

超材料多级结构在太赫兹和可见光波段响应特性的研究

田冰霜, 张玲

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月26日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

超材料是一种人工合成的二维超表面, 具备负介电常数、负磁导率等天然材料所不具备的电磁响应。不同结构与尺寸的超材料具有不同的性能, 因此超材料在生物医学、光学器件等领域有着广泛的应用。太赫兹超材料吸收器是一种将超材料应用于太赫兹波段的器件, 该结构能够与自由空间阻抗相匹配, 对特定频率范围内的入射电磁波能够有效的“完美吸收”。本文设计了一款“川”字型的金属-介质-金属的“三明治”式的太赫兹超材料吸收器, 利用有限元仿真软件进行建模与仿真优化, 获得最优的太赫兹超材料吸收器在1~3 THz之间有一个在2.84 THz谐振吸收峰, 在此频率处实现了对太赫兹波99.93%的“完美吸收”。为了进一步扩展太赫兹超材料吸收器的功能, 将太赫兹超材料吸收器与金纳米颗粒相结合, 即在其金属条带表面随机生长一定尺寸(30 nm ~ 70 nm)的金纳米颗粒。仿真结果表明, 对于大尺寸结构的太赫兹超材料吸收器来说, 小尺寸的金纳米颗粒并不会减弱其在太赫兹波段的响应。此外, 通过对超材料多级结构上的单个金纳米颗粒在可见光波段的研究发现, 该结构在整个可见光波段均有响应, 且增强因子均在 10^4 以上。因此, 该超材料多级结构实现了在太赫兹和可见光波段均有响应, 这对于太赫兹超材料吸收器应用广度的拓展有着一定的影响。

关键词

太赫兹超材料吸收器, 超材料多级结构, 太赫兹, 可见光, 响应特性

Study of the Response Characteristics of Metamaterial Multilayer Structures in the Terahertz and Visible Light Bands

Bingshuang Tian, Ling Zhang

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Abstract

Metamaterials are synthetic two-dimensional metasurfaces with electromagnetic responses that are not found in natural materials, such as negative permittivity and permeability. Metamaterials with different structures and sizes have different properties, so metamaterials have a wide range of applications in biomedicine, optical devices and other fields. Terahertz metamaterial absorber is a device that applies metamaterials to the terahertz band, and the structure can match the free-space impedance to effectively "perfectly absorb" the incident electromagnetic wave in a specific frequency range. In this paper, a "Sichuan" metal-dielectric-metal "sandwich" type terahertz metamaterial absorber is designed, and the finite element simulation software is used to model and optimize the simulation, and the optimal terahertz metamaterial absorber has a resonant absorption peak of 2.84 THz between 1~3 THz, and the "perfect absorption" of 99.93% of the terahertz wave is achieved at this frequency. In order to further expand the function of the terahertz metamaterial absorber, terahertz metamaterial absorbers are combined with gold nanoparticles, i.e., they grow randomly on the surface of their metal bands of a certain size (30 nm ~ 70 nm). The simulation results show that for the large-scale structure of the terahertz metamaterial absorber, the small size of the gold nanoparticles does not weaken their response in the terahertz band. In addition, the study of individual gold nanoparticles on the multi-level structure of metamaterials in the visible light band shows that the structure responds in the entire visible light band, and the enhancement factor is above 10^4 . Therefore, the multi-level structure of the metamaterial responds in both the terahertz and visible light bands, which has a certain impact on the expansion of the application breadth of terahertz metamaterial absorbers.

Keywords

Terahertz Metamaterial Absorbers, Metamaterial Multilevel Structures, Terahertz, Visible Light, Response Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年来, 超材料因其具有负介电常数、负磁导率等独特的电磁响应而引起了广泛的关注, 应用于隐形[1] [2] [3] [4] [5]、传感、[6]-[13]完美吸收器[14] [15] [16] [17]和能量收集等领域。超材料在结构上层或里面设计周期性排列的亚波长金属谐振器, 亚波长谐振单元可以调控其电磁特性。超材料是具有可变介电常数 ε 和磁导率 μ 的人工周期性结构, 可以达到 $\varepsilon < \varepsilon_0$ 和 $\mu < \mu_0$ [18], 有效磁导率 $\mu(\omega)$ 和有效介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 是独立指定, 通过麦克斯韦方程组可以得到超材料的折射率为: $n(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)}$, 而超材料结构的表面阻抗为: $Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)}$ 。

在 2008 年, Landy 等人[19]首先提出并设计了一款金属 - 介质 - 金属的三层结构的太赫兹超材料吸收器, 在 1.125 THz 处有一个谐振吸收峰, 吸收率达到了 98%。在 2022 年, Wang 等人[20]提出了由两条水平金属条和两条垂直连接的金属条组成的双波段极化可控太赫兹超材料吸收体。为了实现太赫兹超材

料吸收器的“完美吸收”，就是使吸收率最大化即透射率和反射率最小化，满足吸收率为 1，透射率和反射率为零。为了使超材料吸收器透射率为零，只需要在结构底部加上一层金属反射层即可。入射电磁波在金属中传播具有趋肤深度，所以只要金属反射层的厚度远远大于趋肤深度，使得原本应该透射而出的电磁波被金属反射层所阻挡，因此便实现了透射率为零。为了使超材料吸收器反射率为零，需要超材料结构的表面阻抗和空气阻抗相匹配，即超材料结构的阻抗 $Z = 1$ 。根据公式 $Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)}$ 可知，当有效介电常数与磁导率相等时，超材料结构的阻抗 $Z = 1$ ，即实现了超材料结构的表面阻抗和空气阻抗相匹配。设 A 为吸收率， R 为反射率， T 为透射率，则关系式为： $A = 1 - R - T$ 。若 R 为反射率 $|S_{11}|^2$ ， T 为透射率 $|S_{21}|^2$ ，那么会得到以下关系式： $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ [21]。

本文设计了一款“川”字型的金属-介质-金属的“三明治”式的太赫兹超材料吸收器，由于该结构底部为金属反射层，所以，透射率 T 即 $|S_{21}|^2$ 为 0。因此， $A = 1 - T$ ，即 $A = 1 - |S_{11}|^2$ ，由此便可得到该太赫兹超材料吸收器的吸波特性。利用有限元仿真软件进行建模与仿真优化。该太赫兹超材料吸收器在 1~3 THz 之间有一个在 2.84 THz 谐振吸收峰，在此频率处实现了对太赫兹波 99.93% 的“完美吸收”，这是因为所设计的结构能够与入射的电磁波发生耦合现象[22]。为了进一步扩展太赫兹超材料吸收器的功能，在其金属条带表面随机生长一定尺寸范围内的金纳米颗粒，仿真结果表明，一定尺寸范围内的金纳米颗粒的存在，会引起太赫兹超材料吸收器在太赫兹波段谐振吸收峰的偏移，但对峰强度的响应影响较小。此外，选取金属条带上的一颗金纳米颗粒作为可见光波段仿真的结构，验证了该结构在可见光波段也有响应。所以，该超材料多级结构在太赫兹和可见光波段均有响应，这对于太赫兹超材料吸收器应用广度的拓展有着一定的影响。

2. 太赫兹超材料吸收器的建模与仿真

2.1. 太赫兹超材料吸收器的设计

太赫兹超材料的单元结构示意图 1 所示，(a) 为单元结构，(b) 为正视图，典型的金属-介质-金属结构。顶层是由简单金属条带组成，金属材料为金，金属条带宽度为 $0.6 \mu\text{m}$ ，金属条带间距为 $5 \mu\text{m}$ ，沿着 X 轴方向“川”型排列。中间介质层为 FR-4，介质层长度为 $50 \mu\text{m}$ ，厚度为 $20 \mu\text{m}$ 。底层是全覆盖的金膜，厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。利用基于有限元的电磁仿真软件，分别对图 1 所示的太赫兹超材料进行仿真分析。为了模拟无限周期阵列，X 和 Y 方向设置为 unit cell 边界，Z 方向上设置开放性的边界条件。

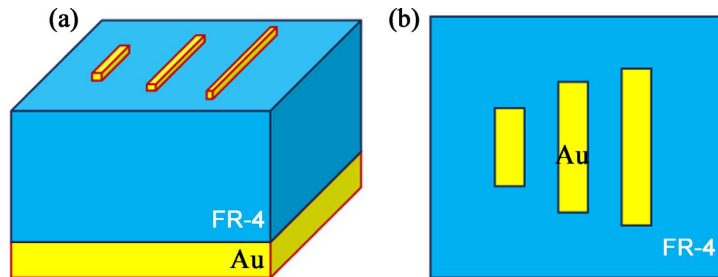


Figure 1. Schematic diagram of the unit structure of terahertz metamaterial absorber. (a) is a three-dimensional view, and (b) is an elevation view

图 1. 太赫兹超材料吸收器单元结构示意图，(a) 为立体图，(b) 为正视图

设定太赫兹波垂直入射到太赫兹超材料结构的表面，电场方向沿着 y 轴正方向，磁场方向沿着 x 轴正方向，由此得到太赫兹超材料结构的频率吸收谱，如图 2 所示。由图 2 可知，该太赫兹超材料在 2.84 Thz 处有一个吸收率为 99.93% 的谐振吸收峰。

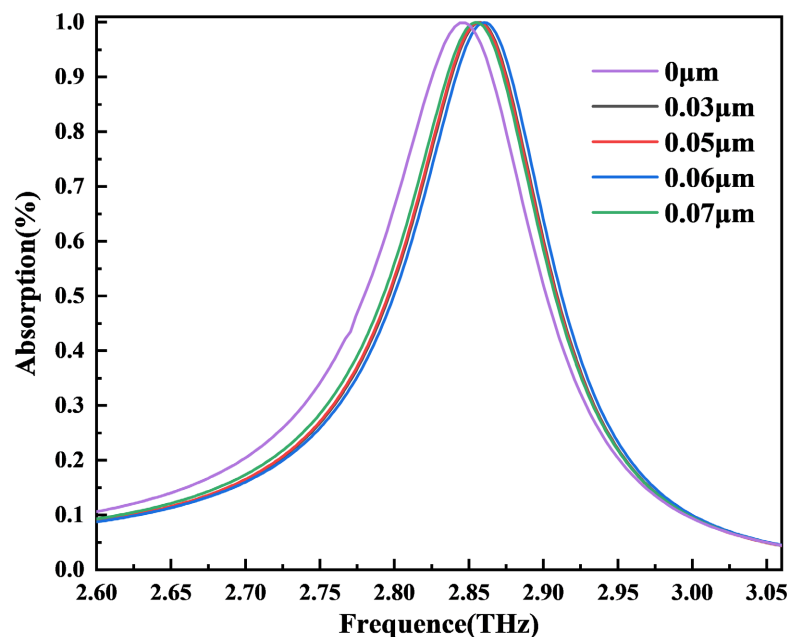


Figure 2. Frequency absorber spectrum of terahertz metamaterial absorber
图 2. 太赫兹超材料吸收器的频率吸收器谱

2.2. 太赫兹超材料吸收器的优化

采用控制变量法对金属条带间距、金属条带宽度、介质层长度、介质层厚度进行参数化扫描, 得到如图 3 所示的频率吸收谱。太赫兹波垂直入射在太赫兹超材料上, 如图 3 所示。因为该太赫兹超材料吸收器的结构由下到上分别为金基底、FR-4 以及带有空气槽的金, 是典型的“三明治”结构, 所以形成了一个法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔, 腔吸收效应是由于腔内多次反射之间的干扰而产生的[23] [24] [25], 这导致了显著的场捕获和增强。所以, 腔长(FR-4 的厚度)也会对该太赫兹超材料吸收器的透射曲线产生很大的影响。

对参数化仿真结果进行逐一对比, 选定金属条带宽度为 $0.6 \mu\text{m}$ 、金属条带间距为 $5 \mu\text{m}$ 、介质层长度为 $50 \mu\text{m}$ 、厚度为 $20 \mu\text{m}$ 为最优结构。

3. 太赫兹超材料多级结构的建模与仿真

3.1. 太赫兹超材料多级结构的设计

基于金纳米颗粒的太赫兹超材料多级结构如图 4 所示, (a)为单元结构立体图, (b)为正视图, 顶层金属条带上随机分布着一定尺寸的金纳米颗粒。

利用基于有限元的电磁仿真软件图 4 所示的超材料多级结构进行仿真分析。为了模拟无限周期阵列, X 和 Y 方向设置为 unit cell 边界, Z 方向上设置开放性的边界条件。

设定太赫兹波垂直入射到太赫兹超材料多级结构的表面, 电场方向沿着 y 轴正方向, 磁场方向沿着 x 轴正方向, 对金纳米颗粒的半径 R (30 nm、50 nm、60 nm、70 nm)进行频域扫描, 分别得到太赫兹超材料多级结构的频率吸收谱。如图 5 所示, 金纳米颗粒的存在会引起太赫兹超材料吸收器谐振峰微弱的偏移, 但对强度基本没有影响。若金纳米颗粒尺寸更小, 那么引起的吸收峰位置偏移量会更小, 对太赫兹超材料吸收器的影响微乎其微。根据超材料吸收器结构设计原理, 如果金纳米颗粒较大, 随机生长在超材料金属谐振层边缘位置, 可能会造成超材料吸收器谐振吸收峰的位置及强度较大的变化。

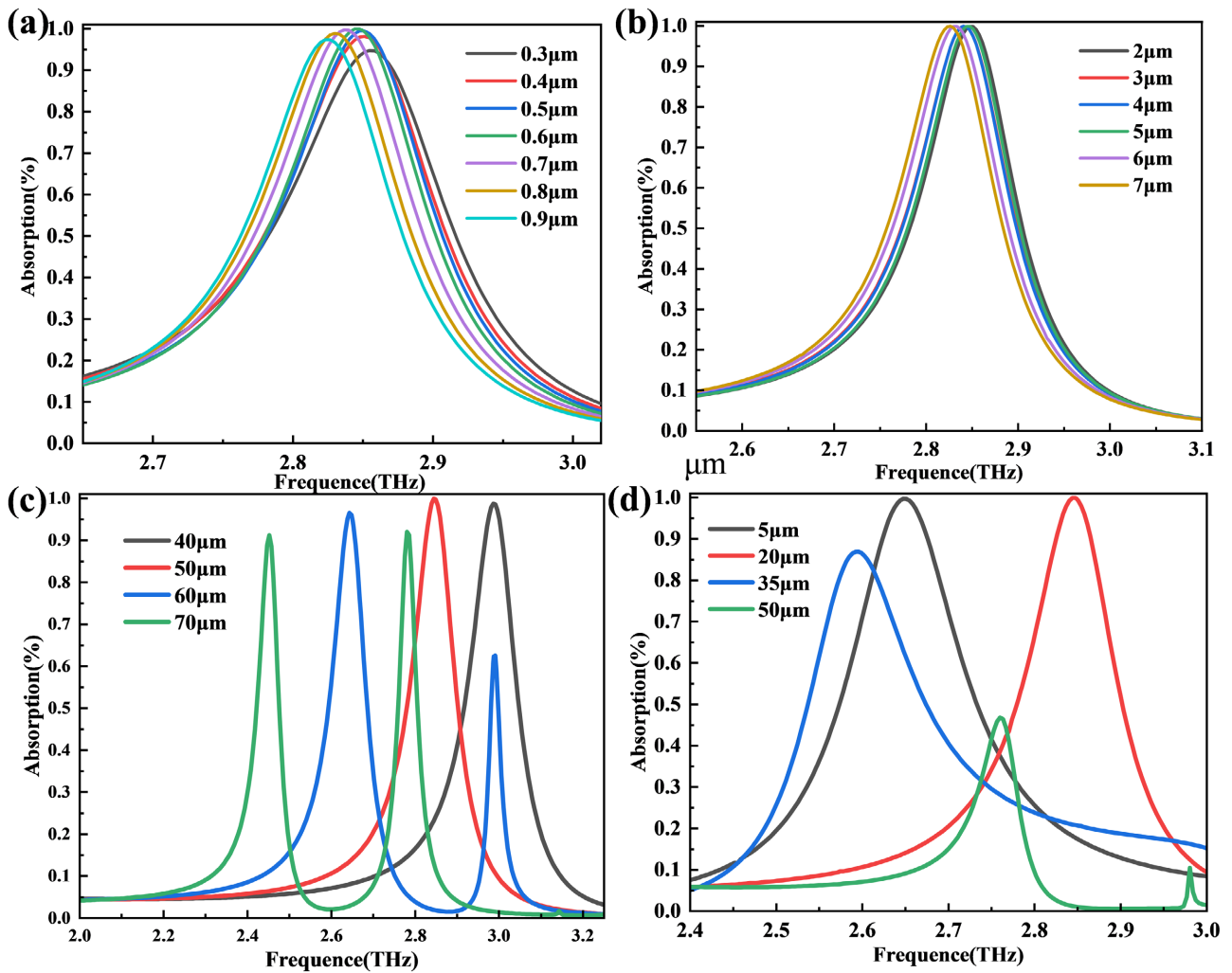


Figure 3. Frequency absorber spectrum of terahertz metamaterial absorber. (a) Parameterization of metal strip width; (b) Parameterized scanning of the spacing between metal strips; (c) Parameterized scanning of the length of the dielectric layer; (d) Parameterized scanning of the thickness of the intermediate dielectric layer

图 3. 太赫兹超材料吸收器的频率吸收器谱。(a) 对金属条带宽度进行参数化; (b) 对金属条带间距进行参数化扫描; (c) 对介质层长度进行参数化扫描; (d) 对中介质层厚度进行参数化扫描

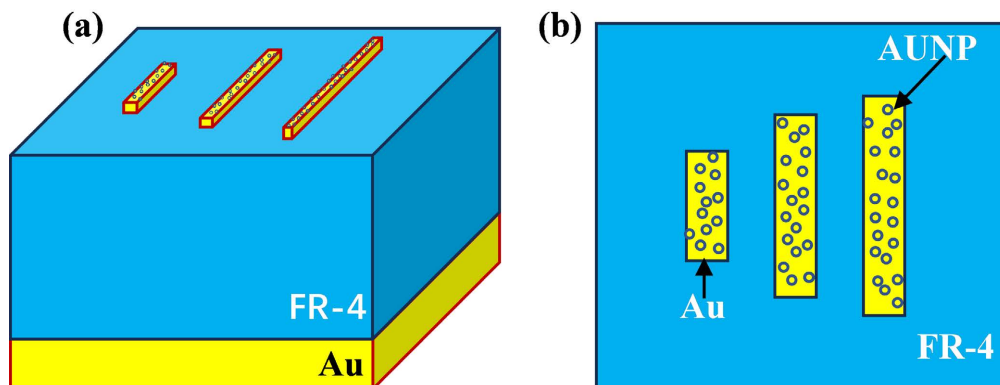


Figure 4. Shows a schematic diagram of the multi-level structure of metamaterials. (a) is a three-dimensional view of the unit structure, and (b) is a front view

图 4. 超材料多级结构示意图。(a) 为单元结构立体图, (b) 为正视图

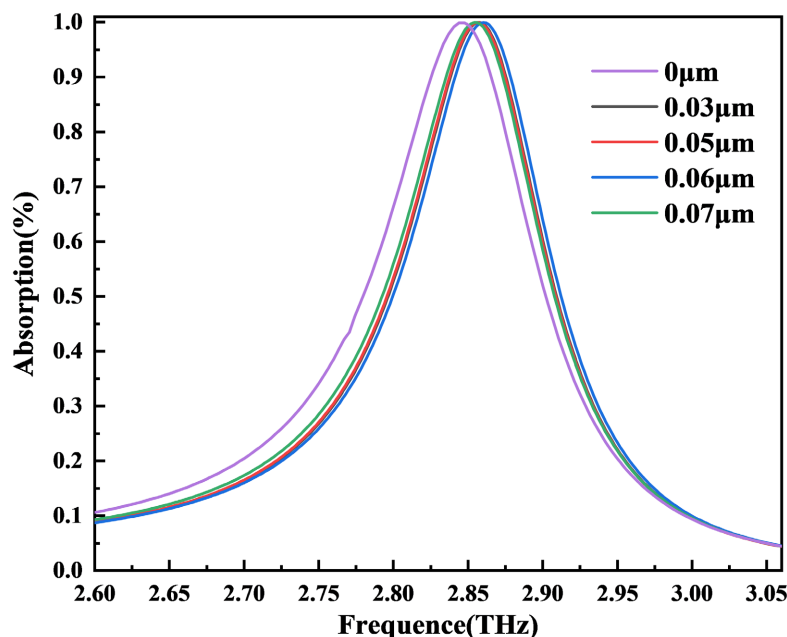


Figure 5. The effect of gold nanoparticle size on the frequency absorption of terahertz metamaterials with multi-level structures

图 5. 金纳米颗粒尺寸大小对太赫兹超材料多级结构频率吸收的影响

3.2. 太赫兹超材料多级结构在可见光波段的响应特性

金纳米颗粒是具有纳米尺寸(通常指直径在 1~100 nm 之间)的金材料粒子。纳米金颗粒具有局部表面等离子体共振、大比表面积、较强的生物亲和力和优良的化学特性,使得其在很多领域具有广泛的应用和研究价值。拉曼增强效应是指金纳米颗粒表面等离子体共振引起的拉曼散射信号的增强。当激光光束与金纳米颗粒相互作用时,金纳米颗粒表面的电子受到激发,产生一种局域表面等离子体(LSP),这种等离子体的共振频率与激光波长相匹配。当分子与金纳米颗粒接近时,分子的振动模式会受到这种局域场的显著增强,从而产生更强的拉曼散射信号。这种效应可用于增强拉曼信号的灵敏度,从而实现对样品中微量成分的检测和表征。

在超材料多级结构上选取部分来研究金膜上金纳米颗粒在可见光波段的响应特性。选取的结构的正视图和侧视图,如图 6 所示。选定金纳米颗粒的半径 R 为 30 nm、50 nm、60 nm、70 nm,可见光波段范围为 400~700 nm。

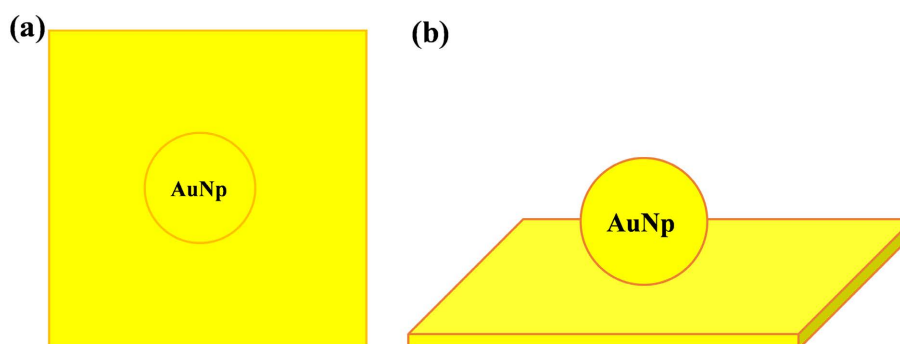


Figure 6. Shows the multi-level structure of selected terahertz metamaterials, where (a) is the front view and (b) is the stereo view

图 6. 选取的部分太赫兹超材料多级结构, (a) 为正视图, (b) 为立体图

首先, 选定入射光波长为 532 nm, 可见光垂直入射在该结构上, 金纳米颗粒的半径 R 为 30 nm、50 nm、60 nm、70 nm, 利用仿真软件对金纳米颗粒的半径频域扫描, 分别得到相对应的 XY 平面电场图如图 7 所示。由图 7 可知, 电场强度最强的位置在金纳米颗粒与金膜的间隙, 也就是所谓的“热点”。在实际检测时, 该超材料多级结构产生的拉曼增强效果会由于金纳米颗粒之间的相互作用而更好。所以, 该超材料多级结构在可见光波段的响应可用于物质的检测与分析。

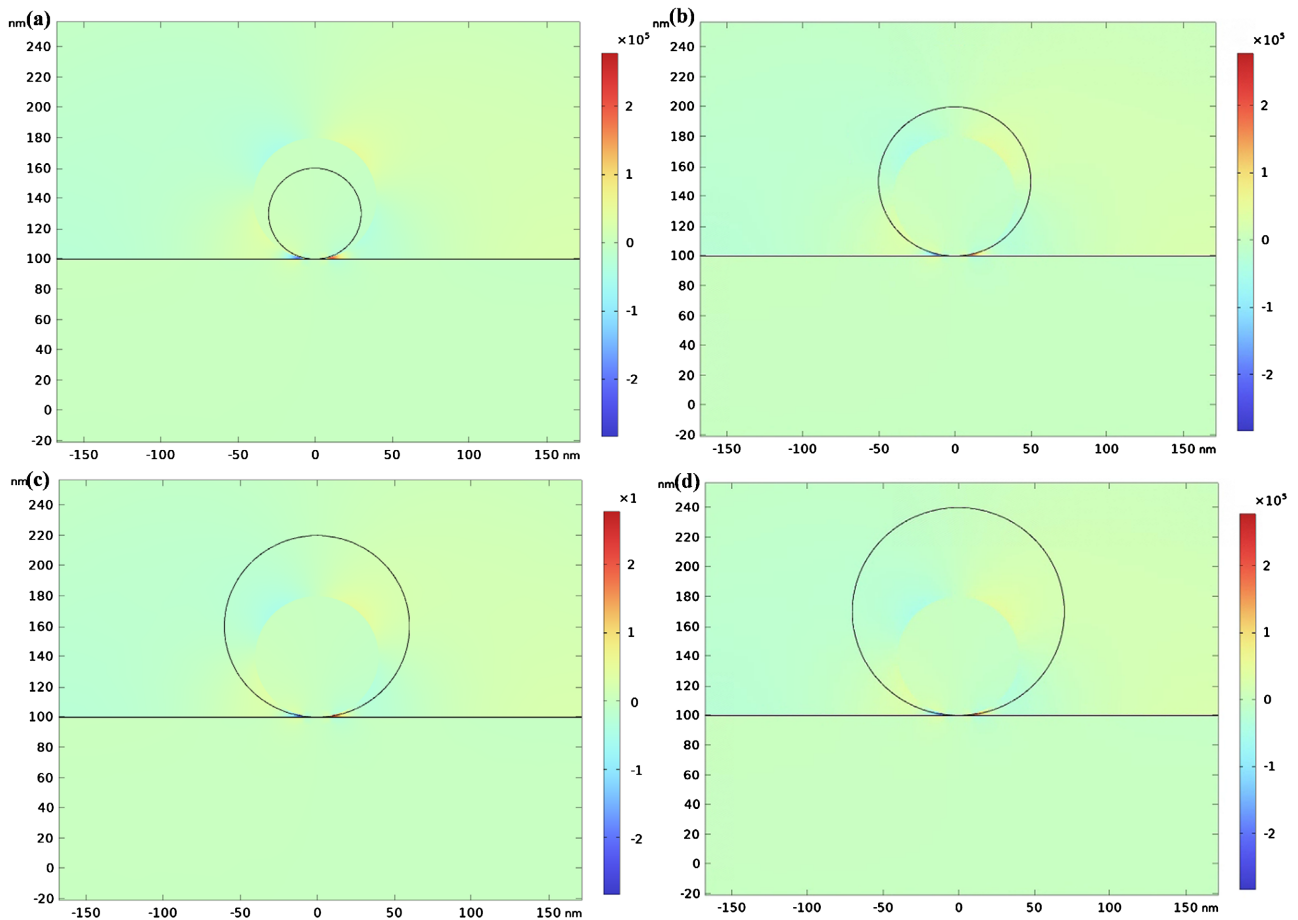


Figure 7. The effect of radius R variation of gold nanoparticles on the electric field strength of the selected structure. (a) When R is 30 nm; (b) When R is 30 nm; (c) When R is 30 nm; (d) When R is 60 nm

图 7. 金纳米颗粒的半径 R 变化对选取结构的电场强度的影响。(a) 当 R 为 30 nm 时; (b) 当 R 为 30 nm 时; (c) 当 R 为 30 nm 时; (d) 当 R 为 60 nm 时

选定金纳米颗粒的半径 R 为 30 nm, 利用仿真软件对入射光波长在 400~700 nm 进行参数化扫描, 步长为 50 nm, 得到 XY 平面电场图如图 8 所示。

从图 8 可以清楚的看出, 此结构在几乎整个可见光波段皆有响应。所以, 一定尺寸的金纳米颗粒结合柔性太赫兹超材料而成的超材料多级结构在太赫兹波段和可见光波段皆有响应, 这种将大尺寸结构的太赫兹超材料吸收器与小尺寸的金纳米颗粒相结合的超材料多级结构, 为拓展超材料吸收器的应用广度具有重要的意义。

4. 总结

本文设计了一款“川”字型的金属-介质-金属的“三明治”式的太赫兹超材料吸收器, 利用有

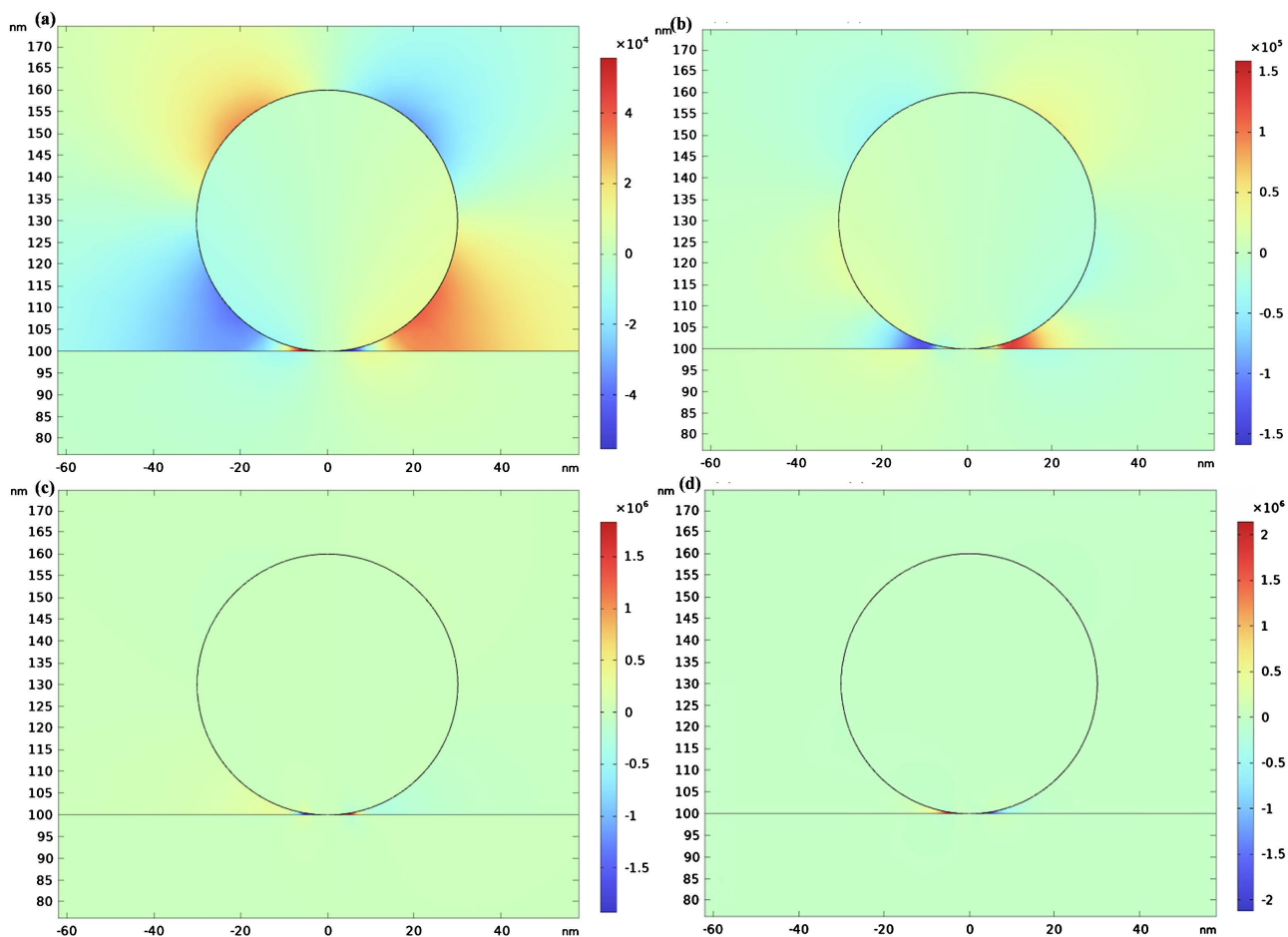


Figure 8. The influence of visible light wavelength variation on the electric field intensity of the selected structure. (a) When the visible light wavelength is 400 nm; (b) When the visible light wavelength is 500 nm; (c) When the visible light wavelength is 600 nm; (d) When the visible light wavelength is 700 nm

图 8. 可见光波长变化对选取结构的电场强度的影响图。(a) 当可见光波长为 400 nm 时; (b) 当可见光波长为 500 nm 时; (c) 当可见光波长为 600 nm 时; (d) 当可见光波长为 700 nm 时

限元仿真软件进行建模与仿真优化,使得该太赫兹超材料吸收器在 2.84 THz 处实现了对太赫兹波 99.93% 的“完美吸收”。为了进一步扩展太赫兹超材料吸收器的功能,在其金属条带表面随机生长一定尺寸范围内的金纳米颗粒,仿真结果表明,一定尺寸范围内的金纳米颗粒的存在对太赫兹超材料吸收器在太赫兹波段的响应没有太大影响。此外,选取金属条带上的一颗金纳米颗粒作为可见光波段仿真的结构,验证了该结构在可见光波段也有响应。所以,该超材料多级结构在太赫兹和可见光波段均有响应,这对于太赫兹超材料吸收器应用广度的拓展有着一定的影响。

致 谢

感谢国家自然科学基金(Nos.61875126)资助。感谢张玲老师在超表面研究中提供了建设性的意见,以及实验室成员在此过程中给予的帮助。

基金项目

国家自然科学基金(Nos.61875126)资助。

参考文献

- [1] Bergmair, I., Dastmalchi, B., Bergmair, M., *et al.* (2011) Single and Multilayer Metamaterials Fabricated by Nanoimprint Lithography. *Nanotechnology*, **22**, Article ID: 325301. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/32/325301>
- [2] Liu, N., Guo, H., Fu, L., *et al.* (2008) H. Three-Dimensional Photonic Metamaterials at Optical Frequencies. *Nature Materials*, **7**, 31-37. <https://doi.org/10.1038/nmat2072>
- [3] Moser, H.O. and Rockstuhl, C. (2012) Laser Photon. 3D THz Metamaterials from Micro/Nanomanufacturing. *Laser & Photonics Reviews*, **6**, 219-244. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000019>
- [4] Soukoulis, C.M. and Wegener, M. (2011) Past Achievements and Future Challenges in the Development of Three-Dimensional Photonic Metamaterials. *Nature Photonics*, **5**, 523-530. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.154>
- [5] Pendry, J.B., Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., *et al.* (2006) Voilà! Cloak of Invisibility Unveiled. *Science*, **314**, 403. <https://doi.org/10.1126/science.314.5798.403>
- [6] O'Hara, J.F., Singh, R., Brener, I., Smirnova, E., *et al.* (2008) Thin-Film Sensing with Planar Terahertz Metamaterials: Sensitivity and Limitations. *Optics Express*, **16**, 1786-1795. <https://doi.org/10.1364/OE.16.001786>
- [7] Chen, T., Li, S. and Sun, H. (2012) Metamaterials Application in Sensing. *Sensors*, **12**, 2742-2765. <https://doi.org/10.3390/s120302742>
- [8] Kim, J., Son, H., Cho, D.J., *et al.* (2012) Electrical Control of Optical Plasmon Resonance with Graphene. *Nano Letters*, **12**, 5598-5602. <https://doi.org/10.1021/nl302656d>
- [9] Li, J., Shah, C.M., Withayachumnankul, W., *et al.* (2013) Flexible Terahertz Metamaterials for Dual-Axis Strain Sensing. *Optics Letters*, **38**, 2104-2106. <https://doi.org/10.1364/OL.38.002104>
- [10] Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N.K., *et al.* (2010) Metamaterial Based Telemetric Strain Sensing in Different Materials. *Optics Express*, **95**, 5000-5007. <https://doi.org/10.1364/OE.18.005000>
- [11] Ng, B., Hanham, S.M., Giannini, V., Chen, Z.C., *et al.* (2011) Lattice Resonances in Antenna Arrays for Liquid Sensing in the Terahertz Regime. *Optics Express*, **19**, 14653-14661. <https://doi.org/10.1364/OE.19.014653>
- [12] Tao, H., Chieffo, L.R., Brenckle, M.A., *et al.* (2011) Metamaterials on Paper as a Sensing Platform. *Advanced Materials*, **23**, 3197-3201. <https://doi.org/10.1002/adma.201100163>
- [13] Xu, X., Peng, B. and Li, D. (2011) Flexible Visible-Infrared Metamaterials and Their Applications in Highly Sensitive Chemical and Biological Sensing. *Nano Letters*, **11**, 3232-3238. <https://doi.org/10.1021/nl2014982>
- [14] Jiang, Z.H., Yun, S., Toor, F., Werner, D.H., *et al.* (2011) Conformal Dual-Band Near-Perfectly Absorbing Mid-Infrared Metamaterial Coating. *ACS Nano*, **5**, 4641-4647. <https://doi.org/10.1021/nn2004603>
- [15] Shchegolkov, D.Y., Azad, A.K., O'Hara, J.F., *et al.* (2010) Perfect Subwavelength Fishnetlike Metamaterial-Based Film Terahertz Absorbers. *Physical Review B*, **82**, Article ID: 205117. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.82.205117>
- [16] Watts, C.M., Liu, X. and Padilla, W.J. (2012) Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers. *Advanced Materials*, **24**, OP98-OP120. <https://doi.org/10.1002/adma.201200674>
- [17] Wen, Q.Y., Zhang, H.W., Yang, Q.H., Chen, Z., *et al.* (2009) Dual Band Terahertz Metamaterial Absorber: Design, Fabrication, and Characterization. *Applied Physics Letters*, **95**, Article ID: 241111. <https://doi.org/10.1063/1.3276072>
- [18] Saadeldin, A.S., Hameed, M.F.O., Elkaramany, E.M.A., *et al.* (2019) Highly Sensitive Terahertz Metamaterial Sensor. *IEEE Sensors Journal*, **19**, 7993-7999. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2918214>
- [19] Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., *et al.* (2008) Perfect Metamaterial Absorber. *Physical Review Letters*, **100**, Article ID: 207402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>
- [20] Wang, B.X., He, Y.H., Xu, N.X., *et al.* (2020) Design of Dual-Band Polarization Controllable Metamaterial Absorber at Terahertz Frequency. *Results in Physics*, **17**, Article ID: 103077. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103077>
- [21] 路浩. 基于超材料可调谐太赫兹宽带吸收器的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [22] 周倩, 殷小玮, 张立同, 等. 微波可调谐超材料吸波体研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 40-46.
- [23] Chen, H.T. (2012) Interference Theory of Metamaterial Perfect Absorbers. *Optics Express*, **20**, 7165-7172. <https://doi.org/10.1364/OE.20.007165>
- [24] Zhou, J., Chen, H.T., Koschny, T., *et al.* (2011) Application of Metasurface Description for Multilayered Metamaterials and an Alternative Theory for Metamaterial Perfect Absorber. arXiv: 1111.0343.
- [25] Huang, L., Chowdhury, D.R., Ramani, S., *et al.* (2012) Impact of Resonator Geometry and Its Coupling with Ground Plane on Ultrathin Metamaterial Perfect Absorbers. *Applied Physics Letters*, **101**, Article ID: 101102. <https://doi.org/10.1063/1.4749823>