

十字架型超材料吸波特性及机理研究

弓巧侠, 刘晓旻, 段智勇, 师小强, 马凤英, 梁二军

(郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 设计了一种十字架型电磁超材料吸波体, 采用 CST studio suite 2009 频域求解器提取 S 参数进行仿真研究, 并计算了其吸波率, 在 24.65 THz 和 35.25 THz 得到两个吸收峰, 吸收率分别为 0.83 和 0.997。改变材料结构尺寸, 在 7.3 THz 达到完美吸收, 吸收率接近于 1。将 THz 波段的超材料吸波体结构尺寸放大 1000 倍, 在 GHz 波段同样可以达到完美吸收, 说明超材料吸波体可通过对结构尺寸调节改变吸收波段。另外研究了这种吸波体的吸收机理, 发现吸收主要在第一层的十字架金属单元层, 可用于 Bolometer 探测器的设计。

关键词: 超材料; 吸波体; THz; 探测器

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1528-05

Study on absorbing properties and mechanism of cross-shaped metamaterial absorber

Gong Qiaoxia, Liu Xiaomin, Duan Zhiyong, Shi Xiaoqiang, Ma Fengying, Liang Erjun

(School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A cross-shaped metamaterial absorber was designed. The S parameters and absorptivity were calculated by CST studio suite 2009, and the frequency domain solver was utilized. The absorber shows two absorption peaks of 0.83 at 24.65 THz and 0.997 at 35.25 THz. Through changes of the size of elements, a metamaterial perfect absorber with near-unity absorbance is achieved in 7.3 THz. To magnify 1 000 times of the absorber size in terahertz frequency, the perfect absorber can be achieved in the GHz frequency, thus providing a means to dynamically control the absorbing band. In addition, the absorbing mechanism was studied. Simulations reveal that the majority of energy is dissipated in the metallic cross plane. This type of metamaterial absorber can be designed for the bolometer detector.

Key words: metamaterials; absorber; THz; detector

收稿日期: 2012-11-05; 修订日期: 2012-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(51175479); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13B140395, 12A140014)

作者简介: 弓巧侠(1977-), 女, 讲师, 博士, 主要从事新型电磁材料及器件方面的研究。Email: gqx1205@zzu.edu.cn

0 引言

新型人工电磁材料(Metamaterials, 或称电磁超介质、超材料)是将具有特定几何形状的亚波长宏观基本单元周期性或非周期性地排列所构成的人工材料。它用宏观尺寸单元代替了原来微观尺寸的原子或分子,具有负折射、超透镜,隐身斗篷等自然介质所不具备的特性,引起人们研究的热潮^[1-3]。超材料的特性取决于其基本单元结构,可以通过人为地设计单元结构来控制材料属性,构成自然界不存在的特殊结构材料。

根据有效媒质理论,超材料可以用复合介电常数 $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ 和磁导率 $\mu = \mu_1 + i\mu_2$ 来描述,折射率可写成 $n = n_1 + in_2$ 。大多数研究者的工作主要集中在实现介电常数和磁导率的实部 ε_1 、 μ_2 同时为负(构造负折射率材料),或者构建渐变电磁参数以实现隐形斗篷等方面的应用。对于这两种材料来说,要求电磁参数的虚部趋近于零,因为虚部与介质的损耗有关,电磁参数虚部越大,则损耗越大。可以利用超材料实现对电磁波的高吸收,为吸波材料研究开辟了一个全新的领域。吸波材料是指能够有效吸收入射电磁波并使其散射衰减的一类材料,通过材料各种不同的损耗机制将入射电磁波转化成热能或者是其他能量形式而达到吸波的目的。

超材料完美吸收(Perfect metamaterials absorption)概念是由 Landry N I 等^[4]于 2008 年提出的。这种新的超材料可以完全吸收辐射到其表面的电磁波的电场分量和磁场分量,并转换成热量。Landry N I 等提出的吸波体是由方形电谐振环与短导线组合成的结构,在窄频带范围内能近 100%吸收入射电磁波,具有潜在的应用价值,因而受到广泛关注。太赫兹技术近年来得到了长足的发展,但各种功能器件还是比较缺乏,采用超材料是一条较好的解决途径之一^[5-8]。Tao H 等^[9]首次研究了 THz 波段的超材料吸收体,在 1.3THz 吸收率可达 70%。Padilla W J^[10]课题组设计的超材料吸波体,在 6 μm 处吸收峰值为 97%,半波带宽为 1 μm ,并证明了这种吸波材料可用于单像素成像。

设计了一种变异的十字架型超材料吸波体,在 THz 波段可以达到完美吸收,研究了结构尺寸变化

对吸收峰的影响,另外研究了这种吸波体的吸收机理,为不同波段光子器件的设计提供一定理论依据。

1 超材料吸波机理

超材料设计吸波体的理念是最小化透射,同时,通过与自由空间阻抗匹配最小化反射,从而使得吸收最大。设计电磁吸收体的基本要求是:(1)入射波最大限度地进入吸收体内部而不是在其前表面上反射,即材料的匹配特性;(2)进入吸收体内部的电磁波能迅速地被吸收体吸收衰减掉,即材料的衰减特性。实现第一个要求的方法是通过采用特殊的边界条件来达到与空气阻抗相匹配;而实现第二个要求的方法则是使电磁波吸收体具有很高的电磁损耗,即电磁波吸收体应具有足够大的介电常数虚部(有限电导率)或足够大的磁导率虚部。超介质完美吸收材料一般为 3 层结构:第 1 层一般电谐振结构,是金属单元,中间是电介质层,第三层为与第 1 层金属结构对应的磁谐振结构。电响应来自电场激发开口谐振环,磁响应来自电介质层两侧金属结构的反平行电流。材料的阻抗可以表示为:

$$Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)} \quad (1)$$

当有效介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 和有效磁导率 $\mu(\omega)$ 在数值上相等时,材料的阻抗和自由空间阻抗实现匹配,此时反射最小。阻抗匹配层的匹配作用,使空间入射来的电磁波尽可能多地进入吸收层而被损耗吸收。Liu X L 等已通过模拟和实验证明,吸收峰峰值位于介电常数和磁导率实部相等的地方,验证了在这个地方反射最大。刚开始设计的第 3 层结构为金属单元谐振环,通过研究发现,若其为金属膜可大大降低透射率。

2 结果分析与讨论

2.1 结构设计

设计的吸波体结构如图 1 所示。图(a)为电谐振结构单元,图(b)为金属薄膜,对图(c)中的一个超材料结构单元进行模拟,采用 CST studio suite 2009 频域求解器仿真研究,电磁波沿 Z 轴方向垂直入射,电场和磁场偏振方向分别沿 Y 轴和 X 轴方向。在垂直入射电磁波激励下提取了 S 参数, S_{11} 为反射参数, S_{21} 为透射参数,根据 $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 计算其吸收率。

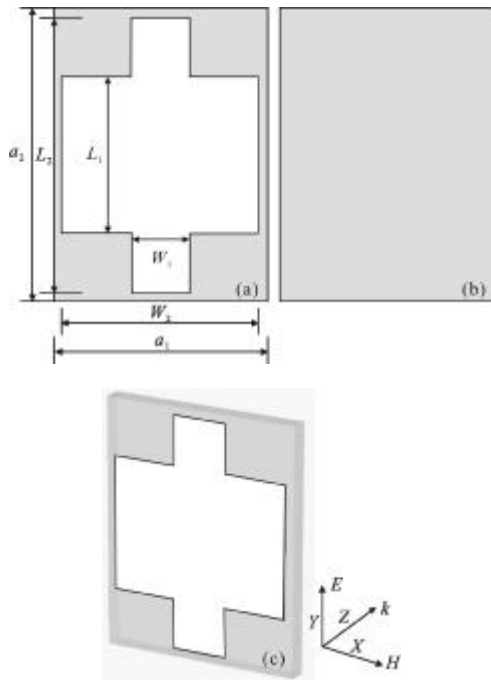


图 1 超材料完美吸收体几何结构

Fig.1 Schematic diagram of the metamaterial absorbers

2.2 不同结构单元仿真结果

图 1 中, 吸波体单元优化后的结构参数为 $a_1=7 \mu\text{m}$, $a_2=9.5 \mu\text{m}$, $W_1=3 \mu\text{m}$, $L_1=6 \mu\text{m}$, $W_2=3 \mu\text{m}$; $L_2=9.5 \mu\text{m}$, $W_2=7 \mu\text{m}$, 金属层厚度均为 $0.03 \mu\text{m}$, 金属为 Ag, 采用 Drude 模型, 电介质为 Al_2O_3 ($\epsilon=2.28$, $\tan\delta=0.04$), 厚度为 $0.8 \mu\text{m}$ 。在 $f=24.65 \text{ THz}$ 和 35.25 THz 得到两个吸收峰, 吸收率分别为 0.83 和 0.997, 表现完美。一般入射电磁波的穿透深度会小于第 3 层金属膜的厚度, 所以透射可忽略, 如图 2 所示, 透射率接近于零。因此, 在后面的仿真中只给出吸收曲线图。

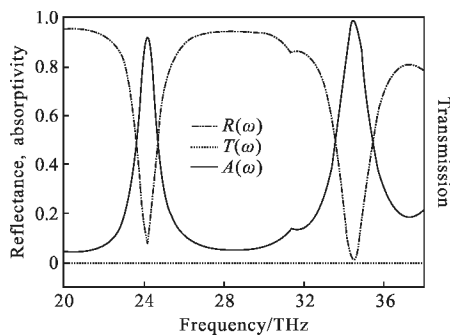


图 2 吸波体的吸收率 $A(\omega)$, 反射 $R(\omega)$, 透射 $T(\omega)$ 随频率变化曲线
Fig.2 Absorptivity, reflectance and transmission of the metamaterial absorber

调整结构单元尺寸, 在 THz 波段可以获得接近于 1 的完美吸收。调整后结构单元参数为: $a_1=11 \mu\text{m}$, $a_2=15 \mu\text{m}$, $W_1=3 \mu\text{m}$, $L_1=8 \mu\text{m}$, $W_2=10 \mu\text{m}$; $L_2=14 \mu\text{m}$, $W_2=10 \mu\text{m}$, 电介质层厚度为 $1 \mu\text{m}$, 金属层厚度均为 $0.03 \mu\text{m}$ 。图 3 中, 在 7.3 THz 处可实现完美吸收, 吸收率高达 0.999。结果表明超材料吸波体可以通过结构尺寸的改变调节吸收波段, 从而实现多频段高吸收。

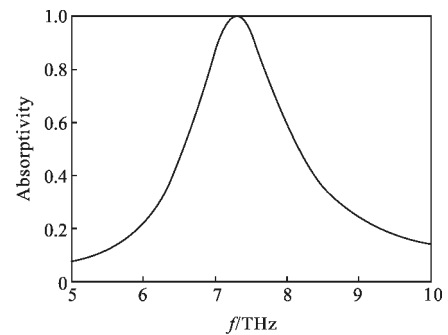


图 3 单元结构尺寸变化后所对应的吸收图谱
Fig.3 Absorption for the unit cell with change of structure parameters

超材料吸波体的响应频率取决于其几何结构, 可以通过缩比结构尺寸改变其工作频率。将图 3 对应的结构单元不变, 将尺寸同比例放大 1 000 倍, 在 GHz 频段同样可获得完美吸收, 如图 4 所示, 在 $f=7.65 \text{ GHz}$, 吸收率为 0.725, 相信通过进一步优化结构单元尺寸, 可获得更高吸收。

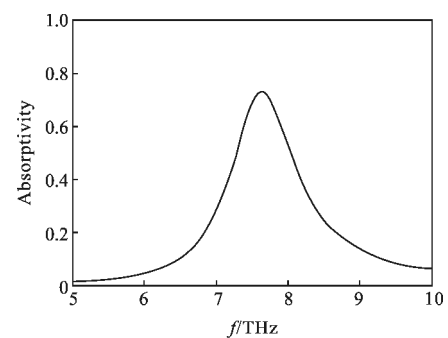


图 4 单元结构尺寸放大后所对应的吸收图谱
Fig.4 Absorption for the unit cell with dimension notations in millimeters

2.3 吸波机理研究

为了进一步研究吸收机理, 了解电磁波主要消耗在那一层, 改变各层材料属性, 得到其吸收率的变化, 如图 5 所示。图 6 为电磁波在各层的能量损耗密

度,图(a)为金属十字架层,图(b)为电介质层,图(c)为金属膜,图(d)为单元结构侧面图(图中所示横向比例放大)。可以看出,在第 1 层十字架金属层损耗最大,吸收了大部分的电磁波。图 5 中,如果将中间电介质换成无损耗的 Al_2O_3 ($\epsilon=2.28, \tan\delta=0$),材料的吸收率从 0.999 下降到 0.961,影响不大,反之将金属 Ag(Drude-model)层设置成完美电边界,即无耗,吸收率下降到 0.721,说明入射电磁波能量损耗主要在金属层。

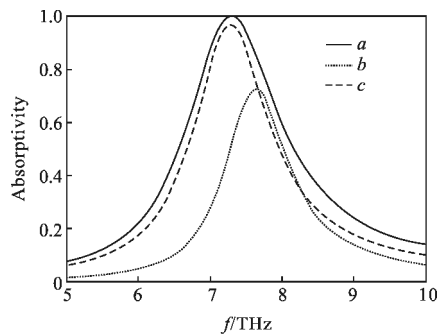


图 5 各种基质的超材料吸波体吸收曲线图

Fig.5 Absorptivity of the metamaterial absorber for different materials

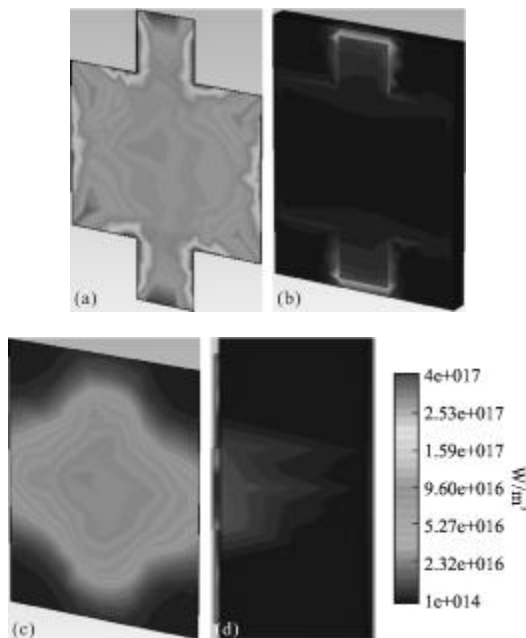


图 6 入射电磁波能量在超材料各层中损耗示意图

Fig.6 Energy dissipation in the absorber structure

关于完美吸收材料的吸收机理无明确的理论, Padilla W J 等认为吸收主要发生在电介质层,电介质损耗比欧姆损耗高一个数量级。与 Padilla W J 设

计超材料吸波体的不同之处在于,改变了第 1 层十字架的结构,增大其占据整个结构单元的面积,并且降低了金属膜的厚度,中间电介质基本不吸收电磁波。结合 Padilla W J 设计的金属十字架吸波体,发现第 1 层金属结构单元比较简单时,主要吸收在第 2 层的电介质;如果第 1 层金属占据面积比较大时,电介质吸收并不明显。针对不同的用途,可以选择不同的吸波体。选择主要吸收在电介质层的平板型超材料制作太阳能电池,提高能量转换效率。理想的 Bolometer 探测器是能将落在其表面的光子都能吸收,并转换成热量。选择电磁波吸收主要在金属层的吸波体制作 Bolometer 探测器件,因为能量主要集中在外层的金属层上,方便收集与检测入射的电磁波,提高器件灵敏度。

3 结论

基于 Metamaterials 的电磁吸波材料,由于电谐振与磁谐振结构各自独立设计,可以分别调节介电常数与磁导率,具有较高的吸收率,在电磁抗干扰、军事隐身、光子器件方面设计等方面都具有十分重要的意义,引起大家的重视。在过去的几十年里,大多数研究集中在 THz 源产生及探测,对于 THz 的各种功能器件仍然缺少,这给太赫兹科学技术的广泛应用带来了很大的困难。设计了一种十字架型超材料吸波体,通过改变结构单元尺寸,可以调节吸波频段,在 THz 波段吸收率接近于 1。将入射电磁波的主要吸收在金属层,设计 Bolometer 探测器,为太赫兹器件缺乏提供一条较好的解决途径。

参考文献:

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292 (5514): 77-79.
- [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.
- [3] Wang Jianbo, Chen Xinyi, Chen Guibo, et al. Characterization of terahertz metamaterials based on hexagonal split-ring resonators [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 622-625. (in Chinese)
- [4] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial

- absorber[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 1-4.
- [5] Li J S. Terahertz wave modulator based on optically controllable metamaterial[J]. *Opt Laser Technol*, 2011, 43(1): 102-105.
- [6] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C, et al. Electrically resonant terahertz metamaterials: theoretical and experimental investigations[J]. *Phys Rev B*, 2007, 75(4): 1-4.
- [7] 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): 1-6.
- [8] Tao H, Bingham C M, Pilon D, et al. A dual band terahertz metamaterial absorber [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(22): 1-5.
- [9] 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.
- [10] 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): 1-4.