

太赫兹波段双宽带极化无关超材料吸波体的设计研究

王连胜¹, 夏冬艳², 丁学用¹, 汪源¹, 何彦廷¹

(1. 三亚学院理工学院, 海南 三亚 572022; 2. 三亚学院财经学院, 海南 三亚 572022)

摘要: 设计了一种太赫兹波段的雪花状双宽带极化无关超材料吸波体。采用时域有限元积分的方法对结构单元的电磁特性进行计算, 结果表明结构单元在 0.9~1.2 THz 之间出现了两个吸收带, 吸收率 90% 以上的频带分别是 0.9642~1.002 THz 和 1.096~1.1316 THz, 带宽分别为 37.8 GHz 和 35.6 GHz; 通过对其表面电流分布进行分析, 发现其双宽带吸收特性是由不同的谐振频率叠加产生的; 通过对结构单元在不同级对称性破缺下的吸收特性进行计算分析, 发现结构单元的双宽带吸收特性对对称性破缺不敏感。

关键词: 太赫兹; 双宽带; 极化无关; 超材料吸波体; 对称性破缺效应

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2016)07-0607-05

The Design Research of Dual Wideband Polarization-independent Metamaterials Absorber in the THz Band

WANG Liansheng¹, XIA Dongyan², DING Xueyong¹, WANG Yuan¹, HE Yanting¹

(1. Science and polytechnic department, Sanya University, Sanya 572022, China;

2. Finance and economics department, Sanya University, Sanya 572022, China)

Abstract: The snowflake dual wideband polarization-independent metamaterials absorber in the THz band was designed in this paper. The electromagnetic properties of structure unit was calculated by using time-domain finite integral method, and the results indicated that two absorption bands appeared between 0.9-1.2 THz, the two absorption bands with the absorption larger than 90% were 0.9642-1.002 THz and 1.096-1.1316 THz, and the bandwidth was 37.8 GHz and 35.6 GHz respectively. By monitoring the surface current distribution, it indicated that its wideband absorption characteristic was determined by the overlay of different resonance frequencies. By measuring the absorption characteristic of structure unit under different levels of symmetry broken, it indicated that its dual wideband absorption characteristic was not sensitive with symmetry-broken.

Key words: THz, dual wideband, polarization-independent, metamaterials absorber, symmetry-broken effect

0 引言

超材料吸波体是一种结构型吸波体, 由周期性吸收单元组成吸波阵列, 每个吸波单元一般是三明治结构: 顶层的金属图案、中间层的介质基板以及底层的金属板^[1-2]。Landy 于 2008 年首次提出了基于单个电环谐振器和短导线组合而成的超材料吸波体, 金属结构的谐振会使得超材料吸波体中局域场急剧增强, 在达到阻抗匹配的情况下, 具有损耗的电介质会对电磁波产生强损耗吸收^[3]。此后, 超材料吸波体的设计从微波波段^[4-5]进一步拓展到太赫兹频段^[6-7]以及红外波

段^[8-9]和光波段^[10-12], 从单频带吸收扩展到双频带^[13-15]、三频带^[16-18]、宽带^[19-20]以及可调^[21]吸收。基于人工结构的超材料吸波体成功地突破了 Terahertz (太赫兹) “禁带”, 为超材料吸波体在医学、生物、军事以及热成像仪等领域和设备上的应用提供了广阔的前景。

目前, 设计太赫兹波段宽带超材料吸波体的方法主要有 3 种, 一种是文歧业^[22]、He^[23]和 Van Tuong Pham^[24]等提出的利用多层金属与介质层交替叠加实现宽带吸收; 一种是 Grant^[25]、Ye^[26]和 Wang^[27]等提出的在厚度方向上多层金属嵌套实现宽带吸收; 最后一种是 Huang^[28], Wang^[29], Cheng^[30]和 Wen^[31]等提出

收稿日期: 2015-10-23; 修订日期: 2016-03-11.

作者简介: 王连胜 (1982-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事超材料方面的研究。E-mail: wlswws1982@126.com.

基金项目: 海南省自然科学基金项目 (114015); 海南省自然科学基金项目 (614252)。

的平面内不同尺寸金属单元排列来实现宽带吸收。其中,前两种方法要求各层严格对准,对工艺要求高,制备过程复杂,加工成本高。第3种方法仅设计3层结构,在工艺上容易实现,而且成本低,但是Huang, Wang 等人设计的结构是通过平面内不同尺寸金属单元排列实现的,吸收特性是极化相关的。在许多实际的应用中,不仅要求吸波体有大的吸收带宽,而且要求对极化方向不敏感。基于此,结合Zhao X P教授课题组提出的具有各向同性结构的树枝状超材料及其符合化学上自然生长的制备方法^[32],本文设计了太赫兹波段的雪花状双宽带极化无关电磁超材料吸波体,结构单元在0.9~1.2 THz 之间出现了两个宽带吸收峰,由于结构单元的旋转对称性,故其吸收特性是极化无关的;由于结构单元的金属单元是单一尺寸的,故其加工成本更低。

1 模型设计

本文设计的太赫兹波段雪花状双宽带极化无关超材料吸波体结构单元模型如图1所示,正视图如图2所示。结构单元由3层材料组成:第一层为雪花状金属铜层(电导率为 $5.9\times10^7\text{ S/m}$),厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$;第二层为FR4介质层(正切损耗角为0.025,介电常数为4.9),厚度为 $500\text{ }\mu\text{m}$;第三层为金属铜基板,厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。结构单元的有关尺寸为: $a=800\text{ }\mu\text{m}$, $b=200\text{ }\mu\text{m}$, $c=200\text{ }\mu\text{m}$, $d=10\text{ }\mu\text{m}$, $\theta=60^\circ$,上述结构单元的厚度及结构尺寸是经优化后得出的。

采用商业三维电磁仿真软件Microwave studio CST对图1所示的模型按上述参数进行建模,仿真过程中采用波导端口激励,周期边界条件设置为 x 、 y 方向,其中 x 方向为完美磁边界(PMC), y 方向为完美电边界(PEC), z 方向设置为激励入射端口,采用时域求解器对结构单元的电磁参数进行计算。

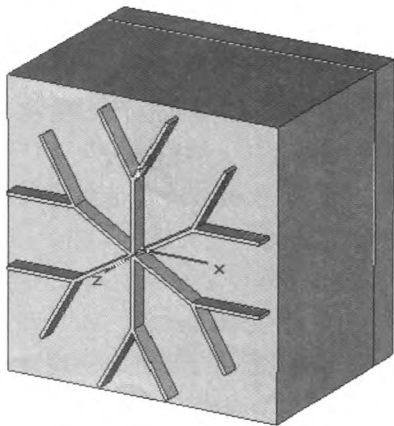


图1 结构单元示意图
Fig.1 The diagram of structure unit

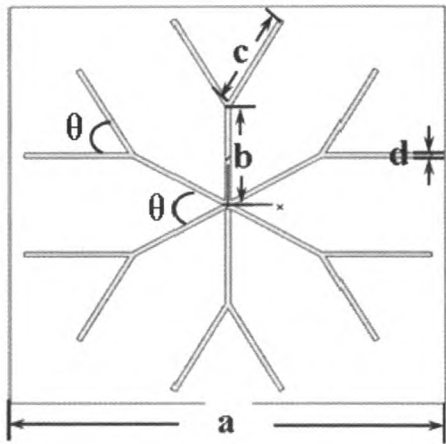


图2 结构单元正视图
Fig.2 The front view of structure unit

2 结果分析与讨论

利用Microwave Studio CST的时域求解器可以计算出结构单元与频率相关的 S 参数(S_{11} , S_{21}),根据吸收率 $A(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$,由于结构单元第3层介质板为金属铜基板,故 $S_{21}=0$,计算得结构单元在电磁波垂直入射下的吸收率曲线如图3所示。从图3可以看出,结构单元在0.9~1.2 THz 之间出现了2个吸收峰,吸收率90%以上的频带分别是0.9642~1.002 THz和1.096~1.1316 THz,带宽分别为37.8 GHz和35.6 GHz。由于结构单元的旋转对称性,故其双宽带吸收特性是极化无关的。

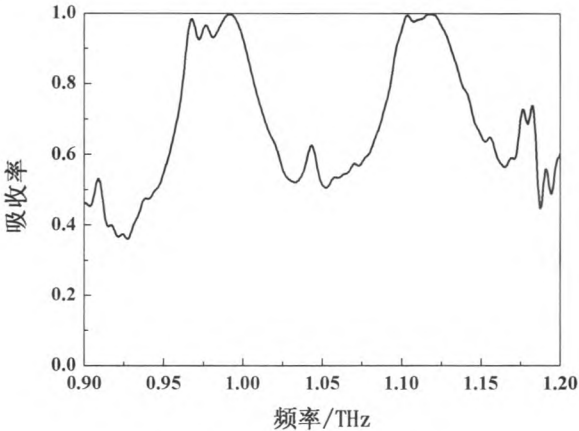


图3 结构单元的吸收率曲线
Fig.3 The absorption rate curve of structure unit

根据测得的 S 参数,采用 S 参数反演法计算了超材料吸波体结构单元的归一化阻抗实部,结果如图4所示,从图4可以看出,归一化阻抗实部在0.9642~1.002 THz和1.096~1.1316 THz之间接近于1,根据超材料吸波体归一化阻抗实部的计算公式 $Z_2=Z_1/Z_0$,其中 Z_2 为超材料吸波体的归一化阻抗实部, Z_1 为超材

料吸波体的阻抗实部, Z_0 为自由空间的阻抗实部, 当超材料吸波体的归一化阻抗实部接近 1 时, 超材料吸波体的阻抗实部与自由空间的阻抗实部接近, 表明超材料吸波体与自由空间达到了良好的阻抗匹配, 吸收率较高。

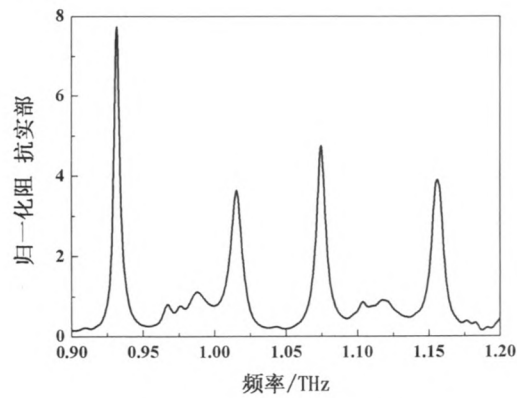


图4 归一化阻抗实部曲线

Fig.4 The curve of normalized impedance real part
为分析超材料吸波体结构单元宽带吸收峰出现的原因, 在吸收带内随机选取 0.967 THz、0.989 THz、

1.101 THz 和 1.114 THz 四个频率点处结构单元的表面电流分布进行分析, 结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 0.967 THz、0.989 THz 和 1.101 THz 处表面电流主要集中于相应图中虚线框内的区域; 1.114 THz 处的表面电流均匀分布于雪花状金属结构层。这说明不同的谐振频率是由结构单元不同的部分引起的。由此可见, 结构单元在电磁波的作用下会在不同频率处产生谐振, 多个谐振频率叠加产生宽带吸收。

超材料吸波体的结构尺寸对其吸收特性有重要影响, 为分析超材料吸波体的结构尺寸对其吸收特性的影响, 计算了不同线宽下结构单元的吸收率, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 当 d 从 $10\text{ }\mu\text{m}$ 到 $50\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐增加时, 结构单元吸收率 90% 以上的带宽逐渐减少。分析原因主要是随着宽度 d 的增加, 结构单元对电磁波的反射面增加, 对电磁波的反射增强, 导致结构单元在一些频率处与自由空间的阻抗匹配程度减小, 进而对电磁波的吸收率减小, 故随着宽度 d 的增加, 结构单元吸收率 90% 以上的带宽逐渐减小。

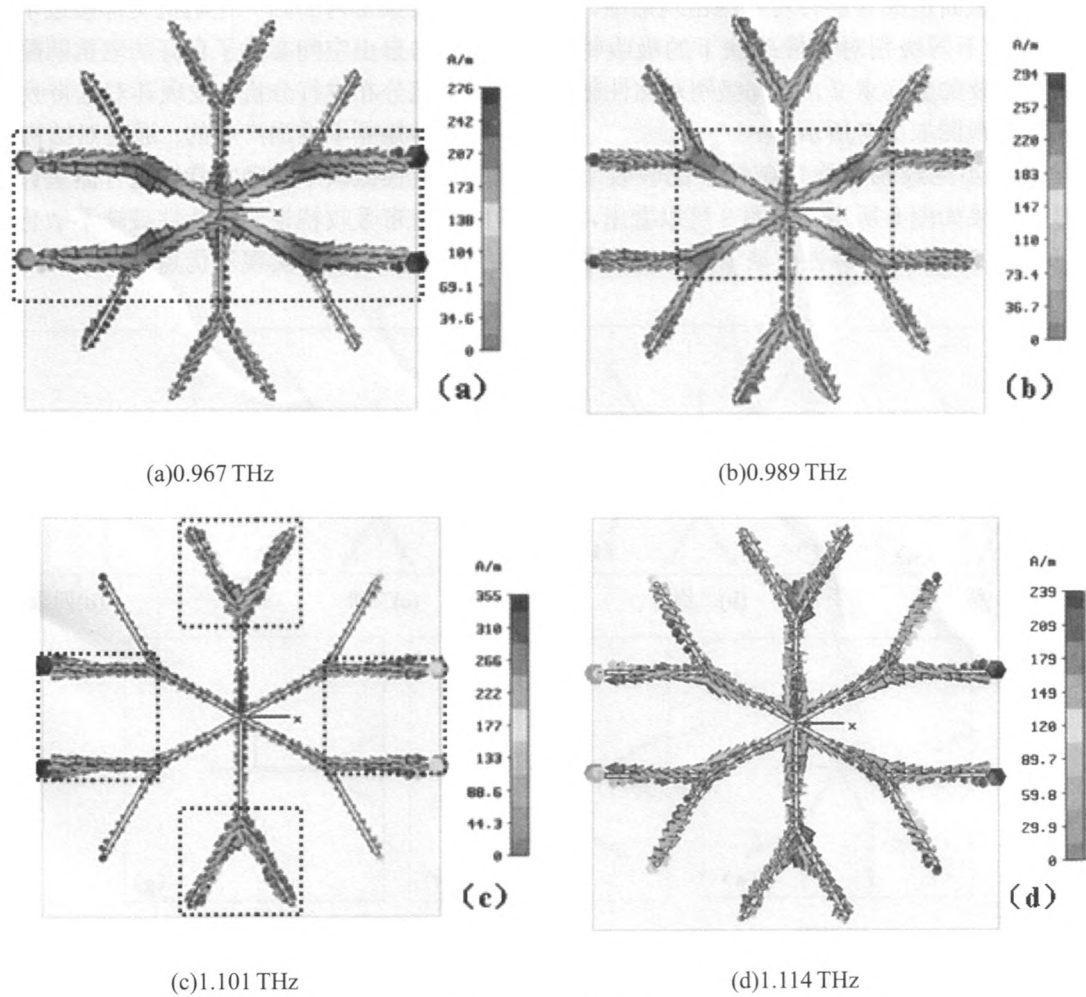


图5 表面电流分布

Fig.5 The surface current distribution

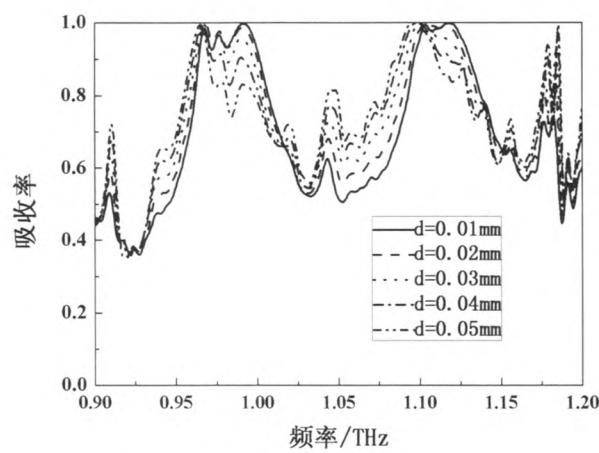


图 6 不同线宽下结构单元的吸收率曲线

Fig.6 The absorption rate curves of structure unit with different line width

3 对称性破缺效应研究

由图 1 可以看出，结构单元具有较高的旋转对称性，而采用物理刻蚀或者化学沉积的方法在制备该结构单元过程中，不可避免地会造成雪花状金属铜层中某些部分的缺失，从而造成其旋转对称性出现破缺，因此对结构单元在不同级别对称性破缺下的吸收特性进行研究具有重要的实际意义，不同级别对称性破缺下结构单元的正视图如图 7 所示。

对结构单元在不同级别对称性破缺下的吸收率进行测量计算，结果如图 8 所示。从图 8 可以看出，结构单元在 1、2、3、4 级对称性破缺下对太赫兹电

磁波的吸收特性没有发生明显变化；在 5 级、6 级和 7 级对称性破缺下结构单元的双宽带吸收特性消失，只出现了双吸收峰，分析原因主要是随着对称性破缺程度的加大，引起谐振的结构单元组成部分减少，从而造成谐振频率减少，因而双宽带吸收峰逐渐变窄，形成双吸收峰。上述结果说明结构单元的双宽带吸收特性对对称性破缺不敏感，有利于实际实现。

4 总结

自然界中很多材料在太赫兹频段没有电磁响应，太赫兹超材料的出现为太赫兹技术的发展和應用带来了新的机遇。本文设计了一种太赫兹波段的雪花状双宽带极化无关超材料吸波体，结构单元由 3 层材料组成：顶层的雪花状金属层，中间的 FR4 介质层以及底层的金属铜基板。采用时域有限元积分的方法对结构单元的电磁特性进行计算，结果表明结构单元在 0.9~1.2 THz 之间出现了两个吸收带，吸收率 90% 以上的频带分别是 0.9642~1.002 THz 和 1.096~1.1316 THz，带宽分别为 37.8 GHz 和 35.6 GHz；计算表明，两个吸收频带内的归一化阻抗实部接近于 1，表明结构单元与自由空间实现了良好的阻抗匹配；通过对其表面电流分布进行分析，发现其双宽带吸收特性是由不同的谐振频率叠加产生的；通过对结构单元在不同级别对称性破缺下的吸收特性进行测量计算，结构单元的双宽带吸收特性对对称性破缺不敏感。结构单元具有简单、较容易实现等优点。

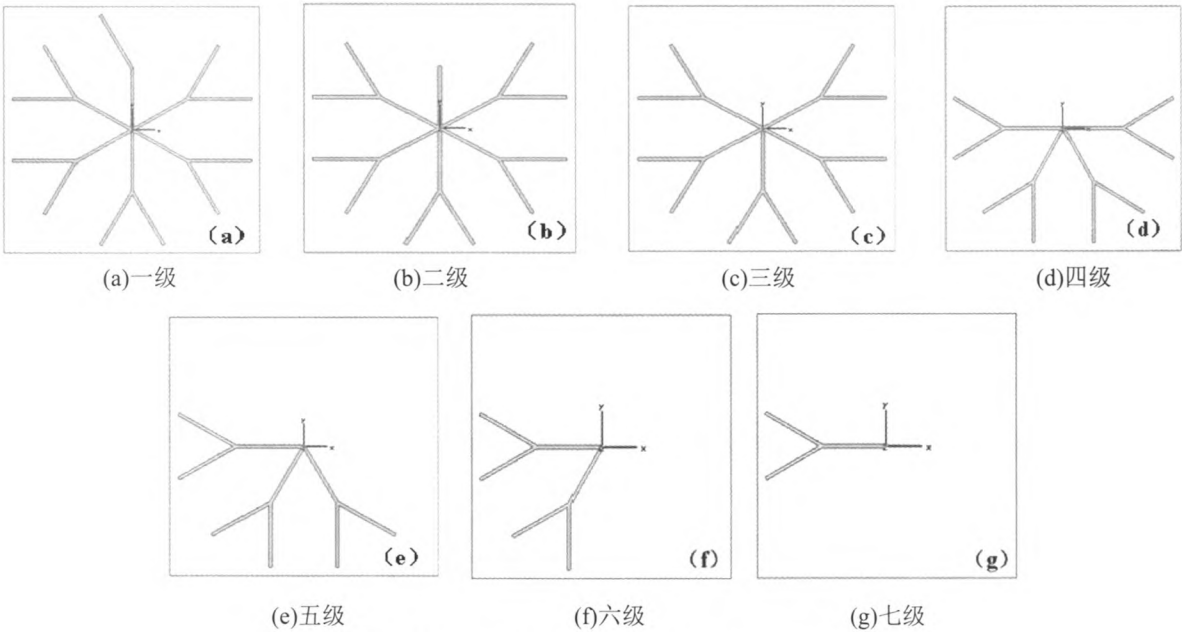


图 7 不同级别对称性破缺下结构单元的正视图

Fig.7 The front view of structure unit under different levels of symmetry broken

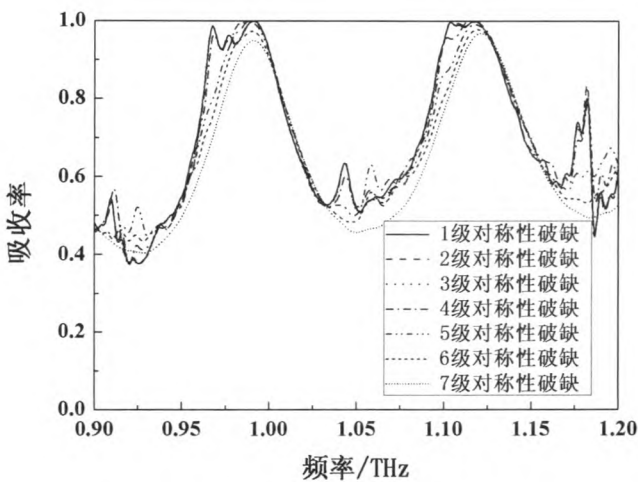


图8 不同级别对称性破缺下结构单元的吸收率

Fig.8 The absorption rate of structure unit under different levels of symmetry broken

参考文献:

[1] 张洪欣, 徐楠, 黄丽玉, 等. 电磁异向介质在阵列天线中的应用研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 673-677.
ZHANG Hongxin, XU Nan, HUANG Liyu, et al. Application of metamaterials in antenna array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(4):673-677.

[2] 徐含乐, 祝小平, 周洲, 等. 基于双向耦合补偿的超材料传输/反射法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(1): 40-46.
XU Hanle, ZHU Xiaoping, ZHOU Zhou, et al. A metamaterials transmit/reflection method based on bi-directional coupling compensation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(1): 40-46.

[3] Landy N I, Saiuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Phys. Rev. Lett, 2008, 100(20): 207402(1-4).

[4] CHENG Y Z, YANG H L, CHENG Z Z, et al. Perfect metamaterial absorber based on a split-ring-cross resonator[J]. Appl. Phys. A, 2011, 102(1): 99-103.

[5] WANG B, Koschny T, Soukoulis C M. Wide-angle and polarization independent chiral metamaterials absorbers[J]. Phys. Rev. B, 2009, 80: 033108(1-9).

[6] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization[J]. Phys. Rev.B, 2008, 78(24): 241103(R).

[7] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. Opt. Lett, 2011, 36(8): 1524-1526.

[8] LIU N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. Nano. Lett, 2010, 10(7): 2342-2348.

[9] LIU X L, Starr T, Starr A F, et al. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance[J]. Phys. Rev. Lett, 2010, 104(20): 207403 (1-6).

[10] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, et al. Broadband

polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers[J]. Nat. Commun, 2011, 57(2): 517-528.

[11] WANG Y, SUN T Y, Paudel T, et al. Metamaterial-plasmonic absorber structure for high efficiency amorphous silicon solar cells[J]. Nano. Lett, 2012, 12(1): 441-445.

[12] WANG J Q, FAN C Z, DING P, et al. Tunable broad-band perfect absorber by exciting of multiple plasmon resonances at optical frequency[J]. Opt. Express, 2012, 20(14): 14871-14878.

[13] WEN Q Y, ZHANG H W, XIE Y S, et al. Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization[J]. Appl. Phys. Lett, 2009, 95: 241111.

[14] LEE J, LIM S. Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance [J]. Electron. Lett, 2011, 47(8): 8-9.

[15] 沈晓鹏, 崔铁军, 叶建祥. 基于超材料的微波双波段吸收器[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 058101(1-5).
SHEN Xiao-peng, CUI Tie-jun, YE Jian-xiang. Dual band metamaterials absorber in microwave regime[J]. Acta Phys.Sin, 2012, 61(5): 058101(1-5).

[16] SHEN X P, CUI T J, ZHAO J M, et al. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber[J]. Opt. Express, 2011, 19(10): 9401-9407.

[17] LI L, YANG Y, LIANG C. A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes[J]. J. Appl. Phys, 2011, 110: 063702.

[18] SHEN X P, YANG Y, ZANG Y Z, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: design, experiment, and physical interpretation[J]. Appl. Phys. Lett, 2012, 101: 154102.

[19] 保石, 罗春荣, 赵晓鹏, 等. 基于树枝结构单元的超材料宽带微波吸收器[J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3187-3191.
BAO Shi, LUO Chun-rong, ZHAO Xiao-peng, et al. Broadband metamaterials absorber based on dendritic structure[J]. Acta Phys.Sin, 2010, 59 (5): 3187-3191.

[20] DING F, CUI Y X, GE X C, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. Appl.Phys. Lett, 2012, 100: 103506.

[21] YANG Y J, HUANG Y J, WEN G J, et al. Tunable broadband metamaterials absorber consisting of ferrite slabs and a copper wire[J]. Chin. Phys. B, 2012, 21(3): 038501.

[22] 莫漫漫, 文歧业, 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: 237801(1-7).
MO Man-man, WEN Qi-ye, CHEN Zhi, et al. A polarization-independent and ultra-broadband terahertz metamaterials absorber studied based on circular-truncated cone structure[J]. Acta Phys. Sin, 2013, 62(23): 237801(1-7).

(下转第 621 页)

参考文献:

- [1] 周锡钊, 张伯良. 结构热实验技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1993: 44-69.
ZHOU Xiyi, ZHANG Boliang. *Structural Thermal Experimental Technique*[M]. Beijing: Aerospace Press, 1993: 44-69.
- [2] DEANGELIS V Michael, ANDERSON KARL F. Thermal-structural test facilities at NASA dryden[R]. NASA-1992-Technical Memorandum 104249, 1992.
- [3] APPEL G, BAR K, KNAPP T. Thermomechanical test facility of HERMES Winglet Box[R]. AIAA-1993-5087, 1993.
- [4] 任青梅. 热/结构试验技术研究进展[J]. 飞航导弹, 2012(2): 91-96.
REN Qingmei. The recent trends of thermal-test technique of structure[J]. *Winged Missiles Journal*, 2012(2): 91-96.
- [5] 夏吝时, 齐斌, 田宁, 等. 小尺寸高温透波盖板双温区边界隔热性能试验研究[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(2): 196-200.
XIA Linshi, QI Bin, TIAN Ning, et al. Experiment research on heat-shielding capability of small-size high temperature wave-transparent cover board in dual temperature area boundary conditions[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, 32(2): 196-200.
- [6] 刘守文, 尹晓芳, 裴一飞, 等. 基于蒙特卡罗方法的红外灯热流分布研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 608-614.
LIU Shouwen, YIN Xiaofang, PEI Yifei, et al. The study of heat flux distribution for infrared lamp based on monte carlo method[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(2): 608-614.
- [7] 王智勇, 黄世勇, 巨亚堂. 石英灯辐射加热试验热流分布优化研究[J]. 强度与环境, 2011, 38(2): 18-23.
WANG Zhiyong, HUANG Shiyong, JU yatang. The quartz radiation heating system heat flux distribution optimization study[J]. *Structure and Environment Engineering*, 2011, 38(2): 18-23.
- [8] HUDSON L. Thermal-mechanical testing of hypersonic vehicle structures[R]. NASA-2008-13159, 2008.
- [9] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 157-165.
TAN Heping, XIA Xialin, LIU Linhua, et al. *Numerical Calculation of Infrared Radiation Characteristics and Transmission*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 157-165.
- [10] 王晓婷, 张宏波, 杨海龙, 等. 耐高温隔热材料组合结构模拟研究与试验验证[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(1): 92-96.
WANG Xiaoting, ZHANG Hongbo, YANG Hailong, et al. High temperature resistant heat insulating material simulation and experimental verification[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014, 44(1): 92-96.
- [11] 夏吝时, 齐斌, 田宁, 等. 石英灯电热特性建模分析及测试方法研究[J]. 红外技术, 2015, 37(10): 877-882.
XIA Linshi, QI Bin, TIAN Ning, et al. Study on modeling analysis and testing method of electro-thermal properties quartz lamp[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 877-882.
- [12] 万强, 贾阳, 刘敏. 调节红外灯高度改善不均匀度的方法研究[J]. 航天器环境工程, 2003, 20(1): 31-34.
WAN Qiang, JIA Yang, LIU Min. Research on height adjustment of infrared lamps for their uniformity optimization[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2003, 20(1): 31-34.
- [13] 齐斌, 娄文忠, 田宁, 等. 防热试验用高温超声速燃气流场热环境分析[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(1): 30-35.
QI Bin, LOU Wenzhong, TIAN Ning, et al. The thermal-environment analysis of high temperature and supersonic flow field for thermal protection system test[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014, 44(1): 30-35.
- [28] HUANG L, Chowdhury D R, Ramani S, et al. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(2): 154-156.
- [29] WANG G D, LIU M H, HU X W, et al. Broadband and ultra-thin terahertz metamaterial absorber based on multi-circular patches[J]. *Eur. Phys. J. B*, 2013, 86: 304(1-9).
- [30] CHENG Y Z, NIE Y, GONG R Z, et al. A polarization-insensitive and omnidirectional broadband terahertz metamaterial absorber based on coplanar multi-squares films[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 48: 415-421.
- [31] WEN Y Z, MA W, Bailey J, et al. Planar broadband and high absorption metamaterial using single nested resonator at terahertz frequencies [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(6): 1589-1592.
- [32] LIU H, ZHAO X P, YANG Y, et al. Fabrication of infrared left-handed metamaterials via double template-assisted electrochemical deposition[J]. *Adv. Mater.*, 2008, 20(11): 2050-2054.

(上接第 611 页)

- [23] HE S L, CHEN T. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013(3): 757-763.
- [24] Van T P, Park J W, Dinh L V, et al. THz-metamaterial absorbers[J]. *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechno.*, 2013, 1(4): 015001(1-4).
- [25] Grant J, Ma Y, Saha S, et al. Polarization insensitive broadband terahertz metamaterials absorber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(17): 3476-3478.
- [26] YE Y Q, JIN Y, HE S L. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, 27(3): 498-504.
- [27] WANG B X, WANG L L, WANG G Z, et al. Theoretical investigation of broadband and wide-angle terahertz metamaterial absorber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2014, 26(2): 111-114.