

具有大范围高分辨率线性响应特性的超短无芯 光纤溶液折射率传感器*

郑晶晶^{1)2)†} 简水生¹⁾ 马林¹⁾ 柏云龙¹⁾ 裴丽¹⁾ 宁提纲¹⁾ 闻映红²⁾

1) (全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

2) (北京交通大学电磁兼容实验室, 北京 100044)

(2013年4月22日收到; 2013年5月16日收到修改稿)

通过理论与实验对比, 证明模式传输分析 (MPA) 方法求解单模-多模-单模 (SMS) 结构的可行性. 以 MPA 理论为基础, 提出了 SMS 结构折射率传感装置线性响应点的寻找方法. 利用该方法为实验制作的无芯光纤 SMS 折射率传感器设计了大范围高分辨率线性响应位置, 并在实验中获得证实. 实验采用短至 4.4 mm 的直径 104 μm 无芯光纤, 在折射率 1.326—1.417 范围上获得了 19.10 dB 的功率线性变化, 以商用光功率计 0.01 dB 分辨率计, 折合折射率分辨率 4.76×10^{-5} , 实现了理论指导下的大范围高分辨率线性响应.

关键词: 全光纤折射率传感器, 多模干涉仪, SMS, 无芯光纤

PACS: 07.07.Df, 42.81.Pa, 07.60.-j, 07.60.Ly

DOI: 10.7498/aps.62.150703

1 引言

基于无包层多模光纤 (multimode fiber, MMF) 的单模-多模-单模 (single mode fiber-MMF-single mode fiber, SMS) 结构全光纤多模干涉仪 (multimode interference, MMI) 在折射率传感上的应用已经吸引了研究者们的大量关注. 在 SMS 结构中, MMF 段传输的模式能够受到外界环境变化的强烈影响, 因此可以被用于包括弯曲^[1]、液位^[2]、湿度^[3]、温度及应力^[4,5], 以及外界折射率^[6-8]等多种环境参量的监测. 基于 SMS 结构的全光纤折射率传感器不仅具备全光纤传感器抗电磁干扰、质量轻、尺寸小、精确度高、结构灵活、可实现在线实时连续监测的特点, 与可用于光纤折射率传感器的其他方式, 如光纤布拉格光栅^[9]、长周期光栅^[10,11]、光纤微腔^[12]、表面等离子体共振^[13,14]、金属狭缝阵列^[15]等相比, SMS 结构还具有无需特殊制备设备、制作方法极为简单、成本低、结构

稳定等独特优点.

基于 SMS 结构的外界折射率传感装置, 在信号提取上有两种方式. 一种方式是跟踪给定的峰值或谷值^[7] 波长随折射率的变化, 通过分析峰值/谷值波长确定外界折射率的大小. 这种方法最为直观, 因此在现有研究中出现较多. 然而这种信号提取方式有两个重要的不利因素: 其一是该方法必须对输出谱进行分析以确定峰值/谷值位置, 这就要求系统必须配备昂贵的 OSA 设备, 特别是考虑到 SMS 结构低成本的优势, 这对降低系统造价、提高价格竞争力非常不利. 这种信号提取方式的另一个不利因素是, 峰值/谷值波长随外界折射率变化的关系并非线性的, 而是变化速度不断增加的单调增关系. 这就意味着很难通过简单表达式确定波长与折射率的对应关系, 增加了系统实际使用的难度.

SMS 结构折射率传感装置还有一种能够提供线性响应的信号提取方式. 这种方式通过检测输出功率的变化判断外界折射率, 仅需要光功率计即可完成信号提取. Wang 等^[6] 在 2006 给出了一

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2010CB328206)、国家自然科学基金 (批准号: 61275076, 61177069) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2011JBM211) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jjzheng.c@gmail.com

个 SMS 结构, 理论分析表明采用直径 80 μm 长度 9.45 mm、折射率 1.47 的无包层多模光纤, 当外界折射率从 1.38 变化到 1.45 时, 传输功率变化超过 20 dB, 折合分辨率 3.3×10^{-5} . 其后直到 2012 年, Gao 等^[8] 通过 BPM 方法在给定 MMF 长度的前提下通过考察不同直径下的输出, 得到了一组线性表现的实验数据, 利用腐蚀方法移除包层并改变光纤直径, 采用直径约 80 μm 、长度 6.05 mm、折射率 1.4662 的无包层多模光纤, 在 1.33 到 1.43 的折射率变化范围上获得了线性响应, 输出功率变化约 2 dB. Xia 等^[3] 在 2013 年发表的实验结果中出现有一组存在线性关系, 该实验采用直径 125 μm 、长度 20 mm 的纯石英无芯光纤, 在折射率从 1.4128 到 1.4155 变化的过程中, 传输功率变化约 8.6 dB.

与此相比, 利用单个光栅类元件进行折射率传感通常以峰值波长移动作为外界折射率变化指标, 仅有少数论文对单光栅折射率传感的线性功率响应特性进行研究. 2009 年 Miao 等^[16] 利用倾斜光栅实现了 1.37—1.45 折射率变化范围上的线性响应, 功率变化 1.1 dB, 同年 Kapoor 等^[17] 利用两个不同周期的长周期光栅获得了 1.33—1.38 以及 1.37—1.38 两个范围上的近似线性响应, 对应功率变化分别约 7 dB 和 10 dB.

虽然腐蚀法是目前论文中获得无包层多模光纤较为常见的处理方法, 但这种方法耗时长, 精确性、可控性和可重复性都比较差. 若真正实现可大规模生产的实用化廉价 SMS 折射率传感器, 必须考虑采用无芯光纤 (no-core fiber, NCF) 构成 SMS. 纯石英 NCF 是一类不带有芯包结构的纯石英纤维, 控制方法与现有光纤相同, 光纤成本低廉. 利用 NCF 构成 SMS 结构, 仅需要利用光纤熔接机在两段单模光纤 (single mode fiber, SMF) 之间熔接一段 NCF 即可, 操作极为方便快捷. 需要注意的是, 如果所用的 SMF 和 NCF 直径相差过大, 在接头处出现的自然锥形过渡可能会对器件特性造成影响.

本文采用长度仅 4.4 mm 的 104 μm 直径 NCF 构建 SMS, 并通过模式传输分析 (mode propagation analysis, MPA) 理论证明了该光纤与 125 μm 直径普通 SMF 直接熔接的锥形过渡对器件性能几乎不存在影响. 本文给出了一个概括性的推断, 说明对于采用任意直径和长度 NCF 的 SMS 结构, 在满足一定条件的区域, 总存在对于某个折射率变化范围的线性响应位置. 对于实验所用的 SMS, 通过 MPA 理论分析了能够提供线性响应的波长, 并通过实验

证实了这一结论. 该方法能够帮助对线性响应 SMS 折射率传感器进行设计. 在 1.326 到 1.417 的折射率变化范围上, 实验 SMS 提供了 19 dB 的传输功率线性变化, 折合分辨率 4.76×10^{-5} .

2 理论模型及实验 SMS 构建

2.1 MPA 理论模型

目前用于 SMS 结构进行分析的方法主要有 BPM 和 MPA 两种. 前者有比较成熟的商用软件, 耗时较长, 在分析不规则结构中有特殊优势. 相比之下, 对于光在轴向正对良好连接的正规圆光波导中的传输, MPA 方法求解简单快速^[18], 在 matlab 环境下进行数值运算, 通常在十至数十秒时间内即可完成 SMS 结构的求解^[19], 它的问题仅在于处理渐变区域的不便.

对于轴向正对良好连接的 SMS, 多模段仅有 LP_{0m} 模式能够获得较好激励. 在多模段传输的光可以表示为

$$\psi(r, \phi, z) = \sum_m \sqrt{\eta_{0m}} \psi_{0m}(r, \phi) \exp(-j\beta_{0m}z), \quad (1)$$

其中 β_{0m} , ψ_{0m} 分别表示多模段 LP_{0m} 模式的传输常数和场分布, η_{0m} 表示输入 SMF 向多模段 LP_{0m} 模式的耦合系数, 定义为

$$\eta_{0m} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{\text{smf}} \psi_{0m}^* dx dy \right)^2}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{\text{smf}}^2 dx dy} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{0m}^2 dx dy}}, \quad (2)$$

其中 ψ_{smf} 为输入 SMF 的基模场分布. 若输入输出 SMF 参数相同, SMS 的输出特性, 即输出功率与输入功率的比值, 可以表示为

$$T = \left| \sum_m \eta_{0m} \exp(-j\beta_{0m}z) \right|^2. \quad (3)$$

由于 β_{0m} , η_{0m} 均为波长 λ 的函数, 从 (3) 式即可求解出给定 SMS 的传输谱.

2.2 实验 SMS 构建及理论对比

对于无包层多模光纤, 外界介质作为包层与作为纤芯的光纤共同构成多模波导, 因此多模段支持模式的渐逝场分布延伸到光纤以外的外界介质当中, 这决定了该结构本质上对外界折射率非常敏感, 因而具备作为外界介质折射率传感元件的先决条

件. 本文以 NCF 为基础构建 SMS, 结构如图 1 所示, 这是在两段 SMF 之间连接有一段 NCF 的简单结构. 实验所用纯石英 NCF 直径 $104\ \mu\text{m}$, 在兼顾操作性的前提下, 把 NCF 长度降低到 $4.4\ \text{mm}$; 直接采用光纤熔接机熔接的两段输入输出 SMF 为相同的直径 $125\ \mu\text{m}$ 康宁 SMF. 该 SMS 在空气中的传输谱见图 2.

图 2 还给出了在外界环境折射率 $n_{\text{sp}} = 1$ 条件下利用 MPA 理论计算得到的 SMS 传输谱, 所用参数包括: NCF 直径 $104\ \mu\text{m}$, 长度 $4.3\ \text{mm}$; SMF 纤芯直径 $9\ \mu\text{m}$, 芯包折射率差 5×10^{-3} ; 石英折射率通过 Sellmeyer 公式计算得到.

实验中使用的 NCF 和 SMF 在直径上存在一个比较小的差异, 这个差异会导致直接熔接的接头处发生微小的锥形变化. 从图 2 可以看到, 实验与理论具有良好的一致性, 这不仅说明 MPA 理论能够有效的对 SMS 进行分析和设计, 而且表明 $104\ \mu\text{m}$ NCF 与 $125\ \mu\text{m}$ SMF 的直径差异对器件性能几乎没有影响.

3 SMS 折射率传感器线性响应的设计和实验

3.1 SMS 折射率传感器线性响应的寻找原则

Wang^[6] 和 Gao^[8] 等用 BPM 方法分别在给定无包层 MMF 直径和长度的条件下, 讨论了另一个因素对响应线性特性的影响. 实际上, 几乎在所有长度和直径下, SMS 都有可能在某个波长上实现折射率传感的功率线性响应特性.

从现有论文的理论 and 实验结果中, 都可以得到这样的一个概念: SMS 传输谱随外界折射率的增加, 以加速向右移动; 在这个移动过程中, 传输谱自身形状变化不大. 基于这一概念, 可以推导出这样的结论: 功率的线性响应点必然位于传输谱加速下降或加速上升的区域. 反之, 在一个加速下降或上升区域, 应该至少存在一个波长能够提供一定折射率范围上的功率线性响应. 同时, 由于线性响应点位于加速区域, 应该优选在加速结束区域附近, 这个区域的线性响应点会有更大的功率差, 传感器就可能提供更高的分辨率.

以基于 $40\ \text{mm}$ 长 $104\ \mu\text{m}$ NCF 的 SMS 为例, 图 3 给出了 MPA 理论下该器件在 $1370\text{--}1670\ \text{nm}$

范围内的传输谱. 三条曲线对应的外界折射率 n_{sp} 分别为 1.33 (直线)、 1.37 (虚线)、 1.41 (点线). 从该图中可以看到加速右移、传输谱自身形状变化不大的特点. 图中 A, B 分别是典型的加速上升和加速下降区域, 在这两段曲线加速结束的区域附近, 能够找到高分辨率的功率线性响应点. 与之相对的 A', B' 则是典型的减速上升和减速下降区域, 在这两段曲线上不可能找到功率线性响应点. C 是 SMS 传输谱常见的另一种减速下降曲线, 在这种曲线上也不可能找到功率线性响应点. 文献 [6] 给出的线性响应点位于类似 A 的加速上升结束附近, 因此能够提供较大的功率差. 文献 [8] 位于类似 B 的加速下降起始附近, 因此功率差较小.

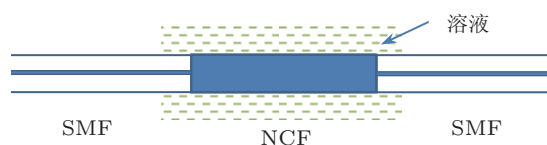


图 1 以 NCF 为基础的 SMS 溶液折射率传感器结构示意图

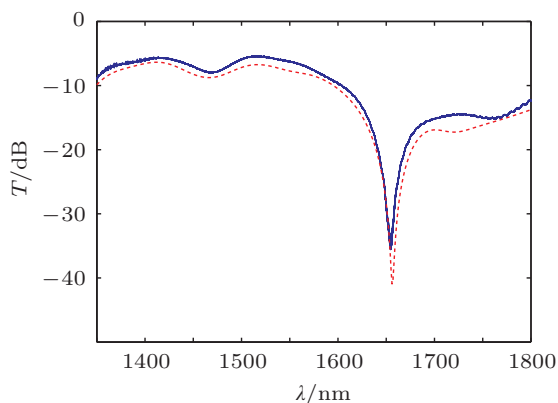


图 2 SMS 实测结果 (实线) 及理论计算结果 (虚线) 比较

3.2 实验 SMS 线性响应点的理论设计

从图 2 可以看出, 实验所用 SMS 在 $1670\ \text{nm}$ 左右具有一个深度超过 $20\ \text{dB}$ 的低谷, 它的下降沿符合典型加速下降特征, 说明在这段曲线上至少会存在一个功率线性响应点. 如果希望该点具有较高精度, 应该在下降沿加速结束位置附近寻找.

为了分析 SMS 的线性响应点, 利用 MPA 方法计算外界折射率 n_{sp} 在 $1.33\text{--}1.426$ 范围上变化时的传输谱. 图 4(a) 给出了其中 n_{sp} 分别为 $1.33, 1.35, 1.37, 1.39$ 和 1.41 (从下到上) 时的传输谱计算结果. 图 4(b) 给出了 $1.33\text{--}1.426$ 折射率变化范围上 $1650\ \text{nm}, 1666\ \text{nm}, 1670\ \text{nm}$ 三个波长的功率变化, 其中 $1666\ \text{nm}$ 的线性拟合结果调整 R^2 值达到

0.9984, 说明该波长上的功率点具备良好的线性性. 在考查范围上, SMS 传输从 -30.19 dB 变化到 -10.98 dB, 变化量 19.21 dB. 考虑到以 nW 为单位的功率变化受到光源的强烈影响, 本文采用文献 [6] 的精度确定方法, 以商用光功率计 0.01 dB 的分辨率为参考, 该 SMS 在 1666 nm 线性响应的理论分辨率折合为 4.997×10^{-5} .

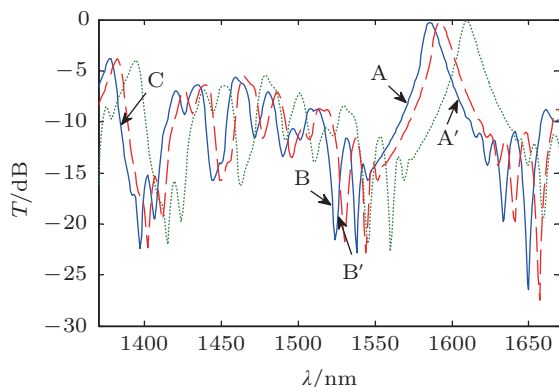


图3 SMS 传输谱随外界折射率变化理论计算结果. 三条曲线对应的外界折射率 n_{sp} 分别为 1.33(直线)、1.37(虚线)、1.41(点线)

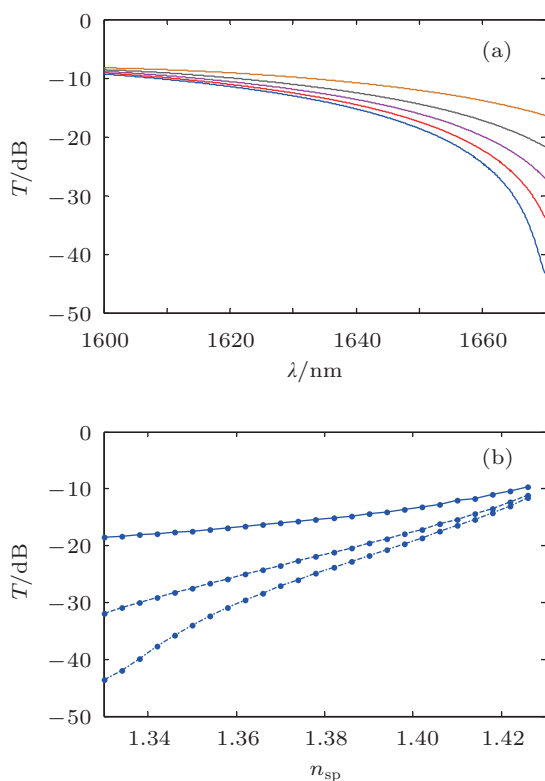


图4 (a) 外界折射率 n_{sp} 分别为 1.33, 1.35, 1.37, 1.39 和 1.41(从下到上) 的理论传输谱; (b) 外界折射率 n_{sp} 范围 1.33—1.426 对应的传输功率理论变化

这个方法不仅能用于在给定 SMS 结构下确定提供功率线性响应的波长, 而且可用于指导器件

构成. 前面已经得出该给定结构下, 1666 nm 处能够提供功率的线性响应. 根据这一结果, 如果希望线性响应点能够位于 1500 — 1550 nm 范围内, SMS 所用的 NCF 还需要稍微加长以令传输谱左移到相应位置.

3.3 SMS 线性响应点实验

为了测试基于无芯光纤的 SMS 折射率传感器在实际使用中的线性响应表现, 将实验制备的无芯光纤 SMS 置于不同浓度的甘油溶液中, 以检测传输特性随溶液折射率的变化. 测试过程中使用的甘油溶液浓度从 7% 开始, 以 7% 为间隔增加到 70%, 对应折射率线性增加. 在每个溶液浓度下记录折射率传感器的传输谱, 其中溶液浓度 7%, 21%, 35%, 49%, 63% 对应的传输谱如图 5(a) 所示. 在 1666 nm 附近, 以 1665 nm 处具有最好的功率线性响应, 该波长对应的实验数据见表 1. 图 5(b) 给出了 1665 nm 实验数据的线性拟合结果, 该组数据线性拟合的调整 R^2 值达到 0.9989, 表现出非常好的线性性.

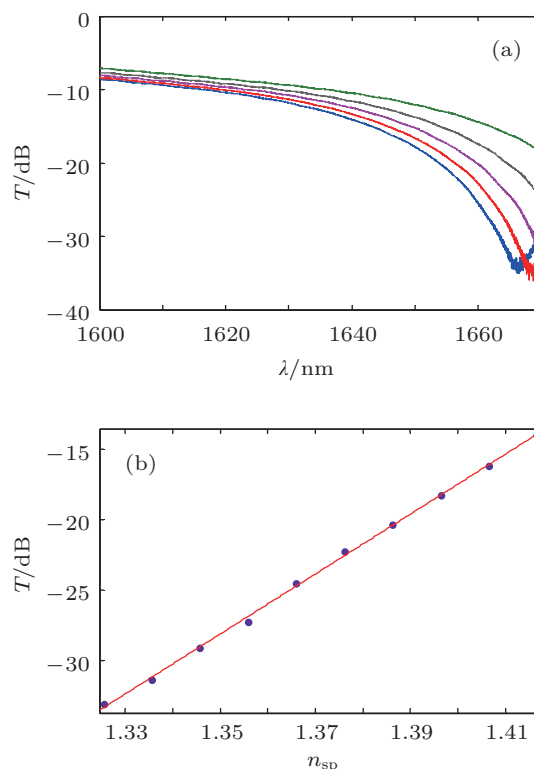


图5 (a) 实验折射率传感器在不同浓度溶液中的传输谱(从下到上对应甘油质量分数分别为 7%, 21%, 35%, 49%, 63%); (b) 1665 nm 实测传输与溶液折射率 n_{sp} 之间的关系

在 1665 nm 附近, 纯水和甘油的折射率分别为约 1.315 和 1.460 , 实验的折射率变化范围对应为

1.326—1.417. 从实验数据可以看出, 在该范围上, 1665 nm 的传输从 -33.061 dB 变化到 -13.963 dB, 变化范围 19.10 dB, 折合实验分辨率 4.76×10^{-5} .

表 1 实测 1665 nm 功率传输特性与甘油溶液浓度/折射率之间的关系

标号	质量分数/%	溶液折射率	传输/dB
1	7	1.3255	-33.061
2	14	1.3356	-31.350
3	21	1.3458	-29.071
4	28	1.3559	-27.220
5	35	1.3660	-24.493
6	42	1.3761	-22.237
7	49	1.3862	-20.343
8	56	1.3964	-18.236
9	63	1.4065	-16.170
10	70	1.4166	-13.963

4 结论

基于无包层 MMF 的 SMS 要实现真正的大规模生产和实用化, 不能依靠用时长、难以控制的化学腐蚀方法. 本文以无芯光纤为实验对象, 考察了理论指导可行性、线性响应设计方法以及器件实际性能. 本文有三个主要关注点: 第一, 通过理论和实验的对比, 证明基于标量模的 MPA 方法能够有效求解 SMS 问题. 第二, 提出了 SMS 结构折射率传感器高分辨率线性响应点的寻找方法, 该方法在 SMS 结构折射率传感器结构设计上能够提供帮助. 本文以实验无芯 SMS 折射率传感器参数为例, 选择出高分辨率线性响应点, 并在实验中获得了一致性良好的检验. 第三, 以无芯光纤为基础, 构建了具有高分辨率线性响应的折射率传感器, 所用 $104 \mu\text{m}$ 无芯光纤长度短至 4.4 mm.

- [1] Yuan G, Tian Z, Rao Y, Yu W 2011 *IEEE Photonic Tech. L.* **23** 679
- [2] Antonio-Lopez J E, Sanchez-Mondragon J J, LiKamWa P, May-Arrioja D A 2011 *Opt. Lett.* **36** 3425
- [3] Xia L, Li L, Li W, Kou T, Liu D 2013 *Sensor Actuat. A: Phys.* **190** 1
- [4] Liu Y, Wei L 2007 *Appl. Opt.* **46** 2516
- [5] Tripathi S M, Kumar A, Varshney R K, Kumar Y P, Marin E, Meunier J 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 2348
- [6] Wang Q, Farrell G 2006 *Opt. Lett.* **31** 317
- [7] Wu Q, Semenova Y, Wang P, Farrell G 2011 *Opt. Express* **19** 7937
- [8] Gao R X, Liu W J, Wang Y Y, Wang Q, Zhao F, Qu S L 2012 *Sensor Actuat. A: Phys.* **179** 5
- [9] Chen N, Yun B, Cui Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 133902
- [10] Chiang K S, Liu Y, Ng M N, Dong X 2000 *Electron Lett.* **36** 966
- [11] Falciai R, Mignani A G, Vannini A 2001 *Sensor Actuat. B: Chem.* **74** 74
- [12] Yin L, Zhang W, Xue X, Bai Z, Wei S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 170701 (in Chinese) [殷丽梅, 张伟刚, 薛晓琳, 白志勇, 魏石磊 2012 物理学报 **61** 170701]
- [13] Liang H, Miranto H, Granqvist N W, Sadowski J, Viitala T, Wang B, Yliperttula M 2010 *Sensor Actuat. B: Chem.* **149** 212
- [14] Zhang Z, Liu Q, Qi Z M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060703 (in Chinese) [张喆, 柳倩, 祁志美 2013 物理学报 **62** 060703]
- [15] Zeng Z, Liu H, Zhang S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 200701 (in Chinese) [曾志文, 刘海涛, 张斯文 2012 物理学报 **61** 200701]
- [16] Miao Y, Liu B, Zhao Q 2009 *Opt. Fiber. Technol.* **15** 233
- [17] Kapoor A, Sharma E K 2009 *Appl. Opt.* **48** G88
- [18] Mohammed W S, Mehta A, Johnson E G 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 469
- [19] Zheng J J, Wen Y H, Feng S C, Pei L, Ning T G, Jian S S 2013 *Software Copyright 2013SRBJ 0089* (in Chinese) [郑晶晶, 闻映红, 冯素春, 裴丽, 宁提纲, 简水生 2013 软件著作权 2013SRBJ 0089]

Solution refractive index sensor with wide-range high-resolution linear response based on short no-core fiber*

Zheng Jing-Jing^{1)2)†} Jian Shui-Sheng¹⁾ Ma Lin¹⁾ Bai Yun-Long¹⁾
Pei Li¹⁾ Ning Ti-Gang¹⁾ Wen Ying-Hong²⁾

1) (Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of the Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (EMC Research Section, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 22 April 2013; revised manuscript received 16 May 2013)

Abstract

The feasibility of applying mode propagation analysis (MPA) method in solving single mode- multimode- single mode (SMS) fiber structure is confirmed by comparing the experimental data with the theoretical results. The method of searching for linear response points on SMS based on MPA was proposed, applied to finding a wide-range high-resolution linear response wavelength theoretically, and confirmed in experiment. By using a 104 μm -in-diameter no-core fiber as short as 4.4 mm, we archived a linear transmission variation of 19.10 dB in the refractive index range of 1.326—1.417, which means a refractive index resolution of 4.76×10^{-5} according to the resolution of common commercial optical powermeter, and realizes a wide-range high-resolution linear response under the direction of the theory.

Keywords: all-optic refractive index sensor, multimode interference, SMS, no-core fiber

PACS: 07.07.Df, 42.81.Pa, 07.60.-j, 07.60.Ly

DOI: 10.7498/aps.62.150703

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB328206), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275076, 61177069), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 2011JBM211).

† Corresponding author. E-mail: jjzheng.c@gmail.com