

基于光子晶体光纤四波混频效应的甲烷传感测量

刘海^{1,2*}, 陈灿灿¹, 张文¹, 王浩然¹, 唐守锋¹

¹中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

²徐州市人工智能与大数据重点实验室, 江苏 徐州 221116

摘要 通过在非线性光子晶体光纤的两个特定包层气孔内侧镀甲烷气敏薄膜, 实现了一种基于简并四波混频效应的甲烷测量新方法, 该方法通过建立光纤中斯托克斯光谱、反斯托克斯光谱的移动与甲烷浓度变化的直接联系来实现对甲烷气体的实时精准检测。实验结果证明, 传感器的灵敏度与气敏膜厚度、泵浦波长密切相关。在同一泵浦波长下, 随着气敏膜厚度增加, 传感灵敏度相应增加; 当气敏膜厚度保持不变时, 泵浦波长越接近零色散波长, 传感灵敏度越高。经过结构参数优化, 最终斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱所对应的气体传感灵敏度分别达到了 $-4.87 \text{ nm}/\%$ 和 $2.83 \text{ nm}/\%$ 。相关测量原理同样适用于其他气体的精准测量和混合气体的组分分析。

关键词 测量; 光子晶体; 四波混频; 非线性; 气体检测

中图分类号 TN25 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.191203

Methane Sensing Measurement Based on Photonic Crystal Fiber Four-Wave Mixing Effect

Liu Hai^{1,2*}, Chen Cancan¹, Zhang Wen¹, Wang Haoran¹, Tang Shoufeng¹

¹School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

²Xuzhou Key Laboratory of Artificial Intelligence and Big Data, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract This study introduces a new methane measurement method based on the degenerate four-wave mixing effect by coating a methane gas-sensitive film on the inside of two specific cladding pores in a photonic crystal fiber. The method accurately detects methane gas in real time by establishing a direct relationship between the movement of the Stokes and anti-Stokes spectra in optical fiber and the change in methane concentration. The experimental results show that the sensor sensitivity is closely related to the gas-sensitive film thickness and the pump wavelength. At the same pump wavelength, the sensing sensitivity increases as the thickness of the gas sensing film increases. Under an unchanged thickness of the gas-sensitive film, the closer the pump wavelength is to zero dispersion wavelength, the higher the sensing sensitivity. The gas sensing sensitivity corresponding to the Stokes and anti-Stokes spectra can reach $-4.87 \text{ nm}/\%$ and $2.83 \text{ nm}/\%$, respectively, after the structural parameter optimization. The related measurement principle is also applicable to the accurate measurement of other gases and the composition analysis of mixed gases.

Key words measurement; photonic crystal; four-wave mixing; nonlinear; gas detection

OCIS codes 120.0280; 120.4630; 060.2370

1 引言

光子晶体光纤(PCF)由于具有特殊的传输原理和独特的光学特性而得到了越来越多的应用^[1-3]。

随着微结构纤维制造技术的飞速发展,人们已设计了多种基于光子晶体光纤的传感器^[4-9]。四波混频(FWM)是非线性介质中四个光波相互作用引起的一种独特的光学现象,它源于介质的三阶非线性极

收稿日期: 2020-01-05; 修回日期: 2020-01-26; 录用日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(51874301)、国家重点研发计划(2017YFF0205500)

* E-mail: lhai_hust@hotmail.com

化效应,具有较好的应用前景。于方永^[10]基于光纤中的四波混频理论和光子晶体光纤的特性,设计了以特定光子晶体光纤作为增益介质的相位敏感型光参量放大器(相比于传统的非相位敏感型光参量放大器,该光参量放大器的增益更高,并可以实现超低的噪声系数);同时,他提出了一种具有高非线性、小色散和保偏特性的特种光子晶体光纤,用作未来具有超高增益、超低噪声和大带宽特性的相位敏感型光参量放大器的参量增益介质。由于四波混频现象对光纤的色散非常灵敏,所以基于四波混频现象的传感器可以产生极高的灵敏度。Sharping 等^[11]首次从实验上证实了光子晶体光纤中非简并的四波混频,他们在零色散波长(≈ 750 nm)附近实现了相位匹配,而且在光纤中观察到了参量增益;2011年, Frosz 等^[12]将液体填充到光子晶体光纤的气孔中,证明了将四波混频现象作为光纤折射率传感器传感原理的可行性;2012年, Gu 等^[13]提出了一种非线性光纤应变传感器,并基于光纤的固有非线性运用四波混频现象对光纤的应变进行了测量;2018年, Nallusamy^[14]等采用简并四波混频(DFWM)技术设计了用于监测海水温度和盐度的传感器。光子晶体的气孔结构非常有利于不同功能材料的填充或镀膜。光子晶体光纤的非线性特性使得基于光子晶体光纤的传感测量方法具有极大的研究价值。

甲烷属于单纯窒息性气体,高浓度的甲烷对空气中的氧分子会进行排挤或取代,在局限空间(或密闭空间)内,危险性较高。因此,有必要探索一种有效的实时测量甲烷浓度的传感方法。近年来,常用的甲烷传感方法有电化学法、催化燃烧法、光子电离法、红外分光光度法等。基于催化燃烧原理的 NGP5-CH₄-W 型固定无线甲烷检测仪可以对甲烷浓度进行扩散式和流通式测量;AZJ-2000 型便携式瓦斯报警检测仪可以在一定浓度范围内设置报警点,其浓度(体积分数)检测范围 $<5\%$ 。尽管这些检测仪器已经得到了普遍认可,但仍存在着不足,比如:电化学传感器的电极暴露在大气中,可能发生化学污染和腐蚀,因此电化学传感器需要经常更换;催化传感器虽然坚固且廉价,但运行时对氧气的需求是必不可少的,并且它们易被污染,易发生烧结现象,因此需要频繁地进行校准和更换。除此之外,有的甲烷传感设备昂贵,需要专业人员在特定环境下操作;或者敏感元件的结构比较复杂,在工作中容易产生电火花,存在安全隐患。相对于这些检测方法,以光子晶体光纤作为传感元件进行传输的检测方法

具有损耗低、抗电磁干扰等优点,可以在极端环境下工作;同时,光纤类传感器还具有灵敏度高、响应速度快和不存在安全隐患等特点。

本文提出了一种基于 DFWM 效应的光纤甲烷传感器,其中光子晶体光纤的空气孔中镀上了甲烷气敏膜。当甲烷气体通过时,在外部因素的影响下,光子晶体光纤传播模式的色散和非线性系数会发生变化,使斯托克斯和反斯托克斯光谱的增益峰发生移动,通过检测增益峰值的移动就可以达到传感测量的目的。其中,斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱对应的甲烷传感器的灵敏度分别能达到 -4.87 nm/%和 2.83 nm/%。该传感器结构紧凑、灵敏度高且灵活性好,能拓展应用于单一气体精准测量和混合气体组成分析领域。

2 理论模型与传感原理

DFWM 现象是指频率为 ω_p 的两个泵浦光子湮灭,产生一个频率为 ω_{Stokes} 的斯托克斯光子和一个频率为 $\omega_{\text{Anti-Stokes}}$ 的反斯托克斯光子,即

$$2\omega_p = \omega_{\text{Anti-Stokes}} + \omega_{\text{Stokes}} \quad (1)$$

由于本文在处理脉冲时既希望光纤足够长,以产生可检测的斯托克斯和反斯托克斯线,又希望光纤短得足以避免其他非线性效应(如超连续谱的产生^[14]),因此,这里可以忽略拉曼效应、自陡变效应和线性损耗。此时,非线性薛定谔方程可以表示为^[15]

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \sum_{m=2}^{\infty} \frac{i^m \beta^m}{m!} \frac{\partial^m A}{\partial \tau^2} + \gamma |A|^2 A = 0, \quad (2)$$

式中: A 为归一化之后的光脉冲振幅; τ 为时间; γ 为非线性参数; β 为传播常数。

对非线性薛定谔方程进行线性稳定性分析可以求得无损介质中斯托克斯和反斯托克斯光学参数信号增益的计算公式为^[16-17]

$$G_s = 1 + 2 \left(\frac{\gamma P_0}{g} \right)^2 \sinh^2(gL_{\text{eff}}), \quad (3)$$

因为光波在传播过程中存在损耗,因此需要考虑损耗对增益的影响。增益公式可以修正为^[18]

$$G_s = \exp(-\alpha L) \left[1 + 2 \left(\frac{\gamma P_0}{g} \right)^2 \sinh^2(gL_{\text{eff}}) \right], \quad (4)$$

式中: α 为限制损耗; P_0 为泵浦的峰值功率; L 为光纤长度; L_{eff} 为有效长度,计算公式为 $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$; g 为增益系数, $g = \sqrt{(\gamma P_0)^2 + \left(\frac{\kappa}{2}\right)^2}$,其中 $\kappa = \Delta\beta + 2\gamma P_0$ 是线性相位

失配($\Delta\beta$)和非线性相位失配的总和,线性相位失配可以表示为 $\Delta\beta = \beta_2(\Delta\omega_s)^2 + \frac{\beta_4}{12}(\Delta\omega_s)^4$, β_2 、 β_4 是将传播常数 $\beta(\omega)$ 在泵浦光频率处进行泰勒级数展开获得的, $\Delta\omega_s$ 为泵浦光与斯托克斯光或反斯托克斯光与泵浦光之间的频移。显然,待测甲烷的浓度变化会影响光子晶体光纤有效折射率(n_{eff})的变化,进而使 β_2 、 β_4 和 γ 发生变化,最终导致斯托克斯和反斯托克斯光谱的峰值移动。根据斯托克斯和反斯托克斯光谱的峰值移动可以对甲烷浓度进行精准测量。

本文所提传感器的截面结构如图 1(a)所示,孔间距 $\Lambda = 3 \mu\text{m}$,空气孔直径 $d = 1.25 \mu\text{m}$,甲烷敏感膜厚度为 t ,甲烷敏感膜材料为 cryptophane A。cryptophane A 分子与甲烷分子发生络合反应后,薄膜折射率就会随甲烷浓度增加而线性下降。镀膜方法采用毛细管柱涂渍法。首先,在光子晶体光纤一端涂紫外线胶,所涂紫外线胶被吸入空气孔中;然

后用紫外线灯对紫外线胶进行固化处理,硬化后的紫外线胶会阻塞所有的孔;打开选定的空气孔进行液体填充;最后将涂覆好紫外线胶的一端放置在已经配制好的涂覆溶液液面下,涂覆溶液在毛细力作用下能够沿着光纤包层内分布的空气孔上升。通过调整涂覆溶液的浓度可以控制涂覆膜层的厚度,通过改变涂覆时间和外界温度可以控制空气孔内紫外线的涂覆距离。本传感器的实验原理图如图 1(b)所示。首先,激光器产生的激光经由单模光纤传输,光信号经过光纤耦合器后被偏振控制器滤除某一偏振态的光,特定偏振态的光信号经准直镜和聚焦镜后被导入到光子晶体光纤中;当注入光子晶体光纤中的甲烷浓度发生变化时,经光子晶体光纤调制后的光信号从光子晶体光纤尾端输出,经由单模光纤(SMF)进入光谱分析仪(光谱分析仪能够准确地分析相应的传感信号)。SMF 采用光纤冷接子与普通单模光纤对接。

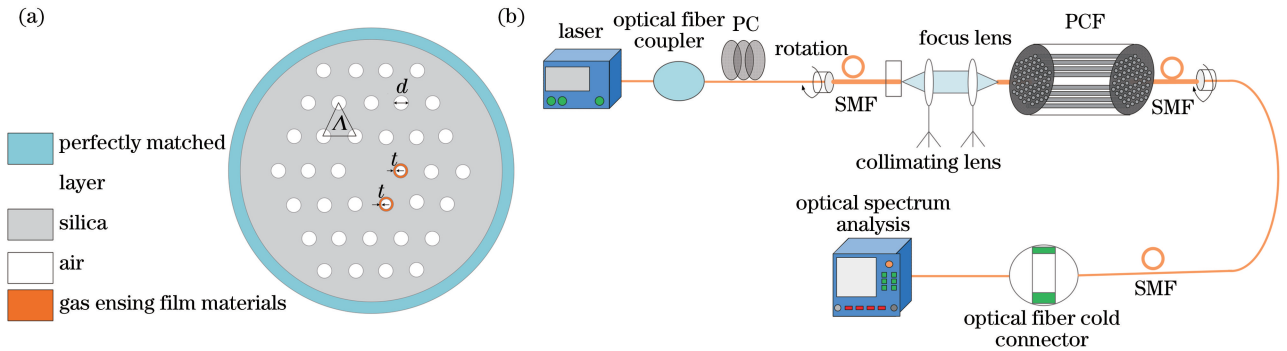


图 1 光子晶体光纤的截面结构和传感器实验原理图。(a)截面结构图;(b)传感器实验原理图

Fig. 1 Cross-section of PCF and experimental principle diagram of the sensor.

(a) Cross-section of PCF; (b) experimental principle diagram of the sensor

此外,甲烷体积分数每增加 1%,甲烷敏感膜的折射率在 1.448~1.433 范围内下降 0.0038。折射率计算公式为^[19]

$$n_{\text{eff}} = 1.4478 - 0.0038C_{\text{CH}_4}, \quad (5)$$

式中: n_{eff} 为甲烷敏感膜的等效折射率; C_{CH_4} 为甲烷的体积分数。光纤基底材料为二氧化硅,其折射率 n 可根据 Sellmeier^[20] 方程计算得到。该方程为

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.897479\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2}, \quad (6)$$

式中: λ 为入射波长。

3 仿真结果与分析

当泵浦波长为 1080 nm 时,本文计算了不同甲

烷浓度下 β_2 、 β_4 和 γ 的变化,以及斯托克斯和反斯托克斯峰的移动情况。如图 2 所示,当 CH_4 的体积分数从 0% 变化到 3.5% 时, β_2 从 $-1.6622 \times 10^{-4} \text{ ps}^2/\text{m}$ 变化到 $-3.35137 \times 10^{-4} \text{ ps}^2/\text{m}$, β_4 从 $-8.42672 \times 10^{-8} \text{ ps}^4/\text{m}$ 变化到 $-8.53131 \times 10^{-8} \text{ ps}^4/\text{m}$, γ 从 9.48713×10^{-3} 变化到 9.67327×10^{-3} 。分析这些参数的变化可以发现,甲烷浓度的变化会影响色散和非线性系数,这种改变将使 DFWM 过程中产生的斯托克斯和反斯托克斯线的波长发生变化。

通过公式 $\kappa = \Delta\beta + 2\gamma P_0$ 和 $\Delta\beta = \beta_2(\Delta\omega_s)^2 + \frac{\beta_4}{12}(\Delta\omega_s)^4$ 可以获得不同甲烷浓度下 DFWM 的相位失配曲线,如图 3(a)所示。图 3(b)则显示了斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱的增益曲线。通过

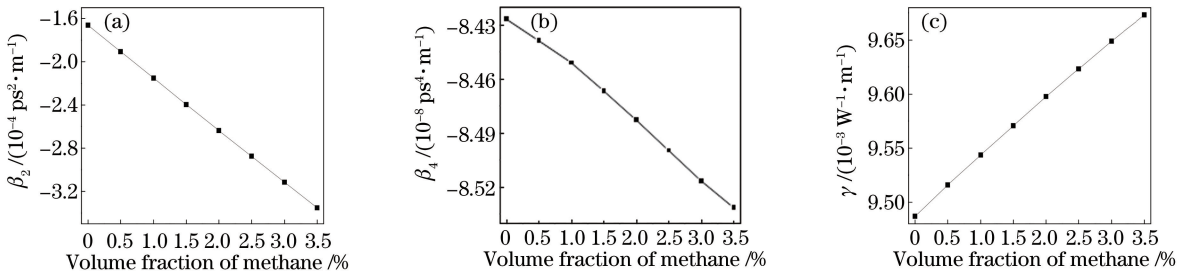


图2 β_2 、 β_4 和 γ 随甲烷浓度的变化。(a) β_2 的变化;(b) β_4 的变化;(c) γ 的变化

Fig. 2 Plots of the variations of β_2 , β_4 , and γ with methane concentrations.

(a) Variation of β_2 ; (b) variation of β_4 ; (c) variation of γ

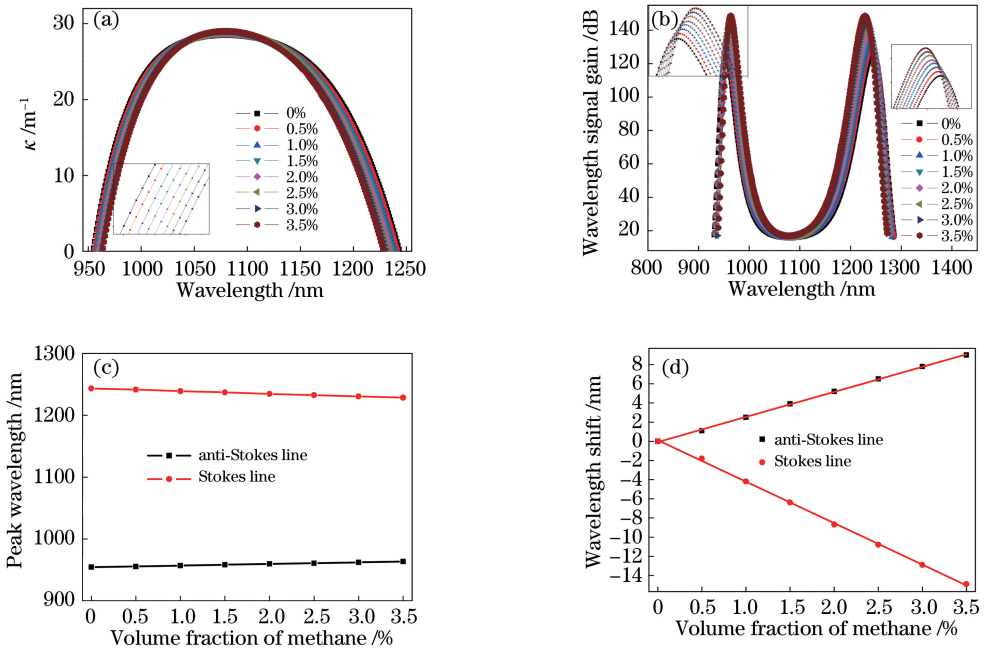


图3 斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱气体浓度灵敏度曲线图。(a)不同甲烷浓度下的相位失配曲线图;(b)DFWM在泵浦波长附近的斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线图;(c)不同甲烷浓度下增益信号的峰值波长;(d)泵浦波长为1080 nm时,波长偏移与甲烷浓度之间的关系

Fig. 3 Gas-sensitivity graph of Stokes and anti-Stokes spectra. (a) Phase mismatch plots for different methane concentrations; (b) DFWM gain plot of the Stokes and anti-Stokes signals near the pump wavelength; (c) peak wavelength of the gain signal for different methane concentrations; (d) relationship between wavelength shift and methane concentrations at a pump wavelength of 1080 nm

图3(a)、(b)明显可以看出,相位失配 $\kappa = 0$ 的点对应斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱的峰值。因此,当公式 $\kappa = \Delta\beta + 2\gamma P_0$ 中的参数确定后,斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱的峰值位置将随之确定。随着甲烷浓度增加,斯托克斯光谱发生蓝移,反斯托克斯光谱发生红移,波长移动状况如图3(c)所示。图3(d)列出了斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱峰值移动与甲烷浓度的线性拟合曲线,结果显示,左右两个增益峰的线性拟合度都能达到99.9%以上,甲烷气体的灵敏度分别为2.65 nm/%和-4.32 nm/%。

在甲烷浓度不变的情况下,本文发现,甲烷敏感膜的厚度变化会影响光子晶体光纤的有效折射率,从而进一步影响斯托克斯和反斯托克斯光谱峰值的移动。保持甲烷浓度不变,仅改变膜厚,即将膜厚 t 从220 nm增加到260 nm,得到了相位失配曲线、斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱的增益曲线,如图4所示。可以看出,随着膜厚增加,斯托克斯峰右移,反斯托克斯峰左移,且峰值降低。

为了进一步研究膜厚对甲烷灵敏度的影响,本文改变甲烷浓度进行实验,即将甲烷的体积分数从0%增大到2%,研究不同膜厚下所对应的增益峰的

移动。由图 5 可以看出:随着膜厚增加,甲烷体积分
数每改变 1%,斯托克斯峰和反斯托克斯峰的改变

量都会增大。即:在包层气孔镀膜条件容许的范围
内,气敏薄膜越厚,其探测气体的灵敏度越高。

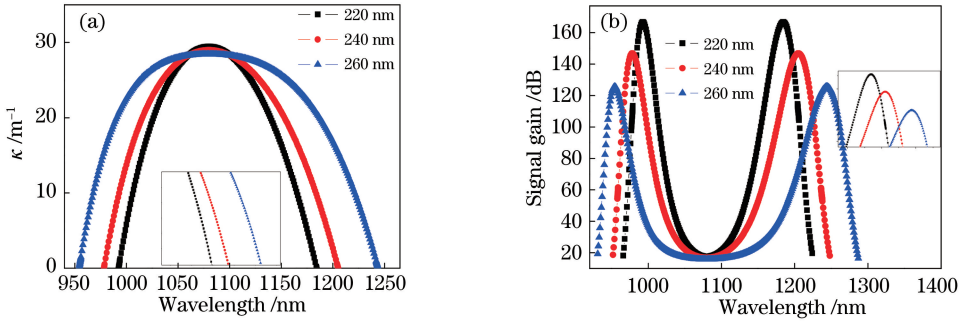


图 4 不同膜厚下的相位失配曲线以及斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线。

(a) 相位失配曲线;(b) 斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线

Fig. 4 Phase mismatch plots as well as Stokes and anti-Stokes signal gain plots obtained at different film thicknesses.

(a) Phase mismatch plots; (b) Stokes and anti-Stokes signal gain plots

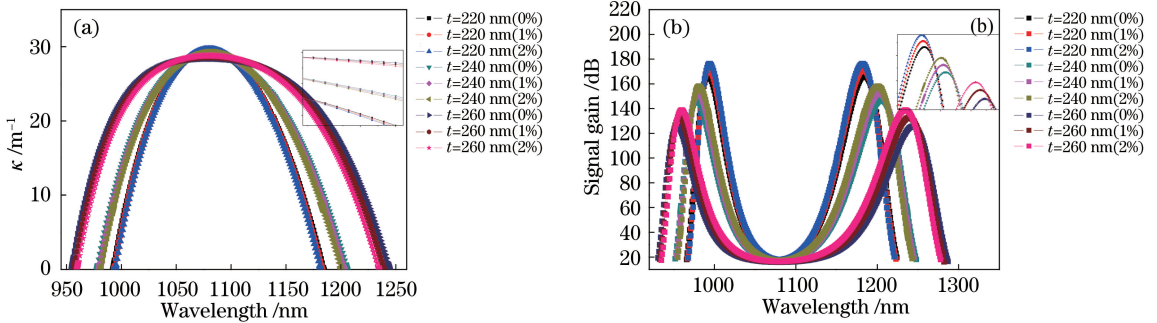


图 5 不同膜厚和不同甲烷浓度下的相位失配曲线以及斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线。

(a) 相位失配曲线;(b) 斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线

Fig. 5 Phase mismatch plots as well as Stokes and anti-Stokes signal gain plots obtained at different film thicknesses and methane concentrations. (a) Phase mismatch plots; (b) Stokes and anti-Stokes signal gain plots

同样,泵浦波长也会影响斯托克斯光谱和反斯托
克斯光谱的移动。本文在零色散波长附近分别选取
1079,1080,1081 nm 三个泵浦波长,其相位失配曲线以

及斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线如图 6 所
示。可以看出,随着泵浦波长向零色散波长靠近,斯托
克斯峰右移,反斯托克斯峰左移,且峰值升高。

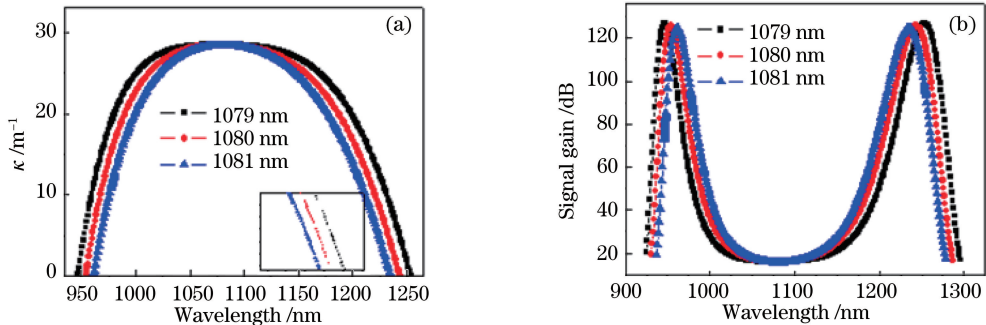


图 6 不同泵浦波长下的相位失配曲线以及斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线。

(a) 相位失配曲线;(b) 斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线

Fig. 6 Phase mismatch plots as well as Stokes and anti-Stokes signal gain plots obtained at different pump wavelengths.

(a) Phase mismatch plots; (b) Stokes and anti-Stokes signal gain plots

进一步考虑泵浦波长对测量甲烷浓度灵敏度的
影响,本文将甲烷的体积分数从 0%变化到 2%,研

究了不同膜厚下泵浦波长对应的增益峰的移动情
况,结果如图 7 所示。显然,随着泵浦波长增加,甲

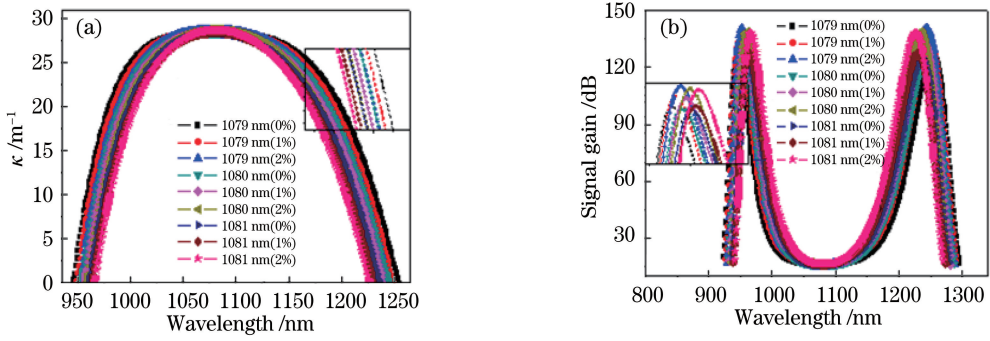


图7 不同泵浦波长和甲烷浓度下的相位失配曲线以及斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线。

(a) 相位失配曲线; (b) 斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线

Fig. 7 Phase mismatch plots as well as Stokes and anti-Stokes signal gain plots obtained at different pump wavelengths and methane concentrations. (a) Phase mismatch plots; (b) Stokes and anti-Stokes signal gain plots

烷体积分数每改变 1%，斯托克斯峰和反斯托克斯峰的改变量就会减小。即：泵浦波长越靠近零色散波长，所测甲烷浓度的灵敏度就越高。

综合考虑以上影响因素，本文选择如表 1 所示的数值作为传感器的结构参数，对甲烷进行精准测

量。图 8(a)~(c) 是在该条件下 β_2 、 β_4 和 γ 的变化

表 1 传感器结构参数

Table 1 Structural parameters of the sensor

$\Delta / \mu\text{m}$	$d / \mu\text{m}$	t / nm	λ / nm	L / m
3	1.25	260	1079	0.2

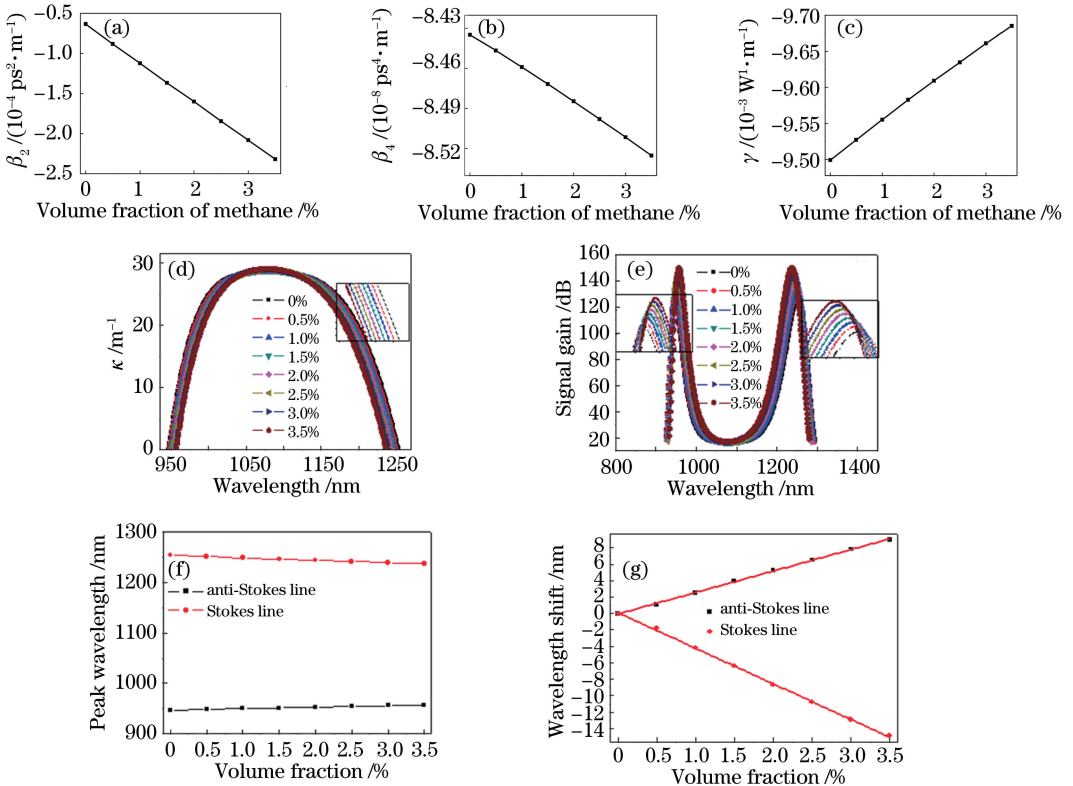


图 8 泵浦波长为 1079 nm 时的 β_2 、 β_4 、 γ 、 κ 、斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线、峰值移动曲线和灵敏度拟合曲线。

(a) β_2 曲线; (b) β_4 曲线; (c) γ 曲线; (d) κ 曲线; (e) 斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱增益曲线; (f) 峰值移动曲线;

(g) 灵敏度拟合曲线

Fig. 8 Plots of the variation of β_2 , β_4 , γ , κ , DFWM gain plot of the Stokes and anti-Stokes spectra, peak movement curves and sensitivity fitting curves at a pump wavelength of 1079 nm. (a) β_2 ; (b) β_4 ; (c) γ ; (d) κ ; (e) Stokes and anti-Stokes spectra gains plots; (f) peak movement curves; (g) sensitivity fitting curves

曲线,图 8(d)、(e)分别为相位失配曲线和增益光谱的移动情况。结合图 8(f)可以看出,随着甲烷浓度增加,斯托克斯光谱曲线左移,反斯托克斯光谱增益光谱曲线右移。图 8(g)是在该结构下甲烷气体浓度和光谱峰值移动量之间的线性拟合曲线,拟合系数均达到 99.9% 以上,气体浓度灵敏度分别为 $-4.87 \text{ nm}/\%$ (斯托克斯光谱)和 $2.83 \text{ nm}/\%$ (反斯托克斯光谱)。

本文通过仿真确定气体浓度的检测极限,结果如图 9 所示。可见:当甲烷体积分数从 0% 改变到 0.05% 时,左边的反斯托克斯峰值移动了 0.1 nm,右边的斯托克斯峰值移动了 0.3 nm,气体的探测极限分别为 5×10^{-4} 和 1.66×10^{-4} 。

表 2 所示是近几年相关领域发表的基于光子晶体光纤的甲烷传感器的灵敏度和探测极限。可以看

出,本文提出的基于非线性光子晶体光纤中 DFWM 效应的新型甲烷传感装置无论是在灵敏度方面,还是在气体的探测极限上都有较为明显的优势。

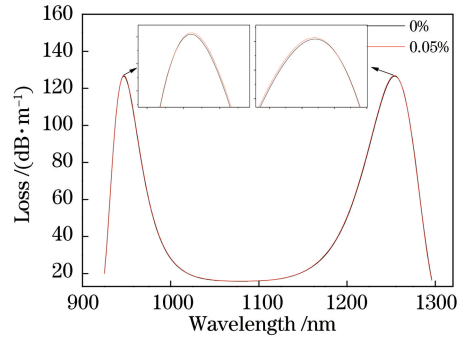


图 9 甲烷体积分数从 0% 改变到 0.05% 时,斯托克斯和反斯托克斯光谱的移动情况

Fig. 9 Movement of Stokes and Anti-Stokes Spectra when methane volume fraction changes from 0% to 0.05%

表 2 光子晶体光纤传感器的比较

Table 2 Comparison of photonic crystal fiber sensor

Type	Year	Sensitivity/ (nm/%)	Low detection limit	Ref.
PCF-LPG	2017	1.078	1.8×10^{-3}	[21]
PCF-LPG	2015	2.5	2×10^{-3}	[22]
Modal interference	2016	0.51	1.6×10^{-3}	[19]
PC micro-cavity	2015	1.67	7×10^{-4}	[23]
In this paper	2019	$-4.87/2.83$	$5 \times 10^{-4}/1.66 \times 10^{-4}$	

4 结 论

本文设计了一种基于非线性光子晶体光纤中 DFWM 效应的新型甲烷传感装置,其工作原理是基于甲烷浓度改变导致的斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱的峰值移动。该传感器能通过测量光谱漂移量精确地测量甲烷气体的浓度。优化气敏膜厚度及泵浦波长后,最终斯托克斯光谱和反斯托克斯光谱所对应的浓度-峰值移动量拟合曲线的拟合度均达到了 99.9% 以上,其气体浓度灵敏度分别能达到 $-4.87 \text{ nm}/\%$ 和 $2.83 \text{ nm}/\%$ 。

参 考 文 献

[1] Shuai B B, Xia L, Zhang Y T, et al. A multi-core holey fiber based plasmonic sensor with large detection range and high linearity [J]. Optics Express, 2012, 20(6): 5974-5986.
 [2] Feng X, Feng W L, Tao C Y, et al. Hydrogen sulfide gas sensor based on graphene-coated tapered photonic crystal fiber interferometer[J]. Sensors and Actuators B, 2017, 247: 540-545.
 [3] Zhao Y, Deng Z Q, Li J. Photonic crystal fiber based

surface plasmon resonance chemical sensors [J]. Sensors and Actuators B, 2014, 202: 557-567.

[4] Chang Y H, Jhu Y Y, Wu C J. Temperature dependence of defect mode in a defective photonic crystal[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1501-1504.
 [5] Liu Y Z, Salemink H W M. All-optical on-chip sensor for high refractive index sensing in photonic crystals [J]. Europhysics Letters, 2014, 107(3): 34008.
 [6] Rifat A A, Ahmed R, Yetisen A K, et al. Photonic crystal fiber based plasmonic sensors[J]. Sensors and Actuators B, 2017, 243: 311-325.
 [7] Hu P B, Dong X Y, Wong W C, et al. Photonic crystal fiber interferometric pH sensor based on polyvinyl alcohol/polyacrylic acid hydrogel coating [J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2647-2652.
 [8] Rifat A A, Hasan M R, Ahmed R, et al. Photonic crystal fiber-based plasmonic biosensor with external sensing approach [J]. Journal of Nanophotonics, 2017, 12(1): 012503.
 [9] Miao Y P, Zhang H, Lin J C, et al. Simultaneous measurement of temperature and magnetic field based

- on a long period grating concatenated with multimode fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(13): 132410.
- [10] Yu F Y. Four-wave mixing effect in photonic crystal fiber and it's application [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2016.
于方永. 光子晶体光纤中的四波混频效应及应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [11] Sharping J E, Fiorentino M, Coker A, et al. Four-wave mixing in microstructure fiber [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(14): 1048-1050.
- [12] Frosz M H, Stefani A, Bang O. Highly sensitive and simple method for refractive index sensing of liquids in microstructured optical fibers using four-wave mixing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10471-10484.
- [13] Gu B, Yuan W, Frosz M H, et al. Nonlinear fiber-optic strain sensor based on four-wave mixing in microstructured optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 794-796.
- [14] Nallusamy N, Raja R V J, Arzate N, et al. Simultaneous measurement of salinity and temperature in gold-coated D-shaped photonic crystal fiber using four-wave mixing technique [J]. *IEEE Sensors Letters*, 2018, 2(2): 1-4.
- [15] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [16] Ott J R, Heuck M, Agger C, et al. Label-free and selective nonlinear fiber-optical biosensing [J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 20834-20847.
- [17] Marhic M E. Fiber optical parametric amplifiers, oscillators and related devices [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 187-193.
- [18] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. 4th ed. Burlington: Academic Press, 2006.
- [19] Alem M, Soto M A, Thévenaz L. Analytical model and experimental verification of the critical power for modulation instability in optical fibers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29514-29532.
- [20] 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*, 2016, 235: 717-722.
- [21] Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, et al. Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1403-1410.
- [22] 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.
- [23] 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*, 2015, 207: 477-480.