光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023072001

基于双十字结构的太赫兹传感器设计

马　勇[1,2*]，陈　鑫[1]，徐应松[1]，盛宏远[1]，黎人溥[1*]，陈前斌[3]，周幸叶[4]，陈　沁[5]

（1. 重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065；2. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；
3. 重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065；4. 中国电子科技集团第十三研究所，石家庄 050057；
5. 暨南大学 纳米光子学研究院，广州 511443）

摘　要： 设计了一种基于双十字结构的多谐振峰太赫兹超材料传感器。整体结构由表面金属图案、中间介质和底面金属板组成。基本单元的表面图案呈双十字交叉状，介质材料为聚酰亚胺(Polyimide)。仿真结果表明，所提出的结构具有5个不同的谐振吸收峰，吸收率均超过90%。前3个谐振峰分别对应单元结构内部不同区域形成的基本磁谐振，后2个谐振峰则来源于单元结构间的相互作用。当传感器表面覆盖15 μm厚的分析物时，该传感器各个谐振峰的灵敏度分别为72，137，234，353和252 GHz/RIU，且谐振峰偏移量与待测分析物折射率变化量呈较强的线性关系，具有优越的传感特性。此外，多峰传感器稳定性优于传统的单峰或双峰传感器，具有良好的抗干扰能力，有助于降低测量误差。所提出的这种高灵敏度多谐振峰传感器在微量分子检测领域具有广阔的应用前景。

关键词： 太赫兹；超材料；传感器；多谐振峰；灵敏度

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0655－07

Design of Terahertz Sensor Based on Double-Cross Structure

MA Yong[1,2]，CHEN Xin[1]，XU Yingsong[1]，SHENG Hongyuan[1]，
LI Renpu[1]，CHEN Qianbin[3]，ZHOU Xingye[4]，CHEN Qin[5]

（1. College of Optoelectronics，Chongqing University of Posts and Telecommunications，Chongqing 400065，CHN；2. College of Communication and Information Engineering，Chongqing University of Posts and Telecommunications，Chongqing 400065，CHN；
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN；
4. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation，Shijiazhuang 050057，CHN；
5. Nano Photonics Research Institute of Jinan University，Guangzhou 511443，CHN）

Abstract： A multiple resonance peaks terahertz metamaterial sensor based on double-cross structure was designed. The overall structure was composed of surface metal pattern，intermediate medium and bottom metal plate. The surface pattern of the basic unit was double-cross and the medium material was polyimide. The simulation results show that the proposed structure has five different resonant absorption peaks，and the absorption rate is more than 90%. The first three resonance peaks correspond to the basic magnetic resonance formed in different regions of the unit structure，and the last two resonance peaks are derived from the interaction between the unit structures. When the surface of the sensor is covered with an analyte with a

收稿日期：2023－07－20.

基金项目：新一代信息网络与终端省部共建协同创新中心项目；中电科芯片技术(集团)有限公司量子实验室基金项目(6310001-2)；重庆邮电大学交叉学科和新兴领域重点专项项目(A2018-01)；重庆市基础与前沿研究项目(cstc2016jcyjA0301)；2021年度重庆市留学人员创业创新支持计划项目(cx2021011)；河北省杰青项目(F2021516001)；国家自然科学基金青年基金项目(61405001).

* **通信作者：**马　勇，黎人溥　**E-mail：** mayong@cqupt.edu.cn；lirp@cqupt.edu.cn

thickness of 15 μm, the sensitivity of each resonance peak of the sensor is 72, 137, 234, 353 and 252 GHz/RIU, respectively. The resonance peak offset has a strong linear relationship with the refractive index change of the analyte to be measured, which has superior sensing characteristics. In addition, the stability of the multiple peaks sensor is better than that of the traditional single peak or double peak sensor, which has good anti-interference ability to reduce the measurement error. The proposed high sensitivity multiple resonance peaks sensor has a broad application prospect in the field of trace molecule detection.

Key words: terahertz; metamaterial; sensor; multiple resonance peaks; sensitivity

0 引言

太赫兹(Terahertz,THz)波是指频率范围为0.1～10 THz的电磁波,其波长范围覆盖30 μm～3 mm。太赫兹波的长波段与微波相重合,短波段与红外波相重合,与其他波段相比,因太赫兹波在电磁频谱中位置的特殊性,令其在生物医学、通信传输和食品安全等领域有着广阔的应用前景[1-2]。

许多有机分子、生物大分子的旋转和振动能级对应的都是太赫兹频段,它们在该频段拥有独特的特征吸收谱,且由于太赫兹光子能量低,不会对生物组织造成电离伤害,因此太赫兹波在物质传感及无损检测领域被广泛研究[3-4]。然而单纯的太赫兹光谱对物质的响应并不明显,使得其在微量生物化学物质检测方面的应用受到限制。

超材料是人工制造的电磁材料,由周期性排列的亚波长金属结构组成[5]。超材料的共振特性和局域性的场增强效应使得其对于周围物质异常敏感,从而能有效提高检测灵敏度。太赫兹超材料传感器同时结合了超材料和太赫兹波的相关优势,近年来一直是太赫兹技术研究领域的一大热点[6]。

2019年,Zhou等[7]利用双层十字形板孔结构的超材料吸收器检测生物素浓度,实验发现,随着生物素浓度的增加,反射谱共振频移单调上升,折射率灵敏度为153 GHz/μm。同年,Saadeldin等[8]针对太赫兹传感应用提出了一种基于吸收结构的太赫兹超材料传感器,其吸收率可达99%,折射率灵敏度为300 GHz/RIU,厚度灵敏度为23.7 GHz/μm。以上所设计的太赫兹超材料传感器均为单个谐振峰,尽管拥有良好的传感性能但易受外界环境影响,抗干扰能力较弱,适用范围窄。

2021年,Wang等[9]设计了一款由3个同心方环组成的3频带太赫兹超材料传感器,仿真结果表明3个谐振峰的传感灵敏度分别为72,103.5,139.5 GHz/RIU。2022年,Abdulkarim等[10]设计了一款由3个同心圆环组成的3频带太赫兹超材料传感器,谐振峰的传感灵敏度分别为70.5,133,149.5 GHz/RIU,品质因数最大为5.69。以上两种传感器结构均拥有3个谐振峰,相较于单谐振峰而言,其抗干扰能力和稳定性得到了提升,有助于降低测量误差。但上述以及大多数已发表的多频点太赫兹传感器结构均是通过相同形状不同尺寸的金属结构嵌套组合而成,由此设计的结构相对复杂、谐振模式单一,导致传感器加工难度大且性能受限。同时,这类基于嵌套结构的超材料传感器金属图案之间耦合较强,不能方便灵活地调节各频点的谐振频率,适用范围窄。此外,在一些稳定性和抗干扰能力需求更高的应用场景下,3个工作频点并不能满足要求。

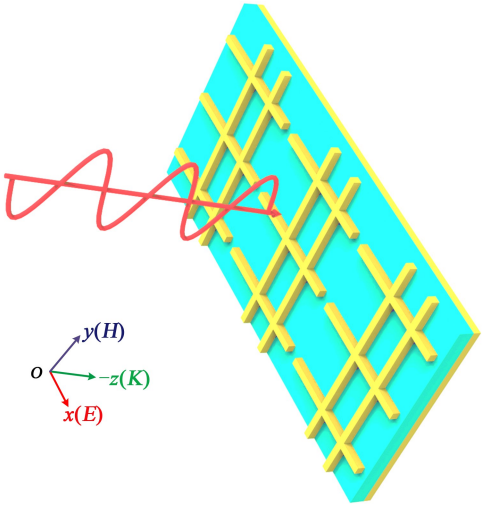
为解决上述问题,本文设计了一款拥有5个谐振峰的太赫兹超材料传感器结构,并对其性能进行了相关仿真分析。

1 单元结构设计

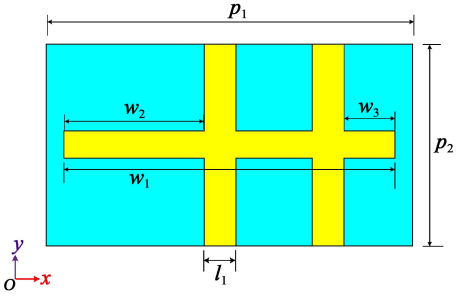
本文设计的超材料结构如图1所示,(a)为单元结构组成的阵列示意图,(b)为正视图,(c)为侧视图。构成传感器的超材料单元采用典型的金属-介质-金属结构。顶层由简单金属条带构成,金属材料为铜(Copper),电导率 $\sigma=5.96\times10^7$ S/m,金属条带的宽度均为 $l_1=10$ μm,厚度 $t_1=0.2$ μm。x 方向的横向金属条带长度 $w_1=160$ μm,y 方向的2条纵向金属条带长将横向金属条带分为3段,其中 $w_2=65$ μm,$w_3=30$ μm,纵向金属条带长度和介质层宽度均为 $p_2=110$ μm。中间介质层材料为聚酰亚胺(Polyimide),相对介电常数 $\varepsilon_r=3.5$,损耗角正切 $\tan\delta=0.0027$。介质层长度 $p_1=190$ μm,宽度 $p_2=110$ μm,介质层厚度 $h=15$ μm。底面为全覆盖的金属铜底板,厚度 $t_2=0.2$ μm。

利用电磁仿真软件CST Microwave Studio

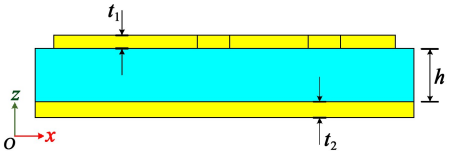
2020 对图 1 所示的太赫兹超材料传感器进行仿真分析。选用频域求解器进行仿真，x 和 y 方向设置为 unit cell 边界，z 方向为开放边界条件。



（a）3×3 阵列示意图



（b）正视图



（c）侧视图

图 1　结构示意图

2　谐振机理分析

沿 $-z$ 轴方向传播的太赫兹波垂直入射到所设计的超材料平面上，沿 x，y 轴分别为入射波的电场方向和磁场方向，由此得到该传感器的频率吸收谱如图 2 所示。由图 2 可知，该传感器在 0.2～2 THz 频段内共有 5 个谐振吸收峰，谐振峰分别位于 $f_1=0.43$ THz，$f_2=0.77$ THz，$f_3=1.18$ THz，$f_4=1.52$ THz，$f_5=1.79$ THz。吸收率计算公式为：

$$A=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2 \tag{1}$$

式中，S_{11} 为反射系数，S_{21} 为透射系数。由于底面为金属板，不存在透射电磁波，即 $S_{21}=0$，因此吸收率可简化成：

$$A=1-|S_{11}|^2 \tag{2}$$

由此可以得出 5 个谐振峰的吸收率分别为 90.34%，96.15%，95.63%，94.65%和 90.82%，均达到了 90%以上。

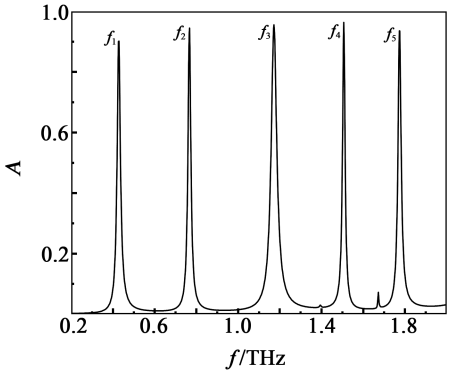
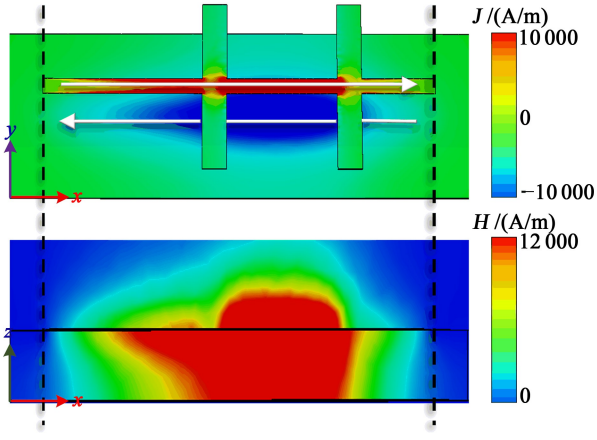
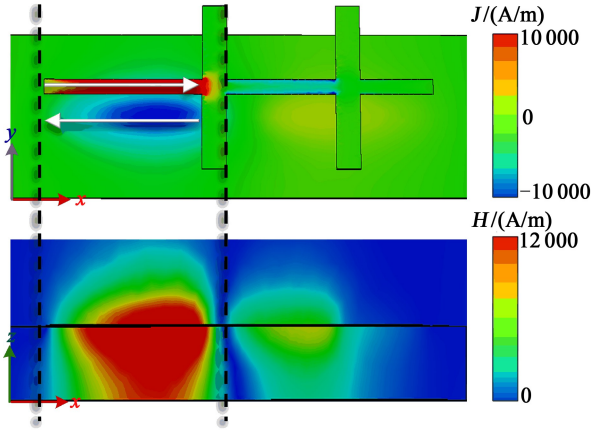


图 2　传感器吸收频谱图

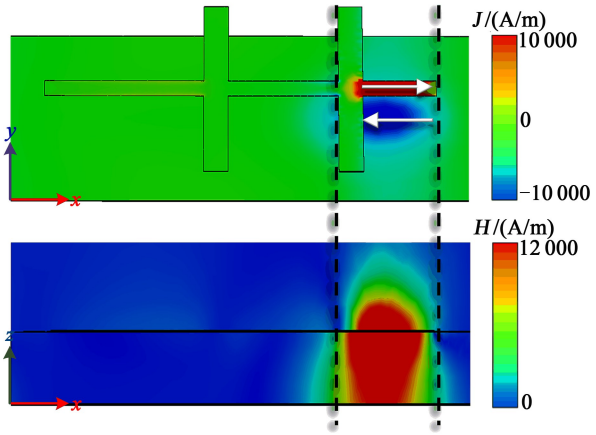
为研究该传感器 5 个谐振峰的产生机理，分别在 f_1，f_2，f_3，f_4 和 f_5 处设置场监视器，通过模拟仿真得到各个谐振峰中心频率处的表面电流分布与磁场分布，结果如图 3 所示。



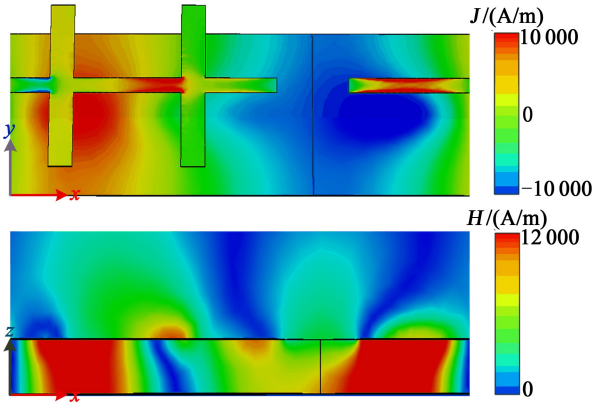
（a）$f_1=0.43$ THz



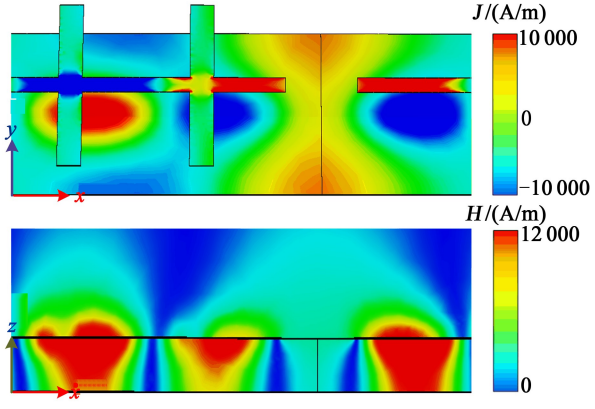
（b）$f_2=0.77$ THz



(c) $f_3=1.18$ THz



(d) $f_4=1.52$ THz



(e) $f_5=1.79$ THz

图 3 各谐振峰处表面电流及磁场分布图

图 3 中的(a),(b),(c),(d)和(e)分别对应 f_1,f_2,f_3,f_4 和 f_5 这 5 个谐振峰。每个谐振峰对应图的上部分为金属表面的电流分布,设定 x 方向的电流为正,$-x$ 方向的电流为负。下部分为横向金属条带处 xz 截面上的磁场分布情况。

由图 3(a)可知,在 $f_1=0.43$ THz 处,上层金属图案的表面电流集中在整个横向金属条带上,底面金属板的表面电流主要集中在横向条带正下方相对应的区域,两电流平行且相反,形成环状电流,由此构成基本磁谐振,磁场能量主要集中于横向金属条带与金属底板之间。

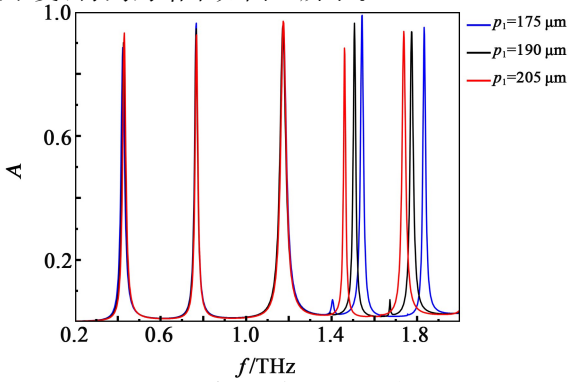
类似地,如图 3(b)和 3(c)所示,谐振峰 $f_2=0.77$ THz 和 $f_3=1.18$ THz 的形成源于被纵向金属条带隔断的横向金属条带不同部分和金属底板相对应区域之间形成的基本磁谐振。由等效电路理论[11]可知,超材料的谐振频率与金属图案的长度成反比,即金属条带越短,谐振频率越高。因此 f_1,f_2 和 f_3 的谐振频率依次增大。

在 $f_4=1.48$ THz 和 $f_5=1.79$ THz 处的电流分布和磁场分布如图 3(d)和 3(e)所示。与前 3 个谐振峰不同的是,在这 2 个谐振频率下,表面金属结构除了部分区域与底板对应位置之间形成反向电流外,其他区域同样也受到了入射场激发但是并未形成反向电流。同时可以观察到,前 3 个谐振峰的表面电流及磁场均局限于单元结构内部,而 f_4 及 f_5 在单元结构交界处也有着较强的电流分布及磁场分布。

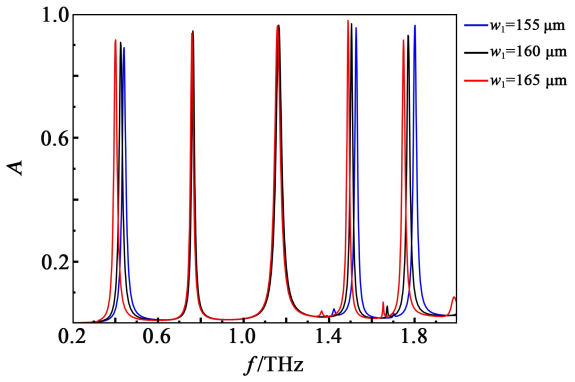
由上述分析可知,谐振峰 f_1,f_2 和 f_3 是由单元结构内部金属图案和底板间的基本磁谐振产生。f_4,f_5 则主要来源于结构整体对电磁波的响应,即相邻单元间的相互作用。

3 结构参数对谐振峰的影响

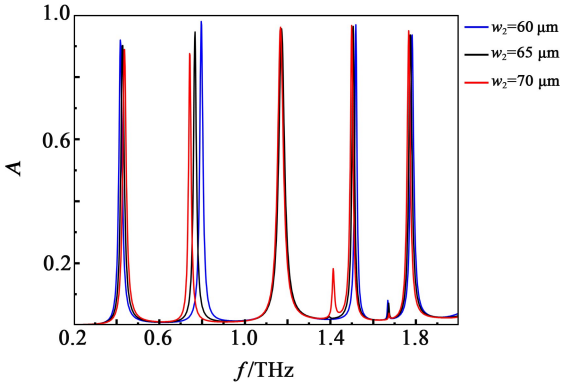
如上所述,可知谐振峰 f_1,f_2 和 f_3 所处的频率主要取决于横向金属条带的总长度及被纵向条带分割的各部分的长度,f_4 及 f_5 所处的频率主要取决于单元结构间的相互影响。因此结构参数主要观察横向金属条带各部分长度 w_1,w_2 和 w_3 以及相邻单元结构的距离 p_1 对吸收频谱的影响。采用控制变量法,在改变某一参数的同时保持其他结构参数不变,得到的结果如图 4 所示。



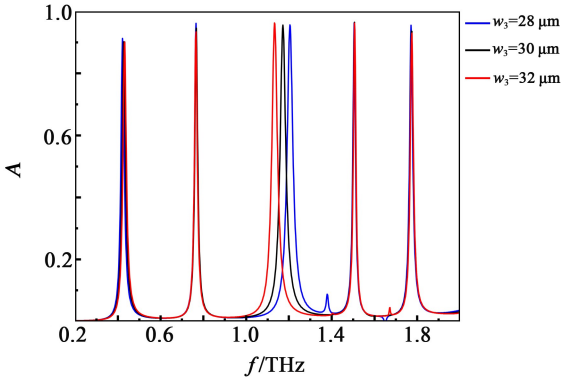
(a) 单元距离 p_1 的影响



(b) 横向金属条带长度 w_1 的影响



(c) 横向金属条带长度 w_2 的影响



(d) 横向金属条带长度 w_3 的影响

图 4　结构参数对传感器的影响

图 4(a)表示的是 p_1 的变化带来的影响，p_1 主要影响的是单元结构之间的相互作用，即谐振峰 f_4 和 f_5，可用等效电路理论对其进行分析。将整个结构等效为 LC 谐振电路，金属条带为电感，电感 L 与参与谐振的金属条带长度成正比，表面结构和金属底板间及表面结构之间均可形成电容，电容为：

$$C=\varepsilon S/4\pi kd \tag{3}$$

当 p_1 减小时，结构之间的距离变小，即 d 变小，单元结构间的相互作用变强，而结构内部的谐振相对减弱，整体上 C 减小，又根据谐振频率公式：

$$f=1/(2\pi\sqrt{LC}) \tag{4}$$

得到谐振频率的大小与等效电感和等效电容的值成反比，因此 f 变大，谐振峰向右移动。

图 4(c)，(d)分别为横向金属条带 w_2，w_3 长度变化对吸收频谱带来的影响。w_2 对应谐振峰 f_2，w_3 对应谐振峰 f_3。因为横向条带各分段相对独立，没有明显的耦合关系，且都属于单元结构内部的磁谐振，所以调节时不会对横向金属条带其他段的基本磁谐振及单元间的相互作用造成显著影响。

横向金属条带总长度对吸收频谱造成的影响如图 4(b)所示。从前面的谐振机理可知，w_1 对应的是谐振峰 f_1，可图中显示，除 f_1 外，f_4 和 f_5 均受到了影响。这是因为在改变 w_1 的同时，也影响了单元结构间的相对距离，间接改变了 p_1 的大小，因此，w_1 的长度会同时影响 f_1，f_4 及 f_5 的谐振特性。

根据规律改变上述参数即可相对灵活地调整各个谐振峰的位置，以适应不同的样品或环境，进一步扩大传感器的适用范围。

4　传感性能分析

超材料传感器的传感机理本质上是将物质折射率的差异转化成电磁信号的差异来实现检测，物质的折射率为：

$$n=\sqrt{\varepsilon_r\mu_r} \tag{5}$$

其中，ε_r 为物质的相对介电常数，μ_r 为相对磁导率。通常情况下，绝大多数材料都是非磁性的，即 $\mu_r=1$，因此物质折射率的差异主要体现为介电常数的差异。超材料传感器的等离子体谐振频率可以表示为[12]：

$$\omega_d\propto 1/(2d\varepsilon_{eff}^{1/2}) \tag{6}$$

其中，d 主要由超材料传感器的几何参数决定，加工完成后就被固定了，此时谐振频率只取决于 ε_{eff}。ε_{eff} 为传感器周围环境的平均介电常数，一般表示为：

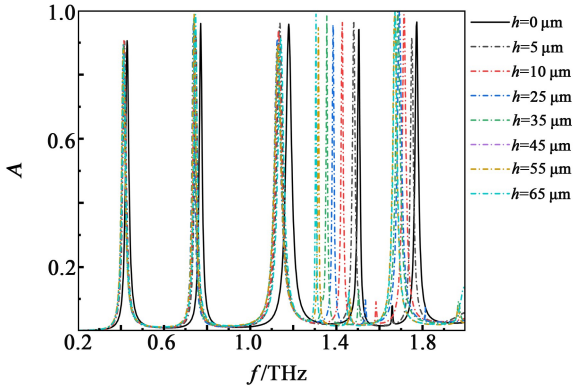
$$\varepsilon_{eff}=\varepsilon_{sub}+\varphi\varepsilon_{air}+(1-\varphi)\varepsilon_s \tag{7}$$

式中，ε_{sub}，ε_{air} 和 ε_s 分别为传感器介质基底的介电常数、空气的介电常数和待测分析物的介电常数，φ 表示空气在周围媒介中的比例。当待测分析物的介电常数大于空气的介电常数时，附着在太赫兹超材料传感器上的分析物会引起 ε_{eff} 的增大，进而使谐振频率减小，产生红移。

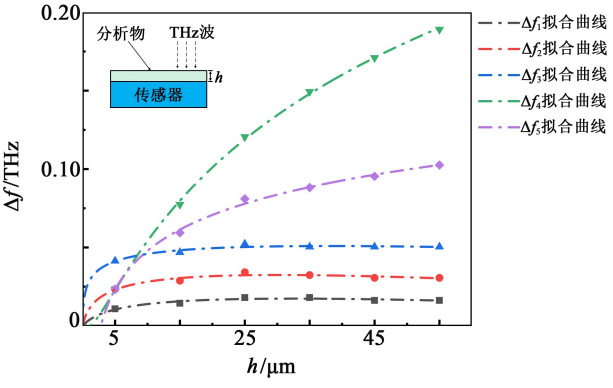
为验证所设计结构作为传感器的检测能力，仿

真分析了在不同分析物厚度及折射率情况下，传感器对分析物的响应特性。

首先探究了所设计传感器的厚度传感性能，本文统计了 5 个谐振峰在不同分析物厚度下对应的谐振频率，分析物的折射率 n 设为 1.2，改变传感器表面覆盖的分析物厚度 h，得到不同 h 值对应的传感器吸收频谱，如图 5(a)所示。当 h 从 0 μm 增加到 55 μm，各谐振峰对应的中心频率逐渐红移，频移量 Δf 与分析物的厚度 h 的关系如图 5(b)所示。可看出，随着 h 的不断增加，5 个谐振峰分别对应的频移量均不断增加，且增长速率逐渐减小。



(a) 不同厚度下传感器的吸收频谱图



(b) 谐振峰偏移量与分析物厚度间的关系

图 5 传感器的厚度传感特性

由式(6)和式(7)可知分析物厚度增加导致红移是因为传感器周围环境中分析物介电常数所占的比重增加，进而引起等效介电常数 ε_{eff} 的增大。最后逐渐趋于平缓则是由于太赫兹波会激发传感器表面的电流发生震荡，这种电流振荡对外辐射的电磁波会随着距离的增大而快速衰减，该现象可在图 3 中观察到。因此，当分析物厚度 h 增加到 15 μm 后，f_1，f_2 和 f_3 谐振峰分别对应的频移量的增幅都趋向于零，f_5 偏移量的增幅显著减小。f_4 的频率偏移几乎成线性增加，说明 f_4 对分析物的厚度变化比较敏感，适用于微量物质的厚度检测。

结合对厚度传感特性的研究，进一步分析了所设计传感器的折射率传感性能。通常用灵敏度和品质因数对太赫兹超材料传感器的折射率传感性能进行评价，灵敏度定义为：

$$S = \Delta f / \Delta n \tag{8}$$

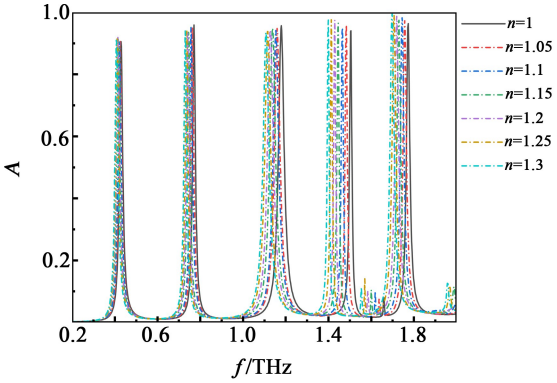
式中，Δf 为传感器中心谐振频率的频移量，Δn 为被测物的折射率变化量。在其他条件一定的情况下，传感器的灵敏度越大，对微弱物质的检测能力越强。品质因数(Figure of Merit，FOM)用于描述传感器的整体性能表现，其表达式为：

$$FOM = S / FWHM \tag{9}$$

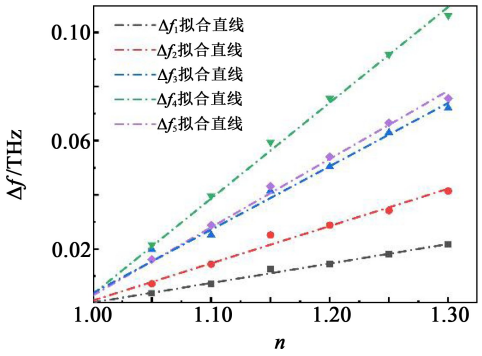
其中，FWHM(Full Width at Half Maximum)为谐振峰的半高全宽，表现在太赫兹光谱上为谐振峰的尖锐程度，值越小越尖锐，谐振峰的移动就更明显。因此在传感器之间的灵敏度比较接近时，通过比较 FOM 值，来进一步区分传感器的性能优劣，当传感器的 FOM 值越大时，意味着传感器的整体性能表现越好。同时 FOM 值大小与谐振峰所处频率无关，常用来统一衡量不同波段超材料传感器的传感性能。

依据前文对该传感器厚度传感性能的仿真测试，固定分析物的厚度为 15 μm，得到超材料结构单元的谐振频率随被测覆盖物的折射率变化的吸收谱如图 5(a)所示。可以看出，当覆盖不同折射率的分析物时，传感器的谐振频率相比较于没有覆盖分析物的传感器有不同程度的红移。对不同折射率下各个峰谐振频率的偏移量进行提取，绘制成如图 5(b)所示的偏移量与折射率变化的关系图。

由图 5(b)观察到 5 个谐振频率的频移量均与分析物的折射率成强线性关系，对其进行线性拟合，得到拟合函数分别为 $f_1 = 0.071\,7x - 0.072$，$f_2 = 0.137x - 0.136$，$f_3 = 0.234x - 0.23$，$f_4 = 0.353x - 0.35$，



(a) 不同折射率下传感器的吸收频谱图



(b) 谐振峰偏移量与分析物折射率间的关系

图 6　传感器的折射率传感特性

$f_5=0.252x-0.249$。根据式(8),可以计算出谐振频率 f_1,f_2,f_3,f_4 和 f_5 处的折射率灵敏度分别为 72,137,234,353 和 252 GHz/RIU,根据式(9)可得各谐振峰 FOM 值分别为 3.88,8.56,7.34,21.93 和 14.59。由于谐振峰 f_4 和 f_5 是基于结构间的响应,相较于基本磁谐振来说,有更多的谐振场能量集中在超材料表面,因此对分析物的厚度及折射率变化更为敏感。

5　结论

利用金属条带与金属底板之间的基本磁谐振以及单元结构间的相互作用,设计了一种具有 5 个窄带高吸收率谐振峰的太赫兹超材料传感器,吸收率均达到了 90%以上。通过改变传感器的结构参数可实现对谐振峰位置相对灵活的调控。随后对其在传感检测方面的能力进行了仿真验证。结果表明,当分析物厚度逐渐从 0 μm 增加到 55 μm 时,5 个谐振峰的频移量均呈现增加的趋势,其中谐振峰 f_4 对分析物厚度的改变较为敏感,频移量与厚度近似呈线性关系,因此适用于微量物质的厚度传感。当传感器表面覆盖一层厚度为 15 μm 的分析物时,5 个谐振峰的折射率灵敏度分别为 72,137,234,352 和 252 GHz/RIU。该传感器具有加工简单的优点,同时有着良好的厚度及折射率传感特性,稳定性和抗干扰能力优于传统的单峰或双峰传感器,有助于降低测量误差,在微量分子检测领域具有独特优势。

参考文献:

[1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术与应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007.

[2] 边明明,王世涛,雷利华,等. 太赫兹技术及空间应用国内外发展现状研究[J]. 空间电子技术,2013,10(4):80-84.
Bian Mingming, Wang Shitao, Lei Lihua, et al. Study of the domestic and abroad development status of THz technology and its space application[J]. Space Electronic Technology, 2013, 10(4): 80-84.

[3] Menikh A. Terahertz-biosensing technology: Progress, limitations, and future outlook[J]. Springer Ser. Chem. Sens. Biosens., 2010, 1(8): 283-295.

[4] Alves F, Kearney B, Grbovic D, et al. Narrowband terahertz emitters using metamaterial films[J]. Opt. Express, 2012, 20(19): 21025-21032.

[5] Xiao S, Wang T, Liu T, et al. Active metamaterials and metadevices: A review[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2020, 53(50): 503002.

[6] Nagel M, Richter F, Haring-Bolivar P, et al. A functionalized THz sensor for marker-free DNA analysis[J]. Phys. Med. Biol., 2003, 48(22): 3625.

[7] Zhou H, Yang C, Hu D L, et al. Terahertz biosensing based on bi-layer metamaterial absorbers toward ultra-high sensitivity and simple fabrication[J]. Appl. Phys. Lett., 2019, 115(14): 143507.

[8] Saadelain A S, Hameed M F O, Elkaramany E M A, et al. Highly sensitive terahertz metamaterial sensor[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(18): 7993-7999.

[9] Wang J, Lang T, Hong Z, et al. Design and fabrication of a triple-band terahertz metamaterial absorber [J]. Nanomaterials, 2021, 11(5): 1110.

[10] Abdulkarim Y, Xiao M, Awl H, et al. Simulation and lithographic fabrication of a triple band terahertz metamaterial absorber coated on flexible polyethylene terephthalate substrate[J]. Opt. Mater. Express, 2022, 12: 338-359.

[11] 黄　博. 人工电磁材料太赫兹吸波器等效电路的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2014.
Huang Bo. Research of equivalent circuit of artifical electromagnetic materials teraherz absorber[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.

[12] Withayachumnankul W, Abbott D. Metamaterials in the terahertz regime[J]. IEEE Photonics J., 2009, 1(2): 99-118.

作者简介:

马　勇(1980—),男,重庆市人,博士,毕业于英国埃塞克斯大学,研究领域:电磁超材料与超表面、太赫兹器件与系统、量子精密测量、光量子器件、光电技术与系统;

黎人溥(1988—),男,重庆市人,博士,毕业于俄罗斯圣彼得堡大学(ITMO University)信息技术、机械与光学专业,研究领域:光学测量。