

# 光学学报

## 基于导电塑料膜的角度不敏感宽带超材料吸波体设计及制备

邓光晟<sup>1,2\*</sup>, 陈文卿<sup>1</sup>, 余振春<sup>1,2</sup>, 杨军<sup>1,2</sup>, 尹治平<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学光电技术研究院特种显示与成像技术安徽省技术创新中心, 安徽 合肥 230009;

<sup>2</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009

**摘要** 提出一种基于导电塑料膜谐振结构的超材料宽带吸波体。吸波体采用介质层-膜单元阵列-介质层的三层结构模型,其中上层介质兼具阻抗匹配和保护电阻膜谐振结构的作用。所采用的导电塑料膜片与基于导电墨水的电阻膜结构相比,不仅克服了加工过程中墨水厚度不均匀对方阻的影响,还可兼容激光刻蚀工艺,进而提高了谐振结构的加工精度。模拟结果表明,该吸波体在 6.9~22.7 GHz 的频率范围内,可以保持 90% 以上的入射波吸收率,相对吸收带宽为 106.8%。此外,所提结构对入射波的极化特性不敏感,且对宽角入射的电磁波仍能在宽频带内实现高效吸收。更为重要的是,所提结构中的电阻膜谐振结构与介质基板可以独立加工,这种积木拼搭式的加工方案不仅节省了制备时间,还使得基底材料的选择不再受电阻膜加工的制约,为发展宽带超材料吸波体提供了新的思路。

**关键词** 材料; 导电塑料膜; 超材料; 吸波体; 宽带吸收; 宽角稳定性

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2216001

### Design and Preparation of Angle-Insensitive Broadband Metamaterial Absorber Based on Conductive Plastic Film

Deng Guangsheng<sup>1,2\*</sup>, Chen Wenqing<sup>1</sup>, Yu Zhenchun<sup>1,2</sup>, Yang Jun<sup>1,2</sup>, Yin Zhiping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

<sup>2</sup>Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

**Abstract** A broadband metamaterial absorber based on a resonant structure made of conductive plastic film is proposed. The absorber adopts a three-layer structure model of dielectric layer-film unit array-dielectric layer, in which the upper dielectric layer performs the functions of impedance matching and protection of the resistive film resonant structure. Compared with the resistive film structure based on conductive ink, the conductive plastic film adopted not only overcomes the influence of uneven ink thickness on sheet resistance during processing, but also is compatible with the laser etching process, resulting in higher processing accuracy of the resonant structure. The simulation results show that the proposed absorber can maintain an incident wave absorptivity of more than 90% in the frequency range of 6.9–22.7 GHz, with a relative absorption bandwidth of 106.8%. In addition, the proposed structure is insensitive to the polarization characteristics of incident waves, and it can still achieve efficient absorption of electromagnetic waves with wide incident angles in a wide frequency band. More importantly, its resistive film resonant structure and dielectric substrate can be processed independently. Not only saving preparation time, but also removing the restriction of resistive film processing on the choice of substrate material, such a building block type of processing scheme provides a new approach for the development of broadband metamaterial absorbers.

**Key words** materials; conductive plastic film; metamaterial; absorber; wideband absorption; wide-angle stability

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-07; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61871171)、航空科学基金(2020Z0560P4001)、中央高校基本科研业务费资助项目(JD2020JG-PY0012)

通信作者: \*dgsh@hfut.edu.cn

# 1 引言

在电磁屏蔽和雷达隐身等领域中,宽带电磁波吸收材料起到了至关重要的作用。超材料作为一类可自由调控电磁波的人工介质<sup>[1-2]</sup>,为构建电磁吸波材料提供了新的途径。相比传统的电磁波吸波材料,基于超材料的电磁波吸波体具有体积小、厚度薄和重量轻等独特优势<sup>[3]</sup>。构建宽带超材料吸波体的主要方法有加载集总电阻元件、使用多层堆叠结构和采用多个单元复合结构等<sup>[4-6]</sup>,但上述方法不可避免地增大了吸波体的体积和厚度,不利于器件的轻量化。近年来,研究人员发现利用电阻膜结构代替金属结构,可以将电磁谐振转化为电路谐振模式,使得吸波体的表面阻抗与自由空间阻抗可以在较宽的频率范围内匹配,从而实现宽带吸收效果<sup>[7]</sup>。基于电阻膜表面设计的宽带超材料吸波体不仅具有厚度薄的优点,其制备难度还明显小于其他类型的宽带超材料吸波体,进而日益得到了国内外研究者的广泛关注<sup>[8-9]</sup>。

现有报道的电阻膜超材料吸波体一般采用导电墨水来构建电阻膜谐振单元。Olszewska-Placha等<sup>[10]</sup>提出了一种宽带柔性电磁吸波体,该结构由印制在介质隔离层上的基于石墨烯纳米片墨水的谐振单元构成。Bu等<sup>[11]</sup>设计了一款由交叉的矩形环形电阻膜、介质基片和连续金属膜组成的宽带超材料吸波体,该吸波体在4.75~17.57 GHz范围内获得了12.82 GHz的宽吸收,该结构可以在宽入射角下工作并对极化角不敏感。Lu等<sup>[12]</sup>提出了一种由导电墨水加工的电阻膜和玻璃制成的新型透明超材料吸波体,在3.5~18.5 GHz频率范围内实现了高吸收,同时对偏振不敏感。Deng等<sup>[13]</sup>提出了一种基于导电墨水谐振结构的超材料吸波体,吸收频率覆盖了X-Ku波段,并具有宽角和极化不敏感的吸波性能。Li等<sup>[14]</sup>设计了一种柔性宽带电磁微波吸收器,该吸收器由上下介质层和丝网印刷碳基电阻膜组成,吸收带宽为13.5 GHz。基于导电墨水的宽带超材料一般采用丝网印刷工艺进行加工,由于导电墨水的方阻主要取决于其厚度,故这对加工过程中墨水印刷的厚度均匀性提出了较高的要求。若不同电阻膜谐振单元的方阻存在偏差,则吸波体的吸收特性将受到严重影响。

此外,氧化铟锡(ITO)薄膜也被广泛应用于电阻膜宽带吸波体的设计中。Zhang等<sup>[15]</sup>设计了一款由风车形结构ITO膜谐振单元构建的宽带吸波体,通过调整结构的共振实现了8.3~17.4 GHz的宽带吸收。Sheokand等<sup>[16]</sup>提出了由ITO膜构建的宽带吸波体,该结构拥有较小的厚度和光学透明度,在6.06~14.66 GHz的频率范围内实现了90%以上的入射波吸收。Singh等<sup>[17]</sup>提出了十字形ITO谐振单元构成的超材料吸波体,其具有6.61~17.91 GHz的宽带吸收特性。然而,对于基于ITO薄膜的宽带超材料,需首先在基底表面旋涂ITO薄膜,这在很大程度上限制了基底材料的选择。另外,无论是基于导电墨水还是

ITO的超材料吸波体,谐振结构都需要在介质基底上进行加工,加工过程中的失误也将导致整个吸波体失效,进而增加了制备成本。

本文提出了一种基于导电塑料膜谐振结构的超材料宽带吸波体。其中,导电塑料膜谐振结构与介质基板可以独立加工,这种积木拼搭式的加工方案不仅节省了制备时间,还使得基底材料的选择不再受电阻膜加工的制约。此外,所提导电塑料膜兼容激光刻蚀工艺,提高了谐振结构的加工精度。所提宽带超材料吸波体在6.9~22.7 GHz的频率范围内可以实现90%以上的入射波吸收率,相对吸收带宽为106.8%。此外,所提结构对入射波的极化特性不敏感,且对宽角入射电磁波仍能在宽频带内实现高效吸收。

## 2 吸波体的设计与制备

### 2.1 结构设计

所提电阻膜吸波体结构采用介质层-电阻膜单元-介质层的三层结构模型,在模型的底部覆上一层铜板,这层铜板将入射电磁波全部反射,进而在吸波体单元的顶层和底层之间形成电磁谐振层。基于波阻抗匹配的设计原理,电阻膜单元结构的形状与结构参数决定了吸波体的谐振响应特性,调整电阻膜单元和介质层的结构参数可使得结构的输入阻抗与自由空间的波阻抗在特定的频率范围内实现匹配,进而实现电磁波的有效吸收。对吸波体中电阻膜拓扑单元与介质层结构参数进行优化,所提超材料吸波体单元结构示意图如图1所示。图1中上下层介质基板选用的介质材料为PEEK材料,其介电常数为3.1,损耗角正切为0.0035。介质层厚度分别为 $H_1=2.8$  mm和 $H_2=2.6$  mm。两层介质板之间为导电塑料膜谐振单元,膜的厚度为0.1 mm。由于膜厚远小于工作波长,因此在模拟中可利用电阻表面来等效导电塑料膜。利用方阻仪测得的导电塑料膜的方阻值为100  $\Omega$ ,谐振单元采用正方形环内套空心圆环的结构,其结构参数为:结构周期为 $P=5$  mm,方环开口为 $W=3$  mm,圆环外径为 $R_1=1.3$  mm,圆环内径为 $R_2=0.4$  mm。

### 2.2 加工与测试

对所设计的超材料吸波体进行了加工制备,结构样品和电阻膜谐振结构分别如图2(a)和图2(b)所示。为了实现电阻膜谐振单元的高精度加工,选用实验室制备的方阻值为100  $\Omega$ 的导电塑料膜,并利用激光刻蚀工艺完成了20×20单元阵列的加工。此外,为了确保介质层厚度的准确性,上下两层PEEK介质基板均采用3D打印机(SinoTec, ST 200 FDM)打印成型。相较传统超材料吸波体的整体成型加工方式,所设计的超材料吸波体中谐振结构与介质基底可采用分离式加工,极大地提升了基底材料选择的自由度。样品测试在室温(25  $^{\circ}$ C)下进行,实验环境如图2(c)所示。在实验中,将两个与矢量网络分析仪(Rohde & Schwarz, ZVA40)相连的喇叭天线分别作为发射端和接收端,并调整样品位置使之与喇叭天线保持齐平。首先,在

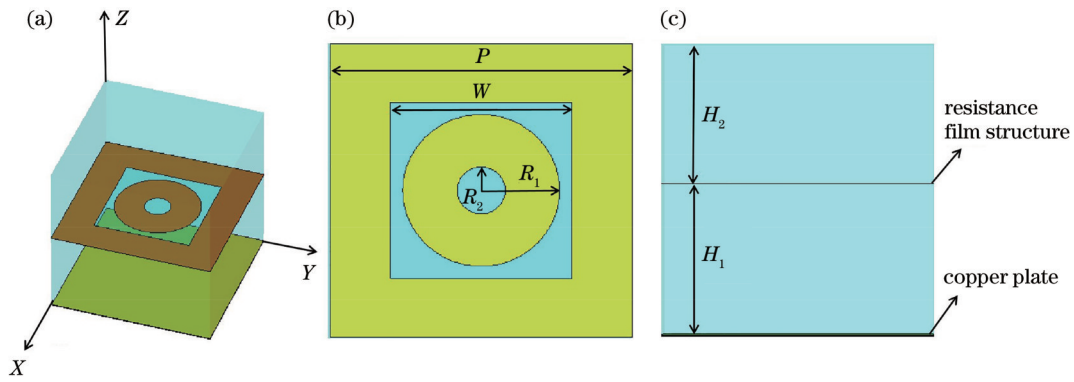


图 1 电阻膜吸波体示意图。(a)单元结构示意图;(b)单元结构俯视图;(c)单元结构侧视图

Fig. 1 Schematic diagram of resistive film-based absorber. (a) Structural diagram of unit cell; (b) top view of unit cell; (c) side view of unit cell

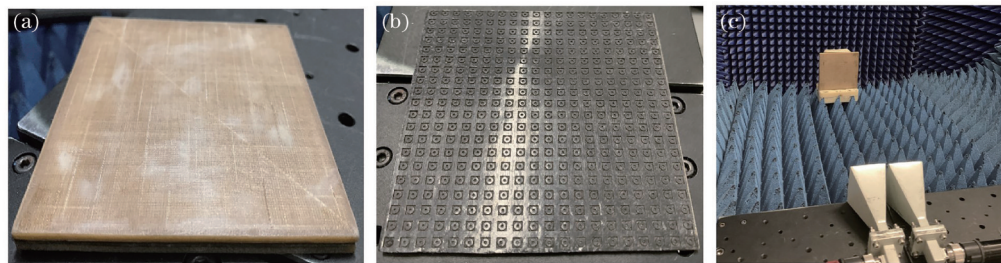


图 2 样品及测试。(a)样品示意图;(b)导电塑料膜谐振结构;(c)实验平台

Fig. 2 Prototype and measurement. (a) Schematic diagram of sample; (b) resonant structure based on conductive plastic film; (c) experimental platform

待测样品位置处放置与样品大小相同的铜板进行反射系数  $S_{11}$  的背景值测试。然后,将铜板替换为待测样品,并测试样品的  $S_{11}$  值。最后,将所测得的  $S_{11}$  值与背景值相减,就可以得到待测样品的真实反射系数。吸波体的吸收率  $A$  可根据测得的反射系数  $S_{11}$  求得,即

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2, \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为电磁波的角频率。

利用有限元法(FEM)对吸波体的吸收特性进行模拟。在仿真中,将单元结构的  $x$  方向和  $y$  方向设置为周期性边界, $z$  方向作为电磁波的入射方向并设置为开放边界用以模拟电磁波的传播。图 3(a)和图 3(b)

分别给出了模拟和测试得到的反射系数与吸收频谱曲线。受实验条件限制,测试频率的下限为 8 GHz。模拟结果表明,该超材料吸波体在 6.90~22.70 GHz 的频率范围内对垂直入射电磁波的吸收率大于 90%。定义相对吸收带宽<sup>[18]</sup>为

$$A_{\text{bandwidth}} = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l}, \quad (2)$$

式中:  $f_h$  和  $f_l$  表示吸收率大于 90% 的频率范围的上限和下限。根据式(2),所提吸波体的相对吸收带宽达到了 106.8%。此外,从图 3 可以看出,得益于谐振单元拓扑结构的高精度加工,样品的测试数据与模拟结果

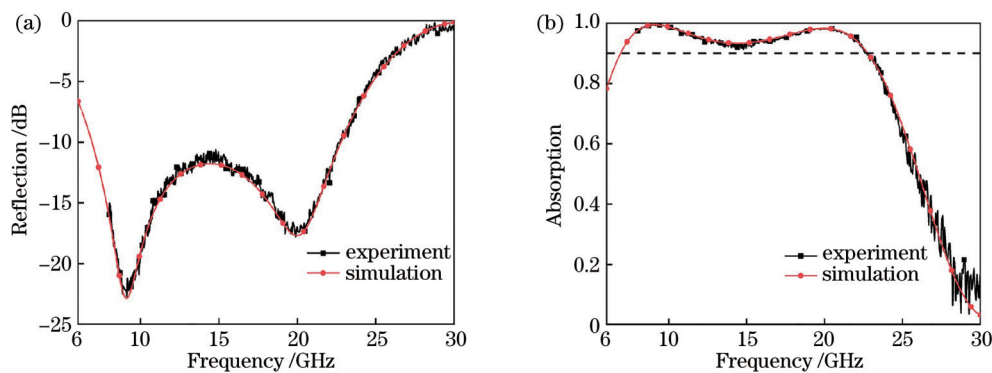


图 3 反射频谱与吸收频谱。(a)反射频谱;(b)吸收频谱

Fig. 3 Reflection spectrum and absorption spectrum. (a) Reflection spectrum; (b) absorption spectrum

吻合良好。

### 3 吸波特性和测试

吸波体的宽带吸收机理可以用波阻抗匹配原理解释。对超材料吸波体,其等效阻抗可表示<sup>[19]</sup>为

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (3)$$

式中: $S_{21}$ 为透射系数。

当等效阻抗为 $Z=1$ 时,入射波可以无反射地进入吸波体内部,并转换为热能消耗于吸波体内部。将模拟获得的 $S$ 参数代入式(3)中,计算得到的该超材料吸波体的等效阻抗的实部与虚部随频率变化的曲线如图4所示。在6.90~22.70 GHz频率范围内,吸波体的等效阻抗实部和虚部基本保持在1和0附近,良好的阻抗匹配为吸波体对入射波的有效吸收奠定了基础。

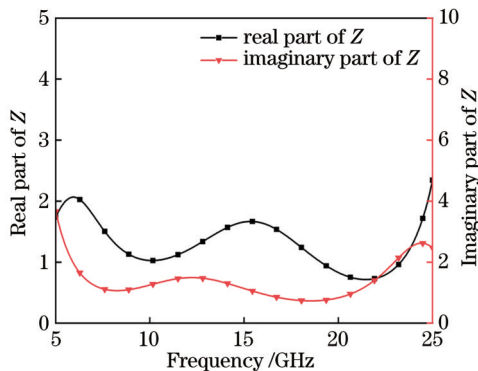


图4 所提吸波体的等效阻抗

Fig. 4 Equivalent impedance of proposed absorber

为进一步研究吸收原理,分析了在9.10 GHz和19.96 GHz两个谐振频率点处超材料单元的电场分布和功率损耗分布,模拟结果如图5所示。由图5(a)所示的低频谐振点的电场分布可以看出,电场主要集中于矩形环的边缘部分。图5(b)所示的19.96 GHz处的谐振电场分布则表明,电场除集中于矩形环边缘外,空心圆环内部也局域了相当强度的电场能量。图5(c)、(d)分别给出了两个谐振频率点处的功率损耗分布,低频(9.10 GHz)谐振模式对应的功率损耗集中在矩形环内部,而高频(19.96 GHz)谐振模式中内部电阻膜圆环的电磁损耗也起到了重要作用,这与电场分布所示的结果是一致的。此外,功率损耗分布进一步表明电磁波的吸收主要局域于电阻膜内部,因此电阻膜的拓扑单元设计是吸波体宽带吸收性能的关键。

由于电阻膜谐振单元的拓扑结构对吸波体的电磁波吸收特性有直接影响,故分析了不同的谐振单元(仅有方环单元结构、仅有圆环单元结构和方环内套圆环的组合单元结构)时吸波体的吸收频谱特性。模拟得到的吸收频谱如图6所示。可以发现,采用组合单元结构的吸波体在吸收率方面相比其余两种结构具有明显优势。此外,由于内外环的耦合作用,组合单元结构可使吸波体在更低的频率处实现电磁波的高效吸收,

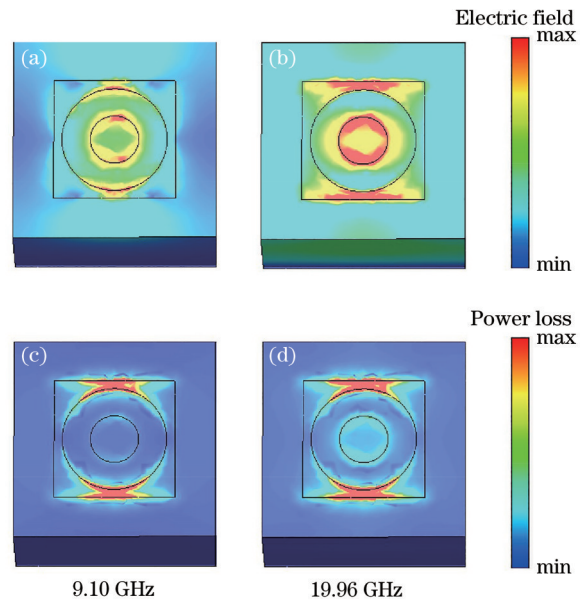


图5 谐振频率下的电场分布与功率损耗分布。(a)(b)电场分布;(c)(d)功率损耗分布

Fig. 5 Electric field distribution and power loss distribution at resonant frequency. (a)(b) Electric field distribution; (c)(d) power loss distribution

因此更有利于超材料吸波体的小型化。图6还给出了将所提结构的导电塑料膜替换为铜(电导率为 $\sigma=5.8 \times 10^7$  S/m)时的吸收频谱。可以看出,这种情况下吸波体的电磁波吸收能力急剧降低,进一步证实了所提结构下吸波体的吸收能力主要来源于电阻膜谐振单元。在所提设计中,电阻膜超材料吸波体的宽频带、强吸收特性主要源于电路谐振机制。与基于金属谐振结构的电磁谐振相比,利用电阻膜结构代替金属单元,可将电磁谐振转化为相对于频率变化更加稳定的电路谐振,在宽频带内实现超材料等效阻抗与自由空间波阻抗的匹配,进而达到电磁波宽带吸收效果。

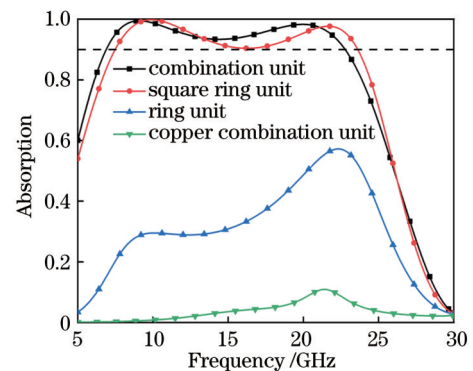


图6 不同结构参数和材料参数对吸收特性的影响

Fig. 6 Effects of different structural and material parameters on absorption properties

除了电阻膜拓扑单元结构会对吸波体的吸收特性产生影响外,电阻膜的阻值也是影响电磁波吸收的重要参数。选取电阻膜阻值 $R$ 分别为50、100、150  $\Omega$ ,模

拟的吸收频谱如图7所示。随着电阻膜方阻的增大,吸收频带逐渐变宽,但进一步增大方阻则会导致带内的吸收率降低。对于所提结构,当电阻膜阻值 $R$ 为 $100\ \Omega$ 时,可兼顾吸收带宽与吸收率的要求。

考虑到介质层的厚度对吸波体的等效阻抗也有一定的影响,模拟分析了上下两层介质板取不同厚度时的吸收频谱。如图8(a)所示,当 $H_1$ 从 $2.4\ \text{mm}$ 增大到 $3.2\ \text{mm}$ 时,吸波体的吸收带宽和吸收率均有一定程度的降低,但较大的基底厚度可以改善吸波体在低频端处的电磁波吸收效果。图8(b)则给出了匹配层厚度 $H_2$ 从 $2.2\ \text{mm}$ 变化到 $3.0\ \text{mm}$ 时,吸波体吸收频谱的变化特性。相比低频端,匹配层厚度 $H_2$ 对高频端的吸收性能影响更大,随着 $H_2$ 的增大,吸收频带变窄,而带内吸收率增加。因此,超材料吸波体的设计需要折中考虑吸收频带与吸收率的选择。同时,从图8可以看出,无论是基底还是匹配层厚度的增大都会导致吸收频带红移。该现象出现的原因在于,超材料的等效电容会

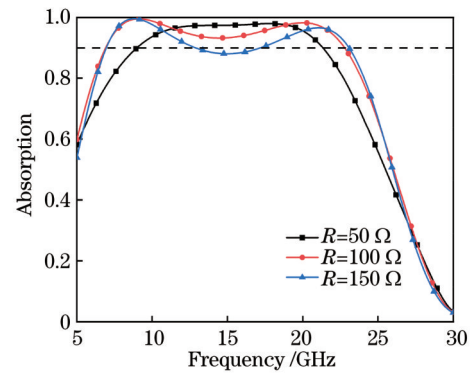


图7 导电塑料膜方阻对吸收频谱的影响

Fig. 7 Effect of surface resistance of conductive plastic film on absorption spectrum

随着介质层厚度的增加而增大,引起谐振频率向低频端移动。

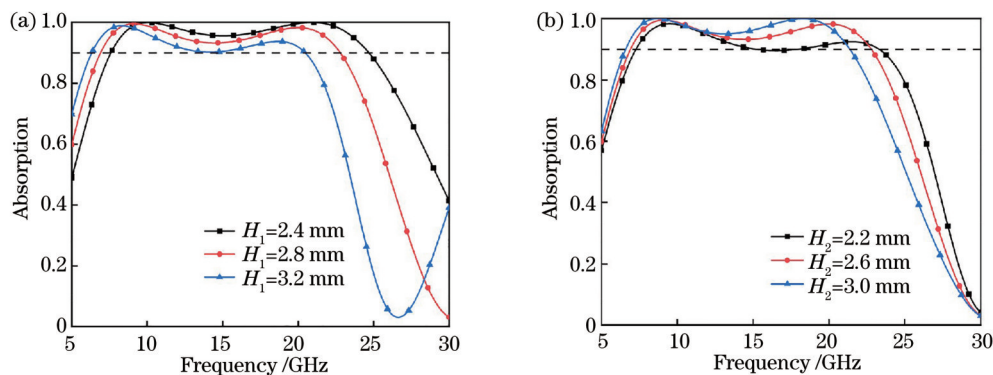


图8  $H_1$ 和 $H_2$ 对吸收频谱的影响。(a) $H_1$ ;(b) $H_2$

Fig. 8 Effects of  $H_1$  and  $H_2$  on absorption spectrum. (a)  $H_1$ ; (b)  $H_2$

图9给出了谐振结构参数变化对吸收特性的影响。如图9(a)所示,当方环开口 $W$ 增大时,下谐振频率向低频方向移动,从而在一定程度上增加了吸收带宽。然而,随着两个谐振频率间隔的增大,带内的吸收率也在逐渐降低。圆环外径 $R_1$ 和圆环内径 $R_2$ 对谐振模式的影响相对较小,如图9(b)和图9(c)所示。随着外径 $R_1$ 的增大,上谐振频率显现出轻微的红移,而随着内径 $R_2$ 的增加,上谐振频率呈现出细微的蓝移。谐振单元的内外环半径对吸收特性影响很小,这在一定程度上降低了加工误差对吸波体性能的影响。

超材料吸波体的极化敏感特性是考察其吸收性能的重要指标之一。在大部分应用场景中,都希望超材料吸波体对任意极化角度的电磁波能实现良好的吸收。由于电阻膜谐振单元的对称性,故仅对极化角( $\varphi$ )在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 范围内的吸收频谱进行了分析。图10(a)所示的模拟结果表明,受谐振单元的结构对称性影响,所提吸波体对入射波的极化角不敏感。图10(b)给出了实验得到的样品对不同极化角入射波的吸收频谱,表明该结构的吸收性能与入射波极化特性无关。

最后,进一步分析了所提吸波体对斜入射电磁波的吸收性能。图11(a)给出了模拟得到的横电(TE)极化(入射波的电场方向平行于 $x$ 轴)时不同入射角下的吸收频谱。可以发现:当电磁波入射角 $\theta$ 小于 $30^\circ$ 时,吸波体的吸收带宽与吸收率变化较小;当 $\theta$ 大于 $45^\circ$ 时,吸收频段整体呈现出一定程度的蓝移,且低频端的吸收率逐渐降低;当 $\theta$ 达到 $60^\circ$ 时,该吸波体仍能在 $7.90\sim 26.90\ \text{GHz}$ 的频段内实现 $80\%$ 以上的电磁波吸收率。图11(b)给出了实验得到的吸波体样品对不同入射角的TE极化波的吸收频谱。可以发现,测试结果与模拟结果吻合得较好,证明所提加工方案具有很高的样品加工精度。

图12(a)、(b)分别给出了模拟和实验得到的吸波体对横磁(TM)极化(入射波的磁场方向平行于 $x$ 轴)时不同入射角下的入射波吸收频谱。可以发现:当入射角 $\theta$ 从 $0^\circ$ 增大至 $45^\circ$ 时,吸收带宽与吸收率均保持了良好的一致性;当 $\theta$ 增大至 $60^\circ$ 时,吸收带宽有一定程度的减小,可在 $9.44\sim 22.06\ \text{GHz}$ 频段内实现 $90\%$ 以上的宽带吸收。综上,该超材料吸波结构对TE和TM极化波均具有良好的宽角特性。

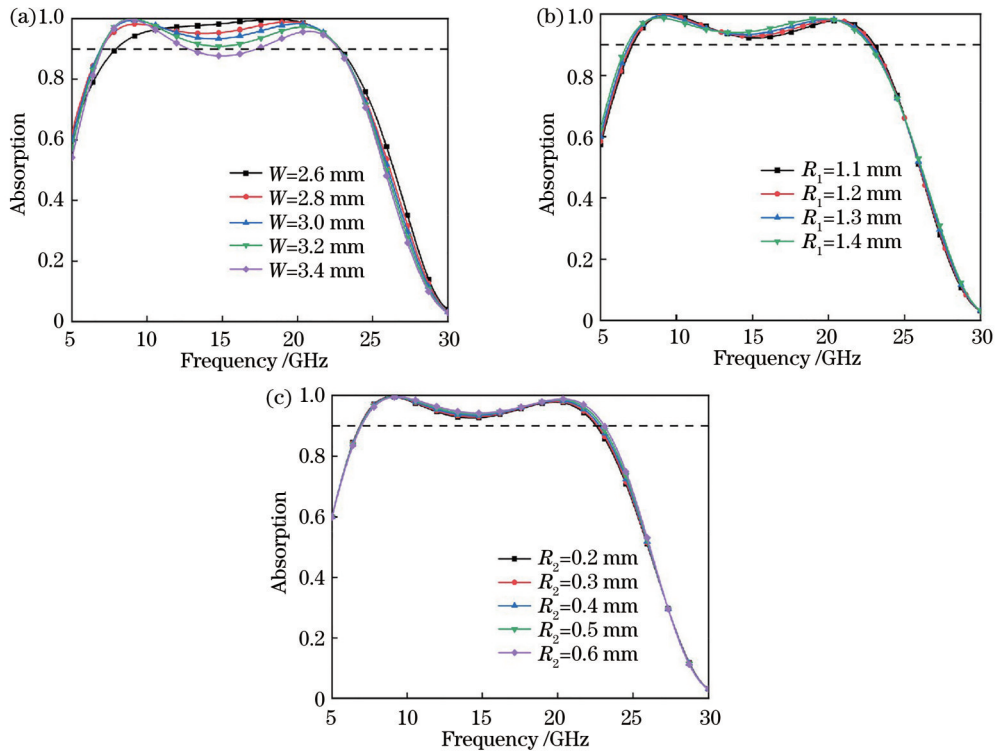


图 9  $W$ 、 $R_1$  和  $R_2$  对吸收频谱的影响。(a)  $W$ ; (b)  $R_1$ ; (c)  $R_2$

Fig. 9 Effects of  $W$ ,  $R_1$  and  $R_2$  on absorption spectrum. (a)  $W$ ; (b)  $R_1$ ; (c)  $R_2$

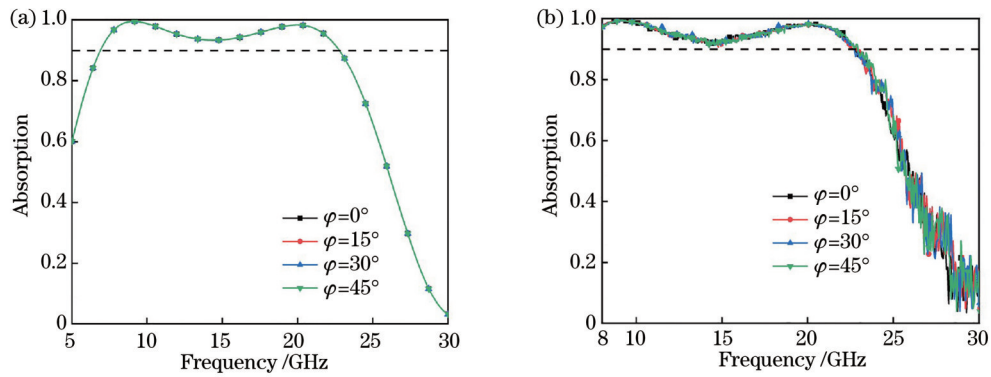


图 10 不同极化角的人射波吸收频谱。(a) 模拟结果; (b) 实验结果

Fig. 10 Absorption spectrum of incident wave under different polarization angles. (a) Simulated result; (b) experimental result

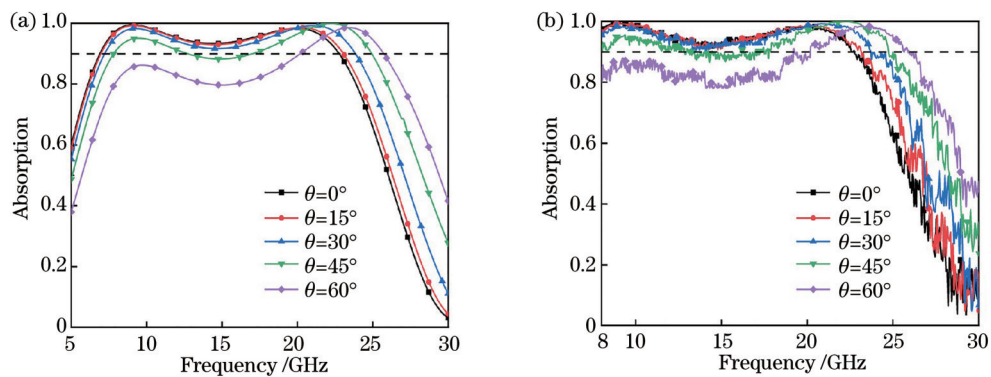


图 11 TE 极化下不同入射角对吸收频谱的影响。(a) 模拟结果; (b) 实验结果

Fig. 11 Effects of different incident angles on absorption spectrum under TE polarization. (a) Simulated result; (b) experimental result

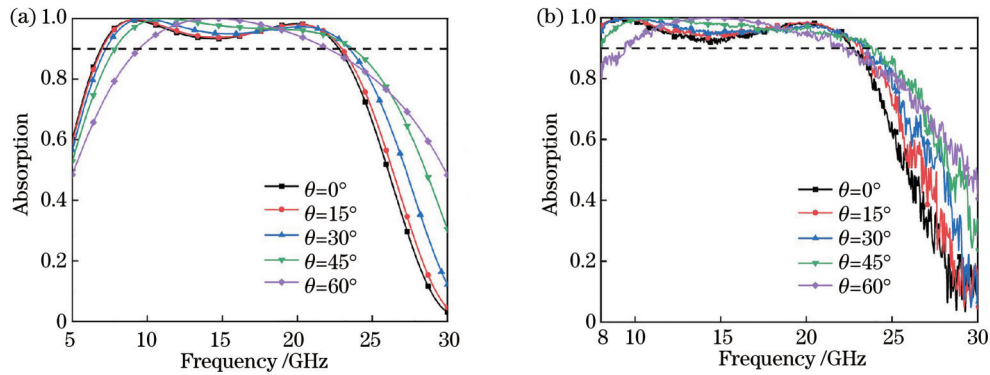


图 12 TM 极化下不同入射角对吸收频谱的影响。(a)模拟结果;(b)实验结果

Fig. 12 Effects of different incident angles on absorption spectrum under TM polarization. (a) Simulated result; (b) experimental result

将所设计的结构和近期报道的其他宽带超材料吸波体进行对比,如表 1 所示。所设计的结构在单元尺寸和吸收带宽方面均具有明显优势。同时,相比采用

导电墨水或氧化锡锡 ITO 薄膜的超材料吸波体,所设计结构中的导电塑料膜谐振结构与介质基板可以独立加工,从而节省了制备时间。

表 1 几种基于电阻膜的宽带超材料吸波体对比

Table 1 Comparison of several resistive film-based broadband metamaterial absorbers

Ref.	Unit size / (mm×mm)	Absorption bandwidth /GHz	Relative absorption bandwidth /%	Resistive film	Assembling
[13]	10×10	6.58-16.38	85.4	Conductive ink	Integrated processing
[20]	2.2×2.2	8.9-14.0	44.5	ITO film	Integrated processing
[21]	16.2×16.2	4.0-17.2	124.5	ITO film	Integrated processing
[22]	28×28	4.5-10.5	80.0	ITO film	Integrated processing
[23]	11×11	8.2-16.2	65.6	Silver nanowire film	Integrated processing
This work	5×5	6.9-22.7	106.8	Conductive plastic film	Separated preparation

## 4 结 论

提出一种基于导电塑料膜谐振单元的宽带超材料吸波体。与基于导电墨水的电阻膜结构相比,所采用的导电塑料膜片不仅克服了加工过程中墨水厚度不均匀对方阻的影响,还可兼容激光刻蚀工艺,提高了谐振结构的加工精度。此外,导电塑料膜谐振结构与介质基板可以独立加工,极大地提升了基底材料选择的自由度,为发展宽带超材料吸波体提供了新的思路。实验结果表明,所设计的超材料吸波体在 6.90~22.70 GHz 的频率范围内可以保持 90% 以上的入射波吸收率,相对吸收带宽为 106.8%。此外,所提超材料吸波体对入射波的极化角度不敏感,且对宽角入射波仍能保持良好的宽带吸收效果。

### 参 考 文 献

- [1] Burch J, Ma J, Hunter R I, et al. Flexible patches for mm-wave holography[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(2): 021104.
- [2] Cheng K X, Hu Z D, Kong X L, et al. High performance reflective microwave split-square-ring metasurface vortex beam generator[J]. Optics Communications, 2022, 507: 127631.

- [3] 周维, 陈俊, 李豪, 等. 太赫兹电磁超材料完美吸收器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1100005.  
Zhou W, Chen J, Li H, et al. Progress of electromagnetic metamaterial perfect absorber based on terahertz band[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1100005.
- [4] Chen T, Li S J, Cao X Y, et al. Ultra-wideband and polarization-insensitive fractal perfect metamaterial absorber based on a three-dimensional fractal tree microstructure with multi-modes[J]. Applied Physics A, 2019, 125(4): 232.
- [5] 王杨, 轩雪飞, 朱路, 等. 宽波段高吸收的多层齿轮形超材料吸收器设计[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1823001.  
Wang Y, Xuan X F, Zhu L, et al. Design of multi-layer gear-shaped metamaterial absorber with broadband and high absorption[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1823001.
- [6] 李辉, 余江, 陈哲. 基于混合石墨烯-二氧化钒超材料的太赫兹可调宽带吸收器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0903001.  
Li H, Yu J, Chen Z. Broadband tunable terahertz absorber based on hybrid graphene-vanadium dioxide

- metamaterials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0903001.
- [7] 顾超, 屈绍波, 裴志斌, 等. 基于电阻膜的宽频带超材料吸波体的设计[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 087802.  
Gu C, Qu S B, Pei Z B, et al. Design of a wide-band metamaterial absorber based on resistance films[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 087802.
- [8] Varkani A R, Firouzeh Z H, Nezhad A Z. Equivalent circuit model for array of circular loop FSS structures at oblique angles of incidence[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2018, 12(5): 749-755.
- [9] 黄栩静, 万国宾. 一种新型宽带电阻膜吸波体设计[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(2): 78-83.  
Huang X J, Wan G B. Design of novel broadband absorber based on resistive film[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(2): 78-83.
- [10] Olszewska-Placha M, Salski B, Janczak D, et al. A broadband absorber with a resistive pattern made of ink with graphene nano-platelets[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 565-572.
- [11] Bu D D, Yue C S, Zhang G Q, et al. Broadband, polarization-insensitive, and wide-angle microwave absorber based on resistive film[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(6): 067802.
- [12] Lu X R, Chen J, Huang Y Q, et al. Design of ultra-wideband and transparent absorber based on resistive films[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2019, 34(5): 765-770.
- [13] Deng G S, Lü K, Sun H X, et al. Wideband absorber based on conductive ink frequency selective surface with polarization insensitivity and wide-incident-angle stability [J]. Nanomaterials and Nanotechnology, 2020, 10: 1-10.
- [14] Li W W, Jin H, Zeng Z H, et al. Flexible and easy-to-tune broadband electromagnetic wave absorber based on carbon resistive film sandwiched by silicon rubber/multi-walled carbon nanotube composites[J]. Carbon, 2017, 121: 544-551.
- [15] Zhang C, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(14): 143511.
- [16] Sheokand H, Ghosh S, Singh G, et al. Transparent broadband metamaterial absorber based on resistive films [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(10): 105105.
- [17] Singh G, Bhardwaj A, Srivastava K V, et al. Perforated lightweight microwave metamaterial broadband absorber with discontinuous ground plane[J]. Applied Physics A, 2021, 127(11): 858.
- [18] Deng G S, Lü K, Sun H X, et al. An ultra-broadband and optically transparent metamaterial absorber based on multilayer indium-tin-oxide structure[J]. Journal of Physics D, 2021, 54(16): 165301.
- [19] 仇晓琦, 延凤平, 杜雪梅, 等. 角度及温度不敏感的水基宽带超材料吸波器[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1613002.  
Zhang X Q, Yan F P, Du X M, et al. Water-based broadband metamaterial absorber insensitive to angle and temperature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1613002.
- [20] Lei X Y, Li Y, Huo S Y, et al. Design and analysis of a novel compact metamaterial absorber based on double-layer ITO resistive film for improving signal integrity[J]. IEEE Access, 2022, 10: 24067-24079.
- [21] Sheokand H, Singh G, Ghosh S, et al. An optically transparent broadband microwave absorber using interdigital capacitance[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(1): 113-117.
- [22] Kong X K, Lin W H, Wang X M, et al. Liquid reconfigurable stealth window constructed by a metamaterial absorber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2021, 38(11): 3277-3284.
- [23] Lyou M, Kim G, Lee B. Design of thin and wideband microwave absorbers using general closed-form solutions [J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2021, 21(5): 430-438.