

角度及温度不敏感的水基宽带超材料吸波器

仇晓琦, 延凤平*, 杜雪梅, 王伟, 张敏

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 提出了一个新型水基宽带超材料吸波结构, 利用水在微波波段优异的电磁特性, 使该结构对于入射电磁波的吸收率在 8.2~78.32 GHz 频段内始终保持 90% 以上。当电磁波的入射角度变化时, 吸波器仍然具有优异的吸收性能, 尤其是在横磁模式下, 即使入射角度达到 70° 时吸收率基本仍能全部保持在 90% 以上; 由于设计的吸波器为完全的中心对称结构, 因此极化角度对其吸收特性的影响十分微弱; 调整温度在 0~100 °C 范围内变化时, 该吸波器在整个仿真频段内几乎始终保持 90% 以上的高吸收率。所提出的吸波结构不仅具有宽带高吸收率特性, 且具有广角入射、极化无关以及热稳定的优异性能。该吸波结构可通过 3D 打印技术进行制备, 大大降低了制作的复杂度和成本, 对于新型宽带介质吸波器的应用和发展具有十分重要的作用。

关键词 材料; 超材料; 超宽带; 吸波器; 广角; 热稳定

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1613002

1 引言

自 2008 年 Landy 等^[1]设计出第一个超材料电磁吸波器以来, 其在电磁隐身^[2]、太阳能收集^[3-4]以及传感^[5-6]等领域一直发挥着十分重要的作用, 也引起了越来越多人的研究和探索。电磁吸波器首先被应用在窄带吸收领域, 随着研究的深入以及应用的需求开始逐渐向着宽带吸收发展, 早期的超材料吸波器具有单频吸收、极化角度敏感等缺点^[7], 这些吸波结构大多数以金属作为主体材料, 为了获得宽吸收带, 研究人员利用高阻抗表面进行相关设计^[8-9], 同时采用了将具有不同吸收带的谐振单元组合在一起^[10], 或将不同的谐振单元逐层堆叠等^[11]方法。然而, 这些设计方法不仅具有较高的复杂度, 所使用的金属材料也存在一定的金属吸收损耗^[12], 同时吸波器表面的金属部件在长期使用中可能会发生氧化和腐蚀, 以上不足大大限制了宽带电磁吸波器的发展^[13-14]。

在进行宽带吸波结构的设计中, 频率色散材料发挥着重要的作用, 因此对于研究人员来说, 研究和制造频率色散材料变得十分有价值, 其中, 水作为世

界上宝贵的资源之一, 逐渐引起了研究学者的注意。水在微波频段内具有很大的介电常数和良好的频率色散特性^[15-16], 不仅能够对入射的电磁波产生很大的介电损耗, 同时也为超材料吸波器的宽带工作特性提供了可能。此外, 水具有极好的流动性和透明性, 对于研究可弯曲吸波材料以及材料的光学透明性具有重要的意义^[17]。同时, 基于水的全介质吸波结构可以通过 3D 打印技术实现^[18], 3D 打印技术采用自下而上、逐层累加的加工方法, 不但能够对结构进行精确的制备, 制作成本也更加低廉。据此设计的水基宽带吸波器由于在微波波段有着良好的吸收特性, 在雷达隐身、电磁能收集、防止电磁辐射与泄漏、微波暗室^[19-20]等领域都有着广阔的应用前景。2018 年, Ren 等^[21]提出了圆柱形的水基超材料谐振器结构, 在 5.58~24.21 GHz 范围内达到了 90% 以上的吸收率, 同时该结构对于入射角度不敏感, 也具有较好的热稳定性; 2017 年, Pang 等^[22]通过将水封装在 ITO 基板和 PMMA 之间, 实现了吸收带宽为 6.4~30 GHz 的吸波器, 同时该吸波器还具有广角吸收的特性; 2019 年, Yang 等^[23]提出了基于室温离子液体的超宽带超材料吸波器, 该吸收体在

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2020-12-28; 录用日期: 2021-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61327006, 61620106014)

通信作者: *fpyan@bjtu.edu.cn

9.26~49 GHz 频带内的吸收率超过 90%，同时入射角度在 45° 以内时可以保持优异的吸收性能；2020 年，Zhang 等^[24]提出了带有十字微结构的水基超材料吸波器，其吸收频带扩展到了 7.84~74.16 GHz，且具有良好的广角入射性能及热稳定性，但该结构相对来说比较复杂，较难应用于实际中。

本文设计了一个基于水的宽带超材料吸波结构，仿真结果表明该结构在 8.2~78.32 GHz 超宽频带内的吸收率达到了 90% 以上；对谐振点处的电磁场分布及功率损耗密度进行了分析，以探究该吸波结构宽带吸收的工作机理；分别改变电磁波的入射角度和极化角度进行仿真，结果表明该吸波结构在所研究的频段内仍然能够保持很高的吸收率，说明其具有广角吸收和极化无关的吸收性能；同时根据 Debye 公式对不同温度下水的介电常数进行了计算，经仿真发现该吸波器对温度变化不敏感，具有

较好的热稳定性。该吸波结构相对来说复杂度不高，在满足了优异吸收性能的同时，大大降低了其制备及实现难度，在实际应用中具有十分重要的意义。

2 设计及仿真

2.1 结构设计

图 1 展示了水基超材料吸波器的基本结构，图 1(a) 为超材料吸波单元结构示意图，图 1(b) 为单元结构中间层的俯视图。吸波单元主要由金属底板、树脂外壳以及环形水柱三部分组成，树脂外壳包括下层的方形树脂底板、中间层内部的圆柱体和外部的空心圆柱以及上层的圆柱形树脂盖板，环形的水柱被包裹在中间层的空心圆柱体及内部圆柱之间，最后在底部附上金属板以阻止入射电磁波的透过。通过将单元结构在 x 和 y 方向上进行周期性扩展，便可得到图 1(c) 所示的整体吸波结构阵列。

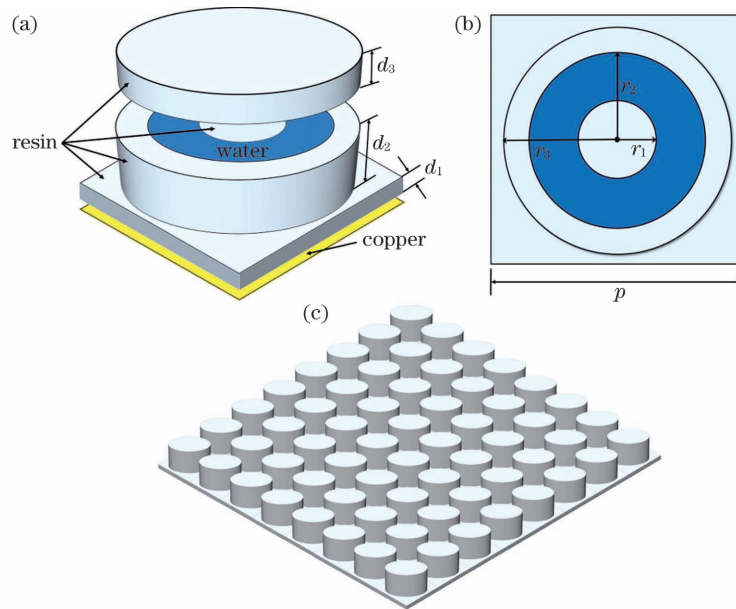


图 1 超材料吸波结构。(a) 单元结构图；(b) 中间层俯视图；(c) 整体结构图

Fig. 1 Metamaterial absorbing structure. (a) Unit cell; (b) top view of middle layer; (c) overall structure

金属板采用电导率为 5.8×10^7 S/m 的铜，树脂的介电常数为 $3.2(1-j0.1)$ ，水的介电常数与频率和温度有关，可通过 Debye 公式进行描述^[25]：

$$\varepsilon(\omega, T) = \varepsilon_{\infty}(T) + \frac{\varepsilon_0(T) - \varepsilon_{\infty}(T)}{1 - i\omega\tau(T)}, \quad (1)$$

式中： $\varepsilon_0(T)$ 、 $\varepsilon_{\infty}(T)$ 和 $\tau(T)$ 分别表示室温时的静态介电常数、高频介电常数以及旋转弛豫时间。这三个变量与温度之间的关系可以表示为^[26]

$$\varepsilon_0(T) = a_1 - b_1 T + c_1 T^2 - d_1 T^3, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\infty}(T) = \varepsilon_0(T) - a_2 e^{-b_2 T}, \quad (3)$$

$$\tau(T) = c_2 e^{\frac{d_2}{T+T_0}}, \quad (4)$$

式中： $a_1 = 87.9$ ， $b_1 = 0.404 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ， $c_1 = 9.59 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ， $d_1 = 1.33 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$ ， $a_2 = 80.7$ ， $b_2 = 4.42 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ， $c_2 = 1.37 \times 10^{-13} \text{ s}$ ， $d_2 = 651 \text{ } ^\circ\text{C}$ ， $T_0 = 133 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。据此计算得到的 0~100 °C 条件下水的介电常数如图 2 所示。

假设在室温条件下，通过对吸波结构进行参数扫描来获得具体的几何尺寸，经多次扫描后得到的最优几何参数为： $d_1 = 0.4 \text{ mm}$ ， $d_2 = 2.5 \text{ mm}$ ， $d_3 = 0.8 \text{ mm}$ ， $r_1 = 1.3 \text{ mm}$ ， $r_2 = 2.6 \text{ mm}$ ， $r_3 = 3.6 \text{ mm}$ ，

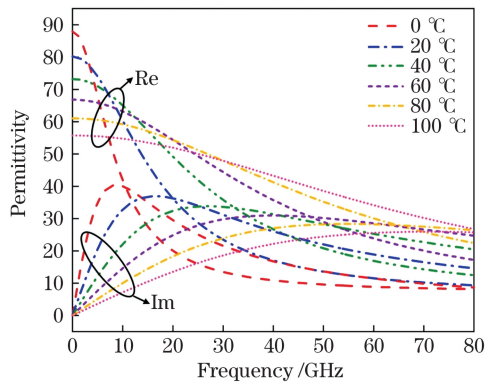


图 2 不同温度下水的复介电常数

Fig. 2 Complex permittivity at different temperature

$p = 8 \text{ mm}$ 。

2.2 仿真分析

吸波材料对于入射电磁波的吸收率可通过反射率 $R(\omega)$ 和透射率 $T(\omega)$ 来进行描述^[27]：

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2, \quad (5)$$

式中： $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 分别表示吸波器对于入射波的反射系数和透射系数。由于底部金属板的存在阻挡了电磁波透过该结构，透射率可近似为 0，因此吸收率最终可表示为

$$A(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2. \quad (6)$$

根据上述原理，利用 CST Microwave Studio 软件对超材料吸波结构的 S 参数进行了仿真研究。仿真时将 x 和 y 方向上的边界条件设置为 unit cell, z 方向为开放边界，同时设定 x 极化的电磁波沿 $+z$ 方向入射到超材料结构上。在室温条件下对设计的吸波结构进行了仿真，仿真结果如图 3 所示，由图可知，该水基超材料吸波结构在 8.2~78.32 GHz 频段内获得了 90% 以上的吸收率，同时分别在 9.26 GHz、17.76 GHz、33.04 GHz、50.48 GHz 和 74.08 GHz

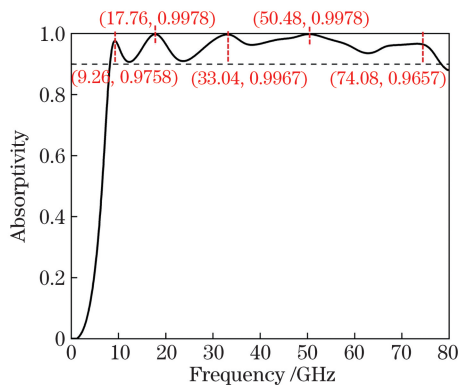


图 3 水基超材料吸波体的吸收率曲线

Fig. 3 Absorptivity curve of water-based metamaterial absorber

处出现了谐振峰，其吸收率分别为 0.9758, 0.9978, 0.9967, 0.9978, 0.9657，说明该水基吸波器具有超宽的吸收带宽且在谐振频率处的吸收率非常高，多个频点处吸收率几乎达到 100%。

为了进一步进行深入研究，分别对树脂外壳、完整水层以及环形水柱的吸收情况进行仿真，仿真结果如图 4 所示。可以发现除去环形水层之后，吸收率整体下降十分明显；同时由于水本身在微波频率下具有较高的吸收率，因此为证明该结构的宽带吸收主要是由于水的固有损耗引起的，采用了相同厚度的完整水层进行仿真，仿真结果表明采用完整水层时的吸收率也有大幅下降；在此基础上，采用了环形水柱进行了仿真，可以发现其吸收率在仿真范围内较高，吸收效果与上述两种情况相比都有了一定提升，同时可以观察到在该结构吸收率较低的频段，树脂的吸收较强，因此对于整体的吸收情况也有了一定的弥补。这说明结构化的水谐振器即环形水柱对吸收率的贡献是相当大的，同时水的频散特性使得吸波器实现了宽带范围内对电磁波的吸收，在不同频率处发生的谐振作用叠加使得超材料吸波体最终拥有了较宽的吸收频带。

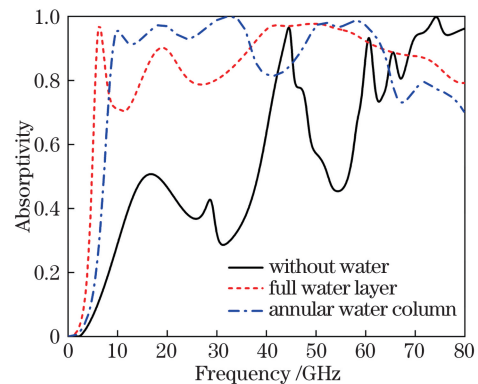


图 4 树脂外壳、完整水层和环形水柱的吸收率曲线

Fig. 4 Absorptivity curves of resin shell, full water layer, and annular water column

宽带吸波机理可以用阻抗匹配原理^[28]来解释，当超材料吸波结构的等效阻抗与空气阻抗相等时，入射的电磁波可以无反射地全部进入到结构内部，然后在吸波器的谐振作用下被转化为热量而耗散掉，材料的等效复阻抗可表示为^[29-30]

$$Z = \frac{\sqrt{[1 + S_{11}(\omega)]^2 - S_{21}^2(\omega)}}{\sqrt{[1 - S_{11}(\omega)]^2 - S_{21}^2(\omega)}}. \quad (7)$$

由(7)式可以得知，在满足阻抗匹配条件时超材料的等效复阻抗值为 1。超材料吸波体的等效阻抗会受到材料的介电常数和磁导率的影响，当入射电

磁波的频率发生变化时,水优异的频散特性能够使超材料结构在宽带范围内实现较好的阻抗匹配,从而使吸波结构保持良好的电磁吸收性能。在所设计的频段内,对仿真获得的超材料吸波器的 S 参数进行相关计算,据此得到的等效阻抗随频率变化的曲线如图 5 所示。从图中可以发现,在该吸收频段内,吸波结构等效阻抗的实部和虚部分别始终保持在 1 和 0 附近,说明该超材料吸波结构具有较好的阻抗匹配特性。

为了进一步分析水基吸波结构宽吸收带的形成机理,对谐振频率处的电磁场分布以及功率损耗密

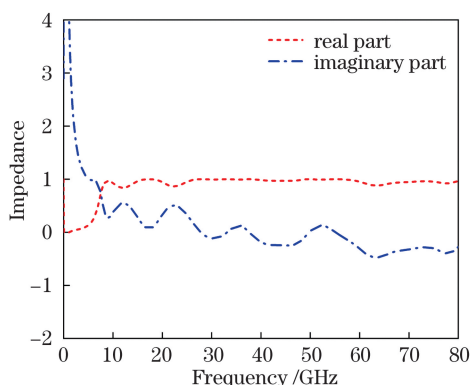


图 5 超材料吸波体的等效阻抗

Fig. 5 Equivalent complex impedance of metamaterial absorber

度进行了仿真,仿真结果如图 6 所示。由图 6(a)和 (b)可知,超材料吸波器在不同的谐振频率处都有其特定的电磁场分布,即在不同频率下产生了不同的电磁共振模式。低频 f_1 、 f_2 和 f_3 处存在着环状分布的电场,吸波器中对应位置产生了较强的磁场,这说明这三个频率处发生了偶极模式的谐振。出现该现象的原因是:介质谐振器的谐振频率与其电尺寸呈线性关系^[20],频率增大使得入射波波长以及水的介电常数减小,进而使得电尺寸在较大的范围内保持稳定,最终形成了同模式下的多个谐振点。随着频率的升高,吸波结构中产生的谐振模式发生了变化,频率 f_4 和 f_5 处的电场分布很相似,但磁场分布情况却有很大的差异。 f_4 处的磁场主要集中在水层和外层树脂壳之间,而 f_5 处的磁场主要分布在水层与上层树脂之间以及吸波器与底部的金属板之间,这说明在频率 f_5 处同时发生了人工等离子体谐振^[31]和其他模式的谐振,即在高频段时吸波器中出现了高阶共振模式。为了更好地展示吸波结构内部的吸收情况,进一步仿真了谐振频率处的功率损耗密度。从图 6(c)中可以看出,对于不同的谐振模式,由于水的大介电损耗特性,功率损耗都主要发生在环形水层中,这也表明了在所研究的超材料吸波器中,结构化的水层是主要的吸收介质。

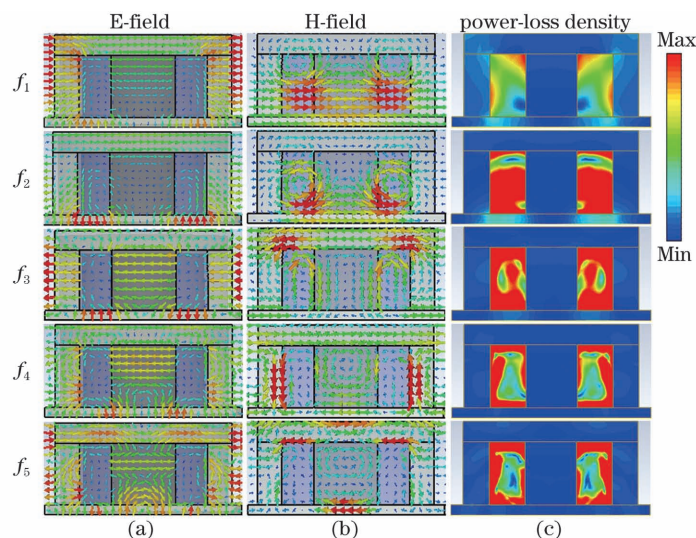


图 6 超材料吸波体的矢量场分布。(a)电场分布;(b)磁场分布;(c)功率损耗密度

Fig. 6 Vector field distributions of metamaterial absorber. (a) Electric field distributions; (b) magnetic field distributions; (c) power loss density

3 吸波特性和分析

3.1 广角吸收

图 7 展示了在 TE 和 TM 极化时不同入射角度下超材料吸波器的吸收情况。从图 7(a)中可以看

出,TE 极化时除了低频段处,电磁波入射角度在 40° 以内时吸波器的吸收率几乎始终保持在 90% 以上,入射角达到 60° 后吸波器的吸收率有所下降但也仍然保持在较高水平,到了 70° 时吸收效果明显变差;图 7(b)展示了 TM 极化模式下入射角度对吸

收性能的影响,可以发现当入射角逐渐从 0° 增大到 70° 时,除了在低频段较小范围内,吸波器一直保持着 90% 以上的高吸收率。由于在 TM 和 TE 极化下沿着超材料吸波器表面方向的电磁场强度分量不同^[32],TM 模式下,电场强度随入射角的增大而减小,而吸波性能对电场强度的变化不太敏感,对于

TE 模式,磁场强度随入射角的增大而减小,吸波器的吸收性能受磁场分量的影响较大,因此吸收率降低较为明显。虽然两种模式下的吸收情况有一定差异,但从整体来看,水基超材料吸波器在入射角度发生变化时仍然能够维持很高的吸收率,具有十分优异的广角吸收性能。

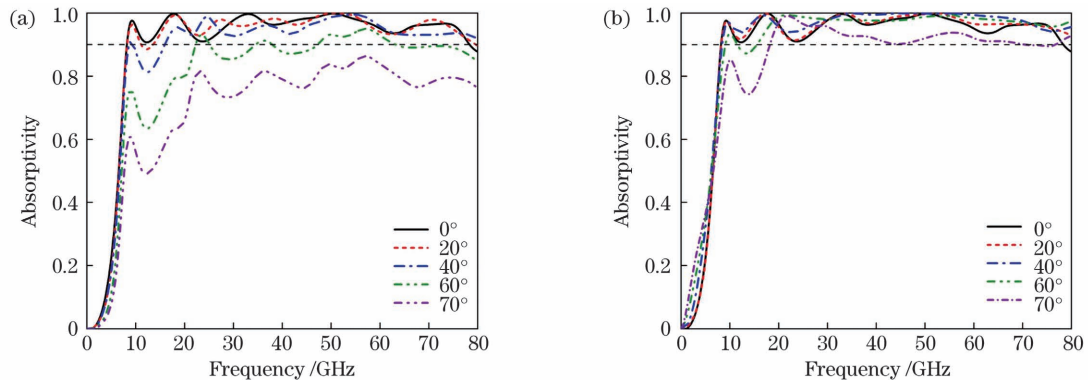


图 7 不同入射角度时超材料吸波体的吸收率。(a)TE 极化;(b)TM 极化

Fig. 7 Absorptivity of metamaterial absorber with different incident angles. (a) TE polarization; (b) TM polarization

3.2 极化无关

图 8 为在极化角度发生改变时超材料吸波结构的吸收率曲线。从图中可以看出,当极化角度在 $0\sim 90^\circ$ 范围内变化时,吸波器的吸收率曲线几乎没有变化,在吸收频段内始终保持在 90% 以上。这主要是由于所设计的超材料吸波体是完全的中心对称结构,因此对电磁波表现出了优异的极化无关特性。

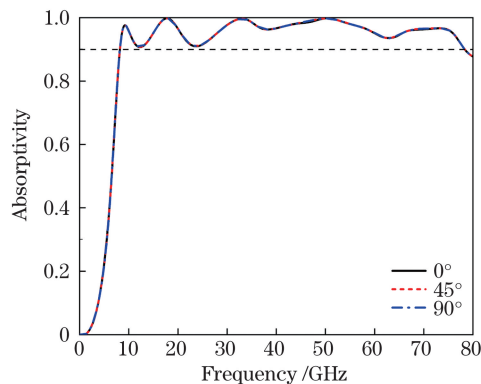


图 8 不同极化角度时超材料吸波体的吸收率

Fig. 8 Absorptivity of metamaterial absorber at different polarization angles

3.3 热稳定性

吸波材料在吸收电磁波时,入射电磁波的电磁能有一部分转化为热能,这会在一定程度上提高吸波器的温度,而水的介电常数会受温度变化的影响,因此对不同温度下水基超材料吸波体的吸收性能进

行分析是至关重要的。当温度在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内变化时,温度对树脂材料的介电常数以及铜的电导率的影响可忽略不计,因此可只考虑水的介电常数随温度的变化。图 9 为不同温度下水基超材料吸波器的吸收率曲线,由图可知,在整个设计波段内,随着温度的升高,除在 12 GHz 和 22.8 GHz 附近吸收率随温度的升高下降较为明显,其他频段内吸波器的吸收率几乎一直在 90% 以上,同时,即使当温度达到 100°C 时,在 12 GHz 处吸波器对电磁波的吸收率最低,但仍能达到 78% ,在整个吸收频段上始终具有比较稳定的工作性能。基于以上分析,可以证明所设计的超材料吸收器对温度的依赖性很弱,在温度发生显著变化时仍然可以保持很高的吸收率。

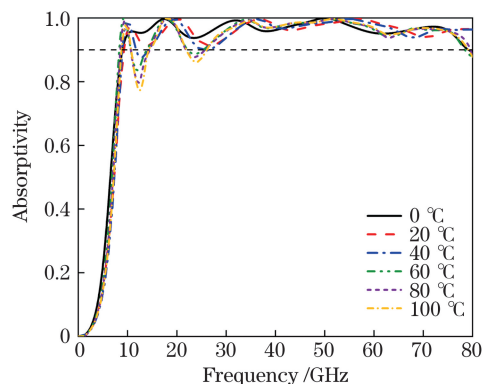


图 9 不同温度下吸波体的吸收率

Fig. 9 Absorptivity of absorber at different temperature

4 分析与讨论

水具有频率色散特性和较大的介电损耗,在微波波段具有十分优异的电磁性能,近年来已经逐渐被应用于各种宽带吸波器的设计中。表 1 为几种同类型吸波器与本文提出的吸波器的对比,其中 f_L 和 f_H 分别表示吸收率超过 90% 的吸收带宽的最低及最高频率值。从表中可以看出,随着对不同结构

表 1 几种同类型吸波器与本文提出的吸波器的对比

Table 1 Comparison of several same type of absorbers and proposed absorber

Reference	Absorber type	Bandwidth $f_L - f_H$ /GHz
[33]	Absorber with periodic droplets	8-18
[34]	Absorber with cylindrical holes	12-29.6
[21]	Cylinder water-based absorber	5.58-24.1
[22]	ITO-water-PMMA absorber	6.4-30
[23]	Absorber based on ILs	9.26-49
[24]	Water-based absorber with cross microstructure	7.84-74.16
This work	Absorber with annular water column	8.2-78.32

5 结 论

设计了一个基于水的宽带超材料吸波结构,利用水在微波波段下优异的电磁特性,该结构对在 8.2~78.32 GHz 频带内的入射电磁波始终保持 90% 以上的高效吸收。当电磁波的入射角度发生变化时,在 TM 模式下,即使入射角达到 70°,该吸波结构的吸收率仍几乎保持在 90% 以上;TE 模式时,随着入射角度的增大,吸收率的下降相对来说较为明显,但仍然具有比较稳定的吸收特性。调整电磁波的极化角度在 0~90° 内变化,仿真发现该结构的吸收率曲线几乎没有明显变化,说明其具有极化无关的吸收特点。设置温度在 0~100 °C 之间变化,对吸波器的吸收率进行了分析,结果表明除了在 12 GHz 和 22.8 GHz 附近的吸收效果随着温度的升高稍有下降,其他频段的吸收率始终保持在 90% 以上,这说明其对于温度变化不敏感。该水基吸波器不仅具有宽带高吸收率的特性,且具有极化无关、入射角度不敏感以及热稳定性的吸收性能,同时,该结构复杂度比较低,通过 3D 打印技术可方便地对其进行加工制作,这不但降低了制备成本,在实际使用时也可满足较好的透明及弯曲特性。该研究为新型介质吸波器的设计和发展提供了一个思路。

参 考 文 献

[1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters,

的水基吸波器的设计和改进,其获得的吸收频带也在逐步加宽,相比于近年来主要提出的几种吸波结构,本文中采用的水基超材料吸波器的吸收频带有了显著的提升,从现实层面看,该结构不仅具有较低的复杂度,还具有极好的广角吸收和极化无关特性,同时在温度发生显著变化时仍然能够保持稳定工作,这不仅大大扩展了其应用范围,对于新型介质吸波结构的研究和发展也具有重要的意义。

2008, 100(20): 207402.

- [2] Liu Y, Li Z Y, Zhang W Z, et al. Design and emulation of combined-shaped electromagnetic stealthy cloak made of metamaterials[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15): 2235-2238.
刘冶, 李竹影, 张旺洲, 等. 组合型电磁隐身斗篷的超材料设计与仿真[J]. 功能材料, 2013, 44(15): 2235-2238.
- [3] Bağmancı M, Karaaslan M, Ünal E, et al. Extremely-broad band metamaterial absorber for solar energy harvesting based on star shaped resonator [J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(7): 1-14.
- [4] Li P F, Liu B A, Ni Y Z, et al. Large-scale nanophotonic solar selective absorbers for high-efficiency solar thermal energy conversion [J]. Advanced Materials, 2015, 27(31): 4585-4591.
- [5] Grant J, Escorcía-Carranza I, Li C, et al. A monolithic resonant terahertz sensor element comprising a metamaterial absorber and microbolometer[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(6): 1043-1048.
- [6] Li G H, Chen X S, Li O P, et al. A novel plasmonic resonance sensor based on an infrared perfect absorber[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(20): 205102.
- [7] Cui Z J, Wang Y, Zhu D Y, et al. Perfect absorption conditions and absorption characteristics of terahertz metamaterial absorber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614023.
崔子健, 王玥, 朱冬颖, 等. 太赫兹超材料吸收器的

- 完美吸收条件与吸收特性[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614023.
- [8] Huang X J, Yang H L, Wang D Q, et al. Calculations of a wideband metamaterial absorber using equivalent medium theory [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(32): 325101.
- [9] Kim Y J, Hwang J S, Yoo Y J, et al. Triple-band metamaterial absorber based on single resonator[J]. *Current Applied Physics*, 2017, 17(10): 1260-1263.
- [10] Gu S, Su B, Zhao X P. Planar isotropic broadband metamaterial absorber [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(16): 163702.
- [11] Cui Y X, Fung K H, Xu J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1443-1447.
- [12] Leonhardt U. Optical conformal mapping [J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [13] Pu M B, Hu C G, Wang M, et al. Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure [J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17413-17420.
- [14] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, et al. Dendritic metamaterial absorber based on the impedance matching[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6078-6083.
张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 等. 基于阻抗匹配条件的树枝状超材料吸收器[J]. *物理学报*, 2010, 59(9): 6078-6083.
- [15] Andryieuski A, Kuznetsova S M, Zhukovsky S V, et al. Water: promising opportunities for tunable all-dielectric electromagnetic metamaterials [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13535.
- [16] Shen Z Y, Yang H L, Huang X J, et al. Design of negative refractive index metamaterial with water droplets using 3D-printing [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(11): 115101.
- [17] Huang Y X, Yuan X J, Wang C X, et al. Flexible thin broadband microwave absorber based on a pyramidal periodic structure of lossy composite [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2764-2767.
- [18] Xiong Y J, Wang Y, Wang Q, et al. Structural broadband absorbing metamaterial based on three-dimensional printing technology [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(8): 084202.
熊益军, 王岩, 王强, 等. 一种基于 3D 打印技术的结构型宽频吸波超材料[J]. *物理学报*, 2018, 67(8): 084202.
- [19] Wang Y, Leng Y B, Dong L H, et al. Design of tunable metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0716001.
王越, 冷雁冰, 董连和, 等. 基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0716001.
- [20] Wang H, Sivan P V, Mitchell A, et al. Highly efficient selective metamaterial absorber for high-temperature solar thermal energy harvesting [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 137: 235-242.
- [21] Ren J, Yin J Y. Cylindrical-water-resonator-based ultra-broadband microwave absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(8): 2060-2071.
- [22] Pang Y Q, Wang J F, Cheng Q, et al. Thermally tunable water-substrate broadband metamaterial absorbers [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(10): 104103.
- [23] Yang F L, Gong J H, Yang E, et al. Ultrabroadband metamaterial absorbers based on ionic liquids [J]. *Applied Physics A, Material Science & Processing*, 2019, 125(2): 149.
- [24] Zhang X Q, Yan F P, Du X M, et al. Broadband water-based metamaterial absorber with wide angle and thermal stability [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(5): 055211.
- [25] Ellison W J. Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0-25 THz and the temperature range 0-100 °C [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2007, 36(1): 1-18.
- [26] Wu Z, Chen X Q, Zhang Z L, et al. Design and optimization of a flexible water-based microwave absorbing metamaterial [J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(5): 057003.
- [27] Shen Y, Zhang J Q, Pang Y Q, et al. Transparent broadband metamaterial absorber enhanced by water-substrate incorporation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15665-15674.
- [28] Iwaszczuk K, Strikwerda A C, Fan K B, et al. Flexible metamaterial absorbers for stealth applications at terahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 635-643.
- [29] 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.
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.
- [30] Song Q H, Zhang W, Wu P C, et al. Water-resonator-based metasurface: an ultrabroadband and near-unity absorption [J]. *Advanced Optical*

- Materials, 2017, 5(8): 1601103.
- [31] Huang X J, Yang H L, Shen Z Y, et al. Water-injected all-dielectric ultra-wideband and prominent oblique incidence metamaterial absorber in microwave regime[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(38): 385304.
- [32] Guo J Y, Liang Q X, Jiang Z J, et al. A high-performance metamaterials absorbing structures based on fused deposition modeling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(23): 226-232.
- 郭建勇, 梁庆宣, 江子杰, 等. 一种熔融沉积 3D 打印的高性能超材料吸波结构 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(23): 226-232.
- [33] Yoo Y J, Ju S, Park S Y, et al. Metamaterial absorber for electromagnetic waves in periodic water droplets[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14018.
- [34] Xie J W, Zhu W R, Rukhlenko I D, et al. Water metamaterial for ultra-broadband and wide-angle absorption[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 5052-5059.

Water-Based Broadband Metamaterial Absorber Insensitive to Angle and Temperature

Zhang Xiaoqi, Yan Fengping^{*}, Du Xuemei, Wang Wei, Zhang Min

Key Laboratory of All-Optical Network and Modern Communication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China

Abstract

Objective Metamaterial electromagnetic absorbers play an important role in many aspects, such as electromagnetic compatibility, radar stealth, and sensing. Owing to the limited applications of narrow-band absorbers, researchers combine resonant unit cells with different sizes in a plane or stack them layer by layer to obtain a wide bandwidth absorption. Most of these structures are designed with metal as the main material; this not only increases the complexity of design and production, but also loses the absorption of the metal, and these defects greatly limit the development of electromagnetic absorbers. Recently, all-dielectric metamaterial absorbers have become a new research focus because of their potential in improving wide-band impedance matching, and water has gradually been applied to the all-dielectric design of electric broadband absorbers. Simultaneously, water has large permittivity and excellent dispersion characteristics in the microwave band and its fluidity and transparency can satisfy the bending and transparency characteristics of materials. Therefore, the design of broadband absorbers based on water materials provides an excellent possibility for the design of ultrabroadband electromagnetic absorbers.

Methods A water-based metamaterial absorbing structural unit was first designed based on the basic principle of the metamaterial absorbers. The structure mainly includes three parts: a metal bottom plate, a resin shell, and a circular water column. Moreover, the overall structure comprises a unit cell that periodically expands in the x and y directions. Furthermore, we used computer simulation technology software to simulate the scattering parameters of the absorbing structure and calculated the absorptivity by the related formula in origin. To further analyze the formation of the wide absorption band, electric and magnetic fields and power loss density at the resonance points were analyzed. Based on the above, the structure was analyzed by changing the incident and polarization angles to explore its absorption performance. Finally, according to the Debye formula, the dielectric constant of water at different temperatures was calculated, and the absorption rate of the wave-absorbing structure was simulated to analyze the performance of the designed absorber when the temperature changed.

Results and Discussions A water-based metamaterial absorber is designed based on the principle of equivalent medium and impedance matching (Fig. 1). The results show that the frequency range where the absorber's absorptivity of the designed water-based absorber exceeds 90% is 8.2–78.32 GHz (Fig. 3), whereas the absorption rate is relatively low at low frequencies (Fig. 4). The equivalent complex impedance of the absorbing structure is simulated, and the result shows that its real and imaginary parts are always kept at about 1 and 0, respectively (Fig. 5). To analyze the formation mechanism of the absorption peaks, the electric field, magnetic field, and power loss density at five resonance frequencies were simulated. Different local resonance effects occurred at these

frequencies in the absorber, and most of the power losses occurred in the water layer (Fig. 6). The absorption rates of the metamaterial absorber at different incident angles were analyzed in transverse-electric (TE) and transverse-magnetic (TM) polarizations, respectively. The results show that the proposed metamaterial absorber can maintain an excellent absorption characteristic when the incident angle changes (Fig. 7). Then, the absorptivity of the structure was simulated at different polarization angles. The results show that the structure has excellent polarization-independent characteristics for electromagnetic waves (Fig. 8). Finally, the absorption performances of the water-based metamaterial absorber at different temperatures were analyzed. The results prove that except in the frequency band near 12 and 22.8 GHz, the absorption rate of the absorber is almost insensitive to temperature changes, and remains above 90% throughout the designed waveband (Fig. 9).

Conclusions In this paper, a water-based ultrabroadband metamaterial absorbing structure is proposed. According to the electromagnetic characteristics of water in the microwave band, the structure realizes an excellent absorption performance of over 90% for incident electromagnetic waves in the 8.2–78.32 GHz frequency band. When the incident angle of electromagnetic waves changes in the TE and TM modes, respectively, the structure has good absorption characteristics. When the polarization angle of the electromagnetic wave is changed, the results show that the structure has excellent polarization-independent characteristics. The absorptivity of the absorber is also analyzed when the temperature changes and the results show that as the temperature increases, absorption effect decreases slightly around 12 and 22.8 GHz, and absorption rates of other frequency bands stay above 90%. The water-based metamaterial absorber has not only the wide absorption-frequency band and high absorptivity but also the characteristics of insensitivity to the incident angle, polarization-independence, and thermal stability. Simultaneously, the structure has low complexity, good transparency, and excellent bending characteristics, which is essential to the application and development of new dielectric wave absorbers.

Key words materials; metamaterial; ultra-broadband; electromagnetic absorber; wide-angle; thermal stability

OCIS codes 160.3918; 230.4000; 230.5750; 300.1030