

基于 Fano 共振的全介质超表面双参数传感器

南雪莹^{1,2}, 刘会刚^{1,2*}, 刘海涛^{3,4**}¹南开大学电子信息与光学工程学院薄膜光电子技术教育部工程研究中心, 天津 300350;²南开大学电子信息与光学工程学院微电子工程系, 天津 300350;³南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350;⁴天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350

摘要 与金属超表面相比,全介质超表面具有较低的欧姆损耗和较尖锐的共振峰。提出了一种基于“ θ ”形全介质硅超表面的双参数传感器。通过增加空孔破坏周期单元结构的对称性,从而产生两个 Fano 共振峰,其中第一个 Fano 共振峰为连续域中的准束缚态(QBIC),两个峰的光谱对比度分别为 71.4% 和 99.4%。利用商用多物理场仿真软件 COMSOL 对该超表面周期结构进行模拟仿真,结果表明,传感器在两个 Fano 共振峰处的折射率传感灵敏度分别为 $278.9 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 和 $230.0 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 优值(FOM)最大为 9387,品质因子(Q)最大为 9735。本传感器能够同时实现折射率和温度的双参数测量,仿真结果显示两个共振峰的温度传感灵敏度分别为 $18.86 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$ 和 $42.71 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$ 。

关键词 传感器; Fano 共振; 全介质超表面; 折射率传感; 温度传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230854

1 引言

由近场中离散态和连续态之间干涉引起的 Fano 共振可以有效抑制系统的辐射衰减^[1],并且可以引起更强的场增强,获得更精细的光谱,因此 Fano 共振可用于设计高灵敏度的光学传感器。近些年,研究人员在不同领域提出了众多基于超表面的光学器件,包括光学滤波器^[2]和折射率传感器^[3]等。目前,大多数基于金属超表面的折射率传感器,由于金属材料会产生较大的欧姆损耗,其品质因子一般较低^[4-5],而基于全介质超表面的折射率传感器,恰恰能够克服上述缺点。

2018 年, Liu 等^[6]提出了一种基于硅裂环的超表面,在透射谱中只有一个 Fano 共振峰,无法同时实现高精度的双参数测量。2019 年, Liu 等^[7]提出一种双 Fano 共振峰的偏振不敏感折射率传感器,其灵敏度为 $186.96 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。2020 年,王梦梦等^[8]提出一种等离子体折射率纳米传感器,由直波导耦合开口方环谐振器组成,其灵敏度为 $1125.7 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$,品质因子为 30.01。2021 年, Qi 等^[9]提出了一种由沉积在金对称分裂环中的金纳米棒构成的等离子体纳米腔,通过改变纳米棒的旋转角度或长度,可以优化纳米棒的辐射损耗,其灵敏度达到 $1090 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$,但其优值(FOM)只有 60。2022 年, Song 等^[10]提出了一种全介质空心超表面,其灵敏度达到 $160 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。Samadi 等^[11]提出

了一种基于互补裂环谐振器的双 Fano 共振峰折射率传感超表面,通过破坏结构对称性,可以在近红外窗口中激发具有超高品质因子的连续域中的准束缚态(QBIC),具有超高优值(FOM 大于 10^5),其灵敏度达到 $155 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 。陈颖等^[12]提出基于硅缺口盘单谐振器的全介质超表面微流体折射率传感器,灵敏度达到 $400.36 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$,品质因子为 1252.3。但上述传感器大多忽略了温度波动的影响,不能应对环境中折射率和温度之间的串扰。

利用连续域中的束缚态(BIC)可以实现高品质因子(Q)的共振。BIC 最初的概念起源于量子力学^[13],之后在流体力学、声学 and 光学^[14]中被观察到。BIC 只存在于没有辐射损失的理想结构中,它的特征是谐振线宽为零, Q 无穷大,因此 BIC 与远场辐射之间不存在耦合,无法由外部激励源激励产生。对于对称保护型 BIC,其存在于具有空间对称性(例如镜像对称)的结构中,通过打破对称性,对称保护型 BIC 能够转化为 QBIC^[15],其具有有限大的 Q,因此能够由外部激励源激励产生。QBIC 的优势在于,通过减小不对称参数,在理论上能够可控地获得任意大的 Q。可见, BIC 模式是理想化的状态,它只有转化为 QBIC 模式才具有现实意义,从而实现光与物质相互作用的增强。

本文提出了一种基于双 Fano 共振的“ θ ”形全介质超表面双参数传感器,通过破坏周期性单元结构的对

收稿日期: 2023-05-23; 修回日期: 2023-06-12; 录用日期: 2023-06-25; 网络首发日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(62075104)

通信作者: *liuhg@nankai.edu.cn; **liuht@nankai.edu.cn

称性,产生了光谱对比度分别为 71.4% 和 99.4% 的两个独立的 Fano 共振峰,其中第一个 Fano 峰为近红外波段具有超高品质因子的 QBIC。基于这两个 Fano 共振峰的传感器可实现液体、气体折射率以及周围环境温度的双参数测量。利用商用多物理场仿真软件 COMSOL 对该传感器进行了折射率和温度的双参数测量的模拟仿真,结果显示,该传感器在波长 1036.5 nm 和 1155.8 nm 处可分别达到 $278.9 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 和 $230.0 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 的折射率灵敏度,对温度的灵敏度分别为 $18.86 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$ 和 $42.71 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$,可以实现对折射率和温度的同时测量。

2 超表面共振特性的分析和结构参数的确定

图 1 是本文提出的非对称全介质超表面的三维结构示意图,其中 E' 为电场矢量, H' 为磁场矢量, k' 为入

射平面波传播方向。该超表面由排列在 SiO_2 基底上的“ θ ”形硅纳米盘阵列组成,单元结构的周期为 $P_x = P_y = P = 650 \text{ nm}$,厚度为 $t = 175 \text{ nm}$,圆环中间纳米棒的宽度为 $w = 150 \text{ nm}$,圆环的内径、外径分别为 $R_0 = 225 \text{ nm}$ 、 $R_1 = 300 \text{ nm}$ 。设置单元结构底部中心位置为坐标原点 O 。空孔的半径为 r ,孔圆心到单元结构中心的水平距离为 d (称为非对称参数)。本文使用商用多物理场仿真软件 COMSOL 对该结构进行了数值仿真,仿真时设置硅的折射率为 3.48, SiO_2 半无限衬底的折射率为 1.45,沿 x 与 y 方向设置周期性边界条件,沿 z 方向在单元结构的上方和下方分别设置 2 个端口,在上方端口设置入射平面波,在下方端口计算零级平面波透过率,并在端口外侧各设置一个完美匹配层(PML)。有限元网格尺寸最大值设置为最小入射光波长的 1/10,扫描波长范围为 1000~1200 nm。设置沿 x 轴方向偏振的平面波从超表面上方沿 z 轴负方向正入射。

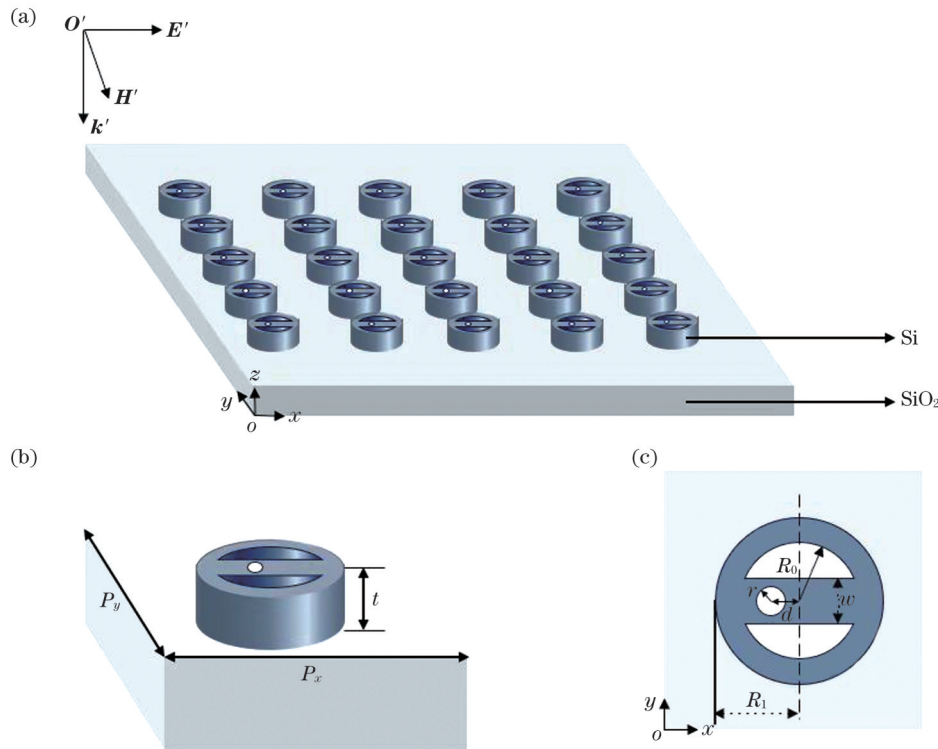


图 1 “ θ ”形折射率、温度双参数传感器结构示意图。(a)超表面的整体示意图;(b)超表面周期的示意图;(c)超表面周期的俯视图
Fig. 1 Structural diagram of “ θ ”-shape refractive index and temperature dual-parameter sensor. (a) Overall diagram of metasurface; (b) schematic of metasurface period; (c) top view of metasurface period

文献[16]指出环形偶极子(TD)共振可以明显减小辐射损耗,从而形成一种高Q的光学共振,能极大增强光与物质的相互作用。后文的分析表明,本文所提出的“ θ ”形全介质硅超表面周期结构能够形成TD共振。同时,通过引入空孔破坏周期单元结构的对称性,能够形成QBIC。上述TD共振与QBIC形成了双Fano共振峰,其中Fano共振是由离散态和连续态之间的干涉形成的,其光谱曲线具有非对称的线型。

光谱对比度($C_{\text{Spectral Contrast}}$)是滤光器和光开关的重

要参数,其定义为

$$C_{\text{Spectral Contrast}} = \frac{T_p - T_d}{T_p + T_d} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: T_p 为谐振峰附近光谱最大值波长处的透过率; T_d 为谐振峰附近光谱最小值波长处的透过率。传感器的性能参数可以通过灵敏度(S)、品质因子 Q 和优值FOM来衡量。灵敏度定义式为

$$S = \frac{\lambda'_0 - \lambda_0}{n' - n}, \quad (2)$$

式中: λ'_0 和 λ_0 分别为折射率取 n' 和 n 时的共振波长^[17]。

定义品质因子 $Q = \lambda_0 / W_{FWHM}$, 其中 W_{FWHM} 为反射率或透射率谱线谐振峰的半峰全宽。定义优值为 $F_{FOM} = S / W_{FWHM}^{[17]}$ 。

当 $r=60\text{ nm}$, $d=50\text{ nm}$ 时, 对传感器进行波长扫描仿真, 图 2 是传感器加入不对称空孔结构前、后的透射率光谱曲线(设超表面上方环境为空气, 折射率为 1)。在入射波长为 1036 nm 和 1159 nm 处有两个透射谷, 分别记为 dip 1 和 dip 2, 其 W_{FWHM} 分别为 0.1782 nm 和 0.2543 nm, 光谱对比度分别为 71.4% 和 99.4%。

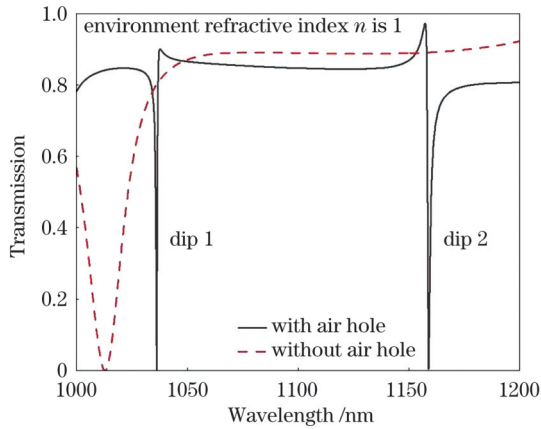


图 2 超表面加入不对称空孔前(虚线)、后(实线)的透射光谱对比

Fig. 2 Comparison of transmission spectrum of metasurface with (solid line) and without (dotted line) asymmetric air hole

从图 2 可以看出, dip 1 和 dip 2 是空孔打破了周期单元结构的对称性引入的。调节单元结构不对称性的方法是改变空孔的半径及位置。图 3 展示了 dip 1 和 dip 2 两个 Fano 共振峰的 Q 与不对称参数 d 之间的关系(设超表面上方环境为空气, 折射率为 1), 可见当 d 取较小数值时, 只有 dip 1 的 Q 与 $1/d^2$ 成正比, 表明面内不对称程度越低(即 d 越小), 则 Q 越高, 而 dip 2 的 Q 与 $1/d^2$ 无正比关系。因此 dip 1 为 QBIC 模式^[15], dip 2 不是 QBIC 模式。

改变空孔半径 r (分别取 50、60、70 nm) 和偏移量 d

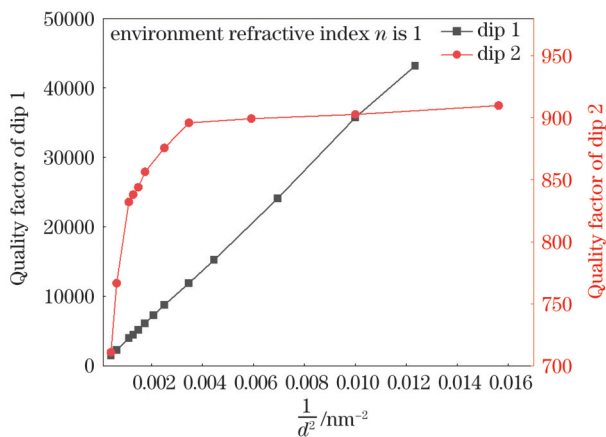


图 3 Q 随 $1/d^2$ 的变化曲线

Fig. 3 Q versus $1/d^2$

(分别取 20、30、40、50 nm), 透射率谱的计算结果如图 4 所示(设超表面上方环境为空气, 折射率为 1)。在 r 一定的条件下调节 d , d 从 20 nm 增大到 50 nm, dip 1 出现了蓝移, dip 2 出现了红移, 且 dip 1 和 dip 2 的半峰全宽 W_{FWHM} 都逐渐增大。在 d 一定的条件下, 随着 r 的增大, dip 1 的 W_{FWHM} 逐渐增大, dip 2 的 W_{FWHM} 逐渐减小, dip 1 和 dip 2 的共振波长均发生蓝移。根据上述仿真结果, 该传感器选择 $r=60\text{ nm}$ 、 $d=20\text{ nm}$ 作为最终参数, 此时 dip 1 的共振波长为 1036.5 nm, dip 2 的共振波长为 1155.8 nm。计算得到两处 Fano 共振峰的 W_{FWHM} 分别为 0.02971 nm 和 0.21330 nm, FOM 值分别为 9387.0 和 1078.3, Q 分别为 9735.0 和 1216.2。

为了进一步研究两个 Fano 共振峰的形成机理, 接下来利用近场分布讨论共振模式的特性。定义归一化

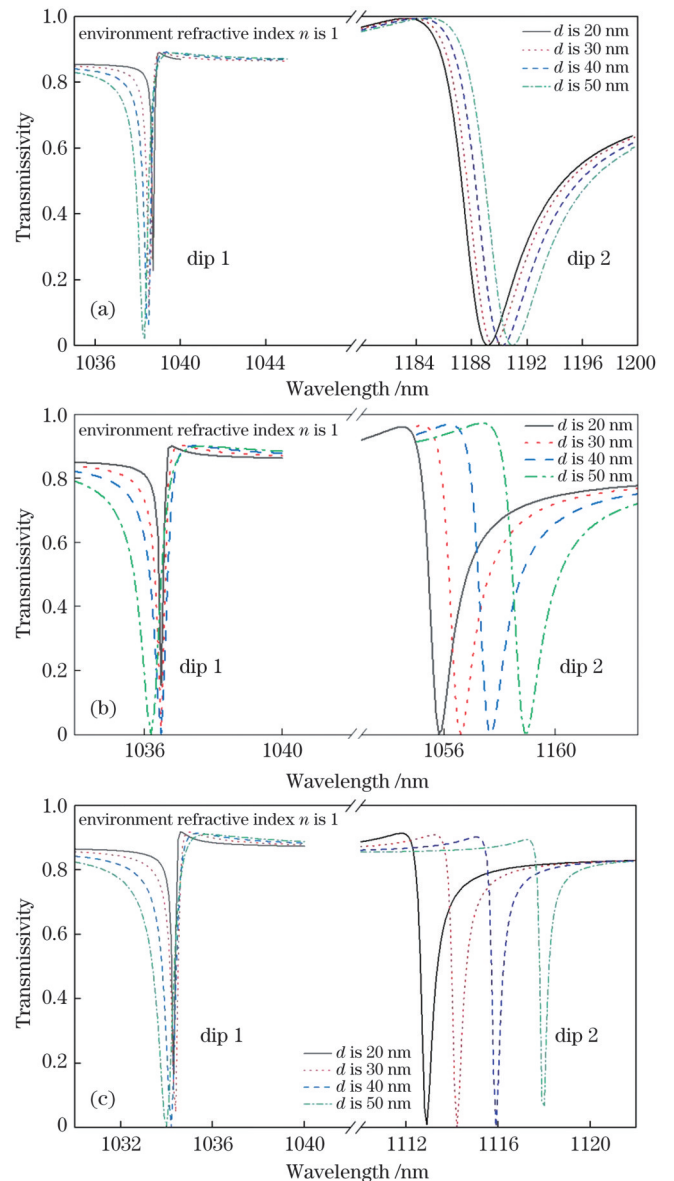
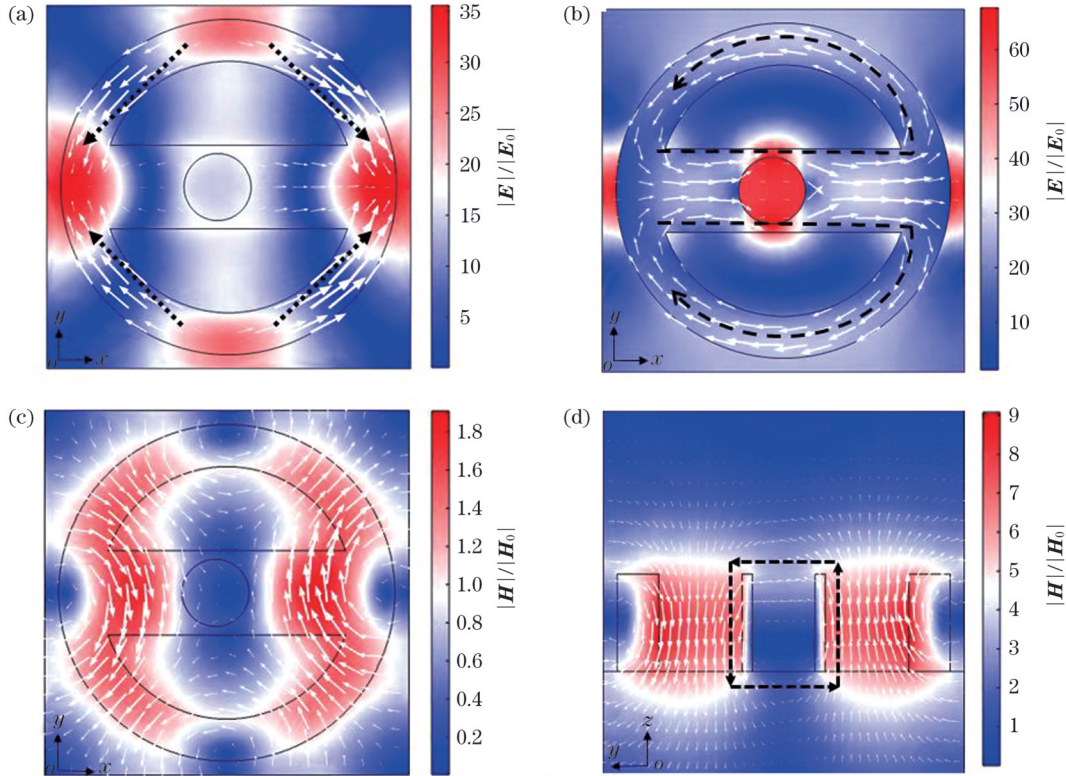


图 4 超表面结构的透射率曲线。(a) $r=50\text{ nm}$; (b) $r=60\text{ nm}$; (c) $r=70\text{ nm}$

Fig. 4 Transmissivity curves of metasurface structures. (a) $r=50\text{ nm}$; (b) $r=60\text{ nm}$; (c) $r=70\text{ nm}$

电场强度和归一化磁场强度分别为 $|E|/|E_0|$ 和 $|H|/|H_0|$, 其中, E_0 为入射平面波电场矢量, H_0 为入射平面波磁场矢量, E 为谐振波长处的电场矢量, H 为谐振波长处的磁场矢量。图 5 展示了两个共振模式的场分布(设超表面上方环境为空气, 折射率为 1)。图 5(a)、(c) 显示了在波长 $\lambda=1036.5$ nm 处, $x-y$ 平面上 ($z=t/2$) 的归一化电场强度和磁场强度分布, 图 5(b) 显示了在 $\lambda=1155.8$ nm 处, $x-y$ 平面上 ($z=t/2$) 的归一化电场强度分布, 图 5(d) 显示了在 $\lambda=1155.8$ nm 处, $y-z$ 平面上

($x=0$) 的归一化磁场强度分布, 箭头给出了场矢量的方向。从图 5(a) 可以观察到, 在 $\lambda=1036.5$ nm 处, 结构内场分布呈现出电四极子模式。从图 5(b) 可以观察到, 在 $\lambda=1155.8$ nm 处, 在 $x-y$ 平面的局部区域内出现顺时针和逆时针的环形电场分布, 从而形成沿 z 方向的一对方向相反的磁偶极子, 这对磁偶极子与沿 y 方向偏振的磁场形成了 $y-z$ 平面内的环形磁场分布, 如图 5(d) 的黑色虚线框所示, 最终形成了沿 x 方向振荡的环形偶极子^[18]。



environment refractive index n is 1

图 5 谐振波长处的电磁场分布。(a) $\lambda=1036.5$ nm, $z=t/2$; (b) $\lambda=1155.8$ nm, $z=t/2$; (c) $\lambda=1036.5$ nm, $z=t/2$; (d) $\lambda=1155.8$ nm, $x=0$
Fig. 5 Electromagnetic field distributions at resonant wavelengths. (a) $\lambda=1036.5$ nm, $z=t/2$; (b) $\lambda=1155.8$ nm, $z=t/2$; (c) $\lambda=1036.5$ nm, $z=t/2$; (d) $\lambda=1155.8$ nm, $x=0$

3 超表面传感性能的分析

当超表面结构上方环境中被测物质的折射率和温度同时发生变化时, 通过测量两个 Fano 共振峰的波长, 可实现对折射率和温度的双参数传感, 有效避免环境中折射率和温度之间的串扰, 下面具体分析。图 6 显示在环境温度不变的条件下(设为室温 25 °C, 此时固定硅的折射率为 3.48, SiO_2 衬底的折射率为 1.45), 当环境中液体折射率 n 不同时透射光谱, 可见随着折射率的增加, dip 1 和 dip 2 均出现红移。图 7 显示了 dip 1 和 dip 2 的折射率灵敏度分别为 $278.9 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 和 $230.0 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$, 可以看出折射率与共振波长具有良好的线性关系。

当传感器用于环境温度传感时, 以图 8 和图 9 中的计算结果设置超表面上方环境折射率 $n_1=1.33$ (水的

折射率), 环境温度范围为 $0 \sim 100$ °C。由于结构尺寸小, 热膨胀系数可以忽略不计。利用 SiO_2 和 Si 的热光学系数进行仿真, 热光学系数 (κ) 定义为光学材料的折射率 (n_1) 随温度 (T) 的变化率, 即 $\kappa = (n_1 - n_0) / (T - T_0)$, 其中 n_0 为参考温度 T_0 对应的折射率。对于 SiO_2 , 取 $\kappa = 8.6 \times 10^{-6} / \text{K}$, $T_0 = 25$ °C (室温), $n_0 = 1.45$; 对于 Si, 取 $\kappa = 1.84 \times 10^{-4} / \text{K}$ ^[19], $T_0 = 25$ °C, $n_0 = 3.48$ 。由已知温度 T 可确定 SiO_2 和 Si 的折射率。从图 8 可以看出, 随着温度的升高, 两个共振峰都出现红移。

图 9 显示了传感器的 dip 1 和 dip 2 的温度传感灵敏度, 分别为 $18.86 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$ 和 $42.71 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$, 可以看到, 该传感器的谐振波长与温度的依赖关系也具有好的线性特性。

基于上述结果, 利用两个 Fano 共振峰的共振波长与待测物质的折射率和周围环境温度的线性依赖特

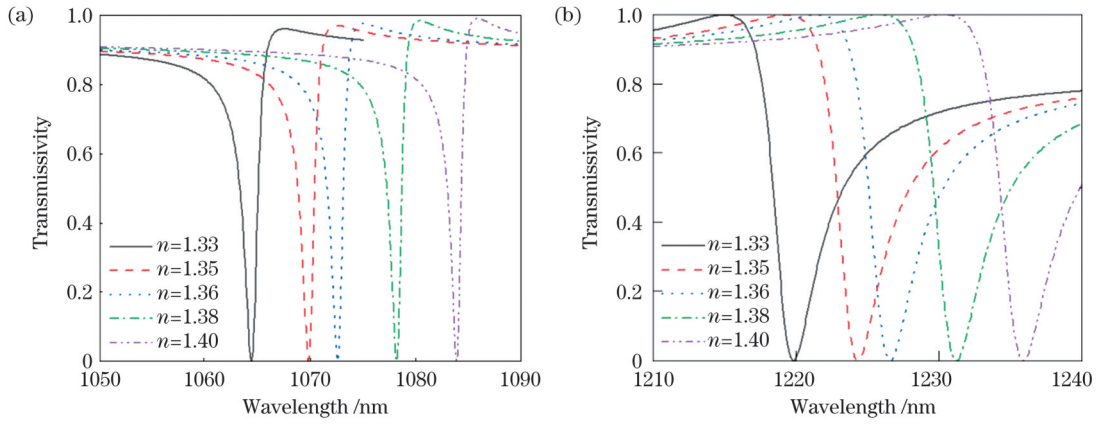


图 6 不同 n 下的透射率曲线。(a) Dip 1; (b) dip 2

Fig. 6 Transmissivity curves under different n . (a) Dip 1; (b) dip 2

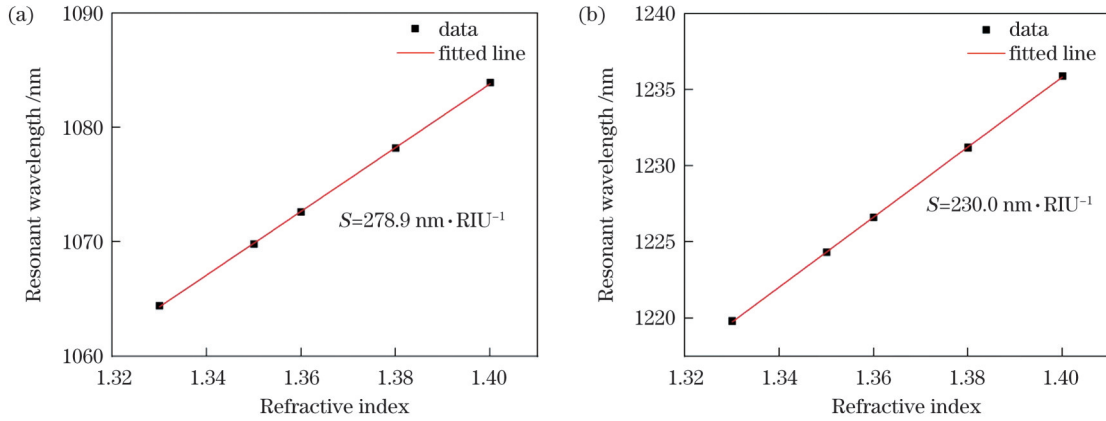


图 7 当 n 从 1.33 变为 1.40 时 dip 1 和 dip 2 的共振波长与折射率依赖关系的线性拟合。(a) Dip 1; (b) dip 2

Fig. 7 Linear fitting of resonance wavelength as a function of refractive index for dip 1 and dip 2 when n changes from 1.33 to 1.40.

(a) Dip 1; (b) dip 2

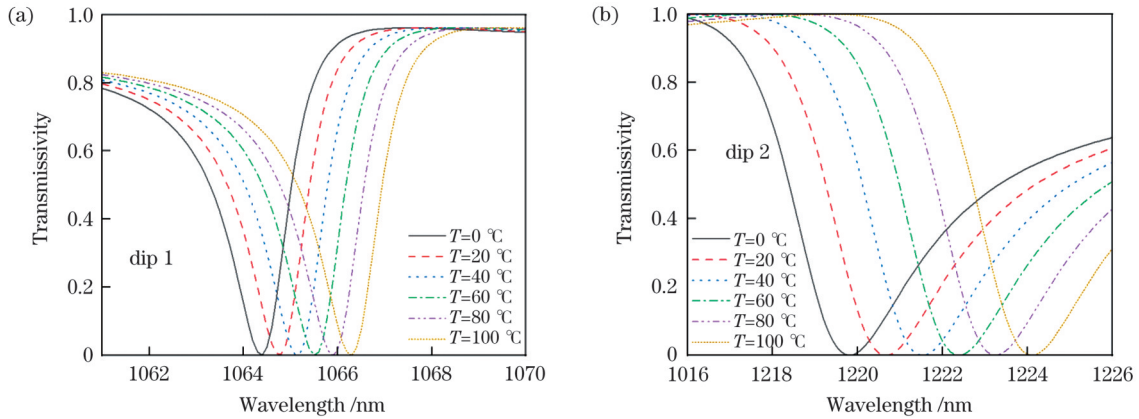


图 8 不同温度下的透射率曲线。(a) Dip 1; (b) dip 2

Fig. 8 Transmissivity curves under different temperatures. (a) Dip 1; (b) dip 2

性,可以实现折射率和温度的双参数传感测量。

双参数传感器可以用灵敏度矩阵(A)描述,共振波长的变化量表达式为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为 dip 1 和 dip 2 的共振波长变化量; Δn 和 ΔT 分别为环境的折射率和温度的变化量;矩阵 A 定义为

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{T1} \\ A_{12} & A_{T2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: A_{11} 、 A_{T1} 分别为 dip 1 对应的折射率灵敏度和温度灵敏度; A_{12} 、 A_{T2} 分别为 dip 2 对应的折射率灵敏度和温度灵敏度,其数值已经由前文计算得到,即

$$A = \begin{bmatrix} 278.9 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1} & 18.86 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1} \\ 230.0 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1} & 42.71 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

根据式(3),折射率和温度的变化量表达式为

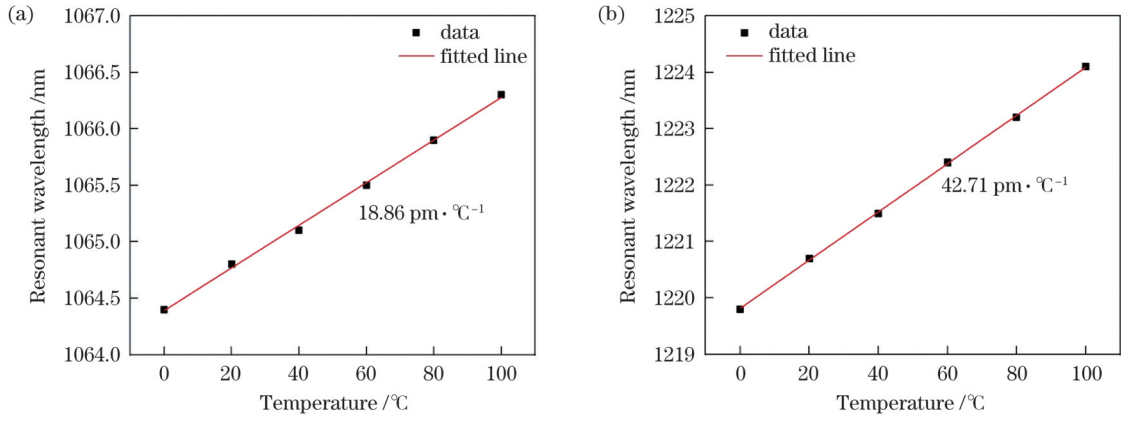


图9 共振波长随温度变化的线性拟合。(a) Dip 1; (b) dip 2

Fig. 9 Linear fitting of resonant wavelength as a function of temperature. (a) Dip 1; (b) dip 2

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta T \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_1 \\ \Delta \lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

利用式(6),可在测量得到 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 后,计算得到 Δn 和 ΔT ,从而实现折射率和温度的双参数传感。需要注意,应用式(6)的前提是矩阵 A 为可逆矩阵,这等价于矩阵 A 的第1行、第2行线性无关。从物理上讲,矩阵 A 的第1行、第2行线性无关反映的是共振波长与折射率和温度的依赖关系对于两个Fano共振峰呈现不同的规律。

接下来验证双参数传感器能够同时测量环境折射

率和温度,本文展示了6组随机数据的计算结果,如表1所示,其中, Δn_{set} 和 ΔT_{set} 为预先设定的环境折射率和温度的变化量, $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 是环境折射率和温度变化引起的dip 1和dip 2谐振波长的变化量(由COMSOL软件仿真计算得到), Δn_{cal} 和 ΔT_{cal} 为基于矩阵理论式(6)预测得到的环境折射率和温度的变化量, δ_n 和 δ_T 分别为环境折射率和温度传感的相对误差,定义为 $\delta_n = (\Delta n_{\text{cal}} - \Delta n_{\text{set}}) / \Delta n_{\text{set}}$, $\delta_T = (\Delta T_{\text{cal}} - \Delta T_{\text{set}}) / \Delta T_{\text{set}}$ 。表1结果表明,矩阵理论预测结果相对于设定值的误差较小, δ_n 和 δ_T 均不超过 $\pm 5\%$ 。

表1 折射率和温度双参数传感的矩阵理论预测结果(Δn_{cal} 和 ΔT_{cal})和设定值(Δn_{set} 和 ΔT_{set})之间的对比Table 1 Comparison among matrix-theory prediction results (Δn_{cal} and ΔT_{cal}) and preset values (Δn_{set} and ΔT_{set}) for refractive index and temperature dual-parameter sensing

Δn_{set}	$\Delta T_{\text{set}} / ^\circ\text{C}$	$\Delta\lambda_1 / \text{nm}$	$\Delta\lambda_2 / \text{nm}$	Δn_{cal}	$\Delta T_{\text{cal}} / ^\circ\text{C}$	$\delta_n / \%$	$\delta_T / \%$
0.02	20	5.83	5.35	0.0196	19.98	-2.00	-1.00
0.02	40	6.36	6.32	0.0201	39.605	0.50	-0.99
0.04	20	11.68	10.15	0.0406	19.08	1.50	-4.60
0.04	60	12.44	11.84	0.0407	58.25	1.75	-2.90
0.05	60	14.96	13.96	0.0496	59.79	-0.80	-0.35
0.07	40	20.28	17.76	0.0701	38.154	0.14	-4.60

本文提出的“0”形全介质硅超表面的双参数传感器,考虑其在实际加工中不可避免地会产生加工尺寸误差。在原尺寸大小 $w=150 \text{ nm}$, $R_1=300 \text{ nm}$, $r=60 \text{ nm}$ 的基础上,同时改变上述三个变量的大小,仿真其在 $-2\sim 2 \text{ nm}$ 误差范围内对双重Fano共振峰位置的影响。仿真结果如图10所示:在 $-2\sim 0 \text{ nm}$ 误差范围内,dip 1从 1061.54 nm 移动至 1064.38 nm ,dip 2从 1215.54 nm 移动至 1219.81 nm ;在 $0\sim 2 \text{ nm}$ 误差范围内,dip 1从 1064.38 nm 移动至 1067.28 nm ,dip 2从 1219.81 nm 移动至 1224.09 nm 。双重Fano共振峰的波长变化绝对误差均在 5 nm 以内。

表2给出了本文所提结构与已有文献提出的一些结构在传感性能上的对比,带*标记的数值是根据参考文献中的数据计算得到的值,以便于直接对比。可以

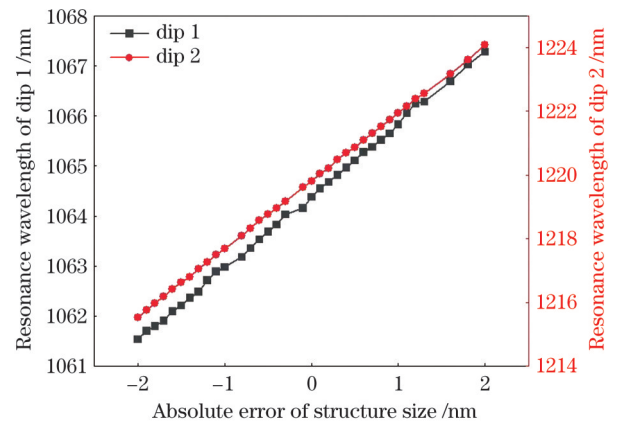


图10 谐振波长随结构尺寸绝对误差变化的曲线

Fig. 10 Resonance wavelength versus absolute error of structure size

表 2 不同超表面结构传感性能的对比
Table 2 Comparison of sensing performance of different metasurface structures

Structure	Material	λ_0 / nm	$S / (\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	Q	FOM	Reference
V-shape	TiO ₂	909.88 921.36	186.96	5126	721	[7]
Two asymmetric rectangular hollows	Si	1124 1256	160.0	8428	575*	[10]
Complementary split-ring resonator metasurface	Si	1545 1610	155.0	3.86×10^6		[11]
Au nanoparticle array	Au	856 1090	250.0	121		[20]
Silicon-notched disk	Si	1219.95 1311.70 1527.55	400.36	1252.3	292.23*	[12]
Si rectangular column	Si	1591 1651	419.45	3408	542.8	[21]
Our structure (“ θ ” shaped Si disc array)	Si	1036 1159	278.9	9735	9387	This work

看出,本文设计的结构在具有较高灵敏度的同时,有较高的品质因子 Q 和FOM。

4 结 论

提出了一种“ θ ”形全介质硅超表面双参数传感器,通过增加空孔破坏结构的对称性,获得了两个Fano共振峰,实现了温度和折射率的同时传感测量,有效避免了环境中折射率和温度的串扰问题。通过仿真计算选择优化空孔半径和偏移量等结构参数,最终得到两个Fano共振峰的折射率传感灵敏度 S 分别为 $278.9 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ 和 $230.0 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$,温度传感灵敏度分别为 $18.86 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$ 和 $42.71 \text{ pm} \cdot \text{°C}^{-1}$,FOM值最大为9387, Q 最大为9735。此外,近场分析结果表明,这两个Fano共振中分别存在电四极子共振和环形偶极子共振,表明这两个Fano共振峰的形成机理不同。通过改变被测物质的折射率或温度,均可以改变Fano共振峰的波长,并且共振波长的改变对于两个Fano共振峰呈现不同的规律,从而可实现折射率和温度的双参数传感。所提超表面结构为高品质因子双参数传感器的设计提供了参考。

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] 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): 2700208.
- [3] He Z H, Xue W W, Cui W, et al. Tunable Fano resonance and enhanced sensing in a simple Au/TiO₂ hybrid metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(4): 687.
- [4] Chen X, Fan W H, Yan H. Toroidal dipole bound states in the continuum metasurfaces for terahertz nanofilm sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 17102-17112.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Liu H G, Zheng L, Ma P Z, et al. Metasurface generated polarization insensitive Fano resonance for high-performance refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13252-13262.
- [8] 王梦梦, 韵力宇, 王一飞, 等. 基于Fano共振的等离子体折射率纳米传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 052401. Wang M M, Yun L Y, Wang Y F, et al. Plasma refractive index nanosensor based on Fano resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 052401.
- [9] Qi Z P, Hu G H, Liu B, et al. Plasmonic nanocavity for obtaining bound state in the continuum in silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9312-9323.
- [10] Song S Z, Yu S L, Li H, et al. Ultra-high Q-factor toroidal dipole resonance and magnetic dipole quasi-bound state in the continuum in an all-dielectric hollow metasurface[J]. *Laser Physics*, 2022, 32(2): 025403.
- [11] Samadi M, Abshari F, Algorri J F, et al. All-dielectric metasurface based on complementary split-ring resonators for refractive index sensing[J]. *Photonics*, 2022, 9(3): 130.
- [12] 陈颖, 张敏, 丁志欣, 等. 基于全介质超表面的微流体折射率传感器[J]. *中国激光*, 2022, 49(6): 0613001. Chen Y, Zhang M, Ding Z X, et al. Microfluidic refractive index sensor based on all-dielectric metasurfaces[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(6): 0613001.
- [13] von Neumann J, Wigner E P. Über das verhalten von eigenwerten bei adiabatischen prozessen[M] // Wightman A S. The collected works of Eugene Paul Wigner. Berlin, Heidelberg: Springer, 1993: 294-297.
- [14] Plotnik Y, Peleg O, Dreisow F, et al. Experimental observation of optical bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(18): 183901.
- [15] Koshelev K, Lepeshov S, Liu M K, et al. Asymmetric metasurfaces with high-Q resonances governed by bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 193903.
- [16] Papanikolaou N, Fedotov V A, Savinov V, et al. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(3): 263-271.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Zhao L, Wang J Y, Li H Y, et al. Simultaneous sensing of refractive index and temperature using a symmetry-breaking silicon metasurface with multiple Fano peaks[C] // 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), April 25-29, 2021, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2021: 1441-1446.
- [20] Chen J, Yuan J, Zhang Q A, et al. Dielectric waveguide-enhanced localized surface plasmon resonance refractive index sensing[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(2): 342-347.
- [21] 刘海, 任紫燕, 陈聪, 等. 基于 Fano 共振超表面的多功能传感器设计[J]. *中国激光*, 2023, 50(10): 1010001.
- Liu H, Ren Z Y, Chen C, et al. Multifunctional sensor design based on Fano resonance metasurface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(10): 1010001.

All-Dielectric Metasurface Dual-Parameter Sensor Based on Fano Resonance

Nan Xueying^{1,2}, Liu Huigang^{1,2*}, Liu Haitao^{3,4**}

¹*Engineering Research Center of Thin Film Optoelectronics Technology, Ministry of Education, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;*

²*Department of Microelectronic Engineering, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;*

³*Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;*

⁴*Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology, Tianjin 300350, China*

Abstract

Objective Currently, the performance of refractive-index sensors based on metal metasurfaces is limited by their low quality factors, due to significant Ohmic losses in the metal material. Sensors based on all-dielectric metasurfaces can overcome these disadvantages. However, most dielectric refractive-index sensors neglect the impact of temperature fluctuations. Hence, they experience crosstalk between the refractive index and environmental temperature. In this study, we design a dual-parameter sensor based on the “ θ ” shaped all-dielectric silicon metasurface. Two Fano resonance peaks are generated by adding an empty hole to break the symmetry of the periodic units in the structure. The sensor can simultaneously measure both the refractive index and temperature by measuring the wavelengths of the two Fano resonances.

Methods In this study, we use the commercial multiphysics simulation software COMSOL to numerically solve Maxwell equations for an all-dielectric dual-parameter metasurface sensor. We set periodic boundary conditions along the x - and y - directions and place two ports above and below the metasurface structure in the z -direction. An incident plane wave, polarized along the x -axis, is set at the upper port. The zeroth-order plane-wave transmittance is calculated at the lower port. To prevent undesirable reflections, perfectly matched layers (PMLs) are introduced outside each port. The maximum finite-element mesh size is set to 1/10 of the minimum incident wavelength. The scanned wavelength range is 1000–1200 nm. The relationship between the Fano resonance and quasi-bound state in the continuum (QBIC) is analyzed by varying the structural asymmetry parameter of the metasurface and calculating the corresponding quality factors.

Results and Discussions The designed structure exhibits high values of sensitivity, quality factor (Q), and figure of merit (FOM). Two Fano resonances can be generated by breaking the symmetry of the periodic unit structure. The first Fano resonance peak is a QBIC with an ultrahigh Q in the near-infrared band (Fig. 3). The near-field distributions at the resonance show the existence of electric quadrupole and toroidal dipole resonances in the two Fano resonances, indicating distinct formation mechanisms for each Fano resonance peak (Fig. 5). We obtain the refractive index sensitivities of the two Fano resonance peaks, by fixing the temperature at room temperature and calculating the resonance wavelengths for different environmental refractive indices (Fig. 7). Similarly, we set the environmental refractive index to 1.33 (the refractive index of water) and calculate the resonance wavelengths at different temperatures, to obtain the temperature sensitivities of the two Fano resonances (Fig. 9). When the environmental refractive index and temperature change simultaneously, the two Fano resonance wavelengths shift. By calculating the product of the inverse sensitivity matrix (whose elements are the previously calculated refractive index and temperature sensitivities) and a column vector composed of the shifts of the two resonance wavelengths, the change in the environmental refractive index and temperature can be inferred. This approach enables dual-parameter sensing of both the refractive index and temperature. For six sets of randomly preset values of the change in the environmental refractive index and temperature, the matrix theory predictions exhibit small errors of less than $\pm 5\%$ relative to the preset values (Table 1), confirming the feasibility of dual-parameter sensing. Regarding the impact of the structural fabrication error, the simulation results show that for fabrication errors ranging from -2 nm to 2 nm, the resultant changes in the two resonance wavelengths remain within 5 nm (Fig. 10).

Conclusions In this study, we propose a dual-parameter sensor based on the “ θ ”-shaped dielectric silicon metasurface. The sensor design includes an empty hole, which introduces a structural asymmetry and generates two Fano resonances. This unique feature enables the simultaneous sensing of the environmental temperature and refractive index, eliminating any crosstalk between the two parameters. By conducting calculations to optimize the structural parameters such as hole radius and offset, we obtain refractive index sensitivities of 278.9 nm/RIU and 230.0 nm/RIU for the first and second Fano resonances, respectively. Additionally, we obtain temperature sensitivities of 18.86 pm/°C and 42.71 pm/°C, respectively. The maximum figure of merit and Q are 9387 and 9735, respectively. The near-field analysis reveals the existence of electric quadrupole and toroidal dipole resonances in the two Fano resonances, indicating different formation mechanisms for each Fano resonance peak. When the environmental refractive index or temperature changes, the resonance wavelengths are shifted. These shifts follow different rules for the two Fano resonance peaks, enabling the dual-parameter sensing of the refractive index and temperature using a sensitivity matrix. The verification results show that the matrix theory predictions exhibit small errors (less than $\pm 5\%$) relative to the preset values of the environmental refractive index and temperature change. The simulation results show that for fabrication errors ranging from -2 nm to 2 nm, the resultant changes in both the resonance wavelengths are within 5 nm.

Key words sensors; Fano resonance; all-dielectric metasurface; refractive-index sensing; temperature sensing