

基于法诺共振的全介质硫系化合物超表面高性能中红外折射率传感

许诺 黄虎钧 郭万祺 姜湖 王莹莹 张培晴 沈祥 戴世勋 宋宝安

All-dielectric chalcogenide metasurfaces based on Fano resonance for high-performance mid-infrared refractive index sensing

XU Nuo, HUANG Hu-jun, GUO Wan-qi, JIANG Hu, WANG Ying-ying, ZHANG Pei-qing, SHEN Xiang, DAI Shi-xun, SONG Bao-an

引用本文:

许诺, 黄虎钧, 郭万祺, 姜湖, 王莹莹, 张培晴, 沈祥, 戴世勋, 宋宝安. 基于法诺共振的全介质硫系化合物超表面高性能中红外折射率传感[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 267–276. doi: 10.37188/CO.2025–0158

XU Nuo, HUANG Hu-jun, GUO Wan-qi, JIANG Hu, WANG Ying-ying, ZHANG Pei-qing, SHEN Xiang, DAI Shi-xun, SONG Bao-an. All-dielectric chalcogenide metasurfaces based on Fano resonance for high-performance mid-infrared refractive index sensing[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 267-276. doi: 10.37188/CO.2025-0158

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0158>

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>

双有源区结构4.7 μm 中波红外量子级联激光器

4.7 μm mid-wave infrared quantum cascade laser with double active region structure

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1042 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0239>

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>

基于非连通金属介质金属波导耦合D形谐振腔的多法诺共振传感器

Multi-Fano resonances sensing based on a non-through metal-insulator-metal waveguide coupling D-shaped cavity

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1484 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0017>

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>

文章编号 2097-1842(2026)02-0267-10

基于法诺共振的全介质硫系化合物超表面 高性能中红外折射率传感

许诺^{1,2,3}, 黄虎钧⁴, 郭万祺^{1,2,3}, 姜湖^{1,2,3}, 王莹莹^{1,2,3}, 张培晴^{2,3,5},
沈祥^{1,2,3}, 戴世勋^{2,3,5}, 宋宝安^{1,2,3*}

- (1. 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江宁波 315211;
2. 浙江省光电探测材料与器件重点实验室, 浙江宁波 315211;
3. 浙江省先进红外光电材料与器件工程研究中心, 浙江宁波 315211;
4. 宁波舜宇车载光学技术有限公司, 浙江宁波 315400;
5. 宁波大学高等技术研究院, 浙江宁波 315211)

摘要:本文提出一种基于全介质超表面的高性能中红外折射率传感器, 工作波长约为 $5.36 \mu\text{m}$ 。超表面单元结构由四个对称分布的 Sb_2Se_3 半椭圆结构与一个中心 Sb_2Se_3 圆柱体周期性排列构成, 以 BaF_2 为衬底。采用时域有限差分法进行数值模拟, 获得结构的反射光谱。进一步分析共振峰处的电磁场矢量分布, 并探究几何参数对光谱的影响。反射光谱中观察到的法诺共振现象通过准连续域束缚态理论予以解释。通过对几何参数进行系统性扫描, 重点考察在固定谐振峰强度条件下, 各结构参数对器件品质因子与半高全宽的影响规律, 比较不同方向调整参数时光谱线宽的响应差异。进一步通过改变背景折射率, 研究了基于法诺共振的折射率传感特性。结果表明, 该传感器最高灵敏度达 1985 nm/RIU , 最大品质因子为 1096.6 , 优值达 400 。与现有报道的中红外折射率传感器相比, 在灵敏度、品质因子及优质等关键性能上均展现出明显优势。本文研究为发展基于硫系化合物的高性能中红外光学传感器提供了有效的设计思路与性能参考。

关键词:全介质超表面; 折射率传感; 准连续域束缚态; 中红外; 硫系化合物

中图分类号: O436 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0158 CSTR: 32171.14.CO.2025-0158

收稿日期: 2025-12-16; 修订日期: 2026-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62135011); 宁波市自然科学基金(No. 2024J024)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62135011); Ningbo Natural Science Foundation (No. 2024J024)

All-dielectric chalcogenide metasurfaces based on Fano resonance for high-performance mid-infrared refractive index sensing

XU Nuo^{1,2,3}, HUANG Hu-jun⁴, GUO Wan-qi^{1,2,3}, JIANG Hu^{1,2,3}, WANG Ying-ying^{1,2,3}, ZHANG Pei-qing^{2,3,5}, SHEN Xiang^{1,2,3}, DAI Shi-xun^{2,3,5}, SONG Bao-an^{1,2,3}*

(1. School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Province Key Laboratory of Optoelectronic Detection Materials and Devices, Ningbo 315211, China;

3. Zhejiang Provincial Engineering Research Center for Advanced Infrared Optoelectronic Materials and Devices, Ningbo 315211, China;

4. Ningbo Sunny Automotive Optical Technology Co., Ltd., Ningbo 315400, China;

5. Ningbo University Advanced Technology Research Institute, Ningbo 315211, China)

* Corresponding author, E-mail: songbaoan@nbu.edu.cn

Abstract: We propose a high-performance mid-infrared refractive index sensor based on an all-dielectric metasurface, operating at a wavelength of approximately 5.36 μm . The metasurface unit consists of four symmetrically arranged Sb_2Se_3 semi-elliptical structures and a central Sb_2Se_3 cylinder, periodically arranged on a BaF_2 substrate. Numerical simulations were performed using the finite-difference time-domain (FDTD) method to obtain the reflection spectrum and to analyze the electromagnetic field vector distribution at the resonance peak, as well as the influence of geometric parameters on the spectral response. The observed Fano resonance in the reflection spectrum is explained by the theory of quasi-bound states in the continuum (Q-BIC). Through systematic parameter scanning, we investigate the influence of structural parameters on the quality factor (Q) and full width at half-maximum (FWHM) under the constraint of fixed resonance intensity, and compare the spectral linewidth responses when adjusting parameters in different directions. Furthermore, by varying the background refractive index, the refractive-index sensing characteristics based on the Fano resonance are studied. The results show that the sensor achieves a maximum sensitivity of 1985 nm/RIU, a peak Q-factor of 1096.6, and a figure of merit (FOM) of 400. Compared with previously reported mid-infrared refractive index sensors, the proposed design demonstrates significant advantages in key performance metrics such as sensitivity, Q-factor, and FOM. This work provides a feasible design strategy and performance reference for developing high-performance mid-infrared optical sensors based on chalcogenide compounds.

Key words: all-dielectric meta-surface; refractive index sensing; quasi-bound states in the continuum; mid-infrared; chalcogenide compounds

1 引 言

随着全球健康监测需求的升级,高灵敏度、快速响应的生物传感技术在疾病早期诊断、环境监测及食品安全等领域的应用日益增多。中红外

光谱凭借其独特的分子“指纹”识别能力,在无标记生物检测与痕量化学分析中展现出显著优势。其中,基于超表面的中红外传感器因具有操作简便、易于集成、可快速检测蛋白质、抗体、核酸等生物标志物的特点,已成为生物安全与环境监测领域的研究热点^[1]。

超表面是一种由人工设计的亚波长单元组成的二维平面阵列^[2-3], 能够对光场的振幅、相位及偏振进行灵活调控, 在波前操控^[4]、滤波^[5]、超薄透镜^[6]、成像^[7-8]、激光器^[9]、结构色^[10]以及生化传感^[11]等方面展现出广阔的应用前景^[12]。然而, 传统的金属超表面受限于等离子体固有的欧姆损耗, 存在品质因子 Q 较低、传感优值 FOM 有限(文献报道最高约 162 RIU^{-1})^[13-16], 且存在由热效应引起的信号干扰等问题。尽管可通过引入电磁诱导透明(EIT)^[17]或 Fano 共振^[18-19]机制来提升性能, 但其 FOM 值仍难以突破 200。相较于金属材料, 全介质超表面以低损耗的位移电流替代欧姆损耗, 能支持更强的局域电磁共振模式^[20-22], 有利于增强光与物质的相互作用, 从而为实现更大的 FOM 值和更高的 Q 因子提供了可能。然而, 常用的硅基材料在中红外波段存在显著的本征吸收, 限制了其对折射率差异微小的生物样本(如癌细胞, $\Delta n \approx 0.002-0.005$)的检测灵敏度。目前报道的硅基传感器多在近红外波段工作, 其灵敏度 S 和 FOM 值通常不超过 370 nm/RIU 和 1000 ^[22-25]。此外, 现有大多数基于超表面的单频共振传感器的工作波段集中在可见光和近红外^[26-28]。而 DNA、蛋白质等生物分子的特征振动谱区则位于中红外波段, 因此开发适用于该波段的高性能传感器显得尤为迫切。

Fano 共振来源于宽带超辐射模式和窄带亚辐射模式之间的干涉^[29-31], 能产生具有陡峭边沿的不对称线型^[32]。其高 Q 值、窄半高全宽 $FWHM$ 以及强局域场增强特性^[33], 为发展灵敏度折射率传感提供了新途径^[34-36]。尽管如此, 目前基于 Fano 共振的全介质传感器 FOM 值仍普遍较低($\leq 389 \text{ RIU}^{-1}$)^[24-25], 且工作波段大多局限于可见光/近红外, 面向中红外的高性能器件仍面临重要挑战。

本研究提出一种基于硒化锑(Sb_2Se_3)全介质超表面的中红外折射率传感器。该结构在 BaF_2 衬底上集成了四个对称排布的 Sb_2Se_3 半椭圆柱与一个中心圆柱, 通过激发磁偶极模式产生尖锐的 Fano 共振。采用时域有限差分法进行数值模拟, 重点分析结构的反射光谱与电磁场分布, 探究几何参数对共振特性的影响, 并基于准连续域束缚态理论阐释共振机理。通过系统优化结构参

数, 实现高品质因子与窄线宽的共振响应, 进而提升传感器的折射率传感性能。

2 超表面结构设计

本文提出的全介质超表面结构如图 1(彩图见期刊电子版)所示。以 BaF_2 为衬底, 其上周期性排列由四个对称分布的 Sb_2Se_3 半椭圆柱及一个中心圆柱组成的复合单元。

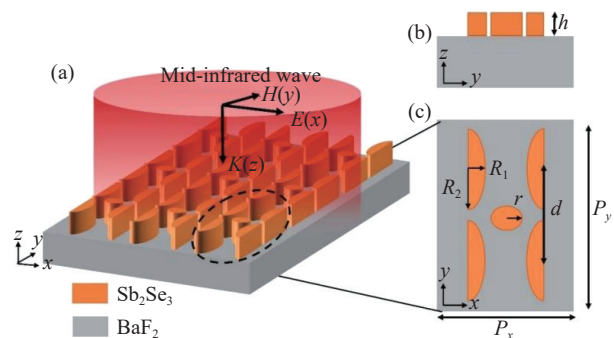


图 1 Sb_2Se_3 蝶形超表面结构示意图。(a) 超表面阵列与入射光束;(b) 单元结构的 YOZ 平面侧视图;(c) 单元结构的 XOY 平面俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of the Sb_2Se_3 butterfly-shaped metasurface array. (a) Metasurface array and incident light; (b) side view of the unit structure in the YOZ plane; (c) top view of the unit structure in the XOY plane

在超表面设计中, 采用椭圆或椭圆柱形的结构单元可引入可控的几何各向异性, 从而为独立调控光的振幅、相位和偏振态提供了额外的自由度。通过旋转椭圆方位或调节其长短轴, 可有效打破体系的旋转对称性, 将对称性保护的传统连续域束缚态(BIC)转化为多个可独立调控的准 BIC 模式。这使得原本被完全束缚的能量能够通过可控的辐射通道与外界耦合, 形成强烈的场局域, 显著增强光与物质相互作用。类似思路已在六角晶格光子晶体平板的椭圆孔设计中得以验证, 实现了多个高 Q 值($Q > 1000$)准 BIC 共振的协同激发^[37-38]。

关键几何参数如下: 沿 x 与 y 方向的晶格常数分别为 $P_x = 3.7 \mu\text{m}$ 和 $P_y = 4.3 \mu\text{m}$; 半椭圆柱的短半轴 $R_1 = 0.34 \mu\text{m}$ 和长半轴 $R_2 = 1 \mu\text{m}$, 柱高 $h = 2.2 \mu\text{m}$, 相邻柱体的中心距离 $d = 2.2 \mu\text{m}$; 中心圆柱半径 $r = 0.26 \mu\text{m}$, 高度与半椭圆柱相同。

材料光学参数方面, BaF₂ 衬底在中红外波段的折射率数据取自 Query 数据库, 其虚部为零, 实部随波长变化可忽略; Sb₂Se₃ 的折射率 n 、吸收系数 σ 、介电常数 ε 均基于 325 °C 退火薄膜的实验表征结果^[37,39]。

在本设计中, 选择 Sb₂Se₃ 作为核心介电材料。这主要基于其中红外波段的低损耗特性与高折射率对比度。首先, 针对中红外动态光子器件(如调制器、开关)对低损耗的严苛要求, 传统硅基方案存在固有局限: 虽然硅材料本身在中红外波段的本征吸收较低, 但其基于热光效应或载流子注入效应的动态调谐机制会引入较高的调制损耗。相比之下, Sb₂Se₃ 作为一种低光学损耗的相变材料, 能够从根本上缓解这个问题, 为构建高效波导、高 Q 值谐振器及低功耗器件提供了关键材料基础。其次, Sb₂Se₃ 在中红外波段还具有较高的折射率对比度, 这有助于实现高性能、低功耗的动态光子器件(如光开关与调制器), 并为可

重构器件提供有利平台^[40]。

采用时域有限差分(FDTD)法计算超表面的反射光谱与电磁场分布。仿真中, x 和 y 方向设为周期性边界, z 方向设置完美匹配层(PML)。为准确捕捉高 Q 共振模式, PML 层数设为 64 层以抑制边界反射, 全域采用均匀网格尺寸 $3 \text{ nm} \times 3 \text{ nm} \times 3 \text{ nm}$, 能量收敛准则设为 1×10^{-9} 。光源选用沿 $-z$ 方向垂直入射的平面波, 偏振方向平行于 x 轴(即半椭圆柱短轴方向)。

3 仿真结果及分析

当 x 偏振平面波垂直入射时, 全介电超表面在波长 $\lambda = 5.36 \mu\text{m}$ 处表现出显著的 Fano 共振, 如图 2(彩图见期刊电子版)所示。该共振峰呈现典型的非对称线型, 光谱曲线光滑且信噪比优异, 对入射光的吸收效率超过 95%, 表明其具有很强的光场局域能力。

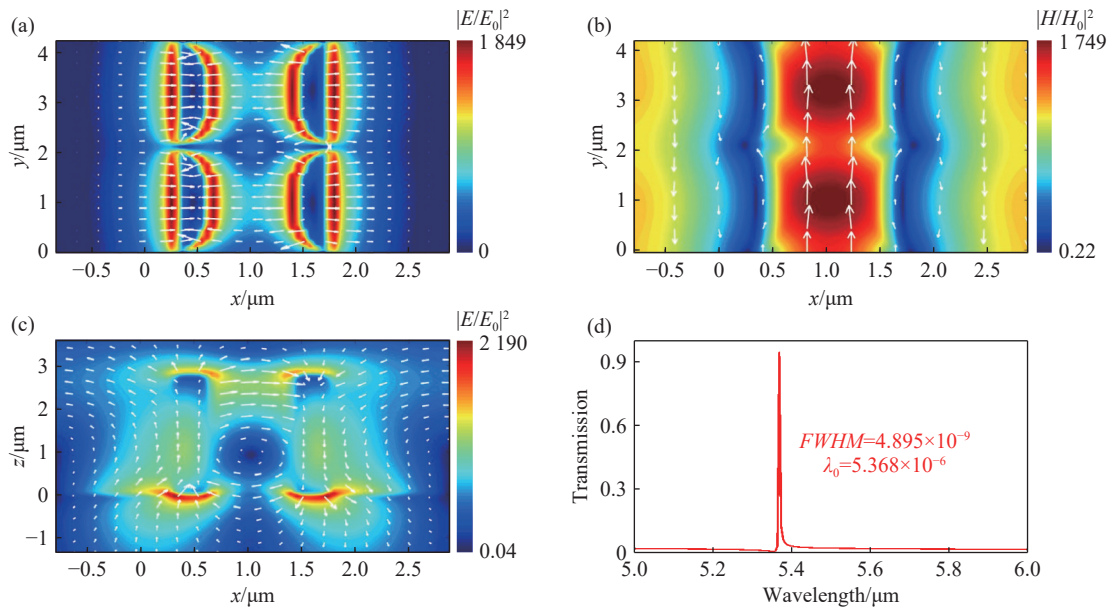


图 2 超表面结构的电磁场分布。(a) XOY 平面内电场; (b) XOY 平面内磁场; (c) XOZ 平面内电场; (d) 超表面结构的反射光谱, 周围介质为空气 ($n=1$)

Fig. 2 Electromagnetic field distributions of the metasurface structure. (a) Electric field in the XOY -plane; (b) magnetic field in the XOY -plane; (c) electric field in the XOZ -plane; (d) reflection spectra of the metasurface structure (ambient medium: air, $n = 1$)

通过 Fano 线型拟合得到该共振峰的 $FWHM$ 为 4.89 nm。据此计算品质因子 $Q = \lambda_{\text{res}}/\Delta\lambda \approx 1096.6$ 。高 Q 值反映了系统的低光学损耗和窄线宽特性, 对实现高灵敏度折射率传感至关重要。

为阐明共振的物理起源, 在谐振波长处进行

了多极子分解并计算了电磁场分布。图 2(a)和 2(c)分别展示了 XOY 和 XOZ 平面的电场分布: 在 XOY 平面内电场主要沿 x 方向极化, 而在 XOZ 平面内则形成闭合环形分布, 并伴随高达 2190 倍的电场增强。同时, 磁场呈现轴对称的反向涡

旋结构(图2(b))。这些特征满足磁偶极子(MD)模式的判据:(1)环形电流分布;(2)头尾相接的电场环;(3)涡旋状磁场构型。该MD模式具有低辐射损耗,能将能量高效局域于 Sb_2Se_3 结构表面。从侧截面(XOZ 平面)的场分布可见,部分能量通过辐射通道耗散,表明该模式为准BIC(Q-BIC)。理想对称结构下,MD模式可与连续辐射谱完全解耦,形成对称性保护的完美BIC。本设计通过引入面内结构非对称性,使完美BIC转变为辐射通道可控打开的准BIC,从而实现高 Q 值共振。多极子分解进一步确认该共振主要由MD贡献主导,其辐射通道的打开源于对称性的可控破坏^[40-41]。

场分布显示,谐振时电场在 Sb_2Se_3 半圆柱与中心盘附近显著增强,使更多电磁场与周围介质相互作用,这为提升传感灵敏度提供了物理基础。结合 Sb_2Se_3 的低损耗特性与准BIC的高场局域能力,为构建高性能中红外光子器件(如传感器、调制器)提供了新思路^[40,42]。

除 Q 因子外, S 和 FOM 是评价传感器性能

的核心指标。 S 定义为谐振波长随折射率变化的偏移率,表达式为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} (\text{nm/RIU}) \quad (1)$$

FOM 定义为 S 与谐振峰 $FWHM$ 的比值:

$$FOM = \frac{S}{FWHM} \quad (2)$$

其中 $FWHM$ 是非对称Fano共振体系中谐振谱线峰与谷间的宽度。

为表征该超表面的传感性能,通过调控其周围环境的折射率进行了系统仿真:背景折射率从 $n = 1.318$ 开始,以 $\Delta n = 0.008$ 为步长递增至 $n = 1.358$ 。图3(彩图见期刊电子版)为传感器性能的定量评估结果。图3(a)展示了不同介质环境下的反射光谱。结果表明,特定共振模式保持稳定,其谐振波长随折射率增加呈现规律性的红移现象。如图3(b)所示,谐振波长的位移 $\Delta\lambda$ 与环境折射率 Δn 之间存在显著的线性相关。

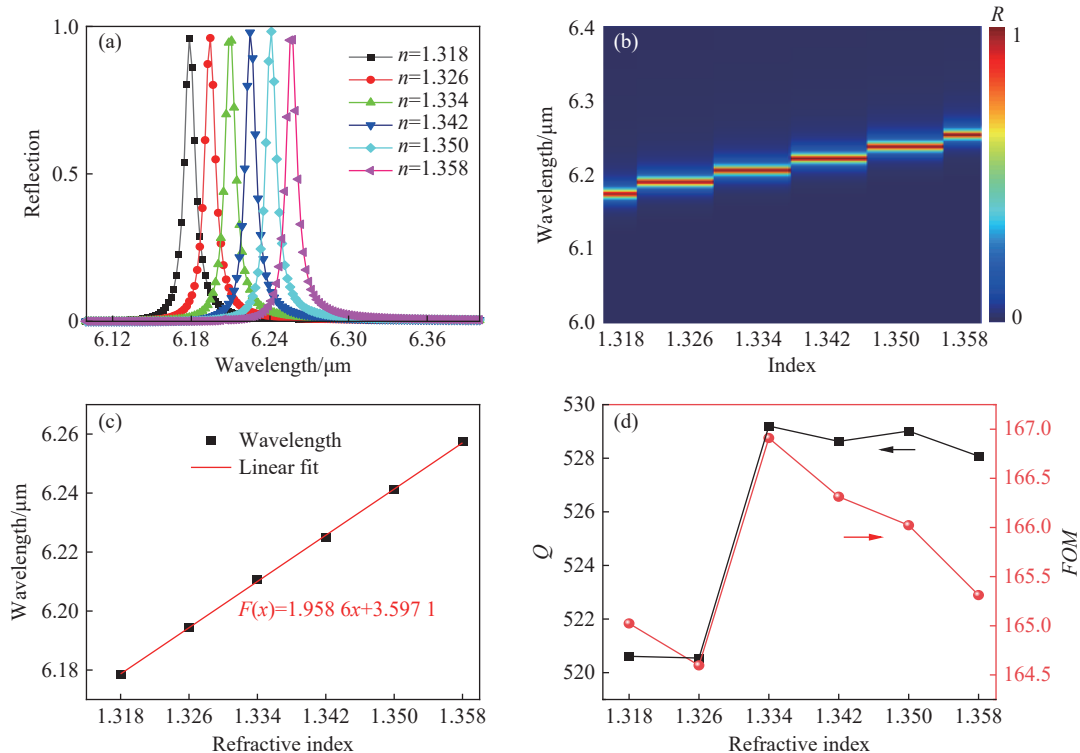


图3 传感器性能的定量评估结果。(a) 超表面在不同折射率介质中的反射光谱;(b) 共振波长位移与环境折射率的依赖关系;(c) 共振波长位移随折射率的变化关系;(d) 共振峰的 FOM 值与品质因子 Q 随折射率的变化关系

Fig. 3 Quantitative evaluation results of sensor performance. (a) Reflection spectra of the metasurface in media with varying refractive indices; (b) dependence of the resonance wavelength shift on the environmental refractive index; (c) resonance wavelength shift as a function of the refractive index; (d) the relationship between the FOM value of the resonance peak and the quality factor Q with changes in refractive index

通过改变环境折射率, n 从 1.318 以步长 $\Delta n = 0.008$ 增至 1.358, 对超表面的传感响应进行了系统仿真。如图 3(a) 所示, 共振峰保持稳定, 且随折射率增大发生规律性红移。谐振波长偏移 $\Delta\lambda$ 与折射率变化 Δn 呈良好线性关系(图 3(b))。线性拟合得到平均灵敏度 $S \approx 1958.6 \text{ nm/RIU}$, 结合 FWHM 计算得 $FOM \approx 400$ 。高灵敏度表明该结构能够检测微小的折射率变化($\Delta n \approx 0.008$)。进一步分析关键性能参数在传感范围内的稳定性。

超表面单元的几何参数直接决定了所支持的准 BIC 模式的固有辐射损耗, 而结构的不对称度是调控模式从理想 BIC(无限大 Q 值)转变为可观测的、高 Q 值法诺共振的关键方式。材料本征属性, 例如 Sb_2Se_3 材料的低光学损耗和高折射率对比度, 有利于实现强局域能力, 减少能量泄漏, 从而获得高 Q 值和 FOM 值。实际过程中的外部扰动与工艺误差引入额外的散射损耗也会影响 Q 值和 FOM 值。

从图 3(d) 中可以看出, Q 值与 FOM 值随 n

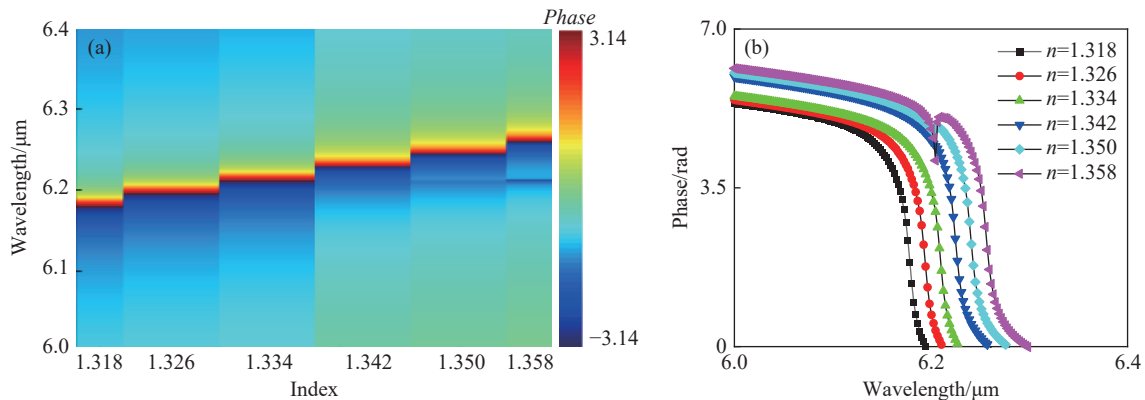


图 4 在不同环境折射率下的谐振波长相位演化特性。(a) 干涉相移分布图; (b) 相位-折射率响应曲线

Fig. 4 Phase evolution at resonance wavelength under varying ambient refractive index. (a) Interference phase-shift distribution map; (b) phase-refractive index response curve

为评估制造容差并探讨几何参数对谐振特性的调控规律, 系统分析了中心柱半径 r 、半椭圆柱短轴 R_1 、结构高度 h 的影响, 如图 5-图 6(彩图见期刊电子版) 所示:

(1) 中心柱半径 r ($0.26 \mu\text{m} \rightarrow 0.38 \mu\text{m}$, 步长为 $0.06 \mu\text{m}$): 谐振波长红移约 72 nm , $FWHM$ 显著展宽 $> 40\%$, 场增强因子衰减 $> 60\%$ 。这主要因为圆柱尺寸增大会导致辐射泄漏增强, 削弱了光场局域能力。

(2) 半椭圆柱短轴 R_1 ($0.34 \mu\text{m} \rightarrow 0.38 \mu\text{m}$, 步长为 $0.02 \mu\text{m}$): 谐振波长红移, $FWHM$ 展宽, 光谱

的变化并非简单的线性关系, 折射率 n 的变化不仅引起共振波长 λ_{res} 的线性偏移(决定灵敏度 S), 更会非线性地改变半高全宽(FWHM)。FWHM 受模式与辐射连续态耦合强度的影响, 随 n 变化呈现先展宽、后变窄、再展宽的趋势, 从而导致 $FOM = S / FWHM$ 与 $Q = \lambda_{\text{res}} / FWHM$ 均表现出非线性关系。这反映了准 BIC 共振对微环境变化的敏感性与复杂响应行为。

但二者在 $n = 1.318$ 至 $n = 1.358$ 的整个测试区间均维持相对恒定, 其中 FOM 值的波动范围不超过 5% , Q 因子的波动范围不超过 3% 。这充分证实了器件优异的鲁棒性。其综合传感性能超越大多数现有方案^[43-44]。

进一步分析谐振波长处的相位响应(图 4, 彩图见期刊电子版), 可见在满足共振条件时, 相位在 0 至 2π 范围内发生陡峭跃变, 其相位灵敏度为 15.8 nm/RIU 。这一突变源于 Fano 共振中离散态与连续态的干涉效应, 揭示了超表面谐振的干涉物理本质。

整体右移, 场增强因子衰减。 R_1 对谐振波长的调控效率最高。

(3) 结构高度 h ($2.3 \mu\text{m} \rightarrow 2.9 \mu\text{m}$, 步长为 $0.3 \mu\text{m}$): 谐振波长红移约 35 nm , $FWHM$ 仅轻微增加 ($< 5\%$), 场增强因子有所衰减, 但谐振模式保持稳定。

仿真结果表明, 面内参数(r, R_1)对 $FWHM$ 和 Q 因子的调控灵敏度远高于轴向参数 h 。图 7(彩图见期刊电子版)进一步定量揭示了这一关系: $FWHM$ 与 r, R_1 呈强正相关(图 7(a)、图 7(b)), 而与 h 关系微弱(图 7(c)); Q 因子则与 r, R_1 呈

强负相关(图 7(a)、图 7(b))。参数敏感度排序为: $r \approx R_1 \gg h$ 。此外, 所有参数的调整量($\geq 0.02 \mu\text{m}$)均满足典型电子束光刻的分辨率要求($\leq 8 \text{ nm}$), 表明该设计具备良好的工艺可行性。

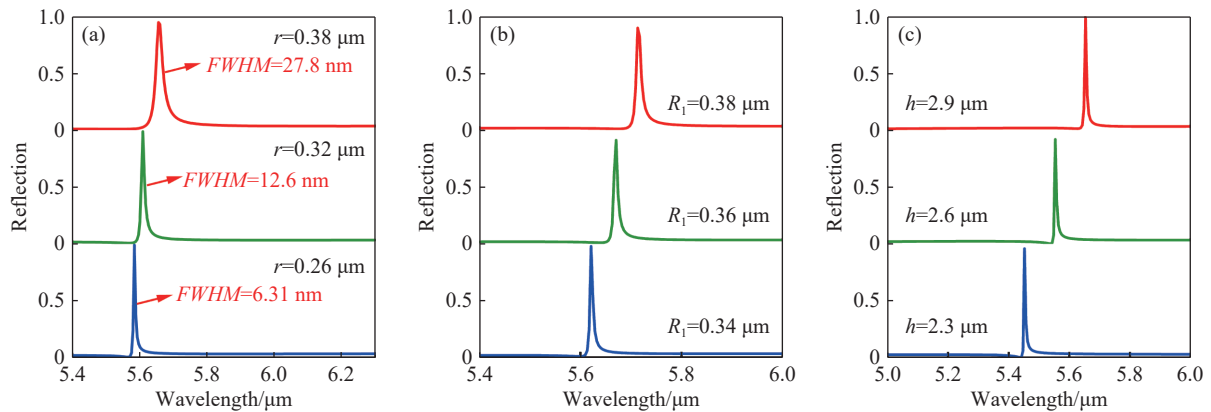


图 5 不同几何参数下的反射谱。(a) 中心柱半径 r ; (b) 半短轴 R_1 ; (c) 结构高度 h

Fig. 5 Transmission spectra under different geometric parameters. (a) Central pillar radius r ; (b) semi-axis R_1 ; (c) structure height h

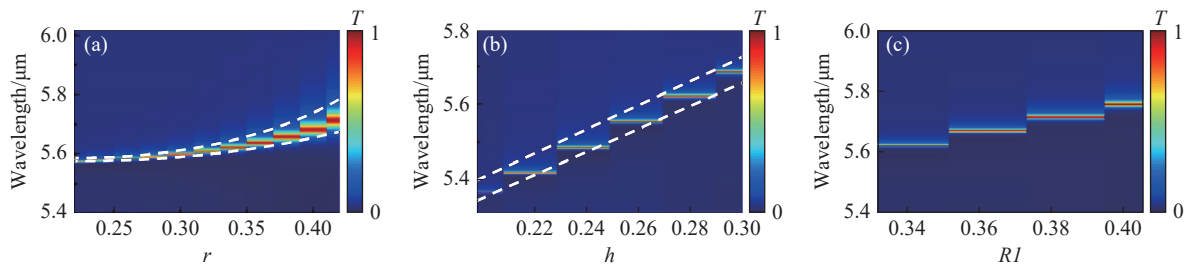


图 6 谐振波长随 (a) 半径 r 、(b) 短半轴 R_1 、(c) 结构高度 h 变化的反射谱图

Fig. 6 Reflection spectrum as a function of (a) the central pillar radius r ; (b) the short semi-axis R_1 ; (c) the structure height h

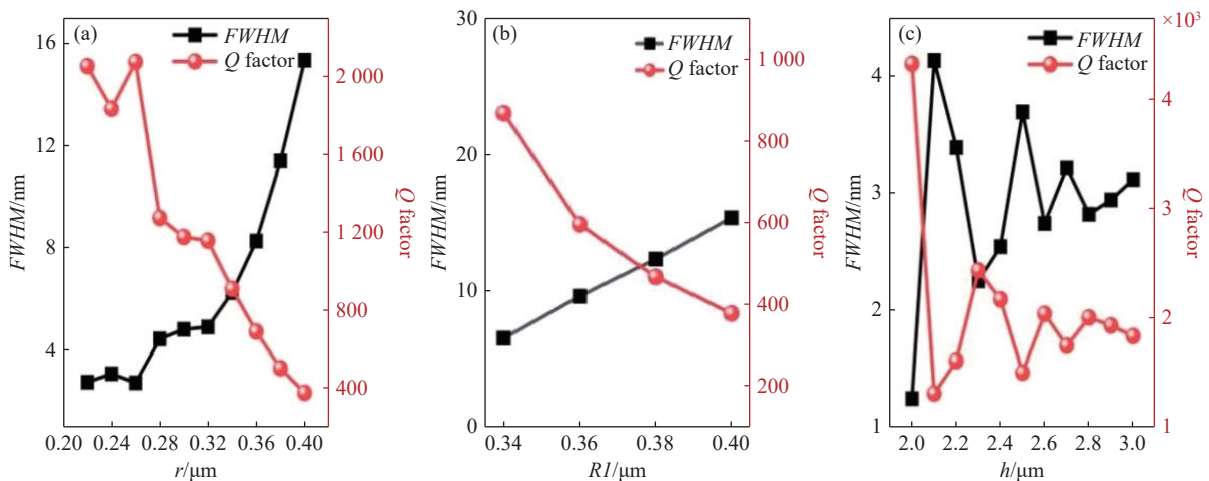


图 7 $FWHM$ 及品质因子 Q 与结构参数 r, R_1, h 的定量关系。(a) 中心柱半径 r ; (b) 短半轴 R_1 ; (c) 结构高度 h

Fig. 7 Quantitative relationship between $FWHM$, quality factor Q , and structural parameters r, R_1, h . (a) Central pillar radius r ; (b) minor semi-axis R_1 ; (c) structure height h

4 结 论

本研究设计并优化了一种基于新型硫系化

合物 Sb_2Se_3 的高性能中红外折射率传感器。其核心结构为由中心圆柱与四个对称放置的半椭圆柱构成的蝶形超表面单元, 通过材料与结构的协同设计, 在 $5.36 \mu\text{m}$ 波长处有效激发了高纯

度磁偶极模式。该模式表现出优异的传感特性: 谐振峰半高全宽仅为 4.89 nm, 折射率灵敏度达 1985 nm/RIU, 品质因子 Q 约为 1096.6, 品质因数 FOM 高达 400(较同类报道提升 4.3 倍以上), 其综合性能优于多数现有方案^[37-38]。参数优化表明, 沿光偏振方向的结构尺寸对 $FWHM$ 的调控效率显著高于沿光传播方向的参数。

本研究的创新与贡献主要体现在以下方面:

(1) 材料与几何的协同设计: 选用在中红外兼具高折射率与低光学损耗的 Sb_2Se_3 , 结合对称破缺的蝶形几何, 有效抑制辐射损耗, 实现高达 2190 倍的局域场增强, 为高灵敏度探测提供了物理基础。

(2) 高效激发与调控准连续域束缚态: 所激发的磁偶极模式本质为辐射损耗极低 ($< 5\%$) 的准连续域束缚态, 这是实现超窄线宽和高 Q 值 (> 1000) 的关键机制, 显著提升了传感器的信噪比与分辨率。

(3) 揭示关键制造容差参数: 系统参数研究表

明, 在维持谐振强度不变的条件下, Q 因子与半椭圆结构的半径 r 及短半轴 R_1 呈负相关趋势, 沿入射光偏振方向的结构参数变化对器件 $FWHM$ 的影响显著大于沿光传播方向的结构参数变化。沿偏振方向的结构尺寸(半径 r 与短半轴 R_1)对谐振线宽的影响显著强于沿传播方向的结构参数(如高度 h), 其影响程度可达 6~8 倍, 为实际工艺容差设计提供了明确依据。

(4) 性能均衡与集成潜力: 该设计在实现高灵敏度、高 Q 值与高 FOM 的同时, 与 CMOS 工艺兼容(所需光刻分辨率 ≤ 8 nm), 并具备多物理场耦合探测潜力, 为片上光子集成系统提供了高性能基础单元。

综上所述, 本文提出的 Sb_2Se_3 蝶形超表面传感器, 在材料选择、结构设计、物理机制与性能指标上具有明显创新, 不仅对实验制备具有指导意义, 也为中红外痕量生物检测、高精度生化监测及下一代集成光子传感系统提供了有力的技术平台。

参考文献:

- [1] SHAMIM S, MOHSIN A S M, RAHMAN M, *et al.*. Recent advances in the metamaterial and metasurface-based biosensor in the gigahertz, terahertz, and optical frequency domains[J]. *Heliyon*, 2024, 10(13): e33272.
- [2] LIU H G, ZHENG L, MA P ZH, *et al.*. Metasurface generated polarization insensitive Fano resonance for high-performance refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13252-13262.
- [3] LI SH P, XIE Y J, MENG J L, *et al.*. Ultracompact and dynamically tunable plasmonic THz switch based on graphene microcavity metamaterial[J]. *Optical Review*, 2020, 27(3): 271-276.
- [4] KOSHELEV K, FAVRAUD G, BOGDANOV A, *et al.*. Nonradiating photonics with resonant dielectric nanostructures[J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(5): 725-745.
- [5] OVERVIG A, ALÙ A. Diffractive nonlocal metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2100633.
- [6] HU T ZH, QIN ZH F, CHEN H, *et al.*. High-Q filtering and dynamic modulation in all-dielectric metasurfaces induced by quasi-BIC[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 18264-18272.
- [7] CHEN J L, CHEN ZH X, ZHOU Z X, *et al.*. Spin-dependent edge detection and imaging enabled by optical circularly polarised states[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(1): 62-70.
- [8] MA J Y, REN J L, ZHANG J H, *et al.*. Quantum imaging using spatially entangled photon pairs from a nonlinear metasurface[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 2.
- [9] DENG Y, WANG X, GONG Z L, *et al.*. All-silicon broadband ultraviolet metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(38): 1802632.
- [10] ZHANG H R, WANG T, TIAN J Y, *et al.*. Quasi-BIC laser enabled by high-contrast grating resonator for gas detection[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(2): 297-304.
- [11] YANG W H, XIAO SH M, SONG Q H, *et al.*. All-dielectric metasurface for high-performance structural color[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1864.
- [12] JI J T, YE ZH L, WANG ZH ZH, *et al.*. Dynamic holographic display with addressable on-chip metasurface network based on lithium niobate photonics[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 332.
- [13] ISLAM M S, SULTANA J, BIABANIFARD M, *et al.*. Tunable localized surface plasmon graphene metasurface for

- multiband superabsorption and terahertz sensing[J]. *Carbon*, 2020, 158: 559-567.
- [14] NEJAD M S, ARDAKANI A G. Significant enhancement of third harmonic generation in graphene layers placed on a random grating supporting plasmonic Anderson localized states[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109123.
- [15] LU X Y, ZHANG T Y, WAN R G, *et al.*. Numerical investigation of narrowband infrared absorber and sensor based on dielectric-metal metasurface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10179-10187.
- [16] ALIPOUR A, MIR A, FARMANI A. Ultra high-sensitivity and tunable dual-band perfect absorber as a plasmonic sensor[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106201.
- [17] LIU N, WEISS T, MESCH M, *et al.*. Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(4): 1103-1107.
- [18] 赵小龙, 常旭艳, 刘艳莉, 等. 基于非连通金属-介质-金属波导耦合 D 形谐振腔的多法诺共振传感器[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(6): 1484-1494.
- ZHAO X L, CHANG X Y, LIU Y L, *et al.*. Multi-Fano resonances sensing based on a non-through metal-insulator-metal waveguide coupling D-shaped cavity[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(6): 1484-1494. (in Chinese).
- [19] 张志东, 张慧男, 梁洁, 等. 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[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(4): 961-971.
- ZHANG ZH D, ZHANG H N, LIANG J, *et al.*. Double Fano resonance and refractive index sensors based on parallel-arranged Au nanorod dimer metasurface arrays[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 961-971. (in Chinese).
- [20] YANG S, NDUKAIFFE J C. Optofluidic transport and assembly of nanoparticles using an all-dielectric quasi-BIC metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 188.
- [21] LI J Y, YE L F. Dielectric dual-dimer metasurface for enhanced mid-infrared chiral sensing under both excitation modes[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(12): 2189-2197.
- [22] YU SH L, LI H, WANG Y S, *et al.*. Multiple Fano resonance excitation of all-dielectric nanoholes cuboid arrays in near infrared region[J]. *Results in Physics*, 2021, 28: 104569.
- [23] CHEN H W, FAN X Y, FANG W J, *et al.*. High-Q Fano resonances in all-dielectric metastructures for enhanced optical biosensing applications[J]. *Biomedical Optics Express*, 2024, 15(1): 294-305.
- [24] LI H, YU SH L, YANG L, *et al.*. High Q-factor multi-Fano resonances in all-dielectric double square hollow metamaterials[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107072.
- [25] FAN H J, LI J, LIU CH, *et al.*. Polarization-independent tetramer metasurface with multi-Fano resonances based on symmetry-protected bound states in the continuum[J]. *Optics Communications*, 2022, 525: 128864.
- [26] YESILKOY F, ARVELO E R, JAHANI Y, *et al.*. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(6): 390-396.
- [27] LI H, XING J J, SHI Y, *et al.*. Performance analysis and optimization of high Q-factor toroidal resonance refractive index sensor based on all-dielectric metasurface[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108752.
- [28] JAHANI Y, ARVELO E R, YESILKOY F, *et al.*. Imaging-based spectrometer-less optofluidic biosensors based on dielectric metasurfaces for detecting extracellular vesicles[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3246.
- [29] NAIK G V, SHALAEV V M, BOLTASSEVA A. Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(24): 3264-3294.
- [30] LUK'YANCHUK B, ZHELUDEV N I, MAIER S A, *et al.*. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 707-715.
- [31] CHRIST A, EKINCI Y, SOLAK H H, *et al.*. Controlling the Fano interference in a plasmonic lattice[J]. *Physical Review B*, 2007, 76(20): 201405.
- [32] LY Q Y, WU X B, ZHOU Y J. Plasmonic nanosensors and metasensors based on new physical mechanisms[J]. *Chemosensors*, 2022, 10(10): 397.
- [33] WANG P, KRASAVIN A V, LIU L F, *et al.*. Molecular plasmonics with metamaterials[J]. *Chemical Reviews*, 2022, 122(19): 15031-15081.
- [34] SINGH R, CAO W, AL-NAIB I, *et al.*. Ultrasensitive terahertz sensing with high-Q Fano resonances in metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(17): 4895595.
- [35] LIU G D, ZHAI X, WANG L L, *et al.*. A high-performance refractive index sensor based on Fano resonance in Si splitting metasurface[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(1): 15-19.

- [36] LIM W X, SINGH R. Universal behaviour of high- Q Fano resonances in metamaterials: terahertz to near-infrared regime[J]. *Nano Convergence*, 2018, 5(1): 5.
- [37] 刘欣丽. 用于太阳能电池的 Sb_2Se_3 薄膜光电特性及微观结构研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.
LIU X L. *Study on photoelectric properties and microstructure of Sb_2Se_3 thin films applied in solar cells*[D]. Ningbo: Ningbo University, 2023. (in Chinese).
- [38] LI SH L, HUANG L J, ZHONG H Z, *et al.*. Observation of multiple quasi-bound states in the continuum by symmetry breaking in a photonic crystal slab[J]. *Photonics Research*, 2025, 13(4): 968-975.
- [39] SUN W W, LIANG ZH ZH, SHI X Y, *et al.*. Potential of high Q dual band Mid-Infrared metasurfaces with Quasi-BIC for refractive index sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110631.
- [40] CHEN X J, LIN J, WANG K. A review of integrated photonic devices using Sb_2Se_3 [J]. *Advanced Physics Research*, 2025, 4(1): 2400080.
- [41] HSU C W, ZHEN B, STONE A D, *et al.*. Bound states in the continuum[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(9): 16048.
- [42] BISWAS S K, ADI W, BEISENOVA A, *et al.*. From weak to strong coupling: quasi-BIC metasurfaces for mid-infrared light-matter interactions[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(16): 2937-2949.
- [43] CHEN X E, ZHANG Y, CAI G X, *et al.*. All-dielectric metasurfaces with high Q-factor Fano resonances enabling multi-scenario sensing[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(20): 4537-4549.
- [44] LEE E, SEO I C, LIM S C, *et al.*. Active switching and tuning of sharp Fano resonances in the mid-infrared spectral region[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25684-25696.

作者简介:



宋宝安(1980—),男,山西晋中人,教授,博士生导师。2009年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现任宁波大学信息学院教授。长期致力于红外材料与光子器件研究,聚焦于硫系材料的可控制备、性能精准调控及光电特性高精度表征。E-mail: songbaoan@nbu.edu.cn