



## 双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性

庞慧中 王鑫 王俊林 王宗利 刘苏雅拉图 田虎强

### Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor

Pang Hui-Zhong Wang Xin Wang Jun-Lin Wang Zong-Li Liu Su-Yalatu Tian Hu-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 168101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210062

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210062>

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

#### 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>

#### S/X双频带吸波实时可调的吸波器

S/X dual-band real-time modulated frequency selective surface based absorber

物理学报. 2020, 69(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200606>

#### 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>

#### 基于表面等离子体共振的新型超宽带微结构光纤传感器研究

A new type of ultra-broadband microstructured fiber sensor based on surface plasmon resonance

物理学报. 2021, 70(7): 074207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201477>

#### 基于石墨烯编码超构材料的太赫兹波束多功能动态调控

Dynamic multifunctional control of terahertz beam based on graphene coding metamaterial

物理学报. 2018, 67(11): 118102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180125>

## 双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性\*

庞慧中 王鑫<sup>†</sup> 王俊林<sup>‡</sup> 王宗利 刘苏雅拉图 田虎强

(内蒙古大学电子信息工程学院, 呼和浩特 010021)

(2021年1月10日收到; 2021年3月29日收到修改稿)

本文提出了一种双频带太赫兹超材料吸波器, 该超材料吸波器在 0.387 和 0.694 THz 两个谐振点的吸收率可达到 99% 以上, 实现了对入射太赫兹波的“完美吸收”. 该双频带太赫兹超材料吸波体传感器在两个谐振频率处的  $Q$  值分别为 28.1 和 29.3, 折射率灵敏度  $S(f)$  分别为 39.5 和 85 GHz/RIU, 均具有较优的传感特性. 研究表明, 对于该太赫兹超材料吸波器来说, 除了可以选用折射率较小的中间介质层材料提高传感特性外, 还可以根据待测物折射率的不同选取相应的待测物厚度来提高传感特性. 本文设计的双频带超材料吸波体传感器可实现谐振频率与待测物质特征频率间的多点匹配, 增加反映被测物质差异的信息量, 从而提升物质探测的准确性和灵敏度. 通过对三种食用油样本的分析, 验证了本文所设计的双频带太赫兹超材料吸波体传感器的实际应用价值. 本次研究丰富了双频带超材料吸波体传感器的种类, 在传感检测领域具有广阔的发展空间.

**关键词:** 太赫兹, 双频带, 超材料吸波器, 传感器**PACS:** 81.05.Xj, 41.20.Jb, 87.50.U-, 07.07.Df**DOI:** 10.7498/aps.70.20210062

## 1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是指频率在 0.1—10 THz 范围内, 波长在 30—3000  $\mu\text{m}$  的电磁波, 在电磁波谱中介于红外光与微波之间. 太赫兹谱的能级与有机生物分子 (如 DNA、氨基酸、蛋白质等) 的转动和振动能级相对应<sup>[1,2]</sup>; 太赫兹辐射的光子能量非常低, 所以在生物样品检测时不会造成生物电离<sup>[2]</sup>; 太赫兹波为亚毫米波, 位于微波与远红外波相交叠的区间范围内, 兼有两种波谱的特点<sup>[3]</sup>. 这些优点使得基于太赫兹波研究生物分子的结构、分子之间的反应、分子与环境的相互作用等具有天然的优势. 近年来, 太赫兹探测技术的发展极大地促进了太赫兹辐射基础理论和应用技术的研究, 为

生物学、化学、物理学等诸多学科的发展提供了新的研究手段<sup>[4–8]</sup>, 并已在生物样品的传感检测领域得到了广泛的应用<sup>[9,10]</sup>. 通过测量被测极性物质, 如药品、食用油、有机材料等的太赫兹吸收光谱, 并与预先建立的太赫兹光谱数据库进行比较, 可以实现对被测样品的快速定性鉴别. 综上所述, 基于太赫兹光谱技术的生物样品检测研究具有重要的科学意义, 为实现生物样品的快速、免标记、高灵敏度检测奠定了基础.

自然材料对太赫兹频段的电磁波难以产生强烈的电磁响应, 电磁超材料的出现弥补了这一缺陷. 超材料 (metamaterials, MMs) 具有自然材料所不具备的超常物理性质, 能够以一定的方式操控电磁波, 实现对入射电磁场的局域增强, 这一特性引起了研究人员的广泛关注与兴趣. 如今, 超材料

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51965047)、内蒙古自然科学基金 (批准号: 2018MS06007)、内蒙古大学 2018 年高层次人才引进科研启动项目 (批准号: 21700-5185128, 21700-5185131)、内蒙古科技攻关项目 (批准号: 2020GG0185) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: wangxin219@imu.edu.cn

<sup>‡</sup> 通信作者. E-mail: wangjunlin@imu.edu.cn

已被广泛应用于实现吸收器、滤波器和热辐射器<sup>[11-13]</sup>等功能器件. 由于超材料对周围环境介电性质的改变很敏感, 当外界环境介电特性发生改变时, 太赫兹波通过超材料后的谐振特性也会随之发生改变, 因此通过测量改变的数值, 可以实现对超材料周围物质的传感检测和鉴别.

太赫兹超材料吸波体传感器是太赫兹超材料的一种典型的功能器件, 通过将待测物质与太赫兹超材料吸波体传感器表层金属谐振结构单元相接触, 监测超材料吸波体传感器吸收频率的偏移可实现对待测样品的传感检测<sup>[14-20]</sup>. 随着太赫兹超材料吸波体传感器的不断创新与进步, 国内外研究人员围绕着超材料吸波体传感器的各个方面, 如谐振频率的可控可调、宽角度入射、极化不敏感以及多频带吸收等展开了深入探究<sup>[21-26]</sup>. 传统的单频带超材料吸波体传感器只能实现待测物质的特征频率与传感器谐振频率的单个匹配, 较少的信息数据量会影响传感器的检测精度和灵敏度, 双频带超材料吸波体传感器具有双频谐振峰, 可实现传感器谐振频率与待测物质特征频率间的多点匹配, 增加反映被测物质差异的信息量, 从而提升物质探测的准确性和灵敏度.

太赫兹超材料传感器主要性能参数有品质因数  $Q$ 、折射率灵敏度  $S(f)$ 、FOM (figure of merit) 值等, 通过提升参数指标可以实现对待测物质的高灵敏传感检测. 提升参数指标的方法有很多种, 首先, 对于超材料表层金属谐振器来说, 改变其谐振方式 (LC 谐振、Fano 谐振、偶极子谐振等) 产生更加尖锐的谐振峰以提高品质因数  $Q$ <sup>[27,28]</sup>; 其次, 通过改变介质层材料可以获得更理想的折射率灵敏度  $S(f)$ <sup>[29]</sup>; 此外, 设计合适的超材料单元结构, 实现具有多谐振峰的超材料吸波体传感器, 也可以提升传感器性能<sup>[30]</sup>.

本文设计实现了一款双频带太赫兹超材料吸波体传感器, 深入分析了传感器谐振频率处的电磁场分布, 揭示了背后的传感机理. 通过分析不同折射率的待测物质对超材料传感器谐振频率的影响, 揭示了所设计的太赫兹超材料吸波体传感器的传感特性. 通过分析不同厚度的待测物 and 不同中间介质层材料对传感特性的影响, 确定了最适合本文设计的超材料传感器的待测物厚度和中间介质层材料. 以食用油品类的传感鉴别为例, 验证了本次设计的双频带太赫兹超材料吸波体传感器可以实现

介电常数相近的三种食用油的高灵敏度快速检测. 综上所述, 本文设计的双频带太赫兹超材料吸波体传感器在未来的生物医学传感领域具有广阔的应用发展空间.

## 2 双频带太赫兹超材料吸波体传感器结构设计与传感机理研究

### 2.1 结构设计与仿真

双频带太赫兹超材料吸波体传感器的结构示意图如图 1 所示, 该传感器采用典型的“三明治”结构, 即由顶层金属谐振结构单元、中间介质层以及底层连续金属底板组成. 其中底层连续金属板的厚度要大于太赫兹波的趋肤深度, 避免太赫兹波发生透射, 通过合理设计顶层金属谐振单元阵列结构及中间介质层厚度, 使入射太赫兹波在超材料内部实现电磁谐振, 进而实现对入射太赫兹波的完美吸收. 顶层金属谐振结构单元与底层金属底板采用的材料是金属铝 (电导率  $\sigma = 3.56 \times 10^7$ ), 中间介质层采用的材料是聚四氟乙烯 (poly tetra fluoro ethylene, PTFE) 材料, 相对介电常数  $\epsilon_r = 2.1$ , 损耗角正切值为 0.002.

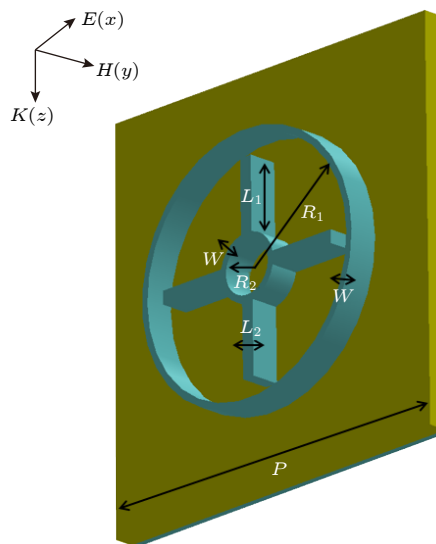


图 1 双频带太赫兹超材料吸波体传感器结构示意图  
Fig. 1. Schematic diagram of dual-band THz MM absorber sensor structure.

采用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2020 的频域求解器对所设计的双频带超材料吸波体传感器结构进行了仿真和优化. 在仿真过程中, 太赫兹波垂直入射到超材料吸波器表面, 波矢量  $k$

沿着  $z$  轴方向, 电场  $E$  沿着  $x$  轴方向, 磁场  $H$  沿着  $y$  轴方向. 在  $X-Y$  平面上设置周期性的边界条件,  $Z$  平面上设置开放性的边界条件, 以此来模拟无限周期阵列.

双频带太赫兹超材料吸波体传感器结构参数如下:  $R_1 = 100 \mu\text{m}$ ,  $W = 5 \mu\text{m}$ ,  $R_2 = 25 \mu\text{m}$ ,  $L_1 = 60 \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 10 \mu\text{m}$ . 结构单元周期  $P = 300 \mu\text{m}$ , 顶层金属谐振结构单元厚度为  $22.5 \mu\text{m}$ , 中介质层厚度为  $4.5 \mu\text{m}$ , 底层金属板的厚度为  $0.1 \mu\text{m}$ , 当太赫兹波垂直入射时所对应的吸收和反射特性曲线如图 2 所示. 超材料吸波体传感器在  $f_1 = 0.387 \text{ THz}$  和  $f_2 = 0.694 \text{ THz}$  处产生了两个吸收峰, 吸收率分别为  $99.70\%$  和  $99.83\%$ , 实现了对入射太赫兹波的“完美”吸收.

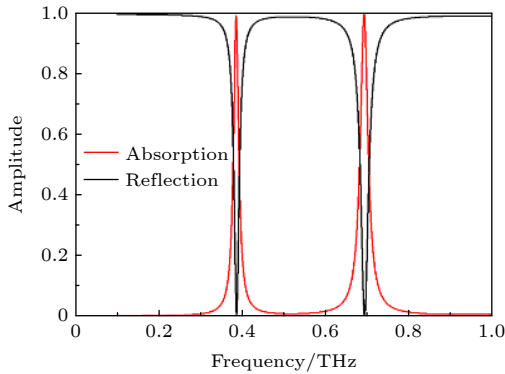


图 2 双频带太赫兹超材料吸波体传感器吸收与反射特性仿真曲线  
Fig. 2. Simulated absorption and reflection characteristic curve of dual-band THz MM absorber sensor.

双频带太赫兹超材料吸波体传感器两个谐振峰的半高宽 (full width half maximum, FWHM) 分别为  $13.8$  和  $23.7 \text{ GHz}$ . 品质因数  $Q$  值反映了传感器的谐振特性, 即谐振峰越尖锐, 对应的  $Q$  值越

大, 传感器的灵敏度也越高. 此外,  $Q$  值也决定了传感器的分辨率,  $Q$  值越大, 传感器的分辨率也越高. 传感器的品质因数可定义为  $Q(f) = f/\text{FWHM}$  (其中,  $f$  为谐振峰的谐振频率, FWHM 为谐振峰的半高宽). 该传感器吸收峰  $f_1$  处品质因数  $Q = 28.1$ , 吸收峰  $f_2$  处品质因数  $Q = 29.3$ , 较高的品质因数证明该结构具有良好的传感性能.

## 2.2 传感机理分析

为了研究双频带太赫兹超材料吸波体传感器的谐振机理, 需要分析谐振频率处的表面电场、表面和底面电流以及磁场分布. 如图 3(a) 所示, 谐振频率  $f_1$  处的表面电场主要集中在外部大圆环的左右两端, 说明谐振频率  $f_1$  处吸收峰是由于外部大圆环偶极子谐振产生的. 图 3(b) 为谐振频率  $f_2$  处的表面电场分布, 可以看出, 电场主要集中分布于内部小圆环及十字结构的左右两端, 同理可以说明谐振频率  $f_2$  处吸收峰是由于内部小圆环及十字结构偶极子谐振引起的.

如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 太赫兹超材料吸波体传感器两个谐振频率处表面电流主要集中在外部大圆环上下两端和内部圆环与十字结构的上下两端. 底面电流如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 底面与表面电流方向相反, 形成磁偶极子谐振.

图 6(a) 和图 6(b) 所示为双频带太赫兹超材料吸波体传感器谐振频率  $f_1$  和  $f_2$  处的磁场分布, 与电场形成的电偶极子谐振呈现对偶的状态.

该双频带太赫兹超材料吸波体传感器结构为中心对称结构, 保证了对于不同极化方向的电磁波入射到超材料吸波体传感器上均能形成强烈的谐振, 具有极化不敏感的特性.

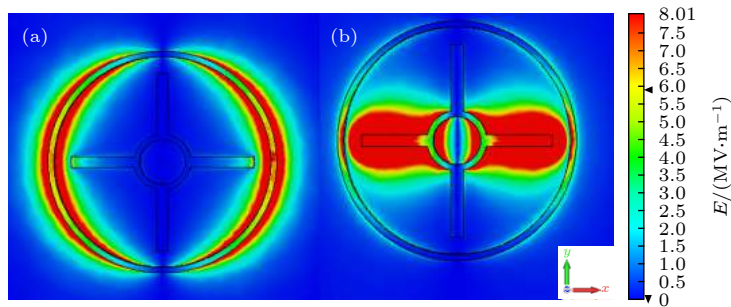


图 3 (a) 谐振频率  $f_1$  处表面电场分布; (b) 谐振频率  $f_2$  处表面电场分布

Fig. 3. (a) Surface electric field distribution at the  $f_1$  resonance frequency; (b) surface electric field distribution at the  $f_2$  resonance frequency.

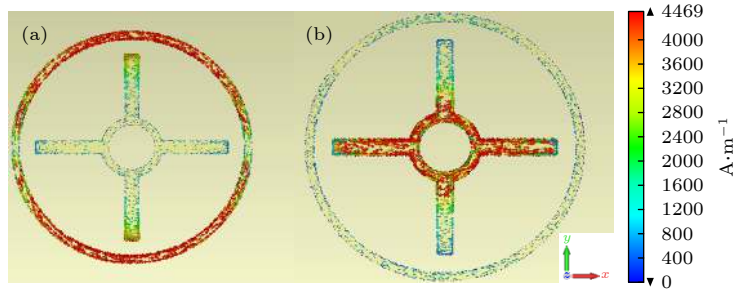


图 4 (a) 谐振频率  $f_1$  处表面电流分布; (b) 谐振频率  $f_2$  处表面电流分布

Fig. 4. (a) Surface current distribution at the  $f_1$  resonance frequency; (b) surface current distribution at the  $f_2$  resonance frequency.

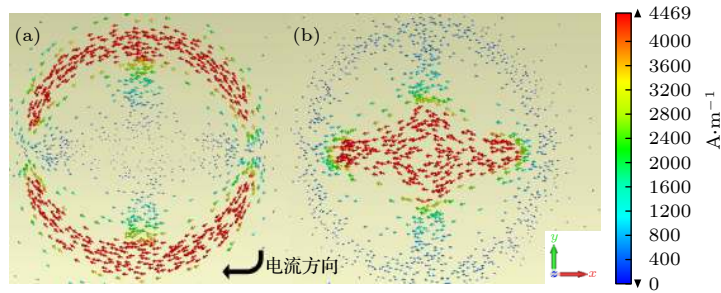


图 5 (a) 谐振频率  $f_1$  处底面电流分布; (b) 谐振频率  $f_2$  处底面电流分布

Fig. 5. (a) Undersurface current distribution at the  $f_1$  resonance frequency; (b) undersurface current distribution at the  $f_2$  resonance frequency.

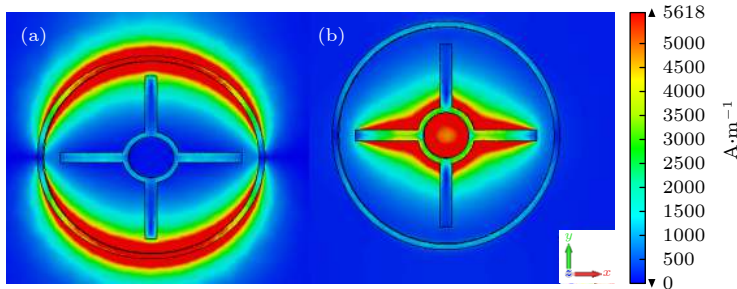


图 6 (a) 谐振频率  $f_1$  处磁场分布; (b) 谐振频率  $f_2$  处磁场分布

Fig. 6. (a) Magnetic field distribution at the  $f_1$  resonance frequency; (b) magnetic field distribution at the  $f_2$  resonance frequency.

### 3 双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性研究及性能改善

研究太赫兹超材料吸波体传感器的传感特性并改善其性能对扩展传感器的应用范围具有一定的参考价值. 对于所设计的双频段太赫兹超材料吸波体传感器来说, 将不同的待测物质覆盖在顶层金属谐振结构单元表面会导致周围环境介电参数的改变, 进而改变超材料吸波器的谐振特性 (谐振频率、吸收率、谐振峰半高宽等), 因此, 通过监测该超材料吸波器谐振频率的偏移、吸收率的改变以

及谐振峰半高宽的变化, 可实现对待测物质的传感检测.

为了研究所设计的太赫兹超材料吸波体传感器对不同的待测物质进行传感检测的性能, 如品质因数  $Q$  和灵敏度  $S(f)$  等, 将不同折射率的待测物覆盖在太赫兹超材料吸波体传感器上, 并对其吸收特性曲线进行了一系列的仿真研究.

如图 7 所示, 当覆盖待测分析物质的折射率从  $n = 1$  增加到  $n = 2$  时会导致谐振频率  $f_1, f_2$  处的两个吸收峰出现不同程度的红移, 且随着折射率的增加, 谐振频率  $f_1$  吸收峰的吸收率几乎不变, 而谐振频率  $f_2$  处吸收峰的吸收率逐渐下降. 当折射率

从  $n = 1$  增加到  $n = 2$  时, 谐振频率  $f_2$  吸收率从 99 % 降低至 90 %。由此可见, 所设计的双频带太赫兹超材料吸波体可实现对不同折射率待测物质的传感检测。

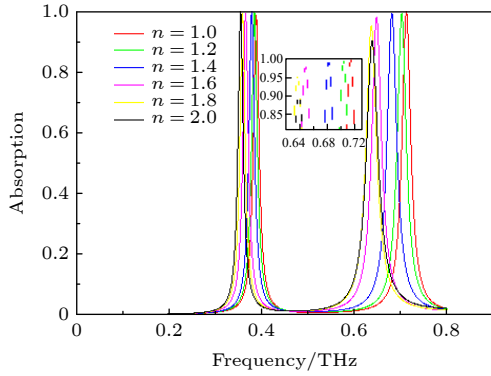


图 7 折射率从  $n = 1$  变化到  $n = 2$  时双频带太赫兹超材料吸波体的吸收特性仿真曲线

Fig. 7. Simulated absorption characteristic curve of dual-band THz MM absorber with refractive index changes from  $n = 1$  to  $n = 2$ .

为进一步探究所设计的太赫兹超材料吸波体传感器的传感特性, 首先对本次设计的传感器两个吸收峰谐振频率偏移与待测物折射率之间的关系进行了研究. 如图 8 所示, 对待测物折射率的变化与两个吸收峰谐振频率偏移量之间的关系进行了拟合. 随着折射率从  $n = 1$  变化到  $n = 2$  时, 谐振频率偏移量逐渐增加 (相对于  $n = 1$  时), 在谐振频率  $f_1$  处折射率灵敏度  $S(f) = 39.5$  GHz/RIU, 在谐振频率  $f_2$  处折射率灵敏度  $S(f) = 85$  GHz/RIU. 由此可见, 本文设计的传感器具有较高的灵敏度。

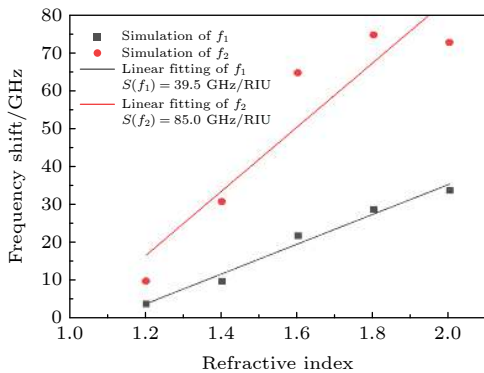


图 8 待测分析物折射率从  $n = 1$  变化到  $n = 2$  时传感器的谐振频率偏移及其线性拟合

Fig. 8. Resonance frequency shift of the sensor and linear fitting with determined refractive index changes from  $n = 1$  to  $n = 2$ .

当折射率从  $n = 1$  变化到  $n = 2$  时, 仿真分析了待测物厚度对太赫兹超材料吸波体传感器传感特性的影响. 当太赫兹波垂直入射时, 仿真了待测样品的折射率和厚度发生变化时, 谐振频率的变化规律, 结果如图 9 和图 10 所示. 可以看出, 当待测分析物厚度  $H$  从  $5 \mu\text{m}$  逐渐增大到  $25 \mu\text{m}$  时, 传感器谐振频率  $f_1$  处的折射率灵敏度  $S(f_1)$  从 16 GHz/RIU 逐渐增大, 当厚度  $H = 15 \mu\text{m}$  时折射率灵敏度达到最大, 即  $S(f_1) = 39.5$  GHz/RIU; 谐振频率  $f_2$  处的折射率灵敏度  $S(f_2)$  从 39 GHz/RIU 逐渐增加, 当厚度  $H = 15 \mu\text{m}$  时灵敏度最大, 即  $S(f_2) = 85$  GHz/RIU. 随着待测分析物厚度从  $15 \mu\text{m}$  逐渐增加时, 所设计的传感器灵敏度甚至出现了下降, 这说明适度增加待测分析物厚度对传感器检测的灵敏度有一定的提升, 但是提升并不是无限制的. 对于该双频带太赫兹超材料吸波体传感器来说,

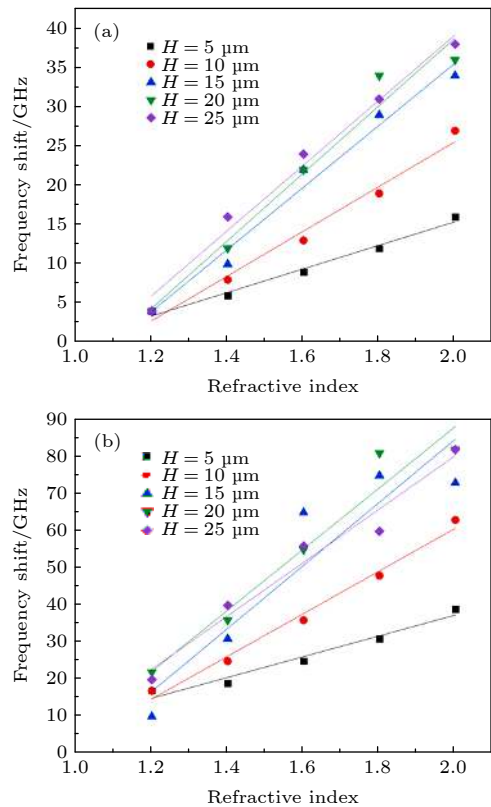


图 9 (a) 待测分析物折射率从  $n = 1$  变化到  $n = 2$  时谐振频率  $f_1$  偏移量及其线性拟合; (b) 待测分析物折射率从  $n = 1$  变化到  $n = 2$  时谐振频率  $f_2$  偏移量及其线性拟合

Fig. 9. (a) Resonance frequency shifts of  $f_1$  resonance frequency with refractive index changes from  $n = 1$  to  $n = 2$  and linear fitting; (b) resonance frequency shifts of  $f_2$  resonance frequency with refractive index changes from  $n = 1$  to  $n = 2$  and linear fitting.

待测分析物厚度在 15  $\mu\text{m}$  时, 谐振场几乎全部被局限在超材料和待测物质中, 因此可以获得较高的传感灵敏度.

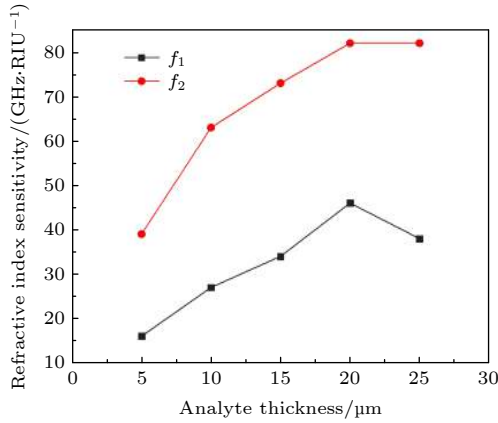


图 10 待测分析物厚度对传感器折射率频率灵敏度的影响  
Fig. 10. Influence of the thickness of the analyte to be measured on the refractive index frequency sensitivity of the sensor.

当传感器折射率灵敏度相差不明显时, 通过 FOM 值也可以分析所设计的传感器传感特性, FOM 值可以比较工作在不同波段传感器的传感性能. 通常情况下, FOM 值可以定义为  $FOM = S(f)/FWHM$ . 该传感器在谐振频率  $f_1$  处  $FOM = 2.86$ , 在谐振频率  $f_2$  处  $FOM = 3.58$ .

此外, 为了提高设计的太赫兹超材料吸波体传感器的传感性能, 对不同材料作为中间介质层对传感性能的影响进行了分析, 结果如图 11(a) 和图 11(b) 所示. 当中间介质层材料分别为相对介电常数  $\epsilon_r = 4.3$  的 FR-4、相对介电常数  $\epsilon_r = 2.68$

的 PDMS 和相对介电常数  $\epsilon_r = 2.1$  的 PTFE 时传感器的谐振频率  $f_1$  处和谐振频率  $f_2$  处偏移量及其线性拟合. 从图 11(a) 和图 11(b) 可以看出, 当相对介电常数 (折射率) 越低时, 本文设计的双频带太赫兹超材料吸波体传感器的斜率越大 (灵敏度越高). 因为当相对介电常数越低时, 中间介质层材料对谐振场的束缚越小, 谐振场扩展到了顶层谐振器的表面, 实现了与待测分析物的充分接触, 提高了传感器的传感性能.

为了验证所设计的双频带太赫兹超材料吸波体传感器的实际应用效果, 选取了三种具有不同介电常数的食用油进行了仿真分析, 分别是相对介电常数  $\epsilon_r = 3$  的花生油、相对介电常数  $\epsilon_r = 3.1$  的橄榄油和相对介电常数  $\epsilon_r = 3.4$  的亚麻籽油. 当待测物厚度为 15  $\mu\text{m}$  时, 基于双频带太赫兹超材料吸波体传感器的三种食用油谐振频率变化如图 12(a) 和图 12(b) 所示, 由此可见, 基于所设计的双频带太赫兹超材料吸波体传感器可以实现三种食用油的有效鉴别.

当待测食用油为相对介电常数  $\epsilon_r = 3$ , 厚度 15  $\mu\text{m}$  的花生油时, 基于双频带超材料吸波体传感器仿真得到的两个谐振频率分别为  $f_1 = 0.361$  THz,  $f_2 = 0.640$  THz, 相对于分析物折射率  $n = 1$ , 厚度为 15  $\mu\text{m}$  时的谐振频率偏移量分别为  $\Delta f_1 = 0.028$  THz,  $\Delta f_2 = 0.073$  THz. 依据之前仿真得到的折射率灵敏度  $S(f_1) = 39.5$  GHz/RIU,  $S(f_2) = 85$  GHz/RIU, 以及计算得到的频率偏移量, 根据折射率公式  $\Delta n_1 = \frac{\Delta f_1}{S(f_1)}$ ,  $\Delta n_2 = \frac{\Delta f_2}{S(f_2)}$  可推算出待测食用油的折射率为  $n_1 = \Delta n_1 + 1 = 1.709$ ,

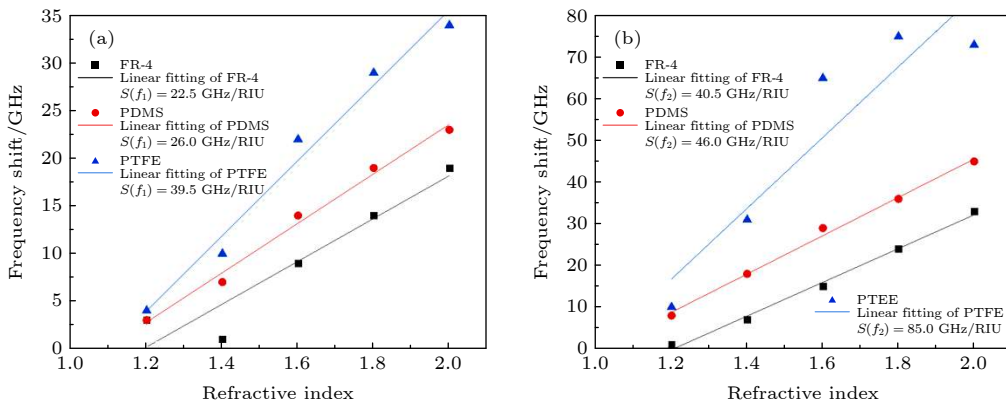
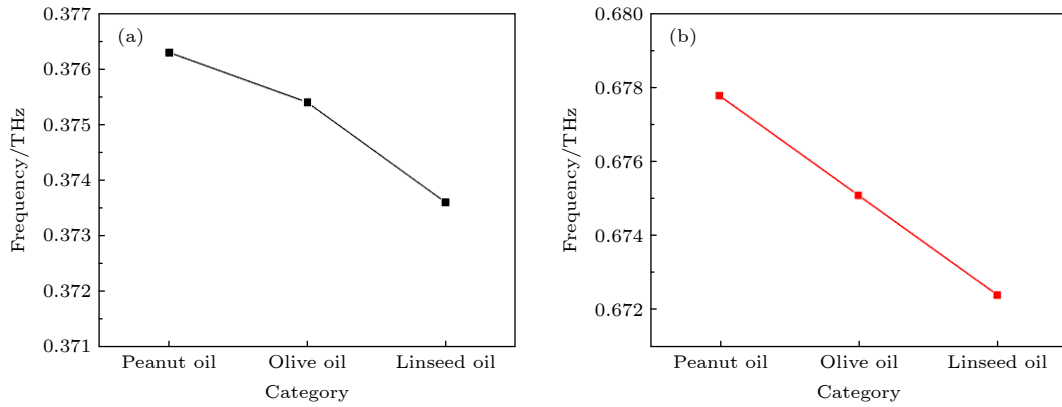


图 11 (a) 不同中间介质层材料对传感器谐振频率  $f_1$  处偏移量的影响及其线性拟合; (b) 不同中间介质层材料对传感器谐振频率  $f_2$  处偏移量的影响及其线性拟合  
Fig. 11. (a) Influence of different dielectric layer materials on the resonance frequency  $f_1$  shift of sensor and linear fitting; (b) influence of different dielectric layer materials on the resonance frequency  $f_2$  shift of sensor and linear fitting.

图 12 (a) 传感器检测食用油的谐振频点  $f_1$ ; (b) 传感器检测食用油的谐振频点  $f_2$ Fig. 12. (a) Sensor resonance frequency  $f_1$  of detects edible oil; (b) sensor resonance frequency  $f_2$  of detects edible oil.

$n_2 = \Delta n_2 + 1 = 1.858$ . 同理当待测食用油为相对介电常数  $\epsilon_r = 3.4$ , 厚度  $15 \mu\text{m}$  的亚麻籽油时, 基于双频带超材料吸波体传感器得到的两个谐振频率分别为  $f_1 = 0.358 \text{ THz}$ ,  $f_2 = 0.635 \text{ THz}$ , 折射率为  $n_1 = \Delta n_1 + 1 = 1.784$ ,  $n_2 = \Delta n_2 + 1 = 1.918$ . 由此可见, 根据谐振频率  $f_1$  推算得到的食用油折射率更接近于实际情况, 而根据谐振频率  $f_2$  推算得到的食用油折射率与实际情况相差较多, 这主要源于我们在仿真计算该超材料吸波体传感器折射率灵敏度进行线性拟合时引入了的误差相对较大. 综上所述, 基于所设计的双频带太赫兹超材料吸波器传感器可以实现对三种具有不同介电常数食用油的快速、高灵敏度传感检测.

## 4 结 论

本文提出了一种双频带太赫兹超材料吸波体传感器, 在  $0.387$  和  $0.694 \text{ THz}$  两个谐振频率点的吸收率可达到  $99\%$  以上, 实现了对入射太赫兹波的“完美吸收”. 该双频带太赫兹超材料吸波体传感器  $Q$  值分别为  $28.1$  和  $29.3$ , 折射率灵敏度  $S(f)$  分别为  $39.5$  和  $85 \text{ GHz/RIU}$ , 具有较优的传感特性. 此外, 基于对所设计的双频带太赫兹超材料吸波体传感器表面电磁场以及电流分布的分析, 揭示了该传感器的传感机理. 本文所设计的传感器对不同折射率、不同厚度的待测物传感性能进行了分析, 结果表明, 该传感器在检测折射率  $n = 1-2$  区间范围内的待测物时, 待测物厚度为  $15 \mu\text{m}$  传感性能最佳, 灵敏度  $S(f_1) = 39.5 \text{ GHz/RIU}$ ,  $S(f_2) = 85 \text{ GHz/RIU}$ . 此外, 还通过分析不同中间介质层材料选出了最适本文所设计的传感器中间介质层

材料, 当中间介质材料折射率越低时, 对谐振场的束缚越小, 实现了与待测分析物的充分接触, 提高了传感器的传感性能. 本文对不同品类食用油的传感检测验证了该传感器的实际应用能力, 通过对谐振频率偏移量与灵敏度之间的关系仿真分析出的折射率在食用油折射率样品范围内, 证明了本文所设计的传感器具有实际应用价值. 该双频带太赫兹超材料吸波体传感器与传统的单频带传感器相比, 具有更优良的传感特性, 可以实现传感器谐振频率与待测物质特征频率间的多点匹配, 增加反映被测物质差异的信息量, 从而提升物质探测的准确性和灵敏度. 本文的研究丰富了双频带超材料吸波体传感器的种类, 在传感检测方面的应用具有相当的参考价值.

## 参 考 文 献

- [1] Lee Y K 2012 *Principles of Terahertz Science and Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) pp1-30 (in Chinese) [李允植 2012 太赫兹科学与技术原理 (北京: 国防工业出版社) 第1—30页]
- [2] Sun S, He Q, Hao J, Xiao S, Zhou L 2019 *Adv. Opt. Photonics* **11** 380
- [3] Su Z, Yin J, Zhao X 2015 *Opt. Express* **23** 1679
- [4] Zhang Y P, Li T T, Lv H H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 117801 (in Chinese) [张玉萍, 李彤彤, 吕欢欢 2015 物理学报 **64** 117801]
- [5] Yan X, Zhang X F, Liang L J, Yao J Q 2014 *Spectrosc. Spect. Anal.* **09** 2365 (in Chinese) [闫昕, 张兴坊, 梁兰菊, 姚建铨 2014 光谱学与光谱分析 **09** 2365]
- [6] Gao J S, Wang S S, Feng X G, Xu N X, Zhao J L, Chen H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7338 (in Chinese) [高劲松, 王珊珊, 冯晓国, 徐念喜, 赵晶丽, 陈红 2010 物理学报 **59** 7338]
- [7] Wang X Z, Gao J S, Xu N X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237302 (in Chinese) [王秀芝, 高劲松, 徐念喜 2013 物理学报 **62** 237302]
- [8] Li S Y, Ai X C, Wu R H 2018 *Opt. Commun.* **428** 251



- [9] Kern D J, Werner D H 2003 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **38** 61
- [10] Moritake Y, Tanaka T 2018 *Opt. Express* **26** 3674
- [11] Hu T, Strikwerda A C, Liu M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 261909
- [12] Li M, Li S, Yu Y F, Ni X, Chen R S 2018 *Opt. Express* **26** 24702
- [13] Xu W, Sonkusale S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 031902
- [14] Feng M C, Li Y F, Zhang J Q, Wang J F, Wang C, Ma H, Qu S B 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 198101 (in Chinese) [丰茂昌, 李勇峰, 张介秋, 王甲富, 王超, 马华, 屈绍波 2018 *物理学报* **67** 198101]
- [15] Cai T, Tang S, Wang G, Xu H, Sun S, He Q, Zhou L 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1600506
- [16] Rahimabady M, Statharas E C, Yao K, Mirshekarloo M S, Chen S, Tay F E H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 241601
- [17] Brian B, Sepúlveda B, Alaverdyan Y, Lechuga L M, Käll M 2009 *Opt. Express* **17** 2015
- [18] Wang W, Yan F P, Tan S Y 2020 *Photonics Res.* **8** 519
- [19] Meng K, Park S J, Burnett A D 2019 *Opt. Express* **27** 23164
- [20] Xiong H, Hong J S, Jin D L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014101
- [21] Wang X Z, Gao J S, Xu N X, Liu H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047303
- [22] He X Y, Liu F, Lin F T, and Shi W Z 2021 *Opt. Lett.* **46** 472
- [23] He X Y, Lin F T, Liu F, Shi W Z 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 155105
- [24] Peng J, He X Y, Shi C Y Y, Leng J, Lin F T, Liu F, Zhang H, Shi W Z 2020 *Phys. E* **124** 114309
- [25] Hu T, Chieffo Logan R, Brenckle Mark A 2011 *Adv. Mater.* **23** 3197
- [26] Whitesides G M 2006 *Nature* **442** 368
- [27] Zhou H, Hu D L, Yang C 2018 *Sci. Rep.* **8** 14801
- [28] Hu X, Xu G Q, Wen L 2016 *Laser Photonics Rev.* **10** 962
- [29] Janneh M, De Marcellis A, Palange E 2018 *Opt. Commun.* **416** 152
- [30] Wang B X, Zhai X, Wang G Z 2015 *Appl. Phys. Lett.* **117** 014504

# Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor<sup>\*</sup>

Pang Hui-Zhong    Wang Xin<sup>†</sup>    Wang Jun-Lin<sup>‡</sup>    Wang Zong-Li  
Liu Su-Yalatu    Tian Hu-Qiang

(College of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

(Received 10 January 2021; revised manuscript received 29 March 2021)

## Abstract

The terahertz metamaterial absorber sensor is an important functional device of the metamaterials. It can realize not only the perfect absorption in the incident terahertz wave, but also the detect sample by monitoring the deviation of the absorption frequency of the metamaterial absorber sensor.

Dual-band metamaterial absorber sensor has double frequency resonance peak. By matching the characteristic frequency between the sensor and the substance to be measured, the information reflecting the difference of the substance to be measured is increased, to improve the accuracy and sensitivity of material detection. Compared with the traditional metamaterial absorber sensor, the dual-band metamaterial absorber sensor can realize very accurate sensing and detection function through multi-point matching of information.

In this paper, a double band terahertz band metamaterial absorber sensor is proposed. The absorption rate of the metamaterial absorber sensor reaches over 99% at 0.387 THz and 0.694 THz frequency point, achieving “perfect absorption”. Through the analysis of a series of materials with different refractive indices to be measured, the suitable sensing range of the designed terahertz metamaterial absorber sensor is obtained. By analyzing the different thickness of the substance to be measured and the different medium layer materials, the thickness of the substance to be measured and the medium layer materials which can improve the sensing performance of the sensor are obtained. In this paper, the sensing identification of edible oil is taken for example to verify that the dual-band terahertz metamaterial absorber sensor designed in this paper can realize high sensitivity and rapid detection, and has a broad development prospect in the field of sensing and detection.

**Keywords:** terahertz, dual-band Frequency, metamaterial absorber, sensor

**PACS:** 81.05.Xj, 41.20.Jb, 87.50.U-, 07.07.Df

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210062](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210062)

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51965047), the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region, China (Grant No. 2018MS06007), the 2018High-level Talent Introduction and Research Startup Project of Inner Mongolia University, China (Grant Nos. 21700-5185128, 21700-5185131), and the Science and Technology Research Project of Inner Mongolia Autonomous Region, China (Grant No. 2020GG0185).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wangxin219@imu.edu.cn](mailto:wangxin219@imu.edu.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [wangjunlin@imu.edu.cn](mailto:wangjunlin@imu.edu.cn)