

基于双复合结构层的宽带太赫兹超材料吸收体

白晋军^{1*}, 葛梅兰¹, 邢海英¹, 孙晓东¹, 赵军发¹, 常胜江²

¹天津工业大学电子与信息工程学院天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387;

²南开大学现代光学研究所, 天津 300071

摘要 提出了一种基于双复合结构层(CSLs)的宽带太赫兹超材料吸收体,其中复合结构层 I 由 4 个不同的圆环金属结构组成,复合结构层 II 由 4 个不同的方形金属结构组成。采用时域有限差分法详细研究和讨论了吸收体的吸收谱线、磁场能量分布、表面电流分布,以及偏振角度和入射角度对吸收的影响。结果表明:该吸收体能够有效抑制高阶共振峰,特别是当太赫兹波正入射时,吸收率大于 90% 的吸收带宽可达 0.722 THz,中心频率为 2.041 THz。

关键词 材料; 超材料; 太赫兹; 复合结构; 宽带吸收体; 时域有限差分法

中图分类号 TB34

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614034

Broadband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Double Composite Structure Layers

Bai Jinjun^{1*}, Ge Meilan¹, Xing Haiying¹, Sun Xiaodong¹, Zhao Junfa¹, Chang Shengjiang²

¹Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and Systems, School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

²Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract A broadband terahertz metamaterial absorber is proposed based on the double composite structure layers (CSLs). The composite structure layer I and composite structure layer II comprise four different-sized gold rings and square plates, respectively. Further, the finite difference time domain (FDTD) method is employed to theoretically investigate and discuss the effects of absorption spectrum, magnetic field distribution, surface current distribution, polarization angle, and incident angle on absorption. The results show that the high-order resonance peaks can be effectively suppressed by this absorber. Furthermore, in case of normal incidence, the absorption bandwidth corresponding to absorptivity greater than 90% is 0.722 THz, and its central frequency is approximately 2.041 THz.

Key words materials; metamaterials; terahertz; composite structure; broadband absorber; finite difference time domain

OCIS codes 160.3918; 040.2235; 310.6628

1 引 言

太赫兹波是指频率介于 0.1~10 THz 的电磁波,由于其处于微波与红外之间,具有穿透性强、分辨率高和光子能量低等特性,因此已经在光谱分析、生物成像、无损检测和无线通信等领域显示出广阔的应用前景^[1-4]。近年来,随着研究人员对太赫兹领

域的深入探索,太赫兹技术已取得了快速发展。但是,高灵敏探测器的缺失仍是阻碍太赫兹技术进一步发展的瓶颈之一,究其原因主要是自然界中缺乏有效的、适用的太赫兹强吸收天然材料^[5]。

电磁超材料的出现为太赫兹吸波材料的研究提供了一种新的方法与途径^[6]。2008 年,Tao 等^[7]设计并制备出了第一个太赫兹超材料吸收体,其周期

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2018-12-27; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(6183000183)、国家重点研发计划(2017YFA0701002)、国家自然科学基金(61671491)、天津市企业科技特派员项目(18JCTPJC60100)、天津市教委科研计划项目(2018KJ213)

* E-mail: jinjunbai@163.com

单元由顶层的方形开口谐振环、中间的聚酰亚胺介质层及底层的短金属线构成。实证结果表明,该吸收体在 1.3 THz 处的吸收率只有 70%。由于该种吸收体存在吸收率低、宽带窄的不足,因此无法满足太赫兹技术的实际应用需求。为了增加吸波带宽和提高吸收效率,研究人员相继提出了许多高性能的宽带太赫兹超材料吸收体^[8-11]。迄今为止,研究人员提出的扩展带宽的方法主要有 4 种:一是将不同尺寸的谐振结构排列组合在一个平面内,通过不同谐振频率的叠加来实现频段的扩展^[12-15];二是利用多个结构嵌套的方式形成一个新的谐振单元结构^[14,16];三是在垂直方向上将介质层和金属结构层交错堆叠,形成多层结构,实现谐振频率的叠加^[17-20];四是基于掺杂硅光栅来实现宽带吸收^[21-23]。前两种方法均受制于结构自身尺寸的限制,其周期单元中不能包含太多的亚金属结构;后两种方法虽然在横向减小了周期单元的面积,但却增大了吸收体的制备难度和厚度。

综上所述,在不降低器件性能的同时,构建出更加紧凑的吸收体已成为太赫兹吸波领域非常重要的课题。Wang 等^[24]提出了一种结构简单、宽带、偏振不敏感的吸收体,该吸收体由双复合结构层构成,复合结构层均由两组尺寸不同的方形金属板组成。该种结构结合了横向和纵向堆叠的思想,实现了大于 90% 的吸波效率以及高达 0.85 THz 的吸收带宽。然而,由于复合结构层中存在尺寸相同的方形金属结构,从而造成各结构之间会不可避免地产生共振耦合,从而会在主吸收带宽附近出现高阶共振次峰,这些高阶共振次峰会对吸收体器件的性能产生一定

影响。

为了抑制高阶共振次峰,本文提出了一种新型的双复合层结构,通过调整复合结构层中谐振结构的几何尺寸,使每层中的共振金属结构尺寸都不相同。为了获得更宽的吸收带宽,顶层复合结构由 4 个不同的圆环金属结构组成,中间复合结构由 4 个不同的方形金属结构组成。计算结果表明,所提出的太赫兹超材料吸收体的强吸收带宽为 0.722 THz。尽管其带宽比文献[22]中报道的吸收体降低了 15%,但其高阶共振峰却得到了有效抑制。

2 结构与设计

双复合结构层太赫兹超材料吸收体的周期单元结构如图 1(a)所示,其中 t 表示材料的厚度, l 表示方形金属结构的边长, r 和 R 表示圆环金属结构的内半径和外半径, E 和 k 表示入射电磁波的电场强度和波矢。从图 1(a)中可以看出,该吸收体由 6 层结构叠加而成,自上而下依次为复合结构层 I (CSL-I 层)、介质层 I、复合结构层 II (CSL-II 层)、介质层 II、金属薄膜层、基底,周期单元的俯视截面为正方形,边长 $L = 120 \mu\text{m}$ 。CSL-I 层由 4 个圆环金属结构 A、B、C、D 组成,如图 1(a)所示;CSL-II 层由 4 个方形金属结构 E、F、G、H 组成,如图 1(b)所示。A、B、C、D 和 E、F、G、H 的中心坐标依次为 $(L/4, -L/4)$ 、 $(L/4, L/4)$ 、 $(-L/4, -L/4)$ 、 $(-L/4, L/4)$ 。超材料吸收体的其他结构参数以及材料的物理参数详见表 1,其中, ρ 表示金的电导率, ϵ 表示介质材料的介电常数。

表 1 结构参数以及材料的物理参数

Table 1 Structural parameters and physical parameters of materials

Layer	Structural parameter	Material	
		Name	Physical parameter
CSL-I	$R_A = 15.96 \mu\text{m}, r_A = 10.96 \mu\text{m}$	Gold (Au)	$\rho = 4.09 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
	$R_B = 15.20 \mu\text{m}, r_B = 10.20 \mu\text{m}$		
	$R_C = 14.60 \mu\text{m}, r_C = 9.60 \mu\text{m}$		
	$R_D = 14.05 \mu\text{m}, r_D = 9.05 \mu\text{m}, t_1 = 0.2 \mu\text{m}$		
Dielectric layer (I)	$L = 120 \mu\text{m}, t_2 = 6.60 \mu\text{m}$	Polyimide	$\epsilon = 3.5 + i0.09$
CSL-II	$l_E = 36.50 \mu\text{m}, t_1 = 0.2 \mu\text{m}$	Gold (Au)	$\rho = 4.09 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$
	$l_F = 33.84 \mu\text{m}, t_1 = 0.2 \mu\text{m}$		
	$l_G = 31.80 \mu\text{m}, t_1 = 0.2 \mu\text{m}$		
	$l_H = 29.76 \mu\text{m}, t_1 = 0.2 \mu\text{m}$		
Dielectric layer (II)	$L = 120 \mu\text{m}, t_3 = 4.5 \mu\text{m}$	Polyimide	$\epsilon = 3.5 + i0.09$
Metallic board	$L = 120 \mu\text{m}, t_1 = 0.2 \mu\text{m}$	Gold (Au)	$\rho = 4.09 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

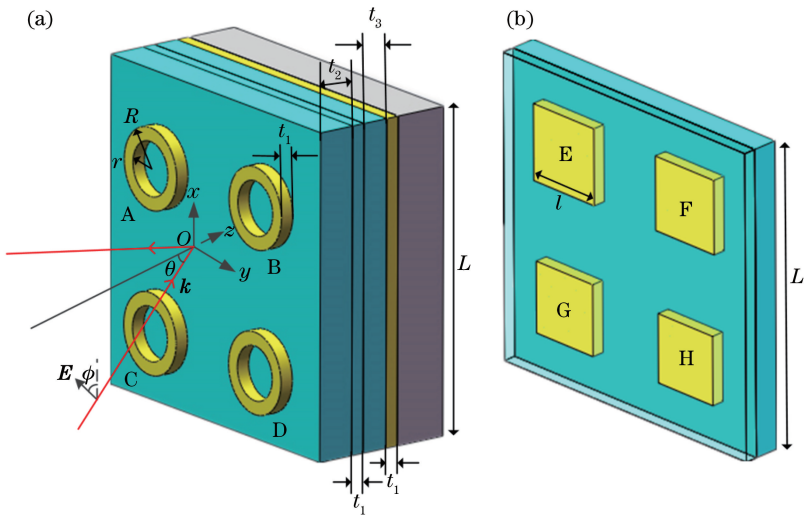


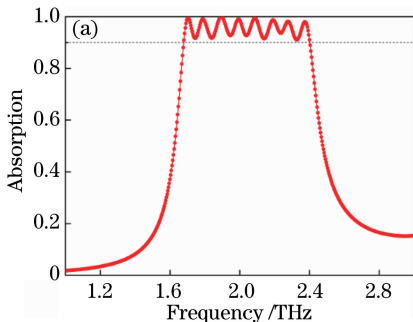
图 1 太赫兹超材料吸收体的结构示意图。(a)周期单元结构;(b)复合结构层 II

Fig. 1 Structural diagram of terahertz metamaterial absorber. (a) Periodic unit structure; (b) composite structure layer II

采用 CST 2014 对超材料吸收体进行建模仿真。为了讨论方便,建立直角坐标系 $O-xyz$, xOy 平面平行于周期单元的俯视截面,入射太赫兹波的波矢 \mathbf{k} 位于 yOz 平面内,入射角 θ 为波矢 \mathbf{k} 的方向与 z 轴之间的夹角,偏振角 ϕ 为电场强度 \mathbf{E} 的方向与 xOz 平面之间的夹角,如图 1(a)所示。建模时,周期单元的 x 轴和 y 轴方向均设定为 unit cell 边界条件, z 轴方向设定为 open add space 边界条件,端口采用 Floquet 边界条件。入射太赫兹波为线性偏振态, $\phi=90^\circ$ 时为横电(TE)偏振波, $\phi=0^\circ$ 时为横磁(TM)偏振波。吸收体的吸收率 $A=1-R'-T$,其中 R', T 分别为反射率、透射率。由于金属薄膜层的厚度大于太赫兹波在金属中的趋肤深度,故而太赫兹波不能穿透金属薄膜,因此,吸收率可简化为 $A=1-R'$ ^[24]。

3 结果与讨论

当电磁波垂直入射时($\theta=0^\circ$),太赫兹超材料吸



收体的吸收光谱如图 2 所示。从图 2(a)可以清楚地看出:TM 波的吸收光谱由 8 个谐振频率组成,峰值频率从左到右依次为 1.704, 1.788, 1.894, 1.922, 2.086, 2.192, 2.278, 2.374 THz,每个谐振频率所对应的吸收率依次为 0.9954、0.9904、0.9996、0.9902、0.9940、0.9869、0.9819、0.9802;吸收率大于 90% 的吸收光谱带宽为 0.722 THz,中心频率为 2.041 THz;在吸收带宽附近没有高阶谐振吸收次峰出现,这是相邻子单元结构尺寸不同而导致有效去耦的结果^[24]。对于 TE 波,如图 2(b)所示,吸收率大于 75% 的带宽为 0.756 THz,中心频率为 2.034 THz,而且吸收光谱内出现了许多带内波纹,吸收率明显降低,但与 TM 波相比,带宽和中心频率几乎保持不变。

为了解释宽带吸收的物理机理,图 3 给出了 TM 波在入射角 $\theta=0^\circ$ 时,吸收体在各个谐振频率处磁场强度的分布情况,图中使用 h-field 表示磁场强度。图 3(a)、(b)、(e)、(f)为 $x=30 \mu\text{m}$ 处的侧切面

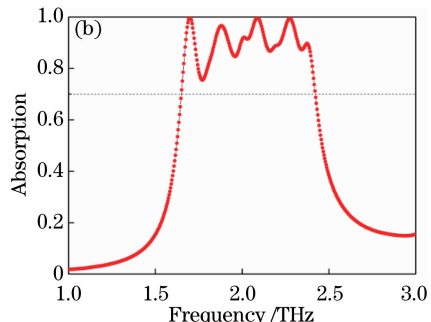


图 2 $\theta=0^\circ$ 时太赫兹超材料吸收体的吸收光谱。(a) TM;(b) TE

Fig. 2 Absorption spectra terahertz metamaterial absorber when $\theta=0^\circ$. (a) TM; (b) TE

图,图 3(c)、(d)、(g)、(h)为 $x = -30 \mu\text{m}$ 处的侧切面图。从图 3(a)可以看出,在 2.086 THz 处的磁场强度主要集中在金属薄膜层与方形金属结构 E 之间的介质层中,而介质层的其他部分只有较少的磁场能量。换言之,在 2.086 THz 频率处的谐振峰主要是由方形金属结构 E 谐振产生的。同理可知,不

同谐振频率处的吸收峰对应于不同的子谐振单元,通过优化每个子谐振单元的尺寸可以使其产生的吸收峰交叠重合,从而形成宽带吸收。由于谐振效应致使入射的电磁能量大部分被局域在介质层中,不能被反射出去,从而在各个谐振频率处实现了强吸收^[24-25]。

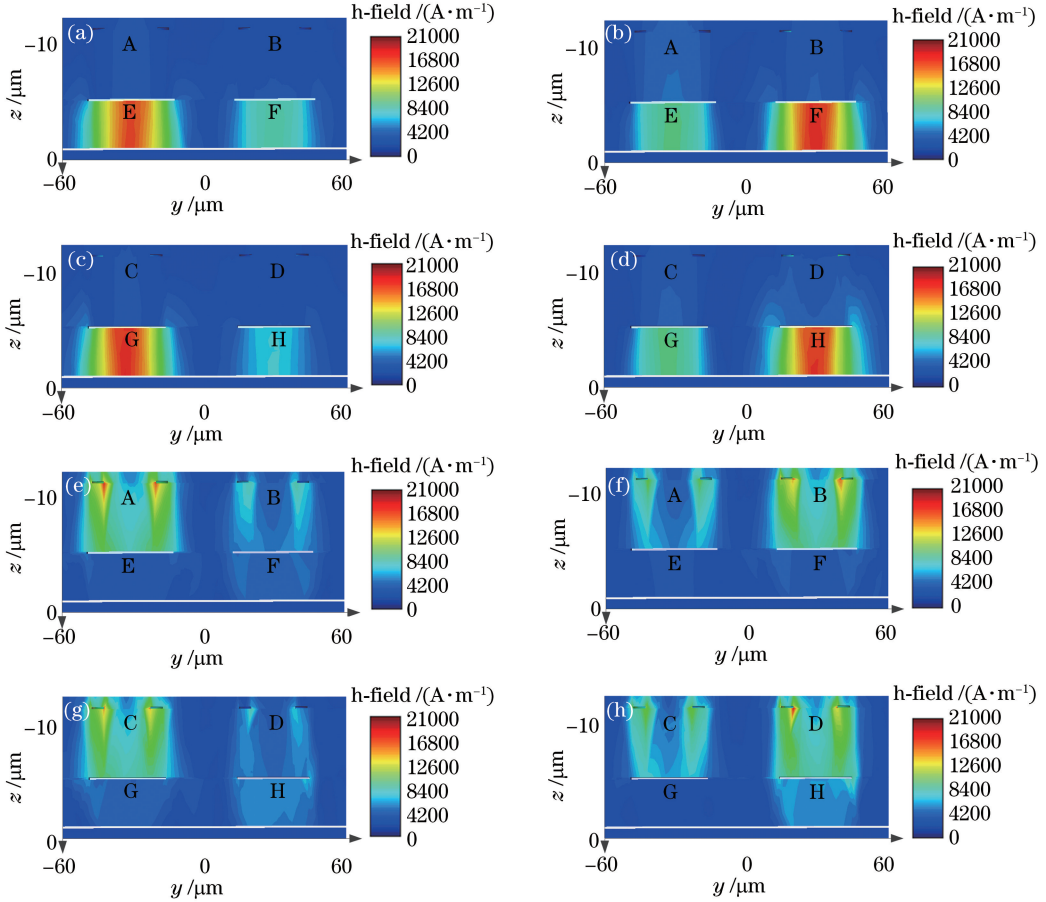


图 3 太赫兹超材料吸收体在不同谐振频率处的磁场强度分布。(a) 1.704 THz;(b) 1.788 THz;(c) 1.894 THz;(d) 1.922 THz;(e) 2.086 THz;(f) 2.192 THz;(g) 2.278 THz;(h) 2.374 THz

Fig. 3 Magnetic field intensity distributions of terahertz metamaterial absorber at different resonance frequencies. (a) 1.704 THz; (b) 1.788 THz; (c) 1.894 THz; (d) 1.922 THz; (e) 2.086 THz; (f) 2.192 THz; (g) 2.278 THz; (h) 2.374 THz

为了解释 TE 波入射时吸收谱线的变化规律,计算了 $f = 2.278 \text{ THz}$ 和 $f = 2.374 \text{ THz}$ 处表面电流密度的分布,如图 4 所示。图 4(a)、(b)、(e)、(f)对应的相位角为 0° ,图 4(c)、(d)、(g)、(h)对应的相位角为 90° 。从图中可以看出:无论是 TE 波还是 TM 波,频率 $f = 2.278 \text{ THz}$ 处的谐振均由金属圆环 C 产生;入射波为 TM 波时,频率 $f = 2.374 \text{ THz}$ 处的谐振由金属圆环 D 产生;但是对于 TE 波时,由于存在耦合作用,在 $f = 2.374 \text{ THz}$ 处金属圆环 C 和 D 都有响应,而且金属圆环 C 引起的谐振滞后于金属圆环 D 的谐振。此外,计算发现,在 1.788, 1.922, 2.192 THz 处存在同样的耦合现象。这种耦

合效应导致吸波效率降低,使得吸收谱线内出现带内波纹。

在实际应用中,偏振态与入射角度对吸收体的影响也非常重要。图 5 给出了电磁波入射角 $\theta = 0^\circ$ 时,吸收光谱随偏振角度 ϕ 的变化规律:当偏振角 ϕ 从 0° 变为 90° 时, TM 波就变成了 TE 波;随着偏振角度的增加,吸收体的吸收带宽和吸收率缓慢下降。众所周知,偏振不敏感性与吸收体周期单元结构对称性相关,当周期单元完全对称时,吸收体具有完全偏振不敏感性。对于所设计的吸收体,虽然每个复合层结构中的方形和圆环金属子单元结构均为中心对称结构,但吸收体周期单元不具有完全中心对称

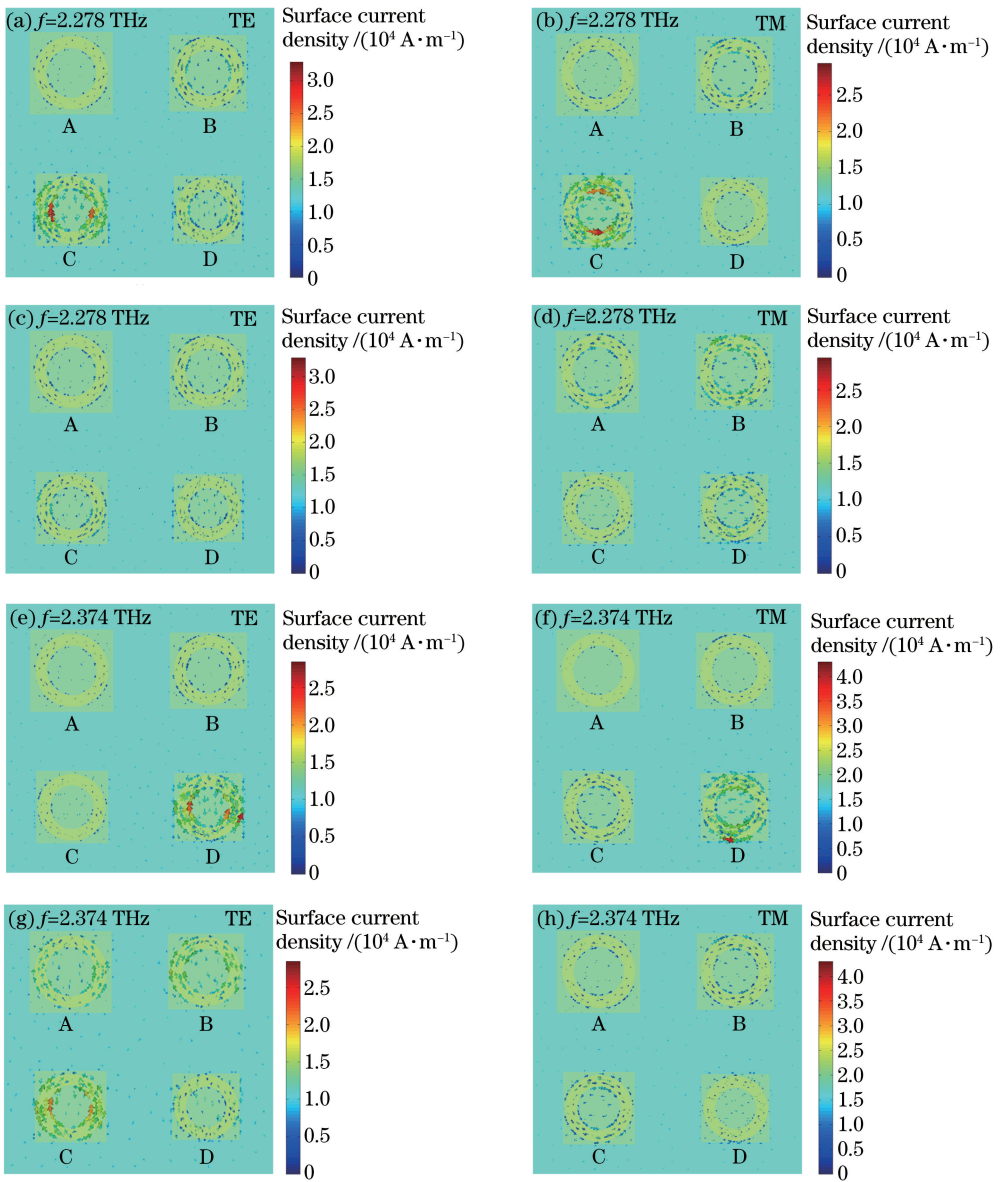


图 4 不同相位角和共振频率下,太赫兹超材料吸收体的表面电流密度分布。

(a)(b) 0° , 2.278 THz; (c)(d) 90° , 2.278 THz; (e)(f) 0° , 2.374 THz; (g)(h) 90° , 2.374 THz

Fig. 4 Surface current density distributions of terahertz metamaterial absorber under different phase angles and resonance frequencies. (a)(b) 0° , 2.278 THz; (c)(d) 90° , 2.278 THz; (e)(f) 0° , 2.374 THz; (g)(h) 90° , 2.374 THz

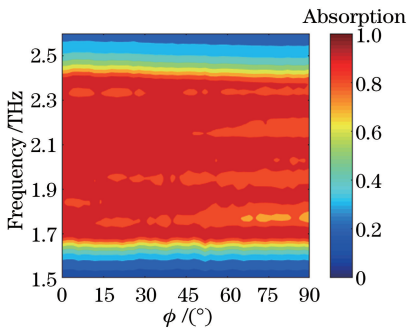


图 5 不同偏振角下计算得到的吸收光谱
Fig. 5 Calculated absorption spectra under different polarization angles

性,从而造成了吸收体偏振不敏感特性的破坏。此外,在偏振态从 TM 波转化为 TE 波的过程中,如前所述,相近谐振子单元之间会产生耦合,致使吸收体出现带内波纹,吸收率下降。

图 6 给出了 TE 波和 TM 波在不同入射角度 θ 下的吸收光谱。从图 6(a)中可以看出,随着入射角度 θ 增大,TE 波的吸收光谱中出现了比较强的带内波纹,且吸收率迅速减小。这是由于随着入射角度 θ 增大,入射波磁场的 x 分量逐渐减小,且激发的有效磁极化子减少,被吸收的磁能越来越少,从而使得电磁吸收能力下降^[26]。对于 TM 波,当入射角

θ 从 0° 增加到 20° 时,吸收体的吸收率发生很小的改变,如图 6(b)所示。但当入射角 θ 超过 20° 时,吸收

光谱中出现了带内波纹,并且带宽和吸收率随着入射角增大而逐渐降低。

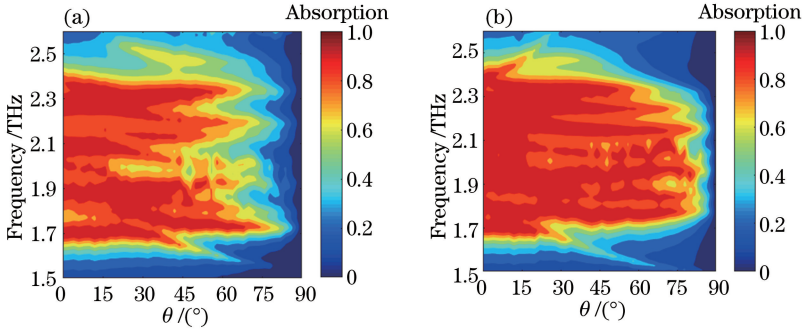


图 6 不同入射角度下计算得到的吸收光谱。(a) TE;(b) TM

Fig. 6 Calculated absorption spectra under different incident angles. (a) TE; (b) TM

4 结 论

基于谐振子单元纵横叠加的思想,提出了一种由双复合结构层构成的太赫兹超材料宽带吸收体。基于时域有限差分法对吸收体的吸波特性进行数值仿真,并给出了宽带强吸收的物理机理。研究发现,该吸收体的强吸收带宽高达 0.722 THz,更为重要的是该结构有效地消除了紧邻主吸收带宽的高阶共振峰。此吸收体结构简单、易于集成,可以通过镀膜、涂胶、光刻、刻蚀等微纳加工技术完成样品的制备。这种超材料吸收体在太赫兹探测、成像技术等领域具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

[1] El Haddad J, Bousquet B, Canioni L, *et al.* Review in terahertz spectral analysis [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2013, 44: 98-105.

[2] O'Hara J, Grischkowsky D. Quasi-optic terahertz imaging[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(23): 1918-1920.

[3] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 17039-17051.

[4] Huang K C, Wang Z C. Terahertz terabit wireless communication [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2011, 12(4): 108-116.

[5] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, *et al.* Dual band terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(24): 241111.

[6] Wang J L, Zhang B Z, Duan J P, *et al.* Flexible dual-stopband terahertz metamaterial filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1016001.

王俊林, 张斌珍, 段俊萍, 等. 柔性双阻带太赫兹超材料滤波器[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1016001.

[7] Tao H, Landy N I, Bingham C M, *et al.* A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7181-7188.

[8] Ye L F, Chen Y, Cai G X, *et al.* Broadband absorber with periodically sinusoidally-patterned graphene layer in terahertz range [J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 11223-11232.

[9] Zhang X, Li H Q, Wei Z Y, *et al.* Metamaterial for polarization-incident angle independent broadband perfect absorption in the terahertz range[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(9): 3294-3302.

[10] Guo Y H, Yan L S, Pan W, *et al.* Ultra-broadband terahertz absorbers based on 4×4 cascaded metal-dielectric pairs [J]. *Plasmonics*, 2014, 9(4): 951-957.

[11] Gao H, Yan F P, Tan S Y, *et al.* Design of ultra-thin broadband terahertz metamaterial absorber based on patterned graphene[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703024.

高红, 延凤平, 谭思宇, 等. 基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体的设计[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703024.

[12] Grant J, Ma Y, Saha S, *et al.* Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3476-3478.

[13] Wang G D, Liu M H, Hu X W, *et al.* Broadband and ultra-thin terahertz metamaterial absorber based on multi-circular patches[J]. *The European Physical Journal B*, 2013, 86(7): 304.

[14] Chen X, Fan W H. Ultra-flexible polarization-insensitive multiband terahertz metamaterial absorber [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2376-2382.

- [15] Xu Z C, Gao R M, Ding C F, *et al.* Photoexcited broadband blueshift tunable perfect terahertz metamaterial absorber[J]. *Optical Materials*, 2015, 42: 148-151.
- [16] Wen Y Z, Ma W, Bailey J, *et al.* Planar broadband and high absorption metamaterial using single nested resonator at terahertz frequencies[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1589-1592.
- [17] Amin M, Farhat M, Bağcı H. An ultra-broadband multilayered graphene absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29938-29948.
- [18] Chen Q, Sun F H, Song S C. Subcell misalignment in vertically cascaded metamaterial absorbers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15896-15903.
- [19] He S L, Chen T. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(6): 757-763.
- [20] Zhu J F, Ma Z F, Sun W J, *et al.* Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(2): 021102.
- [21] Peng Y, Zang X F, Zhu Y M, *et al.* Ultra-broadband terahertz perfect absorber by exciting multi-order diffractions in a double-layered grating structure[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2032-2039.
- [22] Pu M B, Wang M, Hu C G, *et al.* Engineering heavily doped silicon for broadband absorber in the terahertz regime[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25513-25519.
- [23] Yin S, Zhu J F, Xu W D, *et al.* High-performance terahertz wave absorbers made of silicon-based metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(7): 073903.
- [24] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, *et al.* A simple design of ultra-broadband and polarization insensitive terahertz metamaterial absorber[J]. *Applied Physics A*, 2014, 115(4): 1187-1192.
- [25] Li X W, Liu H J, Sun Q B, *et al.* Ultra-broadband and polarization-insensitive wide-angle terahertz metamaterial absorber [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2015, 15: 81-88.
- [26] Ye Y Q, Jin Y, He S L. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(3): 498-504.