

激光与光电子学进展

基于全介质超表面高 Q 的双带太赫兹传感器

赵静¹, 王加贤^{1*}, 赖丽萍¹, 苏倩倩¹, 邱伟彬², 卓立强²

¹厦门工学院计算机科学与信息工程学院, 福建 厦门 361021;

²华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 设计了一种由连续域束缚态控制的高灵敏度太赫兹折射率传感器。该传感器由全介质光栅构成, 通过平移打破结构的对称性, 可以将共振转变为高品质因子 (Q 因子) 泄漏模共振, 且线宽极窄腔模式对周围介质的折射率变化非常敏感。利用有限元方法, 数值模拟了具有不同非对称参数、光栅厚度、光栅宽度以及折射率分析物的透射光谱。结果表明, 该光栅超表面的 Q 因子达到 12620, 标准灵敏度为 31395 nm/RIU, FOM (Figure of merit) 为 1000, 在太赫兹范围内的高灵敏光子传感器领域具有潜在的应用。

关键词 探测器; 太赫兹; 传感器; 全介质超表面; 连续域束缚态

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1304004

High- Q Dual-Band Terahertz Sensor Based on All-Dielectric Metasurface

Zhao Jing¹, Wang Jiaxian^{1*}, Lai Liping¹, Su Qianqian¹, Qiu Weibin², Zhuo Liqiang²

¹Computer Science and Information Engineering School, Xiamen Institute of Technology,
Xiamen 361021, Fujian, China;

²College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China

Abstract A high-sensitivity terahertz refractive index sensor controlled by the continuum bound state is designed in this paper. The sensor is composed of all-dielectric grating. By breaking the symmetry of the structure by translation, and the resonance can be transformed into a leakage mode resonance with a high quality factor (Q factor), and the extremely narrow linewidth cavity mode is very sensitive to the change of the refractive index of the surrounding medium. Using the finite element method, the transmission spectra with different asymmetry parameters, grating thickness, grating width, and refractive index of analytes are numerically simulated. The results show that the Q factor of the grating metasurface reaches 12620, the standard sensitivity is 31395 nm/RIU, and the FOM (Figure of merit) is 1000. The structure has potential applications in the field of highly sensitive photon sensors in the terahertz range.

Key words detectors; terahertz; sensors; all-dielectric metasurface; bound state in the continuum

1 引言

近年来,太赫兹 (THz) 技术在生物医学诊断、安检、无线通信等诸多领域取得了巨大成就^[1-4]。无损成像和无标记传感技术在非导电材料中具有渗透性强、光子能量低以及生物分子光谱指纹的独特特性^[5-9],是太赫兹技术中最重要和最具应用前景的技术。在太赫兹区域,大多数分子由于其旋转和振动跃迁表现出强烈的吸收和色散,这些跃迁表现为分子特异性光谱指纹,使分子检测和重组成为可能。利用太赫兹光谱分

析技术可以很容易地检测出一些化学物质,如违禁药物^[10]、抗生素^[11]、农药^[12]、氨基酸^[13]、转基因生物^[14]、三聚氰胺^[15],但太赫兹技术有限的灵敏度限制和阻碍了其进一步应用。

超材料是人工构建的电磁结构,具有独特的电磁响应,如负折射率、负磁导率和负介电常数^[10, 16-17]。基于全介电超材料结构的太赫兹传感器因其固有的低损耗和高 FOM (Figure of merit) 值表现出高灵敏度^[18-19]。全介电超材料中电磁场的强限制增强了光与物质之间的相互作用,使对分析物的灵敏检测成为可能,被广泛

收稿日期: 2021-10-11; 修回日期: 2021-11-11; 录用日期: 2021-11-19

基金项目: 福建省中青年教育科研项目 (JAT210562)、厦门工学院嵌入式人工智能计算及应用科研创新团队 (KYTD202003)

通信作者: *wangjx@hqu.edu.cn

用于超灵敏传感器的研究中。Xie 等^[20]提出了一种基于四条型金结构的超材料传感器,其灵敏度为 48011 nm/RIU(RIU 为折射率单位),FOM 为 75,品质因子(Q 因子)为 85。旷依琴等^[21]提出了一种工字形椭圆金纳米的超材料生物传感器,其灵敏度为 425 nm/RIU,FOM 为 14。Zhong 等^[22]提出了硅基光栅结构的超材料传感器,其灵敏度为 16042 nm/RIU,FOM 为 533。为了得到更高 Q 的共振,许多超表面设计中引入了连续域束缚态(BIC)的概念^[23-24]。BIC 是指在连续域中仍然能保持局部性的状态,可以用相消干涉来解释。当连续调整系统参数时,BIC 共振模式与所有辐射波的耦合消失,从而具有无限长的寿命,这表明 Q 因子无限高。如果耦合常数的消失是由对称性导致的,则这种 BIC 也被称为对称保护 BIC。理想 BIC 只存在于无损无限结构中,且表现出无限的 Q 因子和消失的共振线宽。实际中可通过破坏对称性产生泄漏共振使 BIC 变为准 BIC,但此时的 Q 因子和谐振线宽都会受到限制。

本文提出了一种基于全介质光栅的超灵敏 THz 传感器,该传感器在 THz 光谱范围内由 BIC 控制。通过控制非对称参数,共振可以从对称保护的 BIC 转变为具有超高 Q 因子的准 BIC。仿真结果表明,该折射率传感结构的灵敏度可以达到 31395 nm/RIU,FOM 高达 1000。该超表面提供了一种在太赫兹频率范围内实现超灵敏传感的有效方法。

2 结构设计

图 1 为 THz 非对称全介质超光栅表面传感单元的结构示意图。该传感器是将高折射率的硅(折射率 $n_g = 3.45$)沉积在玻璃基板(折射率 $n_s = 1.92$)上得到的。其中,光栅的高度为 H ,宽度为 W ^[25]。光栅单元结构由三个条形硅组成,条形硅 1 和条形硅 3 之间的间隙为 g ,条形硅 1 和条形硅 2 之间的间隙为 g_1 ,条形硅 2

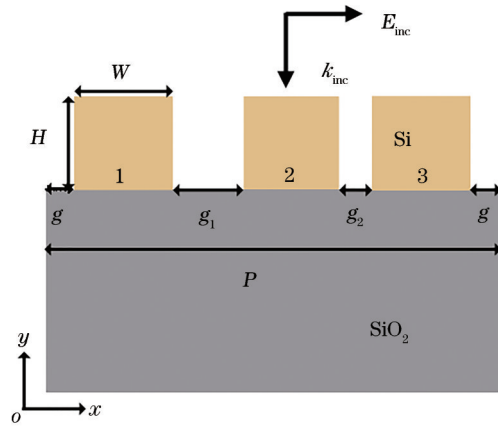


图 1 传感器单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor unit structure

和条形硅 3 之间的间隙为 g_2 ,光栅周期 $P = 2g + g_1 + g_2 + W$,非对称参数 $a = g_1 - g_2$:当 $a = 0 \mu\text{m}$,即 $g_1 = g_2 = 2g$ 时,传感器为对称结构;当 $a \neq 0$ 时,表示引入了对称破坏,结构单元中的条形硅沿 $+x$ 轴移动,偏移原点中心。用有限元方法对该传感器单元的电磁特性以及介电超表面的光谱响应进行数值模拟,其中,Floquet 周期边界条件应用于 y 方向,入射场为 x 极化平面波,沿 z 轴传播。

3 结果分析与讨论

当光栅厚度 $H = 80 \mu\text{m}$,宽度 $W = 80 \mu\text{m}$,周期 $P = 400 \mu\text{m}$,对称参数 a 从 $0 \mu\text{m}$ 增加到 $20 \mu\text{m}$ 时,超表面结构的透射光谱如图 2(a) 所示。可以发现:当超表面结构为对称结构时,在透射光谱中无法观察到共振;随着对称破坏的引入,透射光谱中出现了两个共振峰,当 $a = 5 \mu\text{m}$ 时,两个共振峰分别位于 0.757 THz 和 0.759 THz ,分别对应模式 A 和模式 B,两个模式的电场分布分别如图 2(b) 和图 2(c) 所示。模式 A 随着非对称参数的增加略微向低频移动,而模式 B 随着非对称参数

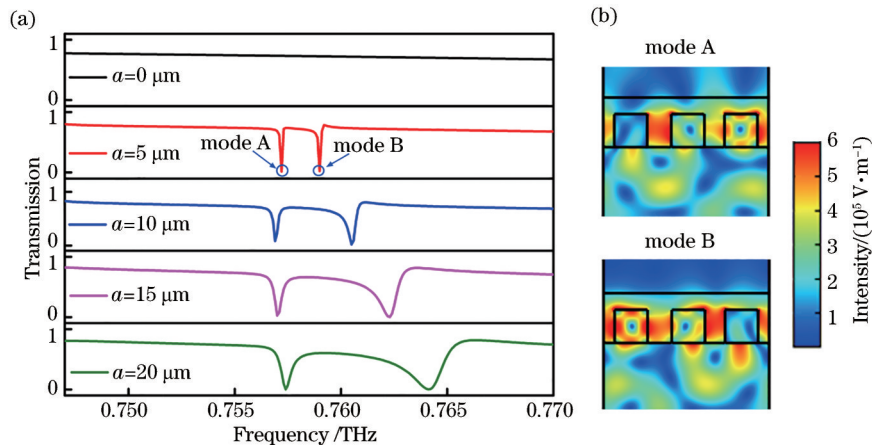


图 2 超表面的谐振性能分析。(a) 不同非对称参数下的超表面透射光谱;(b) 模式 A 和模式 B 的电场图

Fig. 2 Analysis of the metasurface resonance performance. (a) Transmission spectra of metasurface under different asymmetric parameters; (b) electric field distribution of mode A and mode B

的增加逐渐向高频移动,但两者的线宽都变得更宽。当 $a=0\ \mu\text{m}$ 时,这两个共振消失,即从束缚态到自由空间没有能量泄漏,验证了对称保护 BIC 的存在^[23]。继续增加 a 会破坏超表面结构的面内对称性并将对称保护的 BIC 转换为非 BIC,从而出现了两个具有极小线宽的共振。这两种共振源自阵列支持的离散状态与连续自由空间辐射之间的相消干涉^[26]。从两个 BIC 模式的电场可以看到电场被限制在超表面缝隙中,导致超表面对微小的折射率变化比较敏感。Q 因子可反映传感器光学谐振的性质,其值越大,表明谐振系统的损耗越小,谐振峰越窄,越容易探测被传感物的光谱变化。Q 因子^[27]可表示为

$$Q = f_0 / X_{\text{FWHM}}, \quad (1)$$

式中, f_0 为共振频率, X_{FWHM} 为半峰全宽(FWHM)。

灵敏度 S 是衡量传感器性能的一个重要指标,定义为折射率每变化一个单位谐振频率的移动量,其单位为 THz/RIU ^[22],可表示为

$$S = \Delta f / \Delta n, \quad (2)$$

式中, Δf 为谐振峰频率的变化量, Δn 为折射率变化量,单位为 RIU 。谐振的标准灵敏度^[22]可表示为

$$S = \left| \frac{d\lambda}{dn} \right| = \frac{c}{f_0^2} \times \frac{df}{dn}, \quad (3)$$

式中, c 为真空中的光速, f_0 为谐振频率, n 为分析物的折射率。灵敏度 S 越高,越容易探测出传感器周围介电性质的微小变化。

传感器的 FOM 能表征传感器的整体性能,其值越高,表明传感器的整体性能越好。FOM 为单位折射率变化引起的谐振峰波长平移量与谐振峰 FWHM 的比值^[22],可表示为

$$X_{\text{FOM}} = \frac{S}{X_{\text{FWHM}}} = \frac{1}{f_0} \times \frac{df}{dn} \times Q. \quad (4)$$

为了实现高 FOM 的太赫兹传感器,需要同时提高灵敏度和品质因子。而灵敏度与 FOM 之间存在相互制约的问题,即高灵敏度的传感器需要更多的光场从器件中泄漏到空间中,且需要同时提高器件对泄漏模光场的束缚能力,才能获得高品质因子。因此,具有对称结构的光栅通常难以实现高 FOM 的光学传感器^[28-29]。

对于设计的非对称超表面结构,计算不同非对称参数 a 下模式 A 和模式 B 对应的 Q 因子,结果如图 3 所示。可以发现, Q 因子与非对称参数遵循二次反定律,即 $Q = Q_0/a^2$ 。其中, Q_0 为一个常数,由与 a 无关的超表面决定^[23, 30]。 a 的值越接近 $0\ \mu\text{m}$, 模式 A 和模式 B 的 Q 因子会增加到超高值 12620,且在 $g = 0\ \mu\text{m}$ 时变得无穷大。

由于高 Q 因子的共振是通过周期性光栅结构干涉激发的,改变光栅的结构会导致共振频率发生偏移:当光栅厚度 H 增加时,谐振频率会发生红移,如图 4(a) 所示;当光栅宽度 W 增加时,谐振频率也会发

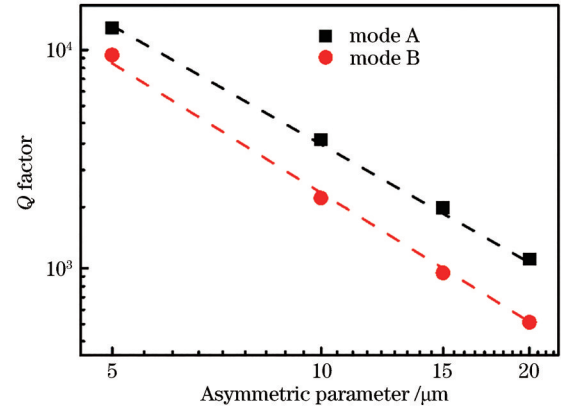


图 3 Q 因子随非对称参数的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of Q factor with asymmetric parameter

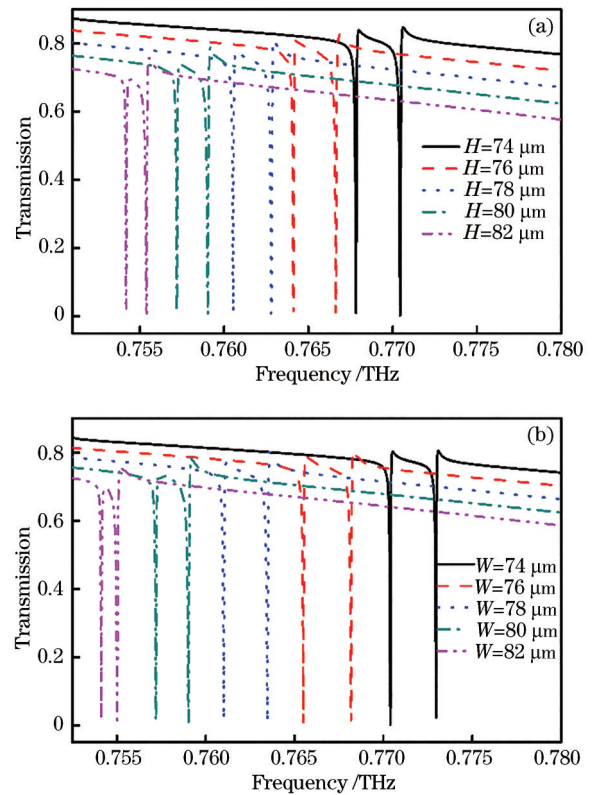


图 4 光栅几何参数对透射光谱的影响。(a)不同光栅厚度透射光谱;(b)不同光栅宽度透射光谱

Fig. 4 Influence of grating geometry parameters on transmission spectra. (a) Transmission spectra with different grating thicknesses; (b) transmission spectra with different grating widths

生明显红移,如图 4(b) 所示。因此,可通过改变结构参数任意调整谐振频率。

将厚度为 $120\ \mu\text{m}$ 的分析物涂覆在光栅表面,光栅厚度 $H=80\ \mu\text{m}$, 宽度 $W=80\ \mu\text{m}$, 周期 $P=400\ \mu\text{m}$, 非对称参数 $a=5\ \mu\text{m}$, 得到超表面周围介电特性对其透射光谱的影响如图 5(a) 所示。可以发现,当分析物的折射率以 0.05 为步长从 1.0 增加到 1.2 时,两个谐振峰均往低频移动,模式 A 和模式 B 都发生红移现象。

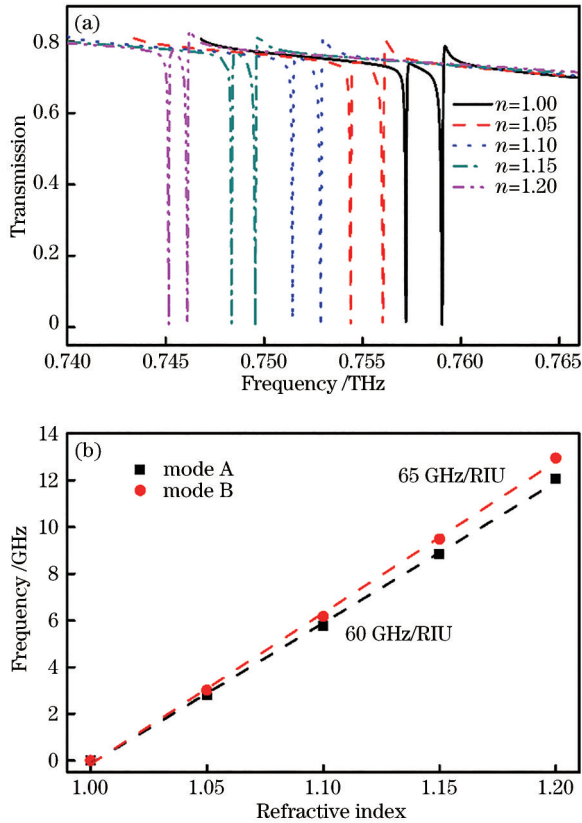


图 5 超表面周围介电特性对其透射光谱的影响。(a)不同折射率下的透射光谱;(b)不同折射率下模式 A 和模式 B 的谐振频率偏移量

Fig. 5 Influence of the surrounding dielectric properties of the metasurface on transmission spectrum. (a) Transmission spectra at different refractive indices; (b) resonant frequency shifts of mode A and mode B under different refractive indices

图 5(b)为模式 A 和模式 B 在不同折射率下的谐振频率偏移量。计算结果表明:模式 A 的灵敏度为 60 GHz/RIU, 谐振的标准灵敏度为 31394 nm/RIU, FOM 为 1000;模式 B 的灵敏度为 65 GHz/RIU, 谐振的标准灵敏度为 33847 nm/RIU, FOM 为 813。

4 结 论

提出了一种基于全介质超表面高 Q 双带太赫兹传感器。该传感器是由高折射率硅组成的光栅结构,通过平移条形光栅,打破结构平面内的对称性,在 0.74~0.78 THz 频段内可以产生两个谐振峰值,对应于两个准 BIC 模式,且两个准 BIC 模式随光栅厚度和宽度的增加均会发生红移现象。因此,可通过修改结构参数选择不同频段的共振来调整共振频率和 Q 因子。计算结果表明,该传感器的 Q 因子可达 12620,灵敏度为 31394 nm/RIU, FOM 为 1000,在折射率传感应用中具有显著优势,对传感太赫兹范围内的其他生物分子也具有重要意义。相比之前报道的非对称超表面结构,实验设计的非对称超表面是通过平面内移动结构实现

的,在一定程度上降低了器件制造的复杂性。

参 考 文 献

- [1] Pawar A Y, Sonawane D D, Erande K B, et al. Terahertz technology and its applications[J]. Drug Invention Today, 2013, 5(2): 157-163.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] Silalahi H M, Chen Y P, Shih Y H, et al. Floating terahertz metamaterials with extremely large refractive index sensitivities[J]. Photonics Research, 2021, 9(10): 1970-1978.
- [4] Xiao J Y, Xiao R W, Zhang R X, et al. Tunable terahertz absorber based on transparent and flexible metamaterial[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(9): 092403.
- [5] Ho L, Pepper M, Taday P. Signatures and fingerprints [J]. Nature Photonics, 2008, 2(9): 541-543.
- [6] Beruete M, Jáuregui-López I. Terahertz sensing based on metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(3): 1900721.
- [7] Shi X, Han Z. Enhanced terahertz fingerprint detection with ultrahigh sensitivity using the cavity defect modes [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 13147.
- [8] Pickwell E, Wallace V P. Biomedical applications of terahertz technology[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(17): R301-R310.
- [9] Xu W D, Xie L J, Ying Y B. Mechanisms and applications of terahertz metamaterial sensing: a review [J]. Nanoscale, 2017, 9(37): 13864-13878.
- [10] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [11] Qin J Y, Xie L J, Ying Y B. Feasibility of terahertz time-domain spectroscopy to detect tetracyclines hydrochloride in infant milk powder[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(23): 11750-11757.
- [12] Maeng I, Baek S H, Kim H Y, et al. Feasibility of using terahertz spectroscopy to detect seven different pesticides in wheat flour[J]. Journal of Food Protection, 2014, 77(12): 2081-2087.
- [13] Ueno Y, Rungsawang R, Tomita I, et al. Quantitative measurements of amino acids by terahertz time-domain transmission spectroscopy[J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(15): 5424-5428.
- [14] Liu J J, Li Z, Hu F R, et al. Identification of GMOs by terahertz spectroscopy and ALAP-SVM[J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(3): 685-695.
- [15] Baek S H, Lim H B, Chun H S. Detection of melamine in foods using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(24): 5403-5407.
- [16] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature, 2006, 444(7119): 597-600.

- [17] Wang W, Yan F P, Tan S Y, et al. Enhancing sensing capacity of terahertz metamaterial absorbers with a surface-relief design[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(4): 519-527.
- [18] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(1): 23-36.
- [19] He X Y, Liu F, Lin F T, et al. Investigation of terahertz all-dielectric metamaterials[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13831-13844.
- [20] Xie Q, Dong G X, Wang B X, et al. High-Q Fano resonance in terahertz frequency based on an asymmetric metamaterial resonator[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2018, 13(1): 294.
- [21] 旷依琴, 李刚, 闫竹青, 等. 工字形椭圆纳米结构的吸收及其折射率敏感特性研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1424001.
Kuang Y Q, Li G, Yan Z Q, et al. Absorption and refractive index sensitivity of the I-shaped elliptical nanostructures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1424001.
- [22] Zhong Y J, Du L H, Liu Q, et al. All-silicon terahertz metasurface with sharp Fano resonance and its sensing applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 4600210.
- [23] 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.
- [24] 柴若衡, 刘文玮, 程化, 等. 人工光学微纳结构中的连续体束缚态:原理、发展及应用[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0123001.
Chai R H, Liu W W, Cheng H, et al. Bound states of continuum in optical artificial micro-nanostructures: fundamentals, developments and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0123001.
- [25] Zhong Y J, Du L H, Liu Q, et al. Ultrasensitive specific sensor based on all-dielectric metasurfaces in the terahertz range[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(55): 33018-33025.
- [26] Wang X F, Li S Y, Zhou C B. Polarization-independent toroidal dipole resonances driven by symmetry-protected BIC in ultraviolet region[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11983-11989.
- [27] Mesli S, Yala H, Hamidi M, et al. High performance for refractive index sensors via symmetry-protected guided mode resonance[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21199-21211.
- [28] Zhou Y, Li X S, Li S, et al. Symmetric guided-mode resonance sensors in aqueous media with ultrahigh figure of merit[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 34788-34802.
- [29] Hu J H, Liu X H, Zhao J J, et al. Investigation of Fano resonance in compound resonant waveguide gratings for optical sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 30502-30505.
- [30] Li S Y, Zhou C B, Liu T T, et al. Symmetry-protected bound states in the continuum supported by all-dielectric metasurfaces[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 063803.