

文章编号: 2095-4980(2024)04-0353-08

基于 SWCNTs 薄膜的多谐振环太赫兹超表面传感特性

张 向, 罗 帆, 任铭欣, 宋博晨, 王 玥*

(西安理工大学 陕西省超快光电技术与太赫兹科学重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 基于单壁碳纳米管(SWCNTs)薄膜, 构建了一种具有多频窄带共振效应的新型太赫兹 (THz) 超表面。深入分析了周期性微结构单元参数对超表面的共振特性的影响; 通过仿真及理论计算对器件的共振耦合机理进行研究, 二者具有较好的一致性。通过在超表面覆盖不同折射率的介质层, 分析这种 THz 超表面器件的折射率传感特性, 灵敏度分析结果显示, 该超表面器件可实现最高 64 GHz/RIU 的折射率传感。

关键词: 太赫兹; 单壁碳纳米管(SWCNTs); 超表面; 传感器

中图分类号: TN607

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023332

THz metasurface sensing characteristics of multiple resonant rings based on Single-Walled Carbon Nanotubes films

ZHANG Xiang, LUO Fan, REN Mingxin, SONG Bochen, WANG Yue*

(Key Laboratory of Ultrafast Photoelectric Technology and Terahertz Science in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: A novel terahertz (THz) metasurface with multi-frequency narrow band resonance effect is constructed based on Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs) thin films. The influence of structural parameters of periodic microstructure unit on the resonance characteristics of the metasurface is analyzed. Furthermore, the resonance coupling mechanism of the device is studied, and the simulation and theoretical calculations have good consistency. In addition, the refractive index sensing characteristics of this THz metasurface device are analyzed by covering a dielectric layer with different refractive indexes on the metasurface. The function fitting results show that the metasurface device can achieve high sensitivity refractive index sensing up to 64 GHz/RIU.

Keywords: terahertz; Single-Walled Carbon Nanotubes; metasurface; sensor

太赫兹 (THz) 波是指频率介于 0.1~10 THz 内的电磁波^[1]。THz 波在近年来的研究中引起了广泛关注, 尤其是在生物化学传感检测领域^[2]。一方面是由于许多生物化学物质, 如葡萄糖、癌细胞和脱氧核糖核酸等大分子物质的振动频率位于 THz 波段, 形成了独特的指纹谱特性^[3-5]; 另一方面, THz 辐射具有能量低、非电离辐射等特性, 对待测样品不会造成损伤或电离效应, 因此在生物化学传感领域具有广泛的应用前景^[6]。但实际应用中, 当待测物的尺寸小于 THz 波长时, 无法充分与 THz 波产生相互作用, 这限制了 THz 光谱检测的灵敏度和有效性^[7]。为克服这一局限, 提出了一种基于 THz 超表面的微量生物化学物质检测方案。THz 超表面是一种人工设计的材料, 其特别之处在于其结构的周期性排列具有亚波长特性^[8-10], 通过精心设计超表面的单元结构尺寸、排列方式和其他参数, 可赋予超表面许多普通材料所不具备的特殊物理性质。因此, THz 超表面成为 THz 波在生物化学传感检测领域的热门研究方向。超表面结合 THz 光谱技术, 可以通过测量超表面的共振响应差异, 实现对微量物质的高灵敏检测; 并通过合理设计结构, 显著提高检测灵敏度^[11-13]。将待测样品覆盖在具有特定谐振结构的超表面器件顶部时, 由于超表面对周围环境特性, 如折射率和厚度等^[14]非常敏感, 当引入的待测样品发生微小变化

收稿日期: 2023-10-26; 修回日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61975163); 陕西省重点研发计划资助项目(2023GXLH-038); 陕西高校青年创新团队资助项目(21JP084); 西安市科技局重点产业链关键核心技术攻关资助项目(23LLRH0057)

*通信作者: 王 玥 email:wangyue2017@xaut.edu.cn

时, 这种变化可以转化为响应谱中透射或反射信号的频率或幅值的显著变化, 进而在微量或痕量级别上实现 THz 光谱的高灵敏度检测。传统的 THz 超表面主要基于金属材料^[15-17], 金属材料的电导率较高, 欧姆损耗较大, 品质因数较低, 限制了太赫兹超材料在生物化学传感检测领域的应用^[18]。为解决这一问题, 研究者们开始探索其他材料, 单壁碳纳米管(SWCNTs)薄膜成为其中一种备受关注的材料。SWCNTs 是一种具有独特结构和卓越性能的纳米材料, 具有出色的机械强度、导电性和导热性, 因此在纳米科技领域得到广泛关注和研究。利用 SWCNTs 薄膜制备高质量的碳纳米管薄膜, 对于实现其在电子器件、传感器、能量存储和导热界面等领域的应用具有重要意义^[19-21]。本文基于 SWCNTs 薄膜设计了一种新的由外部圆环、中间闭合方环和内部开口谐振环三部分构成的一种结构复合型 THz 超表面结构。仿真结果表明, 这些基本结构的嵌套组合能够增强不同共振模式的组分之间的耦合效应, 能在 0~0.8 THz 频率范围内产生 3 个谐振峰, 为太赫兹超表面的进一步发展提供了新的方向, 特别是在生物化学传感检测领域的应用。

1 器件设计与仿真

图 1(a)为所设计的多带 THz 超表面吸收器的结构示意图, 器件自上而下由刻蚀有周期性微结构的 SWCNTs 薄膜、底层聚酰亚胺(PI)衬底双层结构组成。SWCNTs 薄膜及 PI 膜的厚度分别为 $t_1=3\ \mu\text{m}$, $t_2=20\ \mu\text{m}$; 周期性微结构单元的圆环外部直径 $a=256\ \mu\text{m}$, 大方环边长 $b=165\ \mu\text{m}$, 小方环边长 $c=66\ \mu\text{m}$ 、方环的开口大小 $d=12\ \mu\text{m}$, 结构线宽 $w=15\ \mu\text{m}$, 如图 1(b)所示, 整个结构单元以 $p_x=p_y=300\ \mu\text{m}$ 周期性排列。通过导入实验提取的 SWCNTs 薄膜在 THz 范围的介电参数, 对 SWCNTs 薄膜进行仿真建模^[22], 下方衬底介质采用柔性聚酰亚胺(Polyimide)材料(具有较好的柔韧性和优异的机械耐久性, 在 THz 波段介电常数较小, 常被用作 THz 超表面衬底材料), 其相对介电常数为 $3.5+0.00945i$ ^[23]。利用三维电磁场仿真(Computer Simulation Technology, CST)软件对提出的碳基 THz 超表面在 THz 波段的电磁响应进行仿真。设置入射 THz 波频率范围为 0~0.8 THz, 在 z 轴方向添加 port 激励, 选定网格划分精确度, 沿 x 轴和 y 轴设置周期边界条件, x 方向为电(electric)边界、 y 方向为磁(magnetic)边界、 z 方向为开放(open)边界条件, 令电磁波垂直入射到超表面谐振结构所在平面。仿真结果表明, 在 0~0.8 THz 范围内, 这种 SWCNTs 薄膜基 THz 超表面出现反射增强效应, 在中心频率 $f_1=0.264\ \text{THz}$ 、 $f_2=0.444\ \text{THz}$ 、 $f_3=0.552\ \text{THz}$ 处分别产生了共振反射峰, f_1 处的反射率为 97.9%, f_2 处的反射率为 98.2%, f_3 处的反射率为 94.8%。

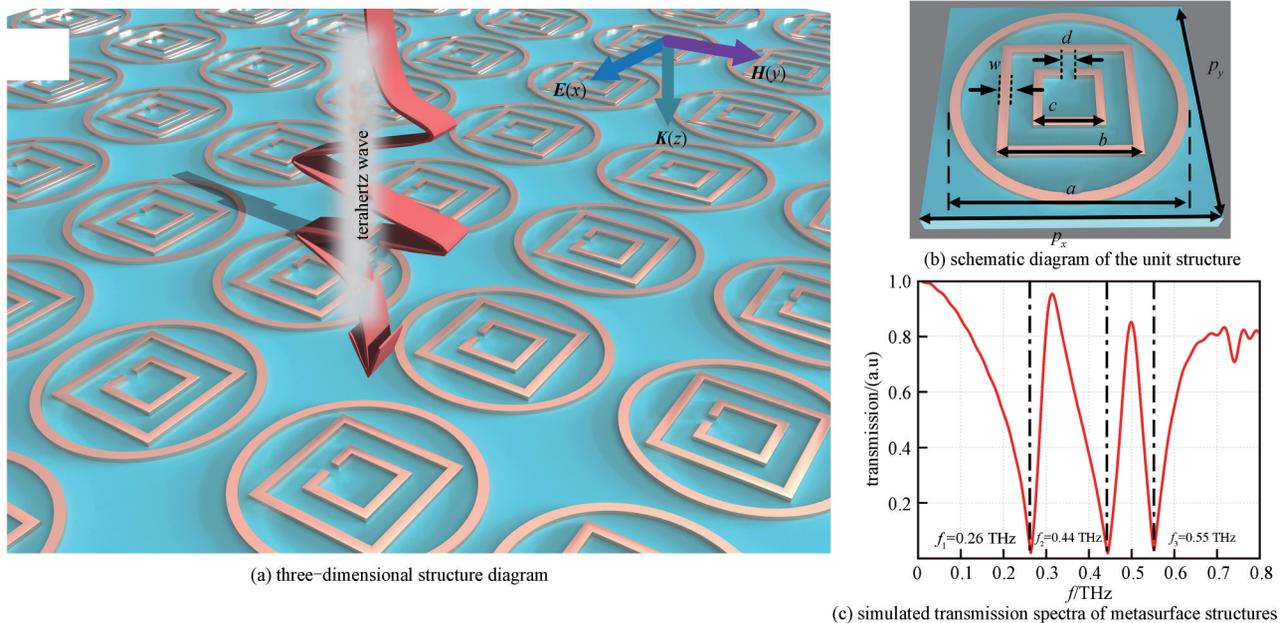


Fig.1 Schematic diagram of THz metasurface structure of carbon nanotubes

图1 碳纳米管 THz 超表面结构示意图

2 结果和讨论

THz 超表面周期性阵列结构的几何参数是影响器件性能(品质因数 Q 值等)的关键因素, 为实现 THz 超表面器件更优异的共振响应, 利用 CST 时域求解器, 分别对周期 p 、圆环外部直径 a 、线宽 w 以及内部方形开口环的开口

口大小 d 在不同数值下器件的共振特性进行研究。当周期 p 由 $280\ \mu\text{m}$ 逐渐增加至 $330\ \mu\text{m}$ ，THz 超表面器件在 $0\sim 0.8\ \text{THz}$ 范围内共振峰幅值基本保持不变；但随着周期的增大，器件在 $0.26\ \text{THz}$ 处共振峰的半高宽逐渐减小，见图 2(a)。当圆环结构的外径 a 由 $260\ \mu\text{m}$ 逐渐增加至 $280\ \mu\text{m}$ ，步长为 $4\ \mu\text{m}$ ，仿真结果显示，随着 a 的增大，透射谱的共振频率有小幅度的红移，半高宽变窄，幅度较为明显，见图 2(b)；但当 a 小于 $260\ \mu\text{m}$ 时，会与内部结构重叠，最终将 a 设置为 $260\ \mu\text{m}$ 。微结构的线宽 w 以及内部方形开口环的开口大小 d 的变化对共振频率在 $0.44\ \text{THz}$ 和 $0.55\ \text{THz}$ 位置处的共振峰影响较大，随着 w 从 $10\ \mu\text{m}$ 逐渐增大到 $20\ \mu\text{m}$ ， d 从 $4\ \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $12\ \mu\text{m}$ 时，2 个共振频率处产生的共振强度逐渐增加，同时共振频率位置发生明显的蓝移，结果分别见图 2(c) 和图 2(d)。基于上述分析，当 $d=8\ \mu\text{m}$ 、 $w=15\ \mu\text{m}$ 以及 $p=300\ \mu\text{m}$ 时，提出的这种由圆环、开口环等基本结构交叉排列和嵌套等方式形成的复合型 THz 超表面器件可在 $0\sim 0.8\ \text{THz}$ 范围内实现多频和窄带共振。此外，见图 2(a)~(d)，这种超表面器件的共振存在多种共振模式，这些共振模式之间也显示出较强的相互耦合。

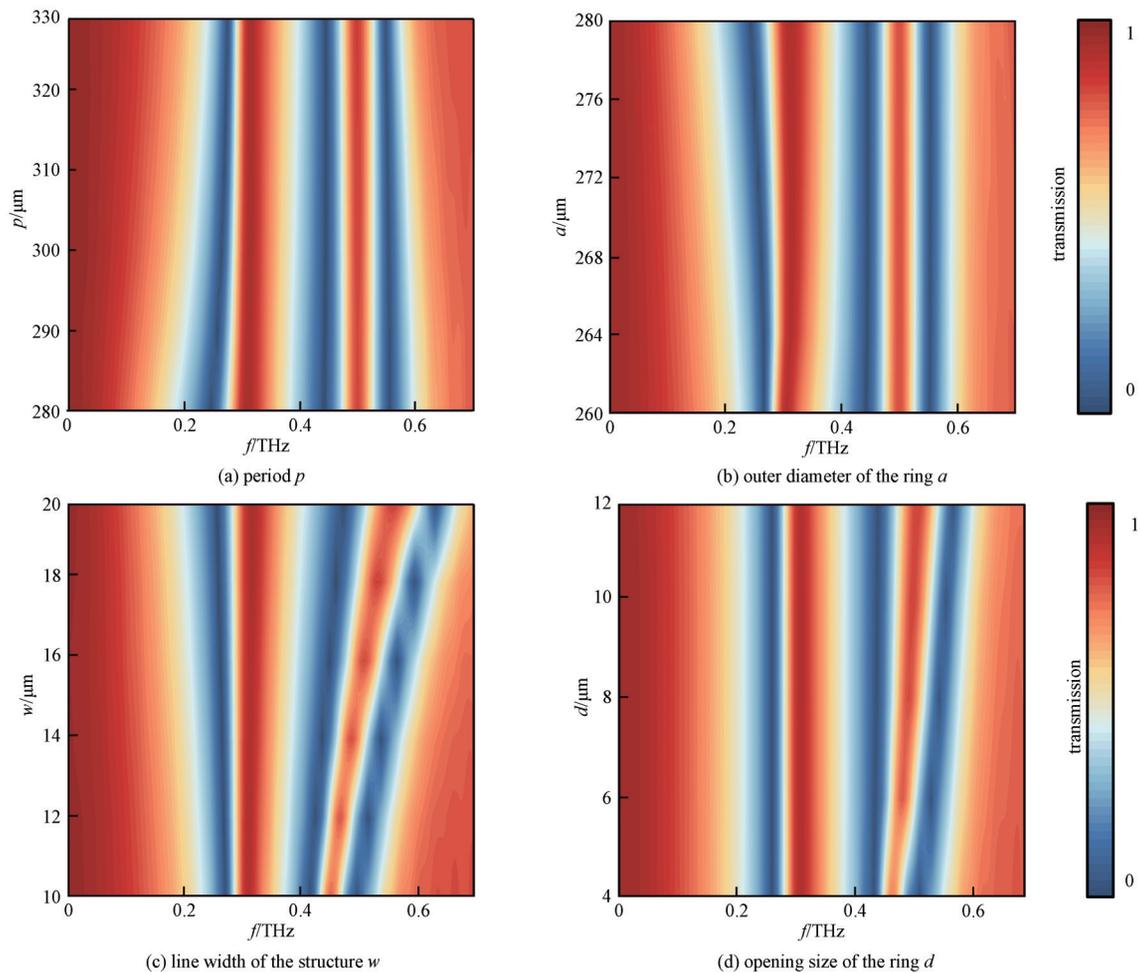


Fig.2 Transmission spectra of metasurfaces under different simulated parameters

图2 模拟的不同参数下超表面的透射光谱

添加电场及磁场监视器，获得两两重组后超表面结构在共振频率处的表面电流及电场分布，并进一步探究当 THz 波照射到超表面器件时，每种结构单独存在时的共振机理以及整体结构中存在的共振耦合模式，如图 3 所示。图 3(a) 中，圆环与方形框组成的复合型超表面结构分别在 $0.26\ \text{THz}$ 处与 $0.47\ \text{THz}$ 处存在 2 个共振峰，通过电场分布可以观察到，结构在 $0.26\ \text{THz}$ 处与 $0.47\ \text{THz}$ 处的共振分别是由外部圆环和内部的方形环产生，这与圆环或方形环单独存在时产生共振增强的频率位置基本保持一致。根据表面电流分布(图 3(c)) 可以看到，电流主要在圆环以及内部方形环的上下两部分来回振荡，感应电荷在外部电场的驱动下分布在圆环的左右两端，故圆环和方形环的上下两部分各构成一个偶极子谐振，且 2 个偶极子谐振完全对称。由于上下两部分产生的感应电流方向相同，根据右手定则，两同向平行电流所激发出的感应磁场在中心区域方向相反，被相互抵消，因此整个结构的磁响应非常微弱。闭合方环+开口方环结构在 $0.44\ \text{THz}$ 和 $0.54\ \text{THz}$ 处同样存在 2 个共振峰，见图 3(b)。根据表面电流分布图以及电场图(图 3(d)) 可知， $0.44\ \text{THz}$ 处的共振同样为方形环产生的偶极子谐振。开口方环结构上形

成逆时针方向旋转的表面环形电流分布，导致电荷聚集在开口环的两端，此时开口环的结构等效于电感，开口等效于电容，两者形成 LC 振荡电路。

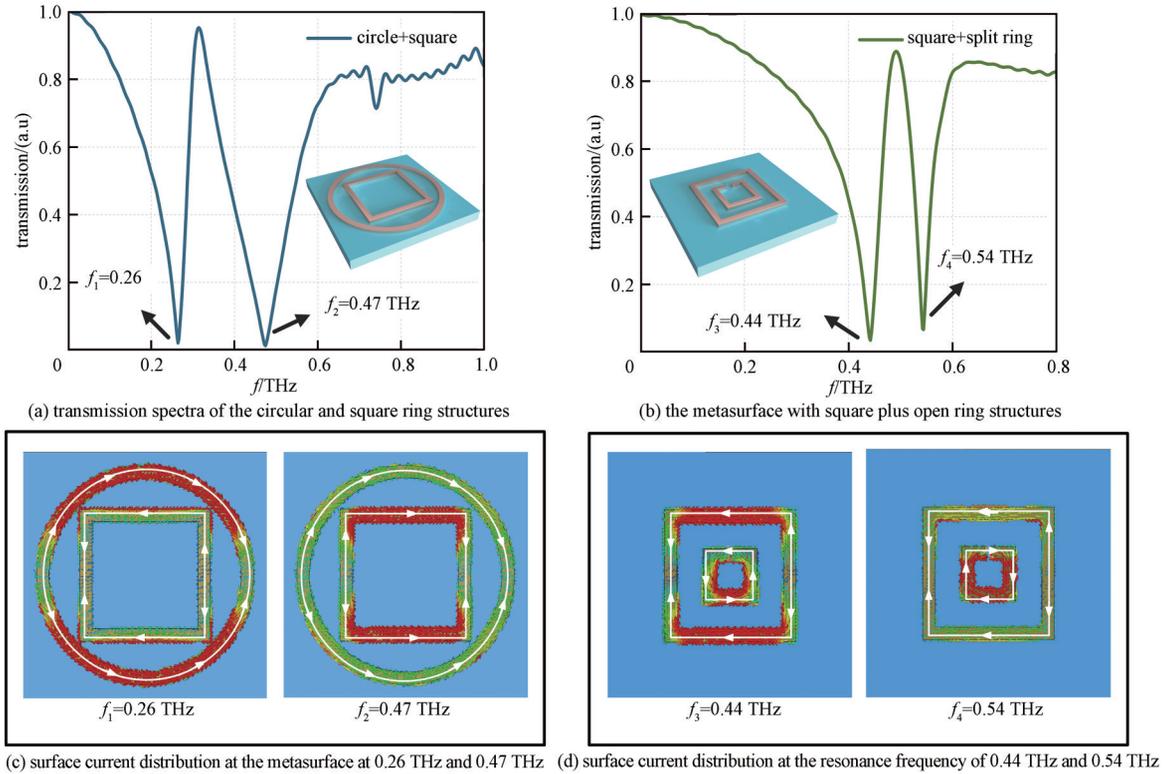


Fig.3 Resonance characteristics analysis of the partial structures composing the metasurface

图 3 构成超表面的各部分结构的共振特性分析

图 4(a)中，单独的方环结构(Square-Closed Loop, SCL)(灰色虚线)和单独的开口环结构(Split-Ring Resonator, SRR)(红色虚线)分别在 0.47 THz 和 0.52 THz 处存在 2 个共振峰，但开口环结构的共振峰线宽窄，幅值小。根据等效电路模型开口环的共振特性： $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，其中 C 和 L 分别为等效电路中的总电容和总电感，几何结构的尺寸对开口环的影响可表示为^[24]：

$$C = \epsilon_0 \epsilon_c \frac{wl}{d} \tag{1}$$

$$L = \mu_0 \frac{c^2}{l} \tag{2}$$

式中： ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_c 为相对介电常数； d 为开口宽度； w 为结构线宽； l 为结构厚度； c 为结构边长； μ_0 为真空中的磁导率。

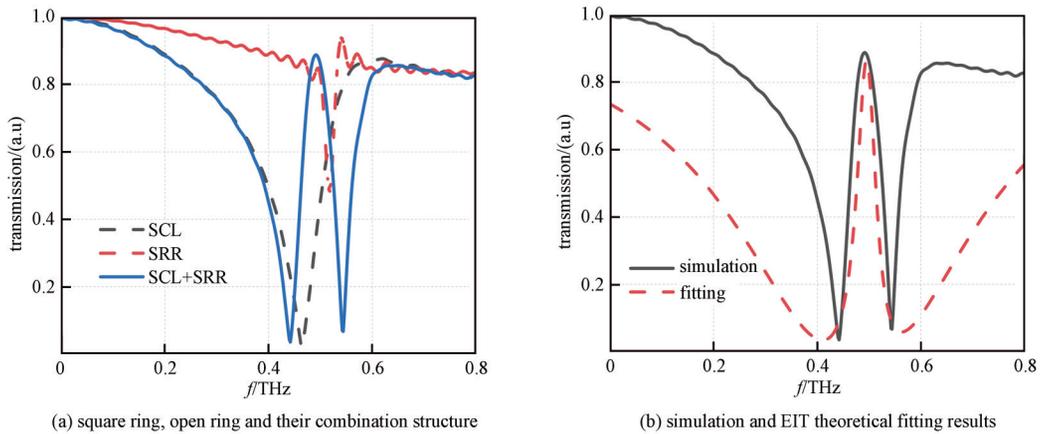


Fig.4 THz transmission spectrum of metasurface structure

图 4 超表面结构的 THz 透射光谱

由式(1)~(2)可看出, 结构尺寸的值会引起开口环共振频率的变化。将参数 $\varepsilon_0=8.854\ 187\ 817\times 10^{-12}$ 、 $\varepsilon_c=1$ 、 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ 、 $w=15\ \mu\text{m}$ 、 $c=66\ \mu\text{m}$ 、 $d=12\ \mu\text{m}$ 、 $l=3\ \mu\text{m}$ 代入计算, 可得共振频率 $f=0.53\ \text{THz}$, 与仿真所得谐振频率 $f=0.52\ \text{THz}$ 基本相符。另外, 如图4(a)蓝色实线所示, 在闭合方环和开口方环的强相干耦合场作用下, 这种组合结构会在 $0.49\ \text{THz}$ 处形成一个电磁感应透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)窗口。根据图3(d)的表面电流分布分析可知, 内部开口环结构的表面电流为环形分布, 没有形成明显的直流电偶极矩, 表明该结构与入射电磁波之间的谐振很微弱, 该结构为暗模式; 外部方框结构产生了偶极子谐振, 与外部电场作用较强, 该结构为明模式。若将明模式和暗模式视为2个谐波振荡器, 可以用二粒子机械振荡模型进行描述。两谐振子的二阶偏微分运动方程为^[25]:

$$\ddot{x}_1(t) + \gamma_1 \dot{x}_1(t) + \omega_0^2 x_1(t) + \kappa x_2(t) = \mathbf{E}(t) \quad (3)$$

$$\ddot{x}_2(t) + \gamma_2 \dot{x}_2(t) + (\omega_0 + \delta)^2 x_2(t) + \kappa x_1(t) = 0 \quad (4)$$

式中: x_1 和 x_2 分别为明、暗模式的谐振强度; ω_0 为明模式的谐振频率; γ_1 和 γ_2 分别为明、暗模式的耗散系数; κ 为明、暗模式之间的耦合系数; δ 为激发态和亚稳态跃迁的失谐因子; $\mathbf{E}(t)$ 为入射电场。对其进行求解消元, 可得

$$x_1 = \frac{1}{M_1 - \frac{\kappa^2}{M_2}} \mathbf{E} = \frac{-\frac{\kappa}{M_2}}{M_1 - \frac{\kappa^2}{M_2}} \mathbf{E} \quad (5)$$

式中: $M_1 = \omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma_1$; $M_2 = \omega^2 - (\omega_0 + \delta)^2 + i\omega\gamma_2$, ω 为角频率。可得该体系能量耗散为:

$$P(t) = \frac{\dot{x}_1}{|\mathbf{E}|^2} \mathbf{E} = \frac{i\omega x_1}{|\mathbf{E}|^2} \mathbf{E} \quad (6)$$

通过傅里叶变换将此方程变换到频域:

$$P(\omega) = \frac{i\omega \left[\omega^2 - (\omega_0 + \delta)^2 + i\omega\gamma_2 \right]}{(\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\gamma_1) \left[\omega^2 - (\omega_0 + \delta)^2 + i\omega\gamma_2 \right] - \kappa^2} \quad (7)$$

在 $\omega_0^2 - \omega^2 \approx -2\omega_0(\omega - \omega_0)$ 的近似条件下, 可简化为:

$$P(\omega) = \frac{i \left(\omega - \omega_0 - \delta + i \frac{\gamma_2}{2} \right)}{\left(\omega - \omega_0 + i \frac{\gamma_1}{2} \right) \left(\omega - \omega_0 - \delta + i \frac{\gamma_2}{2} \right) - \frac{\kappa^2}{4}} \quad (8)$$

因此器件的透射率可表示为:

$$T = 1 - g |P(\omega)|^2 \quad (9)$$

式中 g 为结构的几何参数。通过式(9), 结合谐振子耦合的模型, 对闭合方形环加开口环结构的透射 T 进行解析拟合, 相关参数分别为谐振频率 $\omega_0=0.474\ 01$, 耦合系数 $\kappa=0.124\ 9$, 明模式耗散系数 $\gamma_1=0.559\ 1$, 暗模式耗散系数 $\gamma_2=0.015\ 9$, 失谐因子 $\delta=0.021\ 3$, 结构参数 $g=0.078\ 1$ 。从图4(b)中可以看出, 2条曲线的波峰与波谷处频率基本对应, 仿真结果与理论拟合结果一致性较好。

衡量 THz 超表面传感器传感性能的参数包括品质因子 Q 值、灵敏度 S 和品质因数 FoM 值。 Q 值反映共振峰的尖锐程度, 值越大, 共振峰越尖锐。计算公式为: $Q(f) = \frac{f}{W_{\text{FHM}}}$, 其中 f 为谐振频率, W_{FHM} 为共振峰的半高宽。

灵敏度 S 反映了待测物折射率的变化引起共振频率变化量的大小, 定义为 $S = \frac{\Delta f}{\Delta n}$, 这里 Δf 和 Δn 分别为共振频率

以及折射率的变换量。品质因数的定义为: $FoM = \frac{S}{W_{\text{FHM}}}$ 。

在超表面覆盖不同折射率的介质层, 分析 THz 超表面器件的折射率传感特性。介质层厚度 $h=5\ \mu\text{m}$, 如图5(a)所示。覆盖不同折射率待测物后的超表面透射谱如图5(b)所示, 当折射率从 $n=1.0$ 增加至 $n=2.0$, 步长为

0.2, 器件共振频率位置发生了明显的红移。进一步分析折射率与共振频率移动的关系, 结果显示, 当覆盖 $h=5 \mu\text{m}$ 厚的介质层后, 随着介质层折射率的增大, 超表面第 1 个由共振耦合产生的波峰共振频率从 0.314 THz 降至 0.278 THz, 第 2 个波峰处的共振频率从 0.500 THz 降至 0.436 THz。表明共振频率随着分析物折射率的增加而线性减小, 且折射率与共振频率值基本呈线性负相关, 说明此超表面器件也具有作为折射率传感器的能力。利用一次函数对两种共振频移与折射率变化之间的函数关系进行拟合, 结果如图 5(c)和图 5(d)所示。其中第 1 个峰的拟合函数可表示为: $\Delta f=0.349-0.035n$, 该处超表面传感器的折射率灵敏度 S 为 35 GHz/RIU, 线性拟合优度 $R^2=0.995$; 第 2 个波峰处共振频移与折射率变化之间的数学关系拟合结果见图 5(b), 拟合函数可表示为: $\Delta f=0.563-0.064n$, 该太赫兹超表面传感器的折射率灵敏度 S 为 64 GHz/RIU, 线性拟合优度 $R^2=0.999$ 。在一定折射率范围内, 当待测分析物折射率变化时, 超表面透射谱的共振频率也会发生线性频移。

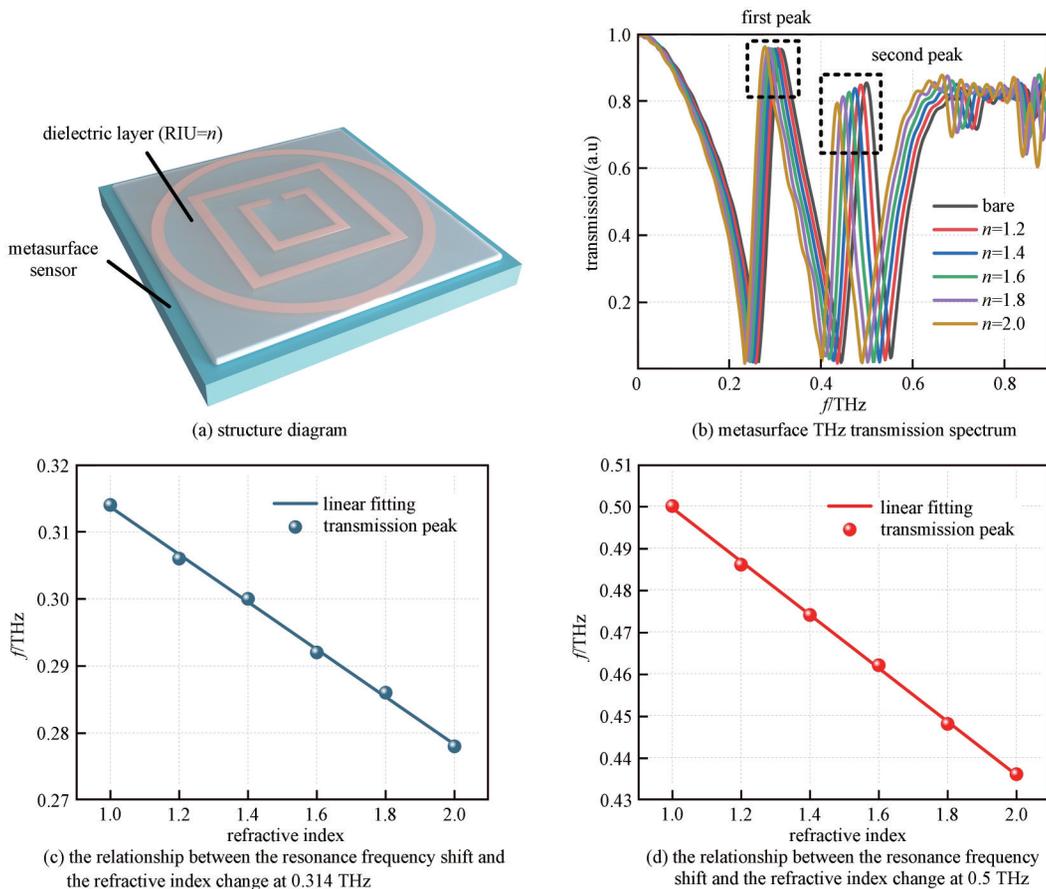


Fig.5 Analysis of refractive index sensing characteristics of metasurfaces

图 5 超表面的折射率传感特性分析

3 结论

本文通过对 THz 超表面周期性阵列结构的几何参数(周期 p 、外部圆环直径 a 、线宽 w 以及内部方形开口环的开口大小 d 等)进行研究, 明确了这些参数对器件性能、共振频率及共振峰的性质产生的影响。最终, 确定了最佳参数组合, 实现 0~0.8 THz 范围内的多频和窄带共振, 为器件的性能优化以及这种 THz 超表面器件的设计和制造提供了理论指导。此外, 通过电场和磁场监视器的应用以及共振耦合模式的理论计算, 进一步分析了不同结构单独存在时的共振机理以及整体结构中的共振耦合模式, 有助于深入理解 THz 波照射时的器件行为。最后, 研究共振频率与折射率变化之间存在线性关系, 考察了超表面器件作为折射率传感器的潜力。函数拟合结果显示, 该超表面器件可实现最高 64 GHz/RIU 的高灵敏度折射率传感。

参考文献:

- [1] 姚建铨,迟楠,杨鹏飞,等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009,36(9):2213-2233. (YAO Jianquan,CHI Nan, YANG Pengfei,et al. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(9):2213-2233.) doi:10.3788/CJL20093609.2213.
- [2] SHI Chenjun,ZHU Ji,XU Mingqian,et al. An approach of spectra standardization and qualitative identification for biomedical

- materials based on terahertz spectroscopy[J]. *Scientific Programming*, 2020(5):1–8. doi:10.1155/2020/8841565.
- [3] LIU Haishun, LIU Xiangyi, ZHANG Zhenwei, et al. Investigating the relationship between composite multiscale entropy and optical property of bovine serum albumin solutions using THz pulsed system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021(137): 106374-1–6. doi:10.1016/j.optlaseng.2020.106374.
- [4] SHI Wei, WANG Yuezheng, HOU Lei, et al. Detection of living cervical cancer cells by transient terahertz spectroscopy[J]. *Journal of Biophotonics*, 2021,14(1):e202000237. doi:10.1002/jbio.202000237.
- [5] 李政隆,张德海. 基于太赫兹技术的葡萄糖及其同分异构体研究[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2021,19(1):11–17. (LI Zhenglong, ZHANG Dehai. Discrimination of glucose and its isomers based on terahertz technology[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2021,19(1):11–17.) doi: 10.11805/TKYDA2019522.
- [6] QU Fangfang, LIN Lei, CAI Chengyong, et al. Terahertz fingerprint characterization of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and its enhanced detection in food matrices combined with spectral baseline correction[J]. *Food Chemistry*, 2021(334):127474. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127474.
- [7] ZHONG Yajun, DU Lianghui, LIU Qiao, et al. Metasurface-enhanced ATR sensor for aqueous solution in the terahertz range[J]. *Optics Communications*, 2020(465):125508. doi:10.1016/j.optcom.2020.125508.
- [8] CHENG Ruijian, XU Ling, YU Xin, et al. High-sensitivity biosensor for identification of protein based on terahertz Fano resonance metasurfaces[J]. *Optics Communications*, 2020(473):125850. doi:10.1016/j.optcom.2020.125850.
- [9] WANG Gangqi, ZHU Fengjie, LANG Tingting, et al. All-metal terahertz metamaterial biosensor for protein detection[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2021,16(1):109. doi:10.1186/s11671-021-03566-3.
- [10] ZHONG Changzhi, FAN Fei, ZHANG Ziyang, et al. Terahertz polarization sensing based on the saccharide-PVA mixture film coated on the flexible metasurface sensor[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022(149):106798. doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106798.
- [11] ZHANG Chiben, XUE Tingjia, ZHANG Jin, et al. Terahertz meta-biosensor based on high- Q electrical resonance enhanced by the interference of toroidal dipole[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022(214):114493. doi:10.1016/j.bios.2022.114493.
- [12] HE Yanan, ZHANG Bo, SHEN Jingling. Performance of terahertz metamaterials as high-sensitivity sensor[J]. *Modern Physics Letters B*, 2017,31(26):1750240. doi:10.1142/S0217984917502402.
- [13] LI Fuyu, HE Ke, TANG Tingting, et al. The terahertz metamaterials for sensitive biosensors in the detection of ethanol solutions[J]. *Optics Communications*, 2020(475):126287. doi:10.1016/j.optcom.2020.126287.
- [14] SURESH K N, NAIDU K C B, BANERJEE P, et al. A review on metamaterials for device applications[J]. *Crystals*, 2021,11(5): 518. doi:10.3390/cryst11050518.
- [15] ZHANG Yong, DUAN Junping, ZHANG Binzhen, et al. A flexible metamaterial absorber with four bands and two resonators[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017(705):262–268. doi:10.1016/j.jallcom.2017.02.076.
- [16] CHENG Dong, HE Xia, HUANG Xialian, et al. Terahertz biosensing metamaterial absorber for virus detection based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2018,28(7):e21448. doi:10.1002/mmce.21448.
- [17] 潘武,杨龙亮,马勇,等. 基于超材料的太赫兹幅度调制器设计[J]. *半导体光电*, 2021,42(5):610–614. (PAN Wu, YANG Longliang, MA Yong, et al. Design of metamaterial-based terahertz amplitude modulator[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021,42(5):610–614.) doi:10.16818/j.issn1001-5868.2021050802.
- [18] WANG Yue, CUI Zijian, ZHANG Xiaoju, et al. Excitation of surface plasmon resonance on multiwalled carbon nanotube metasurfaces for pesticide sensors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020,12(46):52082–52088. doi: 10.1021/acsami.0c10943.
- [19] KVITSINSKIY A, DEMCHENKO P, NOVOSELOV M, et al. Optically driven terahertz wave polarization control by single-wall carbon nanotube thin film[C]// 2020 the 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW–THz). Buffalo, NY, USA: IEEE, 2020:1–2. doi:10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370875.
- [20] ZHAN Hang, CHEN Yuwen, SHI Qiangqiang, et al. Highly aligned and densified carbon nanotube films with superior thermal conductivity and mechanical strength[J]. *Carbon*, 2022(186):205–214. doi:10.1016/j.carbon.2021.09.069.
- [21] HELLMANN T, INAGAKI C S, DAS NEVES M F F, et al. Preparation and characterization of polythiophene/gold nanoparticles/carbon nanotubes nanocomposites thin films: spectroscopy and morphology[J]. *Materials Today. Communications*, 2022(33): 104314. doi:10.1016/j.mtcomm.2022.104314.