

基于全介质缺陷纳米四聚体超结构的高灵敏度折射率传感器

孙庆贺¹, 范鑫烨^{1,2,3,4}, 房文敬^{1,3,4}, 曹爽爽¹, 王丹丹¹, 牛慧娟^{1,3,4}, 陶继方⁵

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;
3. 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城, 252059; 4. 聊城工业互联网研究与应用重点实验室,
山东 聊城 252059; 5. 山东大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛, 266237)

摘要 本文提出并研究了一种具有高灵敏度的全介质纳米四聚体超结构。该结构由位于 SiO_2 衬底上的缺陷型圆柱周期性阵列排布而成。利用时域有限差分(FDTD)方法对非对称全介质超结构的透射谱和电磁场分布进行了数值分析。基于连续体中的束缚态(BIC)理论, 通过引入了平面内圆柱型缺陷来打破对称性, 在近红外波段激发了多重 Fano 共振, 最大 Q 因子达到 1 277, 调制深度接近 100%。结合电磁场分布特性, 分析了五个 Fano 共振峰的共振模式, 分别为 TD(环形偶极子)、MQ(磁四极子)、MD(磁偶极子)、MDs 和 TD。仿真结果表明, 该结构具有良好的传感性能, 灵敏度为 826 nm/RIU, 品质因数(FOM)达到 898 RIU^{-1} 。所提出的结构由于其高灵敏度和高 Q 因子, 因此可广泛应用于环境传感、生物传感和非线性光学等领域。

关键词 全介质; 超结构; 高灵敏度; 基于连续体中的束缚态

中图分类号 TN256

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Highly Sensitive Refractive Index Sensor Based on All-Dielectric Defective Nanotetramer Metastucture

SUN Qinghe¹, FAN Xinye^{1,2,3,4}, FANG Wenjing^{1,3,4}, CAO Shuangshuang¹,
WANG Dandan¹, NIU Huijuan^{1,3,4}, TAO Jifang⁵

(1. School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng 252059, China; 4. Liaocheng Key Laboratory of Industrial-Internet Research and Application, Liaocheng 252059, China; 5. School of Information Science and Engineering (ISE), Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract In this paper, an all-dielectric nanotetramer metastructure with high sensitivity is proposed and

收稿日期: 2024-02-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3210700); 山东省自然科学基金项目(ZR2021MF053, ZR2021MF070, ZR2022MF305); 山东省 2021 年高校青年学者引进与教育计划和 IPOC 开放基金(IPOC2019A009, IPOC2021B07); 聊城大学博士科研基金(318052168)资助

通讯作者: 范鑫烨, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 新一代信息技术, E-mail: fanxinye@yeah.net。

investigated. The structure consists of a periodic array of defective cylinders located on a SiO_2 substrate. The transmission spectrum and electromagnetic field distribution of the asymmetric all-dielectric metastructure are numerically analyzed by using the finite-difference time-domain (FDTD) method. Based on the bound states in continuum (BIC) theory, the symmetry is broken by introducing in-plane cylindrical defects, and multiple Fano resonances are excited in the near-infrared range with a maximum Q-factor of 1 277 and a modulation depth close to 100%. Combined with the electromagnetic field distribution characteristics, the resonance modes of the five Fano resonance peaks are analyzed, which are TD (toroidal dipole), MQ (magnetic quadrupole), MD (magnetic dipole), MDs, and TD. Simulation results show that the structure has good sensing performance with a sensitivity of 826 nm/RIU and the Figure of merit (FOM) of 898 RIU⁻¹. The proposed structure can be widely used in environmental sensing, biological sensing and nonlinear optics due to its high sensitivity and high Q-factor.

Key words all-dielectric; metastructure; high sensitivity; bound states in the continuum

0 引言

社会的进步和科技的飞速发展为人们带来了便捷的生活,与此同时,环境问题也变得日渐严重。因此,开发一种能够实时对环境因素进行准确检测的检测仪是极其重要的。超结构^[1]不仅具备出色的电磁场调控能力,而且制造过程简便、设计灵活、体积小、便于携带和安装等,受到研究人员的广泛关注。它可以用于实时检测周围环境因素,为环境监测和传感提供了新的解决方案。通过调整超结构的材料和结构参数,可以实现对特定环境参数的高度灵敏检测。在超结构中,具有窄带宽和显著的近场增强的 Fano 共振被广泛应用于非线性光学、光学开关和环境传感等领域。Fano 共振是量子系统和非线性光学系统中常见的共振效应,在透射光谱中表现为一种不对称的谱线。Fano 共振通常归因于连续和离散状态之间或明模式和暗模式之间的干涉,是实现高灵敏度折射率传感器的有效方法。Q 因子是评估 Fano 共振性能的关键参数。目前,具有高 Q 因子的 Fano 共振已广泛应用于光学领域。但基于金属的等离子体纳米结构^[2],如自由电子振荡,会导致大的欧姆损耗,从而导致宽的共振谱线。这阻碍了高 Q 因子的实现,限制了制造的光学器件的性能。相比之下,锗、砷化镓和硅等高折射率的全介质超结构可以降低欧姆损耗,并且光场主要局限在器件内部,这有利于增强光与材料内部物质的相互作用。此外,它可以更好地与 CMOS 系统兼容,具有更低的制造成本,并且有望实现大规模集成生产。特别是,基于不对称性的全介质超结构是实现具有窄线宽和高调制深度的 Fano 共振的一种重要方法^[3]。例如, Li 等人提出了一种全介质超结构,通过改变半圆半径的大小来打破对称性,其灵敏度达到了 300 nm/RIU^[4]。Song 等人提出了一种具有两个空心矩形的全介质超结构,以实现超窄带 Fano 共振,灵敏度为 160 nm/RIU^[5]。

基于全介质超结构中连续体中的束缚态(BIC),是实现高灵敏度 Fano 共振的一种有效方法^[6-8]。理想的 BIC 只存在于理想的无损无限结构中,可以认为它具有零泄漏、零线宽共振和无限 Q 因子。当模态的空间对称性与外部辐射波的空间对称性不一致时,导致该模式无法与外部辐射耦合,这种 BIC 称为对称保护的 BIC。我们可以打破对称性,例如具有不同折射率的材料平面中的不对称分布、光源的斜入射,或在结构中引入对称性破坏^[9-12],导致从对称保护的 BIC 转换为具有高 Q 因子和窄共振线宽的准 BIC。在全介质超结构中,利用低自由空间耦合,可以得到具有高 Q 因子的 Fano 共振^[13-17]。随着传感技术的发展,超结构中 Fano 共振的激发已经从单个 Fano 共振发展到多个 Fano 共振,多 Fano 共振在多个领域展现出广阔的应用前景。但目前大多数研究在探索 Fano 共振时,对激发三个及以上的 Fano 共振尚缺乏深入的研究和比较,且在灵敏度等性能提升方面还有待加强。

本文提出一种全介质超结构,该结构周期性地排列在 SiO_2 衬底上,一个单元由四个圆柱体组成,刻有圆柱形缺陷。全介质圆柱型纳米四聚体超结构的设计旨在实现多个 Fano 共振,最大 Q 因子达到 1 277。结构对称时,可以得到两个 Fano 共振峰,当打破结构对称性时,研究了由非对称结构激发的五个尖锐的 Fano

共振峰,调制深度接近 100%。利用时域有限差分(FDTD)方法计算了超结构的电磁场分布和透射谱,五个 Fano 共振峰所对应的共振模式分别为 TD(环形偶极子)、MQ(磁四极子)、MD(磁偶极子)、MDs 和 TD。最大灵敏度为 826 nm /RIU,品质因数(FOM)可达到 898 RIU⁻¹。此外,研究了该结构的可缩放特性,通过调节可缩放因子 S,五个共振峰显示出不同程度的红移。利用此特性,可以实现不同波长范围下的传感检测。因此,该结构在环境传感、多通道生物传感和高灵敏度生物传感领域具有潜在的应用价值。

1 模型建构

图 1(a)显示了全介质对称纳米四聚体超结构单元结构及其俯视图。周期为 $P_x = P_y = 700$ nm,相邻圆柱之间的间隙 g 为 360 nm。图 1(b)显示了全介质缺陷纳米四聚体超结构单元结构及其俯视图,其周期和间隙与对称结构的相同,圆柱型四聚体的半径及缺陷半径 r 为 150 nm,高 h 为 200 nm。 Δ 来表示缺陷圆柱与中心的偏离位置,表征结构的不对称性。入射光的偏振 E 和传播 k 方向如图 1(a)所示。所示超结构浸入折射率 n 为 1.00 的分析物中。在仿真中,衬底材料为 SiO₂,纳米四聚体材料为 Si,且 Si 和 SiO₂ 的折射率参数均取自 Palik 折射率数据库。采用 FDTD 方法对光学特性进行了模拟和分析,在 x 方向和 y 方向上采用周期边界条件,在 z 方向上采用完美匹配层(PML)边界条件。当缺陷圆柱右移时,该结构关于 y 轴不对称。当入射光的偏振方向沿非对称轴设置时,共振响应会被激发。因此,选择 z 轴垂直入射的 y 偏振平面波照射该结构。

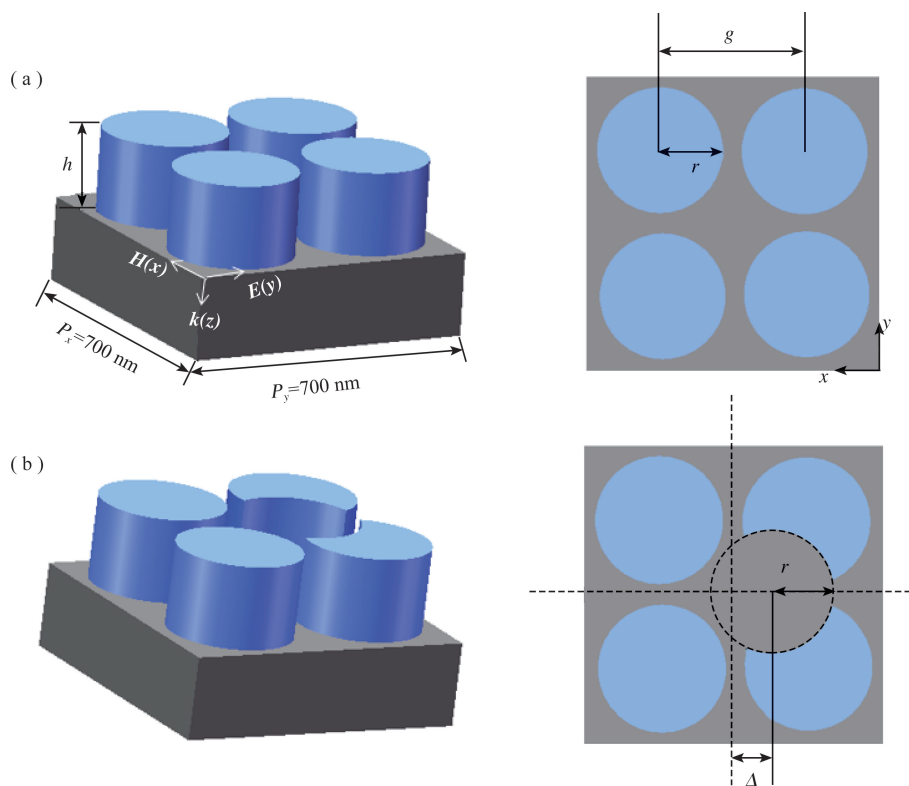


图 1 (a) 全介质对称纳米四聚体超结构单元晶胞图及俯视图; (b) 全介质缺陷纳米四聚体超结构单元晶胞图及俯视图

Fig. 1 (a) The unit cell diagram and top view of the all-dielectric symmetric nanotetramer metastructure; (b) The unit cell diagram and top view of the all-dielectric defective nanotetramer metastructure

2 仿真结果与理论分析

通过改变全介质超结构的尺寸和形状可以调整共振模式。基于这种独特的光学特性,提供了一种方法来提高折射率传感器的性能。例如,基于全介质超结构中的 BIC 是实现具有超高 Q 因子 Fano 共振的一种有效方法。目前,最常用和有效的方法是在结构中引入不对称性,对称保护的 BIC 模式具有无限高的 Q 因

子,通过引入不对称性可以转变为准 BIC 模式,从而得到尖锐的 Fano 共振。

2.1 对称与非对称结构对比

使用 FDTD 方法对超结构进行建模时,使用参数化扫描方法来选择结构的尺寸,即通过在给定的参数范围内改变参数值,并模拟和评估每个参数组合来寻找最优结构维度的系统方法。当结构完全对称时,如图 2(a)显示了 $\Delta = 0$ nm 的超结构阵列的透射光谱,其他参数周期 P 、半径 r 、高度 h 和间隙 g 分别被设置为 700、150、200 和 360 nm。对称结构中,在 1 090.92 nm 和 1 195.03 nm 的波长处出现了两个 Fano 共振峰,分别标记为 $P2$ 和 $P5$ 共振,其调制深度接近 100%。当打破四聚体的不对称性($\Delta = 80$ nm)后,在 1 044.3 ($P1$)、1 136.32($P3$)和 1 156.27 nm($P4$)处出现了三个额外的 Fano 共振,如图 2(b)所示。与对称结构的两个 Fano 共振相比,不对称结构表现出具有五个 Fano 共振、高调制深度及高 Q 因子的优点。

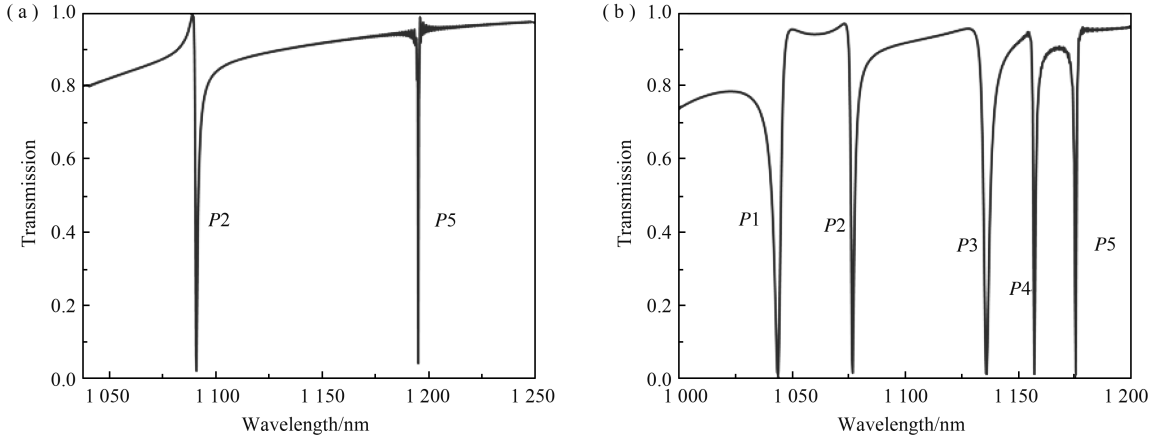


图 2 (a) 对称结构的透射光谱; (b) 不对称结构($\Delta = 80$ nm)的透射光谱

Fig. 2 (a) Transmission spectrum of symmetric structure; (b) Transmission spectrum of asymmetric structure ($\Delta = 80$ nm)

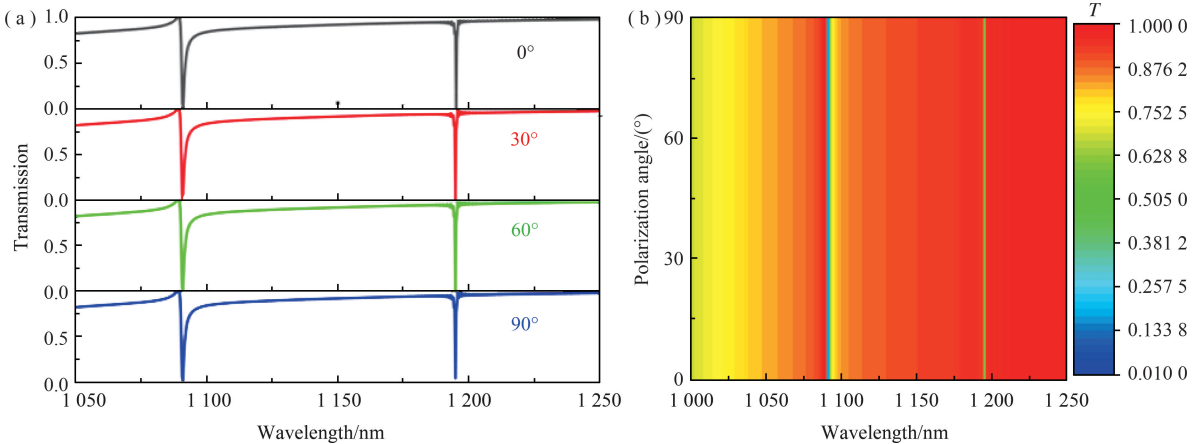


图 3 不同偏振角度下透射光谱

Fig. 3 Transmission spectra at different polarization angles

为了准确地再现 Fano 光谱特征,使用典型的 Fano 公式拟合传输频谱

$$T = \left| \alpha_1 + i\alpha_2 + \frac{b}{\omega - \omega_0 + i\gamma} \right|^2,$$

式中 α_1 、 α_2 和 b 为常数, γ 表示折射率传感器的总阻尼率, ω_0 为振荡频率。此外,也可以得到光谱响应的 Q 因子,可以通过 $Q = \omega_0 / 2\gamma$ 来计算。当 Δ 为 80 nm 时,可以计算出 $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 、 $P4$ 和 $P5$ 共振的 Q 因子分别为 294、633、392、1 123 和 1 277。调制深度 ΔT 定义为 $T_{\text{peak}} - T_{\text{dip}}$,表示 Fano 共振在峰值和谷值的传输振幅之差。可以看出五个 Fano 共振峰的调制深度也相对较高,几乎为 100%。当打破结构的对称性时,可以有效地激发多个具有高 Q 因子和高调制深度的 Fano 共振,而四聚体的剩余尺寸可以保持不变。在改变偏振角度时,如图 3 所示,发现随着偏振角度的变化,共振峰的共振线宽及调制深度保持不变,表明该结构具

有偏振不敏感的特性。

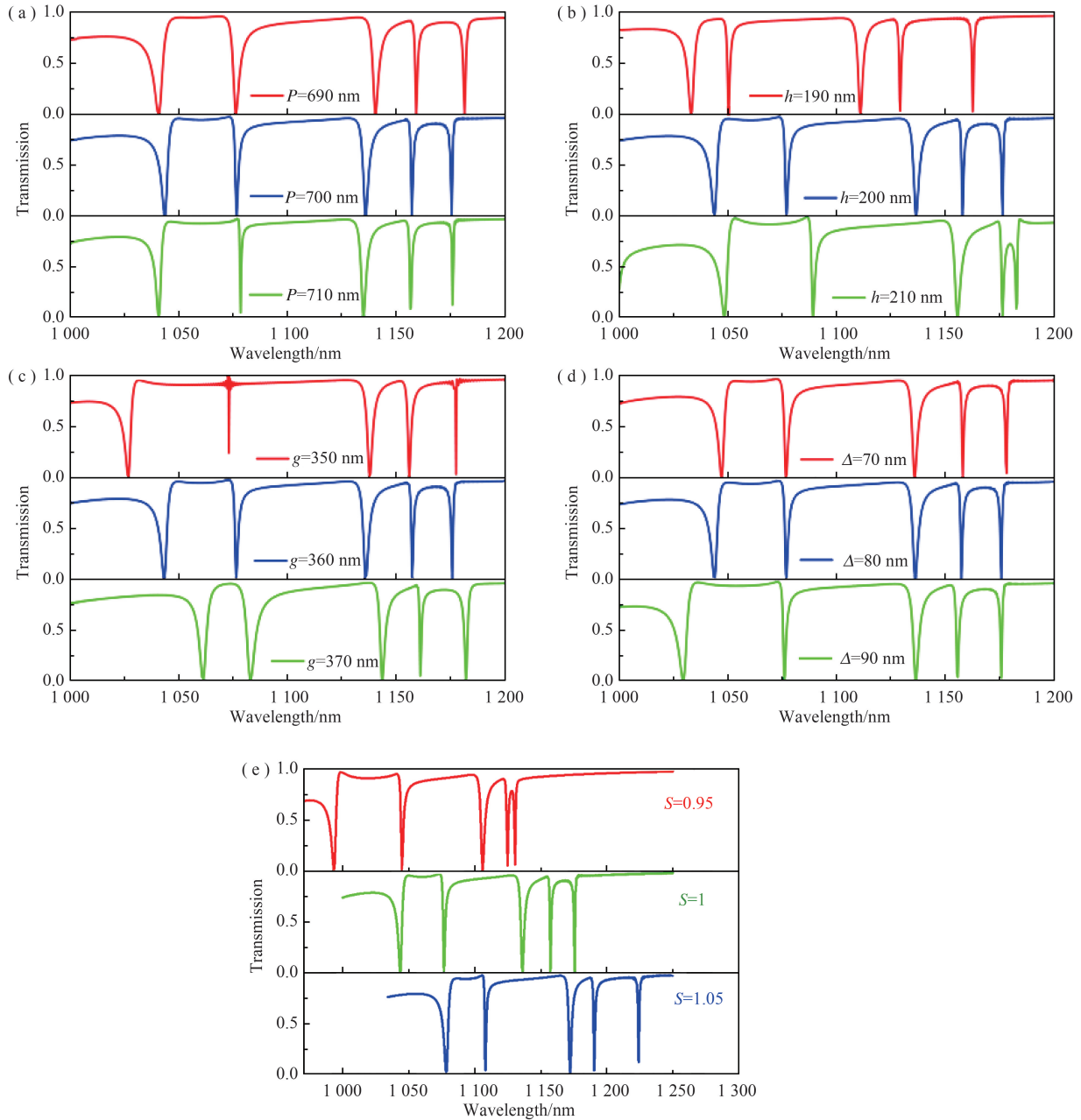


图 4 不同几何参数的透射光谱 (a) 周期 P ; (b) 高度 h ; (c) 间隙 g ; (d) 不对称参数 Δ ; (e) 可缩放因子 S

Fig. 4 Transmission spectra for different geometric parameters (a) Period P ; (b) Height h ; (c) Gap g ; (d) Asymmetric parameter Δ ; (e) Scalable factor S

2.2 透射光谱分析

为了有效提高折射率传感器的性能,分析了不同的几何参数的透射谱,从而研究了透射谱对不同几何参数的依赖关系,如图 4 所示。其他参数与图 1(b) 相同。如图 4(a) 所示,随着周期的增加,存在着蓝移的现象,可以看出 $P3$ 、 $P5$ 对阵列周期 P 比较敏感,而其他的只产生轻微的蓝移,表明表面晶格共振在 $P3$ 、 $P5$ 中起着重要的作用。随着高度 h 的增加,每个峰都产生了显著的红移,因此所产生的五个 Fano 共振峰对高度 h 都较为敏感。如图 4(c) 所示,随着间隙 g 的增加,产生了红移,其中 $P1$ 对间隙 g 较为敏感。在图 4(d) 中,随着不对称参数 Δ 的增加, $P1$ 产生了较为明显的蓝移。同时,线宽明显变宽,由于辐射损失的增加,相应的 Q 因子也急剧减小。从以上分析可以看出,所设计的超结构具有显著的可调性,通过调整参数可以满足不同应用的要求。此外,将 S 定义为可缩放因子,即同等倍数扩大结构尺寸或缩小结构尺寸,如图 4(e) 所

示,随着可缩放因子 S 的逐渐增加,五个共振峰显示出不同程度的红移,这意味着共振波长可以通过可缩放因子 S 来调节,表明该结构具有可缩放特性,提高了传感检测的性能。

消光系数(K),即硅折射率的虚部,用于量化光损耗。为了深入研究 K 对透射谱的影响,对不同消光系数下的对称和非对称透射谱进行了模拟,如图 5 所示。随着 K 的增加,Fano 共振峰的线宽增加,调制深度减小, Q 因子也会相应地减小。 K 越大,吸收光的散射越严重,导致 Fano 共振逐渐消失,且不同模式的 Fano 共振会产生不同的效应。

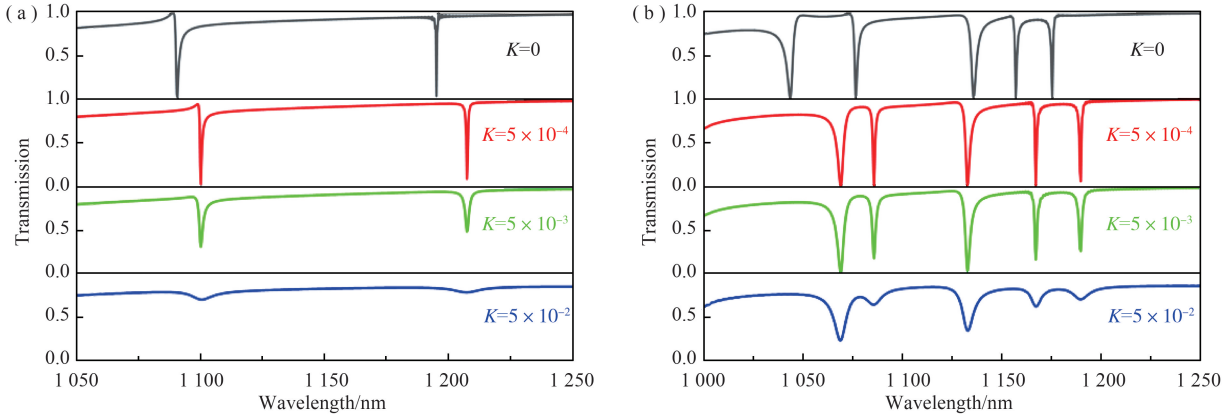


图 5 不同消光系数下的透射光谱

Fig. 5 Transmission spectra under different extinction coefficients

2.3 电磁场分布图分析

为了直观地显示每个共振峰对应的不同电磁激励,图 6(a、b)中显示了五个波长位置附近 x - y 平面以及 y - z 平面中非对称结构的电磁场分布图。从图 6 中可以看出,不对称参数 $\Delta = 80$ nm 时,在 1 044.3 nm 处, x - y 平面的电场形成方向相反的回路, y - z 平面上的磁场形成一个闭合回路,这种情况是典型的 TD 共振。在 1 076.76 nm 处,其电场在 x - y 平面上形成反向回路,且在 y - z 平面呈现相反的磁场方向,表明在 1 076.76 nm 处存在 MQ 共振。在 1 136.32 nm 处, x - y 平面内形成了一个闭合回路, y - z 平面内磁场几乎沿 y 轴正方向极化,因此,在 1 136.32 nm 处的共振对应于 MD 共振。在 1 156.27 nm 处, x - y 平面上存在两个相同方向的回路, y - z 平面上磁场沿 y 轴正方向极化,这种共振模式为 MDs 共振。在 1 175.25 nm 处,四聚体在 x - y 平面的电场形成两个方向相反的回路, y - z 平面上的磁场形成一个闭合回路,对应着 TD 共振。通过观察图 6 中的电磁场分布图,可以看出该结构可以实现局域场增强,利用其可以提高器件的性能。

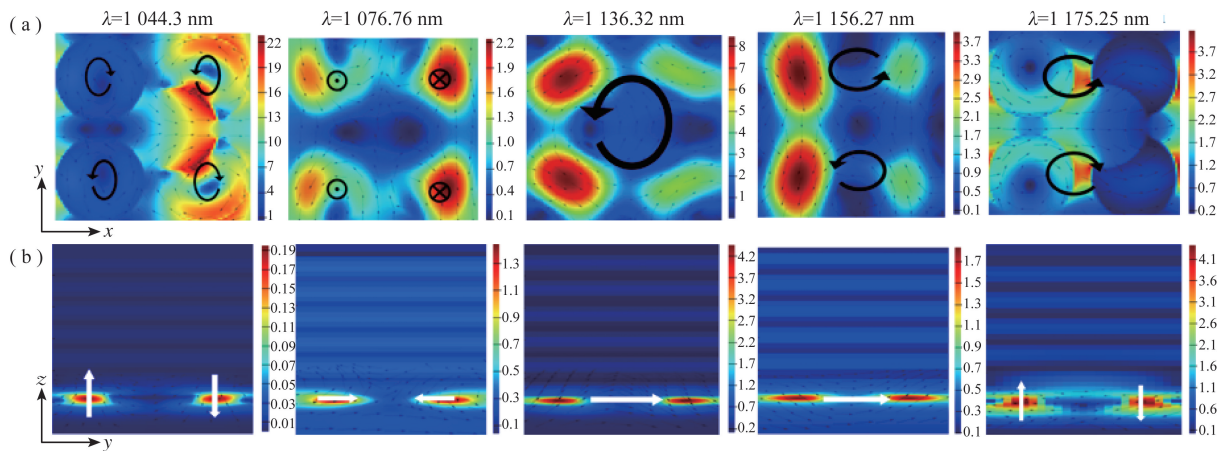


图 6 $\Delta=80$ nm 时不同共振峰的电磁场分布 (a) x - y 平面; (b) y - z 平面

Fig. 6 Electromagnetic field distribution of different resonance peaks when $\Delta=80$ nm (a) x - y plane; (b) y - z plane

2.4 折射率传感器

为了讨论了超结构的传感特性,分析了待测物折射率 n 变化时对透射谱的影响。将待测物的折射率 n

定义在 1.00~1.02 之间,通过改变 n 观察透射谱的变化。当间隙和结构外围被具有不同折射率的待测物覆盖时,其透射光谱如图 7 所示。随着 n 的增加,Fano 共振峰的位置出现明显的红移,但对 Q 因子和线宽的影响不大,因此该超结构在传感领域有很好的应用前景。

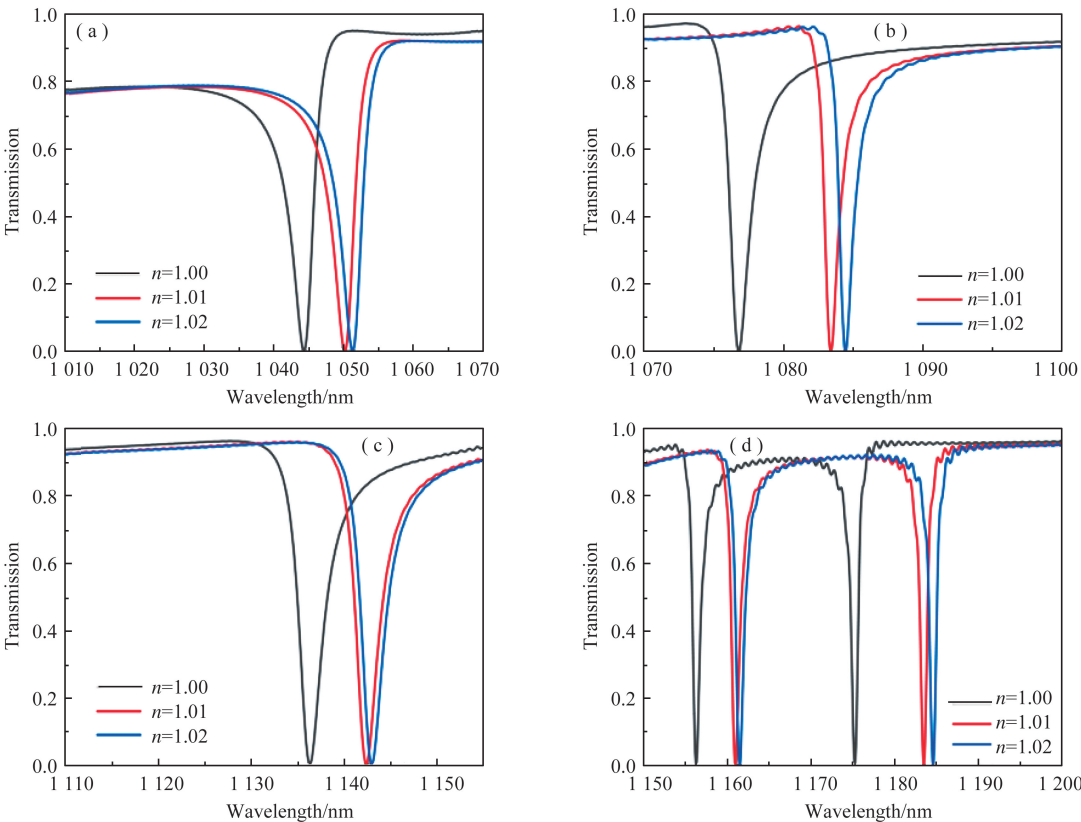


图 7 非对称结构($\Delta=80\text{ nm}$)中五种共振在不同折射率下的透射光谱变化图 (a) 共振 1;
(b) 共振 2;(c) 共振 3;(d) 共振 4 和共振 5

Fig. 7 Transmission spectra of five resonances in asymmetric structure ($\Delta=80\text{ nm}$) under different refractive indices
(a) mode 1; (b) mode 2; (c) mode 3; (d) mode 4 and mode 5

如表 1 所示,将本结构的灵敏度和 FOM 与文献中相应的值进行了比较,可以观察到对比于双空心方形、U 形硅圆柱体以及双半圆孔等结构,缺陷型不对称结构具有较高的 FOM 和灵敏度。该超结构为设计高性能折射率传感器器件提供了一个良好的平台。

表 1 不同种类传感器的灵敏度和 FOM 的比较

Table 1 Comparison of sensitivity and FOM of different types of sensors

传感器类型	$S/(\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	$\text{FOM}/\text{RIU}^{-1}$
double hollow square ^[18]	287.5	389
U-shaped silicon cylinder ^[19]	203	29
double half round hole ^[4]	300	440
defective cylinders	826	898

折射率传感器有两个重要的性能指标,即灵敏度(S)和 FOM。 $S=\Delta\lambda/\Delta n$,其中 $\Delta\lambda$ 和 Δn 为共振波长偏移量和折射率差值的比值。将 FOM 定义为 S/W_{FWHM} ,即灵敏度(S)与半峰全宽(W_{FWHM})之比。5 种共振模式的平均灵敏度分别为 594、663、611、469 和 826 nm/RIU,FOM 分别达到 167 RIU^{-1} 、390 RIU^{-1} 、211 RIU^{-1} 、455 RIU^{-1} 和 898 RIU^{-1} 。图 8(a)为结构缺陷示意图,图 8(b)研究了不对称结构的各种共振模式随分析物折射率的变化,其斜率为灵敏度 S 。

3 结论

本文设计的基于全介质圆柱型缺陷超结构可以实现高灵敏度、高调制深度以及多 Fano 共振。当结构

对称时,可以产生两个 Fano 共振,当打破结构对称性时,五个 Fano 共振($P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 、 $P4$ 和 $P5$)被激发,均具有较高的 Q 因子,其中最大的 Q 因子达到 1 277,也可以通过调整结构来产生不对称性来获得更高的 Q 因子。该折射率传感器的灵敏度可达 826 nm/RIU,最大 FOM 可达 898 RIU⁻¹。通过改变参数可以调整单个或多个共振峰的位置,此外,该结构还具备可缩放特性,这使它们更适合应用并提供优异的光学性能指标。所提出的传感器在多波段生物检测、非线性光学以及其他光电器件中具有广泛的应用。

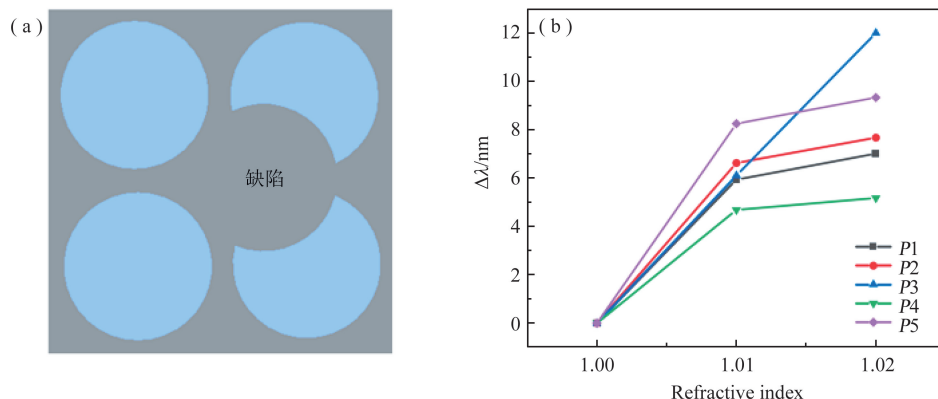


图 8 (a) 缺陷结构示意图; (b) $\Delta=80$ nm 时五种共振模式相对于折射率的波长位移

Fig. 8 (a) Diagram of defective structure; (b) Wavelength shift of five resonance modes relative to refractive index when $\Delta=80$ nm

参 考 文 献

- [1] CHOU-CHAO C T, CHOU-CHAU Y F, CHIANG H P. Multiple Fano resonance modes in an ultra-compact plasmonic waveguide-cavity system for sensing applications[J]. Results in Physics, 2021, 27: 104527.
- [2] CHOU-CHAO C T, CHOU-CHAU Y F, CHIANG H P. Highly sensitive metal-insulator-metal plasmonic refractive index sensor with a centrally coupled nanoring containing defects[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(11): 115301.
- [3] 周朝彪. 全介质微纳结构中 Fano 共振现象及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [4] YU S, LI H, WANG Y, et al. Multiple Fano resonance excitation of all-dielectric nanoholes cuboid arrays in near infrared region[J]. Results in Physics, 2021, 28: 104569.
- [5] SONG S, YU S, 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.
- [6] LONG X, ZHANG M, XIE Z, et al. Sharp Fano resonance induced by all-dielectric asymmetric metasurface[J]. Optics Communications, 2020, 459: 124942.
- [7] ZHANG Y, LIU W, LI Z, et al. High-quality-factor multiple Fano resonances for refractive index sensing[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1842-1845.
- [8] YANG L, YU S L, LI H, et al. Multiple Fano resonances excitation on all-dielectric nanohole arrays metasurfaces[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 14905-14916.
- [9] WANG W D, ZHENG L, QI J G. High Q-factor multiple Fano resonances for high-sensitivity sensing in all-dielectric nanocylinder dimer metamaterials[J]. Applied Physics Express, 2019, 12(7): 075002.
- [10] WANG W, ZHENG L, LIU Y, et al. High-quality-factor multiple Fano resonances in free-standing all-dielectric nanodisk dimers for applications[J]. Optik, 2020, 207: 163815.
- [11] WANG Y, YU S, GAO Z, et al. Excitations of multiple Fano resonances based on permittivity-asymmetric dielectric meta-surfaces for nano-sensors[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(1): 1-7.
- [12] ALGORRI J F, ZOGRAFOPOULOS D C, FERRARO A, et al. Ultrahigh-quality factor resonant dielectric metasurfaces based on hollow nanocuboids[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6320-6330.
- [13] KOSHELEV K, LEPESHOV S, LIU M, et al. Asymmetric metasurfaces with high-Q resonances governed by bound states in the continuum[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(19): 193903.

(下转第 122 页)

- [6] ZHELUDKEVICH M L, TEDIM J, FERREIRA M G S. "Smart" coatings for active corrosion protection based on multi-functional micro and nanocontainers[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 82: 314-323.
- [7] ZHANG Y, YU M, CHEN C, et al. Self-healing coatings based on stimuli-responsive release of corrosion inhibitors; a review[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 8: 795397.
- [8] WANG L, LI S N, FU J J. Self-healing anti-corrosion coatings based on micron-nano containers with different structural morphologies [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 175: 107381.
- [9] WU K Y, DOU P, GU Y, et al. Investigation of relationship between microcapsule shell structure, dispersion state and coating performance[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(44): e54605.
- [10] LIU J Q, WU K Y, LIU R, et al. Robust SiO_2 /polymer hybrid microcapsule synthesized via emulsion photo-polymerization and its application in self-lubricating coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 184: 107856.
- [11] ZHANG L C, WU K Y, SUN G Q, et al. Investigation of particle size effect on the performance of micro/nano capsules and composite coatings[J]. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 675: 132020.
- [12] ZHANG Q Q, CHEN Y X, LIU R, et al. Dual-action self-healing anticorrosive coating based on polyaniline microcapsules[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2023, 54(5): 720-730.
- [13] CAI Y P, CHEN Y H, HONG X Y, et al. Porous microsphere and its applications[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2013, 8(1): 1111-1120.
- [14] PENG S Y, HUANG B H, LIN Y Z, et al. Effect of surface functionalization and pore structure type on the release performance of mesoporous silica nanoparticles [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2022, 336: 111862.
- [15] LANG M, HIRNER S, WIESBROCK F, et al. A review on modeling cure kinetics and mechanisms of photopolymerization[J]. *Polymers*, 2022, 14(10): 2074.
- [16] TAO J J, WU K Y, CHEN Y X, et al. A facile one-pot strategy for the preparation of porous polymeric microspheres via UV irradiation-induced polymerization in emulsions[J]. *Soft Matter*, 2023, 19(7): 1407-1417.
- [17] LI W, TAO J J, CHEN Y X, et al. Porous microspheres with corrosion sensing and active protecting abilities towards intelligent self-reporting and anti-corrosion coating[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 178: 107468.
- [18] ZHANG Q Q, LI W, LIU X Y, et al. Polyaniline microspheres with corrosion inhibition, corrosion sensing, and photothermal self-healing properties toward intelligent coating[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 16(1): 1461-1473.
- [19] HUANG Y, LIU T, MA L W, et al. Saline-responsive triple-action self-healing coating for intelligent corrosion control[J]. *Materials & Design*, 2022, 214: 110381.
- [20] GUO Y G, WANG J, ZHANG D W, et al. pH-responsive self-healing anticorrosion coatings based on benzotriazole-containing zeolitic imidazole framework[J]. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 561: 1-8.

(责任编辑:蒲锡鹏)

(上接第 75 页)

- [14] CAI Y, HUANG Y, ZHU K, et al. Symmetric metasurface with dual band polarization-independent high-Q resonances governed by symmetry-protected BIC[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(16): 4049-4052.
- [15] LIU X, LI J, ZHANG Q, et al. Dual-toroidal dipole excitation on permittivity-asymmetric dielectric metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2826-2829.
- [16] LIU Z, XU Y, LIN Y, et al. High-Q quasibound states in the continuum for nonlinear metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(25): 253901.
- [17] WANG W, YAN H, XIONG L, et al. Symmetry-protected bound state in the continuum in the metasurface of dielectric nanodisk with the inclined surface[J]. *Journal of Modern Optics*, 2021, 68(13): 699-706.
- [18] LI H, YU S, YANG L, et al. High Q-factor multi-Fano resonances in all-dielectric double square hollow metamaterials[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107072.
- [19] QIN M, PAN C, CHEN Y, et al. Electromagnetically induced transparency in all-dielectric U-shaped silicon metamaterials[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1799.

(责任编辑:赵海军)