

超薄电磁屏蔽光窗超材料吸波器

白正元^{1,2}, 姜雄伟¹, 张 龙¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出并验证了一种新型超薄微波超材料吸波器设计。该超材料吸波器由三层金属结构层和两层介质材料层组合而成, 并采用两个相同的金属圆环作为双层复合谐振结构单元。该设计与传统的单层谐振结构单元相比, 不仅大大减小了吸波器整体结构厚度, 而且有效提高了电磁波吸收率。利用有限元电磁模拟对该吸波器内部的空间电磁场及表面电流分布进行仿真与分析, 阐述了其电磁吸波物理机理。模拟和实验结果均证实该吸波器具有极化不敏感及宽角度入射稳定特性。该超薄超材料电磁吸波器整体结构简单, 占空比低, 在电磁屏蔽光窗等领域具有潜在应用。

关键词 材料; 超材料; 电磁吸波器; 微波; 谐振

中图分类号 O441.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0816003

Ultra-Thin Metamaterial Absorber for Electromagnetic Window Shielding

Bai Zhengyuan^{1,2}, Jiang Xiongwei¹, Zhang Long¹

¹Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A novel ultra-thin microwave metamaterial absorber design is proposed and experimentally demonstrated. The metamaterial absorber consists of three metallic structural layers and two dielectric-material layers. Two identical metallic circular rings are used as the double composite resonant structural units. Compared to the traditional resonant unit with a single-layered pattern, this new design has an efficient enhancement in the absorptivity of electromagnetic wave as well as an obvious reduction in the thickness of the whole structure. The electromagnetic simulation based on the finite element method is employed to simulate and analyze the distributions of inner spatial electromagnetic field and surface current of this absorber, and the absorption mechanism of electromagnetic waves is expounded. The simulated and experimental results both confirm this absorber is polarization-independent and stable for the wide oblique angle incidence. This ultra-thin metamaterial absorber with a simplified structure and a low duty cycle has potential applications in many practical areas such as electromagnetic window shielding.

Key words materials; metamaterials; electromagnetic absorber; microwaves; resonance

OCIS codes 160.3918; 350.2450; 350.4010

1 引 言

在过去的十余年间,超材料作为一种新型人工电磁材料,由于其具有超常的物理性质,得到了广泛的关注。超材料由亚波长尺寸的周期微纳结构单元组成,具备独立调节其自身等效介电常数和等效磁导率的能力,所覆盖的频率范围已从微波扩展至可见光波段,因而在完美透镜成像^[1-3]、隐身斗篷^[4-7]、太赫兹器件^[8]、雷达及天线系统^[9-12]等许多领域都有重要的研究意义。

收稿日期: 2017-03-10; **收到修改稿日期:** 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61405224)、上海市自然科学基金(14ZR1445000)

作者简介: 白正元(1989—),男,博士研究生,主要从事超材料器件设计方面的研究。E-mail: zybai@siom.ac.cn

导师简介: 张 龙(1974—),男,博士,研究员,主要从事红外材料及隐身技术方面的研究。E-mail: lzhang@siom.ac.cn

(通信联系人)

超材料在新型电磁吸波器的设计中同样具有重要应用。与传统的电磁吸波器件相比,超材料吸波器具有尺寸更小、厚度更薄、多带和宽带吸波性能优异等特点^[13-15]。自从超材料吸波器首次被 Landy 等^[16]提出并验证以来,相关研究发展迅速,已在电磁隐身^[17]、微热辐射计^[18-19]、传感^[20-22]等领域得到了广泛应用。典型的超材料吸波器通常采用三层复合结构,以介质板为中间夹层,上层为金属谐振结构单元,下层为金属平板。通过调整上层金属几何结构参数和介质层厚度实现上层结构表面与自由空间的阻抗匹配,进而实现吸波器对特定频带入射电磁波的吸收^[23]。

在现代雷达和混合无线通信系统中,电磁屏蔽光窗也常常引入超材料吸波器设计以满足多光谱应用的需求,即在吸收低频入射电磁波的同时,实现整体结构对红外至可见光波段光信号的高透射率。因此,电磁屏蔽光窗的基本结构设计需要具备低占空比的特点,才能满足以上需求。然而,大多数超材料吸波器都采用金属平板作为底层结构^[15,24],从而导致所有频段的入射电磁波都无法穿过。此外,在实际应用需求中,电磁屏蔽光窗器件的小型化也是一个重要的发展方向。因此,需要不断优化相应超材料吸波器的设计,以满足具体的应用要求。

本文提出了一种新型超薄超材料电磁吸波器的设计方法。该设计采用双层金属复合谐振单元取代典型的单层金属谐振结构单元,在有效提高电磁波吸收率的同时,大大减小了超材料吸波器的整体厚度,同时,整体结构依然保持了低占空比的特性,结构简单,灵活可调节。基于有限元方法的三维电磁场仿真分析,进一步阐述了该设计的电磁吸波物理机理,模拟计算和实验测试结果证实了该超材料吸波器具有极化不敏感和宽角度工作稳定性等特点。

2 结构设计 with 计算

设计的超材料吸波器的基本结构单元如图 1 所示, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别为入射电磁波的电场和磁场, \mathbf{k} 为电磁波波矢量。该吸波器由三层金属结构和两层介质组合而成:上层和中间层金属结构单元为完全相同的金属圆环,底层结构为金属网栅,分别被两个相同厚度的超薄介质材料层分隔开。该吸波器的基本结构单元周期 P 为 8 mm,底层金属网栅的相邻金属线间隔 d 为 1.6 mm,两层介质材料层厚度 h 均为 0.2 mm,所有金属线的横向宽度 w 均为 0.2 mm。忽略金属线的厚度,则该超材料吸波器的整体厚度仅为 0.4 mm。总体上看,该吸波器结构的基本结构单元包含了两个半径 R 为 2.7 mm 的金属圆环和 x, y 方向上共 25 根金属线组成的网栅,结构设计简单,具有中心对称特性和较低的占空比。

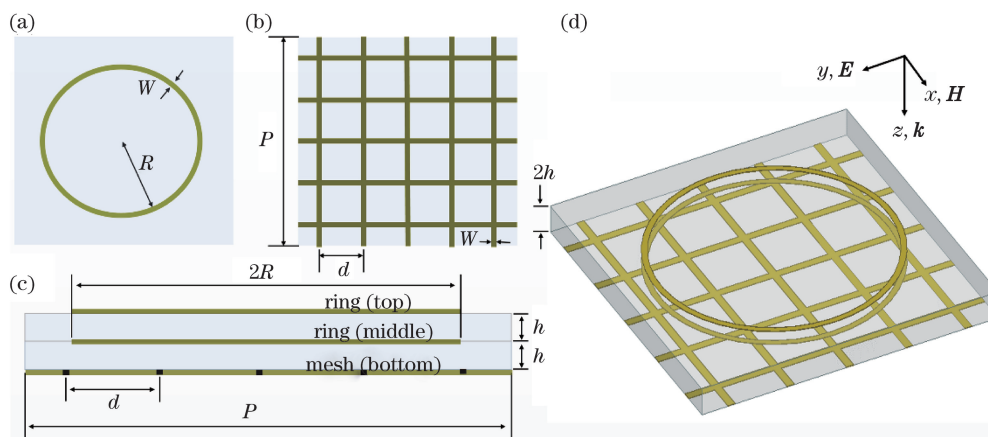


图 1 超材料吸波器的基本结构单元示意图。(a)上层和中间层金属圆环俯视图;
(b)底层金属网栅俯视图;(c)侧视图;(d)三维示意图

Fig. 1 Schematic of basic structural unit of metamaterial absorber. (a) Top view of metallic circular rings in top and middle layers; (b) top view of metallic mesh in bottom layer; (c) side view; (d) three-dimensional view

采用基于有限元方法的 HFSS 三维电磁仿真软件对所设计的超材料吸波器结构进行模拟计算。仿真中将 x, y 方向的边界条件均设置为主从边界条件, z 轴方向则设置为 Floquet 波端口。采用平面电磁波作为入射激励源,横电(TE)模式和横磁(TM)模式偏振分别沿 y 轴和 x 轴方向。结构设计中所有金属材料均

为铜, 电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。介质层材料选为 FR-4, 这是一类常用的印刷电路板(PCB)材料, 其介电常数和损耗角分别为 4.3 和 0.03, 可在 HFSS 软件自带的材料库中直接选择。选用频域有限元算法进行模拟, 可以得到超材料吸波器电磁响应的有效 S 参数(透射: S_{21} , 反射: S_{11})与电磁波频率 ω 间的对应关系。电磁波的能量透射率 $T(\omega)$ 和反射率 $R(\omega)$ 可分别表示为

$$T(\omega) = |S_{21}|^2, \quad (1)$$

$$R(\omega) = |S_{11}|^2. \quad (2)$$

通过几何参数的优化, 可以调控该吸波器结构的等效介电常数和等效磁导率, 使二者趋于一致。此时, 超材料吸波器与空气界面满足空间阻抗匹配条件, 从而实现该超材料吸波器对特定频率电磁波的减反射和吸收, 其吸收率 A 可表示为

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega). \quad (3)$$

3 模拟结果与分析讨论

根据仿真计算得到的 S 参数曲线, 所设计的超材料吸波器在 TE 模式电磁波正入射下的反射率、透射率以及吸收率的计算结果如图 2(a) 所示。可以看到, 在 5~16 GHz 频率范围内出现了两个谐振吸收峰 8.37 GHz 和 9.98 GHz, 对应的电磁波吸收率分别为 56.9% 和 97.5%, 即该吸波器在 9.98 GHz 频率处实现了对电磁波的近完美电磁吸收, 相应的半峰全宽为 8.9% (频率范围: 9.53~10.42 GHz)。若将该超材料吸波器结构看作一个整体, 则可以通过 S 参数提取法^[25] 进一步计算得到其与空气界面处的有效空间阻抗值。根据图 2(b) 得到的计算结果可知, 在 9.98 GHz 频率处, 该吸波器整体结构的阻抗实部接近 1, 满足与空气波阻抗匹配的条件, 因而电磁波在该吸波器上表面的反射率接近 0。同时, 其空间阻抗的虚部为负值, 说明电磁波在吸波器材料内部传输过程中, 能量被不断吸收(损耗)。当上述两种情况同时满足时, 所设计的超材料吸波器可实现在 9.98 GHz 频率处的近完美吸收。

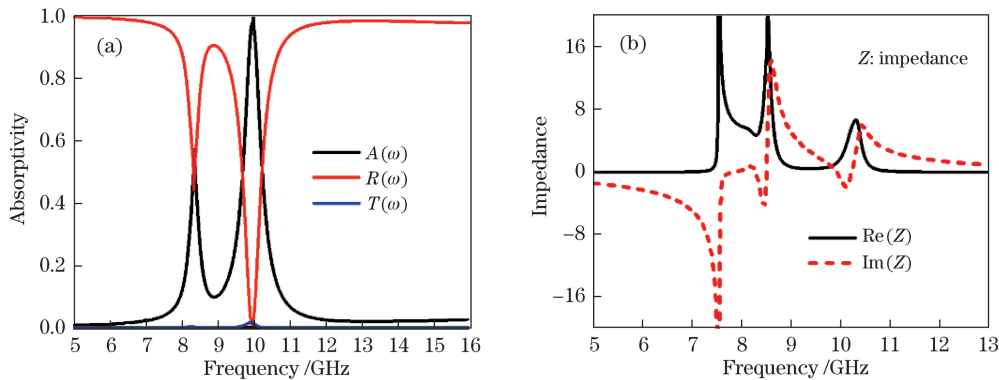


图 2 超材料吸波器的模拟结果。(a) 反射率、透射率及吸收率; (b) 空间等效阻抗

Fig. 2 Simulated results of metamaterial absorber. (a) Reflectivity, transmissivity, and absorptivity; (b) equivalent spatial impedance

为了更深入讨论所设计的超材料吸波器的电磁波吸收物理机理, 对其在谐振状态下的空间电磁场分布进行模拟计算。首先研究 TE 模式平面波入射下其结构单元的空间谐振电场强度分布。为便于分析讨论, 在两个谐振吸收频率(8.37 GHz 和 9.98 GHz)下对不同金属结构层位置的电场强度分布进行仿真和比较, 仿真计算结果如图 3 所示。通过对比可以清楚地观察到两个谐振吸收频率处的空间电磁场分布明显不同。当入射电磁波的频率为 8.37 GHz 时, 谐振电场能量主要集中在中间层金属圆环沿电场 E 方向的两侧以及下层金属网栅与之相邻的位置, 而上层的金属圆环上几乎没有振荡的电场能量存在。而当入射电磁波的频率为 9.98 GHz 时, 空间谐振的电场能量主要集中在上层金属圆环沿电场 E 方向两侧以及中间层金属圆环的相邻位置, 在下层金属网栅上的谐振电场能量则非常弱。由此可推测, 该超材料吸波器在两个谐振频率处的吸收率不同, 这主要是由于不同频率的入射电磁波所诱导的空间电磁场谐振分布存在差异。

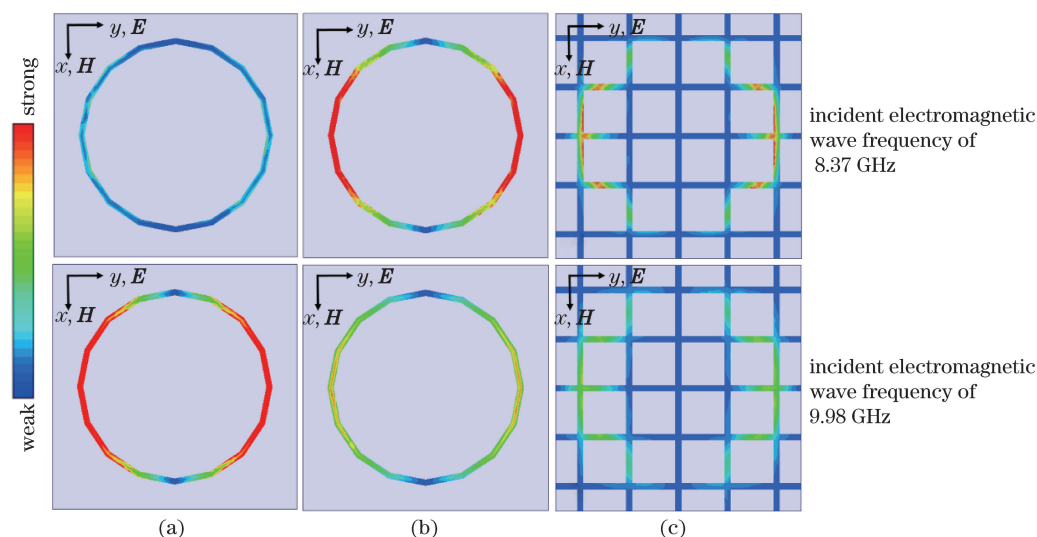


图 3 超材料吸波器在不同入射电磁波频率下的电场强度分布。(a)上层金属圆环;(b)中间层金属圆环;(c)底层金属网栅
Fig. 3 Electric-field strength distributions in metamaterial absorber at different incident electromagnetic wave frequencies.

(a) Metallic circular ring in top layer; (b) metallic circular ring in middle layer; (c) metallic mesh in bottom layer

同样选择 8.37 GHz 和 9.98 GHz 两个谐振频率,对该结构单元的表面电流矢量分布进行模拟计算,结果如图 4 所示。当入射电磁波的频率为 8.37 GHz 时,可以清晰地看到,在中间层金属圆环上形成了沿电场 E 方向流动的表面振荡电流。此时,在下层金属网栅的邻近位置上,也可以观察到明显的沿相反方向流动的表面振荡电流,但在上层金属圆环上未能观察到该现象。与前述电场强度分布情况类似,当入射电磁波的频率为 9.98 GHz 时,结构上的表面电流矢量分布也发生了明显变化。此时,表面振荡电流主要集中在上层金属圆环及中间层金属圆环的相应位置上,电流沿电场 E 谐振方向流动且上、下两层金属圆环上的表面电流的流动方向相反,而在下层金属网栅上,几乎无法观察到表面振荡电流。

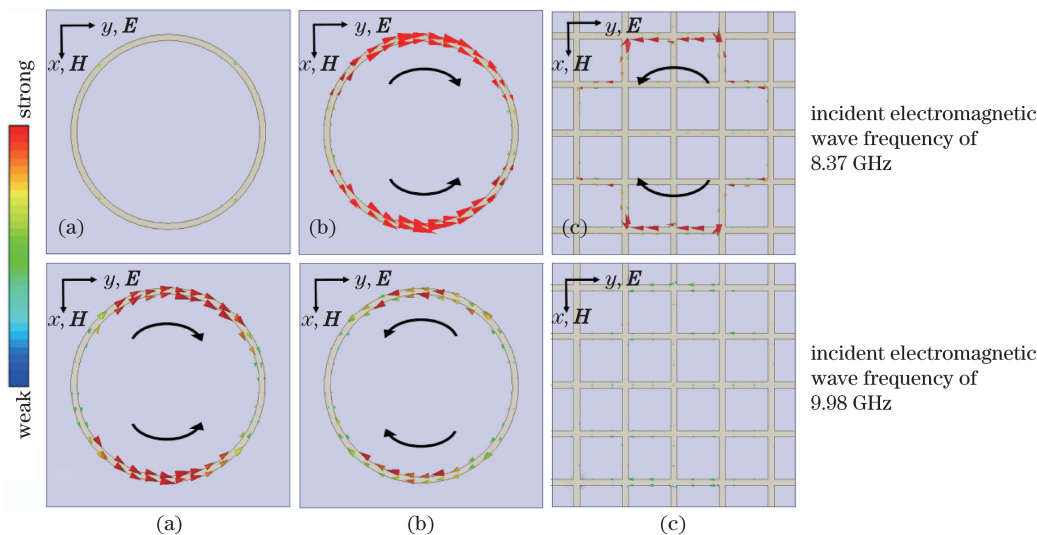


图 4 超材料吸波器在不同入射电磁波频率下的表面电流矢量分布。

(a)上层金属圆环;(b)中间层金属圆环;(c)底层金属网栅

Fig. 4 Surface current vector distributions in metamaterial absorber at different incident electromagnetic wave frequencies.

(a) Metallic circular ring in top layer; (b) metallic circular ring in middle layer; (c) metallic mesh in bottom layer

通过空间电场强度和表面电流矢量分布的模拟结果可以得出,在两个不同的谐振吸收频率处,该超材料吸波器结构单元上均形成了由反向平行表面电流组成的谐振环路。谐振状态下的环路电流可激励周围介质层内部的磁场发生谐振,谐振的磁场将在各自频率下与同时发生谐振的空间电场发生耦合,使谐振层与相邻结构层或空气的界面处满足阻抗匹配条件,进而抑制该界面处的电磁波反射。当材料的电磁损耗系数(介质

材料损耗和金属欧姆损耗)足够大时,入射的电磁波能量将进入材料结构中产生剧烈的电磁振荡并不断耗散,从而实现特定频率下的电磁波能量吸收。

上述分析和讨论阐述了该超材料吸波器的电磁波吸收机理,需要指出的是,该超材料吸波器只在 9.98 GHz 频率处实现了电磁波的近完美吸收,原因讨论如下。首先,超材料结构单元内的电磁谐振耦合促使其在界面处的空间阻抗匹配条件得到满足,进而使界面处的电磁波反射得到抑制。在 8.37 GHz 频率处,层间电磁耦合主要发生在中间层金属圆环和底层金属网栅之间的介质层中,因此,部分电磁波能量在到达中间层金属圆环之前已经被上层金属圆环反射。相反,在 9.98 GHz 频率处,层间电磁耦合主要发生在上层金属圆环和中间层金属圆环之间的介质层内,因而实现了超材料吸波器整体结构上表面与空气界面处的空间阻抗匹配条件。此时,几乎所有的电磁波能量均可穿过材料结构的上表面进入其内部,并产生剧烈的电磁振荡和能量耗散。其次,对于 9.98 GHz 频率的入射电磁波而言,底层金属网栅结构可以视作一层具备全反射特性的电磁屏蔽结构,因此穿过结构内部的谐振电磁场能量在抵达底层金属网栅后被全反射回介质层中,即电磁波在吸波器结构内的有效传输距离为结构总厚度的两倍,因而相对于 8.37 GHz 频率的入射波,9.98 GHz 频率电磁波的能量实际损耗空间大大增大。超材料吸波器结构上表面的电磁波反射抑制以及结构内部的高吸收损耗是实现 9.98 GHz 频率处电磁波近完美吸收的两个主要因素。

为进一步研究该超材料吸波器的电磁波吸收物理机理,采用 HFSS 软件数据后处理功能,对 9.98 GHz 频率下的单元结构内部电磁吸收损耗分布进行仿真计算,结果如图 5 所示。单元结构内的电磁波能量损耗主要来源于金属欧姆损耗和介质材料损耗。由图 5(a)~(c)可以看出,欧姆损耗主要产生于上层金属圆环和中间层金属圆环上,其分布位置和损耗大小与表面电流矢量分布相同,即证明了金属欧姆损耗主要取决于表面电流在金属结构上的振荡强度。根据图 5(d)、(e)所示结果可知,上部介质层内的介质损耗明显大于下部介质层内的损耗,且介质损耗主要集中在介质层上下两侧金属结构间的区域,这也与 9.98 GHz 频率处电磁谐振耦合主要发生于两金属圆环之间的仿真计算结果相对应,再次证明了损耗的大小由电磁谐振强度决定。此外,对电磁波能量总吸收损耗的比例分布进行了计算,根据图 5(f)所示结果可知,介质损耗约为金属欧姆损耗的 3 倍,证明在该超材料吸波器结构中,介质材料损耗对电磁波的吸收贡献更大。

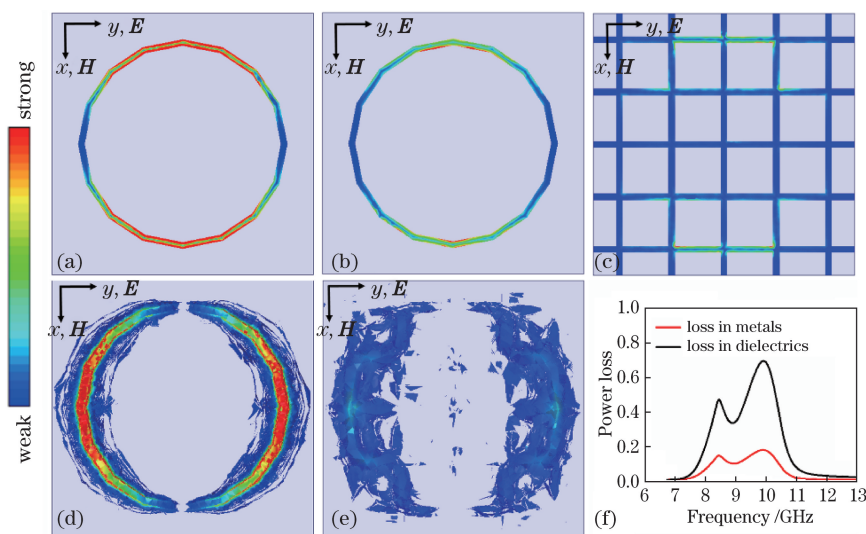


图 5 在 9.98 GHz 频率下超材料吸波器单元结构中的损耗分布的仿真结果。(a)上层金属圆环处的欧姆损耗;(b)中间层金属圆环处的欧姆损耗;(c)底层金属网栅表面处的金属欧姆损耗;(d)上部介质层中的介质损耗;(e)下部介质层中的介质损耗;(f)金属欧姆损耗与介质损耗对比

Fig. 5 Simulated results of loss distributions in unit structure of metamaterial absorber at 9.98 GHz. (a) Ohmic loss in top metallic circular ring layer; (b) ohmic loss in middle metallic circular ring layer; (c) ohmic loss on surface of metallic mesh in bottom layer; (d) dielectric loss in upper dielectric layer; (e) dielectric loss in lower dielectric layer; (f) comparison of metallic ohmic loss and dielectric loss

所设计的超材料吸波器可以灵活调整谐振吸收频率。如图 6 所示,同时改变上层和中间层金属圆环半径的大小,使其分别增大至 3.5 mm、3.1 mm 或减小至 2.3 mm、1.9 mm,相应的吸收谐振峰也逐渐向低频或高频波段移动,移动范围为 6.3~14.2 GHz,且吸收率始终大于 97%。因此,在较宽频带范围内,只需改变两层金属圆环的半径大小,便可轻松获得任意所需频率下的近完美电磁吸收。

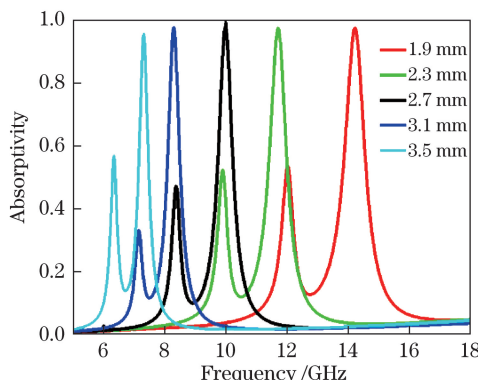


图 6 不同金属圆环半径时超材料吸波器的吸收模拟曲线

Fig. 6 Simulated absorption curves of metamaterial absorbers with different metallic circular ring radii

所设计的超材料吸波器对不同空间极化角度下垂直入射电磁波的吸收响应结果如图 7 所示。当入射平面波的方位角 φ 从 0° 逐渐增大至 45° 时,该结构始终保持稳定的电磁吸收,这得益于所设计的超材料吸波器为四轴中心对称结构。在 TE 和 TM 模式下,该吸波器能够始终保持严格的结构一致性;以任意极化角度入射的平面电磁波都可以分解成 TE 和 TM 两种模式,进而有效激励材料结构表面的电磁场谐振耦合,满足 9.98 GHz 谐振频率下的空间阻抗匹配条件,从而实现超材料吸波器的近完美电磁吸收。

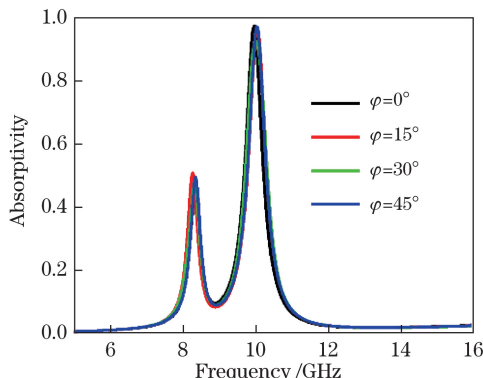


图 7 超材料吸波器对不同空间极化角度下入射电磁波的吸收模拟曲线

Fig. 7 Simulated absorption curves of metamaterial absorber for incident electromagnetic waves with different spatial polarization angles

在实际应用中,空间中传输的电磁波常常来自不同的方向,这对超材料吸波器的实际性能提出了更高的要求。为了检验所设计的超材料吸波器对倾斜入射电磁波的吸收响应特性,分别对 TE 和 TM 模式下不同入射角度 θ 的电磁波吸收特性进行了模拟计算,结果如图 8 所示。对于 TE 模式的入射电磁波,如图 8(a)所示,随着入射角度的逐渐增大,谐振频率处的吸收幅值慢慢降低,并发生轻微蓝移,但其在小于 45° 倾斜入射角度下的吸收率仍高于 90%。入射角大于 45° 后,吸收率将明显减小,这主要是由于随着入射角度的增加,多层结构间的谐振磁通量逐渐变小。在 TE 模式下,当电磁波倾斜入射时,其磁场分量将随着入射角度 θ 的增加相对于结构 x - y 面逐渐倾斜,此时垂直穿过多层结构横截面的谐振磁通量将逐渐变小(磁通量大小正比于 $\cos \theta$)。在之前的分析讨论中已指出,该吸波器的高效电磁波吸收得益于结构内部电场和磁场谐振耦合所产生的空间阻抗匹配,因此,当入射电磁波的倾斜角度过大时,多层结构间的谐振磁通量将减小,进而导致电磁场谐振耦合的减弱,最终使吸收率明显减小。对于 TM 模式的入射电磁波,如图 8(b)所示,随着入射角度的增大,谐振吸收频率向高频方向轻微移动,但吸收幅值始终大于 97%。这说明在 TM 模式下,材料多层

结构间的谐振磁通量保持不变,保证了材料界面的空间阻抗匹配。吸收频率的蓝移是因为结构单元的等效电容和电感随着电磁波入射角度的增大而逐渐变小,由于谐振频率反比于这两个参量,因而吸收频率向高频方向逐渐移动^[26]。综上所述,TE 和 TM 模式下的模拟计算结果证明了所设计的超材料吸波器具有出色的宽角度入射稳定性。

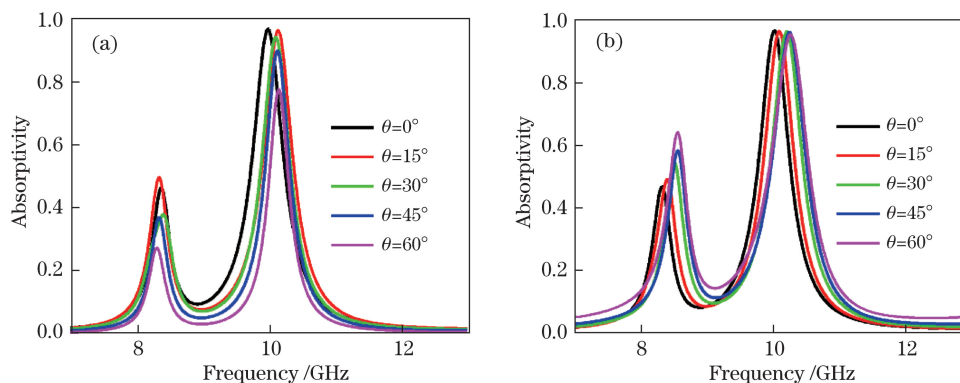


图 8 (a) TE 和(b) TM 模式下的超材料吸波器对不同倾斜角度入射电磁波的吸收模拟曲线

Fig. 8 Simulated absorption curves of metamaterial absorber for incident electromagnetic waves with different angles of inclination under (a) TE and (b) TM modes

4 样品制备与实验验证

为了证实所设计的超材料吸波器结果的可靠性,采用传统的 PCB 方法加工制备尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、包含 625 个结构单元的样品,如图 9(a)所示。首先将所需的金属铜结构分别加工在两块厚度均为 0.2 mm 的 FR-4 基板上,再将两块基板按结构顺序叠加复合,便可得到所设计的超材料吸波器测试样品。

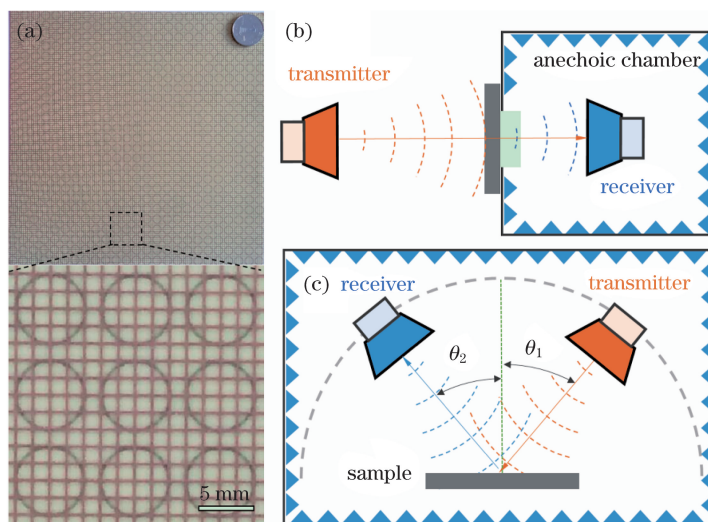


图 9 (a)超材料吸波器样品照片(底部: 3×3 结构单元放大图);(b)透射率测试实验装置示意图;

(c)反射率测试实验装置示意图

Fig. 9 (a) Photo of metamaterial absorber sample (bottom side: enlarged view of 3×3 structural units);

(b) diagram of experimental setup for transmissivity measurement;

(c) diagram of experimental setup for reflectivity measurement

样品的测试分为透射率测试和反射率测试两部分,根据测试结果可计算得到样品的实际吸收率谱线。样品的透射率测试在自由空间中进行,如图 9(b)所示,实验装置采用矢量网络分析仪(PNA-X N5242A, Agilent 公司)和一对角天线(扫描范围: $1 \sim 18\text{ GHz}$),其中接收天线放置于电磁消声腔中,以避免外界的电磁干扰,样品覆盖在消声腔端口处。为了避免测试中近场效应的影响,所有测试设备距离地面高度均为 1.5 m ,发射天线和接收天线与样品间的距离分别为 0.5 m 和 0.3 m 。在样品测试之前,需对测试数据

进行校正。由于测试设备的限制,只对正入射情况下的电磁波透射率进行测量。样品的反射率测试在微波暗室中进行,如图 9(c)所示,实验装置同样采用矢量网络分析仪和一对扫描范围为 $1\sim 18$ GHz 的角天线以及半圆弧滑动轨道。样品放置于半圆弧轨道的圆心处,两个角天线安置于滑动轨道上,可以测量不同角度下的反射率。为了消除近场效应的影响,角天线和样品之间的距离大于 D^2/λ_0 ,其中 D 为角天线孔径的最大横向尺寸, λ_0 为入射电磁波的中心波长。采用一块与待测样品整体结构尺寸相同的铜板进行数据的归一化测量,每隔 15° 测量一次数据,测量范围为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 。

样品的实验测试结果如图 10 所示。由图 10(a)可知,在正入射情况下,电磁波在 10.04 GHz 频率处的吸收率为 94.8%,与实验结果吻合较好。谐振吸收频率及幅值的微小误差主要来源于样品加工制备过程中产生的实际误差。图 10(b)所示为样品在 TM 模式、不同入射角度下的反射率(S_{11})测试结果,图中虚线所代表的测试结果与黑色实线代表的模拟计算结果吻合较好,证明了该样品在电磁波倾斜入射时的吸收稳定性。设备限制导致无法测量倾斜角度下的样品透射率谱线,但由于倾斜角度的实际透射率不会大于垂直入射时的实际透射率,因此,得到的模拟计算与实验结果可以充分证明所设计的超材料吸波器在不同倾斜角度入射电磁波下具有出色的角度稳定性。基于以上结果可以得出,与 Landy 等^[16]所提出的传统超材料吸波器结构(整体厚度为 0.72 mm,理论吸收效率为 96%,实验值为 88%)相比,本文提出的超材料吸波器(整体厚度为 0.4 mm,吸收率的理论和实验值分别为 97.5%和 94.8%)采用双层耦合谐振单元结构,在使吸波器整体结构厚度减小的同时,有效提高了电磁吸波效率,性能更加优异。

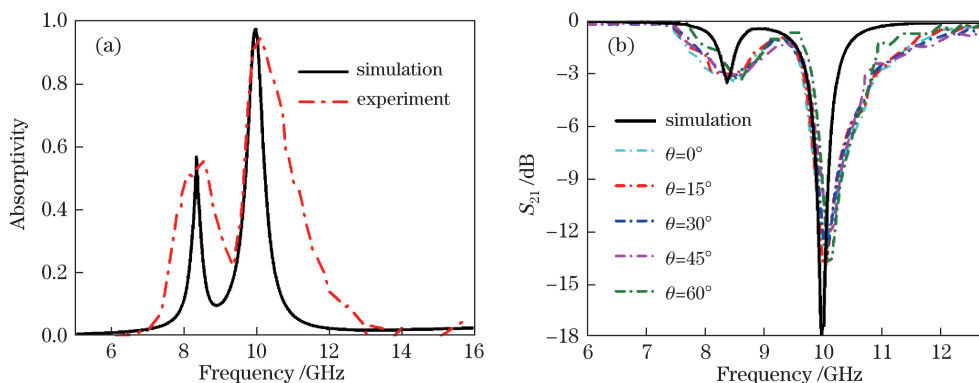


图 10 超材料吸波器的模拟与测试结果。(a)正入射时的吸收率;(b)不同倾斜角度入射时的反射率

Fig. 10 Simulated and measured results of metamaterial absorber. (a) Absorptivity under normal incidence; (b) reflectivity under different incident angles

5 结 论

提出了一种新型超薄超材料吸波器的设计方法,将典型的单层金属谐振结构单元替换为双层金属耦合谐振单元,采用超薄介质层设计,大大减小了该超材料吸波器的整体厚度。在实现近完美电磁吸收的同时,整体结构保持了低占空比特性。通过对不同谐振频率下的空间电磁场强度和表面电流矢量分布的模拟和分析,揭示了该吸波器的电磁波吸收物理机理。模拟计算和实验测试结果证实了该吸波器设计的可靠性及其空间极化不敏感和宽角度入射稳定特性。此外,该超材料吸波器在宽波段范围内具有吸收频带灵活可调节性。因此,基于其结构设计简单和性能优异的特点,所设计的超薄超材料吸波器在光窗电磁屏蔽、无线通信及雷达隐身等领域都具有重要的潜在应用。

参 考 文 献

- [1] Fang N, Lee H, Sun C, *et al.* Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [2] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [3] Jacob Z, Alekseyev L V, Narimanov E. Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8247-8256.

- [4] Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [5] Cai W, Chettiar U K, Kildishev A V, *et al.* Optical cloaking with metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(4): 224-227.
- [6] Valentine J, Li J, Zentgraf T, *et al.* An optical cloak made of dielectrics[J]. *Nature Materials*, 2009, 8(7): 568-571.
- [7] Liu R, Ji C, Mock J J, *et al.* Broadband ground-plane cloak[J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.
- [8] Han Hao, Wu Dongwei, Liu Jianjun, *et al.* A terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0423003.
韩昊, 武东伟, 刘建军, 等. 一种太赫兹类电磁诱导透明超材料谐振器[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0423003.
- [9] Zhu J, Eleftheriades G V. A compact transmission-line metamaterial antenna with extended bandwidth[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 295-298.
- [10] Li D, Szabo Z, Qing X, *et al.* A high gain antenna with an optimized metamaterial inspired superstrate[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(12): 6018-6023.
- [11] Lopez N, Lee C J, Gummalla A, *et al.* Compact metamaterial antenna array for long term evolution (LTE) handset application[C]. *IEEE International Workshop on Antenna Technology*, 2009: 1-4.
- [12] Bai Z Y, Zhang Q, Ju Y F, *et al.* Flexible metamaterial narrow-band-pass filter based on magnetic resonance coupling between ultra-thin bilayer frequency selective surfaces[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(6): 065002.
- [13] Yoo Y J, Zheng H Y, Kim Y J, *et al.* Flexible and elastic metamaterial absorber for low frequency, based on small-size unit cell[J]. *Applied Physics Letter*, 2014, 105: 041902.
- [14] Cao T, Wei C W, Simpson R E, *et al.* Broadband polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial at visible frequencies[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3955.
- [15] Liu X L, Starr T, Starr A F, *et al.* Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(20): 207403.
- [16] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [17] Iwaszczuk K, Strikwerda A C, Fan K, *et al.* Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies[J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 635-643.
- [18] Maier T, Brückl H. Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 3012-3014.
- [19] Maier T, Brückl H. Multispectral microbolometers for the midinfrared[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3766-3768.
- [20] Liu N, Mesch M, Weiss T, *et al.* Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [21] Pryce I M, Kelaita Y A, Aydin K, *et al.* Compliant metamaterials for resonantly enhanced infrared absorption spectroscopy and refractive index sensing[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(10): 8167-8174.
- [22] Sun Yaru, Shi Tonglu, Liu Jianjun, *et al.* Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0328001.
孙雅茹, 史同璐, 刘建军, 等. 太赫兹超材料类 EIT 谐振无标记生物传感[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0328001.
- [23] Watts C M, Liu X L, Padilla W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(23): 98-120.
- [24] Tao H, Landy N I, Bingham C M, *et al.* A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7181-7188.
- [25] Smith D R, Vier D C, Koschny T, *et al.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(3): 036617.
- [26] Sakurai A, Zhao B, Zhang Z M. Resonant frequency and bandwidth of metamaterial emitters and absorbers predicted by an RLC circuit model[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 149: 33-40.