

太赫兹超材料吸收器的完美吸收条件与吸收特性

崔子健^{1,2}, 王玥^{2*}, 朱冬颖^{1,2}, 岳莉莎², 陈素果²

¹哈尔滨理工大学工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

²西安理工大学理学院, 陕西 西安 710048

摘要 提出了一种复合结构三频带太赫兹超材料吸收器, 其对特定频率的入射太赫兹波呈现出完全吸收的特性。设计的超材料吸收器在入射角度达到 50° 时仍能保持良好的吸收特性。利用干涉理论分析了完美吸收发生的条件以及介质层介电常数对吸收频率的影响。进一步利用传输线理论结合干涉理论, 分析了耶路撒冷十字短边长度对吸收特性的影响, 结果表明: 随着短边长度增加, 吸收峰发生红移。实验结果与仿真、干涉理论、传输线理论中得到的结果吻合得较好, 为今后超材料吸收器的设计提供了指导。

关键词 太赫兹技术; 光谱学; 超材料; 干涉; 传输线

中图分类号 TB34

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614023

Perfect Absorption Conditions and Absorption Characteristics of Terahertz Metamaterial Absorber

Cui Zijian^{1,2}, Wang Yue^{2*}, Zhu Dongying^{1,2}, Yue Lisha², Chen Suguo²

¹Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

²School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract This study presents the design of a triple-band metamaterial absorber with a composite structure that can fully absorb the incident terahertz radiation at a certain frequency. The absorption remains high at incident angles up to 50° . The conditions for perfect absorption and the frequency shift caused by the permittivity of the dielectric spacer were analyzed via the interference theory. Further, the effect of the length of the Jerusalem cross on absorption was analyzed by applying the transmission line theory combined with the interference theory. With the increase of the short edge length, the absorption peak redshifts. The experimental results are consistent with those from the simulation, the interference theory, and the transmission line theory, thus the results here provide guidance for the design of a metamaterial absorber.

Key words terahertz technology; spectroscopy; metamaterial; interference; transmission line

OCIS codes 300.6495; 160.3918; 260.3160

1 引言

太赫兹波具有穿透性强、光子携带能量低、多数物质呈现“太赫兹透明”等优势, 具有广阔的应用前景。然而, 自然界中绝大多数物质对太赫兹波的电磁响应很微弱, 使得常规器件对太赫兹波只能产生微弱的吸收, 从而限制了太赫兹吸收器件的发展。

人工电磁超材料吸收器的发展从微波波段跨越到了可见光波段, 这种吸收器具有完美吸收、超薄厚度、吸收频率设计方便灵活等优势, 为调制太赫兹波以及实现相关太赫兹功能器件提供了一种思路, 在电磁隐身^[1]、生物检测^[2]、传感^[3]等领域具有巨大的应用价值。通常, 超材料吸收器结构由顶层金属图样、底部金属全反射层以及中间介质层组成^[4-5]。顶层

收稿日期: 2019-01-31; 修回日期: 2019-03-02; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(11704310)、黑龙江省博士后科研启动基金(LBH-Q16119)、陕西省教育厅自然科学基金专项(17JK0541)

* E-mail: wangyue2017@xaut.edu.cn

的金属图样为一层经过结构化设计和尺寸优化的金属超表面,底部金属全反射层的厚度超过了太赫兹波的趋肤深度,可以起到完全阻隔透射的作用。对于设计的吸收器,超表面单元图样的亚波长几何尺寸与下方附着的介质层具有关键作用。

早期的超材料吸收器具有极化角度敏感、单频带吸收等特点^[6]。然而,在光谱检测和相位成像领域,这些性质限制了超材料吸收器的应用^[7]。随着超材料研究的不断深入,各种基于超材料的太赫兹功能器件被陆续提出^[8-12],超材料吸收器存在的这些问题也逐步得以解决。吸收器单元结构的对称性设计可以赋予超材料吸收器极化角度不敏感的特性^[13]。通过在超材料吸收器单元中组合不同结构单元的方式,可以实现多频吸收器^[14]。在宽频吸收器的设计中,研究人员多采用多层堆砌的方式来增加材料的吸收峰数量,而不同频率位置的吸收峰会相互耦合,进而导致最终的宽频吸收特性^[15]。为解释超材料吸收器完美吸收的奇特性质,进而更好地将超材料吸收器与实际应用结合起来,深入理解超材料吸收器的吸收机制显得格外重要。研究人员先后采用阻抗匹配理论^[16]、干涉理论^[17]阐述了超材料吸收器的物理机制。然而,目前还鲜见利用传输线理论结合干涉理论对超材料吸收器的吸收特性进行分析的报道。

为进一步解释超材料吸收器完美吸收的物理机制,本文提出了一种基于矩形框、圆环和耶路撒冷十字结构的太赫兹超材料完美吸收器,该吸收器在0.53,0.94,1.59 THz处共有3个共振峰,吸收率超过96%。由于超表面结构单元采用了C4对称结构,故而设计的吸收器对入射的太赫兹波极化方向不敏感,且在斜入射角度为50°时仍保持着良好的吸收特性,具有较高的入射角容忍能力。利用干涉理论分析了完美吸收条件以及介质层介电常数实部对吸收特性的影响。同时,利用传输线理论结合干涉理论研究了超表面结构中耶路撒冷十字结构几何参数对吸收特性的影响。文中采用的设计与分析方法可为今后设计太赫兹超材料吸收器提供一定参考。

2 设计与加工

设计的超材料吸收器的单元结构采用了顶层超表面设计图样、中间柔性介质层、底部金属全反射层的三明治结构。图1(a)是超材料吸收器样品的光学显微照片,如图所示,金属矩形框、圆环和耶路撒

冷十字在同一平面内共心排布,构成了超表面设计图样单元。其中矩形框的长度为88 μm,圆环的内径为35 μm,耶路撒冷十字的短边长度为12 μm,长边为40 μm,图样的线宽均为4 μm。超材料吸收器的晶格常数为95 μm,介质层为8 μm厚的纯净聚酰亚胺,其介电常数为3.3+0.009i。上下两层金属的厚度相同,均为200 nm(超过了太赫兹波的趋肤深度)。超材料吸收器单元向四周重复构成阵列。当太赫兹波以一定角度入射到超材料吸收器表面时,超材料吸收器可在特定的频率下展示出完美吸收的特性。与参考文献[7]中的结构相比,本课题组设计的吸收器包含圆环和耶路撒冷十字结构,虽然二者采用相同的方式实现多带吸收特性,但由于中心区域的耶路撒冷十字结构可以通过改变短边长度来调整吸收器的吸收特性,从而在设计吸收频率时更具灵活性。

设计的吸收器通过如下工艺步骤加工获得:首先,在硅片上溅射沉积一层30 nm厚的钛层作为黏附层以及一层200 nm厚的金;然后,通过旋涂的方法均匀涂布一层8 μm厚的聚酰亚胺,之后在氮气氛围中固化;最后,采用标准光刻和离子束刻蚀技术对表层金属进行图样化处理。在表层金属中,除了200 nm厚的金层外,还有一层30 nm厚的铬金属,该层铬金属为金与聚酰亚胺之间的黏附层。加工的样品尺寸为12 mm×12 mm,样品照片如图1(b)所示。使用基于时域有限差分法的仿真软件CST Microwave Studio对单元结构进行数值仿真。图1(c)中给出了仿真和实验中获得的吸收光谱,可见,二者具有良好的一致性,在0~2 THz范围内有3个吸收峰出现。图1(d)展示了不同入射角度下吸收器的吸收情况,随着入射角度逐步增大到50°,超材料吸收器在工作频率下仍能保持良好的吸收特性。

3 分析与讨论

图2(a)是超材料吸收器的工作示意图,太赫兹波以一定角度入射到超材料吸收器表面。根据干涉理论,超材料吸收器被视为一层匀质薄膜,如图2(b)所示,当入射的太赫兹波以入射角 θ 照射在超材料阵列表面时,部分太赫兹波透射进入介质层,部分太赫兹波反射回空气中。将反射回空气中的部分电磁波称为直接反射。进入介质层的部分太赫兹波在介质层中发生多次反射,并在每次返回超表面-介质界面时,向空气中折射部分电磁波。将从介质中

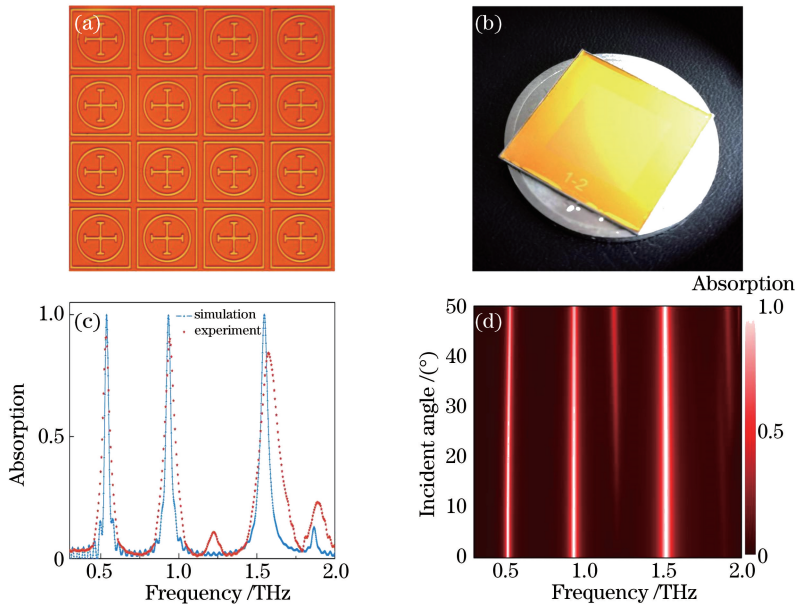


图 1 超材料吸收器的照片以及仿真、实验结果。(a)超材料吸收器的光学显微照片；(b)超材料吸收器样品；(c)仿真和实验得到的吸收光谱；(d)吸收特性随入射角度的变化

Fig. 1 Photos of metamaterial absorber as well as simulated and experimental results. (a) Optical micrograph of metamaterial absorber; (b) metamaterial absorber sample; (c) simulated and experimental absorption spectra; (d) absorption characteristic versus incident angle

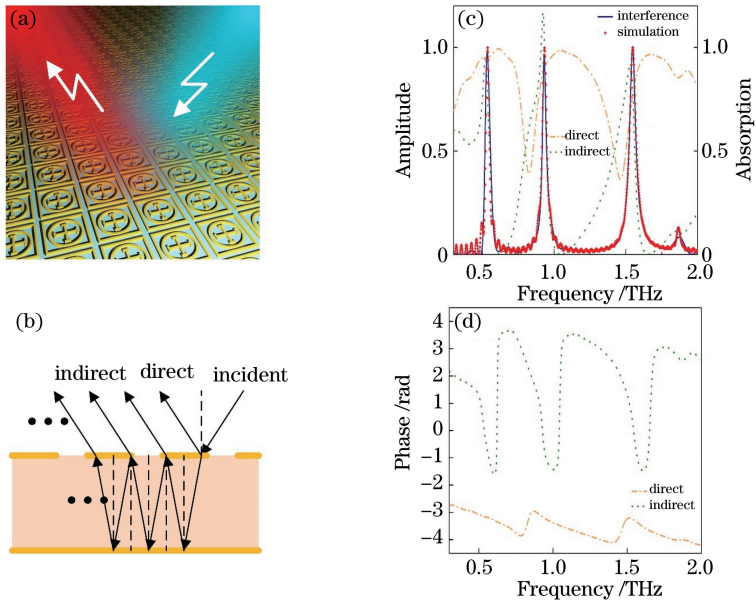


图 2 干涉理论结果和示意图。(a)超材料吸收器工作示意图；(b)干涉理论原理；(c)根据干涉理论计算得到的吸收光谱及仿真得到的吸收谱线，以及直接反射幅度和间接反射幅值；(d)直接反射相位和间接反射相位

Fig. 2 Results of interference theory and schematic. (a) Schematic of metamaterial absorber; (b) schematic of interference theory; (c) absorption spectrum calculated according to interference theory, simulated spectral line, and amplitudes of direct reflection and indirect reflection; (d) phases of direct reflection and indirect reflection

透射回空气中的电磁波称为间接反射。从超表面-介质界面向空气方向的间接反射电磁波和直接反射电磁波构成了多重反射电磁波，并在空间叠加，多重反射满足公式^[17]

$$\tilde{r} = \tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12} \tilde{t}_{21} \exp(i\sigma)}{1 + \tilde{r}_{21} \exp(i\sigma)}, \quad (1)$$

式中： \tilde{r} 为返回空间的电磁波的和； \tilde{r}_{12} 为入射电磁波反射回空气的复反射系数； \tilde{t}_{12} 为入射电磁波透射

入介质层的复透射系数; \tilde{r}_{21} 和 \tilde{t}_{21} 为电磁波再次返回超表面界面时的复反射系数和复透射系数; σ 为多重反射波之间的相位延迟, $\sigma = 4\pi nd/\lambda_0$, 其中 λ_0 为自由空间内的波长, d 为聚酰亚胺介质层的厚度, n 为介质层的折射率。超材料吸收器的吸收系数 A 可由公式 $A = 1 - R^2 - T^2$ 得到, 由于底部覆盖了金属全反射层, 所以 $T = 0$, 即 $A = 1 - R^2$ 。完美吸收需要满足幅值条件和相位条件: 直接反射与间接反射幅值相等, 且相位差为 π 的奇数倍。

图 2(c) 中的实线和星号分别是根据干涉理论计算的吸收光谱和仿真中得到的吸收谱线, 二者具有很好的一致性。图 2(c) 中的点划线和点线是直接反射部分与间接反射部分的幅值, 在吸收频点附近直接反射幅值与间接反射幅值相等。图 2(d) 是直接反射部分与间接反射部分的相位关系, 在吸收频点附近直接反射相位与间接反射相位的差值为 π 。这与干涉理论提出的完美吸收条件一致。从

图 2 可以看出, 幅值相等并不能产生完美的吸收现象, 必须在直接反射相位和间接反射相位差值为 π 时才能发生完美吸收。由此可见, 相位条件在破坏性干涉现象的产生中发挥着更为重要的作用。

如前文所述, 介质层特性将影响吸收器的吸收特性。图 3 中垂直的虚线为当介电常数虚部保持不变的情况下, 介质层介电常数实部 ϵ_r 分别为 2.5、3.3、4.1 时, 吸收器高频吸收峰的峰值位置。从图 3 中可以看出, 随着介质层介电常数实部增大, 吸收峰发生红移。图 3(a) 是介质层采用不同介电常数实部情况下直接反射与间接反射幅度之差, 沿图 3(a) 中的水平虚线观察可以发现, 完美吸收发生在幅值差为 0 的频率附近。图 3(b) 是介质层采用不同介电常数实部情况下直接反射与间接反射相位之差, 完美吸收发生在相位差为 π 的频率附近。只有幅值差几乎为零, 且相位相差为 π 的情况下, 超材料吸收器才可以发生破坏性干涉, 实现完美吸收。

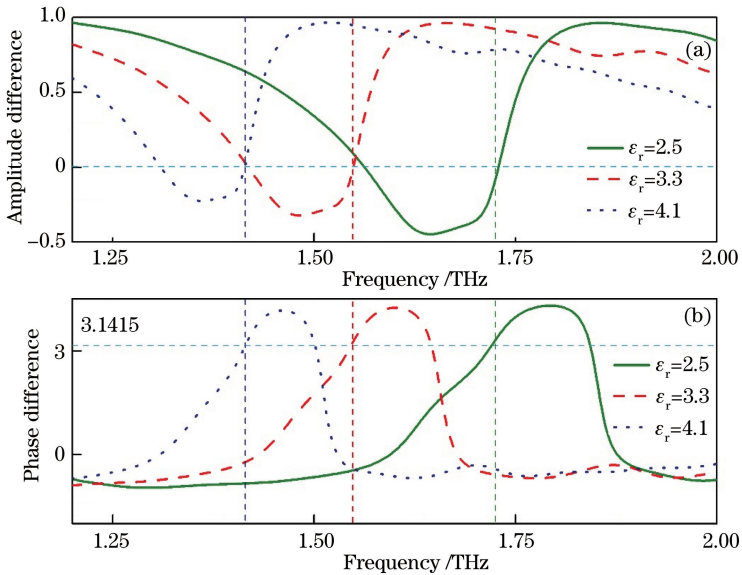


图 3 介电常数实部对吸收特性的影响。(a)对直接反射与间接反射幅值差的影响;(b)对直接反射与间接反射相位差的影响
Fig. 3 Influences of real part of permittivity on absorption characteristics. (a) Influence of real part of permittivity on amplitude difference between direct reflection and indirect reflection; (b) influence of real part of permittivity on phase difference between direct reflection and indirect reflection

对于这种具有单层超表面结构的吸收器, 利用传输线理论进行分析可将超材料吸收器等效成一个二端口 RLC 电路, 入射的太赫兹波等效为电路的激励源, 如图 4 所示。超材料吸收器的每一个吸收模式对应不同的电路参数, 从而导致了吸收特性的变化。每个共振模式的集总阻抗可以表示为^[18-19]

$$Z = R + \frac{\epsilon_i/2}{\omega C \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^2} + i\omega L + \frac{1}{i\omega C \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)}, \quad (2)$$

式中: 等式右侧的第 1 项和第 2 项分别为欧姆损耗和介电损耗, 第 3 项和第 4 项为超表面阻抗; ϵ_r 和 ϵ_i 分别为介质层介电常数的实部和虚部; ω 为角频率; R 为等效电阻; C 为等效电容; L 为等效电感。忽略不同吸收模式之间微弱的耦合, 计算耶路撒冷十字结构对超材料吸收器吸收特性的作用, 结果如图 4 中曲线所示, 其中星号标记的是根据干涉理论计算得到的吸收谱线, 曲线是根据传输线理论计算得到的吸收谱线。可见, 二者的一致性较好, 但稍有偏

差。两种不同方法计算得到的谱线之间的差异是由传输线电路参数不精确导致的。

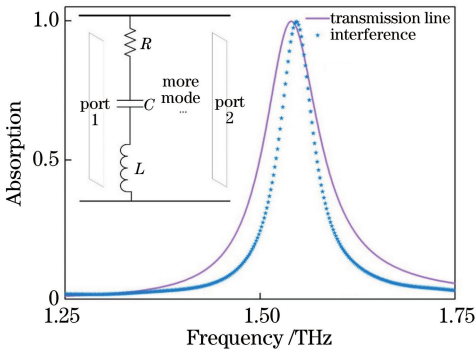


图 4 根据干涉理论和传输线理论计算得到的耶路撒冷十字的吸收谱线(插图为传输线理论示意图)

Fig. 4 Absorption of Jerusalem cross obtained by interference theory and transmission line theory (inset: schematic of transmission line theory)

图 5(a)是根据传输线理论计算得到的吸收光谱,可见,随着短边长度 l 增加,吸收频率向低频方

向移动。图 5(b)是根据传输线理论计算得到的直接反射幅值和间接反射幅值,可以看出,直接反射和间接反射幅差的最小值频点逐渐向低频方向移动。

直接反射与间接反射的幅差是干涉发生的重要因素,但从前述的干涉理论分析中可以知道,直接反射与间接反射幅值相同并不足以引起超材料吸收器发生完美的吸收现象。发生干涉的另一个重要因素是直接反射与间接反射之间的相位差。如图 5(c)所示,间接反射相位几乎保持平稳,与直接反射相位相差为 π 的频率位置随着短边长度增加而逐渐向低频移动,这与直接反射、间接反射幅值相同频点的变化趋势一致。幅值和相位的差异随着短边长度的增加而向低频移动,导致吸收峰位置发生红移。这也说明了顶层超表面的单元设计结构对吸收特性起着重要作用。短边长度的增加直接影响的是等效 RLC 电路中的电路参数。随着短边长度增加,等效电阻和等效电感增大,在金属短边将有更多的电荷发生聚集,从而增大了等效电容。

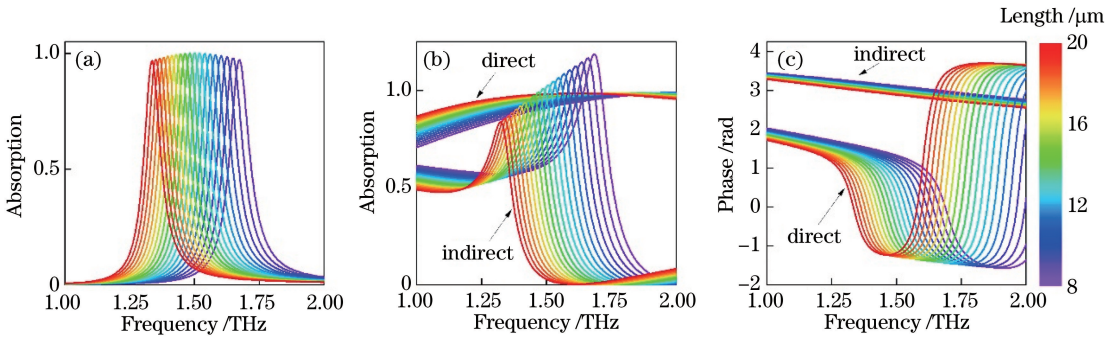


图 5 根据传输线理论计算得到的不同短边长度下的吸收特性。(a)不同短边长度下的吸收谱线;

(b)不同短边长度下的直接反射幅值和间接反射幅值;(c)不同短边长度下的直接反射相位和间接反射相位

Fig. 5 Absorption characteristics obtained by transmission line theory at different lengths of short-side. (a) Absorption lines at different lengths of short-side; (b) amplitudes of direct reflection and indirect reflection at different lengths of short-side; (c) phases of direct reflection and indirect reflection at different lengths of short-side

4 结 论

本研究提出了一种工作在太赫兹波段的超材料吸收器,该吸收器具有 3 个吸收频带,且具有极化不敏感、入射角容忍程度大等优点,实验结果与仿真结果吻合良好。利用干涉理论分析了完美吸收的发生条件,并计算了吸收谱线,其与仿真结果一致。讨论了介质层介电常数实部对吸收的影响,当介质层介电常数的虚部不变时,随着介质层介电常数实部增大,吸收峰位置红移。利用传输线理论分析了超表面图样几何结构对吸收的影响,计算了不同短边长度下的吸收谱线,以及直接反射和间接反射的幅值、

相位,它们均与干涉模型的计算结果具有良好的一致性。实验结果与仿真结果、干涉模型计算结果、传输线模型计算结果吻合得较好,从不同角度反映出超材料吸收器的吸收特性以及完美吸收发生的物理机制,为今后超材料吸收器的设计提供了思路。

参 考 文 献

[1] Savo S, Shrekenhamer D, Padilla W J. Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(3): 275-279.

[2] Nouri-Novin S, Sadatgol M, Zarrabi F B, *et al.* A hollow rectangular plasmonic absorber for nano

- biosensing applications [J]. *Optik*, 2019, 176: 14-23.
- [3] Hu X, Xu G Q, Wen L, *et al.* Metamaterial absorber integrated microfluidic terahertz sensors[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 962-969.
- [4] Meng T H, Hu D, Zhu Q F. Design of a five-band terahertz perfect metamaterial absorber using two resonators[J]. *Optics Communications*, 2018, 415: 151-155.
- [5] Wang G Z, Wang B X. Five-band terahertz metamaterial absorber based on a four-gap comb resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5151-5156.
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [7] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, *et al.* Triple-band terahertz metamaterial absorber: design, experiment, and physical interpretation[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(15): 154102.
- [8] Meng H Y, Wang L L, Zhai X, *et al.* A simple design of a multi-band terahertz metamaterial absorber based on periodic square metallic layer with T-shaped gap[J]. *Plasmonics*, 2018, 13(1): 269-274.
- [9] Zi J C, Xu Q, Wang Q, *et al.* Antireflection-assisted all-dielectric terahertz metamaterial polarization converter[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(10): 101104.
- [10] Liu S J, Zang X F, Zhu Y M. Dual-band terahertz linear-to-circular polarization converter based on single-layer metasurface [J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(3): 16-20.
刘素吉, 臧小飞, 朱亦鸣. 基于单层超表面的双频太赫兹波段线偏振变圆偏振转换器[J]. *光学仪器*, 2017, 39(3): 16-20.
- [11] Liu J Y, Li Z C, Liu W W, *et al.* High-efficiency mutual dual-band asymmetric transmission of circularly polarized waves with few-layer anisotropic metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(12): 2028-2034.
- [12] Sun H H, Yan F P, Tan S Y, *et al.* Simulation analysis on design of permeability-near-zero terahertz metamaterials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(6): 0614001.
孙慧慧, 延凤平, 谭思宇, 等. 磁导率近零太赫兹超材料设计的仿真分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(6): 0614001.
- [13] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, *et al.* Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(12): 125104.
- [14] Pan W, Yu X, Zhang J, *et al.* Absorption characteristics analysis of a terahertz metamaterial absorber based on double split square patches [J]. *Applied Laser*, 2016, 36(3): 346-350.
潘武, 余璇, 张俊, 等. 基于双开口方形薄片的太赫兹超材料吸收器吸收特性分析[J]. *应用激光*, 2016, 36(3): 346-350.
- [15] Mo M M, Wen Q Y, Chen Z, *et al.* A polarization-independent and ultra-broadband terahertz metamaterial absorber studied based on circular-truncated cone structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(23): 237801.
莫漫漫, 文岐业, 陈智, 等. 基于圆台结构的超宽带极化不敏感太赫兹吸收器[J]. *物理学报*, 2013, 62(23): 237801.
- [16] Ma Y B, Zhang H W, Li Y X, *et al.* Study on a novel dual-band metamaterial absorber by using fractal Koch curves [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(11): 118102.
马岩冰, 张怀武, 李元勋, 等. 基于科赫分形的新型超材料双频吸收器[J]. *物理学报*, 2014, 63(11): 118102.
- [17] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7165-7172.
- [18] Wen Q Y, Xie Y S, Zhang H W, *et al.* Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20256-20265.
- [19] Costa F, Genovesi S, Monorchio A, *et al.* A circuit-based model for the interpretation of perfect metamaterial absorbers [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(3): 1201-1209.