

极薄宽角度平面超材料吸波体仿真与实验验证*

鲁磊^{1)†} 屈绍波¹⁾ 苏兮²⁾ 尚耀波³⁾ 张介秋¹⁾ 柏鹏²⁾

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (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, 西安 710051)

3) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2013年4月19日收到; 2013年7月19日收到修改稿)

仿真和实验验证了厚度极薄的平面结构超材料吸波体, 该吸波体采用加载交指电容的耶路撒冷十字结构, 通过增加单元间的耦合电容显著降低了其工作频率. 测试结果表明, 该超材料吸波体在 1.58 GHz, 吸收率峰值为 88.48%, 其厚度为 2 mm, 约为 1/95 工作波长, 吸波体的单元尺寸为 11 mm, 约为 1/17 工作波长. 此外, 通过金属通孔将耶路撒冷十字结构与金属底板相连接, 使其对斜入射横电和横磁极化电磁波具有宽角度吸收特性, 在 60° 时依然具有较高的吸收率, 且吸收峰频率几乎不发生偏移, 从而使其更具实用价值.

关键词: 极薄, 宽角度, 超材料吸波体

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.62.208103

1 引言

2008 年, Landy 等^[1]首次提出了基于金属介质周期结构的完全吸收超材料吸波体, 其高吸收率和极薄的厚度等优点吸引了研究人员的广泛兴趣^[2-10]. 而在传统的吸波材料中, 如经典的 Salisbury 吸收屏^[11], 其厚度须为四分之一工作波长, 当工作于较低频率如 L 波段时, 厚度会显著增加, 因而不利于实际应用. 此外, 在超材料吸波体的设计中, 高吸收率、宽角度吸收、厚度和极化不敏感等特性是衡量吸波体实用性的重要方面.

为对低频电磁波实现强吸收, 且同时降低超材料吸波体的厚度和电尺寸, 并对斜入射电磁波具有宽角度吸收, 本文采用加载交指电容的耶路撒冷十字结构, 通过增加单元间的耦合电容以降低超材料吸波体的工作频率, 并以极薄的厚度对低频电磁波实现强吸收. 且该超材料吸波体对横电 (transverse electric, TE) 和横磁 (transverse magnetic, TM) 极化电磁波在 60° 时依然具有较高的吸收率, 吸收峰的

频率几乎不发生偏移, 具有较好的宽角度吸收特性, 从而使得该超材料吸波体更具实用性, 尤其适用于具有倾斜表面且实现强吸收的情况. 此外, 由于该超材料吸波体的单元结构具有四重旋转对称性, 因而对垂直入射电磁波的极化方向是不敏感的.

2 结构与仿真

为对低频电磁波实现强吸收, 采用在耶路撒冷十字结构的长臂上加载交指电容的方法, 以降低超材料吸波体的工作频率, 其单元结构如图 1(a) 所示, 其中灰色区域为金属. 为使得超材料吸波体对工作频带内斜入射电磁波具有较好的吸收稳定性, 将加载交指电容的耶路撒冷十字结构通过金属通孔与金属底板连接在一起, 如图 1(b) 所示, 从而可以实现吸波体对斜入射 TM 极化电磁波具有宽角度吸收特性^[12]. 为减小仿真计算量, 将实际加工中的圆形金属通孔在仿真时设计为正方形结构. 超材料吸波体的具体尺寸为: 周期为 $a = 11$ mm, $b = 2.3$ mm, $c = 2$ mm, $e = 1$ mm, $h = 5.8$ mm, $l = 2.2$ mm, 缝宽 $g = 0.2$ mm, 金属线宽为 $w = 0.2$ mm. 基

* 国家自然科学基金 (批准号: 11274389) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB623306) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: bblfdd@163.com

板采用 FR4 损耗基板, 其厚度为 $d = 2 \text{ mm}$, 相对介电常数为 $\epsilon_r = 4.3(1 - i0.025) = \epsilon_r' + i\epsilon_r''$, 其中电损耗角正切为 $\tan \delta_e = 0.025$. 周期金属结构成分为铜, 其厚度为 $t = 0.02 \text{ mm}$, 电导率为 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$. 采用基于有限积分的商业电磁仿真软件 CST 微波工作室对超材料吸波体进行全波仿真, 吸波体单元结构的上下左右皆设置为 unit cell 周期边界条件, 均匀平面电磁波垂直入射到吸波体表面, 其中电场 \mathbf{E} 沿 $+x$ 方向, 磁场 \mathbf{H} 沿 $+y$ 方向, 波矢 \mathbf{k} 沿 $+z$ 方向.

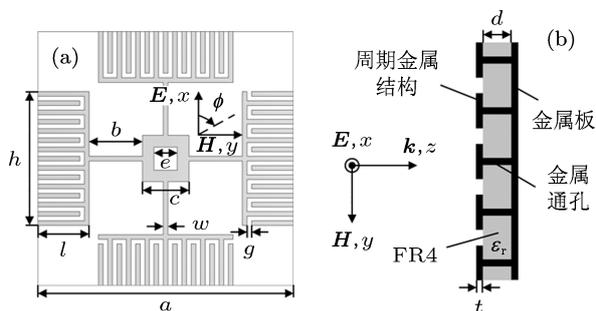


图 1 超材料吸波体的 (a) 单元结构和 (b) 侧视图

超材料吸波体的等效传输线 (transmission line, TL) 电路模型如图 2 所示. 周期金属结构可以等效为 RLC 串联电路, 其中, R_d 为 FR4 损耗介质基板中所产生的介电损耗 [13]. 因为金属结构中的欧姆损耗在微波波段可以忽略不计 [14], 其计算公式为 $R_d \approx \frac{-2\epsilon_r''}{\omega C_0(\epsilon_r' + 1)^2}$, 是随频率变化的函数; $C = \epsilon_{\text{eff}} C_0$ 和 $L = L_0$ 为单元金属结构加载介质后的总电容和电感 [15], 其中, $\epsilon_{\text{eff}} = (\epsilon_r + 1)/2$ 为等效介电常数 [16], C_0 和 L_0 为单元金属结构在自由空间中的电容和电感, 其值可以通过全波仿真的方法反演出 [17,18], 采用该方法计算出的结果为 $C_0 = 0.5 \text{ pF}$, $L_0 = 5.1 \text{ nH}$. 周期金属方片结构的电容大小依赖于 TE 极化电磁波的斜入射角度 [16], 而十字结构的电容则几乎与 TE 极化电磁波的斜入射角度无关 [15]. 因而, 耶路撒冷十字周期金属结构的阻抗 Z_m 可表示为

$$Z_m^{\text{TE, TM}} = Z_m = i\omega L + 1/i\omega C = R_d + iX, \quad (1)$$

其中, R_d 表示阻抗 Z_m 的电阻部分, X 表示电抗部分.

带有金属底板的介质板的阻抗 Z_d 依赖于 TE 和 TM 极化电磁波的斜入射角度 θ [19], 如图 4 中插

图所示, θ 为斜入射电磁波波矢 \mathbf{k} 与超材料吸波体表面法线的夹角. 由于金属通孔的存在, 因而 Z_d 不依赖于 TM 极化电磁波的斜入射角度 [12], 其阻抗大小可表示为

$$Z_d^{\text{TE}} = \frac{iZ_0}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}} \tan \left(k_0 \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta} d \right), \quad (2)$$

$$Z_d^{\text{TM}} = \frac{iZ_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan \left(k_0 \sqrt{\epsilon_r} d \right), \quad (3)$$

其中, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 和 $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 分别为自由空间的特性阻抗和波数, ϵ_0 和 μ_0 分别为自由空间的介电常数和磁导率.

超材料吸波体的反射系数 r 可表示为

$$r^{\text{TE}} = \frac{Z_{\text{in}} - Z_0/\cos \theta}{Z_{\text{in}} + Z_0/\cos \theta}, \quad (4)$$

$$r^{\text{TM}} = \frac{Z_{\text{in}} - Z_0 \cos \theta}{Z_{\text{in}} + Z_0 \cos \theta}, \quad (5)$$

其中, 输入阻抗 Z_{in} 为周期金属结构的阻抗 Z_m 与加载金属底板介质片阻抗 Z_d 的并联阻抗. 其表达式为

$$Z_{\text{in}} = \frac{Z_m Z_d}{Z_m + Z_d}. \quad (6)$$

仿真和采用 TL 模型 (4) 和 (5) 式计算出超材料吸波体对垂直入射电磁波的反射率 (R) 和吸收率 (A) 曲线, 如图 3 所示, 此时, $\theta = 0^\circ$. 由于存在金属底板阻断电磁波的传播, 因而透射率 (T) 为零, 吸收率可表示为 $A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2$. 图 3 中, 在 1.59 GHz, 反射率达到低谷, 吸收率达到最大为 99.63%, 电磁波绝大部分能量被匹配到吸波体内部, 并被损耗介质转变为热能吸收掉, 仿真结果与 TL 模型计算结果符合较好.

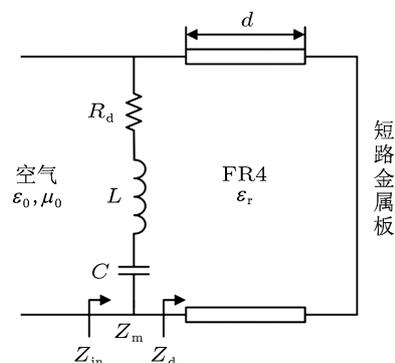


图 2 超材料吸波体的等效传输线电路模型

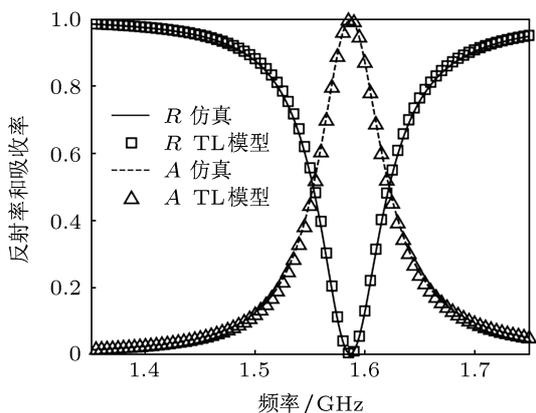


图3 仿真和 TL 模型计算出超材料吸波体的反射率和吸收率

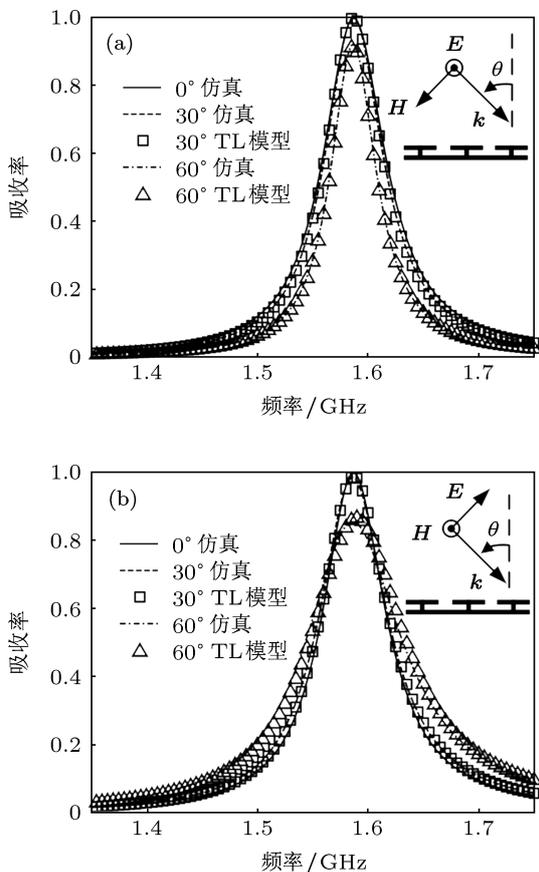


图4 超材料吸波体对斜入射电磁波的吸收率 (a) TE 极化波; (b) TM 极化波

超材料吸波体对斜入射 TE 和 TM 极化电磁波的吸收率如图 4 所示. 对于斜入射 TE 极化电磁波, 随着斜入射角度 θ 由 0° 增加到 60° , 吸收峰的位置几乎保持不变, 吸收峰的幅值略有减小, 吸收频带逐渐缩小, 在 θ 为 60° 时, 其吸收峰幅值大小为 91.95%; 对于斜入射 TM 极化电磁波, 随着斜入射角度 θ 由 0° 增加到 60° , 吸收峰的位置同样

几乎保持不变, 吸收峰的幅值略有减小, 但吸收频带逐渐展宽, 在 θ 为 60° 时, 其吸收峰幅值大小为 85.10%. 可见, 金属通孔的引入, 大大增强了超材料吸波体对斜入射 TM 极化电磁波的吸收稳定性. 因而, 该超材料吸波体对斜入射 TE 和 TM 极化电磁波都具有较好的吸收稳定性, 实现了宽角度吸收.

超材料吸波体随 FR4 基板电损耗角正切 $\tan \delta_e$ 和厚度 d 变化的吸收率曲线如图 5 所示. 图 5(a) 中, 随着电损耗角正切 $\tan \delta_e$ 由 0.005 增大为 0.065, 吸收率逐渐增大, 当其值为 0.025 时, 吸收率达到最大, 随后当继续增大时, 吸收峰逐渐减小, 且吸收频带展宽. 图 5(b) 中, 随着基板厚度 d 由 1 mm 增大到 3 mm, 吸收峰频率逐渐向低频移动, 吸收峰幅值大小在 d 为 2 mm 时达到最大, 随后逐渐减小, 而吸收频带是逐渐展宽的. 因此, 通过调节超材料吸波体中 FR4 基板的电损耗角正切 $\tan \delta_e$ 和厚度 d 可以调节吸收峰的频率和幅值大小, 并展宽吸收频带.

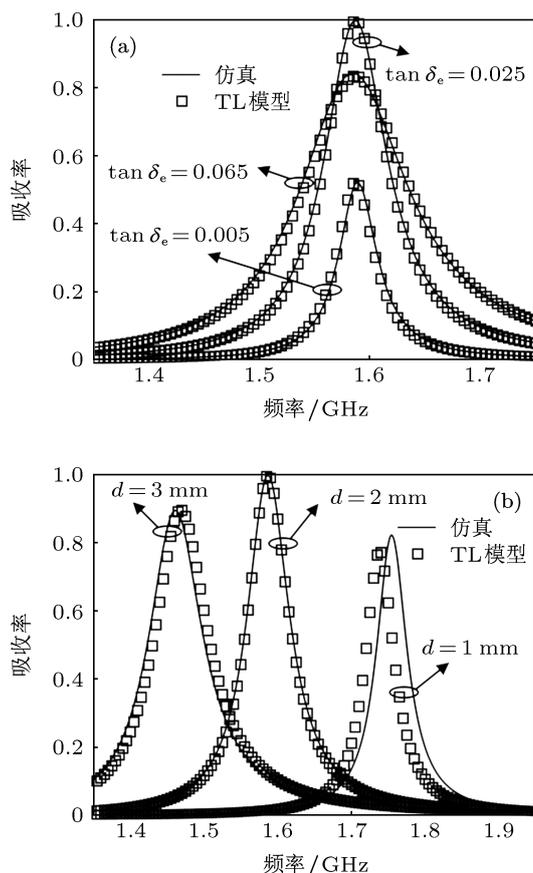


图5 超材料吸波体随各参数变化的吸收率 (a) 电损耗角正切 $\tan \delta_e$; (b) 基板厚度 d

超材料吸波体对具有不同极化角垂直入射电磁波的吸收率如图 6 所示, 其中极化角 ϕ 为图 1(a) 中从 $+x$ 轴方向顺时针旋转到电场矢量 E 的夹角.

随着极化角 ϕ 由 0° 逐渐增大到 90° , 吸收峰的频率和幅值大小基本保持不变, 这主要是因为该超材料吸波体的单元结构具有旋转对称性, 因而对垂直入射电磁波的极化方向是不敏感的。

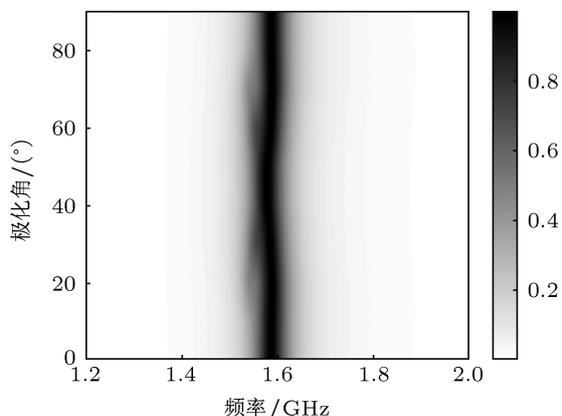


图6 超材料吸波体对不同极化角垂直入射电磁波的吸收率

为进一步研究超材料吸波体的吸收物理机制, 图7给出了其在吸收峰频率 1.59 GHz 的场分布. 加载交指电容的耶路撒冷十字金属结构的表面电流分布如图 7(a) 所示, 其表面电流可视为一个电偶极子, 产生电响应, 实现对入射波电场的耦合. 由于相邻的耶路撒冷十字中交指结构间的电容很大, 入射

波电场主要被耦合局限于该区域, 介质基板中间位置的电场强度分布如图 7(b) 所示, 在交指结构的位置, 电场强度显著增强. 由于 FR4 介质基板只具有电损耗, 因而会在电场强度显著增大的位置对电磁波产生强介电损耗吸收. 介质基板中间位置的功率损耗密度分布如图 7(c) 所示, 其中, 损耗吸收最强烈的位置与图 7(b) 中电场强度最大的位置相同. 因而, 该超材料吸波体对入射电磁波的吸收主要是由介质基板中的介电损耗产生。

3 实验样品制作与测试

采用印刷电路板技术加工出的有限尺寸实验样品如图 8(a) 所示, 其尺寸大小为 $165 \text{ mm} \times 82 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 其中, FR4 基板一侧加载交指电容的耶路撒冷十字结构通过圆形金属通孔与另一侧的金属底板相连接, 金属通孔的直径为 1 mm . 实验样品中周期金属结构的各尺寸参数以及介质基板的属性参数与图 1 中的仿真参数完全相同. 采用矩形波导法测试有限尺寸超材料吸波体的反射率, 测试系统如图 8(b) 所示, 是由型号为 BJ14 的 L 波段标准矩形波导和 HP8270ES 矢量网络分析仪组成, 矩形波导的横截面大小为 $165.10 \text{ mm} \times 82.55 \text{ mm}$.

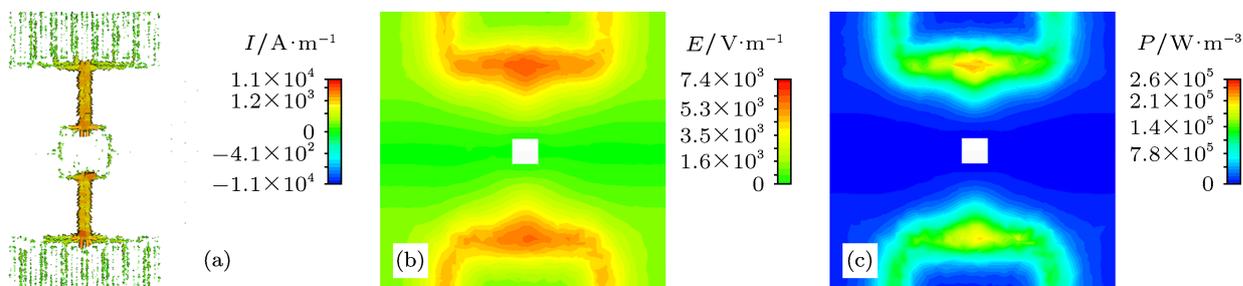


图7 超材料吸波体的 (a) 表面电流分布, (b) 电场强度, (c) 功率损耗密度

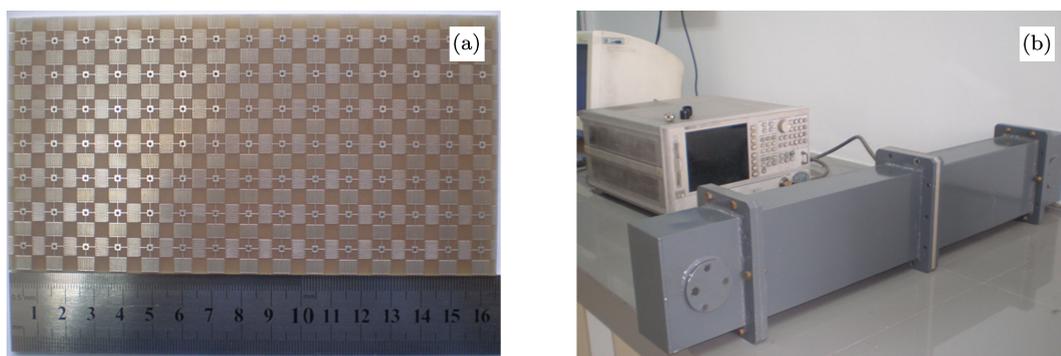


图8 (a) 实验测试样品相片; (b) L 波段矩形波导测试系统

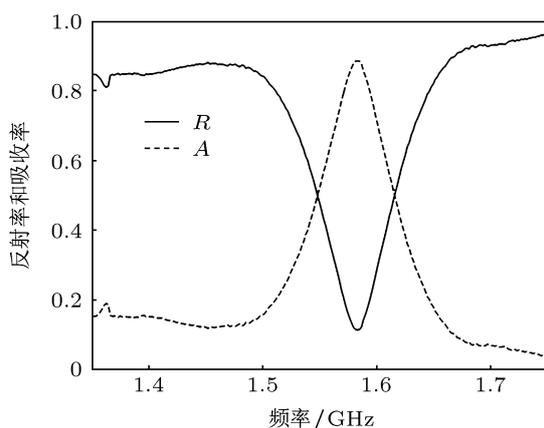


图9 测试的反射率和吸收率

测试得到超材料吸波体的反射率和吸收率曲线如图9所示. 在 1.58 GHz, 反射率达到最小, 吸收率达到最大为 88.48%, 其半功率带宽约为 4.3%. 超材料吸波体的总厚度约为 2 mm, 约为 $1/95$ 工作波长, 吸波体的单元尺寸为 $a = 11$ mm, 约为 $1/17$ 工

作波长. 实验与仿真结果符合较好, 实现了对低频电磁波的窄带强吸收和单元结构的小型化, 并显著减小了吸波体的厚度.

4 结论

本文采用加载交指电容的耶路撒冷十字结构, 通过增加单元间的耦合电容以降低超材料吸波体的工作频率, 以极薄的厚度和较小的单元尺寸对低频电磁波实现窄带强吸收, 并对斜入射 TE 和 TM 极化电磁波具有宽角度吸收特性, 在 60° 时依然具有较高的吸收率, 且吸收峰的频率基本保持不变, 从而使其更具实用性. 实验测试结果表明, 该超材料吸波体在 1.58 GHz, 吸收率达到最大为 88.48%, 其厚度约为 $1/95$ 工作波长, 单元尺寸约为 $1/17$ 工作波长, 以极薄的厚度对低频电磁波实现窄带强吸收和单元小型化.

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [2] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese) [张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 罗春荣 2010 物理学报 **59** 6078]
- [3] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5715 (in Chinese) [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 5715]
- [4] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 张艳萍, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]
- [5] Xu Y Q, Zhou P H, Zhang H B, Chen L, Deng L J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044102
- [6] Ma Y, Chen Q, Grant J, Saha S C, Khalid A, Cumming D R S 2011 *Opt. Lett.* **36** 945
- [7] Chen S, Cheng H, Yang H F, Li J J, Duan X Y 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 253104
- [8] Huang Y J, Wen G J, Li J, Zhong J P, Wang P, Sun Y H, Gordon O, Zhu W R 2012 *Chin. Phys. B* **21** 117801
- [9] Yang Y J, Huang Y J, Wen G J, Zhong J P, Sun H B, Gordon O 2012 *Chin. Phys. B* **21** 038501
- [10] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, Gu J, Han J G, Zhang W L, Cui T J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 154102
- [11] Fante R L, McCormack M T 1988 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **36** 1443
- [12] Simovski C R, Maagt P D, Member S, Melchakova I V 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 908
- [13] Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **60** 4650
- [14] Reynolds J E, Munk B A, Pryor J B, Marhefka R J 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5346
- [15] Costa F, Monorchio A, Manara G 2012 *IEEE Antenn. Propag. Mag.* **54** 35
- [16] Luukkonen O, Simovski C, Granet G, Goussetis G, Lioubtchenko D, Räisänen A V, Tretyakov S A 2008 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **56** 1624
- [17] Costa F, Monorchio A, Manara G 2009 *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications* Turin, Italy, September 14–18, 2009 p852
- [18] Costa F, Monorchio A, Manara G 2009 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* Charleston, USA, June 1–5, 2009 p1
- [19] Tretyakov S 2003 *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics* (1st Ed.) (London: Artech House) p230

Simulation and experiment demonstration of an ultra-thin wide-angle planar metamaterial absorber*

Lu Lei^{1)†} Qu Shao-Bo¹⁾ Su Xi²⁾ Shang Yao-Bo³⁾ Zhang Jie-Qiu¹⁾ Bai Peng²⁾

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

2) (Research Center of Synthetic Electronic Information System and Electronic Countermeasure Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

3) (College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 19 April 2013; revised manuscript received 19 July 2013)

Abstract

In this paper, we present the simulation and experimental validation of an ultra-thin planar metamaterial absorber, which is composed of Jerusalem crosses loaded by interdigital capacitors. By increasing the coupling capacitance between adjacent unit cells, we are able to significantly lower the operating frequency of the absorber. The measured results indicate that the metamaterial absorber achieves a peak absorption of 88.48% at 1.58 GHz. The total thickness and the unit cell size of the absorber are 2 mm and 11 mm, which are approximately 1/95 and 1/17 of the working wavelength, respectively. Additionally, the Jerusalem crosses and the metallic ground plane are connected by vias, which makes the metamaterial absorber achieve wide-angle absorption for both transverse electric and transverse magnetic polarizations electromagnetic wave. The absorptivity is still large even at the incident angle of 60°, and the frequency of the absorption peak almost has no deviation, which makes the absorber more practical.

Keywords: ultra-thin, wide-angle, metamaterial absorber

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.62.208103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11274389) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB623306).

† Corresponding author. E-mail: bblfdd@163.com