中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

基于连续域束缚态理论的双缺口型圆盘多功能超表面传感器研究

李继国 张鑫 焦庆斌 姜思佳 马顶 杨名宇 许亮 谭鑫

The double-notched circular disk multifunctional metasurface sensor based on the theory of bound states in the continuum

LI Ji-guo, ZHANG Xin, JIAO Qing-bin, JIANG Si-jia, MA Ding, YANG Ming-yu, XU Liang, TAN Xin

引用本文:
李继国, 张鑫, 焦庆斌, 等. 基于连续域束缚态理论的双缺口型圆盘多功能超表面传感器研究[J]. 中国光学, 2026, 19(6): 1−10. doi: 10.3724/CO.2026−0069
LI Ji-guo, ZHANG Xin, JIAO Qing-bin, *et al*. The double-notched circular disk multifunctional metasurface sensor based on the theory of bound states in the continuum[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(6): 1-10. doi: 10.3724/CO.2026-0069

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026−0069

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于太赫兹全介质超表面的独立双带连续域束缚态

Independent dual−band bound states in the continuum based on terahertz all−dielectric metasurfaces

中国光学（中英文）. 2025, 18(5): 1230 https://doi.org/10.37188/CO.EN−2025−0004

基于连续束缚态的高品质因子双波长Fano共振

High quality factor dual wavelength Fano resonance based on continuous bound states

中国光学（中英文）. 2023, 16(4): 824 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0166

周期光学系统中的连续域束缚态

Bound states in continuum in periodic optical systems

中国光学（中英文）. 2023, 16(1): 1 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0189

基于Au纳米平行双棒超表面阵列的双Fano共振和折射率传感器特性研究

Double Fano resonance and refractive index sensors based on parallel−arranged Au nanorod dimer metasurface arrays

中国光学（中英文）. 2023, 16(4): 961 https://doi.org/10.37188/CO.EN−2023−0008

纳米环−七聚体金属−介电结构的多重Fano共振特性

Multiple Fano resonance properties of nanoring−heptamer metal−dielectric structures

中国光学（中英文）. 2023, 16(1): 214 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0170

基于表面等离子体共振的光子准晶体光纤甲烷氢气传感器

A novel methane and hydrogen sensor with surface plasmon resonance−based photonic quasi−crystal fiber

中国光学（中英文）. 2023, 16(1): 174 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022−0006

文章编号 2097-1842(2026)06-0001-10

基于连续域束缚态理论的双缺口型圆盘多功能超表面传感器研究

李继国[1,2], 张 鑫[1,2], 焦庆斌[1], 姜思佳[1], 马 顶[1], 杨名宇[1], 许 亮[1], 谭 鑫[1*]
（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049）

摘要: 本文提出并制备了一种基于石英基底的双缺口圆盘硅阵列全介质多功能超表面光学传感器。通过引入呈 45°分布的双非对称缺口打破结构对称性, 成功将无辐射的理想连续域束缚态(BIC)态转化为极强光局域场的高 Q 值准 BIC 态, 并于 1 617 nm 处激发了超窄线宽 Fano 传感谐振峰。仿真结果表明, 谐振峰的主要贡献极子为磁偶(MD)极子, 品质因子(Q)理论最高可达 1.6×10^5, FOM 最高可达 36 350; 其具有 363.5 nm/RIU 的折射率传感与 51.96 pm/ °C 的温度传感性能。此外, 可通过改变入射光的偏振态对超表面谐振峰的调制深度进行调控。由传感实验可得, 其不同折射率液体的灵敏度为 268.7 nm/RIU。本结构可广泛应用于环境监测、生物医学检测及偏振型光开关控制等领域, 并为多参数超表面传感器设计提供参考, 扩展了超表面在实际传感应用中的多功能性。

关 键 词: 全介质超表面; 多功能光学传感器; Fano 共振; 连续域束缚态理论
中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/CO.2026-0069 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0069

The double-notched circular disk multifunctional metasurface sensor based on the theory of bound states in the continuum

LI Ji-guo[1,2], ZHANG Xin[1,2], JIAO Qing-bin[1], JIANG Si-jia[1], MA Ding[1],
YANG Ming-yu[1], XU Liang[1], TAN Xin[1*]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: xintan_grating@163.com*

Abstract: The integration of metasurfaces with optical sensors can effectively reduce the sensor volume and enhance its capability for electromagnetic field manipulation. This paper proposes and fabricates an all-dielectric multifunctional metasurface optical sensor based on a double-notched circular disk silicon array on a quartz substrate. By introducing two asymmetrically arranged gaps oriented at 45° to break the structural symmetry successfully converted the non-radiative ideal bound state in the continuum (BIC) is into a high-Q quasi-BIC state with strongly localized optical fields, and an ultra-narrow linewidth Fano resonance peak at 1 617

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20230508038RC)
Supported by Jilin Province Science and Technology Development Plan Project (No. 20230508038RC)

nm is excited. Simulation results indicate that the resonance peak is predominantly contributed by the magnetic dipole (MD) mode, with a theoretically maximum quality factor (Q) of up to 1.6×10^5 and a figure of merit (FOM) reaching 36 350. The sensor exhibits a refractive index sensitivity of 363.5 nm/RIU and a temperature sensitivity of 51.96 pm/°C. Furthermore, the modulation depth of the metasurface resonance peak can be controlled by varying the polarization state of the incident light. Experimental analysis demonstrates a sensitivity of 268.7 nm/RIU for liquids with different refractive indices. This structure holds promise for applications in environmental monitoring, biomedical detection, polarization-controlled optical switching, and provides a reference for multi-parameter metasurface sensors, extending the multifunctionality of metasurfaces in practical sensing applications.

Key words: all-dielectric metasurfaces; multifunctional optical sensors; Fano resonance; bound states in the continuun

1 引 言

超材料是一种具有亚波长周期结构的人工材料，它能够与入射的电磁场发生共振耦合，表现出天然材料所没有的电磁响应，其可以灵活调控电磁波的相位、振幅、极化等特征表现[1-5]。超表面有着广泛的应用，如化学安全、生物检测、临床诊断[6-8] 等。根据材料属性的不同，可以将超表面分为金属超表面和介质超表面[9-11]。金属超表面依赖表面等离激元共振（SPR）实现局域场增强，但其机制基于自由电子的集体振荡，不可避免地引入欧姆损耗，导致其 Q 值通常被限制在低量级（~10^1），严重制约了在窄线宽传感中的应用[12]。然而，全介质超表面（如硅、锗等高折射率材料）基于米氏共振原理，利用位移电流而非传导电流支持电磁模式，从物理机制上规避了欧姆损耗，可实现 Q 值超过 10^4 的极窄线宽谐振[13]。因此，全介质超表面为实现高性能传感所需的窄带宽、强局域场共振提供了更优的材料平台。

Fano 共振与连续域束缚态（BIC）理论为微纳光子结构实现高品质因子共振提供了关键物理机制支撑。BIC 是一种存在于辐射连续谱中却具有无限品质因数与寿命的理想局域态，其能量完全束缚在结构内部而无法直接辐射。要实现可观测的高效激发，需通过打破对称性（如调节几何参数、改变入射角度[14-15] 等）将理想 BIC 转化为高 Q 值准 BIC（Q-BIC）。该状态具备极高的品质因数与极窄的共振线宽，能够激发显著的 Fano 共振并增强局域场强，非常适用于高灵敏度折射率传感和生物检测。根据形成机制，BIC 可分为对称保护型与偶然型。基于全介质材料的 q-BIC 结构已在多种 Fano 共振设计中得到应用，如不对称纳米盘、纳米棒和纳米簇[16-18] 等，为高性能光子器件设计提供了重要途径。

在实际应用中，由于光学传感信号通常与介质折射率密切相关（如溶液浓度与其折射率呈确定性关系），折射率传感成为超表面传感器主要应用方向。Wei Hong 等人用矩形分裂环设计了一种由 $LiNbO_3$ 和二氧化硅材料组成的超表面传感器，其可实现灵敏度为 241 nm/RIU 的折射率传感[19]。Haoyu Guo 等人[20] 等人将热膨胀效应引入硅二聚体结构，制备了一种灵敏度为 34 pm/°C 的超表面温度传感器。然而，当前技术发展仍面临传感架构功能单一，大多仅支持单参数检测，难以满足高性能检测。基于此，本文提出并制备了一种基于石英基底的圆盘双缺口硅阵列金介质多功能超表面光学传感器，并进行了仿真及传感实验，验证结构性能。

2 超表面结构设计

本文设计的超表面结构由上层的圆柱双缺口硅柱和下层的石英基底进行周期阵列组成。两个缺口的朝向与单元周期 P_x 与 P_y 的夹角均为 45°。硅和二氧化硅的折射率参考了 Palik 手册[21]。其中，n_{Si}=3.45，n_{SiO_2}=1.45。超表面结构的透射光谱响应以及电磁特性仿真分析均由基于时域有限积分法（FIT）的 CST 软件所完成。假设将整个芯片置于水中，即仿真背景折射率为 n_{Water}=1.33。一

束 y 偏振方向的光沿着 z 轴垂直入射整个超表面结构。采用自适应四面体对网格进行细化，将 x 与 y 方向设置为周期性边界条件，z 方向设置为开放性边界条件以更好地吸收入射波能量。超表面的整体结构如图 1(彩图见期刊电子版)所示。所设计的超表面的具体结构参数如下：P_x 和 P_y 分别为石英基底在 x 和 y 方向的周期单元结构长度；H 为石英基底的高度；R 为硅纳米圆盘的半径；m_1 和 m_2 分别为硅圆盘左上缺口和右下缺口的宽度；L_1 和 L_2 分别为两个缺口到圆盘中心的距离；h 为硅纳米圆盘的高度。

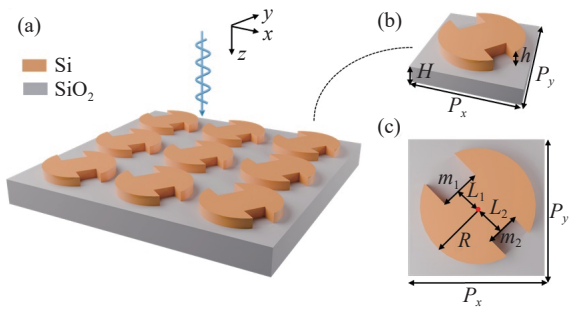


图 1　圆盘双缺口超表面结构。(a) 超表面结构示意图；(b) 单个周期的结构图；(c) 单个周期结构的俯视图

Fig. 1　Metasurface structure of the double-notched circular disk. (a) Schematic diagram of the metasurface structure; (b) unit cell geometry; (c) top-view representation of the unit cell

3　光谱特性与共振模式分析

本文用于数值仿真计算的初始参数为：P_x=P_y=950 nm、h=200 nm、H=3 000 nm、R=300 nm、m_1=220 nm、L_1=140 nm、m_2=200 nm、L_2=150 nm。所设计的超表面通过打破硅圆柱中两个斜向缺口的对称性来激发用于传感的谐振峰。对称破缺会使结构内的能量泄露，将拥有无限大品质因子的连续域束缚态(BIC)转化为准 BIC。根据 BIC 相关理论，谐振峰的 Q 因子与结构的不对称情况有关。为了更清晰地表示几何参数的不对称性，本文将不对称性参数 δ 定义为两个缺口之间的几何参数差值，表示为 δ=(L_1−L_2)+(m_1−m_2)。超表面透射光谱响应如图 2(彩图见期刊电子版)所示。

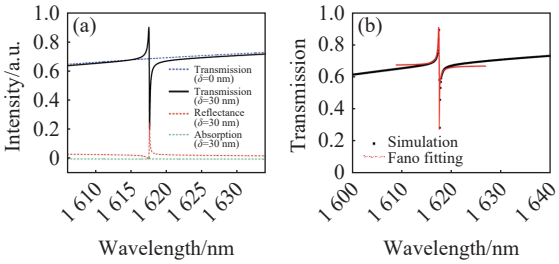


图 2　(a) 所设计超表面的透射光谱；(b) 超表面透射光谱仿真结果(黑色)与 Fano 拟合曲线(红色)

Fig. 2　(a) Transmission spectrum of the designed metasurface; (b) simulated transmission spectrum (black curve) and corresponding Fano fitting curves (red curve)

如图 2(a) 所示，该谐振峰位于 1 617 nm 处。Fano 共振是结构内明膜和暗膜相互干涉形成的非对称线性光谱，它在共振波长处会有一个 π 相位变化。其谐振峰的谱线表达式为[22]：

$$T(\omega)=\left|a_1+ia_2+\frac{b}{(\omega-\omega_0+i\gamma)}\right|^2 \quad , \qquad (1)$$

其中，γ 为整体的阻尼系数，ω_0 为共振中心频率，ω 为变量，a_1、a_2 和 b 为恒定的常数。对得到的透射光谱根据式(1)进行拟合，拟合结果如图 2(b)红线所示，其与数值仿真计算得到的结果高度吻合。调制深度也称光谱对比度，是用于评价传感器性能的指标之一，可定义为共振峰与谷之间的相对强度差。其表达式为：

$$T=\left[\left(T_{\text{peak}}-T_{\text{dip}}\right)/\left(T_{\text{peak}}+T_{\text{dip}}\right)\right]\times 100\% \quad , \qquad (2)$$

其中，T_{peak} 为共振峰峰的透射率最大值，T_{dip} 为共振峰的透射率最小值。谐振峰的调制深度为 76.8%。

本文对超表面所产生的谐振峰 Dip 进行了更详细的探究。品质因子 Q 表示为共振波长位置 λ 与半高宽(FHWM)的比值，可以表示为：Q=λ/$FWHM$，用来衡量共振峰的尖锐程度[23]。Q 值越高，共振峰越尖锐，意味着能量在结构中停留的时间越长，有利于提升传感器的灵敏度。品质因数(FOM)是衡量传感器综合性能的指标，定义为灵敏度 S 与共振峰宽的比值：FOM=S/$FWHM$[24]。因所设计的传感器目的是在获得理想折射率传感功能的基础上扩展超表面的多功能性，所以此部分的 S 为折射率传感灵敏度。通过 Q 值与不对称因子之间的逆二次方定律，可以验证结构中是否存在 BIC。

如图 3(a)(彩图见期刊电子版)所示，令超表面结构两个缺口距离原点的长度差ΔL与两个缺口的宽度差Δm分别以 5 nm 和 10 nm 进行递增，即 δ 的间隔为 15 nm。可见，当 $\delta\neq0$ nm 时，共振峰会被激发。此外，随着 δ 的增大，共振峰的线宽逐渐增加，位置向长波长方向移动。图 3(b)(彩图见期刊电子版)为不同 δ 下的透射光谱 2D-map 彩色图。实际上，超表面结构的不对称性体现为缩小右下斜向缺口的面积，令该不对称因子可表示为$\Delta=S_1/S_2$。其中 S_1 和 S_2 分别为左上和右下缺口的面积。对 Q 因子与非对称因子Δ的关系进行拟合，如图 3(c)(彩图见期刊电子版)所示。可有二者满足$Q\propto A/\Delta^2$(A 为常数)。

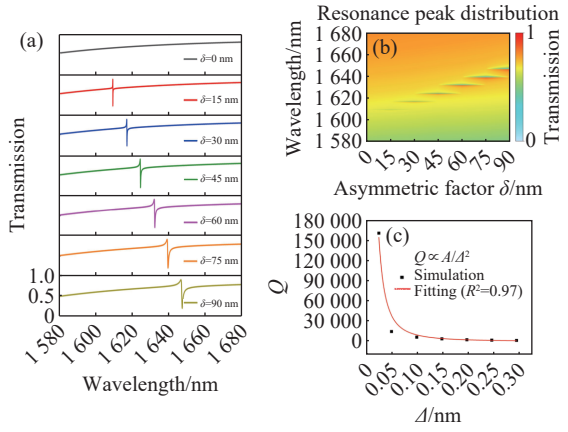


图 3 不同非对称下的超表面光谱响应与品质因子拟态。(a) 不同非对称 δ 下超表面的透射光谱；(b) 透射光谱的 2D-map；(c) Δ与品质因子 Q 之间关系的仿真与拟合结果

Fig. 3 The spectra response of metasurfaces under different asymmetries and quality factor fitting. (a) Transmission spectra of the metasurface under different asymmetry parameters (δ); (b) two-dimensional map of the transmission spectra as a function of δ; (c) simulated and fitted relationship between spectral shift (Δ) and quality factor Q

经仿真计算知，在该结构的 Q 因子最高可达 1.6×10^5，FOM 最高可达 36350。但考虑到目前工艺的精度与芯片制备难度，最终选取$\Delta=0.099$ (m_1=150 nm、m_2=140 nm、L_1=200 nm、L_2=220 nm)作为超表面结构的最终参数，此时该结构的品质因子为 6253，FOM 为 1403。

本文进一步对 Fano 共振峰的共振模式的辐射特性进行了详细分析，众所周知，不同极化体的辐射场分布存在差异。在超表面的的多极子分解中，因高阶极子通常贡献较小且多由低阶极子耦合得到，因此对其忽略不计。主要考虑 5 种常见的多极子，包括电偶极子(ED)、磁偶极子(MD)、电四极子(EQ)、磁四极子(MQ)和环形偶极子(TD)[25]。分别定义如下：

$$P=\frac{1}{i\omega}\int j d^3r \quad , \tag{3}$$

$$M=\frac{1}{2c}\int (r\times j)d^3r \quad , \tag{4}$$

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

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

$$T=\frac{1}{10c}\int[(r\cdot j)r-2r^2 j]d^3 \quad . \tag{7}$$

不同偶极子的远场辐射功率为：

$$I=\frac{2\omega^4}{3c^3}|P|^2+\frac{2\omega^4}{3c^3}|M|^2+\frac{\omega^6}{5c^5}|Q_{\alpha\beta}^{(e)}|^2+\frac{\omega^6}{20c^5}|Q_{\alpha\beta}^{(m)}|^2+\frac{2\omega^6}{3c^5}|T|^2 \quad , \tag{8}$$

其中，α,β 分别对应 x,y,r 为位置向量，ω 为角频率，c 为光速，j 表示位移电流分布。

超表面纳米单元在特定共振频率下对电磁波的散射来源于多种极化体模式的共同作用。其最终形成的散射场通常由其中某一种主导模式决定。根据上述公式，计算超表面对称结构和非对结构的笛卡尔坐标系下的多级子分解结果，如图 4(彩图见期刊电子版)所示。当不对称因子$\Delta=0$时，超表面的主要贡献极子为电偶极子；当不对称因子$\Delta\neq0$ 时，磁偶极子的贡献最大，其他模式受到了强烈的抑制。其中，MD、MQ、EQ 项的贡献占比分别为 97.7%、1.2%、0.8%。由于对称保护性 BIC 被破坏形成了 MD-Fano 共振，这是本文超表面具有高灵敏度、高 Q 值传感特性的原因之一。

为了进一步验证和阐述所设计超表面结构中的共振物理机制，本文详细计算了其在共振波长 1617 nm 处的近场电磁场分布(如图 5(彩图见期刊电子版)所示)。图中，白色箭头代表对应截面内局域场强矢量的瞬时指向(其中图 5(a)、5(e) 为电场，图 5(b)、5(f) 为磁场)；黑色箭头则表示该共振模式下等效宏观偶极矩或电磁场主导极化的总

指向。在全介质硅基超表面中, 由于材料不存在自由载流子, 结构对入射光的强散射主要源于材料内部束缚电荷极化所产生的位移电流, 其密度定义为 $j=\mathrm{i}\omega\varepsilon_0(\varepsilon_\mathrm{r}-1)E$。因此, 超表面单元内位移电流的流向与空间分布同局域电场矢量 E 的分布高度一致。当不对称因子Δ=0 时, 对称结构在入射场激发下表现为显著的 ED 特征, 如图 5(a)中黑色长箭头所示。当引入不对称性打破对称保护的 BIC 平衡后, 原有的共振机制发生演变。如图 5(e) 所示, x-y 平面内的局域电场矢量(白色箭头)首尾相连形成了一个清晰的逆时针涡旋环。根据经典电动力学理论和右手螺旋定则, x-y 平面内这种强烈的环形位移电流环路会产生沿垂直平面方向的等效磁矩。如图 5(f) 所示, 非对称结构的 z-x 平面磁场在截面中心由下至上高度局域化(如黑色竖直箭头所示), 形成了典型的 MD 共振模式。这一结果与前述多极子分解中 MD 项为主要贡献极子的结论相吻合。

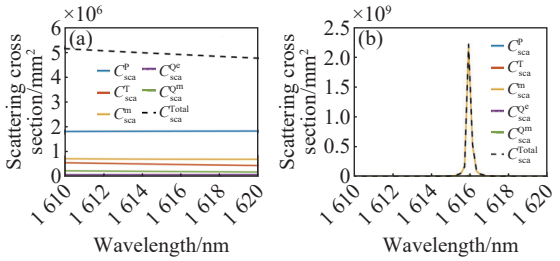


图 4　(a) 对称结构及 (b) 非对称结构的多极子分解情况

Fig. 4　Multipole decomposition results (a) symmetric metasurface structure and (b) asymmetric metasurface structure

共振位置的波长与线宽受超表面周期单元几何参数的影响。当超表面的周期单元结构参数发生改变时, 其对应的透射光谱也会发生变化。图 6(彩图见期刊电子版)给出了随着硅圆盘半径 R、硅圆盘高度 h、石英基底 P_x 以及 P_y 的增加, 超表面的透射光谱的变化情况, 可见, 其均出现不同程度的线性红移。随着 P_x 几何尺寸的增加, 透射光谱的调制深度 T_d 也会逐渐增加,而随着 P_y 的增加, 透射光谱的调制深度 T_d 会逐渐减少。经线性拟合(y=kx+b)可得, 4 个参数与透射峰位置的斜率分别为 1.885、1.306、0.337 和 0.336。可得, 硅圆盘半径 R 对谐振峰透射光谱的影响较大, 其次为硅圆盘的高度。石英基底 x 和 y 方向的周期长度变化对谐振峰的影响较不明显。图 6 中的雷达图展示了在其他参数不变的情况下, 只改变其中一个参数后超表面传感器的主要性能指标变化情况。以上分析结果证明了所设计的超表面结构具有一定的可调谐性, 同时也为超表面的加工和制造提供了相关参考。

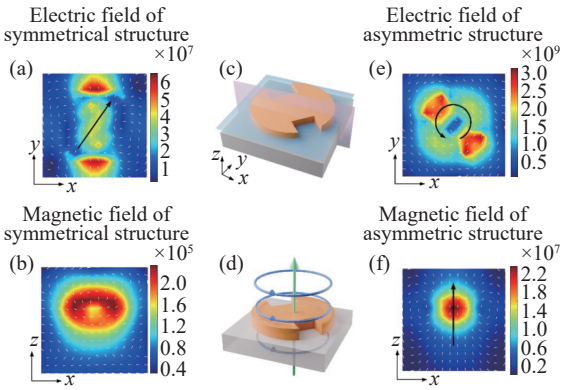
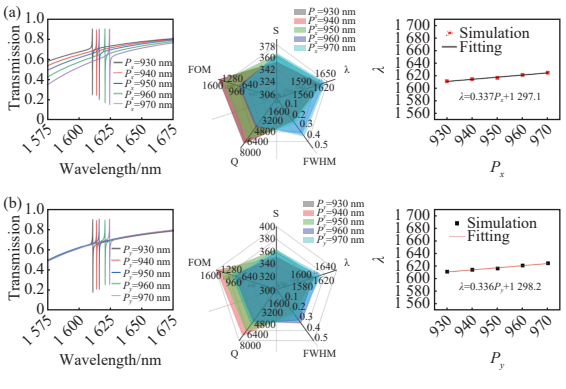


图 5　超表面电磁场分布(白色箭头指示局域场矢量方向; 黑色箭头指示等效偶极矩或总场环流方向)。(a) 对称结构 x-y 平面电场; (b) 对称结构 z-x 平面磁场; (c) 结构中 x-y 平面(z=100 nm, 蓝色)以及 z-x 平面(x=0 nm, 粉色)的示意图; (d) 非对称结构 MD 极子示意图; (e) 非对称结构 x-y 平面电场分布(位移电流环); (f) 非对称结构 z-x 平面磁场分布

Fig. 5　Electromagnetic field distribution of the metasurface (white arrows indicate the direction of the local field vector; black arrows indicate the direction of the equivalent dipole moment or the total field circulation). Electric field distributions in the x-y plane of (a) symmetric structure and (e) asymmtric structure. Magnetic field in the z-x plane of (b) symmetric structure and (f) asymmetric structure. (c) Schematic illustration showing the x-y plane (z = 100 nm, in blue) and z-x plane (x = 0 nm, in pink) within the metasurface structure. (d) Schematic diagram of MD polaritons in the asymmetric structure Electric field in the x-y plane (displacement current loop) in the asymmetric structure



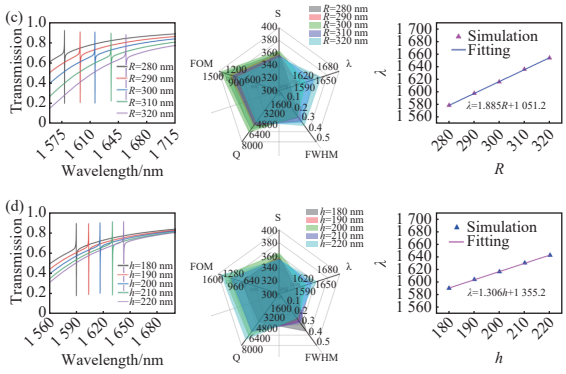


图 6 超表面透射光谱几何依赖性。(a)~(d) 保持其他参数不变，分别只改变 P_x、P_y、R、h 时透射光谱以及超表面传感的性能。（S 为折射率传感灵敏度）

Fig. 6 Geometric dependence of the transmission spectrum of metasurfaces. (a)-(d) Influence of geometric parameter variations—P_x, P_y, R, and h—on the transmission spectra and refractive index sensing sensitivity (S), with all other parameters held constant

4 折射率与温度传感仿真结果

超表面附近的折射率或者温度发生改变会引起超表面透射光谱的变化，具体表现为共振峰的蓝移或者红移。据此，可以通过改变透射光谱来进行相应参数的传感。首先，对超表面传感器仅应用于折射率传感进行了更详细的探究。在仿真计算中，假设覆盖在芯片表面的待测物足够厚可忽略待测物厚度对超表面谐振峰的影响。考虑到水的折射率为 1.33 且其为常见待测物的介质溶液，模拟仿真了折射率为 1.30~1.40 之间时超表面传感器的折射率传感情况。折射率传感灵敏度可定义为 $S_n=\Delta\lambda/\Delta n$，即由环境折射率变化而引起的谐振峰位置的变化。如图 7（彩图见期刊电子版）所示，随着待测物质折射率的增大，共振峰会发生线性红移。经拟合可得，所设计的超表面液体折射率传感灵敏度可达 363.5 nm/RIU。

在实际传感应用中，物质折射率会随着温度而发生变化。因此，需要探究超表面的传感谐振峰在不同温度下的响应情况。因超表面尺寸较小，对热膨胀系数忽略不计。热光学系数可以体现材料的折射率随温度的变化情况，可以表示为 $n(T)=n(T_0)+\eta(T-T_0)$[26]。其中，η 为热光系数，T_0 为初始温度。依旧假设介质溶液为水。当在室温 T_0=20 °C 时，硅、二氧化硅、水的热光系数分别为 1.84×10^{-4}/K、8.6×10^{-6}/K、-1.02×10^{-4}/K。温度灵敏度 S_T 可以定义为温度变化ΔT 与其引起的波长变化$\Delta\lambda$ 的比值，即 $S_T=\Delta\lambda/\Delta T$。仿真计算了 0~80 °C 内超表面仅进行温度传感时透射光谱的变化情况，如图 8(a)（彩图见期刊电子版）所示。经峰位置与温度线性拟合计算后可得温度传感灵敏度为 51.96 pm/ °C。可见，该超表面具有良好的温度传感性能。此外，传感器的谐振峰位置其实是待测物质温度与折射率共同作用的结果，谐振峰偏移$\Delta\lambda$ 与折射率 n 和温度 T 的变化关系可以由以下公式描述：

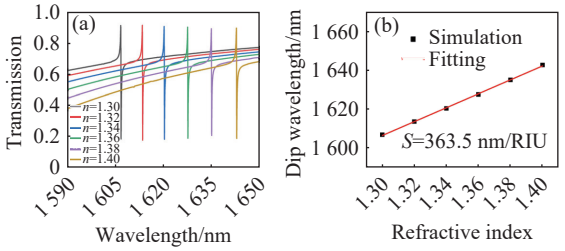


图 7 超表面折射率传感性能。(a) 改变背景折射率 n 透射光谱的变化；(b) n 对共振峰位置的线性拟合结果

Fig. 7 Metasurface refractive index sensing performance. (a) Transmission spectra as a function of background refractive index (n). (b) Linear fitting results of the resonance peak wavelength versus refractive index (n)

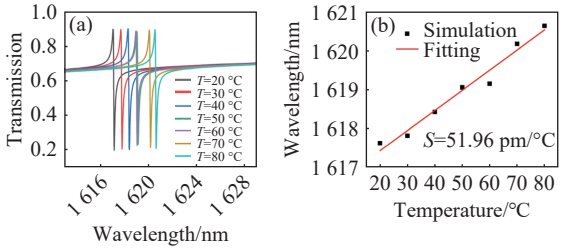


图 8 超表面温度传感特性。(a) 不同温度下的透射光谱曲线；(b) 温度传感灵敏度拟合

Fig. 8 Temperature sensing characteristics of metasurfaces. (a) Transmission spectra measured at different temperatures. (b) Linear fitting results of temperature sensing sensitivity

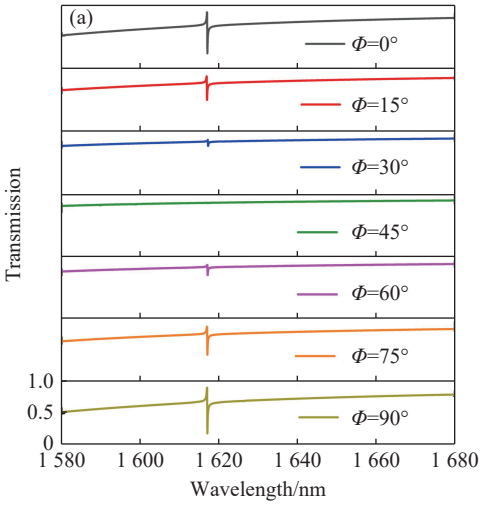
$$\Delta\lambda=\frac{\partial\lambda}{\partial n}\Delta n+\frac{\partial\lambda}{\partial T}\Delta T+\left(\frac{\partial\lambda}{\partial n}\times\frac{\partial n}{\partial T}\right)\Delta T \quad , \qquad (9)$$

式中，第一项和第二项分别代表折射率和温度的独立变化，第三项为待测物质的热光效应。

$$\Delta\lambda=S_n\left(\Delta n+\Delta T\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}\right)+S_T\Delta T \quad . \qquad (10)$$

由此可知，可以根据共振波长的偏移反推出待测物质折射率与温度的具体数值。

图 9(彩图见期刊电子版)给出了超表面透射光谱的偏振特性。由图 9(a) 可知, 随着偏振角 Φ 从 0°增至 45°时, 谐振峰位置保持稳定, 但调制深度逐渐减小; Φ=45°时谐振峰完全消失, 起到光路闭合作用; 继续增大 Φ, 谐振峰又对称地恢复。该现象可由主导共振模式的磁偶极(MD)的激发条件得到机制性解释。对于 z 向 MD 共振, 其产生依赖于 x-y 平面内的电场驱动的环形位移电流。当 Φ=0°(y 偏振)时, 电场沿 y 轴分布, 结构中的双缺口非对称性使位移电流形成逆时针净环流, 有效激发出 MD 谐振, 呈现尖锐 Fano 峰。随 Φ 增大, 入射电场在 x 方向的分量逐渐增强, 位移电流流向趋于紊乱, 环流分量减弱。特别是 Φ=45°时, 入射电场方向与双缺口连线(45°方向)平行, 位移电流被优先沿缺口方向疏导, 无法构建环绕 z 轴的闭合回路, 磁偶极矩趋于零, 因此准 BIC 共振被完全抑制, 透射光谱中谐振峰消失。这表明, 偏振角通过调控位移电流的拓扑分布, 决定了 MD 模式的激发与否, 从而实现了高效的光开关功能。



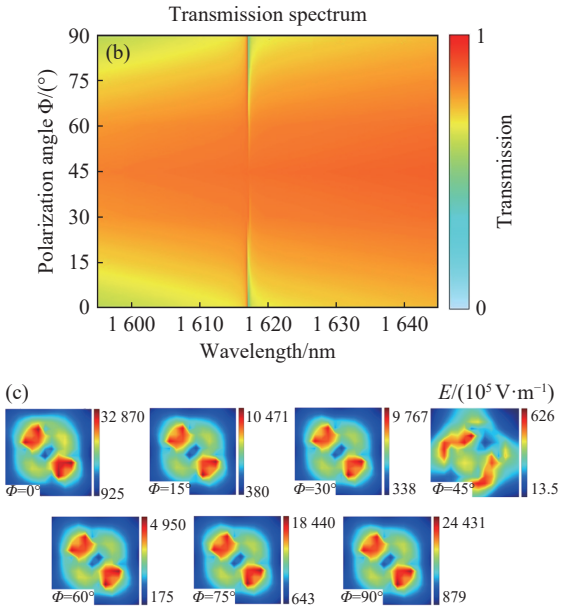


图 9　超表面透射光谱偏振特性。(a) 不同偏振角度下超表面的透射光谱曲线; (b) 不同偏振角度下的 2D-color map; (c) 不同偏振角度下的电场情况(x-y 平面, z=100 nm 处)

Fig. 9　Polarization characteristics of the transmission spectrum of metasurfaces. (a) Transmission spectra of the metasurface under varying polarization angles. (b) Two-dimensional color map of spectral response as a function of polarization angle. (c) Electric field distribution in the x-y plane at z = 100 nm for different polarization angles

表 1 展示了同类型超表面传感器在折射率传感灵敏度与范围、温度传感、气体传感等多功能传感性能参数对比。从表 1 可以看出, 该结构实现了多功能性传感, 且所提出的超表面综合性能参数高于同类别的超表面传感器。

表 1　同类型超表面传感器仿真性能对比

Tab. 1　Simulation performance comparison of metasurface sensors of the same type

材料	n范围	共振峰位置(nm)	S_n(nm/RIU)	T范围	S_T	Q_{max}	FOM_{max}	偏振可调	参考文献
Si/SiO_2	1.33~1.40	1 023.65, 1 095.52,	232	5~50K	63 pm/K	2.6×10^4	3 980	Yes	[14]
Si/Si_3N_4	1.33~1.40	2 409.3, 2 667.0	746	0~100 °C	54 pm/ °C	54 757	18 650	None	[16]
$LiNbO_3/SiO_2$	1.0~1.40	1 230.19	241	None	None	10^5	3×10^5	None	[19]
TiO_2/SiO_2	1.31~1.35	936, 1 013, 1 010, 1 052	288	None	None	6 900	888	Yes	[20]
Si/SiO_2	1.0~1.08	1 038.75, 1 168.44	325	None	None	34 176	10 156	None	[27]
Si/SiO_2	1.0~2.0	1 617	363.5	20~80 °C	51.96 pm/ °C	1.6×10^5	36 350	Yes	**This work**

5 器件制备与实验测试

本文所设计结构仅由两层材料构成，其制备工艺流程只需单次曝光、刻蚀便可完成。超表面芯片整体工艺制备流程图如图 10(a)(彩图见期刊电子版)所示。

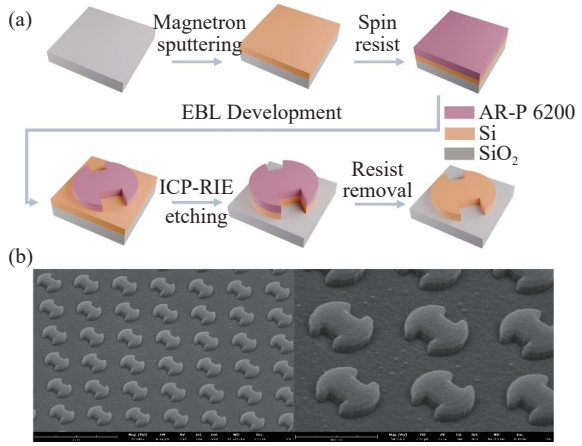


图 10 (a) 超表面工艺流程图及 (b) 制备超表面芯片的 SEM 图像

Fig. 10 (a) Process flow chart and SEM images of the fabricated metasurfaces

本文选用厚度为 1 mm 的石英晶圆片作为初始样片，并使用丙酮、异丙醇(IPA)、去离子水对石英片各超声 5 min 并用氮气吹干以除去附着在基底表面上的灰尘、细小颗粒等。使用磁控溅射仪完成 200 nm 非晶硅薄膜的沉积。使用椭偏仪测量薄膜厚度保证硅膜符合设计要求。在电子束曝光阶段选用 AR-PC 6200 光刻胶作为图案转移的掩模。控制转速为 1 000 rpm，旋转时间为 60 s 以实现 400 nm 的电子束光刻胶厚度。匀胶完成后，需用热板以 150 °C 烘烤样品 90 s，以去除光刻胶中的有机溶剂并增强基底附着效果。当样品不导电时，电子会发生聚集。因此，还需增涂 70 nm 厚度的 AR-PC5094.02 电子束曝光导电胶作为导电涂层。用热板以 90 °C 烘烤 120 s 坚固光刻胶后，对样品进行电子束曝光与显影操作。需要注意的是，显影操作中需先用去离子水冲洗覆盖在样品表面的导电胶，再将样片放置在显影液(乙酸戊酯)中动态显影 105 s。对于 Si 的干法刻蚀工艺，可选用 SF_6 和 CHF_3 作为主要刻蚀气体完成 ICP-RIE 刻蚀过程。SF_6 活性较高，与 Si 极易反应。CHF3 可提供 CF_2 作为聚合物沉积保护侧壁，从而形成比较垂直的侧壁。综合刻蚀选择比与刻蚀速率，最终刻蚀实验的气体配方为：腔压 8 mt; SF_6 气体流量 12 SCCM、CHF_3 气体流量为 68 SCCM；源功率与偏压功率分别为 150 W、50 W；刻蚀速率为 100 nm/min。最后，采用氧气等离子体去胶技术对刻蚀剩余的光刻胶进行去除。图 10(b)(彩图见期刊电子版)展示了不同标尺下本文所设计的超表面芯片 SEM 图像。最终制备的 0.95 mm×0.95 mm 超表面芯片特征线宽满足设计要求，可用于后续实验测试

使用精密天平对分析标准品(氯化钠、蔗糖等)称重后配置出不同浓度的待测溶液。每种溶液经 Easy Brix 折光率仪测量 5 次后取平均值作为折射率标准值，不同溶液与其折射率的对应关系如表 2 所示。对于液体测试，需对超表面芯片进行液体流道粘合处理以搭建液体测试平台。超表面上表面需要粘合两片定制的石英玻璃片以便液体的注入与流出。当样品沿注射器缓慢流入流道层时，光谱仪记录的透射光谱会发生相应的红移或者蓝移。待谱线稳定后，每种样品需要重复测量 3 次并记录共振峰中心波后计算平均值以该值作为最终响应位置。在每次测量完成后，需要用去离子水反复对流道进行冲洗以保证样品表面洁净度。

表 2 实验测试中使用的不同类型待测溶液及其折射率标准值

Tab. 2 The different types of test solutions used in the experimental tests and their standard refractive index values

Solute type	Deionized water	Anhydrous ethanol	50% Ethanol	6% Sucrose	10% Sucrose	20% Sucrose	5% NaCl	10% NaCl	20% NaCl
n	1.33	1.361 8	1.358 4	1.345 2	1.353 2	1.372 7	1.337 7	1.348 7	1.370 7

图 11 展示了圆盘双缺口型超表面对不同折射率溶液的近红外光谱响应曲线，该曲线经过基线矫正与平滑处理。可见，随着折射率的增大，谐振峰的中心位置会发生红移。根据液体折射率与实际测试光谱位置的线性拟合曲线，可求得所制备的超表面实际折射率传感灵敏度为

268.76 nm/RIU。此外, 圆盘双缺口型超表面在背景物质为去离子水下的谐振峰实际的调制深度为 54%、Q 值为 280.4、FOM 为 57.6 RIU^{-1}。本文也对该结构的偏振光谱响应进行了验证, 即通过控制两个偏振片的旋转角度测试了超表面对不同偏振角度光源的透射光谱的动态可调特性。图 11 显示, 随着偏振夹角 Φ 由 0°增至 90°, 圆盘双缺口结构的透射峰幅度呈现规律性调制, 而谐振波长位置保持稳定, 未见显著漂移, 该现象与数值仿真结果相吻合。值得注意的是, 当 Φ=0°(x 偏振)与 Φ=90°(y 偏振)时, 光谱曲线几乎重合, 这表明该结构对 x 与 y 偏振入射光有着相同的光谱响应。可见, 该结构具有偏振型光开关应用潜能。

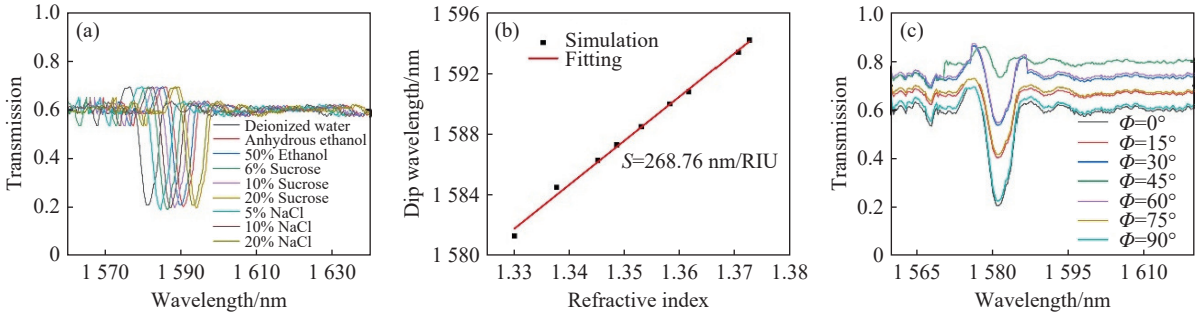


图 11　折射率传感及偏振敏感实验结果

Fig. 11　Experimental results of refractive index sensing and polarization sensitivity

6　结　论

本文通过理论分析和实验测试的方法对由倾斜双缺口硅圆盘组成的全介质超表面进行了研究。仿真结果表明, 通过缩小其中一个缺口的面积可将对称保护性的连续域束缚态(BIC)转变为准连续域束缚态(Q-BIC)。从而可以在 1617 nm 处激发出一个超窄线宽、超高 Q 因子的 Fano 共振峰。经多极子分解与电磁场分析可得, 该谐振峰的主导极子为 MD 极子。通过分析超表面几何参数与透射光谱之间的依赖关系发现, 硅圆盘对透射光谱的影响较为明显, 且该器件可实现折射率与温度的双参数传感。最后, 对该超表面传感器进行了制备。该超表面的折射率传感灵敏度为 268.76 nm/RIU。此外, 该结构具有一定的偏振可调性, 其在 x 和 y 偏振光下的入射光谱基本一致。当偏振角度为 45°时, 谐振峰会消失不见, 即可以通过改变光路的偏振态控制谐振峰的消失与产生。本文所提出的超表面解决了传统单参数检测的局限性, 显著扩展了超表面器件的应用维度, 可实现多参量、高 Q 值的多功能传感系统检测。

参考文献:

[1] SI L M, SHEN Q T, DONG L, *et al*.. Crosstalk-free spin-selective metasurface for full-space wavefront manipulation with nearly 100% efficiency[J]. *Advanced Optical Materials*, 2026, 14(9): 2501041.

[2] NIU L, FENG X, ZHANG X Q, *et al*.. Photonic terahertz phased array via selective excitation of nonlinear Pancharatnam-Berry elements[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 8159.

[3] ZHU R CH, WANG J F, DING CH, *et al*.. Multi-field-sensing metasurface with robust self-adaptive reconfigurability[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(7): 1337-1345.

[4] HU SH G, LI M Y, XU J W, *et al*.. Electromagnetic metamaterial agent[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 12.

[5] HE CH SH, ZHAO L, ZHANG SH, *et al*.. Intrinsic topological hinge states induced by boundary gauge fields in photonic metamaterials[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 19.

[6] HUANG Y J, XIE X, PU M B, *et al*.. Dual-functional metasurface toward giant linear and circular dichroism[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(11): 1902061.

[7] JIANG J Y, CAO Y, ZHOU X, *et al*.. Colloidal self-assembly based ultrathin metasurface for perfect absorption across

the entire visible spectrum[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(8): 1581-1590.

[8] WANG P L, LOU J, YU Y, *et al*.. An ultra-sensitive metasurface biosensor for instant cancer detection based on terahertz spectra[J]. *Nano Research*, 2023, 16(5): 7304-7311.

[9] LV SH Q, TUERSUN P, LI SH Y, *et al*.. Refractive index sensing properties of metal-dielectric yurt tetramer metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(20): 1570.

[10] YEUNG C, TSAI R, PHAM B, *et al*.. Global inverse design across multiple photonic structure classes using generative deep learning[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(20): 2100548.

[11] LENG B R, ZHANG Y, TSAI D P, *et al*.. Meta-device: advanced manufacturing[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(1): 117-132.

[12] MUHAMMAD N, SU ZH X, JIANG Q, *et al*.. Radiationless optical modes in metasurfaces: recent progress and applications[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 192.

[13] WANG T T, FANG W J, GUO H Y, *et al*.. High Q-factor Fano resonances based on an all-dielectric metasurface for high-performance refractive index sensing[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(24): 6322-6330.

[14] YIN Y X, FAN X Y, FANG W J, *et al*.. Double-parameter analysis of an asymmetric herringbone temperature and refractive index sensor based on all-dielectric metasurface[J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 28552-28569.

[15] TANG X, HE R, CHEN CH, *et al*.. Quasi-bound states in the continuum in a metal nanograting metasurface for a high figure-of-merit refractive index sensor[J]. *Optics Express*, 2024, 32(1): 762-773.

[16] GUO L H, ZHANG Z X, XIE Q, *et al*.. Toroidal dipole bound states in the continuum in all-dielectric metasurface for high-performance refractive index and temperature sensing[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 615: 156408.

[17] HSIAO H H, HSU Y C, LIU A Y, *et al*.. Ultrasensitive refractive index sensing based on the quasi-bound states in the continuum of all-dielectric metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(19): 2200812.

[18] WANG D D, FAN X Y, FANG W J, *et al*.. High-performance all-dielectric metasurface for quadruple Fano resonance-induced biosensing applications in the near-infrared range[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(8): 12286-12295.

[19] HONG W, LIU S Y, SUI X B, *et al*.. Ultra-sensitive refractive index sensor based on quasi-BIC formed in rectangular-split solid-ring metasurface with thin film lithium niobate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 175: 110776.

[20] GUO H Y, FANG W J, PANG J L, *et al*.. Multiple Fano resonances based on all-dielectric metastructure for refractive index sensing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 139: 105284.

[21] PRUCHA E J. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. San Diego: Academic Press, 1998.

[22] SADRIEVA Z, FRIZYUK K, PETROV M, *et al*.. Multipolar origin of bound states in the continuum[J]. *Physical Review B*, 2019, 100(11): 115303.

[23] WANG T Y, LIU S Q, ZHANG J H, *et al*.. Highly sensitive polarization-tunable Fano resonant metasurface excited by BICs for refractive index detection[J]. *Results in Physics*, 2024, 58: 107451.

[24] 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.

[25] ZHOU CH B, LI SH Y, WANG Y, *et al*.. Multiple toroidal dipole Fano resonances of asymmetric dielectric nanohole arrays[J]. *Physical Review B*, 2019, 100(19): 195306.

[26] CAO SH SH, FAN X Y, FANG W J, *et al*.. Multi-function sensing applications based on high Q-factor multi-Fano resonances in an all-dielectric metastructure[J]. *Biomedical Optics Express*, 2024, 15(4): 2406-2418.

[27] XIAO W X, FAN X Y, WANG Y L, *et al*.. High-Q Fano resonance metasurface sensor for refractive index and methane gas concentration measurement[J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131187.

作者简介：



谭　鑫 (1980—)，男，吉林长春人，博士，研究员，博士生导师，2008 年于中国科学技术大学获得博士学位，主要从事先进光谱技术及装备开发与应用方面研究。E-mail: xintan_grating@163.com