

一种基于超材料的轻质宽带雷达/红外兼容隐身结构

牛帅^{1,2}, 杨昌^{2,3*}, 常慧聪², 肖林², 郭楠², 曲彦臣³, 李国华^{1*}

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国空间技术研究院 钱学森空间技术实验室, 北京 100094;

3. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 设计并研制出一种基于超材料的宽带微波/红外兼容隐身结构器件, 该结构包括基于氧化铟锡(ITO)薄膜制备出的红外隐身层、微波吸收层和微波反射层, 红外隐身层由圆环镂空结构的频率选择表面组成, 微波吸收层由周期和方阻均不同的方环结构组成, 微波反射层由连续的导电薄膜组成。各层由厚度不同的聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)隔开。结果表明此结构能够在2~18.6 GHz范围内实现90%以上的吸收, 其红外发射率低于0.3。

关键词: 超材料; 氧化铟锡; 兼容隐身

中图分类号: TB34 文献标识码: A

An ultralight broadband radar and thermal infrared compatible stealth structure based on metamaterials

NIU Shuai^{1,2}, YANG Chang^{2,3*}, CHANG Hui-Cong², XIAO Lin², GUO Nan²,
QU Yan-Chen³, LI Guo-Hua^{1*}

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: A radar/infrared compatible stealth structure based on metamaterial was successfully designed in this paper, and the structure consists of an infrared stealth layer (IRSL), two microwave absorption layers (MAL) and a microwave reflection layer (MRL) based on indium tin oxide (ITO) film. The IRSL is composed of frequency selective surface of ring hollow structure. The MALs are composed of square ring structures with different period and square resistance. The MRL is composed of continuous conductive film. Each layer is separated by a polymethacrylimide (PMI) materials with different thickness. Experimental results show that the structure can achieve more than 90% microwave absorption in the range of 2~18.6 GHz, and its infrared emissivity is lower than 0.3.

Key words: metamaterial, indium tin oxide, compatible stealth

PACS: 41.20.-q, 61.41.+e, 81.05.Zx, 83.60.Np, 84.40.-x

引言

随着可见、红外、雷达及激光制导技术的迅猛发展, 军事装备在战场上将面临多波段侦查的威胁, 与之对应的多波段兼容隐身技术能提升武器装备战场生存能力。在各类探测手段中, 雷达(微波)与红外

探测占据90%, 因此微波与红外兼容隐身技术成为多波段兼容隐身的主要研究方向之一^[1-6]。一种常见实现方式是在微波吸收剂外层包覆红外高反射率的微金属颗粒, 以实现雷达与红外隐身的兼容^[7-8]。但红外高反射率的金属材料在微波频段也具一定反射, 因此在一定程度上牺牲了微波吸收性能。如何

收稿日期: 2022-01-10, 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 中国航天科技集团公司项目(1020J20200048)

Foundation items: Supported by Project of China Aerospace Science and Technology Corporation

作者简介(Biography): 牛帅(1996-), 男, 吉林松原人, 硕士研究生, 主要研究领域为隐身材料。E-mail: niushuai1996ns@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: Yangchangwhwc@foxmail.com, lgh@cumt.edu.cn

Received date: 2022-01-10, Revised date: 2022-06-14

解决红外隐身和雷达隐身对电磁波反射特性相互矛盾的难题,是实现雷达/红外隐身技术的关键。

超材料在操纵电磁方面具有可设计性和灵活性,越来越受到研究者的关注。超材料的特性主要取决于周期或非周期排列的结构单元,通过改变结构参数,操纵其有效介电常数和磁导率,实现超材料对电磁波的调控^[9-12]。Landy于2008年首次提出了完美超材料吸收体^[13]的概念,可以在单频点实现全吸收。随后,具有宽带吸波特性和可见透明特性^[17-21]与红外隐身兼容的吸波结构^[22-24]相继报道。最近,Du等人^[25]设计出一种三层复合超材料结构,该结构在1~18 GHz频段的吸收率大于90%,但是该结构无法实现红外隐身。Wen等人^[26]设计出超薄雷达-红外兼容隐身超结构,红外隐身层在8~14 μm的发射率为0.27,但是有效微波吸收频段仅覆盖8.1~19.3 GHz,微波吸收带宽还有待提高。

本文设计了一种基于ITO导电薄膜的雷达/红外兼容隐身轻质超材料结构。该结构由频率选择表面(IRSL)、微波吸波层(MAL)和微波反射层(MRL)共同组成。测量结果表明,该结构在2~18.6 GHz频段内吸收率高达90%,在热红外波段(8~14 μm)的发射率低于0.3。基于PMI泡沫的特性,本隐身结构同时兼具轻质的特点,密度仅为35 kg/m³,约是传统涂层型的1/80。可以作为贴片贴合在武器装备任意部位满足其隐身需求。

1 兼容隐身结构设计

图1为雷达/红外兼容隐身超材料结构示意图,器件从上到下依次为IRSL、MAL和MRL。各功能层由衬底为聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET, 0.175 mm)的透明导电ITO薄膜构成。各功能层之间为不同厚度(d_1 、 d_2 、 d_3)的PMI泡沫。PET和PMI泡沫的介电常数分别为3(1-0.01i)和1.12(1-0.01i)。微波吸收层由两个周期尺寸和方阻不同的两种结构层组成。MAL1和MAL2分别吸收低频段和高频段微波,二者结合实现对微波的宽频吸收。微波反射层由ITO连续膜组成,将透过的微波反射至微波吸收层进而实现多次谐振吸收^[26]。

IRSL为高电导率的ITO导电薄膜,导电薄膜在红外和微波频段均具有较高的反射率。在此,通过使用电磁仿真软件(CST studio suite 2016)模拟出ITO薄膜在红外波段和微波频段的电磁特性。在红外波段,ITO的介电常数可以用Drude模型描述^[27]:

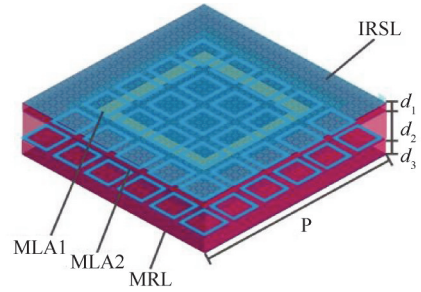


图1 雷达/红外兼容隐身超材料结构示意图。

Fig. 1 The structure diagram of radar/infrared compatible stealth metamaterial structure

$$\varepsilon(\omega) = 3.95 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad (1)$$

其中 $\omega_p = 3.07 \times 10^{15}$ rad/s, $\gamma = 1.82 \times 10^{14}$ s⁻¹。以250 nm厚的ITO薄膜为例,如图2(a)所示,介电常数实部在1.2 μm处由正变为负,说明ITO在可见光和近红外波段表现为介质特性,而在长波红外波段表现为金属特性。这一点由其红外透射和反射谱仿真结果得到验证(图2(b)),ITO薄膜在红外波段的反射率(R)约为0.9,而透射率(T)几乎接近于零。根据基尔霍夫定律可知红外发射率等于吸收率, $A = 1 - R - T$ 。因此,ITO在热红外波段的发射率约为0.1。在微波频段,以方阻为20 Ω/sq的ITO为例,在1~20 GHz范围内,微波反射率(红色曲线)高达95%以上(图2(c)),微波几乎无法穿透ITO薄膜(蓝色曲线)。因此,IRSL需要兼具低红外发射率和微波高透射率的性能。频率选择表面(FSS)是一种典型的超材料,在与电磁波相互作用时可表现为的带通或带阻滤波特性。基于FSS设计出的红外隐身层,其发射率表达式如下:

$$\varepsilon_{\text{IRSL}} = t_c \varepsilon_c + t_d \varepsilon_d \quad (2)$$

式中 ε_c 和 ε_d 分别为导电单元和介质基板的发射率。 t_c 和 t_d 分别为导电单元和介质基板所占面积的百分比。在设计FSS时,导电材料在目标频段内应高填充比和高微波透过率。

如图2(d)所示,本文使用圆环镂空结构代替传统方块结构。各FSS的几何参数选定如下: $p_1 = 0.5$ mm, $d = 2r = 0.45$ mm。通过计算得出,在周期尺寸相同的情况下,圆环镂空结构的占空比为85%,方块结构的占空比为81%。经过FSS结构设计后,红外隐身层在2~25 GHz的透过率大于95%。圆环镂空结构的微波透过率(黑色曲线)略大于方块结构的微波透过率(红色曲线)。由式(2)计算可知,圆环镂空结构的红外发射率约为0.23。

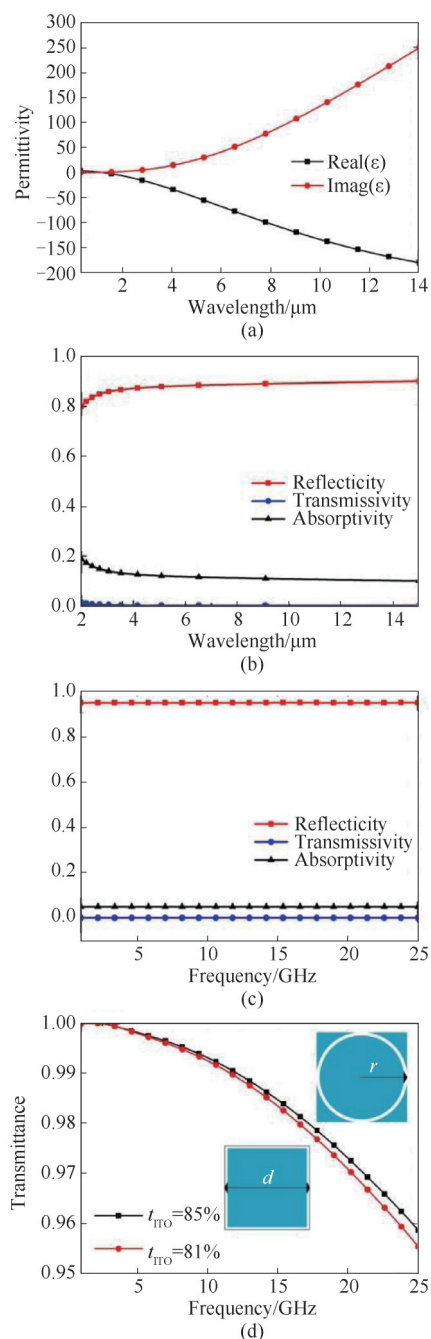


图2 ITO薄膜的红外与微波性能 (a)在红外频段的介电常数实部与虚部, (b)在红外频段的反射率、透射率与吸收率, (c)在微波频段的反射率、透射率与吸收率, (d)方环与圆形频率选择表面的微波透射率

Fig. 2 The infrared and microwave properties of ITO continuous film (a) The permittivity in infrared wavelength, (b) The transmissivity, absorptivity, and reflectivity in infrared spectrum, (c) The transmissivity, absorptivity, and reflectivity in microwave, (d) The transmittance characteristic of the square and ring pattern frequency selective surface in microwave

用于制备 IRSL、MAL 和 MRL 的 ITO 连续膜的方块电阻分别为 11 Ω/sq、26 Ω/sq (MAL1) 和 54 Ω/sq

(MAL2)、11 Ω/sq。采用粒子群优化算法^[27]得到超材料兼容隐身结构的尺寸为: $d_1 = 1.9$ 、 $d_2 = 9.9$ 、 $d_3 = 4.95$ 、 $p = 31$ 、 $l_1 = 24.5$ 、 $w_1 = 2.3$ 、 $l_2 = 4.7$ 、 $w_2 = 0.5$ 、 $p_1 = 0.5$ 、 $r = 0.225$ mm (图3所示)。在垂直入射, 电场偏振方向沿 y 轴时, 优化超材料微波吸收性能的目标函数如下:

$$FF = - \int_{f=2\text{GHz}}^{f=18\text{GHz}} (A(f) - 0.9) \cdot A_1(f) df, \quad (3)$$

$$A_1 = \begin{cases} 0, & A(f) \geq 0.9 \\ 1, & A(f) < 0.9 \end{cases}, \quad (4)$$

式(3)中, $A(f)$ 为超材料结构在目标设定频率范围的吸收率, 以最低吸收效率高于 0.9 为判断条件, 即 $A(f) \geq 0.9$ 。

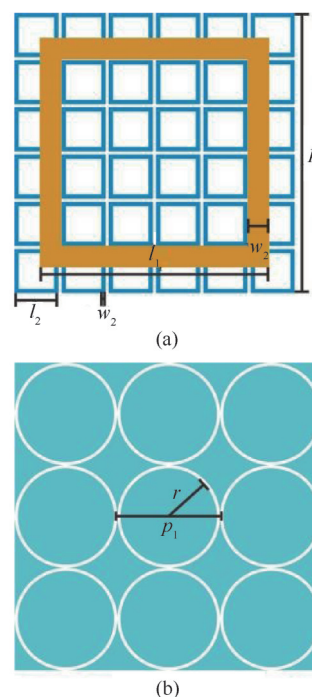


图3 雷达/红外兼容隐身超材料结构的各功能层结构图 (a)微波吸收层1和微波吸收层2的单元结构图, (b)红外隐身层的单元结构图

Fig. 3 The structure diagram of the functional layers of radar/infrared compatible stealth metamaterial structure (a) The unit structure of the microwave absorption layer1 (MAL1) and microwave absorption layer2 (MAL2), (b) the unit structure of the infrared stealth layer (IRSL)

本文仿真了结构在正入射情况下的吸波性能, 电场偏振方向沿 y 轴, 结果如图4所示。仿真结果表明该结构在 2~18.6 GHz 宽带范围实现了超过 90% 的吸收率 (黑色曲线)。为了阐明每一层吸波结构对微波损耗的贡献, 仿真了结构缺失 MAL1 和 MAL2

时的吸波性能,可以看出MAL1主要吸收2~6 GHz的微波,而MAL2主要吸收8~18 GHz波段的微波。

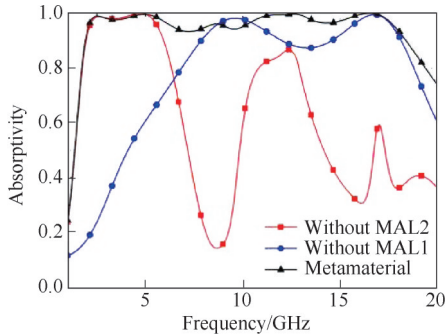


图4 雷达/红外兼容隐身超材料的模拟吸波性能, MAL1和MAL2两层对微波损耗的贡献

Fig. 4 The simulated microwave absorptivity of the structure and the contribution of MAL1 and MAL2 for the microwave absorptivity

微波吸收层的结构单元具有中心对称性,对入射电场偏振方向具有不敏感的优势,在微波正入射时,吸波结构对两种偏振态(E_x 和 E_y)吸波性能基本相同,如图5所示。入射角小于 30° 时,超材料吸

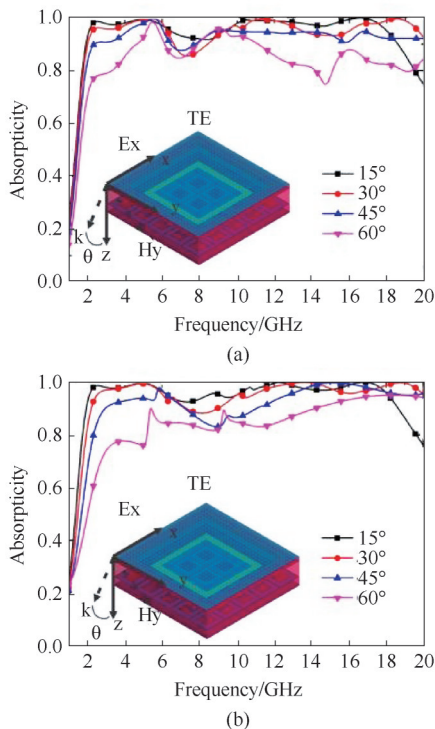


图5 雷达/红外兼容隐身超材料结构在 0° 至 60° 斜入射状态下的模拟吸波性能 (a)横电波(TE)模式, (b)横磁波(TM)模式

Fig. 5 The simulated microwave absorption spectrum of the structure under incident angles of 0° and 60° (a) TE mode, (b) TM mode

波结构对横电波(TE)和横磁波(TM)两种模式的吸波特性基本一致,且仍可以保持大于90%的吸波效率。随着俯仰角的增大,两种模式的吸波性能出现差异。TM模式时,吸波结构在低频的吸收性能显著降低,TE模式时,吸波结构在整个频段的吸波性能均有降低。在入射角为 60° 时,吸波结构也能保持约80%的吸波效能。

为了解释宽频吸波机理,本文给出了2.7 GHz、9.2 GHz和16.8 GHz三个频率处的电场、磁场和功率损耗密度的分布图。如图6(a)和(d)所示,在频率为2.7 GHz处,电场和磁场主要分布在微波吸收层1的方环附近,表明大尺寸的微波吸收层1的方环结构主要与低频微波相互作用,产生谐振吸收。而在频率为9.2 GHz时,电场和磁场在微波吸收层1和微波吸收层2的方环结构附近均有分布(图6(b)和(e))。可以看出这两层微波吸收层结构对中间频段的微波吸收均有贡献。而当频率为16.8 GHz时,电场和磁场集中分布在微波吸收层2附近(图6(c)和(f)),表明微波吸收层2主要吸收高频微波。由图6(g)、(h)、(i)可知,功率损耗主要分布在ITO方环的边缘,吸波结构谐振吸收的电磁波能量主要是被ITO方环的欧姆损

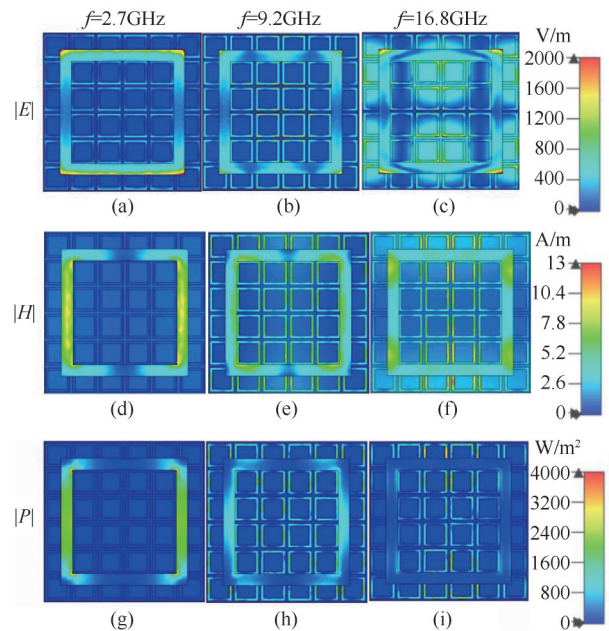


图6 垂直入射下的吸波层在2.7 GHz, 9.2 GHz和16.8 GHz时的模拟分布情况 (a)-(c)模拟电场分布, (d)-(f)磁场分布, (g)-(i)功率损耗密度分布

Fig. 6 Top view of the simulated distribution of microwave absorption layers at 2.7 GHz, 9.2 GHz, and 16.8 GHz under vertical incidence (a)-(c) simulated electric field, (d)-(f) magnetic field, (g)-(i) power loss density distribution.

耗和PET薄膜的介电损耗耗散掉。

2 实验结果

通过上述设计及仿真分析获得了一种具有宽带强吸波功能和低红外发射率的超材料吸波结构,为了证明设计的合理性及正确性,本文对上述仿真结果进行了实验验证。利用激光刻蚀制备出红外隐身层和微波吸收层,再将厚度不同的PMI泡沫插入各结构层间,最后得到与设计一致的超材料吸波结构。该结构设计尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 17.2\text{ mm}$,实际得到的样品厚度为 17.5 mm ,如图7中插图为样品实物照片,由于ITO/PET薄膜可见透光率良好,样品基本呈现PMI泡沫的颜色。用弓形法测试样件在 $2\sim 4\text{ GHz}$, $4\sim 8\text{ GHz}$, $8\sim 18\text{ GHz}$ 的吸波性能,测试结果如图7所示。与仿真结果基本一致,制备的吸波结构在 $2.7\sim 18\text{ GHz}$ 频段的吸收率高于90%。

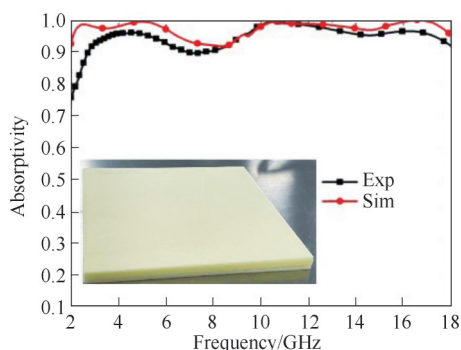


图7 雷达/红外兼容隐身超材料结构在正入射时的仿真与实验吸波曲线,插图为样品的照片

Fig. 7 The simulated (Sim.) and experimental (Exp.) microwave absorption spectrum of the structure at normal incidence

图8为斜入射时,超材料吸波结构在两种模式下的吸波性能(实验结果与仿真结果的对比)。从图8(a)中可以看出,在TE模式时,实验结果与仿真结果的一致性较好。从图8(b)中可以看出,在TM模式,当小角度入射时(30° 以内),实验结果与仿真结果比较一致;在大角度入射时(60°),实验结果的吸波效能差于仿真结果。

最后,通过热红外相机(PI640, Optris Inc.)测量超材料吸波结构的发射率。如图9所示,将红外隐身层和大小相同的对照组样件(方阻相同的ITO连续膜,PET薄膜)放在 70°C 的加热板上。红外隐身层表面的红外温度为 39°C ,红外发射率(ε)为0.27;对照组ITO连续膜和PET薄膜的红外温度分

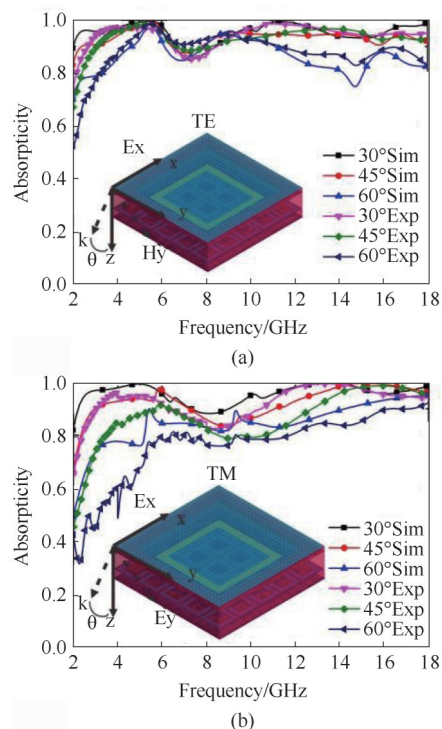


图8 雷达/红外兼容隐身超材料结构在 30° 至 60° 斜入射后的实验结果 (a)横电波(TE)模式,(b)横向磁极化(TM)模式

Fig. 8 The experimental microwave absorption spectrum of the structure under incident angles of 30° and 60° (a) TE mode, (b) TM mode.

别为 31°C ($\varepsilon = 0.15$)和 68°C ($\varepsilon = 0.95$)。可以看出,用ITO制备成频率选择表面结构的红外隐身层相比于PET薄膜,可以显著降低红外温度。按照式(2)计算得到的红外发射率的理论计算值为0.23,实验测量的发射率值为0.27,这是由于实际ITO薄膜的电导率不均匀所致。

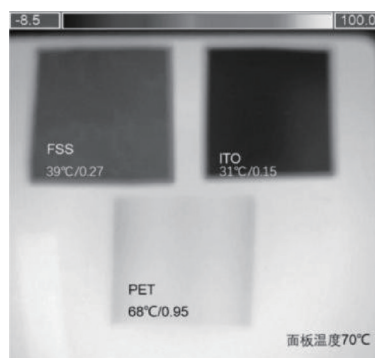


图9 雷达/红外兼容隐身超材料结构在 70°C 温度下的红外热像图

Fig. 9 The infrared thermogram of radar/infrared compatible stealth metamaterial structure under 70°C

3 结论

本文成功设计并制备了一种能够实现雷达/红外兼容隐身的超材料结构,并对其各项性能进行了实验验证。实验结果表明本结构在 2.7~18 GHz 微波吸收率大于 90%,在 8~14 μm 红外波段的发射率低于 0.3。另外本结构具有良好的极化稳定性,当电磁波斜入射角小于 60° 时也能保持良好的宽带吸波效能。该结构质量较轻,密度仅为 35 kg/m^3 ,便于贴附在装备表面使用。在武器装备多谱段隐身领域、微波屏蔽领域具有重要应用价值。

References

- [1] Qi D, Wang X, Cheng Y Z, *et al.* Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications [J]. *Optical Materials*, 2016, **62**:52-56.
- [2] FENG Li-Li, LIU Yi-Man, YAO Lin, *et al.* Infrared stealth and multi-band compatible stealth materials [J]. *Progress in chemistry*, (冯利利, 刘一曼, 姚琳, 等。基于红外隐身及多波段兼容隐身材料。化学进展) 2021, **33**(6):1044-1058.
- [3] Pang Y Q, Li Y F, Yan M B, *et al.* Hybrid metasurfaces for microwave reflection and infrared emission reduction [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(9):11950-11958.
- [4] Mao Z P, Wang W, Liu Y, *et al.* Infrared stealth property based on semiconductor (M)-to-metallic (R) phase transition characteristics of W-doped VO_2 thin films coated on cotton fabrics [J]. *Thin Solid Films*, 2014, **558**:208-214.
- [5] Zhong S M, Wu L J, Liu T J, *et al.* Transparent transmission-selective radar-infrared bi-stealth structure [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(13):16466-16476.
- [6] Zhang J K, Liu R H, Zhao D P, *et al.* Design, fabrication and characterization of a thin infrared-visible bi-stealth film based on one-dimensional photonic crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2019, **9**(1):195-202.
- [7] Phan L, Walkup W G, Ordinario D D, *et al.* Reconfigurable infrared camouflage coatings from a cephalopod protein [J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(39):5621-5625.
- [8] Fu Q, Wang W W, Li D L, *et al.* Research on surface modification and infrared emissivity of In_2O_3 : W thin films [J]. *Thin Solid Films*, 2014, **570**:68-74.
- [9] Jang T, Youn H, Shin Y J, *et al.* Transparent and flexible polarization-independent microwave broadband absorber [J]. *ACS Photonics*, 2014, **1**(3):279-284.
- [10] Ma Y, Wang J B, Shi L H, *et al.* Ultra-wideband, optically transparent, and flexible microwave metasurface absorber [J]. *Optical materials express*, 2021, **11**(7):2206-2218.
- [11] HOU Jian-Zhang, GU De-En, WANG Tao, *et al.* A wide-angle and polarization insensitive highly-tunable infrared metamaterial perfect absorber [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (侯剑章, 顾德恩, 王涛, 等。一种宽角度极化不敏感的高可调谐红外超材料完美吸波体。红外与毫米波学报) 2015, **34**(4):406-410.
- [12] TONG Yan-Qun, WANG Shi-Yan, SONG Xiao-Xian, *et al.* Multi-band tunable terahertz absorber based on metamaterial [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (佟艳群, 汪诗妍, 宋效先, 等。基于超材料的多频带可调谐太赫兹吸收器。红外与毫米波学报) 2020, **39**(6):735-741.
- [13] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20):207402.
- [14] Ding F, Cui Y X, Ge X C, *et al.* Ultra-broadband microwave metamaterial absorber [J]. *Applied Physical Letter*, 2012, **100**(10):103506.
- [15] Zheng Y L, Chen K, Jiang T, *et al.* Multi-octave microwave absorption via conformal metamaterial absorber with optical transparency [J]. *Journal of physics D-Applied physics*, 2019, **52**(33):335101.
- [16] Li L, Lv Z Y. Ultra-wideband polarization-insensitive and wide-angle thin absorber based on resistive metasurfaces with three resonant modes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**(5):055104.
- [17] Zhang C, Cheng Q, Yang J, *et al.* Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption [J]. *Applied Physical Letter*, 2017, **110**(14):143511.
- [18] Chen K, Cui L, Feng Y J, *et al.* Coding metasurface for broadband microwave scattering reduction with optical transparency [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(5):5571-5579.
- [19] Sheokand H, Ghosh S, Singh G, *et al.* Transparent broadband metamaterial absorber based on resistive films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **122**(10):105105.
- [20] Wu Y H, Wang J J, Lai S F, *et al.* A transparent and flexible microwave absorber covering the whole WiFi waveband [J]. *AIP Advances*, 2019, **9**(2):025309.
- [21] Zhou Q, Yin X W, Ye F, *et al.* Optically transparent and flexible broadband microwave metamaterial absorber with sandwich structure [J]. *Applied Physics A*, 2019, **125**(2):131.
- [22] Zhang C L, Wu X Y, Huang C, *et al.* Flexible and transparent microwave-infrared bistealth structure [J]. *Advanced Materials Technologies*. 2019, **4**(8):1900063.
- [23] LI Jun-Zhe, TIAN Hao, LIU Hai-Tao, *et al.* Design and verification of a radar-infrared stealth-compatible material based on metamaterial [J]. *Journal of Functional Materials*(李君哲, 田浩, 刘海韬, 等。一种基于超材料的雷达红外兼容隐身材料设计与验证。功能材料) 2017, **48**(05):5137-5143.
- [24] Yang C, Chen S, Niu S, *et al.* Transparent broadband microwave metamaterial absorber with thermal insulating and soundproof [J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, **17**(2):85-89.
- [25] Du Z Q, Liang J G, Cai T, *et al.* Ultra-light planar meta-absorber with wideband and full-polarization properties [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(5):6434-6444.
- [26] Wen K H, Han T C, Lu H P, *et al.* Experimental demonstration of an ultra-thin radar-infrared bi-stealth absorber [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(6):8872-8879.
- [27] Yang C, Niu S, CHANG Hui-Cong, *et al.* Thermal infrared and broadband microwave stealth glass windows based on multi-band optimization [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(9):13610-13623.