

基于超材料的新型宽带微波吸波器设计

郝宏刚, 丁天玉*, 罗伟, 周小川

重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065

摘要 设计了一种基于超材料的微波频段宽带吸波器。吸波器采用典型的三层结构,顶层和底层为金属层,中间层为介质层。顶层是在单个单元上利用多个吸收峰叠加原理设计的由圆形开口环和方形开口环组合而成的金属结构。仿真结果表明,该吸波器在 10.65~22.39 GHz 频率范围内的吸收率大于 90%,半峰全宽为 13.07 GHz,相对半峰全宽为 83.7%;吸波器整体厚度仅为中心波长的 1/10。

关键词 材料;电磁超材料;吸波器;宽带;微波

中图分类号 O441.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061604

Design of Novel Broadband Microwave Absorber Based on Metamaterials

Hao Honggang, Ding Tianyu, Luo Wei, Zhou Xiaochuan

School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract A novel broadband absorber in microwave frequency band based on metamaterials is designed, which is a typical three-layer structure with top and bottom layers of metal and the middle layer of dielectric. The top layer is a metal structure which is designed on a single cell by using the principle of multiple-absorption-peak superposition and composed of a circular open ring and a square open ring. The simulation results show that the absorptivity of the proposed absorber is over 90% in the frequency range of 10.65-22.39 GHz, the full width at half maximum (FWHM) is 13.07 GHz, and the relative FWHM is 83.7%. The overall thickness of this proposed absorber is only about 1/10 of the center wavelength.

Key words materials; electromagnetic metamaterials; absorber; broadband; microwave

OCIS codes 160.3900; 350.3618; 310.3915; 090.2910

1 引言

电磁超材料是一种人工复合材料,具有负折射、反向传播、逆多普勒效应等超常物理特性^[1-3]。传统的吸波材料大多是基于 Salisbury 吸收屏原理设计的^[4],其主要缺点是体积过大。随着通信、隐身等领域对吸波结构性能的要求越来越高,传统吸波结构已不能满足民用、军事应用的需求。2008年,Landy等^[5]首次提出了一种由开口谐振环、介质层以及金属短线组成的完美超材料吸波器结构,为设计新型吸波材料提供了一种新的技术手段^[6-8]。基于超材料的吸波器具有吸收强、质量轻、厚度薄、成本低且便于设计的优点,但受共振特性的影响,超材料的吸

收频带相对较窄,阻碍了它在微波器件、测辐射热仪等方面的应用^[9-11]。

目前,拓宽吸收频带的方法主要有加载集总元件^[12]、多层堆叠结构^[13]、多单元结构^[14]三种方法。前两种方法会增加吸波器的总体厚度,且制备工艺复杂,不便于大量生产;第三种方法利用多个吸收峰叠加原理拓宽了吸收频带,但会增大吸波器的单元尺寸。本文基于超材料的等效介质理论和理想阻抗匹配理论,利用多个吸收峰叠加原理,在单个单元上设计了一种由圆形开口环和方形开口环组成的顶层金属结构。该吸波器具有简单的单层吸波结构,实现了宽频带强吸收,同时缩小了单元尺寸。

收稿日期: 2017-11-28; 收到修改稿日期: 2017-12-22

作者简介: 郝宏刚(1977—),男,博士,教授,主要从事光电检测技术、LED 通信技术、电磁理论及应用等方面的研究。

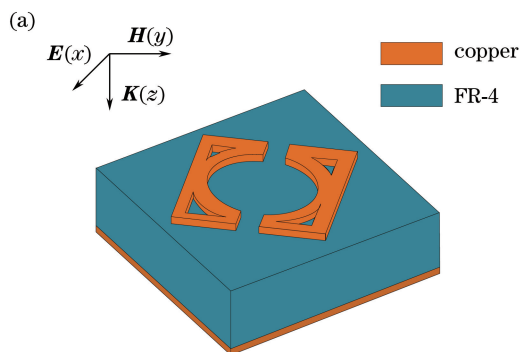
E-mail: haohg@cqupt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: dty2005@126.com

2 宽带吸波器的设计与分析

2.1 宽带吸波器的设计

设计的超材料吸波器采用典型的三层结构：顶层为金属结构，产生电磁共振；底层为金属地面，防止电磁波的透射；中间为介质层，消耗入射的电磁波。选用电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m 的铜作为顶层和底层的金属，介质层选用 FR-4 材料（环氧树脂板），其相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ ，损耗角正切



值为 0.02。顶部金属结构由方形开口环和圆形开口环组成。

单元结构如图 1 所示，单元结构的长度 $p = 8$ mm，中介质层的厚度 $t = 2$ mm，顶层和底层金属的厚度 $h = 0.035$ mm，方形开口环长 $L = 4.53$ mm，宽 $W = 0.5$ mm，圆形开口环的外半径 $R_1 = 2.1$ mm，内半径 $R_2 = 1.7$ mm，开口宽度 $g = 0.89$ mm。此外，电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{H} 平行于入射平面，而波矢量 \mathbf{K} 垂直于结构平面。

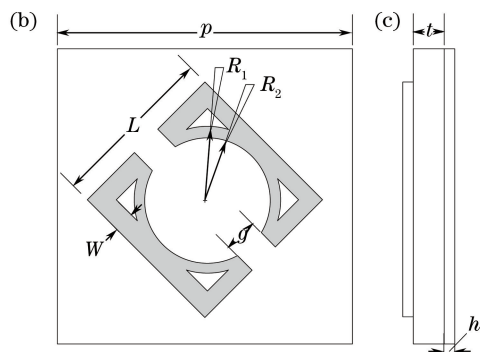


图 1 吸波结构单元示意图。(a)立体图；(b)俯视图；(c)侧视图

Fig. 1 Schematic of unit cell of absorber structure. (a) Stereogram; (b) top view; (c) side view

当电磁波入射到吸波器的表面时，吸收率可表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ ，其中 $R(\omega) = |S_{11}|^2$ 和 $T(\omega) = |S_{21}|^2$ 分别为反射率和透射率， S_{11} 、 S_{21} 分别为反射系数和透射系数， ω 为角频率。由于吸波器底层为铜地面，故透射率 $T(\omega)$ 约为零，吸收率可近似表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$ ，而反射率可表示为 $R(\omega) = [Z(\omega) - Z_0] / [Z(\omega) + Z_0]$ ，其中 $Z(\omega)$ 为等效阻抗， Z_0 为空间波阻抗。通过调节吸波结构的几何参数，使相对介电常数 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 的数值相等，此时，空间波阻抗 $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ (μ_0 为自由空间的磁导率， ϵ_0 为介电常数) 与吸波器的等效阻抗 $Z(\omega) = \sqrt{\mu_r(\omega) / \epsilon_r(\omega)}$ 完美匹配，反射率达到最小值，吸波器实现完美吸收。

2.2 对宽带吸波器的分析

为了探讨宽带超材料吸波器的吸收机理，将超材料吸波器看作一个整体，调整吸波结构的几何参数并进行仿真，得到 S 参数，进而计算超材料的等效阻抗值。由图 2 可知，在 10.65~22.39 GHz 频段内，该吸波器的等效阻抗实部接近 1，虚部为负值且接近 0，满足吸波器等效阻抗与空间波阻抗的匹配条件。

对于典型三层结构的超材料吸波器，当电磁波入射到吸波器的表面时，顶层金属结构的表面电流

图 2 超材料吸波器的等效阻抗

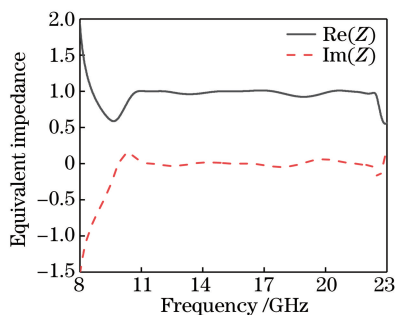


Fig. 2 Equivalent impedance of metamaterial absorber

与底层金属的表面电流反向平行，而反向平行电流作为磁偶极子形成电流环，进而发展成强磁共振。由金属结构、介质层和底层金属的耦合引起强电共振。通过合理设计共振单元的几何形状和尺寸，可以使电共振和磁共振在同一频段内重叠，引起强烈的电磁共振，吸收入射的电磁波，从而实现完美的吸收特性。图 3 所示为吸波器的三个谐振点 $f_1 = 11.5$ GHz、 $f_2 = 15.5$ GHz 和 $f_3 = 21.3$ GHz 处的表面电流分布和电场分布情况，顶层金属结构的表面电流与底层金属的表面电流反向平行，存在强磁共振。由图 4 电场分布图可知，电场主要集中在圆形开口环的内侧与方形开口环的外侧边缘，存在强电共振，吸波器在这三个谐振点处出现强吸收。

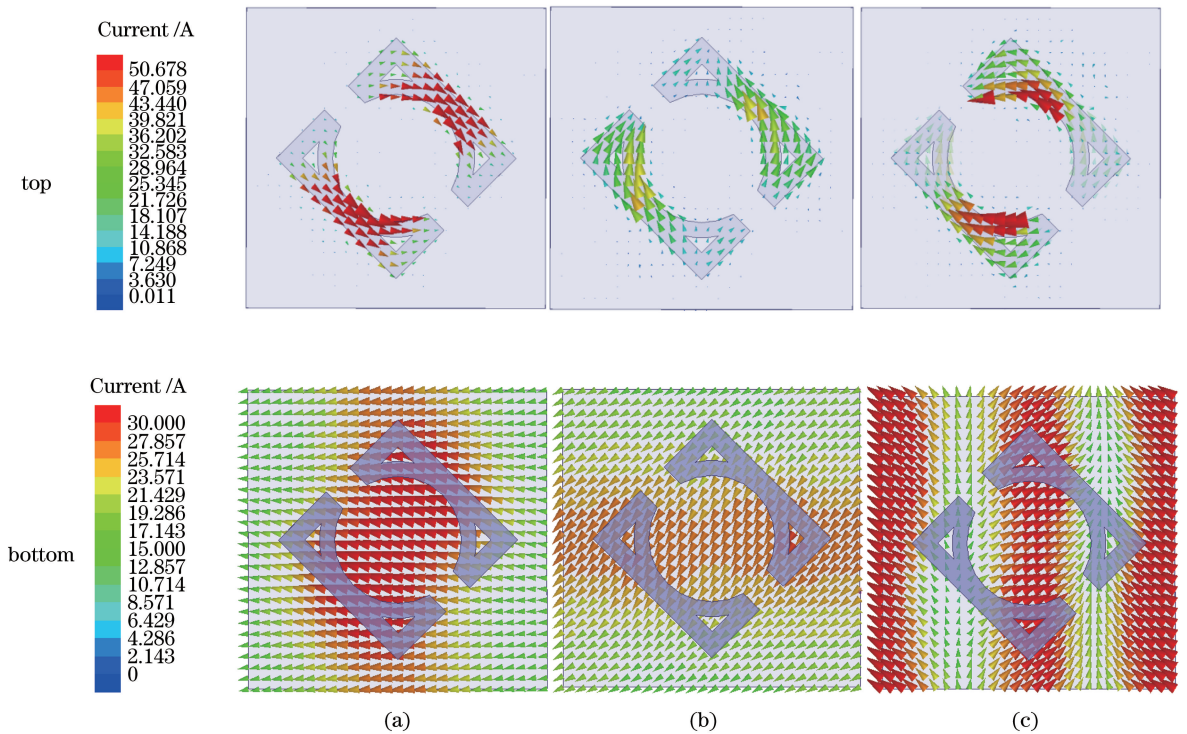


图 3 不同谐振频率处顶层金属和底层金属表面的电流分布。(a) 11.5 GHz; (b) 15.5 GHz; (c) 21.3 GHz

Fig. 3 Current distributions of top metal and bottom metal surfaces at different resonant frequencies.

(a) 11.5 GHz; (b) 15.5 GHz; (c) 21.3 GHz

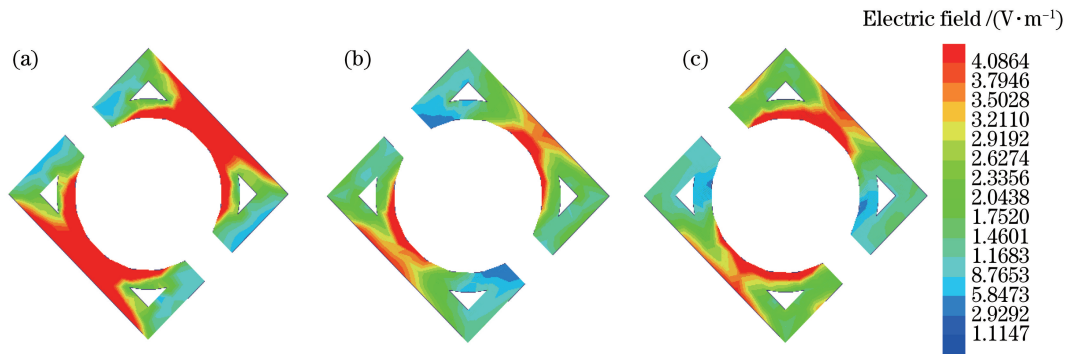


图 4 不同谐振频率处的电场分布。(a) 11.5 GHz; (b) 15.5 GHz; (c) 21.3 GHz

Fig. 4 Electric field distributions at different resonant frequencies. (a) 11.5 GHz; (b) 15.5 GHz; (c) 21.3 GHz

通过上述分析可知,吸波器的等效阻抗主要由介质层的厚度 t 和顶层金属结构的几何参数决定。首先对 FR-4 的厚度进行仿真优化,结果如图 5(a) 所示。可以看出,介质层的厚度影响谐振频率和谐振强度,随着厚度的增加,低频段吸收率增大到极限后,高频段吸收率开始减小,且谐振频率点发生蓝移。当 FR-4 厚度 $t=2$ mm 时,阻抗近乎完美匹配,峰值吸收率高达 99.94%。在其他初始参数不变的情况下,顶层吸波结构的开口宽度 g 对吸波器吸收性能的影响如图 5(b) 所示。可以看出,开口宽度主

要影响高频段吸收率,随着开口宽度的增加,高频段吸收率增大到一定值后开始减小。当开口宽度 $g=0.89$ mm 时,吸波效果最好。

选择铝 ($\sigma=3.8 \times 10^7$ S/m)、铜 ($\sigma=4.4 \times 10^7$ S/m)、银 ($\sigma=6.3 \times 10^7$ S/m) 三种材料进行对比,由图 6(a) 可以看出,使用不同的金属材料时,吸波器的吸收率几乎相等,故金属的电导率对超材料吸波器的吸收性能影响不大。不同的相对介电常数对吸波器吸收性能的影响如图 6(b) 所示。与 FR-4 介质层相比,瓷介质层的吸收频段发生红移且

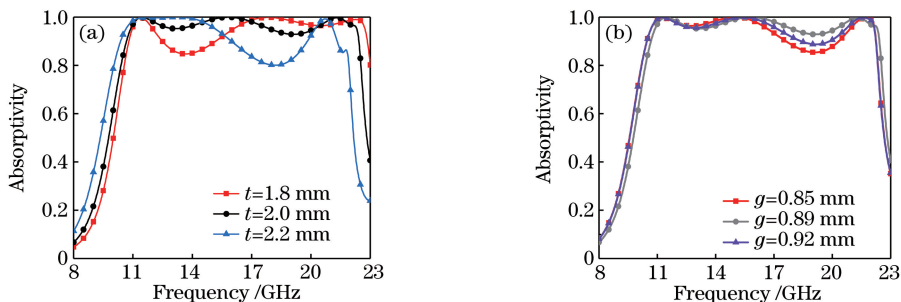


图5 结构参数对吸收率的影响。(a) FR-4厚度;(b)开口宽度

Fig. 5 Influence of structural parameter on wave absorptivity. (a) FR-4 thickness; (b) opening width

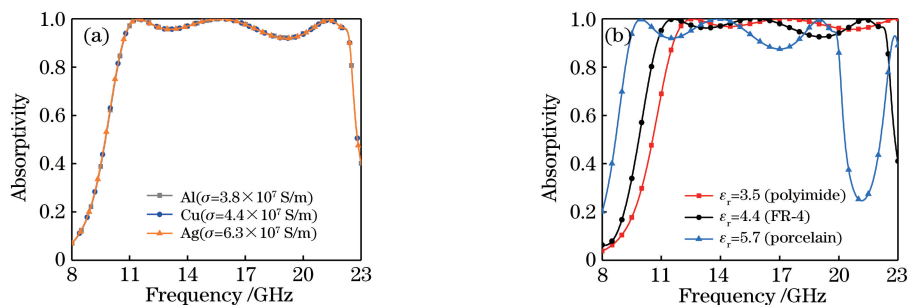


图6 金属材料参数对吸收率的影响。(a)电导率;(b)相对介电常数

Fig. 6 Influence of metallic material parameter on wave absorptivity. (a) Conductivity; (b) relative permittivity

平均吸收率减小,聚酰亚胺介质层的吸收频段向高频方向移动且平均吸收率增大。

3 吸波器性能分析

将优化参数代入仿真,得到该吸波器的吸收率,如图7所示。在10.65~22.39 GHz区间,吸波器的吸收率超过90%,吸收率在50%以上的带宽为13.07 GHz,计算得到相对半峰全宽(FWHM)吸收带宽为83.7%,实现了宽频带强吸收,且整体厚度仅为中心波长的1/10。

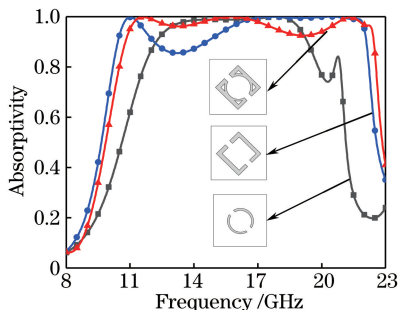


图7 吸收率仿真结果

Fig. 7 Simulated absorptivity

为了进一步分析三个吸收峰,分别对圆形开口环和方形开口环进行仿真模拟,在图7中可以观察到方形开口环在11.5~15.5 GHz频段处的吸收率有所减小,而圆形开口环在12.23~19.31 GHz频段

处的吸收率超过90%,两者的吸收峰叠加实现了吸波器的宽带吸收。

对吸波器在TE(横电)、TM(横磁)模式下的极化角进行了仿真分析。由图8可知,在TE极化和TM极化模式下,该吸波器的吸收率变化曲线基本一致。随着极化角度 φ 从 0° 增大到 45° ,吸波器的吸收率逐渐减小;当极化角 φ 从 45° 增大到 90° ,吸收率再次增大。当极化角为 45° 时,平均吸收率减小到10%;极化角为 0° 和 90° , 15° 和 75° , 30° 和 60° 时的吸收率近似相等。然而,随着极化角的变化,吸收带宽保持近似恒定。图9所示为不同入射角下的电磁波对吸收性能的影响,随着入射角 θ 的增大,吸收率快速减小。当入射角 θ 增大到 75° 时,三个吸收峰处的谐振点向低频方向偏移。当入射角为 90° 时,吸收率减小为0。因为所设计的吸波结构不具有对称性,所以随着极化角和入射角的增大,吸收率开始减小,这也表明该吸波器具有较小的人射角。

将吸波结构单元组成 5×5 的阵列,吸波结构的整体尺寸为 $42.2 \text{ mm} \times 42.2 \text{ mm} \times 2.07 \text{ mm}$,如图10(a)所示。经过仿真优化,单元与单元间的距离为0.55 mm,仿真结果如图10(b)所示。与单元仿真结果相比,阵列仿真结果的带宽减小,在10.52~21.57 GHz范围内吸收率大于90%,其极化特性曲线与单元仿真结果一致。

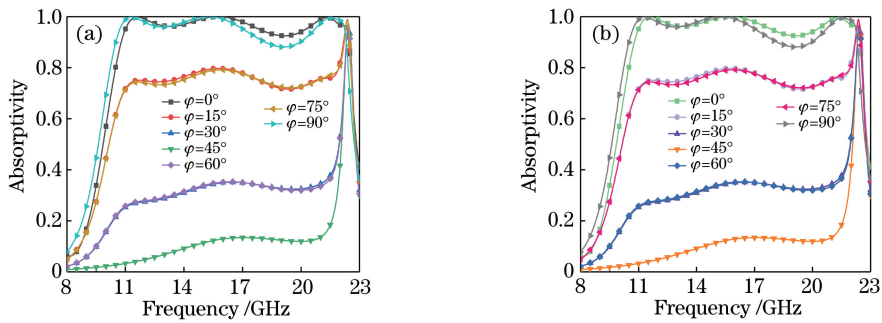


图 8 不同模式下极化角对吸收性能的影响。(a) TE 模式;(b) TM 模式

Fig. 8 Influence of polarization angle on absorption performance at different modes. (a) TE mode; (b) TM mode

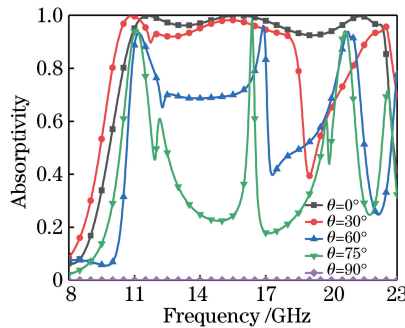


图 9 不同入射角下的电磁波对吸收性能的影响

Fig. 9 Influence of electromagnetic wave on absorption performance under different incidence angles

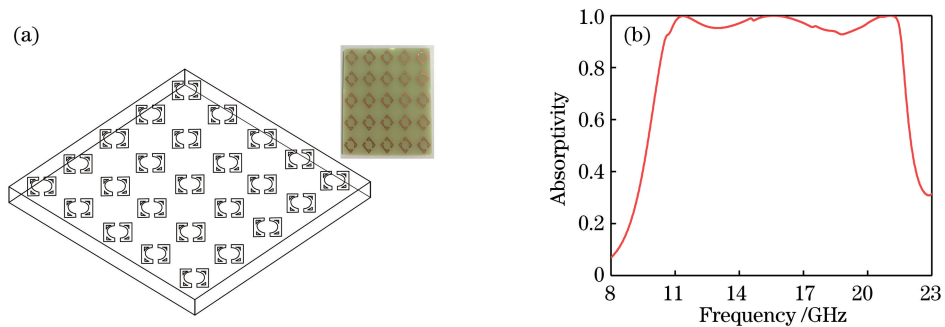


图 10 阵列。(a)结构示意图;(b)仿真结果

Fig. 10 Array. (a) Structural diagram; (b) simulated results

由于超材料的特性,超材料吸波器的吸收带宽都很小。学者们提出了许多增大带宽的方法,但设计和制造的复杂性仍然是主要制约因素之一。与表 1 中

不同吸波结构的宽带超材料吸波器相比,所设计的超材料吸波器具有结构厚度小、单元尺寸小、吸收带宽大、成本低等特点,易于制造,更适合实际应用。

表 1 不同吸波结构参数的对比

Table 1 Comparison among different structural parameters of absorbers

Structure	Structure in [12]	Structure in [13]	Structure in [14]	Proposed structure
Bandwidth /GHz	9.4	9.29	1000	13.07
Relative FWHM bandwidth /%	95.2	96.1	32.1	83.7
Size /(mm×mm×mm)	10×10×3	10×10×3.6	0.1×0.1×0.003	8×8×2

4 结 论

设计了一种顶层结构由方形开口环和圆形开口

环组合而成的宽频超材料吸波器。对于垂直入射的电磁波,该吸波器在 10.65~22.39 GHz 频段内的吸收率超过 90%,吸收带宽为 13.07 GHz,相对

FWHM 吸收带宽为 83.7%。通过分析电磁波入射角和极化方向发现,该吸波器具有频带宽、尺寸小、成本低等特点,适用于检测、隐形、天线系统和电磁设备等领域,且在 TE、TM 模式下的极化行为一致。然而,该吸波器的入射角较小,宽带超材料吸波器如何实现宽入射角特性是未来的研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] Smith D R, Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(14): 2933-2936.
- [2] Seddon N, Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect[J]. *Science*, 2003, 302(5650): 1537-1540.
- [3] Lu J, Grzegorzczak T M, Zhang Y, *et al.* Čerenkov radiation in materials with negative permittivity and permeability[J]. *Optics Express*, 2003, 11(7): 723-734.
- [4] Fante R L, McCormack M T. Reflection properties of the Salisbury screen[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(10): 1443-1454.
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [6] Zhou Y G, Li M Q, Pan X. Broadband absorber based on metamaterials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121602.
周永光, 李民权, 潘旭. 基于超材料的宽频带吸波体[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121602.
- [7] Bai Z Y, Jiang X W, Zhang L. Ultra-thin metamaterial absorber for electromagnetic window shielding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0816003.
白正元, 姜雄伟, 张龙. 超薄电磁屏蔽光窗超材料吸波器[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0816003.
- [8] Fu S M, Zhong Y K, Ju N P, *et al.* Broadband polarization-insensitive metamaterial perfect absorbers using topology optimization[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-11.
- [9] Rufangura P, Sabah C. Wide-band polarization independent perfect metamaterial absorber based on concentric rings topology for solar cells application [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 680: 473-479.
- [10] Zhu L, Wang Y, Xiong G, *et al.* Design and absorption characteristics of broadband nano-metamaterial solar absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0923001.
朱路, 王杨, 熊广, 等. 宽波段纳米超材料太阳能吸收器的设计及其吸收特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0923001.
- [11] Zhang Q L. Application of metamaterials in antennas[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
张庆乐. 新型电磁超材料在天线中的应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [12] Liu L Y, Zhang Z J, Liu L X. Research on broadband metamaterial absorber based on lumped resistance[J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(5): 50-54.
刘凌云, 张政军, 刘力鑫. 基于集总电阻的宽频带超材料吸波器研究[J]. *微波学报*, 2016, 32(5): 50-54.
- [13] Li S J, Cao X Y, Gao J, *et al.* Analysis and design of three-layer perfect metamaterial-inspired absorber based on double split-serration-rings structure[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(11): 5155-5160.
- [14] Zhou T B, Hu F R, Xiao J, *et al.* Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials[J]. *Acta Physics Sinica*, 2014, 63(17): 178103.
邹涛波, 胡放荣, 肖靖, 等. 基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 178103.