

基于全介质超表面的增强古斯-汉欣位移及传感器设计

朱志帆, 刘志敏

(华东交通大学理学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对天然古斯-汉欣位移(GH 移位)幅值小、信号微弱、难以探测应用的技术瓶颈, 本研究利用连续域束缚态(BICs)与准 BICs 超高 Q 值及强光场局域优势, 以二氧化硅为衬底、二氧化铪矩形纳米棒为核心, 在衬底与纳米棒间嵌入二氧化铪薄膜设计新型全介质反射型 BIC 超表面, 结合数值仿真与理论分析, 通过法诺公式拟合反射光谱计算 Q 值, 系统研究结构参数与入射角对谐振特性、反射相位及古斯-汉欣位移的调控规律。结果表明, 具有高品质因子的准 BIC 可以显著提高 GH 位移, 最大 GH 移位可达 400 多倍谐振波长, 且最大 GH 移位正好位于单位反射率的反射峰, 可用于 GH 移位信号的检测, 其折射率传感灵敏度可达 $3.58 \times 10^6 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 。该研究实现古斯-汉欣位移巨幅增强与多维度调控, 为超灵敏折射率传感等微纳光子器件实用化提供新方案。

关键词: 古斯-汉欣位移; 连续域束缚态; BIC; 准 BIC; 全介质超表面

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

Enhanced Goos-Hänchen Shift and Sensor Design Based on All-Dielectric Metasurface

Zhu Zhifan, Liu Zhimin

(1.School of Science, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: To address the technical bottlenecks of natural Goos-Hänchen (GH) shift, including small amplitude, weak signal intensity, and difficulties in detection and practical application, this study leverages the ultra-high Q-factor and strong light field localization characteristics of bound states in the continuum (BICs) and quasi-BICs. With silica as the substrate and hafnium dioxide rectangular nanorods as the core structure, a novel all-dielectric reflective BIC metasurface is proposed by embedding a hafnium dioxide thin film between the substrate and nanorods. Combined with numerical simulation and theoretical analysis, the Q-factor is calculated by fitting the reflection spectrum with the Fano formula, and the modulation laws of structural parameters and incident angle on resonance characteristics, reflection phase and Goos-Hänchen shift are systematically investigated. The results show that quasi-BIC with a high-quality factor can significantly enhance the GH shift, with the maximum GH shift reaching more than 400 times the resonant wavelength. The maximum GH shift exactly occurs at the reflection peak with unit reflectivity, which facilitates the detection of GH shift signals, and the corresponding refractive index sensing sensitivity reaches $3.58 \times 10^6 \mu\text{m}/\text{RIU}$. This research realizes the giant enhancement and multi-dimensional modulation of the Goos-Hänchen shift, providing a new scheme for the practical application of micro-nano photonic devices such as ultra-sensitive refractive index sensors.

Key words: Goos-Hänchen shift; bound states in the continuum; BIC; quasi-BIC; all-dielectric metasurface

古斯-汉欣(GH)位移是光束在两介质界面反射时, 反射光束相对于几何光学预言位置的横向偏移现象, 1947 年由 Goos 和 Hänchen 通过实验验证^[1], 其本质是不同角谱平面波反射相位延迟相干叠加导致的光束重心偏移。作为经典界面光学效应^[2,3], GH 位移揭示了有限光束反射的波粒二象性, 研究已拓展

收稿日期: 2026-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(12164018); 江西省自然科学基金重点项目(20224ACB201008)

至多学科,在超灵敏折射率传感^[4]、光开关^[5]、偏振分束^[6]、光束调控^[7]等微纳光子学器件领域展现出重要的工程应用价值。但天然 GH 位移幅值仅为入射波长数倍,信号微弱,难以探测且无法满足实际需求,因此实现其巨幅增强与灵活调控、兼顾可探测性,成为该领域核心难题。

近年来,研究工作者围绕 GH 位移增强提出多种方案,包括表面等离子体共振^[8-10]、光子晶体缺陷模式^[11-13]、慢光效应^[14-16]等,但均存在固有局限:金属等离子体方案损耗高、Q 值低^[17];光子晶体方案制备复杂、调控性差^[18];常规超表面方案增强上限低,难以兼顾高反射率与大幅位移。更关键的是,多数研究未充分挖掘高 Q 值光学谐振模式与 GH 位移增强的内在关联,无法实现位移幅值与方向的多维度调控,限制了其实用化发展。

连续域束缚态^[19](BIC)及准 BIC 为解决上述瓶颈提供了新机制,二者具备超高 Q 值和强光场局域能力,可强化光与物质相互作用,且反射型 BIC 结构能兼顾高 Q 值与近 100%反射率,解决信号探测难题。基于此,本文设计新型全介质反射型 BIC 超表面,通过微扰结构参数将理想 BIC 转化为超高 Q 值准 BIC,系统探究结构参数对谐振特性的调控规律,分析 GH 位移增强机制,探索其传感应用潜力,该设计可通过成熟工艺制备,为相关器件实用化提供新方案。

1 器件结构

本文设计的用于增强 GH 位移的全介质超表面结构如图 1 所示,仿真过程选取横电(TE)偏振模式,该结构以二氧化硅(SiO_2)为衬底,核心为二氧化铪(HfO_2)矩形纳米棒,且在衬底与纳米棒之间嵌入一层二氧化铪薄膜。此超表面 BIC/QBIC 共振波长约为 985 nm,二氧化铪和二氧化硅的折射率分别约为 1.88、1.45^[20],两种材料在谐振波长附近的光学损耗几乎为 0,可忽略不计。该超表面的具体结构参数如下:二氧化硅衬底厚 10 nm, HfO_2 矩形纳米棒厚度 $t = 150$ nm,衬底与纳米棒间的 HfO_2 嵌入层厚度 $h = 50$ nm;超表面单胞在 x 、 y 轴方向的周期 p 均为 850 nm,单胞内两个矩形纳米棒沿 x 轴间距为 225 nm;两个纳米棒沿 y 轴的长度一致,均为 $w = 750$ nm,沿 x 轴纳米棒的长度存在差异,分别为 $L_1 = 200$ nm 和 $L_1 + d$, d 为二者的长度差,是调控超表面光学特性的关键参数。

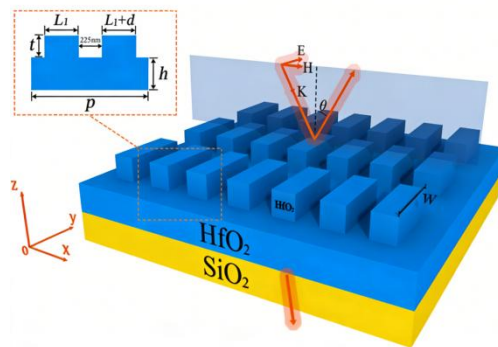


图 1 超表面结构示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Metasurface Structure

2 结构参数与入射角对反射光谱的影响

本文系统探究了超表面单胞内纳米棒长度差 d 、入射光角度 θ 对超表面反射光谱的调控规律,明确了结构对称性破缺程度与准 BIC 模式谐振特性的内在关联。当入射角固定为 2° 时, $d = 0$ nm 的超表面结构保持完美对称,本征模式与自由空间辐射通道完全解耦,处于理想 BIC 状态,反射光谱中无明显谐振峰;当 $d \neq 0$ nm 时,结构面内对称性被打破,理想 BIC 退化为具有有限线宽的准 BIC 模式,反射光谱中出现典型的非对称法诺共振线型,且随着 d 从 20 nm 增大至 60 nm,法诺共振的线宽持续拓宽,谐振特征逐渐减弱,如图 2(a)所示。接下来研究不同入射角对应的反射光谱,我们固定 $d = 20$ nm,入射角从 0°

增大至 2.5° ，法诺共振的线宽无明显变化，说明该超表面的法诺共振的线宽对入射角的变化具有较好的鲁棒性，在小角度入射范围内光学特性稳定，如图 2(b)所示。图 2(c)为结构剖面示意图。

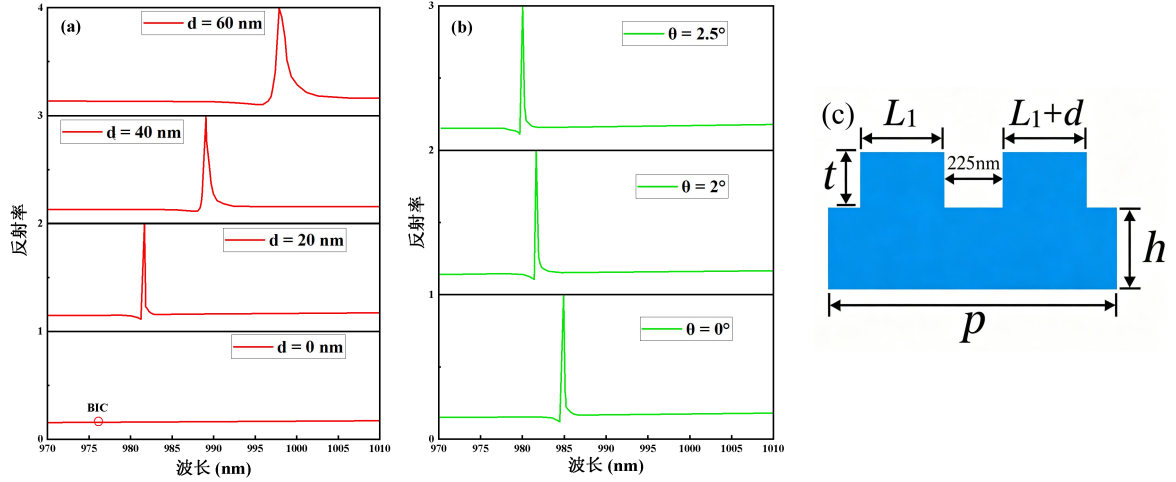


图 2 (a) 矩形纳米棒长度差 d 的影响($\theta = 2^\circ$) ; (b) 入射角 θ 的影响($d = 20$ nm) (c) 结构剖面示意图

Fig.2 (a) Effect of the length difference d of rectangular nanorods ($\theta = 2^\circ$); (b) Effect of the incident angle θ ($d = 20$ nm) (c)

Schematic cross-section of the structure

为探究 d 的变化对超表面 Q 值的影响，基于经典法诺公式对仿真得到的反射光谱进行拟合，经典法诺公式为：

$$T(\omega) = T_0 + A_0 \frac{[q + 2(\omega - \omega_0)/\Gamma]^2}{1 + [2(\omega - \omega_0)/\Gamma]^2} \quad (1)$$

式中， ω_0 为谐振频率， Γ 为谐振线宽， T_0 为背景散射参数， A_0 为连续态与离散态之间的耦合系数， q 为布雷特-维格纳-法诺参数，决定谐振的非对称性。可由该公式得出，法诺共振的品质因子 $Q = \omega_0/\Gamma$ 。图 3(a)为 $d = 40$ nm 时的反射光谱拟合曲线与仿真曲线对比，二者高度吻合，验证了拟合方法的有效性。

当 $d = 40$ nm 时，采用上述公式对超表面反射光谱进行拟合，拟合曲线与仿真所得反射光谱高度吻合，结果如图 3(a)所示。图 3(b)为不同不对称参数 d 对应的超表面 Q 值变化曲线，其中参数 d 定义为超表面单胞内两根二氧化钛矩形纳米棒沿 x 轴的长度差值， d 取负值仅代表纳米棒长度偏离基准值的方向与正值相反，对对称性破缺的反向调控，且 Q 值关于 d 的正负取值呈对称分布。由测试结果可知， d 越趋近于 0 nm，结构的 Q 值越趋近于无穷大。进一步通过拟合分析可得，超表面 Q 值与 d^{-2} 呈现良好的线性对应关系，如图 3(c)所示，该规律与 BIC 主导的非对称共振理论高度契合，证明结构对称性破缺的程度直接决定了准束缚态共振的 Q 值特性^[23]。对不同 d 值下的结构 Q 值进行量化计算发现：当 $d = 5$ nm 时，超表面 Q 值约为 1×10^4 ；且随着 d 的不断增大，结构 Q 值持续减小，该变化规律完全符合 BIC 的典型物理特性。究其机理， d 越小、 Q 值越高，意味着超表面向自由空间辐射的能量越少，电磁场能量的局域束缚效果越强，能够有效强化结构的光与物质相互作用效应，也为该超表面结构的传感应用提供了优异的性能基础。

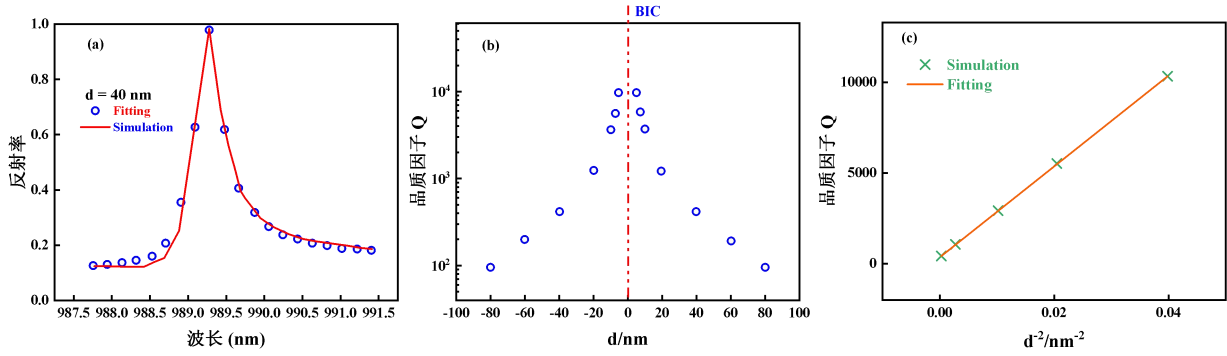


图 3 (a) $d = 40$ nm 时反射光谱的仿真与拟合曲线; (b) 不同 d 值对应的 Q 值; (c) Q 值与 d^2 的线性关系

Fig.3 (a) Simulated and fitted curves of the reflection spectrum at $d = 40$ nm; (b) Q values corresponding to different values of d ; (c) Linear relationship between Q factor and d^2

图 4(a)、图 4(b)分别为 $d = 20$ nm 和 $d = 40$ nm 时, 超表面在 xz 平面($y = 0$ nm)的电场分布云图, 横坐标为 x 轴尺寸(nm), 纵坐标为电场强度 E (V/m), 并标注了 HfO_2 和 SiO_2 的位置区域。对比可见, $d = 20$ nm 时超表面内部的电场强度更高, 能量被更有效地限制在结构内部; $d = 40$ nm 时电场强度显著降低, 能量向自由空间辐射增多, 说明 d 越小, 超表面的光场限制能力越强, 光与物质的相互作用就会越显著, 更适用于传感等应用场景。

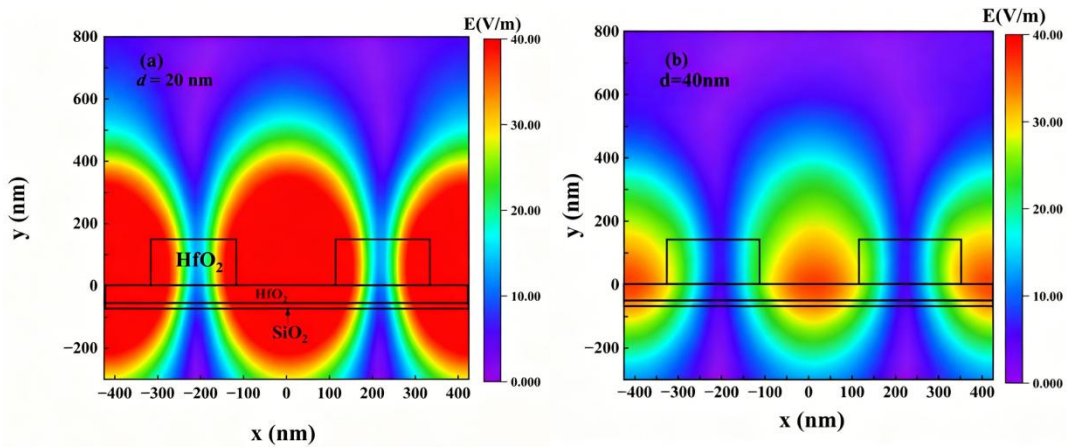


图 4 (a) $d = 20$ nm 时 xz 平面的电场分布; (b) $d = 40$ nm 时 xz 平面的电场分布

Fig.4 (a) Electric field distribution in the xz plane at $d = 20$ nm; (b) Electric field distribution in the xz plane at $d = 40$ nm

3 古斯-汉欣位移

连续域束缚态诱导的高 Q 值准 BIC 共振是实现古斯-汉欣(GH)位移巨幅增强的核心物理基础, 而反射相位在入射角附近的剧烈突变则是位移增强的直接诱因。本文研究固定谐振波长 λ_0 , 通过稳态相位法结合反射相位角谱的变化规律, 系统探究了纳米棒长度差 d 、超表面周期 p 、纳米棒厚度 t 等结构参数对 GH 位移的调控规律, 明确了各参数的调控机制与工程价值, 同时实现了 GH 位移的双向调控, 为其在光场操控、光学传感等领域的应用提供了多维度的设计思路。

固定谐振波长 λ_0 , 计算了不同 d 值(5、20、40 nm)对应的反射角谱, 结果如图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)所示。反射角谱的带宽会随着 d 的变化而变化, d 值越小, 准 BIC 共振的 Q 值越高, 反射角谱的带宽越窄, 且所有 d 值下的反射率均能达到 1, 实现完美反射特性。这一特性突破了传统 GH 位移增强方案中“位移增强与高反射率不可兼得”的固有局限, 完美解决了位移信号实验探测难度大的核心问题, 传统方案中位移增强往往伴随反射率的显著下降, 导致探测信号信噪比较低, 而本研究设计的全介质超表面在实现位移巨幅增强的同时保持完美反射, 为后续实验验证奠定了良好的器件基础。

不同 d 值对应的反射相位角谱如图 5(d)~图 5(f)所示, 图 5(d) ($d = 5$ nm)、图 5(e) ($d = 20$ nm)、图 5(f)

($d = 40 \text{ nm}$)清晰显示, 反射相位均在入射角 2° 附近发生剧烈的非线性变化, 且这种变化的剧烈程度与 d 值呈显著的负相关关系: 随着 d 增大, 相位角谱的线宽逐渐变宽, 相位在入射角 2° 附近的变化速率逐步放缓, 相位变化幅度显著降低。其中 $d = 5 \text{ nm}$ 时, 反射相位在 2° 入射角附近的变化量约为 280° , 是所有 d 值中变化最剧烈的; 而 $d = 40 \text{ nm}$ 时, 反射相位的变化量仅约为 120° , 相位变化的陡峭程度大幅减弱。这一结果直接印证了结构对称性破缺程度对 GH 位移的调控作用: d 值越小, 结构对称性破缺越轻微, 准 BIC 共振的 Q 值越高, 光场局域能力越强, 共振模式对入射角的敏感性也越高, 最终表现为反射相位随入射角的变化越剧烈。

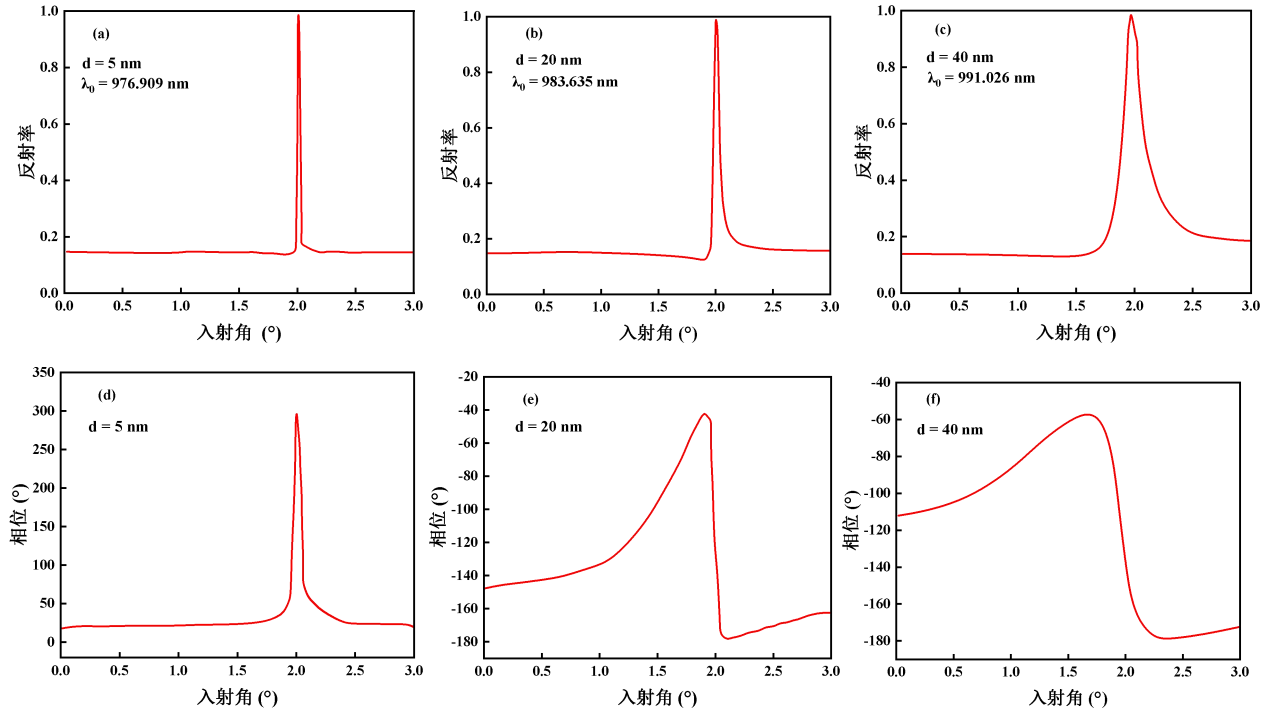


图 5 超表面的反射率和相位角谱。(a) $d = 5 \text{ nm}$ ($\lambda_0 = 976.909 \text{ nm}$); (b) $d = 20 \text{ nm}$ ($\lambda_0 = 983.635 \text{ nm}$); (c) $d = 40 \text{ nm}$ ($\lambda_0 = 991.026 \text{ nm}$); (d) $d = 5 \text{ nm}$; (e) $d = 20 \text{ nm}$; (f) $d = 40 \text{ nm}$

Fig. 5 Reflection angular spectra and phase angular spectra of the metasurface. (a) $d = 5 \text{ nm}$ ($\lambda_0 = 976.909 \text{ nm}$); (b) $d = 20 \text{ nm}$ ($\lambda_0 = 983.635 \text{ nm}$); (c) $d = 40 \text{ nm}$ ($\lambda_0 = 991.026 \text{ nm}$); (d) $d = 5 \text{ nm}$; (e) $d = 20 \text{ nm}$; (f) $d = 40 \text{ nm}$

反射相位角谱和阿特曼的稳态相位法是计算微纳光学结构中 GH 位移的经典方法, 当入射光束腰斑足够宽、满足准平面波入射条件时, GH 位移的计算公式为:

$$GH = -\frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \quad (2)$$

式中, φ 为反射相位, λ_0 为入射光自由空间波长, θ 为入射角。由公式可知, GH 位移的幅值与反射相位对入射角的一阶偏导数成正比, 反射相位随着入射角的变化速率越快, GH 位移的幅值越大, 这也是本研究中 d 值越小 GH 位移增强效果越显著的直接理论依据。根据公式(2)和反射相位角谱, 计算不同 d 值下超表面的 GH 位移角谱, 结果如图 6 所示。所有 d 值下的超表面均在入射角 $\theta = 2^\circ$ 附近出现最大 GH 位移, 这是因为该入射角下超表面实现了完美的反射谐振, 反射相位在此处的变化速率达到峰值, 与准 BIC 共振的角度匹配条件高度契合。随着 d 从 5 nm 增大至 40 nm , 最大 GH 位移值呈现出显著的单调递减趋势, 体现了 d 作为核心调控参数的重要性: $d = 5 \text{ nm}$ 时, 2° 入射角附近出现明显的正、负两个最大 GH 位移, 正最大 GH 位移达到 $405 \lambda_0$, 负最大 GH 位移达到 $-436 \lambda_0$, 实现了 GH 位移的巨幅增强与双向调控; $d = 20 \text{ nm}$ 时, 正、负最大 GH 位移分别降至 $189 \lambda_0$ 和 $-205 \lambda_0$; $d = 40 \text{ nm}$ 时, 正最大 GH 位移仅为 $86 \lambda_0$, 负最大 GH 位移为 $-92 \lambda_0$, 位移增强效果大幅减弱。

本文实现的 GH 位移增强效果相较于传统方案具有显著优势: 基于表面等离子体共振的 GH 位移增

强方案受金属高损耗限制, 位移增强倍数通常不超过 $50 \lambda_0$ ^[21]; 基于光子晶体缺陷模式的方案虽能实现约 $100 \lambda_0$ 的位移增强, 但制备工艺复杂, 且反射率普遍低于 80%^[22]; 而本研究通过准 BIC 共振实现的 GH 位移在 $d = 5 \text{ nm}$ 时达到 $405 \lambda_0$, 且反射率为 1, 在增强倍数和信号可探测性上均实现了突破。同时, GH 位移的双向调控特性具有重要的工程应用价值: 正 GH 位移可使反射光束与入射光束在空间上有效分离, 适用于超灵敏折射率传感、波分复用、光束偏转等主流应用场景; 负 GH 位移则能实现反射光束的反向偏移, 可应用于光存储、闭合光路设计、光开关的双向调控等特殊场景, 大幅拓展了超表面在光场操控领域的应用范围。

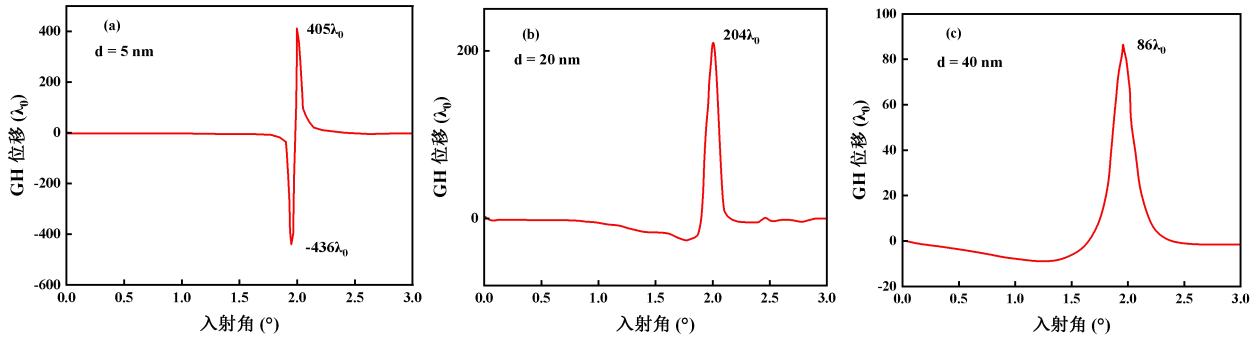


图 6 古斯-汉欣位移角谱。(a) $d=5\text{nm}$; (b) $d=20\text{nm}$; (c) $d=40\text{nm}$

Fig.6 Goos-Hänchen shift angular spectrum. (a) $d = 5 \text{ nm}$; (b) $d = 20 \text{ nm}$; (c) $d = 40 \text{ nm}$

为进一步探究超表面其他结构参数对 GH 位移的调控规律, 本文固定 $d = 20 \text{ nm}$, 分别计算了超表面周期 p 和矩形纳米棒厚度 t 对 GH 位移的影响, 结果如图 7 所示。研究发现, p 和 t 对 GH 位移的数值大小均无显著影响, 但会使最大 GH 位移对应的入射角发生规律性偏移: 当超表面周期 p 从 800 nm 增大至 900 nm 时, 最大 GH 位移对应的入射角从 1.8° 偏移至 2.2° ; 当纳米棒厚度 t 从 120 nm 增加至 180 nm 时, 最大 GH 位移对应的入射角从 2.3° 偏移至 1.7° 。这一调控规律的物理根源在于, p 和 t 的变化虽不会改变超表面的结构对称性破缺程度, 对准 BIC 共振的 Q 值影响较弱, 因此不会改变反射相位的变化速率, 最终对 GH 位移的幅值无明显作用; 但 p 和 t 的变化会改变超表面的有效折射率与光场传播的波矢分布, 进而改变准 BIC 共振的角度匹配条件, 使反射相位剧烈变化的入射角发生偏移。

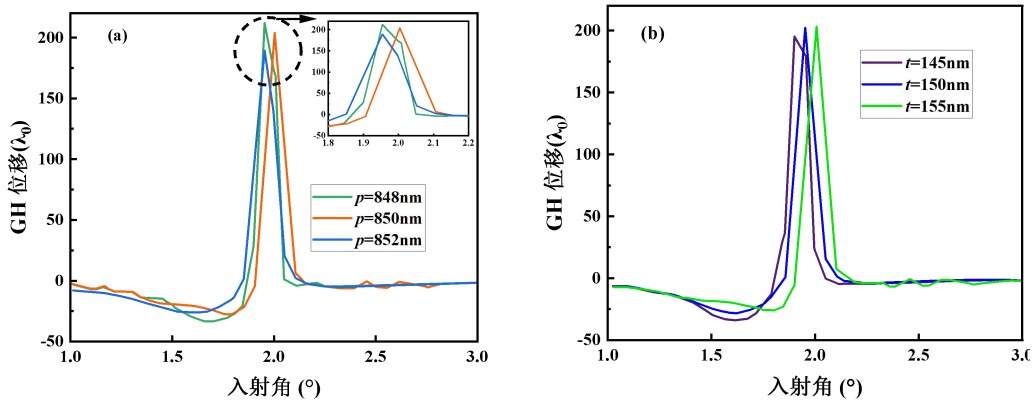


图 7 结构参数对 GH 位移的影响($d = 20 \text{ nm}$): (a) 周期 p 的影响; (b) 矩形纳米棒厚度 t 的影响

Fig.7 Effect of structural parameters on GH displacement($d = 20 \text{ nm}$): (a) Effect of period p ; (b) Effect of thickness t of rectangular nanorods

这一特性具有重要的工程设计意义, 在实际器件应用中, 可通过调控超表面周期 p 和纳米棒厚度 t , 实现最大 GH 位移对应的入射角的灵活调谐, 使器件适配不同的入射角度需求, 提升了器件的环境适应性与集成兼容性。例如, 在片上集成光子器件中, 入射光的角度往往受限于集成光路的结构设计, 可通过微调 p 或 t 的数值, 使超表面的最大 GH 位移与集成光路的入射角度匹配, 无需改变核心调控参数 d ,

避免了 GH 位移幅值的损失。

4 传感器应用

超表面在 $d \neq 0$ nm 时形成的窄线宽法诺共振具有高 Q 值, 说明其用作传感器时具有超高的灵敏度, 因此将其应用于折射率(RI)传感, 检测环境折射率的微小变化。折射率传感器在气候监测、生化检测等诸多领域具有迫切的应用需求, 例如 0 °C、101.325 kPa 条件下二氧化碳的折射率约为 1.0005, 要准确测量二氧化碳的折射率变化, 需要测量精度达到 1×10^{-4} 的折射率传感器, 本文设计的超表面能满足这一测量精度要求。

图 8(a)分析了 $d = 5$ nm 时, 超表面的环境折射率 n 变化对 GH 位移和谐振波长的影响。 n 从 1 变化至 1.0001 时, GH 位移发生明显变化, 折射率增大使最大 GH 位移向更小的入射角方向移动。 $n = 1$ 时, 2° 入射角下的 GH 位移为 $405\lambda_0 = 395.11 \mu\text{m}$ (其中谐振波长 $\lambda_0 = 976.909$ nm); $n = 1.0001$ 时, 2° 入射角下的 GH 位移为 $37.14 \mu\text{m}$ (谐振波长 $\lambda_0 = 977.187$ nm)。传感器灵敏度定义为 $S = \Delta GH / \Delta n$, 计算得出该超表面的灵敏度为 $3.58 \times 10^6 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 。

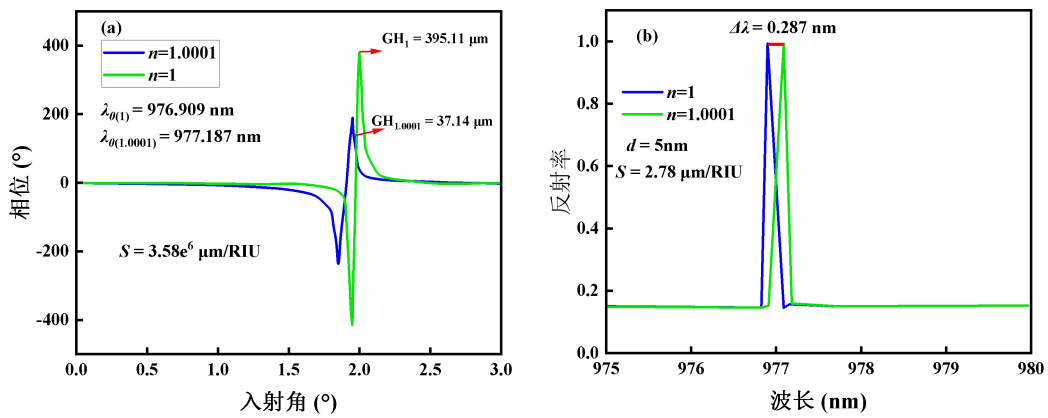


图 8 超表面的折射率传感灵敏度($d = 5$ nm) : (a)GH 位移信号的传感灵敏度; (b)谐振波长信号的传感灵敏度

Fig.8 Refractive index sensing sensitivity of metasurface ($d = 5$ nm): (a) Sensing sensitivity of GH displacement signal; (b) Sensing sensitivity of resonant wavelength signal

图 8(b)显示, n 从 1 变化至 1.0001 时, 谐振波长发生红移, 基于谐振波长的灵敏度 $S = \Delta\lambda_0 / \Delta n = 2.78 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 。对比可知, 以 GH 位移的变化量为检测信号的折射率传感器, 其灵敏度比以波长变化量为检测信号的传感器高近 1×10^6 倍。

5 结论

采用数值仿真与理论分析方法, 对全介质超表面进行了研究, 得出以下结论:

1) 该超表面以 SiO_2 为衬底、 HfO_2 为核心纳米棒结构, 通过调控单胞内纳米棒的 x 轴长度差 d , 可打破结构对称性, 使理想 BIC 转化为具有超高 Q 值的 QBIC; d 越小, Q 值越高, 光场限制能力越强, $d = 5$ nm 时 Q 值可达 1×10^4 。

2) 基于 QBIC 的高 Q 值特性, 该超表面实现了 GH 位移的显著增强, $d = 5$ nm 时最大 GH 位移可达 $405 \lambda_0$, 且最大 GH 位移均出现在反射率为 1 的反射峰位置, 解决了传统结构 GH 位移信号难以检测的问题; 结构参数 d 是调控 GH 位移的核心, p 和 t 仅改变最大 GH 位移对应的入射角, 对数值大小无显著影响。

3) 该超表面在折射率传感中表现出超高灵敏度, 以 GH 位移为检测信号时, 灵敏度达 $3.58 \times 10^6 \mu\text{m}/\text{RIU}$, 远高于以谐振波长为检测信号的灵敏度, 且显著优于现有基于 BIC 的超表面传感器, 能实现对折射率微小变化的精准检测, 适用于环境气体、生物检测等领域。

参考文献:

- [1] Goos F, Hänchen H. Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion [J]. *Annalen der Physik*, 1947, 436 (7/8): 333-346.
- [2] Sahu R, Hease W, Rueda A, et al. Quantum-enabled operation of a microwave-optical interface [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1276.
- [3] Vashishtha P, Kofler C, Verma A K, et al. Epitaxial interface-driven photoresponse enhancement in monolayer WS₂ - MoS₂ lateral heterostructures [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026, 36 (8): e12962.
- [4] Saadatmand S B, Ahmadi V, Hamidi S M. Quasi-BIC based all-dielectric metasurfaces for ultra-sensitive refractive index and temperature sensing [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 20625.
- [5] Li Dongyang, Wu Jiahang, Wang Xingyu, et al. Reversible triple-mode photo- and radioluminescence and nonlinear optical switching in highly efficient 0D hybrid cuprous halides [J]. *Chemistry of Materials*, 2023, 35 (17): 6598-6611.
- [6] Chen Nan, Yue Wanglin, Xu Yiming, et al. Design and simulation of a compact polarization beam splitter based on dual-core photonic crystal fiber with elliptical gold layer [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 18017.
- [7] Khan S, Bilal M, Uddin S, et al. Spherical manipulation of lateral shifts in reflection and transmission through chiral medium [J]. *Results in Physics*, 2024, 60: 107647.
- [8] Hou Wenbo, Cronin S B. A review of surface plasmon resonance-enhanced photocatalysis [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23 (13): 1612-1619.
- [9] Chen Yong, Ming Hai. Review of surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensor [J]. *Photonic Sensors*, 2012, 2 (1): 37-49.
- [10] Anton Van Der Merwe P. Surface plasmon resonance [M] // Harding S E, ed. *Protein-ligand interactions: hydrodynamics and calorimetry*. Oxford: Oxford University Press, 2000: 137-170.
- [11] Tay F, Sanders S, Baydin A, et al. Terahertz chiral photonic-crystal cavities for Dirac gap engineering in graphene [J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 5270.
- [12] Sayed H, Ahmed A M, Hajjiah A, et al. Highly sensitive salinity sensing using annular one-dimensional photonic crystals [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 18337.
- [13] Saha D, Dey A, Mukhopadhyay S. Next-generation high-speed optical switch using photonic crystal: a review [J]. *Journal of Optics*, 2026.
- [14] Li Lijun, Hou Shanglin. Temperature sensing based on slow light via stimulated Brillouin scattering in M-shaped few-mode fiber [J]. *PLoS One*, 2026, 21 (2): e0342177.
- [15] Zhang Baohe, Dong Anlong, Wang Junru, et al. Strong coupling and electromagnetically induced transparency in multiple-BIC-driven metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2025, 25 (11): 4568-4575.
- [16] Ghodrati M, Uniyal A. Exploring metasurface-based biosensor: new frontiers in sensitivity and versatility for biomedical applications [J]. *Plasmonics*, 2025, 20 (7): 5589-5608.
- [17] Wang Xiaojian, Yin Bing, Jiang Lirong, et al. Ligand-protected metal nanoclusters as low-loss, highly polarized emitters for optical waveguides [J]. *Science*, 2023, 381 (6659): 784-790.
- [18] Kumar N, Suthar B, Nayak C, et al. Analysis of a gas sensor based on one-dimensional photonic crystal structure with a designed defect cavity [J]. *Physica Scripta*, 2023, 98 (6): 065506.
- [19] Hsu C W, Zhen Bo, Stone A D, et al. Bound states in the continuum [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1 (9): 16048.
- [20] Alam S, Paul P, Beladiya V, et al. Heterostructure films of SiO₂ and HfO₂ for high-power laser optics prepared by plasma-enhanced atomic layer deposition [J]. *Coatings*, 2023, 13 (2): 278.
- [21] Petrov N I, Danilov V A, Popov V V, et al. Large positive and negative Goos-Hänchen shifts near the surface plasmon resonance in subwavelength grating [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (5): 7552.

- [22] Ashenaei A, Jamshidi-Ghaleh K, Abdi-Ghaleh R. Goos – Hänchen shift in a 1D-photonic crystal structure containing a Weyl semimetal defect layer [J]. *Applied Optics*, 2025, 64 (22) : 6432.
- [23] Jin Jicheng, Yin Xuefan, Ni Liangfu, et al. Topologically enabled ultrahigh-Q guided resonances robust to out-of-plane scattering [J]. *Nature*, 2019, 574 (7779) : 501-504.



第一作者：朱志帆（2001—），男，硕士研究生，研究方向为微纳光学。



通信作者：刘志敏（1979—），男，教授，博士，博士生导师，赣鄱英才、俊才，全球前 2% 顶尖科学家，研究方向为微纳光学、超材料、深度学习。