

A Simple Construction of Terahertz Broadband Metamaterial Perfect Absorber

He Zhao, Xiaoliang Xu*, Chen Chen, Shuhui Wang, Kui Chen

Micron-Nano Functional Materials Laboratory, Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui

Email: *xlxu@mail.ustc.edu.cn

Received: May 6th, 2020; accepted: May 20th, 2020; published: May 27th, 2020

Abstract

A broadband perfect absorber which can work in terahertz band is studied via the finite difference time domain method. It's discovered that the proposed metamaterial absorber could achieve perfect absorption of over 99% in 1.25 THz - 1.75 THz and over 90% in 1.13 THz - 2.25 THz. The finite-difference time domain (FDTD) method was used to simulate the designed structure. And the internal absorption mechanism was analyzed by changing the size of the device, the polarization angle and incident angle of the incident electromagnetic wave. Through the analysis of geometric parameters of the structure model and the distribution of electromagnetic field inside it, we found that the coupling effect of the inner and outer rings of chromium with low conductivity causes that the incident electromagnetic energy dissipates in the metal layer because of the ohm loss. The simulation results provide an important reference for the study and application of the metamaterials perfect absorptions of metal plasma with low conductivity.

Keywords

Metamaterials, Broadband, Perfect Absorber, Finite Difference Time Domain

一种结构简单的太赫兹频段宽带完美吸收体

赵赫, 许小亮*, 陈晨, 汪淑慧, 陈奎

中国科学技术大学物理系, 纳米功能材料实验室, 安徽 合肥

Email: *xlxu@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2020年5月6日; 录用日期: 2020年5月20日; 发布日期: 2020年5月27日

摘要

采用有限时域差分法研究了一种模型结构简单且可以在太赫兹频段工作的宽带超材料完美吸收体。模拟

*通讯作者。

结果表明, 这种超材料吸收体可以在1.13 THz~2.25 THz频率范围内实现90%以上的宽带吸收, 其中在1.25 THz~1.75 THz实现99%以上的完美吸收。利用时域有限差分(finite-different time domain, FDTD)法对该设计进行模拟计算, 通过改变器件的尺寸、入射电磁波的极化角度和入射角等参数, 分析其内部吸收机理。通过模型几何参数和结构内部的电磁场分布分析, 对比高电导率的金属, 低电导率金属铬双环内外环的协同作用使得入射电磁能量主要通过欧姆损耗耗散在金属层。该仿真结果为低电导率金属等离子体超材料的完美吸收研究和应用提供了参考和依据。

关键词

超常材料, 宽带, 完美吸收体, 时域有限差分

Copyright © 2020 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

在过去的几十年中, 电磁超常材料由于其独特的物理性质获得了广泛的关注。区别于传统的光学材料, 超常材料是由周期性的“元原子”[1][2]人工构建, 其展现出自然材料所不具备的多种光学性质, 如负折射率[3]、透射[4]、反多普勒效应[5]等。随着超常材料的深入研究和微纳加工技术的提高, 更多的新奇特性相继发现[6][7], 人们提出并制造了大量不同波长范围内具有非凡电磁特性的结构和器件[8][9][10], 并挖掘了其潜在的巨大应用, 例如超分辨率成像[3]、电磁隐身[11]、电磁诱导透明[12]等。

2008年, Landy等人提出了第一个超材料吸收体构型[13]。这款材料由电环谐振器、介质板和金属线构成, 突破了传统吸波材料四分之一波长厚度的限制, 将超常材料应用到材料吸收领域, 首次提出了超材料完美吸收体的概念。之后对超材料吸收体的研究已成为目前科学研究和发展的一个新方向。由于在自然界很难找到太赫兹频段高吸收率的天然材料, 人们对于在太赫兹频段的超常材料完美吸收尤为感兴趣。典型超材料完美吸收体结构较为简单, 由金属、介质层堆叠组成金属-介质-金属[14]三层结构: 基底为平面结构金属层避免光穿透结构底层减少透射, 中层为介质层引入介质损耗, 上层是由金属微纳结构单元形成的二维周期阵列, 阵列设计为具有一个或多个的电磁响应模式, 并通过与入射区域的阻抗匹配减少反射。

目前, 多波段和宽带完美吸收体的设计取得了一定的进展。它们通常由多层金属[15][16][17]和特殊的介电层[18][19]组成, 这也导致了设计和制造上的复杂性。在本文中, 我们提出一种结构简单的基于金属-介质-金属结构的THz宽带完美吸收体: 顶层为金属铬环双环谐振体, 中间为损失介质平板, 基底反射层为连续的金属铬膜。与此前文献[19]报道的具有两个相反方向开口双同心圆环实现太赫兹波段负折射率不同, 本文我们通过调控欧姆匹配产生赝等离子激元效应[20][21], 致力于实现太赫兹波段宽带完美吸收。

2. 计算模型

图1(a), 图1(b)给出文中THz宽带完美吸收体的结构单元示意图。如图1(b), 该结构介质层材料为负折射率为 $1.68 + i0.06$ [21]的聚酰亚胺层, 金属铬双环谐振体与金属铬膜的电导率采用 $\sigma = 2.2 \times 10^5$ S/m [22]。经过优化后的理想结构参数为: 阵列x, y方向上的周期 $p = p_x = p_y = 90$ μm , 外环半径 $r_1 = 25$ μm , 内环半径 $r_2 = 16$ μm , 环的宽度均为4 μm , 介质平板厚度 $t = 25$ μm , 上下层金属厚度分别为0.8 μm 、1 μm 。

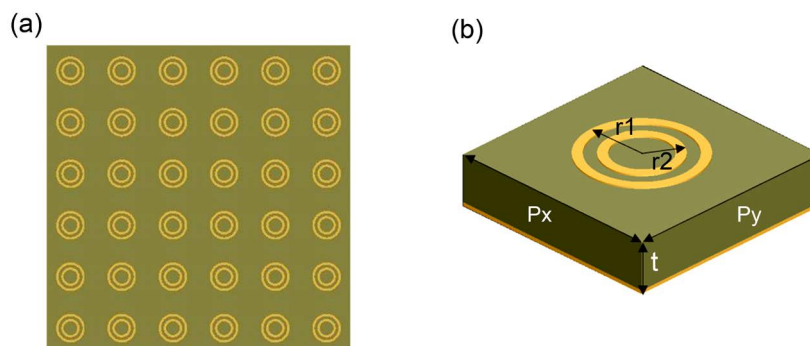


Figure 1. Simulated THz wideband perfect absorber of (a) 2D array model, and (b) Schematic
图 1. THz 宽带完美吸收体(a) 2D 阵列模型; (b) 单元结构示意图

超材料吸收体的数值模拟采用时域有限差分法进行。入射波为平面波，垂直于 x-y 平面入射，偏振平行于 x 轴。x 和 y 方向采用周期性边界条件，z 方向为完美匹配层。通过计算超材料吸收体的反射率(R)和透射率(T)来获得吸收率，吸收率(A)定义为 $A = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ 。电磁仿真软件仿真通过计算依赖于频率的 S 参量从而得到超材料的反射透射情况，其中由于底板金属铬层厚度远大于趋肤深度，透射率 $T(\omega)$ 接近于零，吸收率计算公式可以简化为 $A = 1 - R(\omega)$ 。材料表面反射系数 S_{11} 可表示为 $S_{11} = (Z_m - Z_0) / (Z_m + Z_0)$ ，当材料表面的输入阻抗等于自由空间的波阻抗时，反射率 $R(\omega) = |S_{11}|^2$ 接近于零，即可获得完美吸收体。

3. 结果与讨论

对于经典结构的超材料吸收体，当电磁波入射到该结构时，上层金属环在时谐外磁场的作用下，金属内部的电子来回振荡，形成表面等离子共振[23]，其在结构内部形成内生磁场。当上层金属的结构参数适当时，与空气层产生阻抗匹配[24]，反射几乎为零。而内生磁场与外磁场相互作用，产生很强的磁共振，将入射的电磁能局域在电介质内，能量损耗在介质层和金属层，从而实现完美吸收[25]。

图 2 给出了理想几何参数吸收体的吸收谱线，其在 1.25 THz~1.75 THz 之间吸收率达 99% 以上，在 2.16 THz 处出现另一个吸收峰，吸收率在 90% 以上的频率范围为 1.13 THz~2.25 THz，两处相邻吸收区域使得整个吸收谱形成带宽为 1.12 THz 的吸收带。模拟结果显示提出的理论模型实现了宽带完美吸收。

为了说明结构内部的吸收机制，我们通过仿真进行研究，保持其它参数不变，依次通过改变介质层和金属材料，分析各层结构对于吸收率的贡献。图 2(a)结果显示介质层在有损失和无损失时，其吸收谱线基本保持不变，仅在肩部存在少许变化，由此可知电介质损耗几乎可以忽略不计，电磁能量主要损失在金属环上。图 2(b)结果表明当金属环采用电导率较大的铜($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) [26]时，吸收性能变差，说明电磁能量主要耗散在金属环上，铬的欧姆损耗对电磁能量的吸收是主要的。根据等效媒质理论，波阻抗无法精确计算只能采取近似计算，即等效媒质的电磁特性可以用等效参数进行表述，等效电磁参数采用反演法计算。我们采用杜克大学 D. R. Smith 等人发表的 S 参数反演法[27]提取有效超材料参数。有效波阻抗函数定义为：

$$Z_{eff} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}$$

通过 S 参数反演分析我们提取的波阻抗函数如图 2(c)所示，在 1.13 THz~2.25 THz 频率范围内，波阻抗实部近似为 1 或 -1，波阻抗虚部近似为 0，该频段范围内超材料波阻抗与自由空间波阻抗匹配，导致反射为零，实现完美吸收。

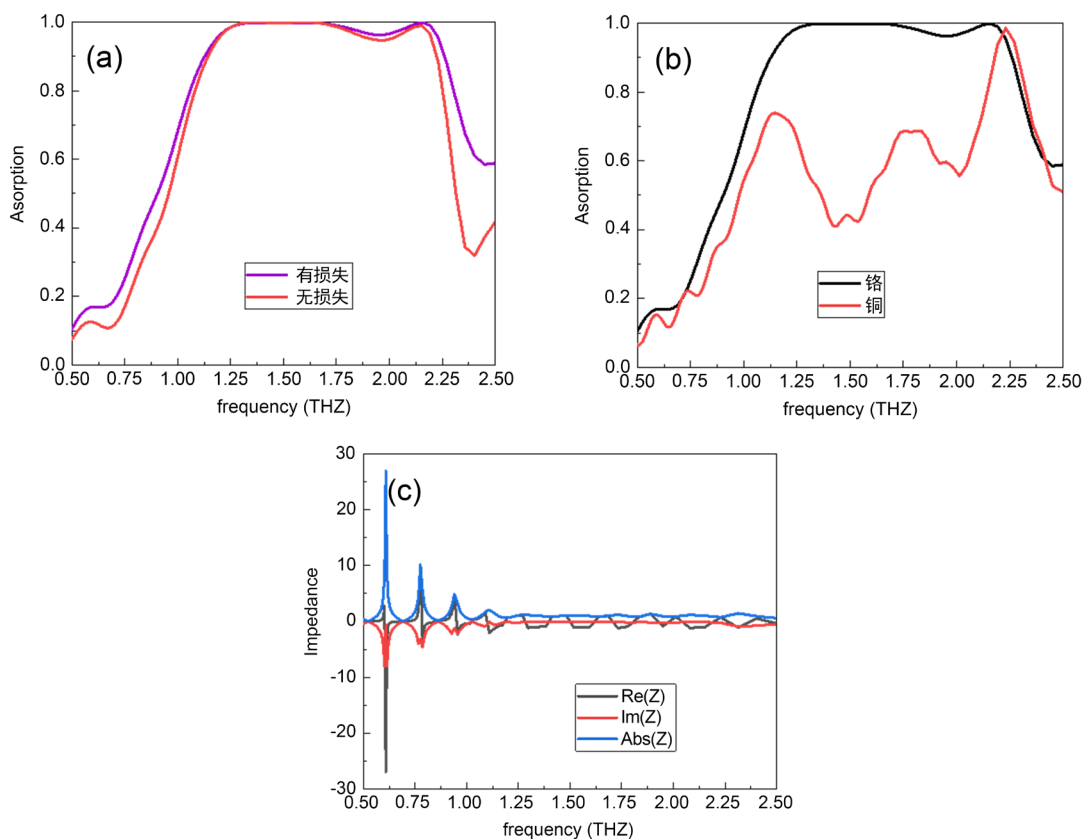


Figure 2. The absorption spectrum of the simulated THz wideband perfect absorber (a) In two different loss conditions (with loss, without loss) and (b) The absorption spectrum in two metal double rings (chromium, copper) with different conductivity, and (c) The wave impedance function

图 2. 模拟的 THz 宽带完美吸收体之(a) 在两种不同损失条件(有损失, 无损失)介质层和(b) 在两种不同电导率的金属双环(铬, 铜)的吸收谱, 以及(c) 波阻抗函数

基于电磁超材料的宽带吸收体一般同时具有共振吸收和宽带吸收的特点综合分析图 3, 如图 3(a)所示两吸收峰随着介电层厚度的增加均向低频移动。这是因为随着介电层厚度的逐渐增大, 吸收体表面产生相消干涉导致吸收峰红移[28]。图 3(b)表明高频吸收峰随着阵列周期变大向低频移动。如图 3(c), 图 3(d), 我们还可以看到低频吸收峰随着外环半径的减小向高频移动, 但当仅内环半径增加时, 两吸收峰位置基本保持不变, 低频吸收带受内环半径影响而变窄。根据两吸收峰的变化特点, 我们可以采用天线谐振模型、结构单元之间耦合效应解释低频吸收峰和高频吸收峰的机理。超材料的天线谐振模型为 $f = mc/nL_{eff} \propto 1/r$ [29], 其中 f 为谐振频率, m 为自然数, c 为真空光速, n 为折射率, L_{eff} 为金属环的有效周长。低频吸收峰反比于外环半径的变化, 在一定的内环协同下形成接近于完美吸收的低频吸收带, 这一特点正符合天线谐振。通过图 3(e)仅存在单环时的吸收谱线可以很好的证明上述分析。当结构周期变大, 阵列相邻结构之间的耦合作用变弱, 使得表面等离子激元共振向低频移动, 这一现象也存在于文献[30], 由此证实了该吸收体结构周期与吸收谱的关系。两种模型合理的解释了超材料结构参数与吸收特性之间的联系。对于微纳尺度的周期性结构来说, 其有效的电磁学性质极大的依赖于周期长度, 空间率和厚度等参数。这使得人们可以不依赖于材料自身的物理性质, 而通过改变结构的几何参数来获得想要的电磁学性质, 成为光子学和超常材料研究中最激动人心之处。如上文所述, 经过几何结构参数优化, 理想的结构参数可以获得最佳的吸收率与吸收带宽。基于以上分析, 我们可以通过调整结构的几何参数来实现对吸收峰位置和吸收带宽的调整。

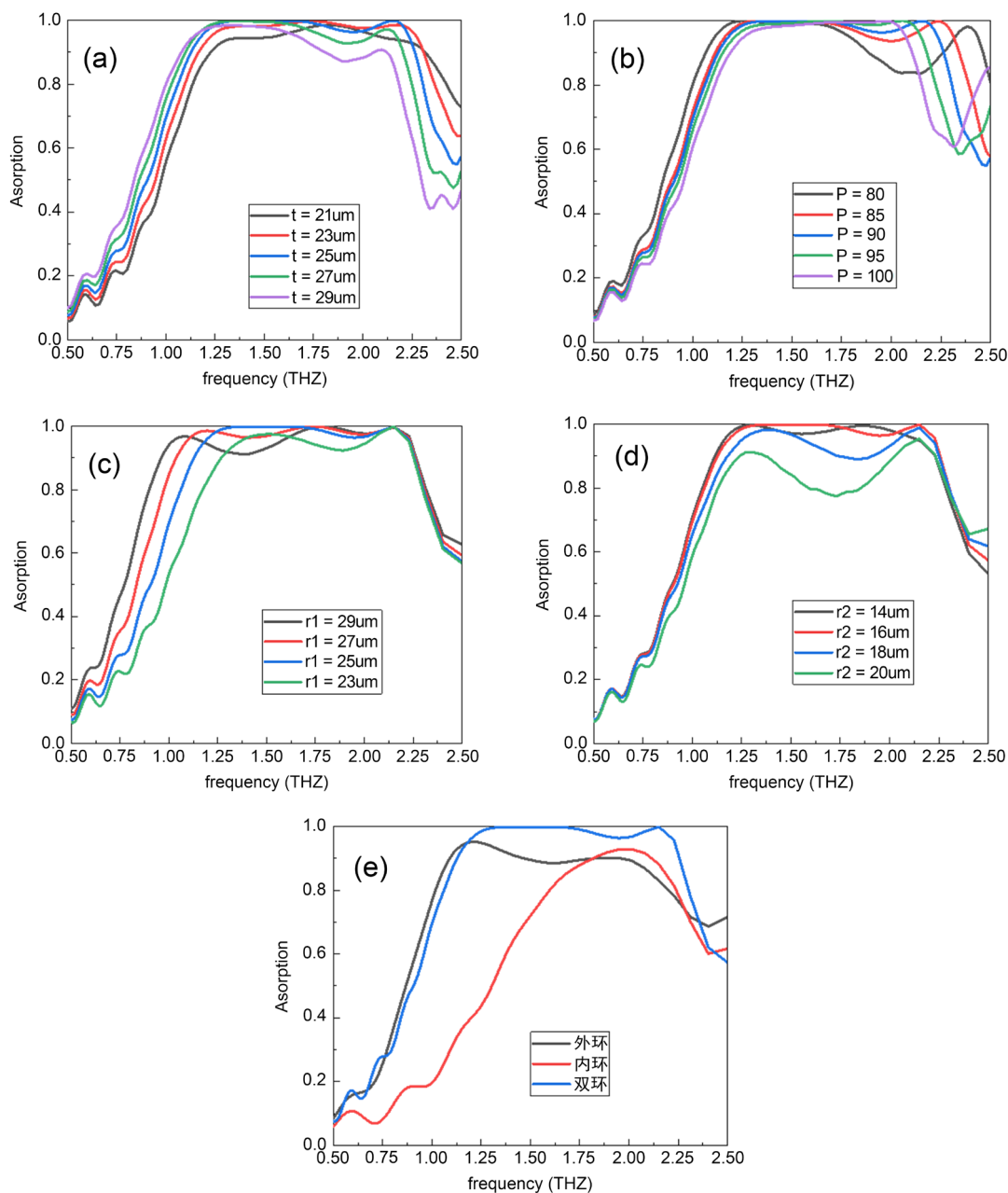


Figure 3. The simulated THz wideband perfect absorber with. (a) Different thickness of medium layer (21 μm - 29 μm); (b) Different period length (80 μm - 100 μm); (c) Different outer ring radius (23 μm - 29 μm) when the inner ring radius is 16 μm ; (d) Different inner ring radius (14 μm - 20 μm) when the outer ring radius is 25 μm ; and (e) Single ring of metal chromium ring (outer ring radius 25 μm , inner ring radius 16 μm)

图 3. 模拟的 THz 宽带完美吸收体。(a) 不同介质层厚度(21 μm ~29 μm); (b) 不同周期长度(80 μm ~100 μm); (c) 当内环半径为 16 μm 时不同外环半径(23 μm ~29 μm); (d) 当外环半径为 25 μm 时不同内环半径(14 μm ~20 μm); 以及(e) 金属铬环单环情况下(外环半径 25 μm , 内环半径 16 μm)的吸收率

为了进一步探究结构的表面等离子共振的吸收机理, 我们给出环与空气界面处的电场分布与磁场分布。图 4(a)显示, 低频吸收峰导致的增强电场主要集中于内环, 外环电场弱于内环电场。由图 4(b)可知, 在高频吸收峰处, 增强电场主要集中于内环, 且外环电场较弱。图 4(c)~(d)电场的 z 分量分布进一步显示, 低频吸收峰处, 内外环均聚集了大量电荷, 内外环相反电荷交替分布; 高频吸收峰的电荷分布主要集中在

于内环。图 4(e)~(f) x-z 剖面的电场分布也证实了电场能量主要集中于金属环中，入射电磁能大部分被金属环由欧姆产热所损耗。由局域等离子共振引起的欧姆损耗现象同样存在于文章的结论中[31]。而从图 4(g)~(h)中可知，对低频吸收峰，由于局域表面等离子共振，磁场被限制在金属环的介质层中；对高频吸收峰，磁场分布在结构单元之间的区域，因此这种共振模式为与阵列相邻结构单元耦合的表面等离子共振，这也和前文周期与高频吸收峰之间的关系相一致。

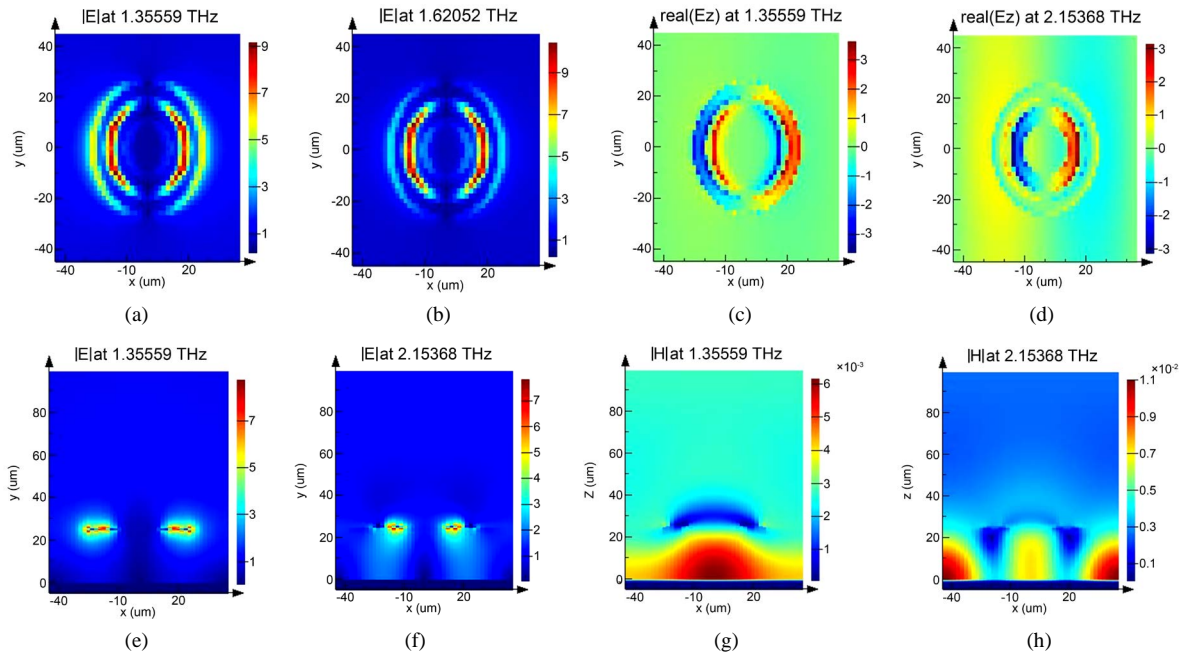


Figure 4. Simulated electric field distribution in (a)-(b) x-y plane when the low-frequency absorption peak $f_1 = 1.3559$ THz and the high-frequency absorption peak $f_2 = 2.15368$ THz of the simulated THz wideband perfect absorber; (c)-(d) The z component of the x-y plane electric field distribution; (e)-(f) Electric field distribution in the x-z plane; and (g)-(h) The distribution of the magnetic field in the x-z plane

图 4. 模拟的 THz 宽带完美吸收体在低频吸收峰 $f_1 = 1.3559$ THz 和 高频吸收峰 $f_2 = 2.15368$ THz 时(a)~(b) x-y 平面的电场分布；(c)~(d) x-y 平面电场分布的 z 分量；(e)~(f) x-z 平面的电场分布；以及(g)~(h) x-z 平面的磁场分布

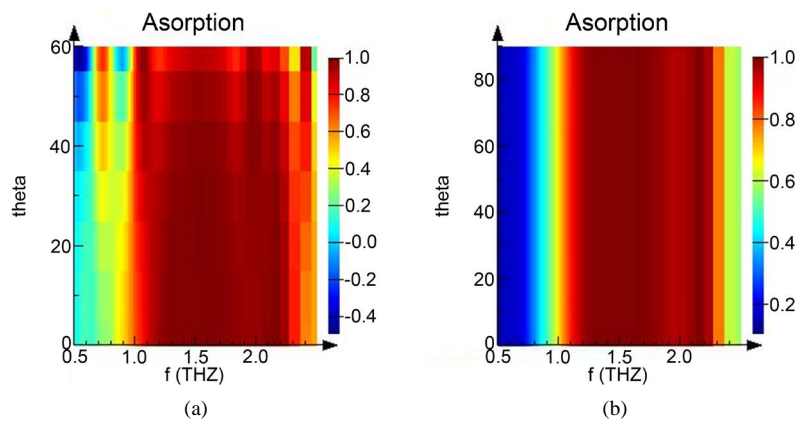


Figure 5. Simulated absorption rate of THz perfect absorber of (a) Plane wave at different incident angles ($\theta = 0^\circ - 60^\circ$), and (b) Absorptivity of plane wave at different polarization angles ($\theta = 0^\circ - 90^\circ$)

图 5. 模拟的 THz 完美吸收体(a)平面波不同入射角($\theta = 0^\circ \sim 60^\circ$)，及(b)平面波不同极化角($\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$)的吸收率

电磁波斜入射时吸收谱与入射角的关系如图 5(a)所示，当入射角大于 40° 时，吸收谱仅在高频处吸收

有所下降,导致吸收带稍有变窄。可以近似认为在 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的角度范围内入射电磁波吸收谱几乎保持不变。由此可以得出结论,我们提出的 THz 宽带完美吸收体结构可以实现大角度吸收。由于金属圆环结构的对称性对极化角度不敏感,导致吸收体吸收率与入射电磁波偏振无关,图 5(b)很好的说明了这一特征,在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 偏振角度下,吸收谱无任何变化。由于大多数情况下,入射电磁波都是斜入射的,极化角也不会保持不变,使得这两种特性对于实际的应用具有十分重要的意义。

4. 结论

本文研究了一种典型三层结构的超材料吸收体,结构简单,其可实现在太赫兹频段宽带的完美吸收。电导率较低的金属铬双环结构作为吸收体,用来吸收入射到金属表面的电磁波,经过研究铬双环协同的超材料结构能够产生宽带的增强吸收特性,并且通过设计不同的结构参数可以调整光谱吸收特性。值得一提的是,优化选择的结构参数可以在 1.25 THz~1.75 THz 波段实现 99% 以上的完美吸收,其吸收率为 90% 以上的吸收带宽达 1.12 THz,并且具有偏振不相关,广角吸收的特性。该材料结构的研究对于 THz 热成像、THz 波长选择辐射和无损检测等技术应用具有参考价值。

基金项目

国家自然科学基金 51672003, 51872279。

参考文献

- [1] Valentine, J., Zhang, S., Zentgraf, T., *et al.* (2008) Three-Dimensional Optical Metamaterial with a Negative Refractive Index. *Nature*, **455**, 376-379. <https://doi.org/10.1038/nature07247>
- [2] Segal, N., Keren-Zur, S., Hendler, N., *et al.* (2015) Controlling Light with Metamaterial-Based Nonlinear Photonic Crystals. *Nature Photonics*, **9**, 180-184. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.17>
- [3] Ebbesen, T.W., Lezec, H.J., Ghaemi, H.F., *et al.* (1998) Extraordinary Optical Transmission through Sub-Wavelength Hole Arrays. *Nature*, **391**, 1114-1117. <https://doi.org/10.1038/35570>
- [4] Fang, N., Lee, H., Sun, C., *et al.* (2005) Sub-Diffraction-Limited Optical Imaging with a Silver Superlens. *Science*, **308**, 534-537. <https://doi.org/10.1126/science.1108759>
- [5] Veselago, V.G. (1968) The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, **10**, 509-514. <https://doi.org/10.1070/PU1968v01n04ABEH003699>
- [6] Hao, J., Wang, J., Liu, X., *et al.* (2010) High Performance Optical Absorber Based on a Plasmonic Metamaterial. *Applied Physics Letters*, **96**, Article ID: 251104. <https://doi.org/10.1063/1.3442904>
- [7] Hedayati, M.K., Javaherirahim, M., Mozooni, B., *et al.* (2011) Design of a Perfect Black Absorber at Visible Frequencies Using Plasmonic Metamaterials. *Advanced Materials*, **23**, 5410-5414. <https://doi.org/10.1002/adma.201102646>
- [8] Koppens, F.H.L., Chang, D.E. and Javier, G.D.A.F. (2011) Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light-Matter Interactions. *Nano Letters*, **11**, 3370-3377. <https://doi.org/10.1021/nl201771h>
- [9] Lin, Y.M., Dimitrakopoulos, C., Jenkins, K.A., *et al.* (2010) 100-GHz Transistors from Wafer-Scale Epitaxial Graphene. *Science*, **327**, 662-662. <https://doi.org/10.1126/science.1184289>
- [10] Dai, J., Ye, F., Chen, Y., *et al.* (2013) Light Absorber Based on Nano-Spheres on a Substrate Reflector. *Optics Express*, **21**, 6697. <https://doi.org/10.1364/OE.21.006697>
- [11] Panwar, R., Puthucheri, S., Singh, D., *et al.* (2015) Design of Ferrite-Graphene Based Thin Broadband Radar Wave Absorber for Stealth Application. *IEEE Transactions on Magnetics*, **51**, Article ID: 2802804. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2454431>
- [12] Coe, J.V., Heer, J.M., Teeters-Kennedy, S., *et al.* (2008) Extraordinary Transmission of Metal Films with Arrays of Subwavelength Holes. *Annual Review of Physical Chemistry*, **59**, 179-202.
- [13] 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>
- [14] Landy, N.I., Bingham, C.M., Tyler, T., *et al.* (2009) Design, Theory, and Measurement of a Polarization-Insensitive Absorber for Terahertz Imaging. *Physical Review B*, **79**, Article ID: 125104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.125104>

- [15] Liu, S., Chen, H. and Cui, T.J. (2015) A Broadband Terahertz Absorber Using Multi-Layer Stacked Bars. *Applied Physics Letters*, **106**, Article ID: 151601. <https://doi.org/10.1063/1.4918289>
- [16] He, X.J., Yan, S.T., Ma, Q.X., *et al.* (2015) Broadband and Polarization-Insensitive Terahertz Absorber Based on Multilayer Metamaterials. *Optics Communications*, **340**, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.11.068>
- [17] Guo, Y., Yan, L., Pan, W., *et al.* (2014) Ultra-Broadband Terahertz Absorbers Based on 4×4 Cascaded Metal-Dielectric Pairs. *Plasmonics*, **9**, 951-957. <https://doi.org/10.1007/s11468-014-9701-8>
- [18] Corrigan, T.D., Park, D.H., Drew, H.D., *et al.* (2012) Broadband and Mid-Infrared Absorber Based on Dielectric-Thin Metal Film Multilayers. *Applied Optics*, **51**, 1109. <https://doi.org/10.1364/AO.51.001109>
- [19] Moser, H.O., Casse, B.D.F., Wilhelmi, O., *et al.* (2005) Terahertz Response of a Microfabricated Rod-Split-Ring-Resonator Electromagnetic Metamaterial. *Physical Review Letters*, **94**, Article ID: 063901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.94.063901>
- [20] Li, W., Guler, U., Kinsey, N., *et al.* (2014) Plasmonics: Refractory Plasmonics with Titanium Nitride: Broadband Metamaterial Absorber (Adv. Mater. 47/2014). *Advanced Materials*, **26**, 7921-7921. <https://doi.org/10.1002/adma.201470316>
- [21] Grant, J., Ma, Y., Saha, S., *et al.* (2011) Polarization Insensitive Terahertz Metamaterial Absorber. *Optics Letters*, **36**, 1524-1526. <https://doi.org/10.1364/OL.36.001524>
- [22] Zhu, J., Ma, Z., Sun, W., *et al.* (2014) Ultra-Broadband Terahertz Metamaterial Absorber. *Applied Physics Letters*, **105**, Article ID: 021102. <https://doi.org/10.1063/1.4890521>
- [23] Pendry, J.B. (2000) Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Physical Review Letters*, **85**, 3966-3969. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966>
- [24] Nikitin, A.Y., Guinea, F., Garcia-Vidal, F.J., *et al.* (2011) Surface Plasmon Enhanced Absorption and Suppressed Transmission in Periodic Arrays of Graphene Ribbons. *Physical Review B, Condensed Matter*, **85**, 1123-1132. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.081405>
- [25] Arslanagic, S., Hansen, T.V., Mortensen, N.A., *et al.* (2013) A Review of the Scattering-Parameter Extraction Method with Clarification of Ambiguity Issues in Relation to Metamaterial Homogenization. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, **55**, 91-106. <https://doi.org/10.1109/MAP.2013.6529320>
- [26] Chen, W.J., *et al.* (2019) Broadband Metamaterial Absorber with an In-Band Metasurface Function. *Optics Letters*, **44**, 1076. <https://doi.org/10.1364/OL.44.001076>
- [27] Smith, D.R., Vier, D.C., Koschny, T., *et al.* (2005) Electromagnetic Parameter Retrieval from Inhomogeneous Metamaterials. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, **71**, Article ID: 036617. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036617>
- [28] Chen, H.-T. (2012) Interference Theory of Metamaterial Perfect Absorbers. *Optics Express*, **20**, 7165-7172. <https://doi.org/10.1364/OE.20.007165>
- [29] Hagen, R., Knopik, T. and Binder, A. (2006) Resonances of Individual Metal Nanowires in the Infrared. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 253104. <https://doi.org/10.1063/1.2405873>
- [30] Le, K.Q. and Bai, J. (2015) Enhanced Absorption Efficiency of Ultrathin Metamaterial Solar Absorbers by Plasmonic Fano Resonance. *Journal of the Optical Society of America B*, **32**, 595. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.32.000595>
- [31] Song, Z.Y., Wang, K., Li, J.W., *et al.* (2018) Broadband Tunable Terahertz Absorber Based on Vanadium Dioxide Metamaterials. *Optics Express*, **26**, 7148-7154. <https://doi.org/10.1364/OE.26.007148>