



基于电阻膜的超宽带超材料吸波体设计

孔祥林, 马洪宇, 陈 鹏, 梁 仓, 王伟华, 韩 奎, 张生俊, 刘晓春, 赵 雷, 沈晓鹏

Design of ultra-wideband metamaterial absorber based on resistance films

KONG Xianglin, MA Hongyu, CHEN Peng, LIANG Cang, WANG Weihua, HAN Kui, ZHANG Shengjun, LIU Xiaochun, ZHAO Lei, and SHEN Xiaopeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021126>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于石墨烯超材料的三频段可调谐完美吸收器

Triple-band tunable terahertz perfect absorber based on graphene metamaterial
电波科学学报. 2021, 36(2): 277-284

一种机载超宽带相控阵雷达T/R组件设计

Design of T/R module for airborne ultra-wideband phased array radar
电波科学学报. 2020, 35(2): 264-269

一种超宽带双极化阵列天线的设计

Design of an ultra-wideband dual-polarized array antenna
电波科学学报. 2021, 36(1): 20-26, 35

一种超宽带超低相位噪声频率综合器

An ultra-wideband ultra-low phase noise frequency synthesizer
电波科学学报. 2021, 36(4): 532-538

超宽带阶梯形微带单极子天线的设计与研究

Design and research of ultra-wideband stepped microstrip monopole antenna
电波科学学报. 2021, 36(2): 225-230

一种陷波超宽带MIMO天线设计

Design of a compact ultra wideband MIMO antenna with WLAN band-rejected
电波科学学报. 2018, 33(4): 436-440



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孔祥林, 马洪宇, 陈鹏, 等. 基于电阻膜的超宽带超材料吸波体设计[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 947-952. DOI: 10.12265/j.cjors.2021126

KONG X L, MA H Y, CHEN P, et al. Design of ultra-wideband metamaterial absorber based on resistance films[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(6): 947-952. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2021126

基于电阻膜的超宽带超材料吸波体设计

孔祥林¹ 马洪宇¹ 陈鹏¹ 梁仓¹ 王伟华² 韩奎² 张生俊³ 刘晓春⁴ 赵雷¹ 沈晓鹏²

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学材料与物理学院, 徐州 221116; 3. 试验物理与计算数学重点实验室, 北京 100076; 4. 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023)

摘 要 为满足宽带电磁隐身需求, 提出了一种完全覆盖 C~Ka 波段、部分覆盖 S 和 U 波段的超材料吸波体. 吸波体由四层不同方块电阻的方形电阻膜及泡沫介质基板构成, 多层电阻膜结构有效地向两侧拓宽了吸收带宽. 为了分析吸波体的电磁吸收机理, 建立并分析了该吸波体的精确等效电路模型. 仿真结果表明, 在 3.16~51.6 GHz(相对带宽为 176.9%) 工作频带内, 对 TE 和 TM 波均能实现 88% 以上的吸收率, 并且对入射角度具有稳定性. 制作、加工并测试了超材料吸波体, 实测结果与等效电路计算、全波仿真结果均具有较好的一致性, 表明该吸波体在电磁隐身领域具有重要的应用价值.

关键词 超材料; 超宽带; 吸波体; 电阻膜; 等效电路

中图分类号 TN011

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2021)06-0947-06

DOI 10.12265/j.cjors.2021126

Design of ultra-wideband metamaterial absorber based on resistance films

KONG Xianglin¹ MA Hongyu¹ CHEN Peng¹ LIANG Cang¹ WANG Weihua² HAN Kui²
ZHANG Shengjun³ LIU Xiaochun⁴ ZHAO Lei¹ SHEN Xiaopeng²

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Key Laboratory of Experimental Physics and Computational Mathematics, Beijing 100076, China;

4. Key Laboratory of Aeronautical Science and Technology for High Performance Electromagnetic Window, Ji'nan 250023, China)

Abstract A metamaterial absorber is proposed to meet the needs of wideband electromagnetic stealth, which completely covers C-Ka band and partially covers S-band and U-band. The absorber is composed of four square resistance films with different square resistance and foam medium substrates, and the multi-layer resistance film structure effectively expands the absorption bandwidth to both sides. The accuracy equivalent circuit is derived for better explaining the mechanism of the proposed absorber. The simulated results show that the proposed absorber provides over 88% ultra-wide absorption from 3.16 GHz to 51.6 GHz (relative bandwidth is 176.9%), and is stable to the incidence angle for both TE and TM wave. The metamaterial absorber is fabricated and tested, and the measured results are in good agreement with the equivalent circuit calculation and full-wave simulation results, which indicates that it has important application value in the electromagnetic stealth field.

Keywords metamaterial; ultra-wideband; absorber; resistance films; equivalent circuit

收稿日期: 2021-05-02

资助项目: 江苏省六大人才高峰(XYDXX-072); 国家自然科学基金(61771226)

联系人: 沈晓鹏 E-mail: xpshen@cumt.edu.cn; 赵雷 E-mail: leizhao@cumt.edu.cn

引言

微波吸波体作为吸收和耗散电磁波能量、抑制电磁波反射和传播的有效工具,在电磁屏蔽、无线通信、成像和雷达隐身等技术领域得到了广泛的应用^[1-4].在过去的几十年里,人们对吸波体设计进行了大量研究.传统的吸波体,如 Salisbury 屏^[5]、Dallenbach 吸波体^[6]等可以实现完美吸收.然而,巨大的体积和质量限制了它们在电磁领域的潜在应用.

超材料,又称人工电磁材料,通常由亚波长结构单元按周期或有规律的非周期方式排列组合而成,具有强大的电磁调控能力^[7],如负折射率、反向传播和电磁隐身等.超材料吸波体可以在特定频率范围内实现电磁波的完美吸收,且可以克服传统四分之一波长器件的厚度限制^[8-11].进而,研究人员利用金属谐振特性设计了高吸收超材料吸波体^[12-15],但吸收带宽较窄.随后,研究人员利用多层堆叠^[16-19]、加载集总元件^[20-23]等方法拓展吸收带宽,但是这些设计复杂、成本较高.电阻膜因具有较好的宽带电磁损耗特性,受到研究人员们的青睐^[24-28].2017年,Cui 等人利用风车结构化电阻膜设计了一款超材料吸波体,在 8.3~17.4 GHz 可以实现 90% 的吸收率^[17].同年,Sheokand 等人基于氧化铜锡电阻膜设计了一款工作于 6.06~14.66 GHz 的超材料吸波体^[26].2021年,Chen 等人基于多层电阻膜叠加方法设计了一种极化不敏感吸波体,在 4.73~39.04 GHz 频带内的吸收率均高于 90%^[28].上述超材料吸波体成功实现了宽带吸收特性,但吸波体带宽需要进一步拓展以提高不同频带的兼容性.

本文基于多层电阻膜-介质复合结构,设计了一款超宽带超材料吸波体.该超材料吸波体由四层电阻膜-介质和金属接地板组成.其中,电阻膜阻值由上向下逐渐减小,多层结构设计有效地向 S 波段和 U 波段拓展了吸收带宽.此设计具有以下优点:1) 在 3.16~51.6 GHz (相对带宽 176.9%) 频段内吸收率都高于 88%,实现了宽带吸收;2) 在工作带宽内,对于 TE 和 TM 波入射表现出极化不敏感特性;3) 电磁波入射角度在 0°~45°内变化,吸波体的吸收率均高于 80%.

1 超材料单元设计与仿真

超材料吸波体单元采用多层结构,周期 p =

14 mm,如图 1(a) 所示.超材料单元由电阻膜、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalat, PET) ($\epsilon=3.0$, $\tan \delta=0.061$)、聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫 (poly-methacrylimide, PMI) ($\epsilon=1.05$, $\tan \delta=0.001$) 和金属接地板构成.其中,PMI 自上而下的厚度分别为 $t_1=2$ mm、 $t_2=2$ mm、 $t_3=3$ mm、 $t_4=2$ mm;方形电阻膜的宽度由上而下分别为 $w_1=12.5$ mm、 $w_2=11.9$ mm、 $w_3=13$ mm、 $w_4=14$ mm.超材料吸波体的侧视图如图 1(b) 所示,多层方形电阻膜的方阻值由上而下递减,分别为 $R_1=450$ Ω/\square 、 $R_2=345$ Ω/\square 、 $R_3=337$ Ω/\square 、 $R_4=250$ Ω/\square .电阻膜放置于衬底 PET 上,PET 厚度 $t_p=0.175$ mm,金属接地板采用厚度为 0.018 mm 的铜,电阻膜厚度可以忽略不计.利用商业软件 CST 对设计的超材料单元结构进行数值模拟,电磁波沿着 z 轴负方向入射,在 x 、 y 方向均采用 unit cell 边界条件.图 2 呈现了超材料吸波体的吸收谱线和归一化阻抗,明显看出,在 3.16~51.6 GHz 频段内,超材料吸波体对于垂直入射下的电磁波吸收效率都高于 88%.设计的超材料吸波体实现了中心频率为 27.38 GHz、相对带宽为 176.9% 的吸收性能,覆盖了 C、X、Ku、K 和 Ka 波段,部分覆盖 S 和 U 波段.超材料吸波体和自由空间阻抗必须完美匹配才能达到完美吸收,通过计算吸波体的归一化阻抗,进一步解释了其宽频带吸收性能:从图 2 可以看出,归一化阻抗的实部和虚部分别接近于 1 和 0,即在目标频率范围内实现了超材料吸波体与自由空间的阻抗匹配,从而减少了接触界面的后向反射.

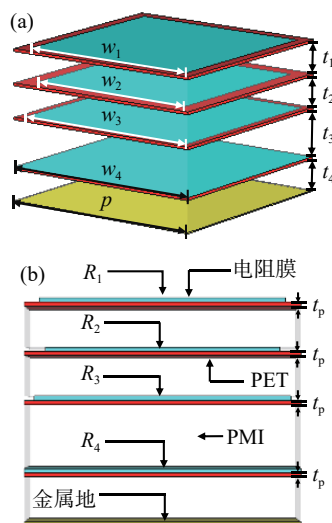


图 1 吸波体单元多层结构 (a) 和侧视图 (b)
Fig. 1 Absorber unit cell multilayer structure (a) and side view (b)

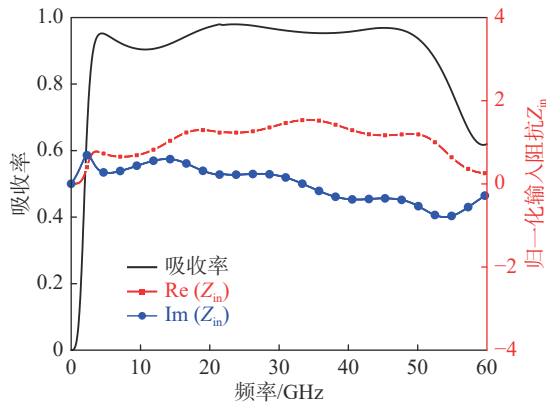


图 2 垂直入射条件下吸收率和归一化阻抗曲线

Fig. 2 Absorptivity and normalized impedance curves under vertical incident conditions

对于电磁波的入射角和极化角是否具有稳定性也是验证吸波体性能的重要指标. 图 3 给出了 TE 和 TM 极化电磁波在不同斜入射角下吸收体的吸收率曲线, 表现出对入射角度具有鲁棒性. 如图 3(a) 所示, TE 极化波入射条件下, 入射角度从 0° 增加至 45° 时, 吸收带宽变化较小, 且吸收率均在 80% 以上. 如图 3(b) 所示, TM 极化波入射条件下, 入射角度从 0° 增加至 30° 时, 吸收带宽变化较小, 且吸收率在 3.98~51.3 GHz 内均高于 88%; 入射角增加至 45° 时, 吸收带宽明显向右移动, 但吸收率依然保持在 88% 以上. 结果表明, 设计的超材料吸波体结构具有对称性, 且对于电磁波极化状态表现出不敏感特性.

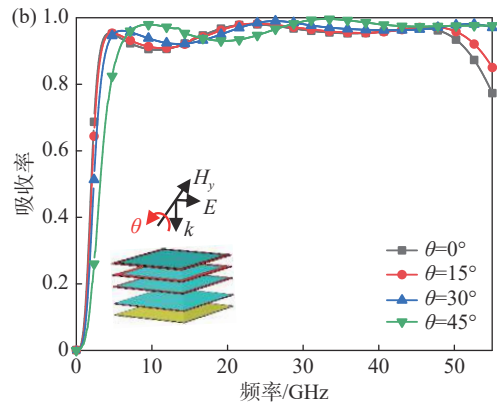
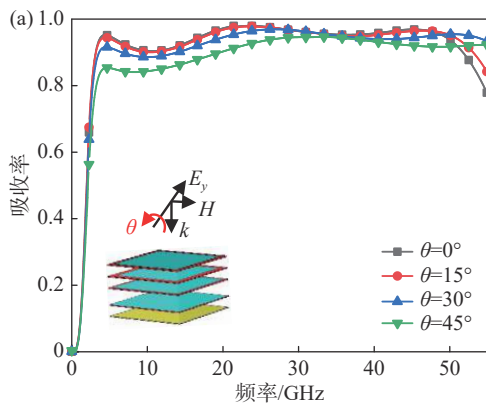
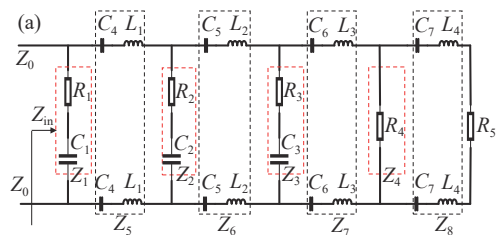


图 3 TE 波 (a) 和 TM 波 (b) 入射下的吸收率仿真曲线

Fig. 3 Absorptivity simulation atlas under TE (a) and TM incident wave (b)

2 理论分析与实验验证

本文基于传输线理论等效电路模型, 分析吸波体的性能. 如图 4(a) 所示, 给出了超材料吸波体所对应的等效电路模型. 其中: Z_0 为自由空间的阻抗; 第一、二和三层电阻膜为容性表面, 可以等效为 RC 串联电路, 其等效阻抗分别为 Z_1 、 Z_2 和 Z_3 ; 第四层电阻膜尺寸与单元结构周期相等可以等效为电阻, 其等效阻抗为 Z_4 ; 介质层和金属地板可以等效为传输线和小电阻 R_5 ; Z_5 、 Z_6 、 Z_7 和 Z_8 是四层介质的波阻抗; Z_{in} 是从左位置向右看去的等效阻抗. 利用 ADS 软件建立等效的电路模型, 数值拟合 CST 仿真结果. 等效模型中的集总元件参数如下: $R_1=58.13 \text{ k}\Omega$, $C_1=2.43 \text{ nF}$, $R_2=66.67 \text{ k}\Omega$, $C_2=789.89 \text{ pF}$, $R_3=555.5 \text{ }\Omega$, $C_3=1.35 \text{ nF}$, $R_4=4.9 \text{ k}\Omega$, $R_5=5 \text{ }\Omega$, $C_4=1.68 \text{ nF}$, $L_1=0.03 \text{ nH}$, $C_5=0.76 \text{ pF}$, $L_2=0.655 \text{ nH}$, $C_6=79.42 \text{ pF}$, $L_3=27.55 \text{ nH}$; $C_7=69.01 \text{ pF}$, $L_4=3.39 \text{ nH}$. 图 4(b) 将电路模型与 CST 仿真的吸收率进行了比较, 可以看出计算结果与仿真结果一致.



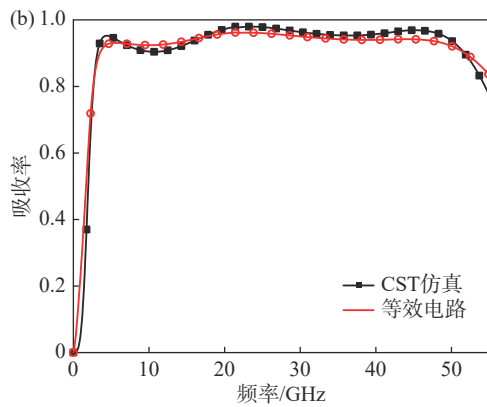


图4 吸波体等效电路模型(a)及ADS与CST仿真结果对比(b)

Fig. 4 Absorber equivalent circuit model (a) and comparison of simulation results between ADS and CST (b)

为了进一步验证其吸波性能,加工、制作并测试超材料吸波体.采用丝网印刷工艺,改变印刷厚度可以得到不同方阻值的电阻膜,制备了四种不同尺寸的方形电阻膜.然后,使用光学胶粘合介质和电阻膜,胶层厚度非常薄,对超材料吸波体的性能影响可以忽略不计,金属接地层为金属铜.加工的样品由 22×22 个单元构成,尺寸为 $308 \text{ mm} \times 308 \text{ mm}$,如图5(a)所示.采用自由空间法对加工的超材料吸波体样品进行测试,实验装置如图5(b)所示.一对 $1 \sim 18 \text{ GHz}$ 宽带喇叭天线,分别作为发射源和接收源,用两根低损耗线缆与矢量网络分析仪连接,以记录测试数据.

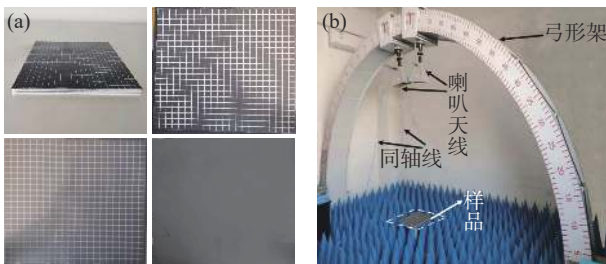


图5 吸波体样品(a)和实验装置(b)

Fig. 5 Absorber sample (a) and experimental device (b)

图6给出了 $2 \sim 18 \text{ GHz}$ 吸波体的吸收率测试曲线.如图6(a)所示,在 $3.15 \sim 18 \text{ GHz}$ 对于不同入射角度的TE波,吸波体的吸收效果变化明显.入射角度在 $5^\circ \sim 30^\circ$ 范围内,其吸收率高于85%;角度增加至 45° ,吸收率下降至78%左右.如图6(b)所示,TM波入射情况下,入射角度从 5° 增加到 15° ,在 $3.5 \sim 18 \text{ GHz}$ 吸收率均大于80%;随着角度变大,吸收带宽明显向右移动,但在 $4.25 \sim 18 \text{ GHz}$ 吸收率均大于80%.测试结果与仿真结果存在差异,这可能是由样品的电阻膜方阻值分布不均匀和实验环境导致.

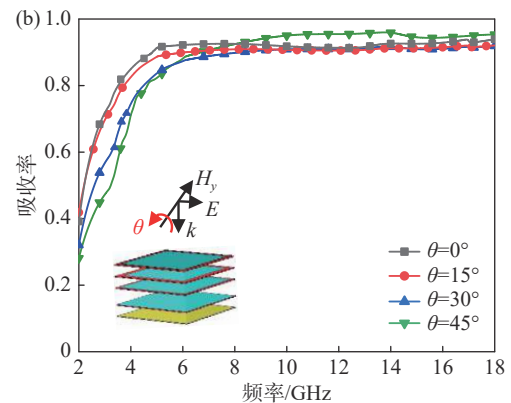
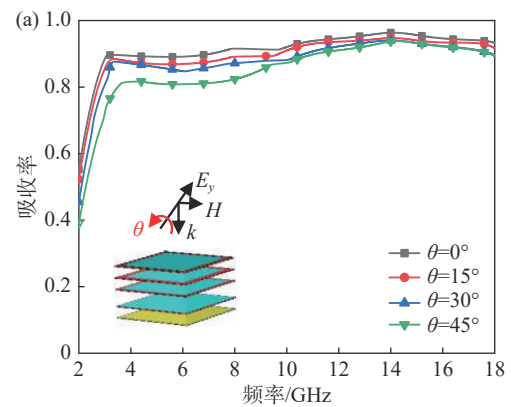


图6 TE波(a)和TM波(b)入射下的吸收率测试曲线

Fig. 6 Absorptivity measured results under TE (a) and TM Incident (b)

3 结论

本文设计了一种完全覆盖C~Ka波段、部分覆盖S和U波段的极化不敏感超材料吸波体.基于电阻膜的电磁损耗特性,将电阻膜/介质叠层结构组合在一起,达到阻抗匹配以实现宽带吸收.仿真结果表明,在 $3.16 \sim 51.6 \text{ GHz}$ 频段内,吸波体的吸收率都高于88%,相对带宽达到176.9%,与同类结构设计相比具有更佳的宽带特性.对于TE和TM波,入射角度从 0° 到 45° 变化,吸波体始终保持良好的吸收性能.最后,制作、加工并测试了超材料吸波体,实验结果与仿真结果基本一致.该设计在隐身领域具有广阔的应用前景,并对多层电阻膜超材料吸波体设计具有参考价值.但该设计对于L~S频段的电磁波吸收存在不足,可以结合磁性吸波材料进一步研究解决方案.

参考文献

- [1] FALLAHI A, YAHAGHI A, BENEDICKTER H, et al. Thin wideband radar absorbers[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2010, 58(12): 4051-4058.
- [2] OKANO Y, OGINO S, ISHIKAWA K. Development of optically transparent ultrathin microwave absorber for ul-

- trahigh frequency RF identification system[J]. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2012, 60(8): 2456-2464.
- [3] THOMASSIN J, HUYNEN I, JEROME R, et al. Functionalized polypropylenes as efficient dispersing agents for carbon nanotubes in a polypropylene matrix; application to electromagnetic interference (EMI) absorber materials[J]. *Polymer*, 2010, 51(1): 115-121.
- [4] LIU T, CAO X, GAO J, et al. RCS reduction of waveguide slot antenna with metamaterial absorber[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2013, 61(3): 1479-1484.
- [5] RONAL D, FANTE L. Reflection properties of the Salisbury screen[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 1988, 36(10): 1443-1454.
- [6] REINERT J, PSILOPOULOS J, GRUBERT J, et al. On the potential of graded-chiral Dallenbach absorbers[J]. *Microwave and optical technology letters*, 2001, 30(4): 254-257.
- [7] MESHARAM M R, AGRAWAL N K, SINHA B, et al. Characterization of m-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber[J]. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2004, 271(2-3): 207-214.
- [8] PARK M, CHOI J, KIM S. Wide bandwidth pyramidal absorbers of granular ferrite and carbonyl iron powders[J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2000, 36(5): 3272-3274.
- [9] ZULKIPLI N F, BATUMALAY M, SAMSAMNUN F S M, et al. Nanosecond pulses generation with samarium oxide film saturable absorber[J]. *Chinese physics letters*, 2019, 36(7): 74203.
- [10] ZHANG C, YANG J, YANG L X, et al. Convolution operations on time-domain digital coding metasurface for beam manipulations of harmonics[J]. *Nano photonics*, 2020, 9(9): 2771-2781.
- [11] ZHANG C, YANG J, CAO W, et al. Transparently curved metamaterial with broadband millimeter wave absorption[J]. *Photonics research*, 2019, 7(4): 1-10.
- [12] SUN J, LIU L, DONG G, et al. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference[J]. *Optics express*, 2011, 19(22): 21155-21162.
- [13] SHEN X, CUI T J, ZHAO J, et al. Polarization independent wide-angle triple-band metamaterial absorber[J]. *Optics express*, 2011, 19(10): 9401-9407.
- [14] XIONG H, HONG J S, LUO C M, et al. An ultrathin and broadband metamaterial absorber using multi-layer structure[J]. *Journal of applied physics*, 2013, 114: 064109.
- [15] LANDY N, BINGHAM C, TYLER T, et al. Design, theory and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging[J]. *Physics review B*, 2009, 79(12): 125104.
- [16] CHENG Y, YANG H, CHENG Z, et al. Perfect metamaterial absorber based on a split-ring-cross resonator[J]. *Applied physics A*, 2011, 102(1): 99.
- [17] ZHANG C, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption[J]. *Applied physics letters*, 2017, 110(14): 143511.
- [18] ZHANG Y, LI Y, CAO Y, et al. Graphene induced tunable and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber[J]. *Optics communications*, 2017, 382: 281-287.
- [19] SU Z, YIN J, ZHAO X. Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MGF₂ multilayer structures[J]. *Optics express*, 2015, 23(2): 1679.
- [20] DING F, CUI Y, GE X, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied physics letters*, 2012, 100(10): 103506.
- [21] 黄栩静,万国宾.一种新型宽带电阻膜吸波体设计[J].*中国舰船研究*, 2021, 16(2): 78-83.
HUANG Y J, WAN G B. Design of novel broadband absorber based on resistive film[J]. *Chinese journal of ship research*, 2021, 16(2): 78-83. (in Chinese)
- [22] SUN L, CHENG H, ZHOU Y, et al. Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface[J]. *Optics express*, 2012, 20(4): 4675-4680.
- [23] 莫漫漫,马武伟,庞永强,等.基于拓扑优化设计的宽频吸波复合材料[J].*物理学报*, 2018, 67(21): 217801.
MO M M, MA W W, PANG Y Q, et al. Broadband absorbent materials based on topology optimization design[J]. *Acta physica sinica*, 2018, 67(21): 217801.
- [24] YUAN W, CHENG Y. Low frequency and broadband metamaterial absorber based on lumped elements: design, characterization and experiment[J]. *Applied physics A*, 2014, 117(4): 1915-1921.
- [25] KUNDU D, MOHAN A, CHAKRABARTY A. Single-layer wideband microwave absorber using array of crossed dipoles[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2016, 15: 1589-1592.
- [26] SHEOKAND H, GHOSH S, SINGH G, et al. Transparent broadband metamaterial absorber based on resistive films[J]. *Journal of applied physics*, 2017, 122: 105105.
- [27] LI S, WU P, XU H, et al. Ultra-wideband and polarization-insensitive perfect absorber using multilayer metamaterials,

lumped resistors, and strong coupling effects[J]. Nano-scale research letters, 2018, 13(1): 1589-1592.

- [28] CHEN P, KONG X, HAN J, et al. Wide angle ultra-broad-band metamaterial absorber with wide-angle ultra-broad-band metamaterial absorber with polarization-insensitive characteristics[J]. *Chinese physics letters*, 2021, 38(2): 27801.

作者简介

孔祥林 (1995—), 男, 山东人, 中国矿业大学信息与控制工程学院在读硕士研究生, 主要研究方向为射频/微波天线、超表面设计.

马洪宇 (1972—), 男, 山东人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为微纳传感器、矿用气体传感器、微纳加工技术、微纳材料.

赵雷 (1974—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国电子学会天线分会委员, IEEE AP-S Chapter Xuzhou 主席, 主要研究方向为射频微波器件、新型电磁材料、涡旋波通信、计算电磁学等.

沈晓鹏 (1974—), 男, 山东人, 教授, 主要研究方向为新型人工电磁材料、人工表面等离激元、光子晶体等.