

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⁾ 刘嘉¹⁾ 顾巍³⁾

1) (空军工程大学理学院, 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, 西安 710049)

3) (成都理工大学工程技术学院计科系, 乐山 614300)

(2010年4月16日收到; 2010年6月14日收到修改稿)

本文设计了一种具有准全向吸波特性的平板超材料吸波体,其准全向吸波特性的由超材料吸波单元的双面吸波、极化不敏感和宽入射角实现的.理论分析和仿真结果表明:该吸波体在 6.18 GHz 的确有一个双面吸波的吸收点,且吸收率对极化角和入射角均不敏感.提取的等效阻抗表明可以调节超材料的电磁响应使其在吸收频率处与自由空间阻抗匹配来抑制反射.仿真的能量损耗分布表明:该吸波体对电磁波的吸收主要源于基板的介质损耗;采用两种不同介质基板的设计可使前吸波体与后吸波体的耦合度明显降低、抑制耦合所导致的传输.该吸波体可能在许多领域具有广泛的应用.

关键词: 准全向吸波, 双面吸波, 极化不敏感, 宽入射角

PACS: 78.20.Ci, 41.20.Jb

1. 引言

利用电磁超材料,科学家们实现了诸如负折射^[1,2]和“隐身衣”^[3]等许多奇异的物理现象.这些现象的实现有赖于超材料经电磁辐射后可产生独立可调的电响应^[4]和磁响应^[5]的能力.改变电磁超材料的几何尺度,可以将其拓展到许多频段.目前,超材料已在无线电^[6]、微波^[7,8]、毫米波^[9]、太赫兹^[10]、中红外^[11]、近红外^[12]、近可见光^[13]等频段被实现.电磁超材料不仅可以用来研究一些新异物理现象,还有着极为广阔的潜在应用价值.

最近,基于电磁谐振的超材料吸波体的设计引起了科学界的极大关注^[14-17].通过调节超材料的几何尺度,Landy等人^[14]在GHz频段实现了吸收率接近100%的“完美”吸波体.在THz频段,几种超材料吸波体已经被实现^[15-17].上述超材料吸波体一般是由电开口谐振子和金属线(或金属板)构成的,这种结构决定了其具有单面吸波、极化敏感和窄入射角等缺陷.虽然具有全方向吸波特性的吸波体具有巨大的应用前景,但是目前在各类文献中尚鲜见报道.

在本文中,提出了一种具有准全向吸波特性的平板超材料吸波体,其准全向吸波特性的由超材料吸波单元的双面吸波、极化不敏感和宽入射角实现的.理论分析和仿真结果表明:该吸波体在 6.18 GHz 的确有一个双面吸波的吸收点,且吸收率对极化角和入射角均不敏感.

2. 结构与吸收率仿真

本文设计的超材料吸波体的结构单元由三个金属方环(图1(a),(b)和(c))和两块介质基板组成.电响应由同平面上金属方环之间的耦合提供,磁响应由平行平面上金属方环之间的耦合提供,平行金属方环之间是两种不同的介质基板,如图1(d)所示.磁响应的这种设计类似于平行金属线^[11],基板两侧的金属方环可以产生反向平行电流,从而激发出磁响应.可以通过改变各金属方环的尺寸和各介质基板的厚度来实现对电磁响应的调节.正向入射的情况下,前环、中环和前介质基板构成前吸波体;而反向入射的情况下,后环、中环和后介质基板构成后吸波体.若平行金属方环之间采用同种介质

* 国家自然科学基金(批准号:60871027, 60901029, 61071058),国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB613306)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

基板,前吸波体和后吸波体之间的相互耦合会使传输明显增大、吸波效果变差,且正向入射和反向入射的谐振频率不易调节重合.采用两种不同介质基板的设计,不仅能使前吸波体与后吸波体的耦合度

明显降低、抑制耦合所导致的传输,还易于调节正向入射和反向入射的谐振频率使其重合.要实现吸收频率处的高吸收,还要同时抑制反射,可以通过调节超材料的电磁响应使其在吸收频率处与自由

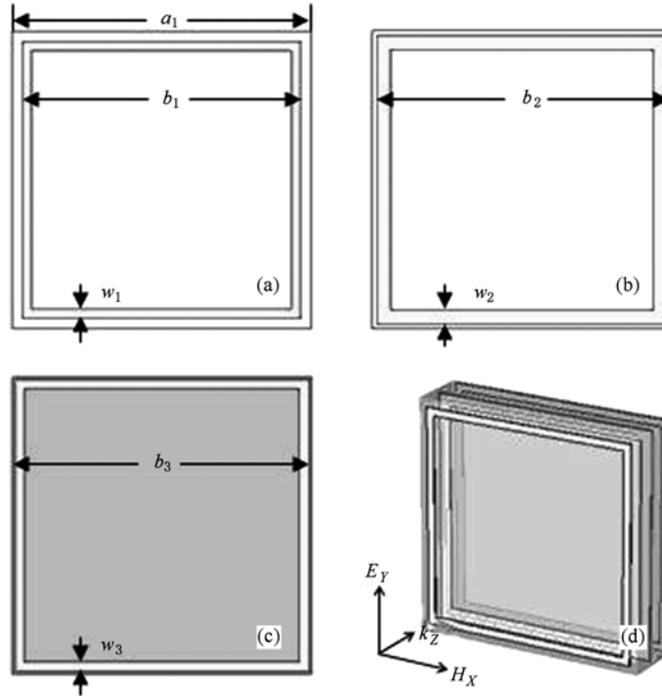


图1 超材料吸波单元结构示意图 (a)前环;(b)中环;(c)后环;(d)单元

空间阻抗匹配来实现.

利用商业时域有限差分求解器(CST Microwave Studio 2008)对所设计的超材料吸波体进行仿真.仿真模型如图1(d)所示, XZ 平面边界设为完美电导体, YZ 平面边界设为完美磁导体, XY 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).经CST优化后的超材料吸波单元的结构参数为: $a_1 = 6.18$, $b_1 = 5.76$, $w_1 = 0.2$, $b_2 = 6$, $w_2 = 0.3$, $b_3 = 6.07$, $w_3 = 0.2$ (mm),如图1(a),(b)和(c)所示.前介质基板厚度为0.8 mm($\epsilon_r = 4.9$, $t_d = 0.025$);后介质基板厚度为0.8 mm($\epsilon_r = 2.65$, $t_d = 0.025$);覆铜厚度为0.017 mm.通过仿真得到的S参数($S_{11}, S_{21}, S_{22}, S_{12}$),可以由 $R_1(\omega) = |S_{11}|^2$, $R_2(\omega) = |S_{22}|^2$ 和 $T_1(\omega) = |S_{21}|^2$, $T_2(\omega) = |S_{12}|^2$ 计算出反射率与传输率,从而可以得到与频率相关的吸收率 $A_1(\omega) = 1 - R_1 - T_1$, $A_2(\omega) = 1 - R_2 - T_2$,如图2所示.

由图2可见,当波沿 Z 轴正向入射时,在6.18 GHz有一个吸收率为 $A_1(6.18) = 93.2\%$ 的吸收

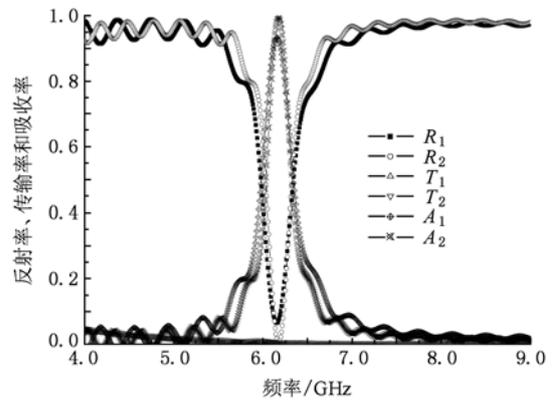


图2 仿真的超材料吸波体的反射率、传输率和吸收率

峰,吸收带宽(吸收率大于50%的带宽)为360 MHz.当波沿 Z 轴负向入射时,在6.18 GHz有一个吸收率为 $A_2(6.18) = 99.6\%$ 的吸收峰,吸收带宽为288 MHz.在6.18 GHz传输没有明显增大,其原因是两种不同介质基板的设计有效抑制了前、后吸波体之间的相互耦合.以上仿真结果证实了该超材料吸波体的确具有双面吸波特性的.

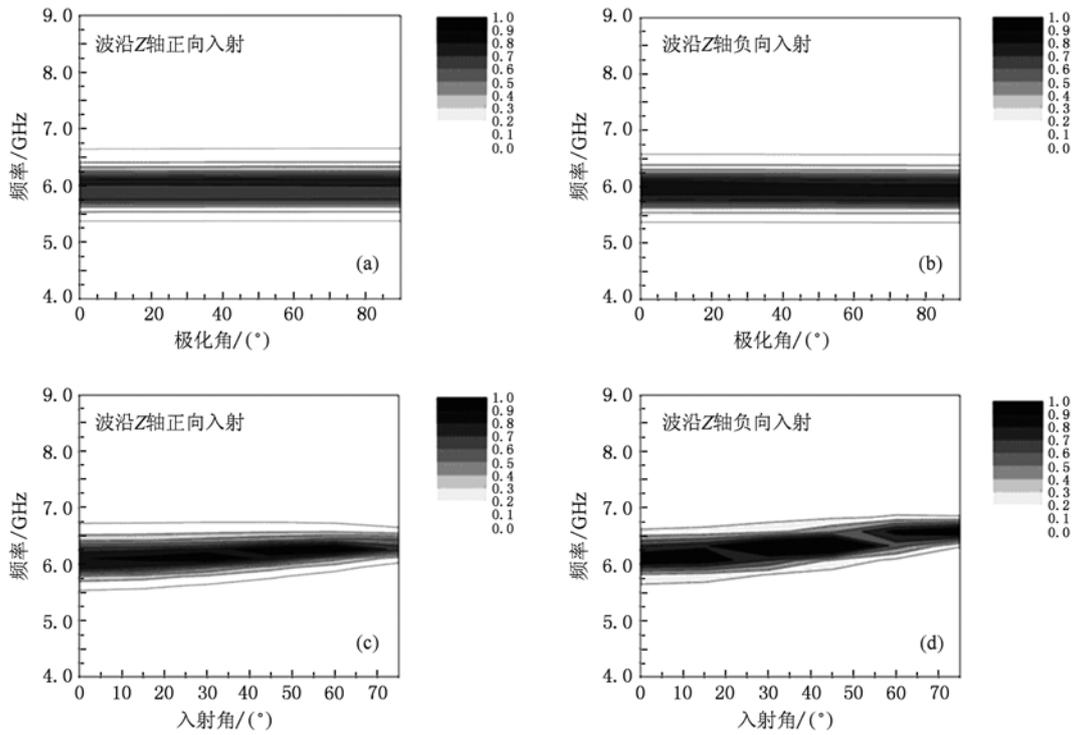


图3 仿真的不同极化角下的吸收率 (a)波沿 Z 轴正向入射;(b)波沿 Z 轴负向入射. 仿真的不同入射角下的吸收率:(c)波沿 Z 轴正向入射;(d)波沿 Z 轴负向入射

另一方面,该超材料吸波结构是极化和入射不敏感的,这一点可由不同极化角和入射角下波沿 Z 轴正向入射和负向入射的吸收率看出,如图 3 所示. 由图 3(a)和(b)可见,当极化角在 0° — 90° 变化时吸收峰附近的吸收率基本不变,说明在吸收峰附近该结构是极化不敏感的. 由图 3(c)和(d)可见,当入射角在 0° — 75° 变化时吸收频点发生了小偏移,

但吸收率没有明显变化,说明在吸收峰附近该结构对入射角不敏感.

3. 等效阻抗与能量损耗分布

由仿真的 S 参数可以提取材料的等效阻抗,如图 4 所示. 由图 4(a)可见,在 6.18 GHz 等效阻抗的

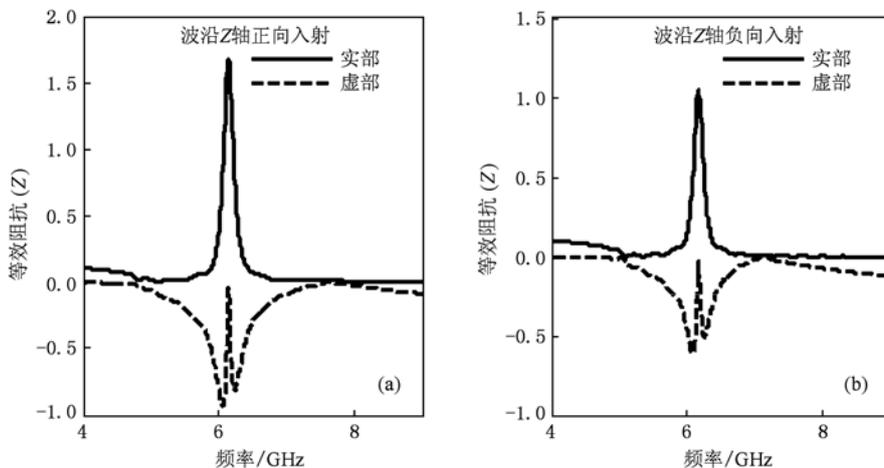


图4 等效阻抗 (a)波沿 Z 轴正向入射;(b)波沿 Z 轴负向入射

实部是 1.68, 这解释了图 2 中 6.18 GHz 波沿 Z 轴正向入射时少量反射存在的原因. 由图 4(b) 可见, 在 6.18 GHz 等效阻抗的实部是 1.05, 这解释了图 2 中 6.18 GHz 波沿 Z 轴负向入射时反射几乎为零的原因. 以上结果表明可以调节超材料的电磁响应使其在吸收频率处与自由空间阻抗匹配来抑制反射.

利用 CST 的场记录功能, 可以得到超材料吸波体在 6.18 GHz 的能量损耗分布. 由图 5 能量损耗分

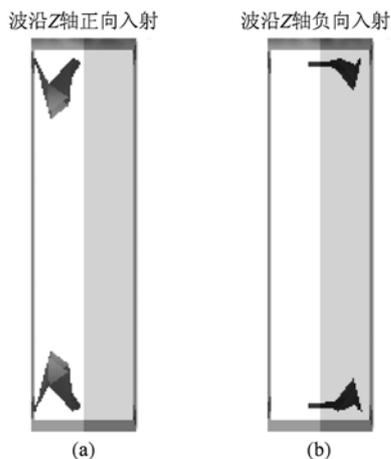


图 5 在 6.18 GHz 超材料吸波体的能量损耗分布侧视图 (a) 波沿 Z 轴正向入射; (b) 波沿 Z 轴负向入射

布的侧视图可见: 波沿 Z 轴正向入射时 $A_1(\omega)$ 主要源于前介质基板的介质损耗(图 5(a)); 波沿 Z 轴负向入射时 $A_2(\omega)$ 主要源于后介质基板的介质损耗(图 5(b)). 这不仅说明了在超材料吸波体中基板的介质损耗起主导作用(金属的电阻热损耗基本上可以忽略不计), 还进一步证明采用两种介质基板的设计能够有效地抑制前、后吸波体之间的相互耦合.

4. 结 论

本文提出了一种具有双面吸波、极化不敏感和宽入射角特性的超材料吸波体. 仿真的不同极化角和入射角下的吸收率验证了其极化不敏感和宽入射角特性. 提取的等效阻抗表明可以调节超材料的电磁响应使其在吸收频率处与自由空间阻抗匹配来抑制反射. 仿真的能量损耗分布表明: 该吸波体对电磁波的吸收主要源于基板的介质损耗; 采用两种介质基板的设计能够有效地抑制前、后吸波体之间的相互耦合. 通过改变超材料的几何尺度, 可以将我们的设计扩展到许多频段, 例如 THz 或低频区.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [5] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075
- [6] Wiltshire M C K, Pendry J B, Young I R, Larkman D J, Gilderdale D J, Hajnal J V 2001 *Science* **291** 849
- [7] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [8] Zhang S, Qu S B, Ma H, Xie F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [张松、屈绍波、马华、谢峰、徐卓 2009 *物理学报* **58** 3961]
- [9] Gokkavas M, Guven K, Bulu I, Aydin K, Penciu R S, Kafesaki M, Soukoulis C M, Ozbay E 2006 *Phys. Rev. B* **73** 193103
- [10] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X 2004 *Science* **303** 1494
- [11] Linden S, Enkrich C, Wegener M, Zhou J F, Koschny T, Soukoulis C M 2004 *Science* **306** 1351
- [12] Zhang S, Fan W, Panoiu N C, Malloy K J, Osgood R M, Brueck S R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 137404
- [13] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2007 *Opt. Lett.* **32** 53
- [14] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [15] Tao H, Landy N I, Bingham C M, Zhang X, Averitt R D, Padilla W J 2008 *Opt. Express*. **16** 7181
- [16] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, Pilon D, Shrekenhamer D, Landy N I, Fan K, Zhang X, Padilla W J, Averitt R D 2008 *Phys. Rev. B* **78** 241103(R)
- [17] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104

The design of a quasi-omnidirectional tabulate metamaterial absorber*

Gu Chao¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)2)†} Pei zhi-Bin¹⁾ Xu Zhuo²⁾ Liu Jia¹⁾ Gu Wei³⁾

1) (Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology Department of Computer Science and Technology, Leshan 614300, China)

(Received 16 April 2010; revised manuscript received 14 June 2010)

Abstract

We report the design of a quasi-omnidirectional tabulate metamaterial absorber, which is substantiated on the double-faced absorbing, polarization-insensitive and wide-angle property of the metamaterial cell. Both theoretical and simulated results reveal that our absorber surely has a distinct absorption point with double-faced absorbing property near 6.18 GHz, which is not influenced significantly by the polarization angle and the angle of incidence. The retrieved impedance indicates the electromagnetic resonance of the metamaterial could be tuned to match approximately the impedance of the free space to suppress the reflectance at the absorption frequency. The distributions of the power loss indicates the strong absorption is mainly due to dielectric loss of the substrates and the design of adopting two different substrates could make the coupling of the front absorber and the back absorber depressed, which effectively suppresses the transmission caused by the coupling. This metamaterial absorber may have applications in many scientific and technological areas.

Keywords: quasi-omnidirectional absorbing, double-faced absorbing, polarization-insensitive, wide-angle

PACS: 78.20.Ci, 41.20.Jb

* Projects supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871027, 60901029, 61071058), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB613306).

† Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn