



基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器

葛宏义 李丽 蒋玉英 李广明 王飞 吕明 张元 李智

Double-opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor

Ge Hong-Yi Li Li Jiang Yu-Ying Li Guang-Ming Wang Fei Lü Ming Zhang Yuan Li Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 108701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212303

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性

Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2021, 70(16): 168101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210062>

太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性

Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band

物理学报. 2021, 70(3): 038102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201054>

超材料赋能先进太赫兹生物化学传感检测技术的研究进展

Research progress of metamaterials powered advanced terahertz biochemical sensing detection techniques

物理学报. 2021, 70(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211752>

基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器

Tunable terahertz wave broadband absorber based on metamaterial

物理学报. 2019, 68(24): 247802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191216>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

基于向日葵型圆形光子晶体的高灵敏度太赫兹折射率传感器

High sensitivity terahertz refractive index sensor based on sunflower-shaped circular photonic crystal

物理学报. 2019, 68(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191024>

基于双开口金属环的太赫兹超材料吸波体传感器*

葛宏义¹⁾²⁾³⁾ 李丽¹⁾²⁾³⁾ 蒋玉英^{1)2)4)†} 李广明¹⁾²⁾³⁾
王飞¹⁾²⁾³⁾ 吕明¹⁾²⁾³⁾ 张元^{1)2)3)‡} 李智¹⁾²⁾

1) (河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 郑州 450001)

2) (河南工业大学河南省粮食光电探测与控制重点实验室, 郑州 450001)

3) (河南工业大学信息科学与工程学院, 郑州 450001)

4) (河南工业大学人工智能与大数据学院, 郑州 450001)

(2021年12月14日收到; 2022年1月24日收到修改稿)

本文提出了一种用于生物样品检测的高灵敏度太赫兹折射率超材料吸波体传感器. 该传感器由2个同心开口金属环组成, 是一种多模谐振器. 传感器在0.7—2.5 THz频率范围内具有2个独立可调的工作频段, 即1.079 THz和2.271 THz, 可观测样品在太赫兹波段的不同电磁效应. 采用吸收特性、灵敏度等指标评估太赫兹传感器的性能, 自由空间中的吸收率超过99.9%, 具有较高的频率选择特性, 灵敏度达到693.7 GHz/RIU, 检测生物样品最小折射率变化量为0.004, 传感性能较好. 所提出的传感器使用低介电常数的柔性材料, 具有生物相容性、便携性等优点, 且在0°—60°斜入射角下及4%的制作误差内显示出高度稳定性. 此外, 通过乙醇-水混合物模拟实验, 验证了传感器的检测效果. 本文设计的传感器单元结构之间相互作用小、稳定、易制作, 能够显著增强光与物质之间相互作用, 在太赫兹高灵敏生物传感检测中具有广阔的应用前景.

关键词: 太赫兹, 超材料, 吸波器, 生物传感器

PACS: 87.50.U-, 87.85.Ox

DOI: 10.7498/aps.71.20212303

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是比微波频率高、比可见光频段低的一段电磁波, 介于0.1—10 THz (1 THz = 10^{12} Hz) 频率范围内, 波长为3—0.03 mm^[1,2,3]. 许多生物大分子的振动频率在太赫兹波段, 其独特的指纹谱在识别探测方面具有较强的优势^[4,5]. 太赫兹波能够穿透许多非极性材料, 探测物质内部信息, 并且太赫兹波的光子能量仅有X射线的百万分之一, 不会损伤被测物质的内部组

成成分, 可进行无损检测. 目前, 太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术在中草药、毒品、添加剂等鉴别方面取得一定的研究成果, 成为物质分类识别的主要手段, 得到广泛的应用^[6,7]. 针对系统或环境等因素造成的光谱数据噪声大、信号弱等问题, 许多学者通过机器学习、深度学习等方法建立模型进行定性定量分析, 但对微量生物样品的检测及相似指纹谱之间的识别仍具有一定的挑战性.

随着微纳加工技术的发展, 超材料 (metamaterials, MMs)^[8,9] 的出现在一定程度上弥补了 THz 技术的硬性难题. 超材料是一种人工设计的由周期

* 国家自然科学基金 (批准号: 61975053, 61705061)、河南工业大学粮食信息处理与控制教育部重点实验室开放基金项目 (批准号: KFJJ2020103)、河南工业大学青年骨干教师培养计划、河南省自然科学基金 (批准号: 202300410111)、河南省高校科技创新人才支持计划资助 (批准号: 22HASTIT017)、河南省重大公益项目 (批准号: 201300210100) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiangyuying11@163.com

‡ 通信作者. E-mail: zy_haut@163.com

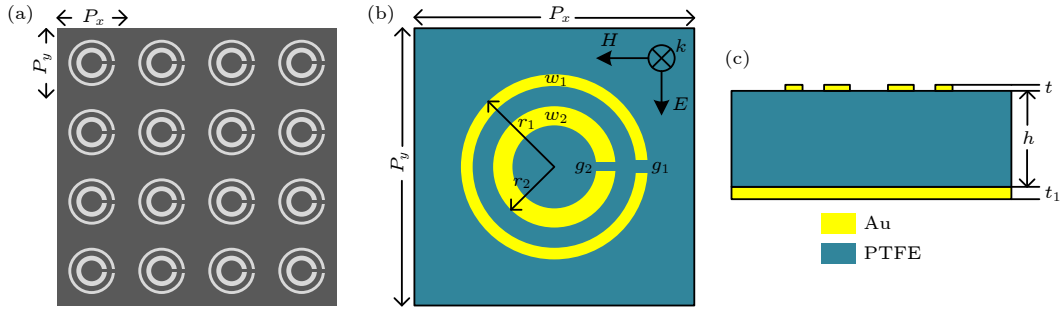


图 1 (a) 周期阵列结构; (b) 单元结构上视图; (c) 单元结构侧视图

Fig. 1. (a) Periodic array structure; (b) top view of unit structure; (c) side view of unit structure.

性亚波长单元结构构成的电磁复合材料, 具备天然材料不能实现的特殊物理性质, 如负折射率^[10,11]、逆多普勒效应^[12,13]. 太赫兹超材料生物传感器^[14,15]是一种无标记亲和型传感器, 能够增强局域电磁场强度, 并且对周围环境的介电常数变化极其敏感, 为微量或痕量生物样品检测提供一种新方式. 太赫兹超材料吸波器^[16,17]是一种典型的生物传感器类型, 由“三明治”结构构成, 即金属谐振层-介质层-金属反射层, 可实现太赫兹波的近完美吸收, 通过观察谐振频率偏移程度或吸收强度实现样品的检测. Chen 等^[18]采用分裂环结构太赫兹超材料吸波器结合密度泛函理论与单变量回归分析实现吡啶-3-乙酸和三环唑等微量农药的高精度检测, 检出限达到 10 ng/L; Veeraselvam 等^[19]设计了一种多模谐振器, 在 1—2 THz 之间存在 4 个独立可调谐的工作频带且偏振不敏感, 并且模拟 DNA 等生物分子的特性, 结果表明该传感器具有较好的检测能力; Xu 等^[20]利用环偶极子谐振增强场约束能力, 实现了对乙醇溶液含量的分析. 基于超材料的太赫兹生物传感器在生物医学、食品安全检测等领域应用广阔, 但其性能需进一步提高以增强光与物质相互作用、检测相差无几的分析物.

本文设计了一种双开口环吸波体传感器, 该谐振结构由 2 个典型的金属开口环组成. 由于内外环的近场耦合, 吸收特性曲线在 0.7—2.5 THz 之间存在 2 个完美吸收峰. 采用有限元积分法仿真分析了谐振形成机理以及开口环位置的影响, 经结构优化后, 对待测物折射率、厚度、介质层材料的传感特性进一步分析并与透射型传感器进行对比. 此外, 通过识别乙醇-水混合物浓度验证了传感检测能力. 本文设计的生物传感器在太赫兹波段实现了高灵敏度, 具有较高的 Q 值, 并且稳定、易于加工制作, 将在微量生物样品高灵敏度检测领域发挥巨大的优势.

2 传感器的结构与机理分析

2.1 结构与仿真

本文设计的传感器周期阵列结构示意图如图 1(a) 所示, 该结构的基本单元由 3 层结构组成, 分别是金属谐振层、介质层、反射层. 图 1(b) 和 (c) 是该传感器单元结构示意图, 上表面为 2 个同心开口圆环组成的谐振器, r , w , g 分别表示金属开口环的半径、线宽、开口间隙, 金属环的厚度为 t , 下表面是厚度为 t_1 的连续金层, 可以全反射太赫兹波, 金的电导率 $\sigma = (4.561e + 007)$ S/m. 介质层材料为聚四氟乙烯 (poly tetra fluoroethylene, PTFE), 相对介电常数 $\epsilon_r = 2.1 + i0.0002$. 周期 $P = P_x = P_y = 80 \mu\text{m}$, 单元结构的优化参数如表 1 所示.

表 1 单元结构的几何参数

Table 1. Geometric parameters of the unit structure.

参数	P	h	r_1	w_1	g_1	r_2	w_2	g_2	t	t_1
值/ μm	80	20	18	2	4	10	3	4	0.2	0.5

采用三维电磁场仿真软件 CST MWS 2020 对传感器结构进行仿真分析, 采用基于有限积分法 (FIT) 的频域求解器计算传感器的吸收特性曲线、电场电流分布等其他参数. 太赫兹波垂直入射到传感器上表面, 极化方向沿 x 轴, 即电场 E 沿 y 方向, 磁场 H 沿 x 方向. 此外, 在 x , y 方向上设置周期边界条件, 在 z 方向上设置开放边界条件. 通过数值仿真得到吸收特性曲线 $A(\omega)$ ^[21], $A(\omega)$ 通过以下公式计算:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

式中: $R(\omega)$ 表示反射率, 其值等于 $|S_{11}|^2$, 即反射系数模的平方; $T(\omega)$ 表示透射率, 其值等于 $|S_{21}|^2$, 即透射系数模的平方, 由于金属底板远大于太赫兹波在金属中的趋肤深度, 对太赫兹波全反射, 透射率

可忽略不计. 因此, 本文中 $T(\omega) = 0$.

该结构无覆盖物时的吸收谱如图 2 所示, 从图中可以看出, 所设计的传感器在 $f_1 = 1.079$ THz 和 $f_2 = 2.271$ THz 处存在 2 个近完美吸收峰, 吸收率均达到 99.9% 以上.

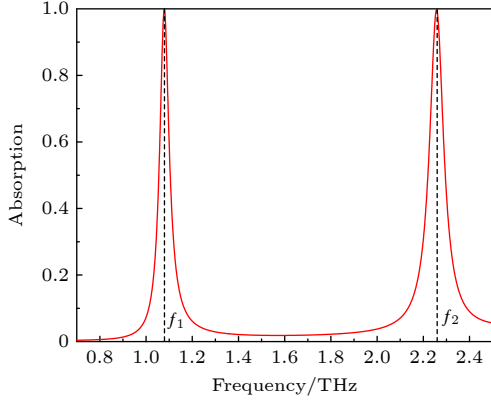


图 2 无分析物时传感器吸收特性仿真曲线

Fig. 2. Simulation curve of sensor absorption characteristics in the absence of analyte.

品质因子 Q 、灵敏度 S 以及 FOM 值是衡量传感器性能的 3 个指标. Q 值表示传感器的谐振特性, 它的大小与分辨率和灵敏度均有关, 一般情况下, Q 值越高, 说明该结构的介电损耗越小, 共振峰窄而尖锐, 并且分辨率和灵敏度越高. S 值表示分析物单位折射率变化引起的中心谐振频率频移量的程度, 是衡量传感器性能的一个重要指标. FOM 值是表示传感器整体性能的一个指标, FOM 值越高, 则传感器性能越好. 计算公式如下:

$$Q = \frac{f}{\text{FWHM}}, \quad (2)$$

式中, f 表示中心谐振频率, FWHM(Full Width Half Maximum) 表示半峰宽.

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta n}, \quad (3)$$

式中, Δn 表示分析物折射率变化量, Δf 表示中心频率频移的大小, S 单位为 GHz/RIU(refractive index unit).

$$\text{FOM} = \frac{S}{\text{FWHM}}, \quad (4)$$

该结构 f_1 处及 f_2 处的 FWHM 为 49.3 GHz, 70.8 GHz, 由 (2) 式计算可知该传感器的 Q 值分别为 21.9 和 32.1, 较高的品质因子 Q 表明所设计的传感器具有较高的频率选择特性.

2.2 谐振机理分析

为了进一步解释该传感器的谐振机理, 仿真研究谐振频率处的电场、电流分布情况. 图 3 表明电场限制在圆环的开口处, 内环电场强度较强, 图 4 表明电流主要分布在 2 个金属开口环上并且沿着箭头指示方向流动. 圆环可以看作电感 L , 开口处可以看作电容 C , 根据等效电路原理 [22], 电场的产生是由于入射波产生的感应电荷聚集在开口处, 电流的产生是由于电荷的移动, 这是典型的 LC 共振. 该传感器的谐振可以等效为 LC 共振的叠加效应, 如图 5 所示, 谐振频率可以近似为:

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}), \quad (5)$$

式中, 等效电感与传感器几何参数有关, 参数确定后, 金属开口环等效电感一般不会改变. 该传感器的等效电容与开口处等效电容、周围环境的等效电容有关, 空传感器只与开口处等效电容有关.

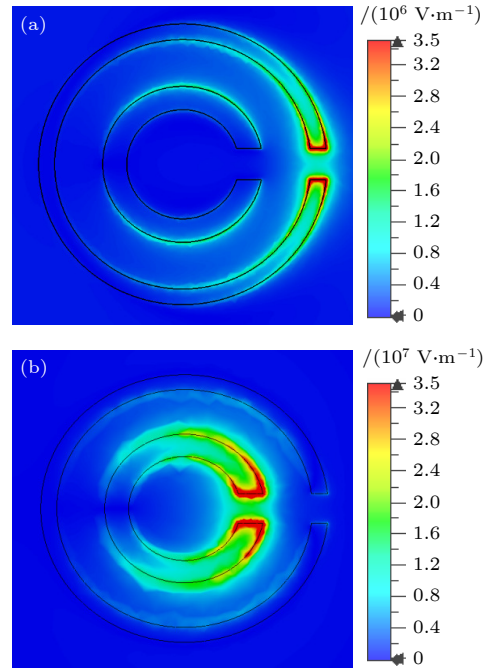


图 3 传感器在谐振频率处的电场分布 (a) f_1 处电场分布; (b) f_2 处电场分布

Fig. 3. The electric field distribution of the sensor at the resonance frequency. (a) Electric field distribution at f_1 ; (b) electric field distribution at f_2 .

图 4(a) 表明传感器第 1 个吸收峰 f_1 是由外环的 LC 谐振形成的, 电流在外环上震荡, 等效电感 L_1 较大, 谐振频率 f_1 较低. 图 4(b) 表明第 2 个吸收峰 f_2 的表面电流主要分布在内环, 整体在内环

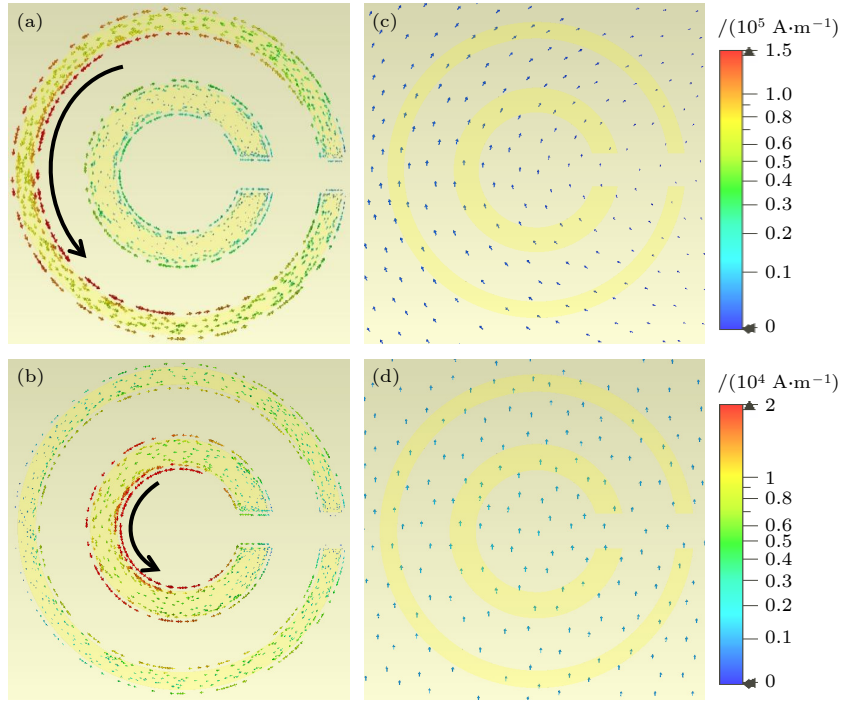


图4 传感器在谐振频率处的电流分布 (a) f_1 处表面电流分布; (b) f_2 处表面电流分布; (c) f_1 处地板电流分布; (d) f_2 处地板电流分布
 Fig. 4. The current distribution of the sensor at the resonance frequency: (a) Surface current distribution at f_1 ; (b) surface current distribution at f_2 ; (c) floor current distribution at f_1 ; (d) floor current distribution at f_2 .

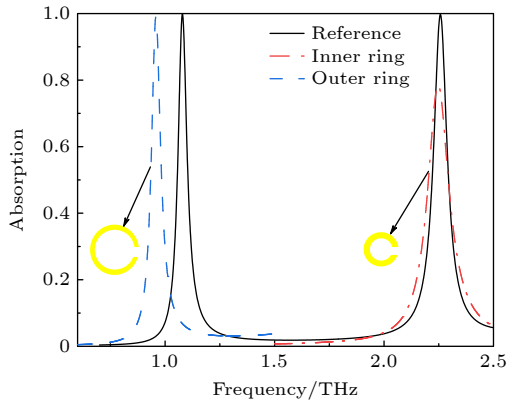


图5 子结构的吸收特性曲线
 Fig. 5. Absorption characteristic curve of substructure.

上形成 LC 谐振. 比较图 4(a) 和图 4(b), f_2 处电流分布的长度明显小于 f_1 处电流分布的长度, 图 4(b) 表面电流所形成的等效电感 L_2 小于图 4(a) 的等效电感 L_1 , 因此, 谐振频率 f_2 大于谐振频率 f_1 . 由图 4(c) 和 (d) 可知, 金属底板中的电流方向与图 4(a)、(b) 中表面电流方向相反, 两者之间存在磁谐振.

如果将分析物涂覆在传感器表面, 就会形成 1 个新的电容 C_{sensor} . 随着周围介电常数和分析物厚度的变化, C_{sensor} 的数值将会改变, 超材料传感器的等效电容发生变化, 共振频率随着覆盖物的介

电常数和厚度呈现出有规律的变化, 从而可以分析出覆盖物的物理性质. 因此, 该结构可以用于生物样品的传感检测.

3 传感器的结构优化及性能分析

3.1 开口环相对位置分析

传感器的性能与谐振结构密切相连, 本节通过移动开口环及开口位置分析了其对传感器的影响. 以中心位置表示原点, d_y , d_x 分别表示内环沿 y 轴正方向、 x 轴正方向移动的相对距离, 由图 6(a) 可知, 内环垂直移动距离越远, 低频处影响较小, 高频处吸收强度明显下降、吸收峰红移, 当移动距离为 $6 \mu\text{m}$ 时, 结构开始交叠, 从图中可以看出, f_2 红移程度较大, 约为 0.47 THz , 这主要是由于内外环之间的相消干涉引起的, 当移动距离 $8 \mu\text{m}$ 处, 两环完全交叉, f_2 吸收强度断层式下降. 内环沿 x 轴移动时的吸收特性曲线如图 6(b) 所示, f_2 变化明显, 出现红移、频带展宽、吸收强度下降现象, 交叉重叠部分吸收谱变化较大, 在 $0.7\text{--}2.5 \text{ THz}$ 范围内只有 1 个谐振峰, 由于检测样品对于每个谐振峰的电磁响应不同, 单峰情况下, 其频率选择特性较弱.

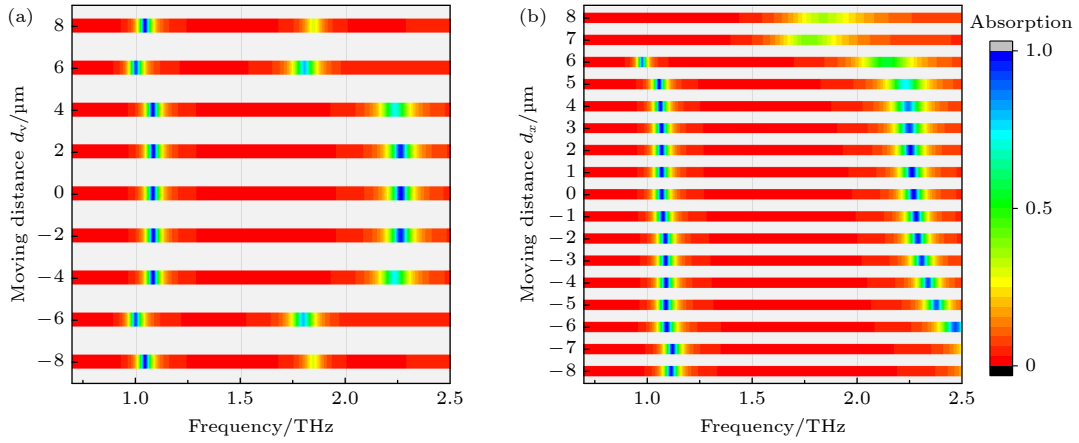


图 6 内环移动距离对吸收谱的影响 (a) 内环上下移动距离; (b) 内环左右移动距离

Fig. 6. Effect of inner ring shift distance on absorption spectrum: (a) Vertical travel distance of the inner ring; (b) horizontal travel distance of the inner ring.

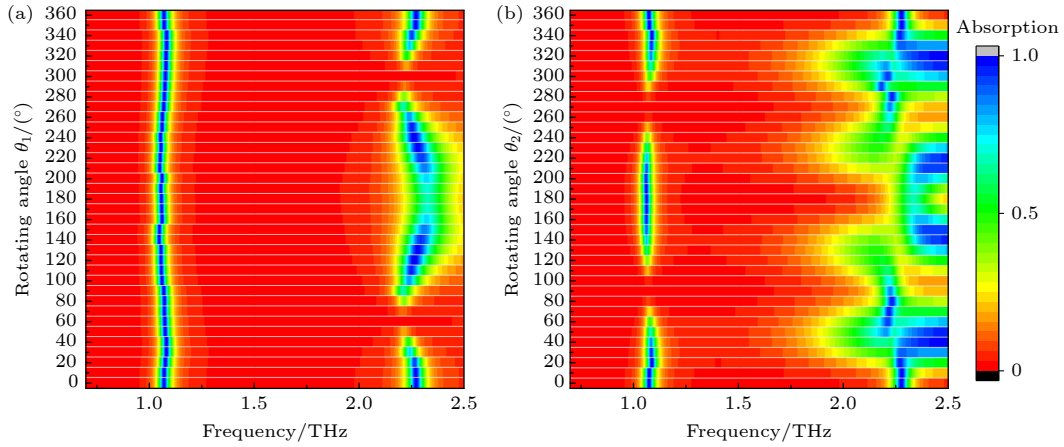


图 7 旋转角度对吸收谱的影响 (a) 内环旋转角度; (b) 外环旋转角度

Fig. 7. Effect of rotating angle on the absorption spectrum: (a) Rotating angle of the inner ring; (b) rotating angle of the outer ring.

图 7 通过旋转开口环进一步研究了开口位置对传感器性能的影响, 以图 1(b) 中开口位置为原型, 逆时针旋转结构, 从图 7(a) 和 (b) 中可以看出外环旋转对传感器性能影响更大. 内环旋转一定角度, f_1 比较平稳, 以旋转 180° 为对称轴, 当内环从 0° 旋转到 60° 时, f_2 吸收强度逐渐下降, 带宽逐渐变窄, 并且在旋转 60° 时, f_2 消失; 当内环从 60° 旋转到 180° 时, f_2 频带展宽, 吸收先增强后降低. 图 8 展示了内环旋转 60° 及单独外环的吸收谱, 并且分析其电场分布情况, 双环结构比单环结构电场强度大, 原因是两环的强耦合作用导致 1.07 THz 处出现 1 个完美窄带吸收峰, Q 值为 36, 该结构可用于样品的单峰检测, 但频率选择特性较弱. 外环以旋转 180° 为对称轴, 从 0° 旋转到 90° 的过程中, f_1 吸收强度下降, 带宽变窄至消失, f_2 带宽变宽甚至出现多峰情况, 并且谐振峰不独立; 从 90° 旋转到

180° 过程中, f_1 吸收强度上升, 带宽变宽, f_2 变化不稳定, 此时, 不适用于传感检测, 在复杂不定的检测环境中, 可能会造成样品信号紊乱.

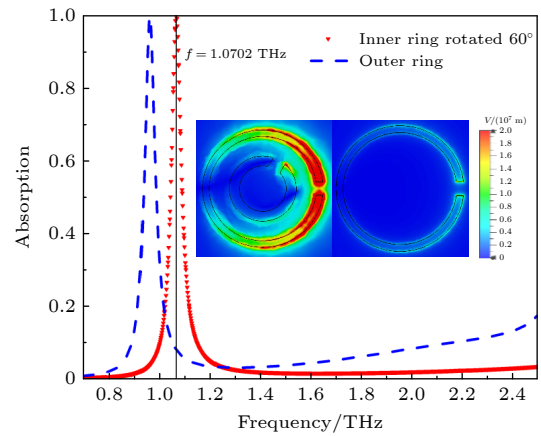


图 8 内环旋转 60° 、单独外环的吸收谱及电场分布

Fig. 8. Absorption spectrum and electric field distribution of the inner ring rotated by 60° and the outer ring alone.

3.2 结构参数优化

为了研究外环对传感器初始谐振频率的影响, 遵循控制变量准则, 分析传感器在不同结构参数下的谐振规律及原因, 相应参数变化的吸收特性曲线图绘制在图 9 中. 只改变 r_1 的值, 并保持其他几何参数不变, 当 r_1 从 $18\ \mu\text{m}$ 增加到 $22\ \mu\text{m}$ 时, 相应的吸收谱被模拟并绘制在图 9(a) 中, 共振频率 f_1 逐渐向低频移动. 这是因为 r_1 的增加会增加等效电路中的等效电感 L_1 , 从而减小谐振频率. 外环开口间隙 g_1 是设计中应该考虑的第 2 个因素, 如

果其他几何参数保持不变, g_1 从 $2\ \mu\text{m}$ 增加到 $5\ \mu\text{m}$, 模拟的吸收光谱如图 9(b) 所示, 随着 g_1 的增加, 谐振频率 f_1 逐渐向高频移动. 原因是 g_1 的增加减小了等效电容 C_1 及等效电感 L_1 , 因此, 共振频率 f_1 最终随着 g_1 的增加而增加. 此外, 共振频率还受线宽 w_1 的影响, w_1 从 $2\ \mu\text{m}$ 变化到 $5\ \mu\text{m}$ 时, 模拟并绘制相应的吸收谱, 如图 9(c) 所示, 共振频率 f_1 逐渐向高频移动, 这是因为 w_1 的增加会产生以下两个效应, 1) 等效电感 L_1 随着 w_1 的增加而减小, 谐振频率增大; 2) w_1 的增大增加了等效电容

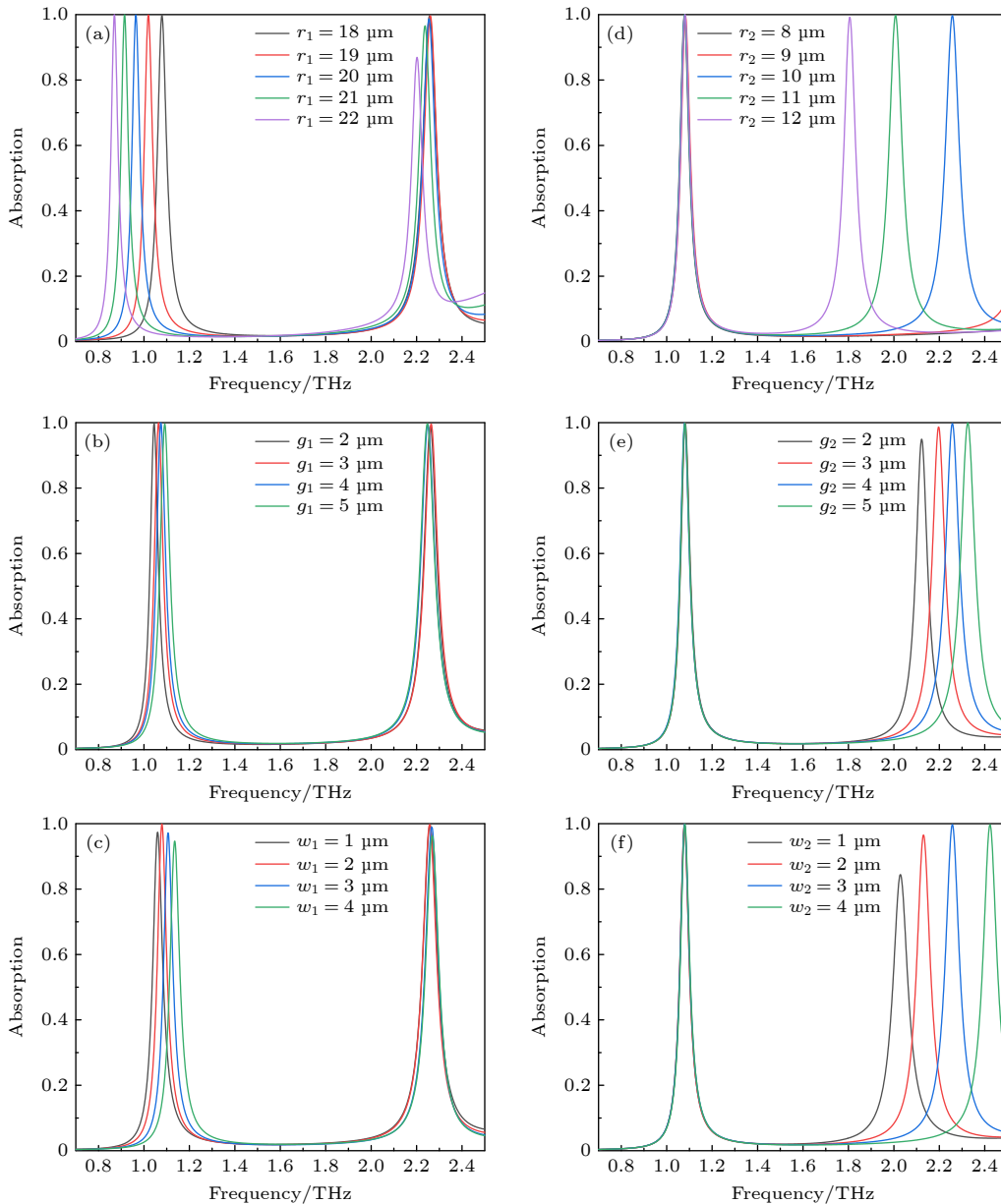


图 9 传感器几何参数变化吸收特性曲线. (a) 外环半径 r_1 ; (b) 外环开口间隙 g_1 ; (c) 外环线宽 w_1 ; (d) 内环半径 r_2 ; (e) 内环开口间隙 g_2 ; (f) 内环线宽 w_2

Fig. 9. Absorption characteristics curve with changes in sensor geometric parameters: (a) Outer ring radius r_1 ; (b) outer ring opening gap g_1 ; (c) outer ring line width w_1 ; (d) inner ring radius r_2 ; (e) inner ring opening gap g_2 ; (f) inner ring line width w_2 .

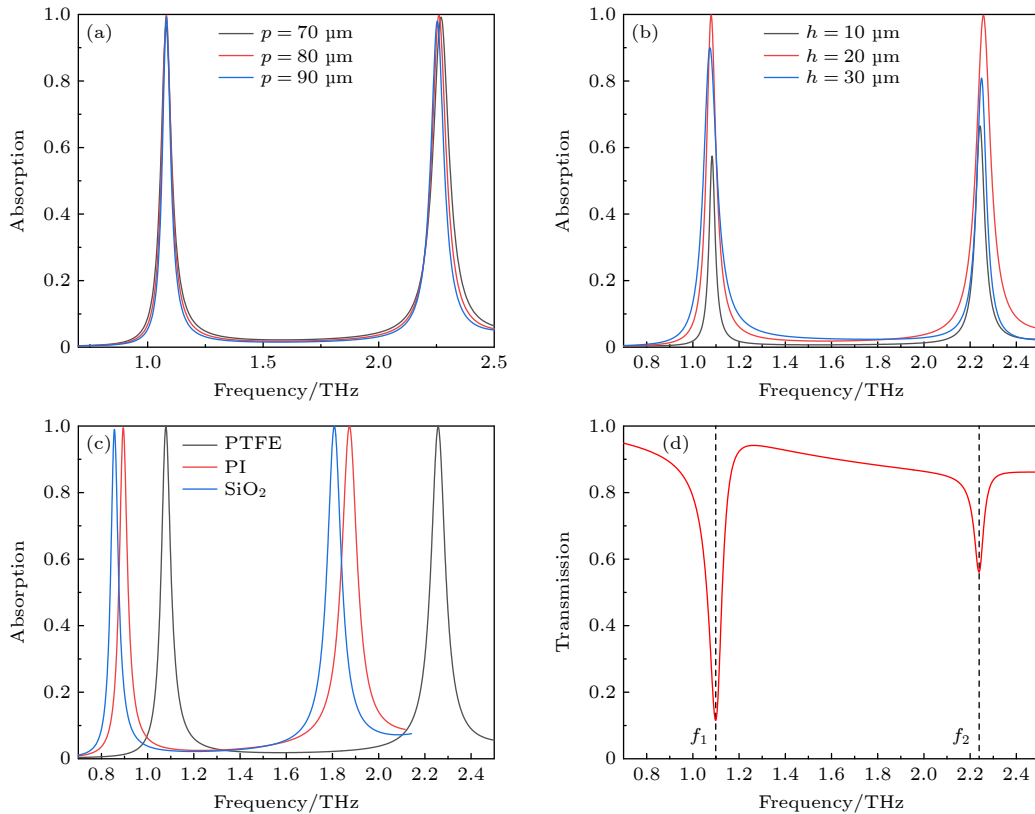


图 10 (a), (b), (c) 分别为不同周期 P 、不同衬底厚度、不同衬底材料的吸收特性曲线; (d) 透射型传感器结构的传输特性曲线
 Fig. 10. (a), (b), (c) are the absorption characteristic curves of different periods P , different substrate thicknesses, and different substrate materials; (d) transmission characteristic curves of the transmissive sensor structure.

C_1 , 前者影响明显大于后者. 同理, 内环结构参数对传感器初始谐振频率的影响适用于上述结论, 由于 2 个开口环没有交叉重叠部分, 传感器的谐振频率可以根据几何参数进行合理调整.

同时, 本文还模拟了单元结构周期、衬底厚度、衬底材料对传感器的影响以及透射型传感器模型. 当周期 P 从 $70 \mu\text{m}$ 增加到 $90 \mu\text{m}$ 时, 吸收特性曲线如图 10(a) 所示, 与低频谐振峰相比, 高频处的谐振峰影响较大, 出现一定的红移, 并且吸收强度减小, 可能是由于相邻结构单元的相互作用引起的. 衬底厚度 h 从 $10 \mu\text{m}$ 变化到 $30 \mu\text{m}$ 时, 如图 10(b) 所示, 吸收强度变化明显, 共振频率变化较小, $h = 10 \mu\text{m}$ 时, 虽然其 Q 值较高, 在 f_1 和 f_2 处分别为 34.2 和 46.1, 但调制深度较浅; $h = 20 \mu\text{m}$ 时实现了对太赫兹波的“完美”吸收; $h = 30 \mu\text{m}$ 时调制深度下降, 可能是由于介电材料的损耗引起的. 当衬底材料改变时, 吸收谱如图 10(c) 所示, 聚酰亚胺 (polyimide, PI) 的介电常数为 $3.5 + i0.0027$, 石英的介电常数为 $3.75 + i0.0004$, 衬底材料 PI 的结构 Q 值分别为 21.3, 22.3, 衬底材料 SiO_2 的结

构 Q 值分别为 21.8, 23.9. 结果显示, 采用介电常数较低的衬底材料可以保持较高的共振强度并提高 Q 值. 此外, 模拟了透射型传感器并与本文设计结构性能比较. 透射型传感器单元结构与吸波体传感器单元结构相比没有第 3 层的金属板, 其他均与吸波体结构相同. 在仿真条件相同的情况下, 模拟并绘制透射型传感器的传输特性曲线, 如图 10(d) 所示, 在 1.098 THz 和 2.239 THz 处存在 2 个透射峰, 透射峰的半峰宽为 75.9 GHz 和 80.8 GHz, Q 值分别为 14.5 和 28.0, 均小于吸波体型 Q 值. 这是由于金属反射板增强了入射能量在吸波器内部的相互作用, 有利于实现极强的局域电磁场, 从而产生尖锐的吸收峰, 获得较高的品质因子.

综合考虑传感器的 Q 值、谐振频率、吸收强度等几个因素后, 设置单元结构参数如表 1 中所示, 共振频率 f_1 处 Q 值为 21.9, f_2 处 Q 值为 32.1.

3.3 传感性能分析

传感器表面待测分析物的厚度和介电常数会影响吸收特性曲线的频移和强度. 优化并确定传感

器的单元结构参数后, 进一步研究传感器对待测物的响应特性. 分析物折射率的实部和虚部定义为

$$n + i = \sqrt{\hat{\epsilon}\hat{\mu}}, \quad (6)$$

式中: $\hat{\epsilon}$ 为分析物相对介电常数, $\hat{\epsilon} = \epsilon' + i\epsilon''$ [23]; $\hat{\mu}$ 为空气的相对磁导率, $\hat{\mu}$ 近似为 1. 当传感器表面覆盖 10 μm 厚不同折射率的分析物时, 模拟并绘制对应的吸收特性曲线, 如图 11(a) 所示, 分析物折射率 n 从 1.3 变化到 1.8 时, 两种谐振峰出现明显的红移, 这是因为传感器周围介电常数发生了明显的变化, 传感器将这种改变体现在谐振频率的变化上. 两种谐振频率随折射率变化而引起的频移的程度曲线如图 11(b) 所示, Δf_2 明显大于 Δf_1 , 通过线性拟合后, f_1 和 f_2 折射率灵敏度分别为 318.9 GHz/RIU 和 693.7 GHz/RIU, FOM 值分别为 6.5, 9.8. 许多物质折射率分布在此范围内, 该传感器可以用

于生物组织、食品中农药残留等的检测.

为了研究待测分析物厚度对传感器性能的影响, n 设置为 1.68 并忽略介电损耗, 厚度 h_1 从 2 μm 变化到 30 μm 的吸收谱如图 12(a) 所示, 谐振频率出现红移现象, 频移量与待测物厚度关系如图 12(b) 所示, 随着待测物厚度的增加, 频移量不断增加, 增长速率逐渐趋于饱和, 这是因为入射波会激发传感器表面电流发生震荡, 距离越大, 震荡衰减越快[24]. 因此, 待测物厚度为 10 μm 时检测效果较好.

此外, 本文分析了不同中间介质层材料对传感器传感性能的影响, 表面待测分析物为 10 μm 时的两种谐振频率频移量及其线性拟合曲线绘制在图 13 中, 相对介电常数越低, 传感器灵敏度越大, 传感性能越好. 表 2 为所提出的传感器与参考文献中提出的传感器的综合性能对比, 可以看出, 在太

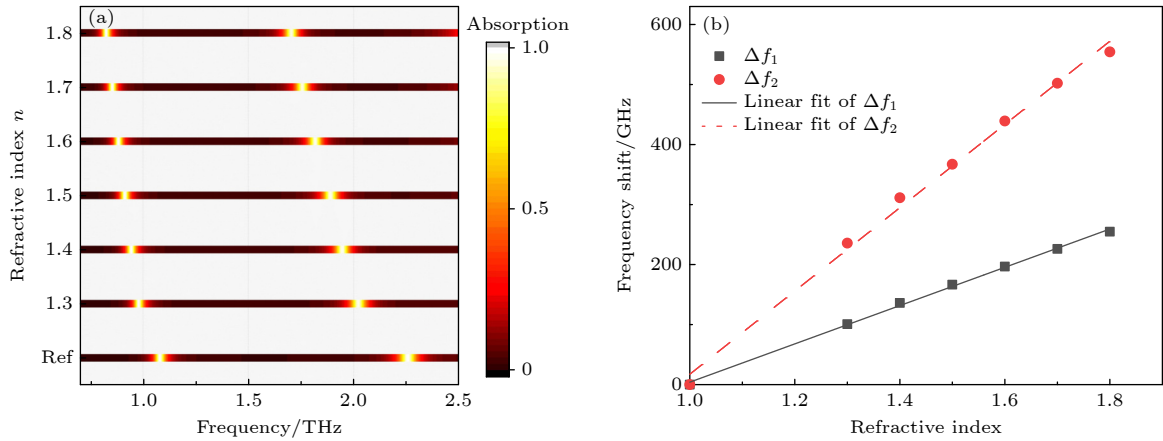


图 11 (a) 待测分析物随折射率变化的吸收特性曲线和 (b) 频移及线性拟合

Fig. 11. (a) Absorption characteristic curve and (b) frequency shift and linear fitting of the analyte to be measured with the change of refractive index.

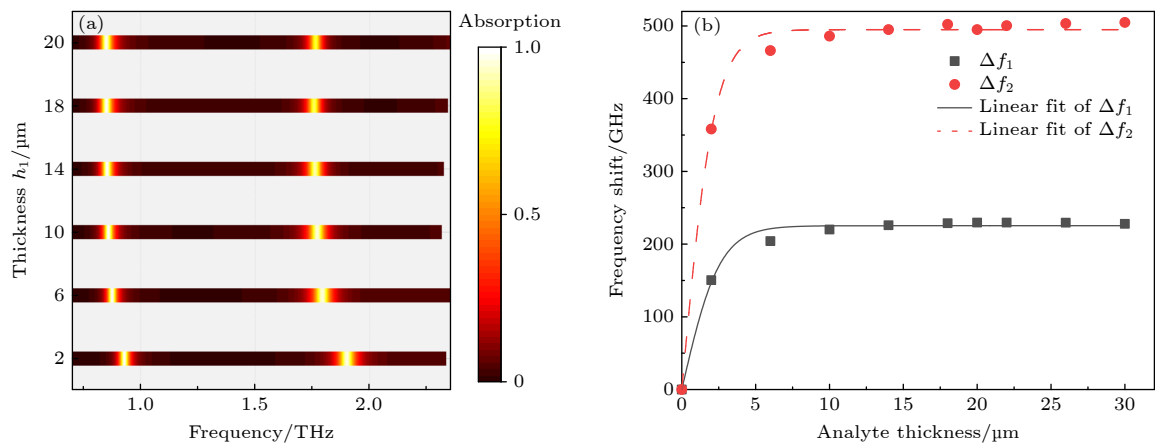


图 12 待测分析物厚度的影响 (a) 不同厚度下的吸收谱; (b) 频率偏移随分析物厚度的变化

Fig. 12. The influence of the thickness of the analyte to be measured: (a) Absorption characteristic curves under different thicknesses; (b) frequency deviation changes with analyte thickness.

表 2 所提出的传感器与参考文献中传感器对比
Table 2. Comparison of the proposed sensors with the sensors in the references.

Design	Operating band/THz	Q-factor	Sensitivity/(GHz/RIU)	FOM	Absorption/%
文献[17]	0.1—1.0	29.3	85	3.58	99.83
文献[25]	0.4—1.0	30.5	537	19.2	99.8
文献[26]	0.1—2.0	—	66	—	99.7
文献[27]	1.0—3.0	22.05	300	2.94	99.9
文献[28]	0.2—1.4	44	300	15	99.9
This work	0.7—2.5	32.1	693.7	9.8	99.98

赫兹频段内, 综合考虑传感器 Q 值、灵敏度、FOM 值、吸收强度, 本文设计的传感器性能更具优势, 有利于生物样品的高灵敏检测。

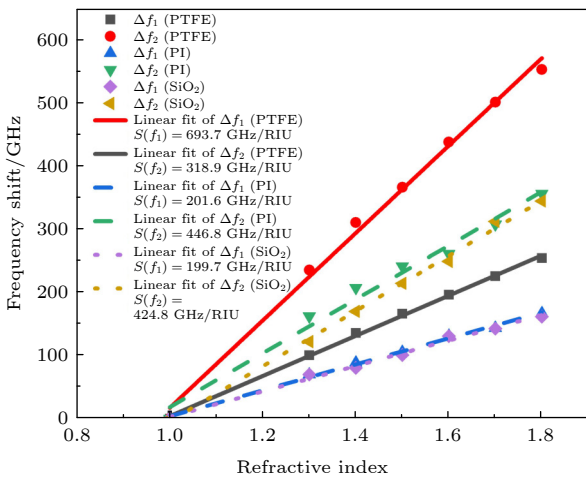


图 13 不同中间介质层材料对传感器谐振频率 f_1 , f_2 处偏移量的影响及其线性拟合

Fig. 13. The influence of different intermediate dielectric layer materials on the offset of the sensor resonance frequency f_1 and f_2 and its linear fitting.

3.4 稳定性分析

图 14(a) 为传感器在两种模式下的吸收谱, 当以 TM 波入射时, 只出现 1 个谐振, 并且吸收强度较低、半峰高较宽, 这是由于外环偶极子谐振引起的, 此时, 电磁场增强作用较小, 不适于生物样品的高灵敏检测. 因此, TE 波入射能够保证生物样品在检测过程中的多点匹配及高灵敏检测. 传感器的电磁响应通常对激励方向很敏感, 在测量中可能存在误差. 入射角是入射太赫兹波与传感器表面法线的夹角, 为了研究入射角度对传感器性能的影响, 不同入射角度的吸收特性曲线模拟并绘制在图 14(b) 中. 当入射角从 0° 增加到 30° 时, 两处谐振频率都没有出现明显的偏移, 在 f_1 处仅观察到

大约 2.6 GHz 的偏移, 在 f_2 处观察到大约 9 GHz 的偏移. 因此, 该传感器在 0° — 60° 斜入射角下显示出较高的角度稳定性. 图 14(c) 为入射角 $\theta = 0^\circ$ 并且其他几何参数固定的情况下, 方位角 φ 从 0° 到 20° 左右旋转时传感器吸收率的变化情况. 当方位角发生变化时, 对共振频率 f_1 以及吸收率基本没有影响, 共振频率 f_2 处的吸收曲线影响较大, 主要体现在 FWHM 的展宽, 使用传感器时, 尽量不要移动位置.

在传感器制作过程中, 由于存在技术难点, 制作过程中难免会产生误差, 影响其性能. 图 15 分析了因制作误差而造成的传感器性能的变化情况, 谐振频率最大偏移量为 10 GHz. 当传感器的制作误差在 -4% — 4% 范围内时, 分析了制作误差对折射率灵敏度的影响, 如图 16 所示, 当制作误差为 -2% 时, 由 $10\ \mu\text{m}$ 厚待测分析物引起的相对于原始低频灵敏度的最大偏差为 2.2 GHz/RIU, 相对于原始高频灵敏度的最大偏差为 2.3 GHz/RIU. 当制作误差为 4% 时, 由待测分析物引起的相对于原始低频灵敏度 (318.9 GHz/RIU) 的最大偏差为 27.5 GHz/RIU, 相对于原始高频灵敏度 (693.7 GHz/RIU) 的最大偏差为 68.6 GHz/RIU. 本文设计的传感器在 -4% 到 4% 的制作误差范围内仍能保持良好的传感性能.

3.5 检测仿真实验

为了研究太赫兹超材料吸波体作为生物传感器的实际应用效果, 采用 CST MWS 2020 频域求解器, 本文从文献 [29] 获取反射式 THz-TDS 下乙醇和水混合物的折射率进行仿真检测分析, 乙醇质量分数从 100% — 0% , 利用 (6) 式计算其折射率, 如表 3 所示, 100% 乙醇溶液计算其折射率为 1.63. 当传感器覆盖 $10\ \mu\text{m}$ 的乙醇-水混合物时, 引起传感器周围介电环境发生变化, C_{sensor} 随之变化, 表

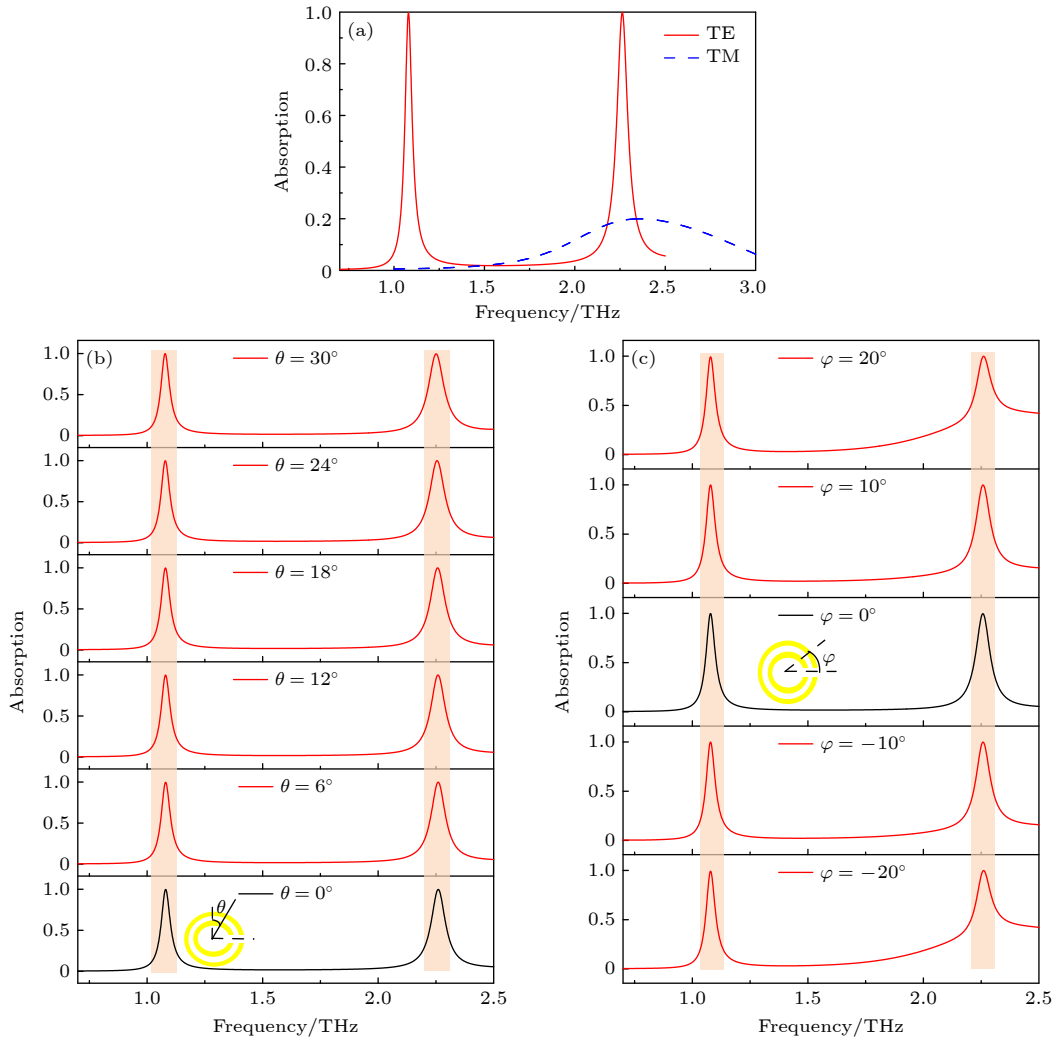


图 14 (a) TE 和 TM 偏振电磁波下传感器的吸收谱; (b) 不同入射角度的吸收特性曲线; (c) 不同方位角度的吸收特性曲线
 Fig. 14. (a) Absorption spectra of the sensor under TE and TM polarized electromagnetic waves; (b) absorption characteristic curves at different incident angles; (c) absorption characteristic curves at different azimuth angles.

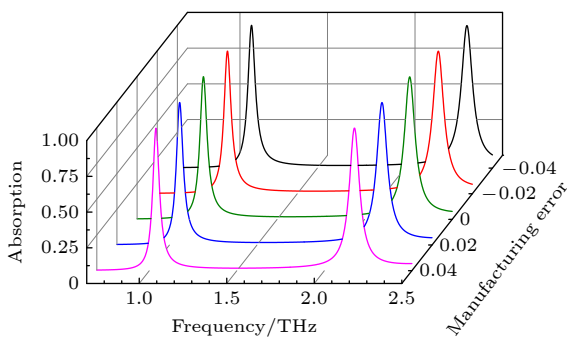


图 15 误差对传感器性能的影响
 Fig. 15. The effect of error on sensor performance.

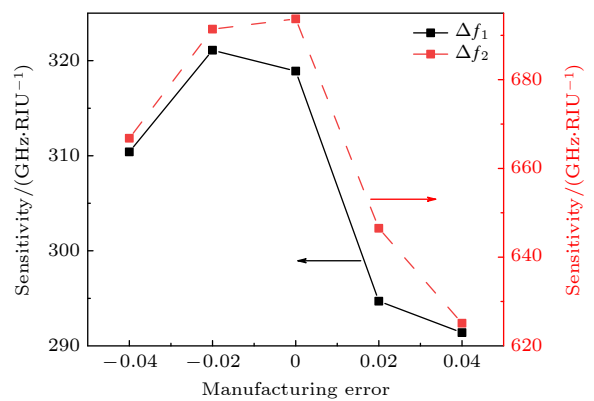


图 16 制造误差对传感器灵敏度的影响
 Fig. 16. The influence of manufacturing error on sensor sensitivity.

现为谐振频率的改变, 其吸收特性曲线情况如图 17 所示, 吸收率保持在 0.7 以上, 乙醇浓度越小, 红移现象越明显, f_2 较 f_1 频移量大, 并且能够识别分析物的折射率变化量为 0.004. 因此, 本文设计的传

感器能够对物质进行高灵敏检测, 为检测痕量及微量生物样品提供了一种简便可行的思路.

表 3 乙醇-水溶液不同浓度折射率

Table 3. Refractive indices of ethanol-water solutions at different concentrations.

Ethanol-water solution concentration (%)	ϵ'	ϵ''	n
100	2.6	0.66	1.63
90	2.7	0.7	1.66
80	2.9	0.82	1.72
70	3	0.83	1.75
60	3.2	0.98	1.81
50	3.6	1.2	1.92
40	3.78	1.43	1.978
30	3.7	1.9	1.982
20	4.2	2.4	2.13
10	4.4	3.1	2.21
0	4.73	4.07	2.34

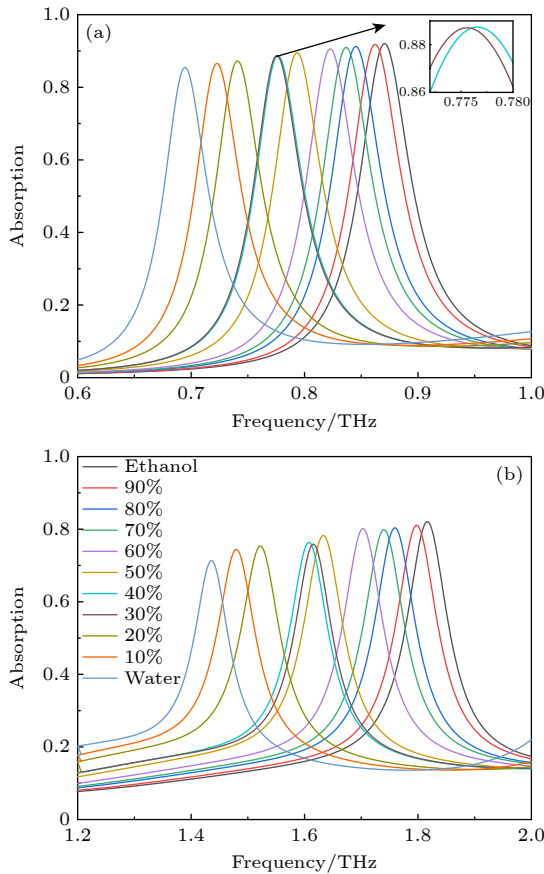


图 17 乙醇-水混合物室温下吸收特性曲线 (a) 低频; (b) 高频

Fig. 17. Absorption characteristics curve of ethanol-water mixture at room temperature: (a) Low frequency; (b) high frequency.

4 结论

本文提出一种性能优良的双频带太赫兹超材料吸波体传感器, 该传感器采用多回路 LC 谐振

器, 其谐振频率可以通过改变几何结构参数独立控制. 该传感器比较稳定、单元结构之间干扰小, 从开口环位置、分析物的折射率及厚度、介质材料对传感器的影响进行全面分析, 并根据入射角、方位角和制作误差等 3 方面评估其稳定性. 结果表明, 传感器的平均吸收率达到 99.9% 以上, 实现了对太赫兹波的完美吸收, 增强了太赫兹波与物质之间的相互作用. 低频、高频处品质因子分别为 21.9, 32.1, 当厚度为 10 μm 时检测效果较好, 灵敏度分别为 318.9 GHz/RIU, 693.7 GHz/RIU, 具有较高的品质因子和灵敏度, 同时呈现出较好的稳定性. 模拟检测实验结果证明本文设计的传感器能够根据吸收特性曲线实现对分析物的检测, 在微量或痕量生物样品检测领域具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Alsharif M H, Albreem M, Solyman A, Kim S 2021 *Comput. Mater. Con.* **66** 2831
- [2] Ma A C, Zhong R B, Wu Z H, Wang Y Q, Yang L, Liang Z K, Fang Z, Liu S G 2020 *Front. Phys.* **8** 584639
- [3] Barnes M E, Daniell G J, Gow P, Apostolopoulos V 2014 *J. Infrared. Millim. Te.* **35** 1030
- [4] Zhou J, Zhang X, Huang G R, Yang X, Zhang Y, Zhan X Y, Tian H Y, Xiong Y, Wang Y X, Fu W L 2021 *ACS Sensors* **6** 1884
- [5] Bartels A, Cerna R, Kistner C, Thoma A, Hudert F, Janke C, Dekorsy T 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 035107
- [6] Sun X, Zhu G K, Hu J J, Jiang X, Liu Y 2019 *J. Appl. Spectrosc.* **86** 661
- [7] Wang L, Qi Z P, Li Z, Guo L 2021 *Opt. Int. J. Light Electron. Opt.* **239** 166873
- [8] Ahmadivand A, Gerislioglu B, Tomitaka A, Manickam P, Pala N 2018 *Biomed. Opt. Express.* **9** 373
- [9] Zheludev N I 2010 *Science* **328** 582
- [10] Shelby, R. A 2001 *Ence.* **292** 77
- [11] Kaina N, Lemoult F, Fink M, Lerosey G 2015 *Nat. Int. J. Sci.* **525** 77
- [12] Chen J B, Wang Y, Jia B H, Geng T, Li X P, Feng L, Qian W, Liang B M, Zhang X X, Gu M, Zhuang S L 2011 *Nat. Photonics.* **5** 436
- [13] Zhai S L, Zhao X P, Liu S, Shen F L, Li L L, Luo C R 2016 *Sci. Rep.* **6** 465
- [14] Wang G Q, Zhu F J, Lang T T, Liu J J, Hong Z, Qin J Y 2021 *Nanoscale. Res. Lett.* **16** 109
- [15] Chen L, Liao D G, Guo X G, Zhao J Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2019 *Front. Inform. Tech. EL.* **20** 591
- [16] Rezazadeh A, Soheilifar M R 2021 *Optic. Quant. Electron.* **53** 555
- [17] Pang H Z, Wang X, Wang J L, Wang Z L, Liu S Y L T, Tian H Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 321 (in Chinese) [庞慧中, 王鑫, 王俊林, 王宗利, 刘苏雅拉图, 田虎强 2021 物理学报 **70** 321]
- [18] Chen Z Y, Qu F F, Wang Y, Nie P C 2021 *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.* **263** 120222
- [19] Veeraselvam A, Mohammed G N A, Savarimuthu K,

- Sankararajan R 2021 *Opt. Quant. Electron.* **53** 354
- [20] Xu J J, Liao D G, Gupta M, Zhu Y M, Zhuang S L, Singh R, Chen L 2021 *Adv. Opt. Mater.* **9** 2100024
- [21] Shen Z L, Li S N, Xu Y F, Yin W, Zhang L Y, Chen X F 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 014066
- [22] Wang Y E, Li D X, Li Z, Hu F R 2020 *Spectrosc. Spec. Anal.* **40** 1785 (in Chinese) [王月娥, 李东霞, 李智, 胡放荣 2020 *光谱学与光谱分析* **40** 1785]
- [23] Jepsen P U, Merbold H 2010 *J. Infrared. Millim. Te.* **31** 430
- [24] Zhang C B, Xue T J, Zhang J, Liu L H, Xie J H, Wang G M, Yao J Q, Zhu W R, Ye X D 2021 *Nanophotonics.* **11** 101
- [25] Chen T, Huang F Y, Zhong X, Jiang W J, Zhang D P 2021 *Acta Photonica Sin.* **50** 131 (in Chinese) [陈涛, 黄锋宇, 钟鑫, 蒋未杰, 张大鹏 2021 *光子学报* **50** 131]
- [26] Islam M S, Sultana J, Biabanifard M, Vafapour Z, Nine M J, Dinovitser A, Cordeiro C M B, Ng B W H, Abbott D 2020 *Carbon.* **158** 559
- [27] Saadeldin A S, Hameed M F O, Elkaramany E M A, Obayya S S A 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 7993
- [28] Yang J P, Wang M C, Deng H, Kang Y, Li Z R, Liu Q C, Xiong L, Wu Z X, Qu W W, Shang L P 2021 *Acta Optica. Sin.* **41** 218 (in Chinese) [杨洁萍, 王民昌, 邓琥, 康莹, 李宗仁, 刘泉澄, 熊亮, 武志翔, 屈薇薇, 尚丽平 2021 *光学学报* **41** 218]
- [29] Jepsen P U, Miller U, Merbold H 2007 *Opt. Express.* **15** 14717

Double-opening metal ring based terahertz metamaterial absorber sensor*

Ge Hong-Yi¹⁾²⁾³⁾ Li Li¹⁾²⁾³⁾ Jiang Yu-Ying^{1)2)4)†} Li Guang-Ming¹⁾²⁾³⁾
Wang Fei¹⁾²⁾³⁾ Lü Ming¹⁾²⁾³⁾ Zhang Yuan^{1)2)3)‡} Li Zhi¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory of Grain Information Processing and Control (Henan University of Technology),
Ministry of Education, Zhengzhou 450001, China*)

2) (*Henan Provincial Key Laboratory of Grain Photoelectric Detection and Control, Henan
University of Technology, Zhengzhou 450001, China*)

3) (*College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China*)

4) (*School of Artificial Intelligence and Big Data, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China*)

(Received 14 December 2021; revised manuscript received 24 January 2022)

Abstract

Terahertz metamaterial biosensor is a label-free affinity sensor that enhances the strength of the local electromagnetic field. It is extremely sensitive to changes in the dielectric constant of the surrounding environment, thereby providing a new method of detecting micro or trace biological samples. In this work, a highly sensitive terahertz refractive index metamaterial absorber sensor for detecting the biological sample is proposed. The sensor consists of two concentric open metal rings and is a multimode resonator. With two independent adjustable operating bands in a frequency range of 0.7–2.5 THz, i.e. 1.079 THz and 2.271 THz, the sensor can observe different electromagnetic effects of the sample in the terahertz band. We evaluate the performance of terahertz sensors with indicators such as absorption characteristics and sensitivity. The sensor possesses the absorption higher than 99.9% in free space. In addition, the large Q value indicates that the sensor provides high frequency selectivity characteristics. Especially, the sensitivity of the sensor achieves 693.7 GHz/RIU, with a minimum refractive index change of 0.004 for the detection of biological samples, which provides good sensing performance. In the proposed sensor, a flexible material with low dielectric constant is used, which has the advantages of biocompatibility and portability and shows high stability at the 0°–60° oblique incidence angle and within 4% fabrication error. Moreover, the detection effectiveness of the sensor is verified by simulation experiments with ethanol-water mixtures. The sensor units designed in this paper have small interactions among them, work stably and are easily fabricated. The sensor can significantly enhance the interaction between light and matter and has broad application prospects in terahertz high-sensitivity biosensing detection.

Keywords: terahertz, metamaterials, absorbers, biosensors

PACS: 87.50.U–, 87.85.Ox

DOI: 10.7498/aps.71.20212303

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975053, 61705061), the Open Fund Project of Key Laboratory of Grain Information Processing & Control, Ministry of Education, China, the Henan University of Technology, China (Grant No. KFJJ2020103), Cultivation Programme for Young Backbone Teachers in Henan University of Technology, the Natural Science Foundation of Henan Province, China (Grant No. 202300410111), the Program for Science & Technology Innovation Talents in Universities of Henan Province, China (Grant No. 22HASTIT017), the Major Public Welfare Projects of Henan Province, China (Grant No. 201300210100).

† Corresponding author. E-mail: jiangyuying11@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: zy_haut@163.com