

太赫兹宽频带准全向平板超材料吸波体的设计

顾超¹, 屈绍波^{1,2*}, 裴志斌¹, 徐卓², 柏鹏³, 彭卫东³, 林宝勤¹, 周航¹

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051;

2. 西安交通大学 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

3. 空军工程大学 综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心, 陕西 西安 710051)

摘要:在太赫兹波段设计了一种宽频带准全向的平板超材料吸波体. 仿真结果表明, 该吸波体在 4.36~4.91 THz 之间具有极化不敏感和宽入射角的强吸收. 提取的等效阻抗实部表明, 可以通过调节超材料的电磁响应造成吸波体一侧与自由空间近似阻抗匹配、另一侧与自由空间阻抗不匹配, 从而在吸收频带内同时实现反射率和传输率最小、吸收率最大. 仿真的三种不同损耗情况下吸波体的吸收率表明, 吸波体的强吸波特性主要源于金属损耗; 金属无耗时, 基板的介质损耗只能吸收部分能量. 仿真的金属覆层在不同电导率和不同厚度情况下吸波体的吸收率表明, 可以通过选用合适高电导率的金属以及适当减小金属覆层的厚度来加强金属损耗的强度. 该吸波体可能在许多领域具有广泛的应用.

关键词:太赫兹; 宽频带; 极化不敏感; 宽入射角

中图分类号: O441 **文献标识码:** A

Design of a wide-band and quasi-omnidirectional tabulate metamaterial absorber in the terahertz regime

GU Chao¹, QU Shao-Bo^{1,2*}, PEI Zhi-Bin¹, XU Zhuo², BAI Peng³,
PENG Wei-Dong³, LIN Bao-Qin¹, ZHOU Hang¹

(1. College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Key Laboratory of Electronic Materials Research of Ministry of Education,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Research Center of Synthetic Electronic Information System and Electronic countermeasure,
Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: We report the design of a wide-band and quasi-omnidirectional tabulate metamaterial absorber in the terahertz regime. Simulated results indicate that the absorber has a wide-band strong absorption between 4.36 and 4.91 THz, which is polarization insensitive and wide incident angle. Retrieved real parts of the impedance show that by adjusting the electromagnetic response of the metamaterial, the impedance of the absorber could be tuned to match approximatively the impedance of the free space on one side and do not match to the impedance of the free space on the other side, resulting in the minimal reflectance, the minimal transmission and the highest absorbance in the absorption band. Simulated absorbance values under three different loss conditions suggest that high absorbance is mainly due to metallic absorption and dielectric loss can be used to absorb partial energy if there is no metallic absorption. Simulated absorbance values under different electric conductivity values and copper thicknesses suggest that the intensity of metallic absorption can be boosted up by adopting metal of high conductivity or reducing the thickness of metal properly. This absorber may have broad applications in many scientific and technological fields.

Key words: terahertz; wide-band; polarization-insensitive; wide-angle

PACS: 78.20.Ci, 41.20.Jb

引言

电磁超材料^[1]是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料.通过对材料的关键物理尺度上的结构有序设计,可以突破某些自然规律的限制,获得超出自然界固有性质的超常材料功能.利用超材料,诸如负折射^[2-3]等反常的物理现象以及超透镜^[4]、隐身罩^[5]和小型化天线^[6]等新奇的应用已经被实现.改变电磁超材料的几何尺度,可以将其应用拓展到许多频段.目前,科学家们已经实现了工作在无线电波^[7]、微波^[8]、毫米波^[9]、太赫兹^[10]、中红外^[11]、近红外^[12]和近可见光^[13]等波段下的超材料.

2008年,Landy等^[14]和Tao等^[15]分别在微波和太赫兹波段设计出基于电磁谐振的“完美”超材料吸波体.随后,研究人员又设计出极化不敏感^[16]和宽入射角^[17-18]的超材料吸波体.虽然上述超材料吸波体具有极强的吸波能力,但其吸波主要依赖于电磁谐振,因而带宽极窄.极窄的带宽极大地限制了其在热辐射探测^[19-20]、太阳能利用^[21-22]以及THz隐身等领域中的应用.本文在太赫兹波段设计了一种宽频带准全向(极化不敏感和宽入射角)的平板超材料吸波体.仿真结果表明,在4.36~4.91 THz之间该吸波体具有极化不敏感和宽入射角的强吸收.

1 结构设计与仿真

设计的超材料吸波体的结构单元由前向同心金属环、后向金属环和介质基板组成,如图1所示.电响应由前向同心金属环各环之间的耦合提供;磁响应由后向金属环与前向同心金属环之间的耦合提供.磁响应的产生机制和平行金属线类似(基板两侧的平行金属线在外磁场作用下产生的反向平行电流激发出磁响应)^[23].通过改变前向、后向金属环的尺寸以及介质基板的厚度可以实现对电磁响应的调节.要实现吸收率最大,传输率和反射率必须同时最小.通过结构优化设计可造成吸波体一侧与自由空间近似阻抗匹配、另一侧与自由空间阻抗不匹配,从而同时实现最小的反射率和最小的传输率.因为后向金属环与前向同心金属环各环之间不同的耦合作用会导致不同频率的谐振,通过结构优化设计使不同频率的谐振相互叠加有可能实现宽频带的超材料吸波体.超材料吸波体的极化不敏感和宽入射角特性是通过采用对称性极好的方形金属环实现的^[16].

利用 CST Microwave Studio 2008 对所设计的超

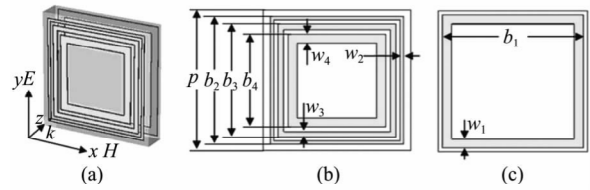


图1 超材料吸波体的单元结构示意图 (a) 仿真模型 (b) 前向同心金属环 (c) 后向金属环
Fig.1 The sketch map of the unit cell of the metamaterial absorber (a) the simulated model (b) the front concentric rings (c) the back ring

材料吸波体进行仿真.仿真模型如图1(a)所示, $x-z$ 平面边界设为完美导体, $y-z$ 平面边界设为完美磁导体, $x-y$ 平面边界设为两端口($-z$ 边界记为端口1,+ z 边界记为端口2).优化后的超材料吸波体单元的结构参数为: $b_1=13\ \mu\text{m}$, $w_1=2.2\ \mu\text{m}$, $b_2=13\ \mu\text{m}$, $w_2=0.1\ \mu\text{m}$, $b_3=9.75\ \mu\text{m}$, $w_3=0.25\ \mu\text{m}$, $b_4=9\ \mu\text{m}$, $w_4=1.2\ \mu\text{m}$, $p=14\ \mu\text{m}$,见图1(b)和1(c).基板厚度为 $5\ \mu\text{m}$ ($\epsilon_r=4.9$, $td=0.025$),覆铜厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$ (电导率设为 5.8×10^7 [S/m]).利用 CST 的时域有限差分求解器,得到了与频率相关的 S 参数(S_{11} , S_{21} , S_{22} , S_{12}).当波沿 z 轴正向传播时,由 $R_1(\omega)=|S_{11}|^2$, $T_1(\omega)=|S_{21}|^2$ 和 $A_1(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ 可以计算出与频率相关的反射率、传输率和吸收率,如图2所示.

由图2可见,波沿 z 轴正向传播时,在4.36~4.91 THz之间吸收率大于90%,在4.57 THz吸收率最大(98.7%).吸收频带内,传输率和反射率同时最小,吸收率最大.以上仿真结果表明,该超材料吸波体具有宽频带吸波特性.

由仿真的 S 参数可以提取超材料吸波体的等效阻抗实部^[24],如图3所示.由图可见:当波沿 z 轴正

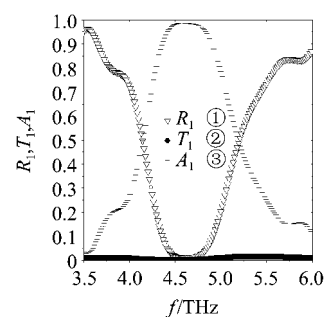


图2 超材料吸波体的反射率(R_1)、传输率(T_1)和吸收率(A_1)

Fig.2 The reflectance (R_1), transmission (T_1) and absorptance (A_1) of the metamaterial absorber

向传播时,4.36~4.91 THz 之间等效阻抗的平均值是 0.81;当波沿 z 轴负向传播时,4.36~4.91 THz 之间等效阻抗的平均值是 0.01. 以上仿真结果表明,在 4.36~4.91 THz 之间,吸波体一侧与自由空间近似阻抗匹配、另一侧与自由空间阻抗不匹配,从而同时实现了最小的反射率和最小的传输率. 由图可见在 4.57 THz 和 4.78 THz 产生了两个谐振,说明该超材料吸波体的宽频带吸波特性和主要源于不同频率谐振的叠加.

由波沿 z 轴正向传播时吸波体在不同极化角和不同入射角下对横电波(TE)和横磁波(TM)的吸收率看出,该超材料吸波体是极化不敏感和宽入射角,见图 4. 计算中采用了 CST Microwave Studio 2008 的频域求解器和周期性单元边界,模数设为 2(一个是 TE 模,一个是 TM 模). 由图 4(a)和图 4(b)可见,对于 TE(或 TM)波,极化角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化时吸波体的吸收率基本无变化,表明该吸波体具有极化不敏感特性;由图 4(c)和图 4(d)可见,在 4.36~4.91 THz 之间,TE 波在入射角小于 71° 时吸波体的吸波特性和 TM 波在入射角小于 70° 时吸波体的吸波特性和无明显变化,表明该吸波体具有宽入射角特性.

2 能量损耗

为了研究该吸波体的吸波机理,仿真了三种不同损耗情况下吸波体的吸收率,如图 5 所示. 由图 5 可见:(1)当介质基板有耗、金属有耗时,4.36~4.91 THz 之间吸收率的平均值是 97.1%;(2)当介质基板无耗、金属有耗时,4.36~4.91 THz 之间吸收率的平均值仍是 97.1%;(3)当介质基板有耗、金属无耗(PEC)时,4.36~4.91 THz 之间吸收率的平均值只有 50.4%. 以上结果表明,该吸波体的强吸

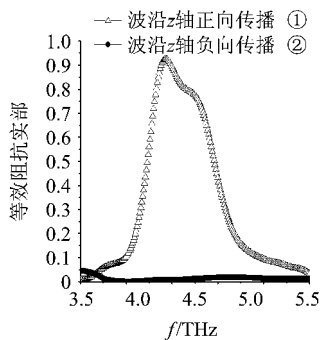


图 3 提取的超材料吸波体的等效阻抗实部
Fig.3 The retrieved real parts of the effective impedance of the metamaterial absorber

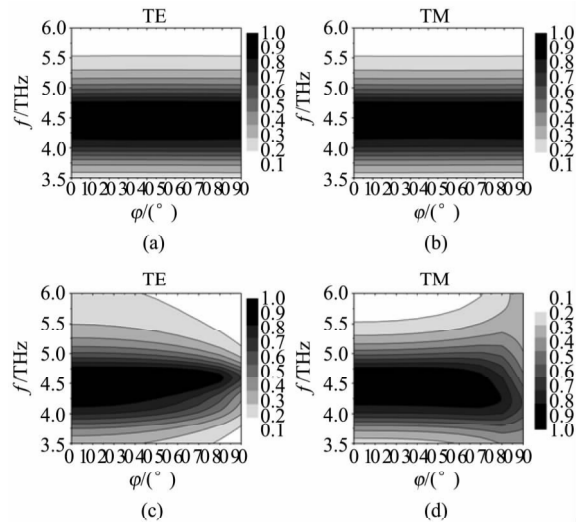


图 4 吸收率仿真图 (a)不同极化角对 TE (b)不同极化角对 TM (c)不同入射角对 TE (d)不同入射角对 TM
Fig.4 Simulated absorbance (a) different polarization angles to TE (b) different polarization angles to TM (c) different angles of incidence to TE (d) different angles of incidence to TM

波特性和主要源于金属损耗;金属无耗时,基板的介质损耗只能吸收部分能量.

3 影响金属损耗的因素

为进一步研究影响金属损耗的因素,对金属覆层在不同电导率和不同厚度情况下吸波体的吸收率进行仿真,如图 6 和图 7 所示. 由图 6 可见,随着金属电导率的增大,吸收频带逐渐向高频移动,吸收率大于 90%的带宽逐渐增大. 由图 7 可见,随着金属厚度的增大,吸收频带逐渐向高频移动,吸收率大于 90%的带宽逐渐减小. 以上结果表明,可以通过选用合适高电导率的金属以及适当减小金属覆层的厚度来加强金属损耗的强度.

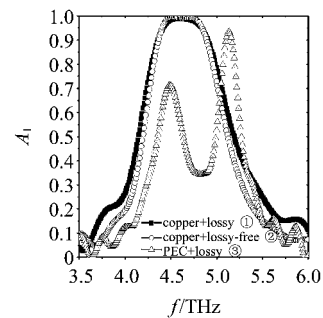


图 5 仿真三种不同损耗吸波体的吸收率
Fig.5 Simulated absorbance values under three different loss conditions

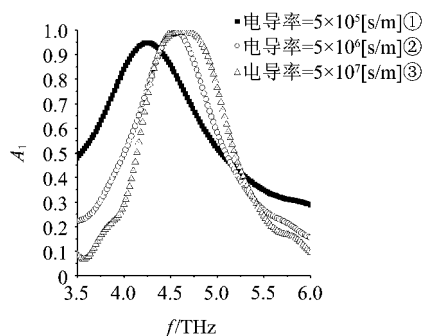


图6 三种不同电导率吸波体的吸收率仿真图
Fig.6 Simulated absorbance values under three different electric conductivity

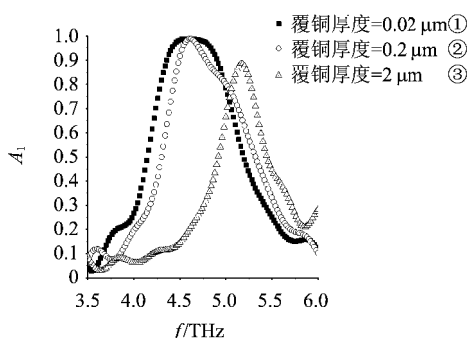


图7 三种不同覆铜厚度吸波体的吸收率仿真图
Fig.7 Simulated absorbance values (A_1) under three different copper thicknesses

4 结论

提出了一种宽频带、极化不敏感和宽入射角的平板超材料吸波体。仿真不同极化角的吸收率,验证了其极化不敏感特性;仿真不同入射角的吸收率,验证了其宽入射角特性。提取的等效阻抗实部表明,通过调节超材料的电磁响应造成吸波体一侧与自由空间近似阻抗匹配、另一侧与自由空间阻抗不匹配,从而在吸收频带内同时实现反射率和传输率最小、吸收率最大。仿真三种不同损耗情况吸波体的吸收率表明,吸波体的强吸波特性和主要源于金属损耗;金属无耗时,基板的介质损耗只能吸收部分能量。仿真金属覆层在不同电导率和不同厚度情况下吸波体的吸收率表明,可以通过选用合适高电导率的金属以及适当减小金属覆层的厚度来加强金属损耗的强度。

REFERENCES

- [1] Caloz C, Itoh T. *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications: the engineering approach* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006:2-3.
- [2] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneous negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4):509-514.
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(5514):77-79.
- [4] Smith D R, Schurig D, Rosenbluth M, et al. Limitations on subdiffraction imaging with a negative refractive index slab [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(10):1506-1508.
- [5] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801):977-980.
- [6] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, et al. A metamaterial for directive emission [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(21):3902-3905.
- [7] Wiltshire M C K, Pendry J B, Young I R, et al. Microstructured magnetic materials for RF flux guides in magnetic resonance imaging [J]. *Science*, 2001, **291**(5505):849-851.
- [8] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18):4184-4187.
- [9] Gokkavas M, Guven K, Bulu I, et al. Experimental demonstration of a left-handed metamaterial operating at 100 GHz [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(19):3103-3106.
- [10] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*, 2004, **303**(5663):1494-1496.
- [11] Linden S, Enkrich C, Wegener M, et al. Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz [J]. *Science*, 2004, **306**(5700):1351-1353.
- [12] Zhang S, Fan W, Panoiu N C, et al. Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(13):7404-7407.
- [13] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, et al. Realization of a three-functional-layer negative-index photonic metamaterial [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5):551-553.
- [14] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(20):7402-7405.
- [15] Tao H, Landy N I, Bingham C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10):7181-7188.
- [16] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(12):5104-5109.
- [17] 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):1103-1106.
- [18] Avitzour Y, Urzhumov Y A, Shvets G. Wide-angle infrared absorber based on a negative-index plasmonic metamaterial [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(4):5131-5135.
- [19] Parsons A D, Pedder D J. Thin-film infrared absorber structures for advanced thermal detectors [J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1988, **6**(3):1686-1689.
- [20] Mauskopf P D, Bock J J, Castillo H D, et al. Composite infrared bolometers with Si3N4 micromesh absorbers [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4):765-771.

(下转 360 页)