

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于双层三维太赫兹超材料的多功能传感器

邓光晟, 郭澳然, 程新奇, 杨军, 蔡斐

引用本文:

邓光晟, 郭澳然, 程新奇, 等. 基于双层三维太赫兹超材料的多功能传感器[J]. 光电工程, 2024, 51(10): 240164.

Deng G S, Guo A R, Cheng X Q, et al. Dual-layer 3D terahertz metamaterial based multifunctional sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(10): 240164.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240164>

收稿日期: 2024-07-12; 修改日期: 2024-09-30; 录用日期: 2024-09-30

相关论文

基于硫属化物相变材料的可重构太赫兹超表面器件的研究进展

张寿俊, 曹瞰, 田震

光电工程 2023, 50(9): 230142 doi: 10.12086/oe.2023.230142

Racemic dielectric metasurfaces for arbitrary terahertz polarization rotation and wavefront manipulation

Jie Li, Xueguang Lu, Hui Li, Chunyu Song, Qi Tan, Yu He, Jingyu Liu, Li Luo, Tingting Tang, Tingting Liu, Hang Xu, Shuyuan Xiao, Wanxia Huang, Yun Shen, Yan Zhang, Yating Zhang, Jianquan Yao

Opto-Electronic Advances 2024, 7(10): 240075 doi: 10.29026/oea.2024.240075

Highly efficient vectorial field manipulation using a transmitted tri-layer metasurface in the terahertz band

Huan Zhao, Xinke Wang, Shutian Liu, Yan Zhang

Opto-Electronic Advances 2023, 6(2): 220012 doi: 10.29026/oea.2023.220012

Hybrid bound states in the continuum in terahertz metasurfaces

Junxing Fan, Zuolong Li, Zhanqiang Xue, Hongyang Xing, Dan Lu, Guizhen Xu, Jianqiang Gu, Jianguang Han, Longqing Cong

Opto-Electronic Science 2023, 2(4): 230006 doi: 10.29026/oess.2023.230006

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 **光电工程**
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE_Journal



Website

基于双层三维太赫兹超材料的多功能传感器

邓光晟^{1,2}, 郭澳然², 程新奇²,
杨 军^{1,2}, 蔡 斐^{1*}

¹合肥工业大学光电技术研究院, 特种显示与成像技术
安徽省技术创新中心, 安徽 合肥 230009;

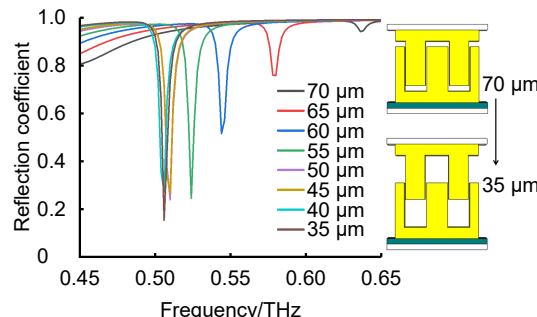
²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 测量理论
与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009

摘要: 传感器作为集成化器件中至关重要的部分, 其多功能性越来越受到重视。本文介绍了一种基于双层三维谐振结构耦合的太赫兹超材料多功能传感器。传感装置包括上下两层聚酰亚胺薄膜基底, 附着在下层聚酰亚胺薄膜基底上的石墨层, 以及在上层聚酰亚胺薄膜基底之间的周期性双层三维齿形耦合谐振结构, 此结构包括下层对称山形结构和上层对称凹形结构。该三维超材料结合多层结构可实现多功能测量: 可通过谐振频率确定待测液体介质层的折射率变化, 从而实现液体成分的高精度分辨; 在一维方向的微位移传感方面, 则可分别在 z 轴方向以及 y 轴方向上实现微位移的高灵敏度测量。本文所提出的三维超材料传感器能为功能集成化传感在太赫兹领域的应用提供了新的思路。

关键词: 三维超材料; 多功能测量; 折射率; 微位移

中图分类号: TB34

文献标志码: A



邓光晟, 郭澳然, 程新奇, 等. 基于双层三维太赫兹超材料的多功能传感器 [J]. 光电工程, 2024, 51(10): 240164

Deng G S, Guo A R, Cheng X Q, et al. Dual-layer 3D terahertz metamaterial based multifunctional sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(10): 240164

Dual-layer 3D terahertz metamaterial based multifunctional sensor

Deng Guangsheng^{1,2}, Guo Aoran², Cheng Xinqi², Yang Jun^{1,2}, Cai Fei^{1*}

¹Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, Academy of Opto-Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

²Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract: The versatility of sensors, as a crucial part of integrated devices, is receiving increasing attention. Here, a terahertz metamaterial multifunctional sensor based on the coupling of a two-layer 3D resonant structure is introduced. The sensor consists of an upper and lower polyimide film substrate, a graphite layer attached to the

收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2024-09-30; 录用日期: 2024-09-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFF0719403); 国家自然科学基金资助项目 (62001150); 安徽省自然科学基金资助项目 (2208085MF160)

*通信作者: 蔡斐, caifei@hfut.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

lower polyimide film substrate, and a periodic double-layer 3D toothed coupling resonant structure between the graphite layer and the upper polyimide film substrate, which consists of a symmetric mountain-shaped structure in the lower layer and a symmetric concave structure in the upper layer. The three-dimensional metamaterial can achieve multifunctional measurements: the refractive index change of the liquid medium can be detected with high sensitivity by measuring the resonant frequency of the structure. Therefore, it is possible to detect the liquid medium with such a design. Meanwhile, in terms of micro displacement sensing, a high micro displacement measurement sensitivity can be realized in both the z-axis and y-axis directions, respectively. The 3D metamaterial sensor proposed in this paper provides an idea for the design of a functionally integrated sensor in the terahertz region.

Keywords: three-dimensional metamaterial; multifunctional measurement; refractive index; micro displacement

1 引言

作为一种人工复合结构, 超材料展示出了自然材料所不具备的特殊性质并日益受到学术界的关注^[1-2]。近年来, 在太赫兹应用领域涌现出了各类性能良好的超材料传感器^[3-5], 诸如超材料压力传感器^[6]、超材料液体传感器^[7]、超材料气体传感器^[8]等。这些传感器不仅在结构设计、材料选择、加工工艺上日益成熟, 更在检测灵敏度、分辨率、待测物的多样性方面取得持续进步。然而, 这些传感器都面临传感功能单一的问题, 在如何实现多功能传感方面, 超材料传感器的探索还相对匮乏^[9-11]。因此结合超材料自身的特殊性质和结构特点设计出高性能、多功能的传感器是值得研究的方向且有很高的实用价值。

现如今各种功能器件高度小型化、集成化, 传感器作为集成化设备中至关重要的部分, 其多功能性越来越受到重视^[12-15]。随着科技发展面临多元环境的考验, 太赫兹超材料传感领域也面临多种功能集成的挑战。传统的超材料传感器为解决具有高灵敏度、快速响应、无损检测、非接触测量、便携小型化等需求的传感场景提供了有效的帮助, 目前广泛应用于生物医学、食品安全、环境监测等领域^[16]。超材料传感器可以实现不同功能的传感应用, 但这些传感器大多以单一检测对象和功能为主。Deng 等人^[17]提出一种基于单层非对称双开环超表面结构的传感器来检测柠檬酸盐样品, 该传感器在 2.0 THz 频率处实现对不同浓度柠檬酸盐溶液的检测。Banerjee 等人^[8]提出一种基于砷化镓基底的超材料气体传感器, 其在 2.9 THz 处对氯仿等有毒气体进行检测, 并取得了 2.857 THz/RIU 的高灵敏度。Li 等人^[18]提出了一种基于液态金属汞的新型 EIT 超材料单元用于高通量的温度传感应用,

检测灵敏度为 17~30 MHz/°C。Hu 等人^[6]在 2023 年提出了一种利用手性形变超材料调节可拉伸应变传感器性能的设计, 负 EPR 器件可在多个拉伸方向上全方位增强灵敏度, 最高可达 53 倍的增强。在超材料的结构设计方面, 广大科研人员早就不满足于二维超表面, 开始把研究重心投向三维立体结构的超材料设计, 以探索超材料器件在性能和功能上的更多可能性^[19]。三维超材料由于自身结构的强耦合优势使其在太赫兹领域具有更强的电磁调制应用价值。如 Chen 等人^[20]提出一种磁等离子体共振衍射耦合的三维超材料传感器, 利用激发的磁场增强的窄带混合共振模式以增强器件的传感性能。Wang 等人^[21]提出一种基于三维谐振结构的超材料吸波器, 结合微流通道可实现灵敏度达 379 GHz/RIU 的液体折射率传感。除了三维谐振结构外, 对于双层以及多层谐振结构的研究也在近些年来得到重视, Fu 等人^[22]提出一种主动调谐式的双层平面超材料, 通过改变层高度, 可以实现编码式开关特性。Lin 等人^[23]提出一种双层耦合的双裂环谐振结构, 其内外双环高度可调谐的优越性可被用于穿戴式压力传感器。考虑到基于三维超材料的传感器具有更高的灵敏度和分辨率, 本文旨在从传感性能增强的设计理念出发, 将双层结构和三维结构进行结合, 提出一种双层三维太赫兹齿形耦合超材料并结合结构特点将其运用于多功能传感器的设计和性能分析, 探讨其在传感技术领域中的意义和应用价值。

本文设计了一种基于双层三维超材料的太赫兹微位移和液体折射率传感器, 该装置由设置在石墨层和上下层聚酰亚胺薄膜基底之间的双层三维超材料齿形耦合谐振结构组成, 所属双层三维超材料谐振结构包括下层对称山形结构和上层对称凹形结构。该三维超材料结合多层结构可实现多功能测量: 1) 通过谐振频

率确定待测液体介质层的折射率变化, 从而实现液体成分的高精度分辨; 2) 在一维方向的微位移传感方面, 则可分别在 z 轴方向以及 y 轴方向上实现微位移的高灵敏度测量。本文设计的传感器的主要优势体现在多功能性以及高灵敏度测量两个方面。双层三维结构的设计使得传感器能够同时实现多种功能, 完成对不同类型目标的高效检测, 为功能集成化传感在太赫兹领域的应用提供了新的思路。

2 立体超材料传感器结构与仿真

本研究提出了一种基于双层三维超材料的太赫兹微位移与液体折射率传感器, 如图 1(a) 所示。通过采用双层三维超材料结构, 可以显著增大上下层超表面的耦合面积。此外, 双层结构设计可以实现对任一单层超表面的相对移动所引起谐振频率变化的精确测量。同时, 双层结构间的间隙形成了天然的液体腔道, 而双层超材料的谐振频率对腔道内液体的介电常数极为敏感, 因此本设计能够实现对微位移与液体折射率的多功能检测目的。该传感器包括上下两层聚酰亚胺薄膜基底、位于下层聚酰亚胺薄膜基底上的石墨层, 以及位于石墨层和上层聚酰亚胺薄膜基底之间的双层呈连续周期性排列的金属立体谐振单元。双层金属立体谐振单元采用齿形耦合形状, 包括下层山形金属立体结构和上层凹形金属立体结构, 而液体折射率传感的介质层位于两层聚酰亚胺薄膜基底之间。上下两部分立体结构齿形耦合形成完整的立体谐振单元。如图 1(b) 所示, 双层金属立体结构上下两层边长、高度均相等, 两层聚酰亚胺薄膜基底与石墨层边长、厚度

均相等。在传感器底部引入石墨层可以提升电磁场局域增强效应, 从而提高传感器的灵敏度。

多层三维谐振单元的周期尺寸 $y=180\ \mu\text{m}$, 整体是由两层聚酰亚胺薄膜基底、石墨层、双层金属立体结构组成。两层薄膜基底的边长 $y=180\ \mu\text{m}$, 厚度 $h_1=10\ \mu\text{m}$, 介电常数为 3.50, 损耗正切为 0.0027。石墨层的边长 $y=180\ \mu\text{m}$, 厚度 $h_2=10\ \mu\text{m}$, 介电常数 12, 导电系数为 $1\times 10^5\ \text{s/m}$ 。双层金属立体结构由上下两层齿形耦合构成。介电常数 12, 导电系数为 $1\times 10^5\ \text{s/m}$ 。双层金属立体结构由上下两层齿形耦合构成。如图 1(c) 所示上层凹形立体结构由底座和两个相互平行且垂直于底座的金属齿柱构成, 底座边长 $x=150\ \mu\text{m}$ 、厚度 $h_3=20\ \mu\text{m}$, 两个金属齿柱尺寸大小相同, 其宽度 $w_4=35\ \mu\text{m}$ 、高度 $h_4=80\ \mu\text{m}$, 两齿柱之间距离 $w_5=40\ \mu\text{m}$, 两齿柱到各自底座边缘的距离相同 $w_6=20\ \mu\text{m}$ 。如图 1(d) 所示, 下层山形立体结构由底座和三个相互平行且垂直于底座的金属齿柱构成, 底座边长 $x=150\ \mu\text{m}$ 、厚度 $h_3=20\ \mu\text{m}$, 两侧金属齿柱宽度 $w_1=13\ \mu\text{m}$ 、高度 $h_4=80\ \mu\text{m}$, 中间齿柱宽度为 $w_2=38\ \mu\text{m}$ 、高度 $h_4=80\ \mu\text{m}$, 中间齿柱到两侧齿柱距离相同为 $w_3=43\ \mu\text{m}$ 。

3 多功能传感器性能分析

当太赫兹波垂直入射时, 模拟得到的反射频谱如图 2 所示, 此时三维超材料传感器在 $f_0=0.524\ \text{THz}$ 处出现了一个明显的共振峰, 共振的品质因子 Q 值可达 118.7, 由此可见立体超材料结构对入射太赫兹波产生强烈谐振。

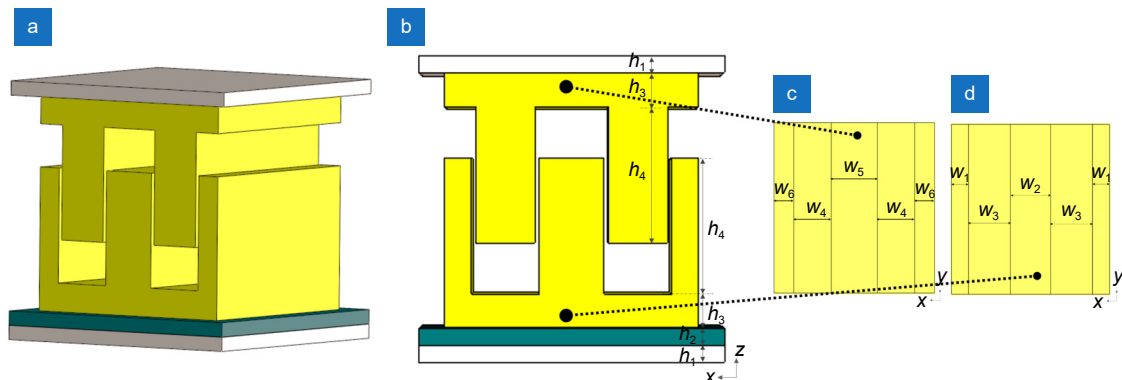


图 1 (a) 双层三维超材料传感器的示意图; (b) 传感器多层结构的侧视图; (c) 下层山形立体结构平面俯视图; (d) 上层凹形立体结构平面仰视图

Fig.1 (a) Schematic diagram of a dual-layer stereo metamaterial sensor; (b) Side view of the multilayer structure of the sensor; (c) Plan view of the lower layer gabled stereo structure; (d) Plan view of the upper layer concave stereo structure

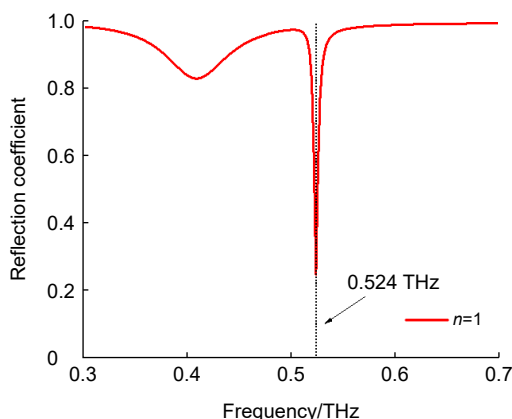


图2 中介质层等效折射率 $n=1$ 时的反射光谱
Fig. 2 The reflection spectrum of the intermediate dielectric layer with equivalent refractive index $n=1$

对平面谐振结构而言, 谐振电磁场往往被局域在谐振器的表面或结构边缘, 或谐振器的支撑基底上, 这部分谐振增强电磁场被限制在传感器结构的内部, 从而无法与待测分析物充分接触, 进而影响了平面超材料传感器的灵敏度。从图3中可以清晰看出本文所设计的立体超材料相比于平面超材料的物理优势: 图3(a)所示为立体超材料谐振器所处谐振频率点处的电场图, 可以看出, 场增强局域集中在立体结构的各个齿柱之间, 越靠近齿尖的位置场增强越大。同样的如图3(b)所示为立体谐振器的磁场分布, 磁场增强局域集中在上下齿柱耦合的沟道内, 而沟道外部包括材料本身并没有磁场增强, 可以看出磁场被牢牢限制在沟道空间内, 降低了电磁能量的辐射损耗, 最后从图3(c)的表面电流分布可以看出, 三维齿形结构的立

体超材料沟道内产生了高密度的同向环形电流, 进一步促进谐振电磁场在沟道空间中的增强与集中。以上分析结果表明, 相较于二维超表面结构, 三维超材料结构能够将谐振增强的电磁场扩展到三维空间。本设计中, 微流通道位于场增强区域, 将待测分析物注入微流通道, 可使其被局域增强场包裹, 进而增大了电磁场与待测物的作用面积, 使谐振结构内部电磁场对待测分析物的介电常数变化更为敏感。

随后本文对双层三维谐振结构的上下两层齿形耦合深度对谐振的反射光谱影响进行探究, 由图4可以看出, 齿合深度在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 附近展现出极强的共振反射峰, 随齿合深度减小共振反射峰逐渐减弱至几乎消失, 证明所设计的结构在特点耦合情况下表现出能用于传感测量的高 Q 值共振峰。我们对液样环境进行建模仿真分析立体超材料用于折射率传感的性能。如图5(a)所示为传感器液体介质层的等效折射率在 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 变化时 S 参数 S_{22} 反射频谱仿真结果图。在双层三维超材料齿合深度为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时, 模拟折射率从 1.0 变化到 2.0 的过程中, 谐振频率从 0.524 THz 偏移至 0.266 THz。本文采用非线性模型来拟合模拟数据, 拟合方程为 $y = 1.3357 \exp(-x/0.7422) + 0.1767$, 拟合结果得到 R^2 为 0.9999, 表明拟合效果良好。此外, 该结构共振的平均品质因子 Q 值可达 118.7, 因此所设计的传感器对于待测物的检测表现出良好的分辨率。

除了用于折射率传感, 本设计得益于三维空间结构的特点以及高 Q 值谐振特性, 还可用于一维方向

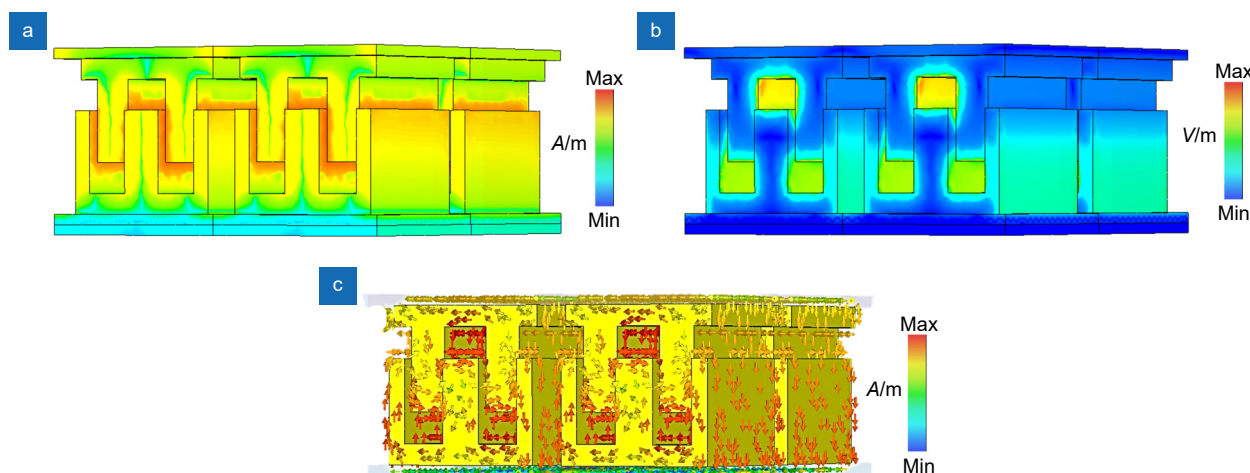


图3 立体超材料谐振结构的 (a) 电场分布图; (b) 磁场分布图; (c) 表面电流分布

Fig. 3 (a) Electric field distribution; (b) Magnetic field distribution; (c) Surface current distribution of the three-dimensional metamaterial resonant structure

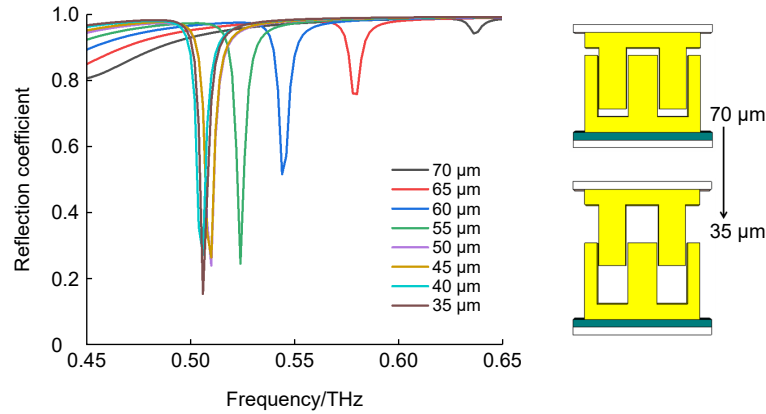


图4 双层三维谐振结构的齿合深度对谐振反射光谱的影响

Fig. 4 Effect of the tooth alignment depth of the double-layer stereo resonant structure on the resonant reflection spectra

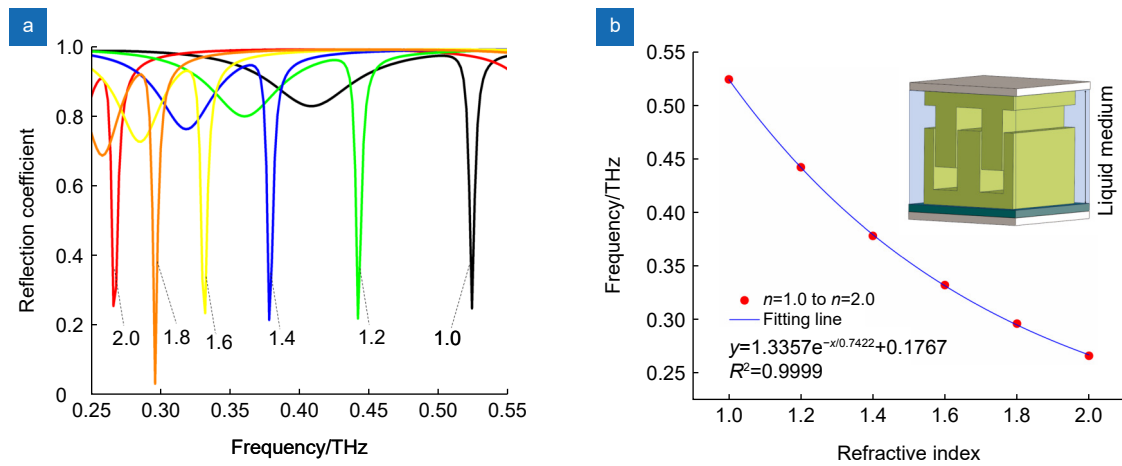


图5 双层三维谐振结构用于折射率传感的(a)反射光谱及其(b)灵敏度拟合

Fig. 5 (a) Reflectance spectra of the dual-layer 3D structure for refractive index sensing, and (b) the fitting line

的高精度微位移传感。图 6(a) 为电磁波垂直入射情况下, 上层超材料结构沿 z 轴移动进而改变上下层结构的齿合深度的反射频谱仿真结果。当双层三维超材料的齿合深度从 $50\ \mu\text{m}$ 变为 $-30\ \mu\text{m}$ 时, 共振频率从 $0.524\ \text{THz}$ 偏移到 $0.6487\ \text{THz}$ 。图 6(b) 为传感器在 z 轴微位移变化下的频移点拟合情况, 使用的拟合方程为 $y = 0.8171 \exp(x/59.1191) + 1.4139$ 。计算所得 R^2 为 0.9952 , 说明拟合效果较好。此外, 所设计的传感器也可以分辨沿 y 轴运动的微位移特性。图 6(c) 为模拟得到的上层结构相对下层结构在固定齿合深度时, 其中心沿 y 轴移动时的反射频谱结果。上下层三维超材料齿合深度为 $50\ \mu\text{m}$ 时, 当上层立体超材料相对下层立体超材料沿 y 轴从 0 移动到 $15\ \mu\text{m}$ 时, 共振频率从 $0.524\ \text{THz}$ 处偏移到 $0.542\ \text{THz}$, 图 6(d) 为传感器在 z 轴微位移变化下的频率拟合曲线, 拟合方程为

$y = 0.0037 \exp(x/8.5437) + 0.5207$, 计算得到的拟合度 R^2 为 0.9949 。所述结构在 y 轴向具有检测动态范围较小的微位移能力。最后本文对所设计的传感器性能与已发表论文进行对比, 从表 1 中可以看出所提出的双层三维结构得益于自身优势展现出更好的传感性能。

4 结 论

本设计展示了一种基于双层三维超材料的太赫兹微位移和液体折射率传感器。传感装置包括上下两层聚酰亚胺薄膜基底, 附着在下层聚酰亚胺薄膜基底上的石墨层, 设置在石墨层和上层聚酰亚胺薄膜基底之间的双层三维超材料齿形耦合谐振结构。中间双层三维超材料谐振结构包括下层对称的山形结构和上层对称的凹形结构, 上下两层重合 $50\ \mu\text{m}$ 的耦合深度。所

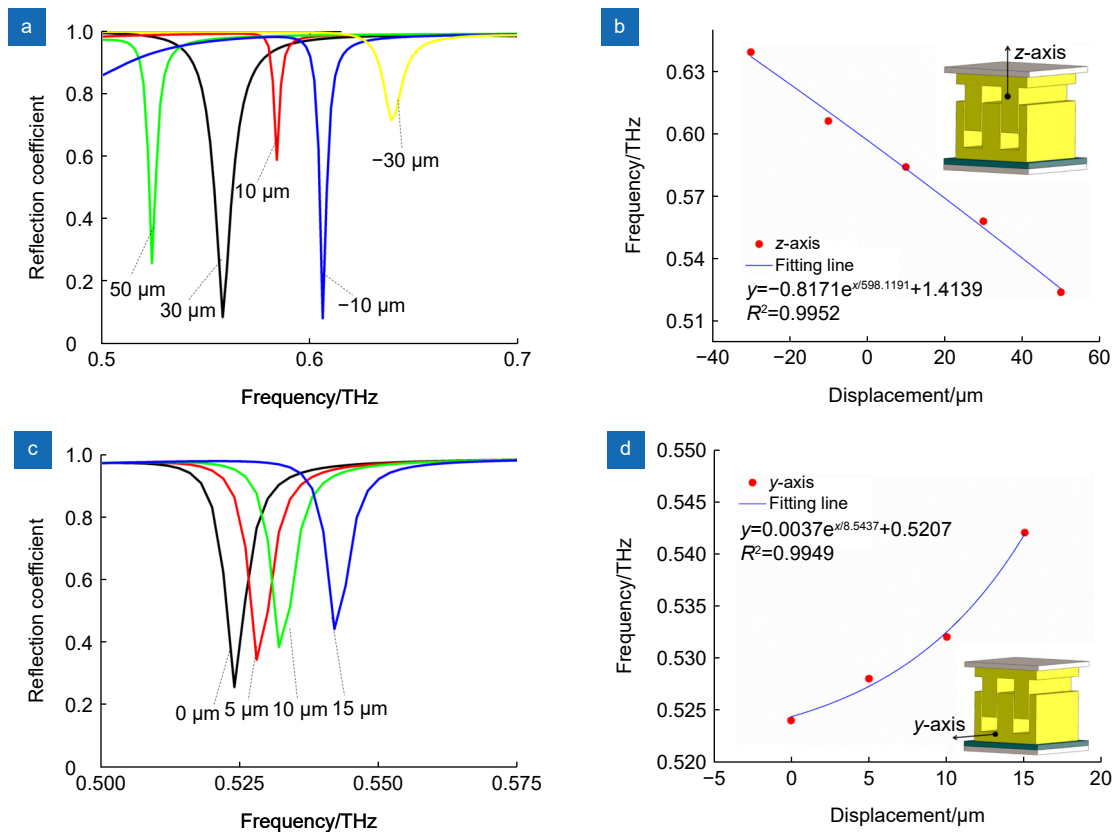


图 6 双层三维谐振结构用于 (a) z 轴向微位移传感的反射光谱及其 (b) 灵敏度拟合, (c) y 轴向微位移传感的反射光谱及其 (d) 灵敏度拟合

Fig. 6 Reflectance spectra of the dual-layer 3D structure for (a) the z -axis micro-displacement sensing and (b) its fitted sensitivity. (c) Reflectance spectra of the y -axis micro-displacement sensing and (d) its fitted sensitivity

表 1 传感器性能对比

Table 1 Comparison of sensor performance

Ref	Structure	Intended detection medium	Resonance frequency /THz	Sensitivity /(GHz/RIU)	Q-factor	FOM
[24]	Single/2D	Heavy metal ion	0.36	113.92	11.22	3.15
[25]	Single/2D	Glucose	0.40	23.30	—	—
[26]	Dual/2D	Ethanol oil sucrose	0.49	120.60	82.30	20.10
This work	Dual/3D	Liquid	0.52	258.00	118.70	58.90
Ref	Structure	Displacement	Resonance frequency /THz	Sensitivity /(GHz/ μ m)	Q-factor	FOM
[27]	Dual/2D	y -axis	0.27	0.30	40.10	0.045
This work	Dual/3D	y -axis	0.52	1.20*	118.70	0.27
		z -axis		1.40*		0.12

*The results were obtained with linear fitting

设计的立体超材料器件结合多层结构可实现多功能测量: 1) 通过谐振频率确定待测液体介质层的折射率变化, 从而实现液体成分的高精度分辨; 2) 在一维方向的微位移传感方面, 则可分别在 z 轴方向以及 y 轴方向上实现微位移的高灵敏度测量。所提出的双层三维结构和功能集成式相结合的设计思路可以看作是太

赫兹超材料传感器未来的一个具有潜力的发展方向。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514):

- 77–79.
- [2] Zhu Q, Tian H W, Jiang W X. Manipulations and applications of radiating waves using electromagnetic metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230115.
朱潜, 田翰闾, 蒋卫祥. 电磁超表面对辐射波的调控与应用[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230115.
 - [3] Baqir M A, Choudhury P K. Hyperbolic metamaterial-based optical biosensor for detecting cancer cells[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2023, **35**(4): 183–186.
 - [4] Ma C W, Ma W Y, Tan Y, et al. High Q-factor terahertz metamaterial based on analog of electromagnetically induced transparency and its sensing characteristics[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(11): 180298.
马长伟, 马文英, 谭毅, 等. 高 Q 值 THz 类 EIT 超材料及传感特性研究[J]. *光电工程*, 2018, **45**(11): 180298.
 - [5] Hu W D, Du X, Liu S Y, et al. Optofluidic refractometric sensor based on quasi-bound states in the continuum in all-dielectric metasurface[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230124.
胡维东, 杜响, 刘思玉, 等. 基于准连续域束缚态介质超表面的光微流折射率传感研究[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230124.
 - [6] Hu T Q, Pan T S, Guo D J, et al. Omnidirectional configuration of stretchable strain sensor enabled by the strain engineering with chiral Auxetic metamaterial[J]. *ACS Nano*, 2023, **17**(21): 22035–22045.
 - [7] Du X X, Mao H P, Yan Y T, et al. Study on the spectral characteristics of plant growth regulators based on the structure difference of terahertz metamaterial sensor[J]. *IEEE Sensors J*, 2022, **22**(14): 14065–14074.
 - [8] Banerjee S, Dutta P, Basu S, et al. A new design of a terahertz metamaterial absorber for gas sensing applications[J]. *Symmetry*, 2023, **15**(1): 24.
 - [9] Saadeldin 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.
 - [10] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications - explosives, weapons and drugs[J]. *Semicond Sci Technol*, 2005, **20**(7): S266–S280.
 - [11] Li Z R, Zhong M, Zang L Y, et al. Dual-mode metamaterial absorber for independent sweat and temperature sensing[J]. *J Electron Mater*, 2023, **52**(6): 4106–4116.
 - [12] Cocker T L, Jelic V, Hillenbrand R, et al. Nanoscale terahertz scanning probe microscopy[J]. *Nat Photonics*, 2021, **15**(8): 558–569.
 - [13] He Z H, Li L Q, Ma H Q, et al. Graphene-based metasurface sensing applications in terahertz band[J]. *Results Phys*, 2021, **21**: 103795.
 - [14] Ahmadivand A, Gerislioglu B, Ahuja R, et al. Terahertz plasmonics: the rise of toroidal metadevices towards immunobiosensings[J]. *Mater Today*, 2020, **32**: 108–130.
 - [15] Wang W J, Sun K X, Xue Y, et al. A review of terahertz metamaterial sensors and their applications[J]. *Opt Commun*, 2024, **556**: 130266.
 - [16] Vivek A, Shambavi K, Alex Z C. A review: metamaterial sensors for material characterization[J]. *Sens Rev*, 2019, **39**(3): 417–432.
 - [17] Deng X X, Shen Y C, Liu B W, et al. Terahertz metamaterial sensor for sensitive detection of citrate salt solutions[J]. *Biosensors (Basel)*, 2022, **12**(6): 408.
 - [18] Li J, Zhou Y D, Peng F W, et al. High-FOM temperature sensing based on Hg-EIT-like liquid metamaterial unit[J]. *Nanomaterials*, 2022, **12**(9): 1395.
 - [19] Tian X Y, Yin L X, Li D C. Current situation and trend of fabrication technologies for three-dimensional metamaterials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2017, **44**(1): 69–76.
田小永, 尹丽仙, 李涤尘. 三维超材料制造技术现状与趋势[J]. *光电工程*, 2017, **44**(1): 69–76.
 - [20] Zhang Y P, Li T T, Zeng B B, et al. A graphene based tunable terahertz sensor with double Fano resonances[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(29): 12682–12688.
 - [21] Wang X, Wang J L. Terahertz metamaterial absorber sensor based on three-dimensional split-ring resonator array and microfluidic channel[J]. *Acta Opt Sin*, 2020, **40**(19): 1904001.
王鑫, 王俊林. 基于三维开口谐振环阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器[J]. *光学学报*, 2020, **40**(19): 1904001.
 - [22] Fu Y P, Xu X C, Lin Y S. Actively programmable MEMS-based racetrack-shaped terahertz metamaterial[J]. *J Appl Phys*, 2022, **131**(11): 115301.
 - [23] Lin Y S, Liao S Q, Liu X Y, et al. Tunable terahertz metamaterial by using three-dimensional double split-ring resonators[J]. *Opt Laser Technol*, 2019, **112**: 215–221.
 - [24] Almagani A H M, Surve J, Parmar T, et al. A graphene-metasurface-inspired optical sensor for the heavy metals detection for efficient and rapid water treatment[J]. *Photonics*, 2023, **10**(1): 56.
 - [25] Yang J, Qi L M, Li B, et al. A terahertz metamaterial sensor used for distinguishing glucose concentration[J]. *Results Phys*, 2021, **26**: 104332.
 - [26] Deng G S, Guo A R, Kou Z F, et al. High-sensitivity terahertz sensor for liquid medium detection using dual-layer metasurfaces[J]. *IEEE Trans Terahertz Sci Technol*, 2024, **14**(1): 57–63.
 - [27] Guo A R, Kou Z F, Yang J, et al. Electromagnetic anapole-inspired micro-displacement sensor using dual-layer terahertz metasurfaces with micrometer-level sensitivity and centimeter-level range[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2024, **73**: 6006709.

作者简介



邓光晟 (1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电磁超材料及其传感应用等方面的研究。

E-mail: dgsh@hfut.edu.cn



【通信作者】蔡斐 (1979-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事计算电磁学、计算机辅助仿真设计等方面的研究。

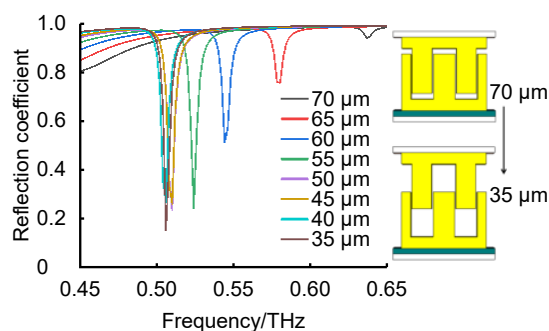
E-mail: caifei@hfut.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Dual-layer 3D terahertz metamaterial based multifunctional sensor

Deng Guangsheng^{1,2}, Guo Aoran², Cheng Xinqi², Yang Jun^{1,2}, Cai Fei^{1*}



Effect of the tooth alignment depth of the double-layer stereo resonant structure on the resonant reflection spectra

Overview: Sensors are increasingly valued for their versatility as a crucial part of integrated devices. With the advancement of technology facing diverse environmental challenges, there is a growing need for multifunctional integration in the sensing field. Metamaterials are the combination of artificial periodic arrays with subwavelength resonant structures, and terahertz metamaterials sensors have a wide range of applications in biomacromolecule sensing and other trace precision detection fields due to their high penetration, specific fingerprint, low photon energy, high sensitivity and high resolution. At present, researchers in this field are increasingly demanding the highly sensitive performance of metamaterial sensors. Traditional metamaterial sensors have already enabled various sensing applications, but most of these sensors are designed for single detection targets and functions. Integrating sensors with multiple detection functions remains one of the challenges in the current research on metamaterial sensors. Moreover, the existing reported metamaterial sensors are primarily based on two-dimensional metasurfaces. A common issue with these sensors is their relatively low sensitivity and resolution, which limits the application of metamaterial sensors in high-precision detection.

In this paper, a terahertz metamaterial multifunctional sensor based on the coupling of a two-layer 3D resonant structure with high sensitivity is introduced. The sensor consists of an upper and lower polyimide film substrate, a graphite layer attached to the lower polyimide film substrate, and a periodic double-layer 3D toothed coupling resonant structure between the graphite layer and the upper polyimide film substrate, which consists of a symmetric mountain-shaped structure in the lower layer and a symmetric concave structure in the upper layer. The three-dimensional metamaterial can achieve multifunctional measurements with high sensitivity: the refractive index change of the liquid medium can be detected with a high sensitivity by measuring the resonant frequency of the structure. Therefore, it is possible to detect the liquid medium with such a design. Meanwhile, in terms of micro displacement sensing, a high micro displacement measurement sensitivity can be realized in both the z -axis and y -axis directions, respectively. Compared with other reported metamaterial sensors, the proposed design achieves multifunctional sensing ability. Moreover, it also outperforms metamaterial sensors based on two-dimensional metasurfaces in terms of sensitivity and resolution. The 3D metamaterial sensor proposed in this paper paves a new way for the design of functionally integrated sensor with high sensitivity at terahertz frequencies.

Deng G S, Guo A R, Cheng X Q, et al. Dual-layer 3D terahertz metamaterial based multifunctional sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(10): 240164; DOI: 10.12086/oe.2024.240164

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2023YFF0719403), National Natural Science Foundation of China (62001150), and Anhui Provincial Natural Science Foundation (2208085MF160)

¹Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, Academy of Opto-Electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; ²Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

* E-mail: caifei@hfut.edu.cn