



小型化超材料吸波体设计与电磁吸收分析

雷晓勇, 霍树云, 李 燕, 王蒙军, 孙 , 于河源, 李尔平

Design of miniaturized metamaterial absorber and analysis of electromagnetic absorption mechanism

LEI Xiaoyong, HUO Shuyun, LI Yan, WANG Mengjun, SUN Zhe, YU Heyuan, and LI Erping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021078>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于超材料的多波段小型化天线

Design of the multi-band and miniaturized antenna based on metamaterial

电波科学学报. 2017, 32(6): 735–741

一种小型化双陷波可重构UWB天线设计

A miniaturized UWB antenna with reconfigurable dual band notch characteristics

电波科学学报. 2021, 36(2): 313–320

基于石墨烯超材料的三频段可调谐完美吸收器

Triple-band tunable terahertz perfect absorber based on graphene metamaterial

电波科学学报. 2021, 36(2): 277–284

一种X波段小型化可调谐FSS设计

An X-band miniaturized tunable FSS design

电波科学学报. 2019, 34(4): 442–446

一种超宽带双极化阵列天线的设计

Design of an ultra-wideband dual-polarized array antenna

电波科学学报. 2021, 36(1): 20–26, 35

一种机载超宽带相控阵雷达T/R组件设计

Design of T/R module for airborne ultra-wideband phased array radar

电波科学学报. 2020, 35(2): 264–269



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

雷晓勇, 霍树云, 李燕, 等. 小型化超材料吸波体设计与电磁吸收分析[J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 896-904. DOI: [10.12265/j.cjors.2021078](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021078)

LEI X Y, HUO S Y, LI Y, et al. Design of miniaturized metamaterial absorber and analysis of electromagnetic absorption mechanism[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(6): 896-904. (in Chinese). DOI: [10.12265/j.cjors.2021078](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021078)

小型化超材料吸波体设计与电磁吸收分析

雷晓勇¹ 霍树云¹ 李燕³ 王蒙军^{1,2} 孙喆¹ 于河源¹ 李尔平^{1,2,4}

(1. 河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300401; 2. 电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300401;

3. 中国计量大学信息工程学院 浙江省电磁波信息技术与计量重点实验室, 杭州 310018;

4. 浙江大学 浙江省先进微纳电子器件智能系统及应用重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 为解决高频率、高集成度电子设备的电磁辐射问题, 提出了一种类似“三明治”的超材料吸波体结构. 该结构的金属层印刷在 FR4 基板两侧, 利用顶层两组金属条增加谐振点, 实现带宽拓展. 采用 S 参数反演得到本构参数, 同时通过等效电路模型和表面电流分布验证该结构的吸波机理, 并进行了实物的加工和测量. 整个吸波体的单元尺寸为 $0.1\lambda_L \times 0.1\lambda_L$ (λ_L 为最低截止频率对应的波长), 厚度仅为 $0.062\lambda_L$, 实测结果表明, 在不同极化方式下 10~18 GHz 的吸收率均高于 90%, 仿真与实测结果具有较好的一致性. 该结构具有小型化、超宽带、高吸收率、极化不敏感等特点, 为小型电子设备的辐射问题提供了一种新型电磁辐射抑制设计方法.

关键词 小型化; 超材料吸波体; 超宽带; 极化不敏感; 吸波机理

中图分类号 TN03

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2021)06-0896-09

DOI [10.12265/j.cjors.2021078](https://doi.org/10.12265/j.cjors.2021078)

Design of miniaturized metamaterial absorber and analysis of electromagnetic absorption mechanism

LEI Xiaoyong¹ HUO Shuyun¹ LI Yan³ WANG Mengjun^{1,2} SUN Zhe¹ YU Heyuan¹ LI Erping^{1,2,4}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Tianjin 300401, China; 3. School of Information Engineering, China Jiliang University & Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, Hangzhou, 310018, China; 4. Zhejiang University & Zhejiang Provincial Key Laboratory of Advanced Microelectronic Intelligent Systems and Applications, Hangzhou 310027, China)

Abstract A type of "sandwich" metamaterial absorber is developed, fabricated and experimentally demonstrated to solve the electromagnetic radiation problem of high frequency and high integration electronic equipment. The metal layer of this structure is printed on both sides of the FR4 substrate, and the two sets of metal strips on the top layer are used to increase the resonance point and realize the expansion of the bandwidth. To understand the electromagnetic wave absorption mechanism, an equivalent circuit model of the metamaterial absorber unit cell is constructed to investigate the absorbing characteristics, and surface current distributions are analyzed at absorption peaks. The size of the unit is only about $0.1\lambda_L \times 0.1\lambda_L$ where λ_L is the wavelength of the lowest frequency, and the total thickness of the absorber is only $0.062\lambda_L$. Simulated and experimental results show that the absorber exhibits absorptivity above 90% from 10 GHz to 18 GHz under different polarization. Measurement results show good agreement with the numerically simulated results. The structure is characterized by miniaturization, ultra-wideband, high absorptivity and polarization-

收稿日期: 2021-04-02

资助项目: 国家自然科学基金(62071424, 62027805)

联系人: 李燕 E-mail: liyan@cjlu.edu.cn

insensitive, which provides a new type of suppression structure for radiation problems of small electronic equipment.

Keywords miniaturized; metamaterial absorber; ultra-wideband; polarization insensitive; absorbing mechanism

引言

随着电子设备工作频率与集成度的不断提高,电磁干扰问题愈发严重,成为专家和学者研究的重点和难点.目前,普遍采用两种方案进行辐射抑制:一种是反射型,比如使用溅射和电镀在封装上涂抹小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的金属导电层,通过反射防止电磁干扰;另一种属于吸收型,辐射的电磁能量被完全吸收,不会发生能量泄漏,能够更好地保护电子设备^[1-3].

传统的吸波体在厚度上无法突破 $\lambda/4$ 的限制,使得尺寸偏大,不适用于小型化的电子设备.2008年波士顿大学物理系的 Landy 等^[4]首次提出超材料吸波体,介质材料采用 FR4,上层开环谐振器保证电谐振的产生,通过结构的调整使其与介质背板的金属条形成磁谐振保证能量的吸收,在 11.5 GHz 产生一个大于 88% 的吸收峰.然而,早期提出的超材料吸波体带宽较窄、尺寸较大.为拓宽带宽,2017年印度理工学院的 A. Bhati 等^[5]提出采用介质盖与超材料结合的方法,增加谐振点,从而增加吸收带宽,结构尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,但极化敏感性较差.同年,马来西亚的 M.M. Gajibo 等^[6]设计一款双波段可切换的超材料吸波体,结构类似于一个横躺的“H”,当入射电磁波角度在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 变化时,吸收率都稳定在 90% 以上,单元尺寸减小到 $6.2\text{ mm}\times 4.9\text{ mm}$.随着研究的不断深入,2018年华南理工大学的 Huang 等^[7]提出一种覆盖 X 和 Ku 波段的超材料吸波体,通过加载集总电阻的方式实现超带宽,由于中心对称结构使得偏振不敏感,在 $7.9\sim 20.2\text{ GHz}$ 实现 90% 以上的吸收率,厚度达到 0.093λ .2019年 M. M. Bait-Suwailam 等^[8]通过在柔性基底上加载变容二极管实现频率重构特性.除此之外,还有通过石墨烯、加载电阻膜和多层堆叠的方法实现多频点和超宽带吸收^[9-11].2020年 Gaurav Singh 等^[12]提出两种宽带吸波体,分别基于电路模拟和电容电路,通过多个电阻层与空气层堆叠实现宽带,空气层的加入必然导致厚度增加、体积变大,不适用于小型化的电子设备中.因此小型化超宽带极化不敏感的超材料吸波体是目前研究的主要方向.

针对以上问题,本文提出了一种小型化超宽带

的超材料吸波体,利用对称弯曲 90° 的金属结构作为超材料单元.由于尺寸的限制,通过增加谐振点来取代传统加载集总电阻的方式拓展带宽,结构简单,易于实现.超材料单元介质板采用传统的 FR4,厚度突破传统 $\lambda/4$ 的限制,达到 0.062λ .为防止发生透射,结构背板全覆铜,实现 $10\sim 18\text{ GHz}$ 的超宽带吸收性能,吸收率达到 90% 以上.最后,利用等效电路法提取等效参数,结合理论和仿真推导超材料单元的吸收机理,同时分析了结构参数对吸收率的影响,并通过实验验证其吸收性能.

1 超材料吸波体的设计与分析

1.1 单元结构的设计

超材料吸波体通常是利用周期金属结构印刷在介质板上,并根据实际设计需要调整结构参数实现阻抗匹配,达到高吸收率的目的.当电磁波垂直入射到金属结构表面,会发生反射或者透射,反射系数和透射系数分别为 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$.根据能量守恒定律,除反射和透射外剩余部分能量被超材料吸波体吸收,吸收率 $A(\omega)$ 可表示为

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

式中: $R(\omega) = |S_{11}|^2$; $T(\omega) = |S_{21}|^2$.由于吸波体的背板全覆铜,使得电磁波无法透射,即 $T(\omega) = 0$,吸收率的表达式简化为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega). \quad (2)$$

因此,当反射系数接近于 0 时可达到最大的吸收效率.

图 1(a) 为本文所设计的超材料吸波体单元结构的主视图,图 1(b) 为三维结构图,类似于一个“三明治”,顶层的金属条弯曲 90° 对称放置,通过增加一组对称弯曲的金属条来增加谐振点,最终实现超宽带.为保证在 X 和 Ku 波段实现高吸收率,将金属结构印刷在传统的 FR4 基板上,材料的介电常数为 4.3,损耗角正切为 0.02.并且耐高温,熔点达到 $203\text{ }^\circ\text{C}$,在电子设备工作时产生的温度不会影响吸波体的正常工作.同时,介质底层全覆铜,确保无透射,铜的电导率为 $5.7\times 10^7\text{ S/m}$,厚度均采用 0.018 mm .所有的几何参数如表 1 所示.

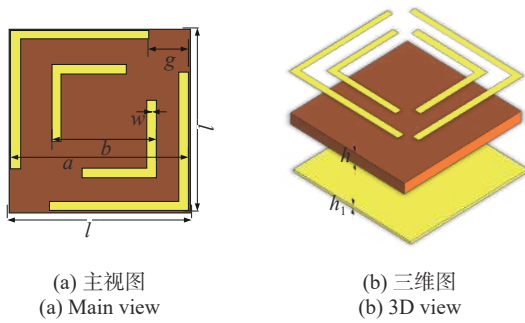


图1 超材料吸波体模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of metamaterial absorber model

表1 单元结构几何参数值

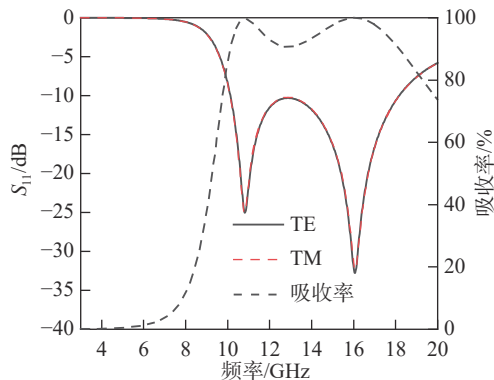
Tab. 1 Geometric parameters of element structure mm

l	a	b	g	h_1	w	h
3	2.9	1.5	0.8	0.018	0.15	1.85

1.2 仿真分析

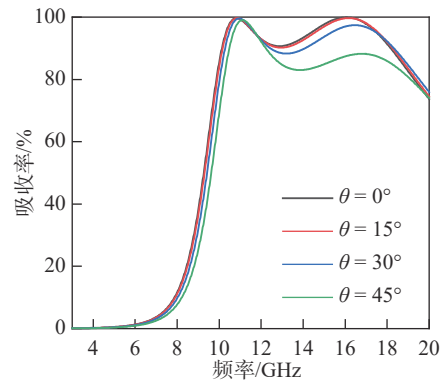
该吸波体单元是在方型开口谐振环的基础上进行改进,使得两组金属条在不同频率下产生共振,得到多个谐振点.同时,金属条的两个方向增加了缝隙,相当于在 45° 方向对金属条进行切割,导致更多的电偶极子与磁偶极子产生,使得吸收带宽的范围更大^[13].

研究中利用 CST 仿真软件进行建模计算,通过频域求解器得到 S 参数, X 和 Y 方向的边界条件设置为“unit cell”, Z 方向上设置为开放边界. 图 2(a) 为超材料吸波体在 TE 和 TM 极化方式下电磁波垂直入射时的 S 参数. 由于结构的中心对称特性, 明显可以看到两种极化方式的 S 参数基本一致, 从而验证了其极化不敏感性. 不仅如此, -10 dB 以下带宽覆盖 X 和 Ku 波段, 相对带宽达到 57.1%, 实现了超宽带. 根据式 (2) 得到虚线所示的吸收率曲线, $10 \sim 18$ GHz 频段范围内吸收率达到 90% 以上, 可以高效吸收入射的电磁波.



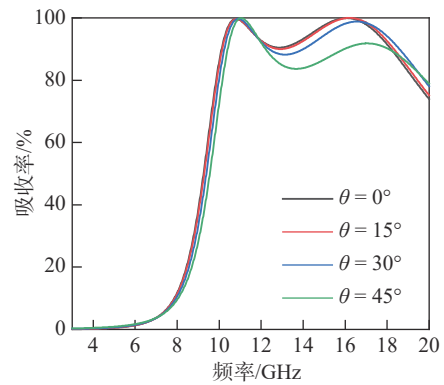
(a) TE与TM极化方式下的S参数与吸收率

(a) S parameter and absorptivity with TE and TM polarization



(b) 不同入射角下TE极化方式的吸收率

(b) Absorptivity of TE polarization at different incident angles



(c) 不同入射角下TM极化方式的吸收率

(c) Absorptivity of TM polarization at different incident angles

图2 不同极化方式下超材料吸波体的 S 参数与吸收率

Fig. 2 S-parameters and absorptivity of metamaterial absorbers under different polarization

为验证结构的角稳定性,对超材料吸波体结构进行斜入射仿真分析. 图 2(b)、(c) 分别展示了 TE 和 TM 极化方式下吸收率受不同入射角影响的关系曲线,当入射电磁波角度为 45° 时,无论是 TE 还是 TM 极化波在 16 GHz 的谐振点吸收率均下降,但相对低一点的 10.8 GHz 吸收率仍然很高. 并且对该结构来说,入射角度变化对 TE 极化波影响较大,随着入射电磁波角度的增加,谐振点均向高频有一定偏移,吸波体的吸收效率在工作频段内始终高于 80%,可以预测即使入射角度超过 45° , 10.8 GHz 附近的一定带宽范围内仍具有较高的吸收率. 因此,超材料吸波体在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 依然保持着高吸收率,即具有良好的角稳定性.

2 吸波原理分析

2.1 电磁参数提取

为验证超材料吸波体单元的吸收原理,通过软

件对 10.8 GHz 和 16 GHz 两个吸收峰处的表面电流与电场分布进行仿真分析. 图 3 中 (a)、(b) 分别展示的是 10.8 GHz 处顶层和底层表面电流分布, (d)、(e) 分别展示的是 16 GHz 处顶层和底层表面电流分

布, 可清楚地看到表面电流主要分布在最外侧的对称金属条上. 同时, 顶层和底层的电流方向相反构成循环电流回路, 激发磁偶极子引起磁共振从而控制磁导率 $\mu(\omega)$ 的大小.

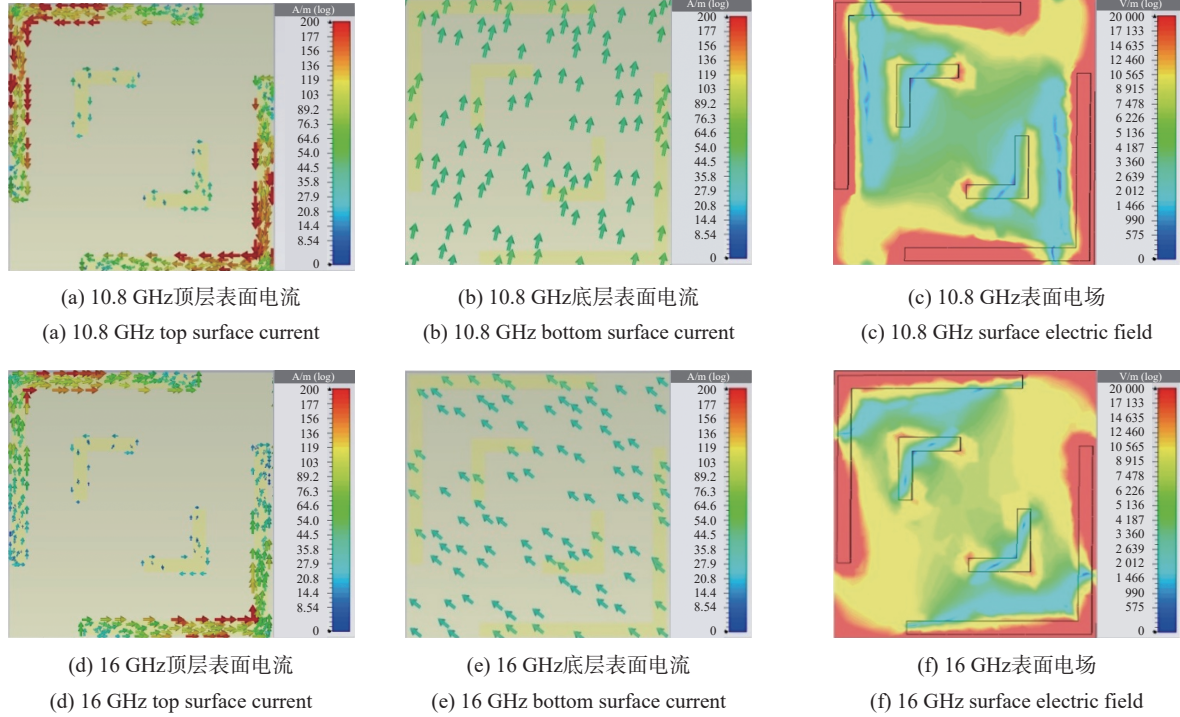


图 3 表面电流与电场分布图

Fig. 3 Distribution of surface current and electric field

图 3(c)、(f) 分别展示了 10.8 GHz 和 16 GHz 的电场分布, 通过颜色的分布可以看到顶层外侧边缘弯曲的金属条部分感应出很强的电场, 从而产生电共振可以有效地控制介电常数 $\epsilon(\omega)$. 因此, 可以通过调节电磁共振实现自由空间阻抗匹配, 达到宽频带高吸收率的目的. 同时, 等效媒质理论是分析超材料吸波体吸收机理常用的方法之一, 由于背板全覆铜无透射, 可以得到等效阻抗^[14]为

$$z(\omega) = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} = \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}. \quad (3)$$

超材料吸波体的背板全覆铜, S_{21} 为 0, 式 (3) 可以简化为

$$S_{11} = \frac{z(\omega) - 1}{z(\omega) + 1}. \quad (4)$$

根据式 (2) 可以看到, 反射系数接近 0 时可以实现高吸收率. 因此, 在吸波体的设计中尽量保证 $z(\omega) = 1$.

由于超材料吸波体背板采用全金属铜, 无透射发生, 入射的电磁波除吸收外全部被反射. 因此, 根据仿真的 S 参数编写程序可以得到吸波体等效阻抗的实部和虚部. 如图 4(a) 所示, 黑色和红色分别代表等效阻抗的实部和虚部, 在 10~18 GHz 的区间内红

色的线接近 0, 黑色的线接近 1. 因此, 在该频段内的等效阻抗接近 1, 实现与自由空间阻抗匹配, 保证电磁波的完美吸收. 由于等效阻抗不等于 1, 所以吸收率无法达到 100%, 只能无限接近.

除此之外, 超材料吸波体的本构参数也是佐证吸收机理的一种重要手段. 由于背面铜板的存在, 结构本身无透射发生, 无法利用等效媒质理论进行 S 参数反演求得本构参数, 等效介电常数 $\epsilon(\omega)$ 和磁导率 $\mu(\omega)$ 新的计算公式^[15]为:

$$\epsilon(\omega) = 1 + \frac{2j}{k_0 h} \left(\frac{1-S_{11}}{1+S_{11}} \right), \quad (5)$$

$$\mu(\omega) = 1 + \frac{2j}{k_0 h} \left(\frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \right). \quad (6)$$

式中: k_0 表示自由空间波数; h 表示介质板厚度.

由图 4(b) 和 (c) 可以看到 $\epsilon(\omega)$ 和 $\mu(\omega)$ 的实部在吸收带宽内基本相同, 并且都接近于 0, 使得吸波体与自由空间实现阻抗匹配, 曲线的变化证实了电场和磁场对吸收带宽具有调控作用. 本构参数的虚部表示超材料吸波体对入射电磁波的损耗, 由图 4(b) 和 (c) 还可以看到在吸收频带范围内损耗较大, 实现了良好的吸波特性.

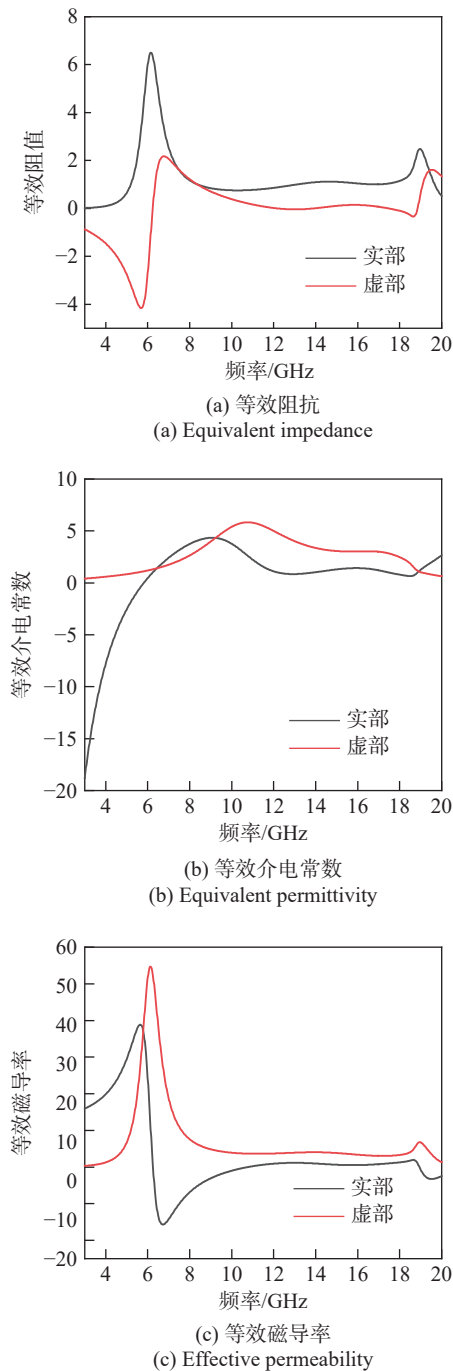


图4 超材料吸波体等效参数

Fig. 4 Equivalent parameters of metamaterial absorber

电磁超材料吸波体的损耗一般分为介质损耗和欧姆损耗. 图5对比展示了FR4介质在有无损耗时吸收率随频率的变化曲线, 两条曲线的走势基本一致, 但在10~18 GHz范围内, 有耗的FR4介质基板吸收率高于无耗基板, 并且吸收率总体均高于80%. 因此, 该吸波体结构存在一定的介质损耗, 为进一步验证是否存在顶层金属的欧姆损耗, 利用不同金属

材料Cu与PEC进行对比得到图6, 图中两条曲线重合, 即顶层金属的欧姆损耗很小. 除此之外, 在图3表面电流分析中可以发现介质顶层与底层之间形成的回路通过激发磁谐振同样是消耗电磁波的一种重要方式, 总之该超材料吸波体的损耗方式不单一, 包括介质损耗、磁谐振损耗以及少部分的欧姆损耗. 由于介质存在一定阻抗, 并且前面已经证明本构参数的虚部是对电磁波进行吸收损耗的主要原因, 因此, 这里的超材料吸波体主要是通过介质损耗产生电磁吸收. 这就意味着介质材料的介电常数与磁导率对吸收率会产生一定的影响, 图7对不同介电常数的材料进行了仿真分析, 同时表2给出了具体材料名称、相对带宽等. 根据表2结果可以充分地验证上述猜想, 介电常数的变化对吸收率的影响较大, 并且与谐振频率呈现反比关系, 随着基底介电常数的增加, 整体的吸收频段向低频偏移, 吸收带宽明显减少, 吸收率由90%逐渐降为80%.

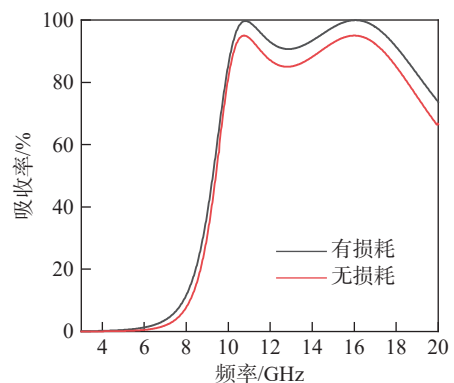


图5 FR4基板在有无损耗下的吸收率

Fig. 5 Absorptivity of FR4 substrate with or without loss

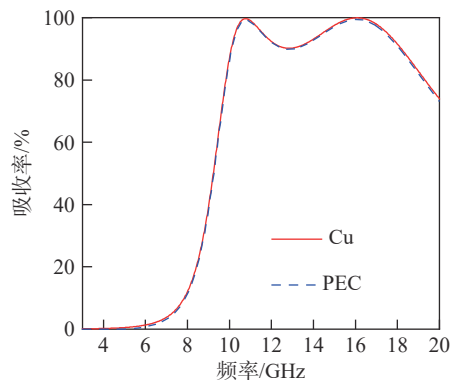


图6 不同金属材料下的吸收率

Fig. 6 Absorptivity of different metal materials

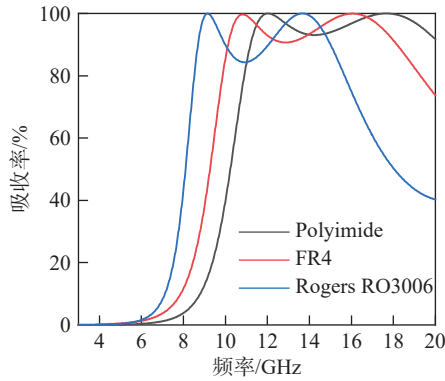


图 7 不同基底材料下的吸收率

Fig. 7 Absorptivity of different substrate materials

表 2 不同介质基板的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of different dielectric substrates

基底材料	ϵ_r	带宽/GHz	相对带宽/%
Polyimide	3.50	11.2~20.0	56.4
FR4	4.30	10.0~18.0	57.1
Rogers RO3006	6.15	8.7~15.0	53.2

2.2 等效电路分析

图 8 展示了超材料吸波体的等效电路模型,顶层的两组对称弯曲金属条等效为两个串联的 RLC 电路,同时并联在一起与介质板的等效阻抗相连,图中 Z_h 表示介质板的等效阻抗, C_{g1} 和 C_{g2} 分别表示每组金属条之间断裂部分的等效电容。

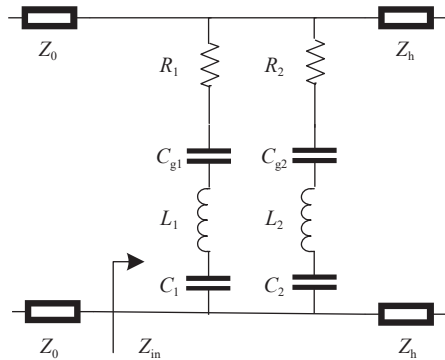


图 8 等效电路模型

Fig. 8 Equivalent circuit model

根据等效电路理论可以得到每组金属条的等效电感^[16]:

$$\frac{L}{Z_0} = \frac{a}{l} F(l, 2w, \lambda), \quad (7)$$

$$F(l, w, \lambda) = \frac{l}{\lambda} \cos \theta \left[\ln \left(\operatorname{cosec} \frac{\pi w}{2l} \right) + M(l, w, \lambda) \right], \quad (8)$$

$$M(l, w, \lambda) = \frac{1}{2} \frac{(1 - \beta^2)^2 \left[\left(1 - \frac{\beta^2}{4} \right) (N_+ + N_-) + 4\beta^2 N_+ N_- \right]}{\left(1 - \frac{\beta^2}{4} \right) + \beta^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} - \frac{\beta^4}{8} \right) (N_+ + N_-) + 2\beta^6 N_+ N_-}, \quad (9)$$

$$N_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \frac{2l \sin \theta}{\lambda} - \left(\frac{l \cos \theta}{\lambda} \right)^2}} - 1, \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\sin(\pi w)}{2l}. \quad (11)$$

式中: a 、 l 和 w 均为超材料吸波体的相关尺寸,在表 1 已经列出; λ 为波长; θ 表示入射电磁波的角度. 因为吸波体实际应用时,垂直入射的电磁波为主要来源,为计算方便,这里的入射角度采用 0° .

等效电容计算方法相似,有

$$\frac{C}{Z_0} = 4 \frac{a}{l} F(l, m, \lambda). \quad (12)$$

式中, m 表示不同组金属条之间的距离. 开口处的等效电容以及电阻可以通过公式 (13) 和 (14) 计算:

$$C_{g1, g2} = \frac{A\epsilon}{G}, \quad (13)$$

$$R_{1,2} = \frac{\rho l}{A}. \quad (14)$$

式中: A 表示金属截面的横截面积; ϵ 表示介质的等效介电常数; G 表示金属条断裂处之间的距离; ρ 表示金属的电导率. 因此,可以通过上述的公式得到超材料吸波体的等效参数,如表 3 所示. 利用 ADS 对等效电路进行优化,如图 9 所示,同样存在两个谐振点,带宽范围与曲线走势和 CST 的结果基本一致,验证了等效电路方法的可行性。

表 3 等效参数值

Tab. 3 Equivalent parameter value

x	R_x/Ω	L_x/nH	C_x/fF	C_g/fF
1	0.041	16	20	38
2	0.044	31	15	3.6

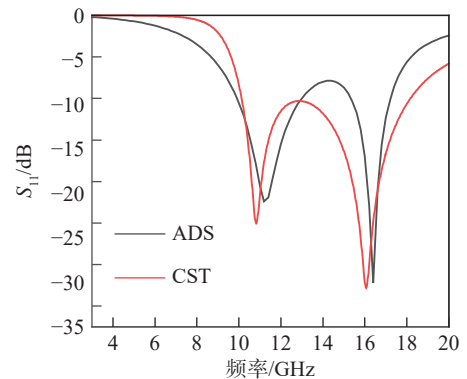


图 9 等效电路 ADS 和 CST 仿真对比图

Fig. 9 Comparison of equivalent circuit simulation between ADS and CST

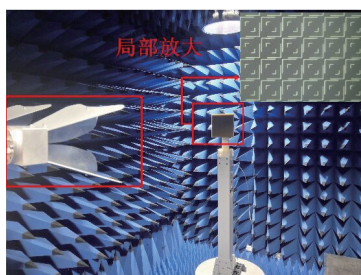
3 实验分析

通过理论与仿真对超材料吸波体的吸收特性有了深入的了解后,随即进行实际加工,目的是更进一步验证吸波体的吸收性能.如表4所示,对比现有的吸波体,本文设计的吸波体具有更小的尺寸和更宽的入射角.由于小单元结构不易测量,为方便实测,利用印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 的方法制作了 60×60 个单元结构组成的超材料吸波体阵列,总体尺寸达到 $18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$,如图10(a)所示,固定在暗室中的一侧.同时,需要两个工作在 $1 \sim 18 \text{ GHz}$ 的宽带双脊喇叭天线作为电磁波的收发端,并将两者并排放置面向吸波体,与其保持同一水平面.将两个喇叭天线与 Agilent N5244A 矢量网络分析仪连接,并保证测试板与喇叭天线之间满足远场条件.

表4 本文与现有超材料吸波体的比较

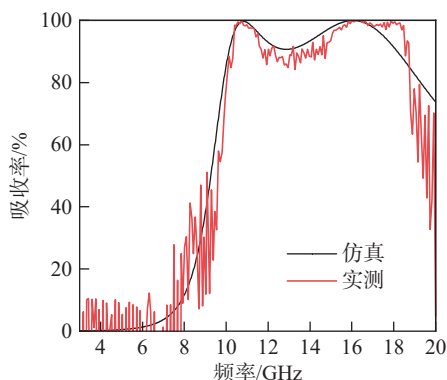
Tab. 4 Comparison of metamaterial absorbers between this paper and the existing ones

文献	厚度	单元尺寸	入射角敏感度/(°)
[17]	$0.068\lambda_L$	$0.197\lambda_L$	30
[18]	$0.097\lambda_L$	$0.090\lambda_L$	40
[19]	$0.078\lambda_L$	$0.089\lambda_L$	30
[20]	$0.216\lambda_L$	$0.210\lambda_L$	45
本文	$0.062\lambda_L$	$0.100\lambda_L$	45



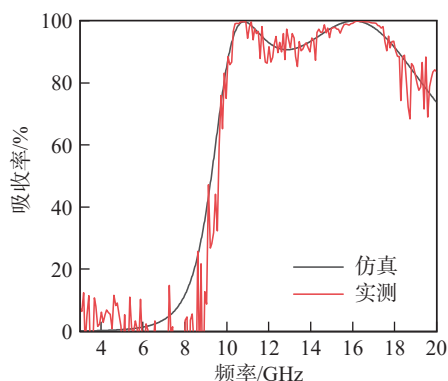
(a) 实测环境

(a) Measured environment



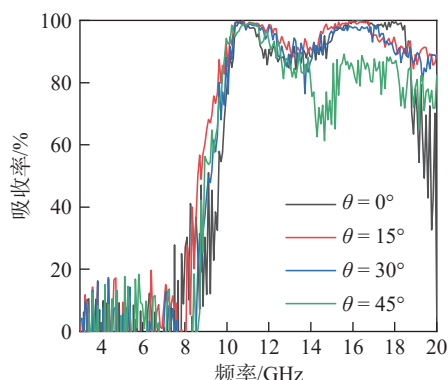
(b) TE极化方式的吸收率

(b) Absorption rates of TE polarization

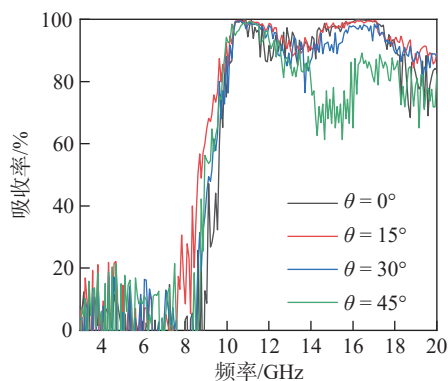


(c) TM极化方式的吸收率

(c) Absorption rates of TM polarization



(d) 不同入射角下TE极化方式的吸收率
(d) Absorption rates of TE polarization at different incident angles



(e) 不同入射角下TM极化方式的吸收率
(e) Absorption rates of TM polarization at different incident angles

图10 不同极化方式与不同入射角下的吸收率测量环境与结果

Fig. 10 Measurement environment and results of absorption rates with different polarization modes and incident angles

为验证不同极化方式下吸波体的高吸收率,将两个双脊喇叭天线的方向均旋转 0° 和 90° ,实测垂直入射时 TE、TM 极化方向下的 S 参数,根据式 (2) 得到吸收率曲线.图10(b)、(c) 分别展示了 TE 与 TM 极化方式下吸收率实测的结果,将其与仿真结果对比发现,曲线的走势基本一致,在 10.8 GHz 和 16 GHz

处出现两个吸收峰.但由于加工精度和测量中的环境干扰误差不可避免,因此得到的实测曲线并不光滑,存在噪声干扰,同时高频谐振点附近均略有误差,产生偏移,但超材料吸波体总体吸收带宽与仿真近似.

随后,利用转台转动不同的角度实测出吸波体在不同入射角下的S参数,从而得到吸收率曲线.如图10(d)、(e)所示,不同极化方式下均能看到10.8 GHz和16 GHz两个吸收峰.随着电磁波入射角的不断增加,吸收带宽逐渐减少,10.8 GHz谐振点吸收率不变,但16 GHz的谐振点受角度稳定性影响较大,当入射角等于45°时,除个别点存在误差外,吸收率均保持在80%以上,与仿真结果一致,即具有良好的角度稳定性.

4 结 论

在传统吸波体结构的基础上,引入两组对称弯曲的金属条设计了一种新型超材料吸波体结构.在10~18 GHz范围内实现超宽带吸收,相对带宽达到57.1%,结构单元尺寸为 $0.1\lambda_c$,厚度为 $0.062\lambda_c$.当电磁波入射角为45°时,超材料吸波体的吸收率仍能保持80%以上,满足小型化电子器件辐射抑制的需求.通过理论分析,采用等效电路与本构参数法验证其吸波机理,0°~45°入射角下TE、TM极化波的吸收率实测结果与仿真结果吻合,表明超材料吸波体具有极化不敏感与角度稳定性的特点.目前,尚未在实测部分验证其电磁干扰抑制能力,后续工作中可以结合辐射源开展进一步研究.

参考文献

- [1] LI Y, CAO W Y, ZUO P P, et al. Analysis of multilayer structure near- and far-field radiation by the coupled PP-PEEC and field-equivalence principle method[J]. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 2019, 61(2): 495-503. DOI: [10.1109/TEMC.2018.2819721](#)
- [2] ERICKSON S, SAKAGUCHI M. Application of package-level high-performance EMI shield material with a novel nozzleless spray coating technology[C]// The 70th Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 2020: 1691-1696. DOI: [10.1109/ECTC32862.2020.00265](#).
- [3] HANNAN S, ISLAM M T, HOQUE A, et al. Design of a novel double negative metamaterial absorber atom for Ku and K band applications[J]. *Electronics*, 2019, 8(8): 853. DOI: [10.3390/electronics8080853](#)
- [4] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical review letters*, 2008, 100(20): 207402. DOI: [10.1109/ICACCI.2017.8125853](#)
- [5] BHATI A, HIREMATH K R, DIXIT V. Bandwidth enhancement of wire-based metamaterial absorber using dielectric cap[C]// International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, IEEE, 2017: 279-282. DOI: [10.1109/ICACCI.2017.8125853](#).
- [6] GAJIBO M M, RAHIM M K A, MURAD N A, et al. Single/dual band selectable metamaterial absorber[C]// International Symposium on Antennas and Propagation, IEEE, 2017: 1-2. DOI: [10.1109/ISANP.2017.8229009](#).
- [7] HUANG H F, LUO B. An ultra-wideband polarization independent metamaterial absorber based on dual-polarization[C]// International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, IEEE, 2018: 1-3. DOI: [10.1109/ICMMT.2018.8563517](#).
- [8] BAIT-SUWAILAM M M, ALMONEEF T S, ALON-AINY A. A dual-band flexible frequency-reconfigurable metamaterial absorber using modified split-ring resonator[C]// The 2nd IEEE Middle East and North Africa COMMUNICATIONS Conference, IEEE, 2019: 1-4. DOI: [10.1109/MENACOMM46666.2019.8988567](#).
- [9] 莫漫漫, 马武伟, 庞永强, 等. 基于拓扑优化设计的宽频吸波复合材料[J]. *物理学报*, 2018, 67(21): 379-388.
MO M M, MA W W, PANG Y Q, et al. Broadband absorbent materials based on topology optimization design[J]. *Acta physica sinica*, 2018, 67(21): 379-388. (in Chinese) DOI: [10.7498/aps.67.20181170](#)
- [10] ZHANG C, CHENG Q, YANG J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption[J]. *Applied physics letters*, 2017, 110(14): 1-5. DOI: [10.1063/1.4979543](#)
- [11] 李辉, 余江, 陈哲. 基于石墨烯超材料的三频段可调谐完美吸收器[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(2): 277-284.
LI H, YU J, CHEN Z. Triple-band tunable terahertz perfect absorber based on graphene metamaterial[J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(2): 277-284. (in Chinese) DOI: [10.13443/j.cjors.2020022601](#)
- [12] SINGH G, GHOSH S. A comparative analysis between circuit analog and capacitive circuit based broadband absorbers[C]// 2020 National Conference on Communications, IEEE, 2020: 1-5. DOI: [10.1109/NCC48643.2020.9056000](#).
- [13] DINH Q V, DINH H L, HONG T D, et al. Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorber by coupling three dipole resonances[J]. *Physica B: condensed matter*, 2018, 532: 90-94. DOI: [10.1016/j.physb.2017.03.046](#)

- [14] SMITH D R, SCHULTZ S, MARKOS P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. *Physical review B*, 2001, 65(19): 195104. DOI: [10.1103/PhysRevB.65.195104](#)
- [15] HOLLOWAY C L, KUESTER E F, GORDON J A, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials[J]. *IEEE antennas and propagation magazine*, 2012, 54(2): 10-35. DOI: [10.1109/MAP.2012.6230714](#)
- [16] LANGLEY R J, PARKER E A. Equivalent circuit model for arrays of square loops[J]. *Electronics letters*, 1982, 18(7): 294-296. DOI: [10.1049/el:19820201](#)
- [17] SAIKIA M, SRIVASTAVA K V. Design of thin broadband microwave absorber using combination of capacitive and circuit analog absorbers[C]// Indian Conference on Antennas and Propagation, IEEE, 2018: 1-4. DOI: [10.1109/IN-CAP.2018.8770777](#).
- [18] BANADAKI M D, HEIDARI A A, NAKHKASH M. A metamaterial absorber with a new compact unit cell[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2018, 17(2): 205-208. DOI: [10.1109/LAWP.2017.2780231](#)
- [19] 吕世奇, 高军, 曹祥玉, 等. 一种基于集总电阻加载的小型化超宽带超材料吸波体设计[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(6): 1330-1335.
- LYU S Q, GAO J, CAO X Y, et al. A design of ultra-broadband miniaturized metamaterial absorber based on loading lumped resistances[J]. *Journal of electronics & information technology*, 2019, 41(6): 1330-1335. (in Chinese) DOI: [10.11999/JEIT180648](#)
- [20] GHAITANYA G, CHANDACHORIYA A. Polarization independent super thin metamaterial microwave broadband absorber for X-band application[C]//The 9th International Conference on Communication Systems and Network Technologies, IEEE, 2020: 13-18. DOI: [10.1109/CSNT48778.2020.9115751](#).

作者简介

雷晓勇 (1994—), 男, 内蒙古人, 硕士研究生, 研究方向为电磁兼容、超材料结构的设计。

霍树云 (1997—), 女, 河北人, 硕士研究生, 研究方向为集成电路电磁兼容。

李尔平 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 现从事电磁场数值、微纳电子集成电路和电子封装电磁兼容、信号/电源完整性研究。