

激光与光电子学进展

基于长周期光纤光栅和 BP 神经网络的高灵敏度甲烷体积分数传感器研究

杜超^{1*}, 张斌², 赵爽¹, 王秋雨¹, 张丽¹, 崔丽琴¹, 邓霄^{1**}¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;²空装驻太原地区军事代表室, 山西 太原 030006

摘要 结合笼形分子(Cryptophane-E)对甲烷气体的选择性吸收特性,提出了一种基于双层薄膜的高灵敏度长周期光纤光栅(LPFG)甲烷体积分数传感器。通过减小包层直径使低阶包层模式 LP₀₆工作在色散转折点(DTP)附近,并在光纤表面涂覆厚度经过优化的 TiO₂薄膜,以确保包层模式 LP₀₆在模式转换(MT)区内与纤芯模式 LP₀₁耦合,从而显著提高了 LPFG 的折射率灵敏度。由于甲烷气体分子会改变最外层 Cryptophane-E 薄膜的材料折射率,进而改变包层模式的有效折射率,因此通过监测共振波长的移动即可实现对甲烷气体体积分数的测量。在 DTP 和 MT 效应的共同作用下,当甲烷气体体积分数从 0% 变化到 3.5% 时,所提的 LPFG 传感器平均灵敏度高达 249.6 nm/%。此外,针对本传感器在不同甲烷体积分数下的非线性响应特征,设计了反向传播(BP)神经网络信号解调算法。研究结果表明:在甲烷气体体积分数变化范围内,其最大预测误差为 0.008%,该传感器良好的性能使其在煤矿安全监测等领域具有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 甲烷体积分数; 长周期光纤光栅; 色散转折点; 模式转换; 反向传播神经网络

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222732

Ultrasensitive Methane Volume Fraction Sensor Based on Long Period Fiber Grating and Back-Propagation Neural Network

Du Chao^{1*}, Zhang Bin², Zhao Shuang¹, Wang Qiuyu¹, Zhang Li¹, Cui Liqin¹, Deng Xiao^{1**}¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;²Military Representative Office of PLA Air Force Equipment Department in Taiyuan, Taiyuan 030006, Shanxi, China

Abstract An ultrasensitive long period fiber grating (LPFG) sensor is proposed and investigated for the measurement of methane volume fraction by applying the selective adsorption property of cryptophane-E to methane. The cladding diameter is reduced to make the low order cladding mode LP₀₆ work near dispersion turning point (DTP). The TiO₂ thin film with optimized thickness is coated on the surface to ensure coupled cladding mode LP₀₆ within the mode transition (MT) region, which can result in higher refractive index (RI) sensitivity of LPFG. The methane gas changes the RI of the cryptophane-E that is coated on the surface of the LPFG sensor, and then the methane volume fraction can be measured by monitoring the shift of the resonance wavelength. A high sensitivity of 249.6 nm/% can be achieved when the methane volume fraction changes from 0% to 3.5% owing to the contribution of DTP and MT. A back-propagation (BP) neural network is designed for the nonlinearity response of the sensor at different volume fraction. The result shows that a maximum predicted error of 0.008% is recorded in the methane volume fraction change range. The excellent performance shows that the proposed sensor has potential application value in the field of coal mine safety monitoring.

Key words fiber optics; methane volume fraction; long period fiber grating; dispersion turning point; mode transition; back-propagation neural network

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2022-11-20; 录用日期: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金(62203320, 52009088, 51809190)、中国博士后科学基金面上项目(2019M661063)、山西省科技厅面上青年基金项目(201901D211073)、山西省社会发展重点研发计划(201903D321001)、山西省高等学校科技创新项目(2019L0198)

通信作者: *duchao@tyut.edu.cn; **dengxiao@tyut.edu.cn

1 引言

甲烷是一种爆炸极限仅为 5% 的可燃性气体, 精准测量其体积分数变化是保证煤矿安全生产的必要条件。近年来, 基于电化学^[1-3]和光学^[4-12]检测原理, 甲烷气体体积分数传感器技术得到了快速发展。其中, 光学气体传感器具有灵敏度高、本质安全等优点, 更适用于甲烷浓度的测量。因此, 国内外学者们探索了多种基于光学检测原理的甲烷体积分数传感器, 如光学吸收光谱^[4-7]、光纤传感器^[8-12]、光子晶体微腔^[13]等。光纤传感器结构紧凑、灵敏度高, 且易与气敏材料结合。据报道, 笼形分子是唯一对甲烷具有直接光敏特性的新型功能材料, 甲烷体积分数的变化会改变其折射率 (RI)^[13]。结合笼形分子, 基于倏逝波光纤^[14]、芯径失配光纤^[15]、长周期光纤光栅 (LPFG)^[9-12]和光子晶体光纤 (PCF)^[8, 16-17]的甲烷体积分数传感器相继被报道。然而, 基于倏逝波和芯径失配光纤的传感信号对温度及光源等波动非常敏感^[9], 极易受到干扰。此外, 虽然基于表面等离子体共振 (SPR) 的 PCF 对其内部填充的笼形分子 RI 变化较敏感, 但 SPR 谐振峰带宽较宽, 故信号解调精度较低^[16-17], 且气体响应速度较慢^[12, 16-17]。

相较其他光纤传感器结构, LPFG 具有 RI 灵敏度高、带宽窄、易集成等优点。2011 年, Yang 等^[9]制备了一种涂覆笼形分子 (Cryptophane-A) 纳米薄膜的 LPFG 甲烷传感器, 其灵敏度约为 0.375 nm/%。然而, 传统 LPFG 的 RI 灵敏度仍不足以满足甲烷体积分数的测量要求。目前, 提高 LPFG 的 RI 灵敏度有 3 种常用方法: 减小包层直径、使 LPFG 工作在色散转折点 (DTP) 附近和模式转换 (MT) 区内^[18]。2015 年, Yang 等^[10]设计了一种最大 RI 灵敏度为 3.56×10^3 nm/RIU 的 LPFG 传感器, 由于光纤表面涂覆的高 RI 聚碳酸酯/Cryptophane-A 薄膜激发了 MT 效应, 因此其灵敏度被提高到 2.5 nm/%。根据单模光纤 (SMF) 的色散特性, 需要耦合阶次较高的包层模式才能使 LPFG 工作在 DTP 附近, 即写入的光栅周期更小, 这将增加 LPFG 的制备难度。为了克服光栅制备难度和灵敏度

之间的矛盾, Del Villar 等^[19]于 2016 年通过腐蚀光纤包层使低阶包层模式耦合的 LPFG 在特定波长范围出现 DTP, 虽然将 LP₀₃ 模式的灵敏度提高到了 8734 nm/RIU (折射率单元), 但光纤直径仅为 34.86 μm , 其脆弱的结构在实际测量中很容易断裂。为了进一步探索 LPFG 的灵敏度极限, 可以将 DTP 和 MT 进行有效结合。

因此, 本文通过减少光纤直径使低阶包层模式 LP₀₆ 耦合的 LPFG 工作在 DTP 附近, 然后在光纤表面涂覆最优化厚度的高 RI 薄膜 TiO₂, 从而将 LP₀₆ 限制在 MT 区内, 最后在 LPFG 最外层涂覆了甲烷敏感膜 Cryptophane-E。所设计的双层薄膜 (TiO₂ 和 Cryptophane-E) LPFG 解决了光栅制备难度与灵敏度之间的矛盾问题, 也大大提高了甲烷体积分数传感器的灵敏度。研究表明, 在甲烷体积分数为 0%~3.5% 的范围内, 该传感器可以达到 249.6 nm/% 的超高灵敏度, 远远超过了文献^[9-17]的性能指标。然而, 在 DTP 附近工作的 LPFG 谐振波长对甲烷体积分数变化呈现非线性响应特征。为此, 基于反向传播 (BP) 神经网络算法建立了一种非线性拟合模型, 该模型对甲烷体积分数具有较高的预测精度。

2 理论和模型

LPFG 的基本原理是耦合模理论, 即纤芯模式和包层模式在谐振波长处满足相位匹配条件而发生模式耦合^[20]。在 RI 传感中, LPFG 的共振波长取决于包层模式的有效 RI, 而 LPFG 的 RI 灵敏度与参与耦合的包层模式的阶次有关。在近红外波段, 纤芯模与高阶包层模之间的相位匹配曲线 (PMC) 存在 DTP。此外, 提高 RI 灵敏度的另一个有效解决方法是在光纤表面涂覆一层高 RI 薄膜, 从而将耦合的包层模式限制在 MT 区内。在 MT 区内, 所耦合的包层模式的有效 RI 随薄膜厚度的增加而不断增大, 并逐渐接近相邻的低阶包层模式。同时, MT 区内包层模式与环境介质之间的相互作用较强, 这使得 LPFG 对周围 RI 变化更加敏感。

所设计的双层薄膜 LPFG 传感结构如图 1 所示, 其中涂覆在光纤表面第 1 层的是厚度为 d_1 的高 RI 薄

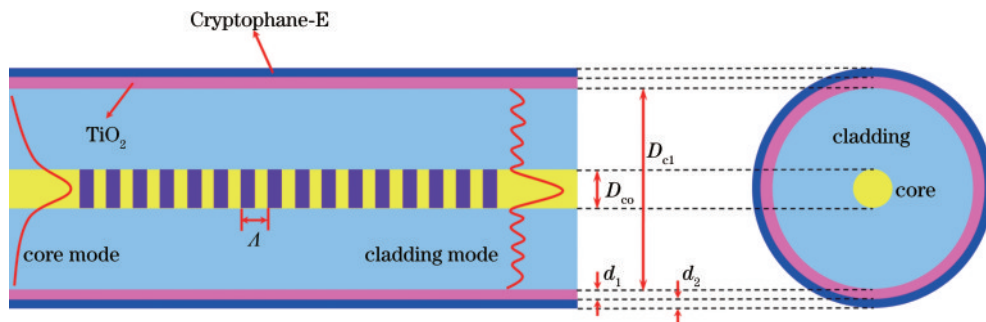


图 1 设计的双层薄膜 LPFG 传感结构

Fig. 1 Designed dual-layer sensing structure of LPFG

膜 TiO₂, 将其选定的包层模式限制在 MT 区内。第 2 层薄膜是厚度为 d_2 的 Cryptophane-E, 可作为敏感介质检测甲烷体积分数的变化。传感器制备中, 首先采用较成熟的静电自组装的方法将 TiO₂ 薄膜沉积在光纤表面, 然后通过浸渍提拉镀膜的方式将溶于有机溶剂二氯甲烷的 Cryptophane-E 涂覆在 TiO₂ 薄膜最外层。其中, 薄膜的厚度由溶液的含量、浸泡时间和提拉速度共同决定。通过减小光纤直径 D_{cl} , 低阶包层模式诱导的 LPFG 也可以在 DTP 附近工作, DTP 和 MT 相结合即可实现对甲烷体积分数的高灵敏度检测, 所有的仿真模型都是基于有限元多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 建立的。

3 仿真和优化

所设计的甲烷体积分数传感器依赖于 LPFG 的 RI 传感特性, 因此 RI 灵敏度是首要研究的关键性能指标。LPFG 仿真模型是基于传统 SMF (SMF-28, Corning) 建立的, 其纤芯和包层的 RI 分别为 1.4681 和 1.4628, 纤芯的 RI 被周期性调制。据文献报道, LPFG 在特定波长范围内工作在 DTP 附近时, 传统 SMF 中参与耦合的包层模阶次较高, 而使用基于电弧法或 CO₂ 激光法制备小周期的 LPFG 难度较大, 只能依赖紫外曝光或飞秒激光微加工技术。因此, 改变 SMF 的色散特性是克服光栅制作难度与灵敏度之间矛盾问题的有效方法。

众所周知, SMF 的色散特性与纤芯和包层的材料 RI 和结构参数有关, 低阶包层模式可以通过减小包层直径使 LPFG 在 DTP 附近工作^[19]。为了优化结构参数以确保低阶包层模式在特定波长范围内使 LPFG 工作在 DTP 附近, 首先研究了 LP₀₆ 的色散特性与包层直径之间的关系, 并绘制了不同包层直径下 LP₀₆ 和 LP₀₁ 之间的 PMC, 如图 2 所示, 其中外界 RI 为 1。结果表明, 当包层直径小于 100 μm 时, 谐振波长与光栅周期之间的变化关系呈非单调性, 即在 DTP 附近, 同一光栅周期对应 2 个谐振波长。

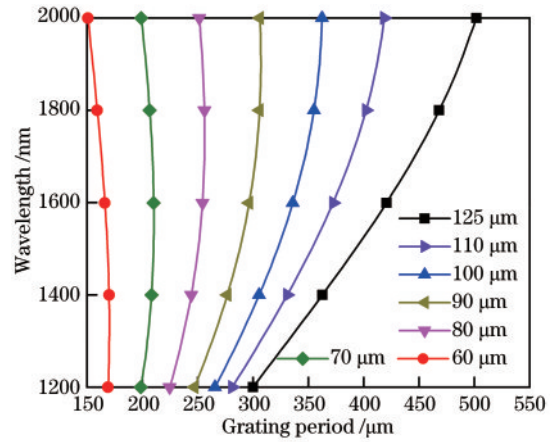


图 2 不同包层直径下 LP₀₆ 和 LP₀₁ 之间的 PMCs
Fig. 2 PMCs between LP₀₆ and LP₀₁ for different cladding diameters

综合考虑实际机械强度和测量可靠性, 选择了直径为 80 μm 的 SMF 来建立仿真模型。在此基础上, 结合 Cryptophane-E 敏感材料和在 DTP 附近工作的 LPFG, 设计了甲烷体积分数传感器。Cryptophane-E 的折射率 RI(n) 与甲烷气体体积分数 C 的关系^[13] 可表示为

$$n = 1.448 - 0.46C. \quad (1)$$

所设计的甲烷体积分数传感器依赖于 LPFG 的 RI 传感特性, 当其表面仅涂覆 Cryptophane-E 单层薄膜时, 模拟结果如图 3 所示。针对不同的甲烷体积分数, LP₀₆ 和 LP₀₁ 之间的 PMCs 如图 3(a) 所示, 其中, 当光栅周期为 263.73 μm 时, LPFG 工作在 DTP 即可获得最高灵敏度。在不同甲烷体积分数 (0% 和 3.5%) 下, LPFG 的模拟透射光谱如图 3(b) 所示。气体体积分数从 0% 变化到 3.5% 后出现双峰谐振, 且 2 个损耗峰向相反方向移动。如图 3(b) 所示, 对直径为 80 μm 的细 LPFG, dip 1 和 dip 2 之间的波长间隔为 513.3 nm, 即平均灵敏度为 146.66 nm/%, 已超过文献[9-17]所报道的灵敏度指标。

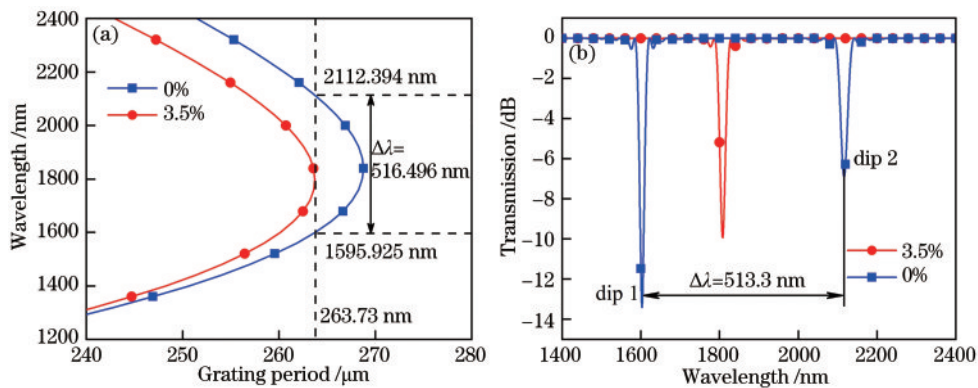


图 3 单层膜结构。(a) 不同甲烷体积分数下 LP₀₆ 和 LP₀₁ 之间的 PMCs; (b) 甲烷体积分数从 0% 到 3.5% 时 LPFG 的模拟透射光谱
Fig. 3 Single-layer film structure. (a) PMCs between LP₀₆ and LP₀₁ under different methane volume fraction; (b) simulated transmission spectra of LPFG when methane volume fraction changes from 0% to 3.5%

作为提高感测环境 RI 变化能力的另一种有效方法,在光纤表面涂覆高 RI 薄膜可以使所选择的包层模式限制在 MT 区内。之前的研究工作表明,光纤表面所涂覆薄膜的 RI 越高,需涂覆的厚度越薄^[20]。同时,

在最优化薄膜厚度参数下,包层模式的有效 RI 变化率与薄膜的 RI 成正比。因此,选择 RI 较高的 TiO₂ 作为该传感器的高 RI 薄膜。LP₀₆ 的有效 RI 与 TiO₂ 薄膜厚度之间的关系如图 4(a) 所示。

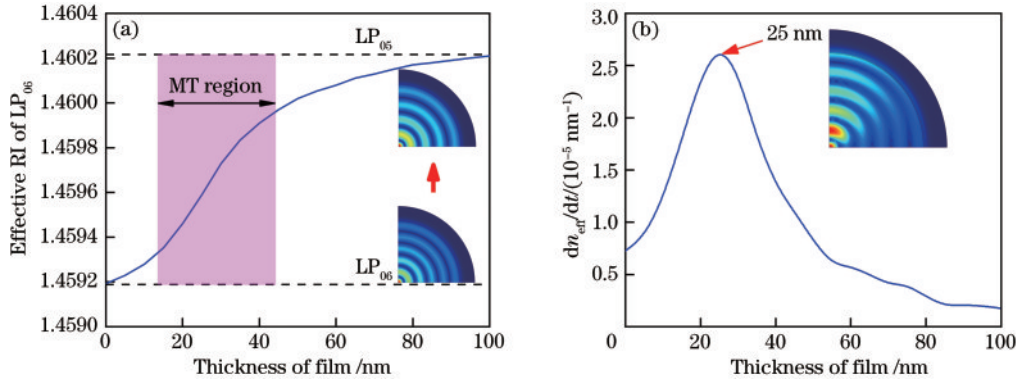


图 4 薄膜厚度优化。(a) LP₀₆ 的有效 RI 与 TiO₂ 薄膜厚度的关系; (b) LP₀₆ 有效 RI 变化率与薄膜厚度的关系

Fig. 4 Film thickness optimization. (a) Relationship between effective RI of LP₀₆ and coated film thickness; (b) relationship between effective RI variation rate of LP₀₆ and film thickness

显然, LP₀₆ 的有效 RI 随薄膜厚度的增加而不断增大,并逐渐接近下一阶包层模 LP₀₅, 这便是当入射波长为 1550 nm 时对应的模场转换过程。在 MT 区, 包层模式可以在高 RI 膜内达到导模条件^[21-22], 由于包层模与环境介质之间的强相互作用, LPFG 可以更灵敏地感知周围 RI 的变化。为了使所选的包层模式在 MT 区实现最高的 RI 灵敏度, 应对 LP₀₆ 的有效 RI (n_{eff}) 求导来探索最佳的薄膜厚度 t 。研究结果如图 4(b) 所示, 对 RI 为 2.0 的 TiO₂ 薄膜, 其最佳薄膜厚

度为 25 nm。

在 LPFG 表面涂覆优化厚度为 25 nm 的 TiO₂ 膜后, Cryptophane-E 被设计为第 2 层膜, 以检测甲烷体积分数的变化。对这种双层薄膜结构的 LPFG, 不同甲烷体积分数下 LP₀₆、LP₀₁ 之间的 PMC 如图 5(a) 所示, LPFG 的透射光谱如图 5(b) 所示。模拟结果表明, 当甲烷体积分数从 0% 到 3.5% 变化时, 所设计的 LPFG 的平均灵敏度可达到 249.6 nm/%, 因此在光纤表面镀上高 RI 薄膜后, 可以大幅提高传感器的平均灵敏度。

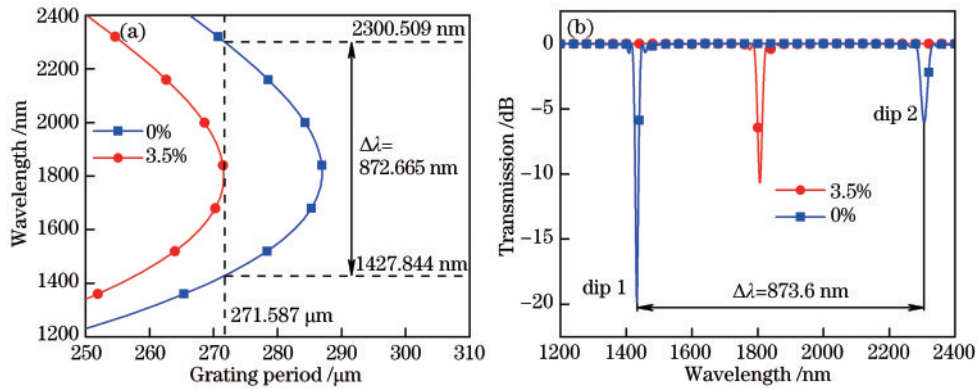


图 5 双层薄膜结构。(a) 不同甲烷体积分数下 LP₀₆ 和 LP₀₁ 之间的 PMCs; (b) 甲烷体积分数从 0% 变为 3.5% 时 LPFG 的模拟透射光谱

4 数据分析和研究结果

该甲烷体积分数传感器的灵敏度取决于 LPFG 检测 Cryptophane-E 薄膜 RI 变化的能力。如图 1 所示, Cryptophane-E 薄膜用于吸收甲烷气体分子。Cryptophane-E 与甲烷气体分子的结合改变了 Cryptophane-E 的局部 RI, 从而进一步影响所选的包层

模式 LP₀₆ 的有效 RI。由于相位匹配条件的改变, 共振波长出现偏移。因此, 可以通过监测 LPFG 的共振波长偏移来测量甲烷体积分数。传感器参数优化后, 对甲烷体积分数变化响应特性进行了理论模拟。

根据文献[8], Cryptophane-E 薄膜的最佳厚度在 100~300 nm 之间, 敏感膜太厚会影响气体传感器的响应速率, 也会影响传感器的测量精度。敏感膜太薄会影

响传感器的量程,且对镀膜工艺要求相对较高。经综合考虑,在仿真模型中,Cryptophane-E 薄膜的厚度设定为 300 nm, TiO₂ 薄膜的最佳厚度为 25 nm。甲烷体积分数从 0% 变化到 3.5% 时的 PMCs 如图 6(a) 所示,当光栅周期为 271.587 μm 时, LP₀₁ 和 LP₀₆ 在 DTP 处发生谐振耦合。如图 6(a) 所示,随着甲烷体积分数的降低,双谐振峰

的波长向相反方向移动。此外,共振波长与甲烷体积分数之间的关系如图 6(b) 所示。在 0%~3% 甲烷体积分数范围内,双谐振峰的平均灵敏度分别为 98.67 nm/% 和 -134.89 nm/%。然而,当甲烷体积分数接近 3.5% 时, LPFG 工作在 DTP 附近, dip 1 和 dip 2 可以分别达到较高灵敏度(220.51 nm/% 和 -251.96 nm/%)。

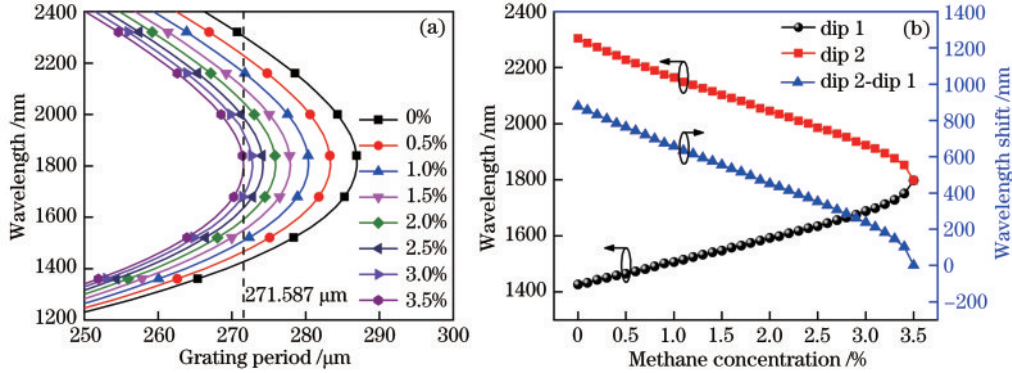


图 6 甲烷体积分数从 0% 变化到 3.5% 时。(a) LP₀₆ 和 LP₀₁ 之间的 PMCs; (b) 谐振波长与甲烷体积分数之间的关系

Fig. 6 Methane volume fraction changes from 0% to 3.5%. (a) PMCs between LP₀₆ and LP₀₁; (b) resonance wavelength shifts with methane volume fraction variations

上述模拟结果表明,提出的基于双层薄膜的 80 μm 细包层 LPFG 传感器可以有效检测甲烷气体体积分数的变化情况。此外,对比了所提的传感器与其他传

感方法的灵敏度,如表 1 所示。由表 1 可知,在 DTP 和 MT 效应的共同作用下,提出的 LPFG 传感器性能指标得到了极大提升,灵敏度远超已报道的文献。

表 1 不同传感方法的甲烷传感器灵敏度对比

Table 1 Comparison of sensitivity for different methane sensor

Configuration	Methane concentration range / %	Sensitivity	Reference
Core diameter mismatch sensor	0-14.5	0.0148	[15]
PCF sensor	0-3.5	0.514 nm / %	[8]
	0-3.5	1.99 nm / %	[16]
	0-3.0	4.60 nm / %	[17]
LPFG sensor	0-3.5	0.375 nm / %	[9]
		2.5 nm / %	[10]
		249.6 nm / %	This work

此外,为了进一步分析和预测甲烷体积分数,建立了 BP 神经网络模型。误差 BP 神经网络是一种基于误差反向传播的多层前馈网络^[23-24]。建立的 3 层 BP 神经网络包括输入层、隐藏层和输出层,如图 7 所示。选择 dip 1 和 dip 2 的谐振波长 λ₁ 和 λ₂ 作为输入数据,测量的甲烷体积分数作为输出数据。

随机选取 80% 的模拟数据作为训练样本,经过 10000 次训练,得到输入和输出变量之间的关系,并用梯度下降法调整网络的权值和阈值,使网络误差达到期望值 10⁻⁸^[24-25]。选取另外 20% 的模拟数据作为测试样本,得到的测试样本预测结果如图 8 所示。其中, BP 神经网络预测的甲烷体积分数值与测试样本值一致,甲烷体积分数的最大和最小预测误差分别为 0.008% 和 0.0011%。因此,基于 BP 神经网络的非线性拟合对甲烷体积分数的测量具有较高的预测精度。

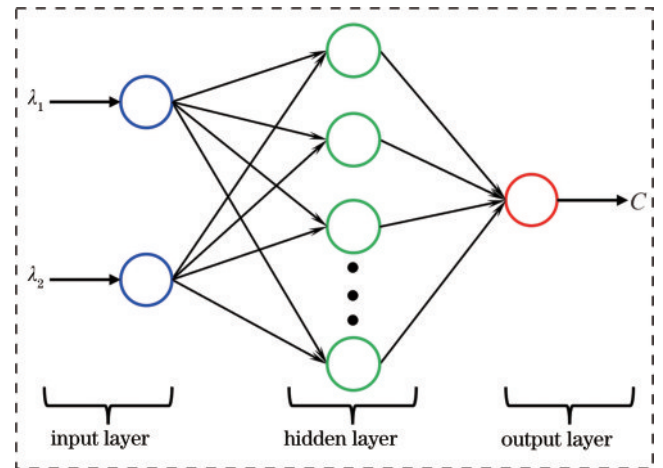


图 7 3 层 BP 神经网络模型

Fig 7 Model of three-layer BP neural network

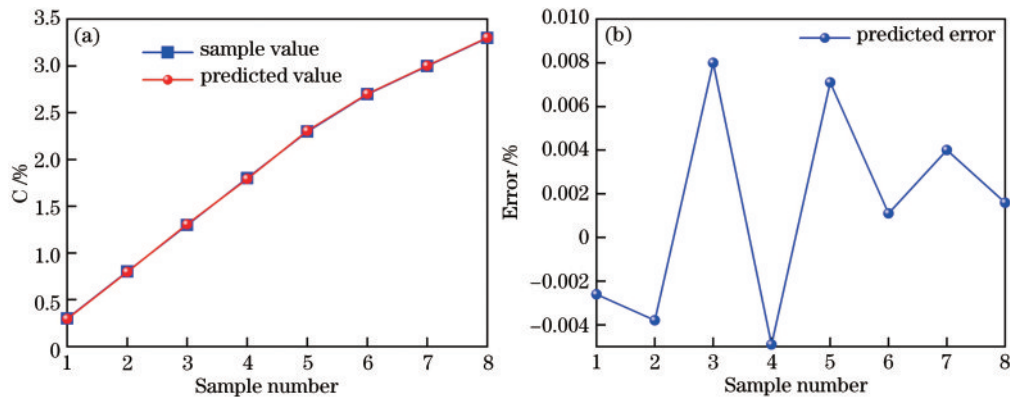


图 8 测试样本预测结果。(a)预测值与测试值的对比;(b)测试样本的预测误差

Fig. 8 Test sample prediction results. (a) Comparison of predicted and tested values; (b) prediction error of the test sample

5 结 论

设计了包层直径为 $80\ \mu\text{m}$ 的 LPFG, 该传感器能使低阶包层模式 LP_{06} 工作在 DTP 附近, 通过结合甲烷敏感材料 Cryptophane-E, 可以得到 $146.66\ \text{nm}/\%$ 的平均灵敏度。在光纤表面涂覆厚度为 $25\ \text{nm}$ 的 TiO_2 薄膜激发 MT 效应后, 该传感器的平均甲烷体积分数灵敏度被提高到 $249.6\ \text{nm}/\%$, 远超已报道的传感器灵敏度指标。尽管如此, 在后续研究中该传感器性能仍有很大的改进潜力。此外, 在甲烷体积分数为 $0\% \sim 3.5\%$ 范围内, 提出的 BP 神经网络算法可以准确预测该传感器的测量结果, 最大预测误差仅为 0.008% 。

参 考 文 献

- [1] Sekhar P K, Kysar J, Brosha E L, et al. Development and testing of an electrochemical methane sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 228: 162-167.
- [2] Dobrzyniewski D, Szulczyński B, Dymerski T, et al. Development of gas sensor array for methane reforming process monitoring[J]. *Sensors*, 2021, 21(15): 4983.
- [3] Halley S, Tsui L K, Garzon F. Combined mixed potential electrochemical sensors and artificial neural networks for the quantification and identification of methane in natural gas emissions monitoring[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2021, 168(9): 097506.
- [4] Song F, Zheng C T, Yang S, et al. A four-channel-based mid-infrared methane sensor system using novel optical/electrical dual-domain self-adaptive denoising algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149: 106797.
- [5] Shemshad J, Aminossadati S M, Kizil M S. A review of developments in near infrared methane detection based on tunable diode laser[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 171/172: 77-92.
- [6] Xia J B, Feng C, Zhu F, et al. A sensitive methane sensor of a ppt detection level using a mid-infrared interband cascade laser and a long-path multipass cell[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 334: 129641.
- [7] Zhang Y, Gao W Z, Song Z, et al. Design of a novel gas sensor structure based on mid-infrared absorption spectrum[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 147(1): 5-9.
- [8] Yang J C, Zhou L, Che X, et al. Photonic crystal fiber methane sensor based on modal interference with an ultraviolet curable fluoro-siloxane nano-film incorporating cryptophane A[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 235: 717-722.
- [9] Yang J C, Tao C Y, Li X M, et al. Long-period fiber grating sensor with a styrene-acrylonitrile nano-film incorporating cryptophane A for methane detection[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14696-14706.
- [10] Yang J C, Zhou L, Huang J, et al. Sensitivity enhancing of transition mode long-period fiber grating as methane sensor using high refractive index polycarbonate/cryptophane A overlay deposition[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 207: 477-480.
- [11] Yang J C, Huang J, Li X M, et al. High-sensitivity long-period fiber grating sensor with SAN/cryptophane A for coal mine gas detection[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(8): 080601.
- [12] Yang J C, Che X, Shen R, et al. High-sensitivity photonic crystal fiber long-period grating methane sensor with cryptophane-A-6Me absorbed on a PAA-CNTs/PAH nanofilm[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20258-20267.
- [13] Zhang Y N, Zhao Y, Wang Q. Measurement of methane concentration with Cryptophane E infiltrated photonic crystal microcavity[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 209: 431-437.
- [14] Benounis M, Jaffrezic-Renault N, Dutasta J P, et al. Study of a new evanescent wave optical fibre sensor for methane detection based on cryptophane molecules[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 107(1): 32-39.
- [15] Yang J C, Xu L J, Chen W M. An optical fiber methane gas sensing film sensor based on core diameter mismatch [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5): 482-484.
- [16] Liu H, Wang M, Wang Q, et al. Simultaneous measurement of hydrogen and methane based on PCF-SPR structure with compound film-coated side-holes[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 45: 1-7.

- [17] Liu H, Wang H R, Chen C C, et al. High sensitive methane sensor based on twin-core photonic crystal fiber with compound film-coated side-holes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(2): 81.
- [18] Del Villar I. Ultrahigh-sensitivity sensors based on thin-film coated long period gratings with reduced diameter, in transition mode and near the dispersion turning point [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8389-8398.
- [19] Del Villar I, Cruz J L, Socorro A B, et al. Sensitivity optimization with cladding-etched long period fiber gratings at the dispersion turning point[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17680-17685.
- [20] Du C, Wang Q, Zhao Y, et al. Ultrasensitive long-period gratings sensor works near dispersion turning point and mode transition region by optimally designing a photonic crystal fiber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 112: 261-268.
- [21] Biswas P, Chiavaioli F, Jana S, et al. Design, fabrication and characterisation of silica-titania thin film coated over coupled long period fibre gratings: towards bio-sensing applications[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 253: 418-427.
- [22] Del Villar I, Achaerandio M, Matías I R, et al. Deposition of overlays by electrostatic self-assembly in long-period fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(7): 720-722.
- [23] Zhang D Z, Liu J J, Jiang C X, et al. Quantitative detection of formaldehyde and ammonia gas via metal oxide-modified graphene-based sensor array combining with neural network model[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 240: 55-65.
- [24] Song H S, Ma L Z, Pei S T, et al. Quantitative detection of formaldehyde and ammonia using a yttrium-doped ZnO sensor array combined with a back-propagation neural network model[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331: 112940.
- [25] Wei P, Cheng C, Liu T T. A photonic transducer-based optical current sensor using back-propagation neural network[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1513-1516.