

激光与光电子学进展

基于 Fano 共振的全介质超表面传感器

张旭^{1,2}, 赵本磊^{1,2}, 吴波^{1,2}, 张翰成^{1,2}, 刘海^{1,2*}¹中国矿业大学教育部地下空间智能控制工程研究中心, 江苏 徐州 221116;²中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116

摘要 为了实现高灵敏度的双参量传感,设计了一种对称的全介电超表面结构。在超表面上涂覆气敏薄膜后,会产生标记为 dip 1 和 dip 2 的两个 Fano 共振峰,可用于同时测量折射率和气体体积分数。计算结果表明,dip 1 的折射率灵敏度和气体体积分数灵敏度分别为 1035 nm/RIU 和 -0.57 nm/%, dip 2 的折射率灵敏度和气体体积分数灵敏度分别为 543.6 nm/RIU 和 -0.87 nm/%。该传感器可用于双参量的高灵敏度测量,且这种对称结构得到的透射谱不受光源偏振角度的影响,提高了传感器对光源的适应性,为环境空间的检测提供了一种新方法。

关键词 传感器; 偏振无关; Fano 共振; 超表面

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1728001

All-Dielectric Metasurface Sensor Based on Fano Resonance

Zhang Xu^{1,2}, Zhao Benlei^{1,2}, Wu Bo^{1,2}, Zhang Hancheng^{1,2}, Liu Hai^{1,2*}

¹The Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

²School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China

Abstract In this paper, a symmetrical all-dielectric metasurface structure is designed to achieve a high-sensitivity dual-parameter sensor. After coating a gas-sensitive thin film on the metasurface, two Fano resonance peaks labeled as dip 1 and dip 2 are generated to measure the refractive index and gas volume fraction simultaneously. The calculation results show that the refractive index and gas volume fraction sensitivity of dip 1 are 1035 nm/RIU and -0.57 nm/%, respectively, and the refractive index sensitivity and gas volume fraction sensitivity of dip 2 are 543.6 nm/RIU and -0.87 nm/%, respectively. The sensor can be used for high-sensitivity measurement of two parameters, and the transmission spectrum obtained using the symmetrical structure is not affected by the polarization angle of the light source, improving the adaptability of the sensor to the light source, and it provides a new method for detecting the environment.

Key words sensors; polarization-independent; Fano resonance; metasurface

1 引言

Fano 共振是原子系统中由离散态(亮模式)和连续态(暗模式)互相干扰引起的^[1-2]。Fano 共振的谱线是不对称的,可用于非线性光学^[3]以及光学滤波器^[4]。此外,Fano 共振可以增加局域电磁场的场强,对周围环境的变化极为敏感,因此,Fano 共振也可以用于传感器的研制^[5-7]。

超表面是一种由周期性结构单元构成的二维材料^[8],结构设计具有的灵活性和电磁特性的可控性使

超表面在许多领域都具有广泛的应用前景,如信息加密^[9]、增强透射^[10]、光学成像^[10]。近年来,超表面得到了人们的广泛关注。根据材料属性的不同,可将超表面分为金属超表面和介质超表面。金属超表面在外加电场作用下容易形成传导电流,往往具有较大的欧姆损耗,其谱线的品质因数通常较低^[11]。介质超表面在电场作用下只能形成位移电流,具有极小的欧姆损耗,其谱线具有较高的品质因数^[7]。

相比传统的介质超表面,基于 Fano 共振的介质超表面不仅具有品质因数高的特点,且拥有更高的灵敏

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-16; 录用日期: 2022-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51874301)、徐州市重点研发计划(KC20162)

通信作者: *lhai_hust@hotmail.com

度^[7,12-14]。通常根据结构的不对称性产生 Fano 共振^[7,11,15-16],但这种不对称结构产生的谱线形状受光源偏振方向的影响,给器件的使用造成一定影响。因此,必须使用具有固定偏振方向的光源,以保证器件的正常使用。为了解决该问题,本文提出了一种不受光源偏振方向影响的超表面传感器。该传感器由纯介质组成,在透射谱中存在两个 Fano 共振,且均具有较高的灵敏度和品质因数。此外,该传感结构具有良好的对称性,透射谱不会随着光源偏振角度的变化而变化,大大提高了器件对于光源的适应性。

2 基本原理

由多极子干涉理论^[17-20]可知,不同的电偶极子或磁偶极子在一定的频率范围内会相互影响产生干涉增强或者干涉相消,不同的电偶极子或磁偶极子干涉产生的远场散射强度可表示为

$$I = \frac{2\omega^4}{3c^3} |\mathbf{P}|^2 + \frac{2\omega^4}{3c^3} |\mathbf{M}|^2 + \frac{4\omega^5}{3c^4} (\mathbf{P} \cdot \mathbf{T}) + \frac{2\omega^6}{3c^5} |\mathbf{T}|^2 + \frac{\omega^6}{5c^5} \sum |Q_{\alpha,\beta}^{(e)}|^2 + \frac{\omega^6}{40c^5} \sum |Q_{\alpha,\beta}^{(m)}|^2 + O\left(\frac{1}{c^5}\right), \quad (1)$$

$$\mathbf{P} = \frac{1}{i\omega} \int \mathbf{j} d^3 r, \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2c} \int \mathbf{r} \times \mathbf{j} d^3 r, \quad (3)$$

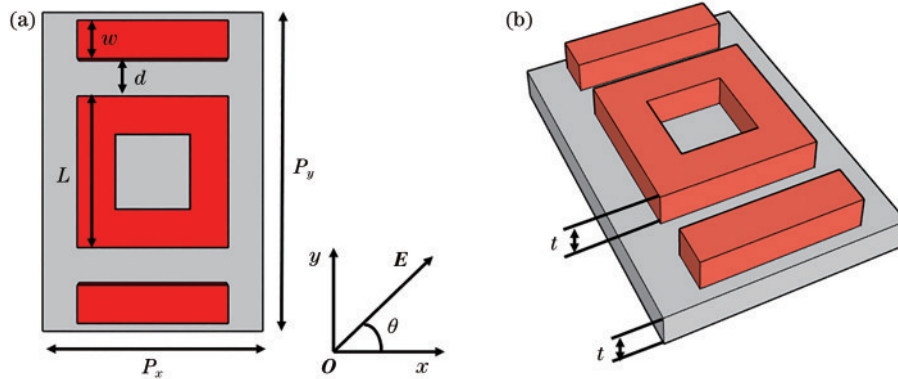


图 1 SA 的模型。(a) xy 视图;(b) 三维图

Fig. 1 Model of the SA. (a) xy view; (b) three-dimensional view

设置光源的偏振角度 $\theta=0^\circ$,通过 FDTD 仿真得到 SA 的透射谱如图 2 所示。可以发现,在波长 1596 nm 处出现了一个明显的 Fano 共振。为了分析该 Fano 共振的形成机理,在插图中给出了 1590、1596、1600 nm 处 z 方向的电场图(E_z)。可以发现:在 1590 nm 波长处,电场能量主要分布在纳米方框上;在 1600 nm 波长处,电场能量主要分布在两个纳米棒上,且这两种模式下的电场是反相的,干涉相消导致 1596 nm 波长处出现了 Fano 共振。这种情况下的电场主要分布在电介质上,因此,称这种模式为电介质模式(DM)。

$$\mathbf{T} = \frac{1}{10c} \int [(d \cdot \mathbf{j}) \mathbf{r} - 2r^2 \mathbf{j}] d^3 r, \quad (4)$$

$$Q_{\alpha,\beta}^{(e)} = \frac{1}{i2\omega} \int \left[r_\alpha j_\beta + j_\beta r_\alpha - \frac{2}{3} (r \cdot \mathbf{j}) \delta_{\alpha,\beta} \right] d^3 r, \quad (5)$$

$$Q_{\alpha,\beta}^{(m)} = \frac{1}{3c} \int [(r \times \mathbf{j})_\alpha r_\beta + (r \times \mathbf{j})_{\beta\alpha}] d^3 r, \quad (6)$$

式中: \mathbf{P} 为电偶极子; \mathbf{M} 为磁偶极子; \mathbf{T} 为环形偶极子; $Q_{\alpha,\beta}^{(e)}$ 为电四极子; $Q_{\alpha,\beta}^{(m)}$ 为磁四极子; c 为光速; ω 为光的频率; \mathbf{j} 为电流密度; α,β 分别表示 x,y 方向。

基于多极子干涉的原理提出了一个在二氧化硅衬底上排列周期性硅介质的超表面结构 A(SA)。该结构包含两个长方体纳米棒和一个方框形纳米结构,如图 1 所示。在入射光的激励下,纳米棒相当于一个电偶极子,周期性的纳米方框相当于磁偶极子。入射光的电场方向和电偶极子平行,且入射光可以和电偶极子耦合,继而通过近场耦合与磁偶极子相互干涉产生 Fano 共振。硅结构和二氧化硅衬底的厚度 $t=110$ nm,纳米棒的长度 $L=600$ nm,宽度 $W=150$ nm,纳米方框的边长 $L=600$ nm。纳米棒与方框的距离 $d=150$ nm, x 方向和 y 方向的周期长度 $P_x=900$ nm 和 $P_y=1300$ nm。用时域有限差分(FDTD)方法计算该结构的透射率光谱。其中,设置 z 方向为完美匹配层(PML), x 和 y 方向为周期性边界条件。入射光设置为平面波,定义电场偏振方向相对于 x 轴的角度为 θ 。

Fano 共振的数学模型可表示为

$$T_{\text{Fano}} = \left| a_1 + ia_2 + \frac{b}{\omega - \omega_0 + i\gamma} \right|, \quad (7)$$

式中: T_{Fano} 为透射率; a_1,a_2 和 b 为常数; ω_0 为振荡频率; γ 为阻尼系数。

保持光源的偏振角度为 0° ,将 SA 旋转 90° 得到结构 B(SB),如图 3(a)所示。用 FDTD 计算出 SB 的透射谱如图 3(b)所示。可以发现,在波长 1364 nm 处,出现了一个尖锐的 Fano 共振。为了解释该 Fano 共振的成因,在插图中绘制出了 1360 nm 和 1370 nm 处 z 方向的电场图。可以发现,在 1360 nm 和 1370 nm 处的电

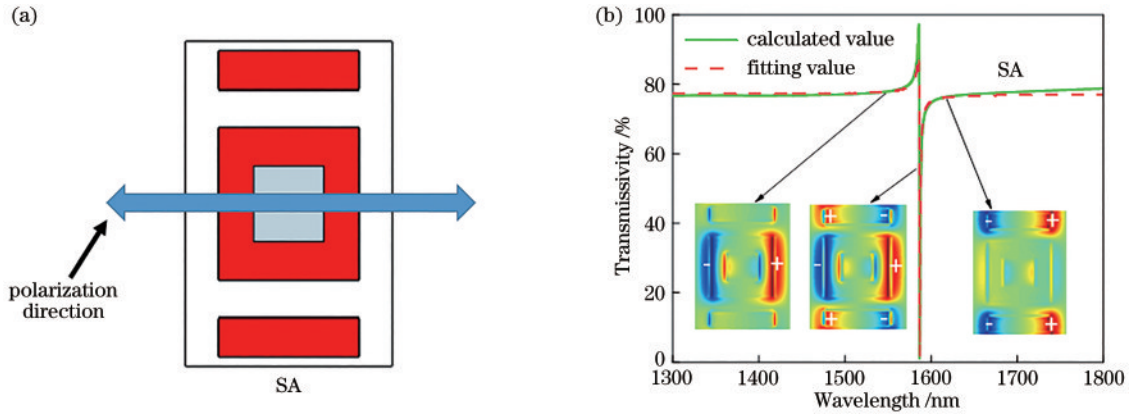


图 2 SA 的结构与透射谱图。(a)光源偏振方向;(b)透射谱和电场分布

Fig. 2 Structure and transmission spectrum of the SA. (a) Light source polarization direction; (b) transmission spectrum and electric field distribution

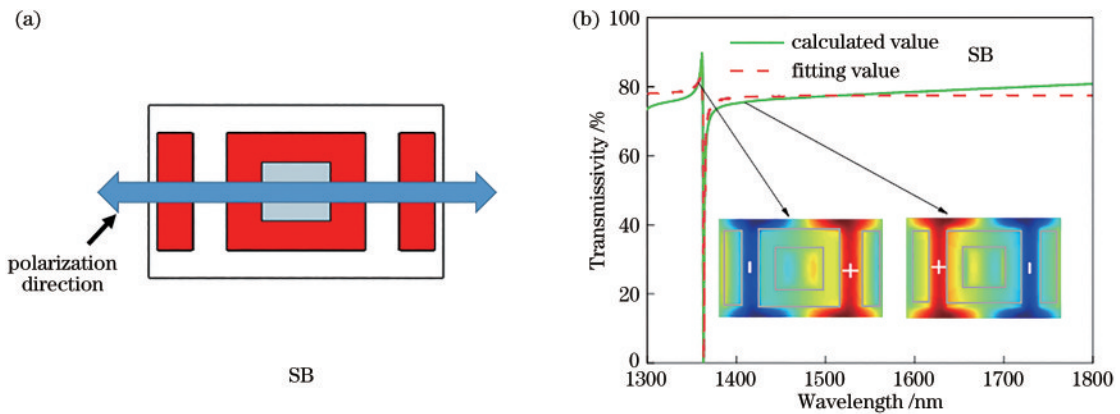


图 3 SB 的结构与透射谱图。(a)光源偏振方向;(b)透射谱和电场分布

Fig. 3 Structure and transmission spectrum of the SB. (a) Light source polarization direction; (b) transmission spectrum and electric field distribution

场是反相的,这两个反相电场互相干扰,导致 1364 nm 波长处出现了 Fano 共振。在这种情况下,电场能量主要分布在空气区域,因此,将这种模式称为空气模式 (AM)。还可以发现,SB 的透射谱可以很好地拟合式 (7) 所示的 Fano 模型。

保持偏振光的角度为 0° 不变,将 SA 和 SB 的结构合并得到 SC,如图 4 所示。通过 FDTD 仿真得到 SC 的透射谱如图 5 所示。可以发现,SC 的透射谱中有两个 Fano 共振,且均能很好地拟合式 (7) 的 Fano 共振模型。为了更好地解释这两个 Fano 共振的形成原因,在

插图中绘制了两个 Fano 共振峰附近 z 方向的电场图。可以发现:在第一个 Fano 共振峰的两侧,1345 nm 和 1405 nm 波长的电场是反相的,这两个反相电场互相干涉,导致了第一个 Fano 共振的产生;对于第二个 Fano 共振峰,纳米棒和纳米方框相当于两个电偶极子,这两个电偶极子的电场分布是反相的,两个反相电场互相干涉导致第二个 Fano 共振的产生。此外,由于 SC 是全对称的结构,其透射谱不受光源偏振角度的影响,如图 6 所示。可以发现,改变光源的偏振角度时,SC 的透射谱保持不变。

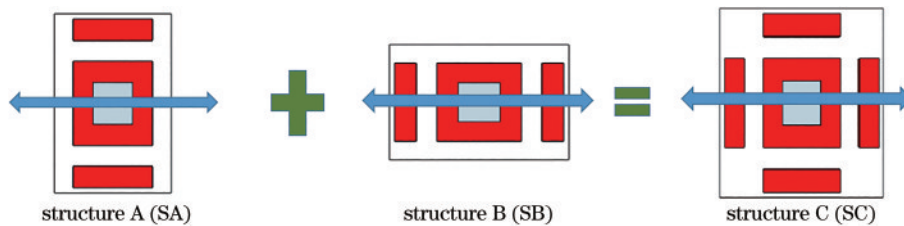


图 4 SC 的合并过程

Fig. 4 Merging process of the SC

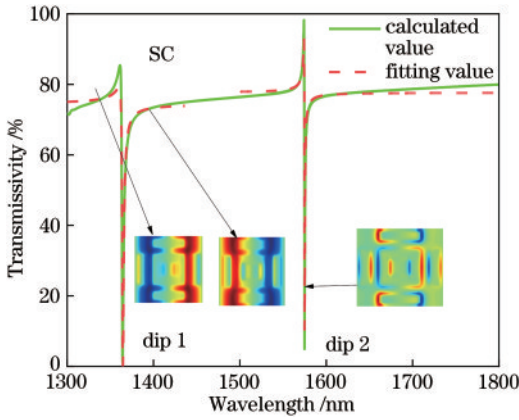


图 5 SC 的透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the SC

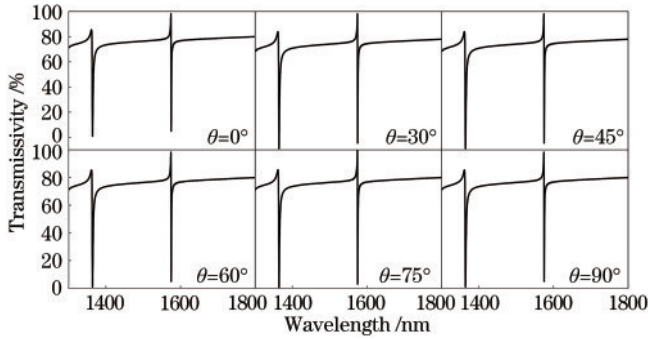


图 6 SC 在不同偏振光下的透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum of the SC under different polarized light

3 软件仿真与分析

仿真得到 SC 的传感性能如图 7 所示。可以发现,随着背景折射率的增加(折射率 $n=1.00, 1.02, 1.04, 1.06, 1.08$), Fano 共振发生右移。SC 的折射率灵敏度可表示为

$$S = d\lambda/dn, \quad (8)$$

式中: $d\lambda$ 为谐振峰的移动量; dn 为折射率的变化量。计算得到 dip 1 的折射率灵敏度为 1172.7 nm/RIU , dip 2 的折射率灵敏度为 764.45 nm/RIU , 这表明结构

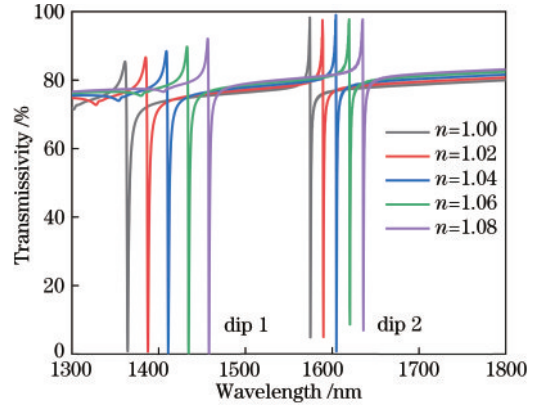


图 7 SC 在不同背景折射率下的透射谱

Fig. 7 Transmission spectrum of SC under different background refractive index

C 能够产生两个 Fano 共振峰且具有良好的传感性能,可用于双参量传感器。

在 SC 表面镀上一层甲烷气敏膜形成结构 D(SD), 该结构可进行气体体积分数和折射率的双参量传感, 如图 8(a) 所示。其中, 甲烷气敏膜的厚度为 200 nm , 长度和宽度设置为刚好覆盖硅结构。选择的甲烷敏感材料 UVCFS^[21] 是一种可紫外线固化的氟硅纳米薄膜, 能通过毛细管浸涂技术制造。这种薄膜对温度和湿度都不敏感, 且在 1550 nm 波长附近的入射光下, 其折射率在 $0\% \sim 3\%$ 范围内随着甲烷体积分数的增加而线性下降。甲烷体积分数每增加 1% , 甲烷敏感膜的折射率在 $1.4478 \sim 1.4364$ 范围内下降 0.0038 , 可表示为

$$N_{\text{eff}} = 1.4478 - 0.0038C_{\text{CH}_4}, \quad (9)$$

式中: N_{eff} 为甲烷敏感膜的折射率; C_{CH_4} 为甲烷的体积分数。

调整模型的结构参数, 令 $L=550 \text{ nm}$, $W=110 \text{ nm}$, $d=140 \text{ nm}$, 此时两个 Fano 共振的峰值位于 1550 nm 附近。通过 FDTD 仿真计算出镀膜之后 SD 的传感效果, 如图 8(b) 和图 8(c) 所示。可以发现: 当甲烷的体积分数为 0% , 空间折射率从 1.00 到 1.03 线性增加时, 透射谱发生右移, 计算得到 dip 1 和 dip 2 的折射率

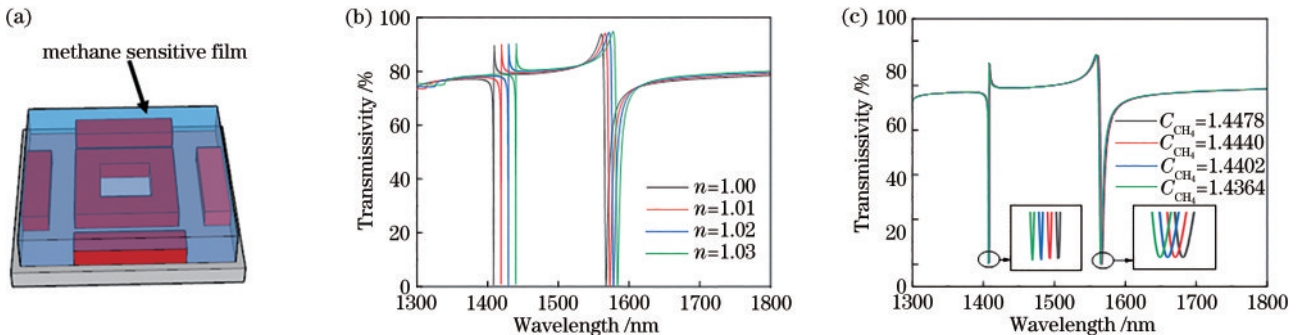


图 8 双参量传感器的结构。(a) 模型结构; (b) 不同背景折射率下的透射谱; (c) 不同甲烷体积分数下的透射谱

Fig. 8 Structure of the dual-parameter sensor. (a) Model structure; (b) transmission spectra at different background refractive indices; (c) transmission spectra at different methane volume fractions

灵敏度分别为 1035 nm/RIU 和 543.6 nm/RIU; 当空间折射率不变, 甲烷体积分数从 0% 到 3% 线性增加时, 透射谱发生左移, 计算得到 dip 1 和 dip 2 的甲烷体积分数灵敏度分别为 $-0.57 \text{ nm}/\%$ 和 $-0.87 \text{ nm}/\%$

两个 Fano 共振的光谱对于所测背景折射率和甲烷灵敏度的变化模型可表示为

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = S_{11} \times \Delta X_{\text{RI}} + S_{C1} \times \Delta C \\ \Delta\lambda_2 = S_{12} \times \Delta X_{\text{RI}} + S_{C2} \times \Delta C \end{cases}, \quad (10)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{C1} \\ S_{12} & S_{C2} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: S_{11} 和 S_{12} 分别为 dip 1 和 dip 2 对背景折射率变化的灵敏度; S_{C1} 和 S_{C2} 分别为 dip 1 和 dip 2 对甲烷体积分数变化的灵敏度; ΔX_{RI} 和 ΔC 分别为背景折射率和气体体积分数的变化量; $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为 dip 1 和 dip 2 的谐振波长变化量。双参数传感器的传感原理可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} \Delta X_{\text{RI}} \\ \Delta C \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式(12)可变换为

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{\text{RI}} \\ \Delta C \end{bmatrix} = S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

可以发现, 已知传感器 S 矩阵的情况下, 由 dip 1 和 dip 2 谐振峰的移动量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 就可以反推出 ΔX_{RI} 和 ΔC , 从而实现双参量传感。代入 FDTD 计算得到的灵敏度参数, 得到双参量传感器的计算矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{\text{RI}} \\ \Delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1035 \text{ nm/RIU} & -0.57 \text{ nm}/\% \\ 543.6 \text{ nm/RIU} & -0.87 \text{ nm}/\% \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

利用三组数据验证式(14)的准确性, 结果如表 1 所示。其中: $\Delta X_{\text{RI}}^{\text{SET}}$ 和 ΔC_{SET} 分别为预设的背景折射率变化量和气体体积分数变化量; $\Delta X_{\text{RI}}^{\text{CAL}}$ 和 ΔC_{CAL} 分别为根据式(13)计算得到的背景折射率和气体体积分数变化量。可以发现, 预设值与计算值的误差较小, 这验证了该双参量传感方法的准确性。

表 1 计算结果

Table 1 Calculation results

No.	$\Delta X_{\text{RI}}^{\text{SET}}$	$\Delta C_{\text{SET}}/\%$	$\Delta\lambda_1/\text{nm}$	$\Delta\lambda_2/\text{nm}$	$\Delta X_{\text{RI}}^{\text{CAL}}$	$\Delta C_{\text{CAL}}/\%$
1	0.005	1.50	4.47	1.48	0.005	1.53
2	0.005	2.00	4.17	1.05	0.005	2.00
3	0.015	3.00	13.83	5.59	0.015	2.93

4 结 论

提出了一种基于 Fano 共振的超表面双参量传感器。该传感器由周期性硅结构组成, 且其透射谱存在两个 Fano 共振。通过在超表面涂覆甲烷敏感膜, 可以实现背景折射率和甲烷的双参量传感。由于该结构是中心对称的, 光源偏振角度的改变不会影响透射谱, 极大方便了传感器光源的选择, 提高了器件对于光源的

适应性。

参 考 文 献

- [1] Limonov M F, Rybin M V, Poddubny A N, et al. Fano resonances in photonics[J]. Nature Photonics, 2017, 11(9): 543-554.
- [2] Miroshnichenko A E, Flach S, Kivshar Y S. Fano resonances in nanoscale structures[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(3): 2257-2298.
- [3] 张梦蝶, 王文涛, 孙朋, 等. 一种基于纳米环-柱结构的高效非线性超表面[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1219002.
Zhang M D, Wang W T, Sun P, et al. A highly efficient nonlinear metasurface based on nanoring-rod structures [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1219002.
- [4] Nguyen V A, Ngo Q M, le K Q. Efficient color filters based on Fano-like guided-mode resonances in photonic crystal slabs[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 17665542.
- [5] Muhammad N, Ouyang Z B, Liu Q, et al. Sensitive label-free sensor with high figure of merit based on plasmonic metasurface with unit cell of double two-split nanorings[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(8): 6301-6309.
- [6] Cheng R J, Xu L, Yu X, et al. High-sensitivity biosensor for identification of protein based on terahertz Fano resonance metasurfaces[J]. Optics Communications, 2020, 473: 125850.
- [7] Liu G D, Zhai X, Wang L L, et al. A high-performance refractive index sensor based on Fano resonance in Si split-ring metasurface[J]. Plasmonics, 2018, 13(1): 15-19.
- [8] Lee Y, Kim S J, Park H, et al. Metamaterials and metasurfaces for sensor applications[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1726.
- [9] 邓子岚, 涂清安, 李向平. 多维度超表面及其在信息加密防伪上的应用[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(9): 20201034.
Deng Z L, Tu Q G, Li X P. Multi-dimensional metasurface and its application in information encryption and anti-counterfeiting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(9): 20201034.
- [10] 王晓坤, 李周. 一种具有异常透射功能的新型惠更斯超表面[J]. 光子学报, 2021, 50(2): 0216001.
Wang X K, Li Z. Novel Huygens metasurface with capability of anomalous transmission[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2): 0216001.
- [11] Wu C, Khanikaev A B, Adato R, et al. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers[J]. Nature Materials, 2012, 11(1): 69-75.
- [12] Modi K S, Kaur J, Singh S P, et al. Extremely high figure of merit in all-dielectric split asymmetric arc metasurface for refractive index sensing[J]. Optics Communications, 2020, 462: 125327.
- [13] Zhang G Q, Lan C W, Bian H L, et al. Flexible, all-dielectric metasurface fabricated via nanosphere lithography

- and its applications in sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 22038-22045.
- [14] Long X Y, Zhang M, Xie Z W, et al. Sharp Fano resonance induced by all-dielectric asymmetric metasurface [J]. *Optics Communications*, 2020, 459: 124942.
- [15] Cui C C, Zhou C B, Yuan S, et al. Multiple Fano resonances in symmetry-breaking silicon metasurface for manipulating light emission[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5 (10): 4074-4080.
- [16] Leitis A, Tittl A, Liu M K, et al. Angle-multiplexed all-dielectric metasurfaces for broadband molecular fingerprint retrieval[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaaw2871.
- [17] Savinov V, Fedotov V A, Zheludev N I. Toroidal dipolar excitation and macroscopic electromagnetic properties of metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(20): 205112.
- [18] Li J, Shao J, Wang Y H, et al. Toroidal dipolar response by a dielectric microtube metamaterial in the terahertz regime[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29138-29144.
- [19] Bao Y J, Hu Z J, Li Z W, et al. Magnetic plasmonic Fano resonance at optical frequency[J]. *Small*, 2015, 11 (18): 2177-2181.
- [20] Wu P C, Liao C Y, Savinov V, et al. Optical anapole metamaterial[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(2): 1920-1927.
- [21] 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.