1.20 和 1.00 的环境折射率. 当纤芯半径较大时, 有效折射率随着纤芯半径的减小而小幅减

小, 但当纤芯半径减小到约 $2\ \mu\text{m}$ 以下时, 有效折射率减小的幅度开始增大, 只是不同环境折射率下的减小幅度不同, 环境折射率越小有效折射率减小幅度越大. 特别是在 $n_2 = 1.0$ 时, 有效折射率随纤芯半径的变化最为明显. 这主要源于传输光以倏逝波的形式进入到环境物质中进而影响导模有效折射率, 纤芯半径越小环境包层中倏逝波的比例会越大^[18], 倏逝波功率随半径的变化有着与图 1 所示的相同变化规律, 这就决定了有效折射率的变化规律.

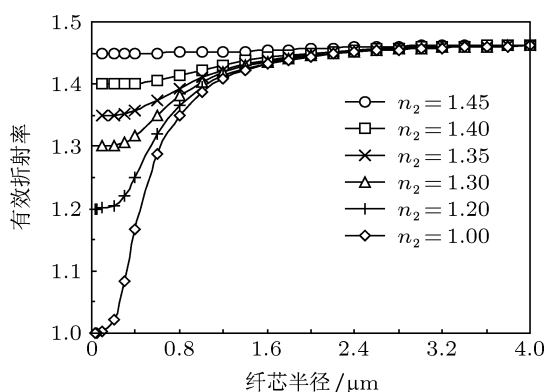


图 1 不同折射率环境下的有效折射率与纤芯半径关系

对于这一分析, 文献 [5] 曾数值模拟了空气中纤芯传输功率百分比随半径的变化关系, 当纤芯半径由 $2\ \mu\text{m}$ 减小到 $1\ \mu\text{m}$ 时, 纤芯内的功率由 95% 减少到 75%, 减少幅度仅 20%, 但当纤芯半径由 $1\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.5\ \mu\text{m}$ 时, 功率很快减少到 10% 以下, 减少幅度却达到 65% 以上, 纤芯光功率随半径减小而递减, 与有效折射率随环境折射率变化的规律是相同的. 当纤芯半径减少到 $0.3\ \mu\text{m}$ 以下时, 绝大部分传输光以倏逝波的形式进入环境包层中, 芯径的变化对传输功率的影响已很小了, 倏逝波功率的变化也趋于平缓, 验证了上述有效折射率随纤芯半径变化的规律. 对于固定光栅周期的光纤布拉格光栅而言, 根据 (1) 式所示关系, 有效折射率随纤芯半径的变化规律即为光纤光栅布拉格波长随纤芯半径的变化规律, 此规律可为制备不同芯径尺寸的 MNFBG 提供判断依据.

不同纤芯半径时的有效折射率随环境折射率变化曲线的模拟结果如图 2 所示, 其中曲线自上而下对应纤芯半径依次减小. 当纤芯半径一定时, 随着环境折射率的减小, 有效折射率及其对应曲线的斜率均呈递减规律, 说明环境折射率越大有效折射率的灵敏度越高. 对于不同纤芯半径的 MNFBG,

由于导模有效折射率的变化随纤芯半径的减小呈递增规律, 致使同一环境折射率对应曲线的斜率即有效折射率的灵敏度在逐渐增大, 纤芯半径越小有效折射率的灵敏度越大. 同时由图 2 可见, 当纤芯半径减小而有效折射率灵敏度增加的同时, 有效折射率随环境折射率变化的关系曲线的线性度不断增加直至趋于恒定, 可见有效折射率的灵敏度在增加的同时, 其对环境折射率响应关系的线性度以及线性响应区间也在增大. 例如, 当纤芯半径约在 $2\ \mu\text{m}$ 以上时, 有效折射率随着环境折射率的变化缓慢, 特别是当纤芯半径为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 其基模有效折射率在 1.0—1.45 范围内的变化量仅为 0.0012. 随着纤芯半径减小到 $1\ \mu\text{m}$ 以下时, 有效折射率的变化量不断增大且非线性特性得到改善, 当纤芯半径趋近 $0.1\ \mu\text{m}$ 时, 有效折射率的变化量达到了 0.435, 是 $4.0\ \mu\text{m}$ 时的 362.5 倍, 平均灵敏度也由 $4\ \mu\text{m}$ 时的 0.003/RIU 提高到了 0.989/RIU, 而且在 1.0—1.45 的折射率范围内, 对环境折射率响应的线性度也由 61.5% 提高到了 99.9%, 已经接近理论上限.

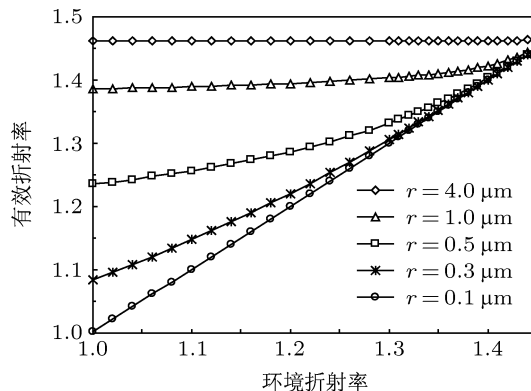


图 2 不同芯径时的有效折射率与环境折射率关系

为了进一步定量验证上述有效折射率灵敏度的变化规律, 又根据 (5) 式数值模拟了 k_n 随纤芯半径 r 和环境包层折射率 n_2 的关系曲线. 图 3 是不同纤芯半径时的有效折射率灵敏度随环境折射率变化的关系曲线. 纤芯半径越小时有效折射率灵敏度越高, 而且在所讨论环境折射率范围内的变化量越小, 即越趋于恒定, 进一步验证了上述对有效折射率随环境折射率变化规律的分析结论. 由于灵敏度显著变化时所对应的纤芯半径会随环境包层折射率的减小而减小, 因此要实现折射率传感检测的大范围和高灵敏度, 在考虑微纳光纤光栅的机械韧性

前提下, 应选择芯径较小而且纤芯折射率与环境折射率相近的微纳光纤光栅, 这样才会使布拉格波长在环境折射率传感检测过程中具有大范围、高灵敏度和高线性度的特性.

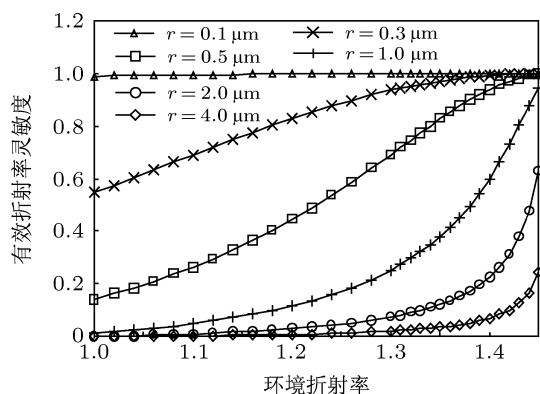


图3 不同芯径时的有效折射率灵敏度与环境折射率的关系

另一方面, 由 (5) 式可知, MNFBG 的反射波长随环境折射率变化的灵敏度 K 是有效折射率灵敏度 k_n 的 2Λ 倍, 在折射率的测量中, 如果不考虑温度的影响, 环境折射率变化影响的只是光纤光栅传输光的有效折射率 n , 而不影响光纤光栅的周期 Λ , 则有效折射率灵敏度 k_n 随纤芯半径 r 和环境折射率 n_2 的变化规律完全表征了布拉格波长随环境折射率变化的规律. 同时, 布拉格波长随环境折射率变化的灵敏度 K 还与光纤光栅的周期有关, 周期越大灵敏度也越高. 若光栅周期取 $\Lambda = 529.04 \text{ nm}$, 则波长灵敏度极限值为 1058.04 nm/RIU . 根据图 3 所示有效折射率灵敏度与环境折射率关系, 可计算出不同纤芯半径和环境折射率附近的波长灵敏度. 例如, 对于 $0.1, 1.0$ 和 $4.0 \mu\text{m}$ 的微纳光纤布拉格光栅, 其在环境折射率为 1.45 时的波长灵敏度分别为 $1058.033, 999.167$ 和 258.971 nm/RIU . 利用上述有效折射率及其灵敏度、线性度和线性响应区间范围问题的研究结论, 可为折射率传感器的设计、灵敏度的提高提供优化依据, 更好地满足测量需求.

由上述研究结果可见, 要在 $1.0\text{--}1.45$ 环境折射率范围内取得较高的折射率传感线性度, 纤芯半径就得达到 $0.1 \mu\text{m}$ 左右, 这样的 MNFBG 折射率传感器机械韧性会很差, 而在小范围折射率区间内, 波长对环境折射率的响应具有高线性度. 如图 4 曲线是纤芯半径分别为 $1.0 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 布拉格波长在不同环境折射率范围内的拟合曲线, 在 $1.20\text{--}1.30$ 的折射率范围内, 其线性度分别

为 99.2% 和 99.58% ; 在 $1.33\text{--}1.43$ 的折射率范围内, 其线性度分别为 96.15% 和 99.7% , 然而在 $1.00\text{--}1.45$ 的折射率范围内的线性度仅为 77.7% 和 93.4% . 因此, 可以利用这种局部范围内的高线性关系特性进行折射率传感检测, 只不过对应的波长灵敏度有所不同. 纤芯半径为 $1.0 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.20\text{--}1.30$ 和 $1.33\text{--}1.43$ 折射率范围内的波长灵敏度分别为 88.53 nm/RIU 和 299.14 nm/RIU , 灵敏度相差 3.4 倍; 纤芯半径为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 在 $1.20\text{--}1.30$ 和 $1.33\text{--}1.43$ 折射率范围内的波长灵敏度达到了 477.33 nm/RIU 和 856.30 nm/RIU , 灵敏度相差 1.8 倍, 纤芯半径缩小一半, 对应折射率区间内的灵敏度成倍提高. 这进一步说明, 纤芯半径越小波长灵敏度随环境折射率的变化越小, 环境折射率越大波长灵敏度越大并且随折射率的增加而趋于恒定值, 即布拉格波长灵敏度是有理论上限的. 同时也说明, 在局部范围内利用线性关系进行折射率的测量是可行的. 实际应用中可根据测量要求, 合理选择灵敏度, 最大限度增加 MNFBG 的芯径, 以增加传感器应用的机械韧性.

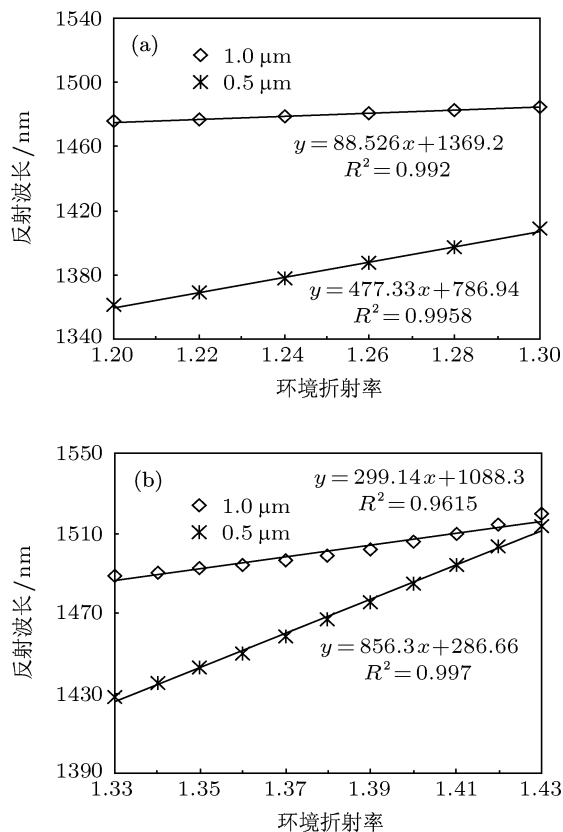


图4 两种不同环境折射率范围内的布拉格波长变化拟合曲线 (a) 折射率 $1.20\text{--}1.30$; (b) 折射率 $1.33\text{--}1.43$

4 结论

为了探究 MNFBG 折射率测量中的布拉格波长变化规律, 在纤芯导模有效折射率和布拉格波长随纤芯半径和环境折射率变化的关系模型基础上, 数值模拟并详细讨论了有效折射率随纤芯半径和环境折射率的变化规律. 研究表明: 受到环境包层物质与倏逝波作用影响, 不同纤芯半径 MNFBG 反射波长的灵敏度、线性度以及线性响应范围均随环境折射率的变化呈现一定的变化规律, 纤芯半径越小环境折射率越大, 布拉格波长随环境折射率变化的灵敏度越高, 而且灵敏度随纤芯半径

变化成非线性关系. 考虑到 MNFBG 应用的机械强度以及实际折射率测量范围特点, 提出按小折射率区间内的高线性关系进行折射率传感测量, 并拟合了纤芯半径为 $0.5 \mu\text{m}$ 的 MNFBG 的反射波长随环境折射率的变化关系, 在 1.20—1.30 和 1.33—1.43 环境折射率范围内, 分别获得了 477.33 nm/RIU 和 856.30 nm/RIU 的波长灵敏度, 而且对应范围内的线性度也分别达到了 99.58% 和 99.7%, 论证了折射率区间划分测量方案的可行性. 研究结果可为 MNFBG 折射率传感器的选择、设计、优化以及合理应用提供理论依据.

-
- [1] Sun W F, Wang X K, Zhang Y 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 114210
- [2] Tong L M, Pan X Y 2007 *Physics* **36** 626 (in Chinese) [童利民, 潘欣云 2007 物理 **36** 626]
- [3] Liang R B, Sun Q Z, Wo J H, Liu D M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104221 (in Chinese) [梁瑞冰, 孙琪真, 沃江海, 刘德明 2011 物理学报 **60** 104221]
- [4] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, He S L, Lou J Y, Shen M Y, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
- [5] Tong L M, Lou J Y, Mazur E 2004 *Opt. Express* **12** 1025
- [6] Liang W, Huang Y Y, Xu Y, Lee R K, Yariv A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 151122
- [7] Fang X, Liao C R, Wang D N 2010 *Opt. Lett.* **35** 1007
- [8] Iadicco A, Campopiano S, Cutolo A, Giordano M, Cusano A 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1250
- [9] Zhang Y, Lin B, Tjin S C, Zhang H, Wang G H, Shum P, Zhang X L 2010 *Opt. Express* **18** 26345
- [10] Chiang K S, Liu Y Q, Ng M N, Dong X Y 2000 *Electron Lett.* **36** 966
- [11] Ran Y, Jin L, Sun L P, Li J, Guan B O 2012 *Opt. Lett.* **37** 2649
- [12] Lee S M, Jeong M Y, Saini S S 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 1025
- [13] Ran Y, Tan Y N, Sun L P, Gao S, Li J, Jin L, Guan B O 2011 *Opt. Express* **19** 18577
- [14] Li B, Jiang L, Wang S M, Tsai H L, Xiao H 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 1420
- [15] Dan G, Stephen J M, Huimin D, Christopher W S 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 160
- [16] Xu B, Li Y, Dong X Y, Jin S Z, Zhang Z X 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 094203
- [17] Liao Y B 2000 *Fiber Optics* (Beijing: Tsinghua University Press) p200 (in Chinese) [廖延彪 2000 光纤光学 (北京: 清华大学出版社) 第 200 页]
- [18] Zhou H Q, Sui C H 2011 *J. Zhejiang Univ. Technol.* **39** 228 (in Chinese) [周寒青, 隋成华 2011 浙江工业大学学报 **39** 228]

Investigation on the characteristics of micro/nanofiber Bragg grating for refractive index sensing*

Liu Ying-Gang[†] Che Fu-Long Jia Zhen-An Fu Hai-Wei
Wang Hong-Liang Shao Min

(Shaanxi Key Laboratory of Photoelectric Sensing Logging, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(Received 16 November 2012; revised manuscript received 12 December 2012)

Abstract

Using the fiber Bragg grating equation and the functional relation of the fundamental effective mode refractive index (RI), the mathematical model of the wavelength shift and the relational function of wavelength sensitivity are established, when the reflected wavelength of the micro/nanofiber Bragg grating (MNFBG) changes with ambient RI and the fiber radius. The theoretical relationship demonstrates that the variation of MNFBG reflected wavelengths is dependent on the change of effective RI with fiber radius and ambient RI. Meanwhile, we also study the variation of effective RI and its sensitivity in detail. The results show that the effective RI nonlinearly decreases with fiber-core radius and ambient refractive index decreasing, and its sensitivity increases as the ambient refractive index increases, and the sensitivity, linearity and the linear response range increase with the decrease of the fiber radius. For a fiber radius of 0.5 μm , by simulating the curves of the effective index versus ambient RI in the index ranges of 1.20–1.30 and 1.33–1.43 respectively, the values of wavelength sensitivity of 477.33 nm/RIU and 856.30 nm/RIU and the values of high linearity of 99.2% and 99.7% are obtained, which not only verifies the analysis conclusions and the measurement program for RI sensing with MNFBG, but also supplies references for the RI sensor design, optimization and the application.

Keywords: micro/nanofiber, fiber Bragg grating, refractive index sensing, numerical simulation

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Pa, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.62.104218

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60727004), and the Research Foundation from Ministry of Education of China (Grant No. 708087).

[†] Corresponding author. E-mail: ygliu@xsyu.edu.cn