

双层螺旋环超表面复合吸波体等效电路模型及微波损耗机制

李宇涵 邓联文 罗衡 贺龙辉 贺君 徐运超 黄生祥

Equivalent circuit model and microwave reflection loss mechanism of double-layer spiral-ring metasurface embedded composite microwave absorber

Li Yu-Han Deng Lian-Wen Luo Heng He Long-Hui He Jun Xu Yun-Chao Huang Sheng-Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 095201 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181960

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181960>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

引入界面耦合系数的长片型磁电层状复合材料的等效电路模型

Equivalent circuit model for plate-type magnetoelectric laminate composite considering an interface coupling factor

物理学报. 2018, 67(2): 027501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172080>

基于电阻型频率选择表面的宽带雷达超材料吸波体设计

Design and fabrication of broadband radar metamaterial absorber based on the resistor FSS

物理学报. 2015, 64(21): 218102 <https://doi.org/10.7498/aps.64.218102>

基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体的设计与制备

Design and fabrication of a broadband metamaterial absorber based on a dielectric and magnetic hybrid substrate

物理学报. 2015, 64(7): 077801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.077801>

基于石墨烯互补超表面的可调谐太赫兹吸波体

Tunable terahertz absorber based on complementary graphene meta-surface

物理学报. 2016, 65(1): 018101 <https://doi.org/10.7498/aps.65.018101>

一种基于石墨烯的超宽带吸波器

An ultra-wideband absorber based on graphene

物理学报. 2016, 65(5): 054101 <https://doi.org/10.7498/aps.65.054101>

0.14 THz双环超材料慢波结构表面波振荡器数值研究

Numerical studies on a 0.14 THz coaxial surface wave oscillator with double-ring metamaterial slow wave structure

物理学报. 2015, 64(7): 070702 <https://doi.org/10.7498/aps.64.070702>

双层螺旋环超表面复合吸波体等效电路模型 及微波损耗机制*

李宇涵 邓联文[†] 罗衡 贺龙辉 贺君 徐运超 黄生祥

(中南大学物理与电子学院, 长沙 410083)

(2018年11月3日收到; 2019年3月5日收到修改稿)

针对超材料吸波频带窄的问题, 采用金属螺旋环超表面与碳纤维吸波材料相复合的方式, 设计了宽频高性能复合吸波体. 研究发现, 在碳纤维吸波材料中引入双层螺旋环超表面能显著增强吸收峰值和吸波带宽, 且适当增加螺旋环初始线长和吸收层厚度有利于提高复合吸波体的吸波性能, 9.2—18.0 GHz 频段的反射损耗均优于-10 dB (带宽达 8.8 GHz), 吸收峰值达-14.4 dB. 利用 S 参数计算得到螺旋环-碳纤维复合吸波体的等效电磁参数和特征阻抗呈现多频点谐振特性, 通过构建双层螺旋环超表面等效电路模型, 定量计算了复合吸波体的电磁谐振频点, 发现由等效电路模型获得的谐振频点计算值与仿真值基本相符, 说明该复合吸波体多频点电磁谐振是宽频电磁损耗的主要机制.

关键词: 螺旋环超表面, 电磁谐振, 等效电路, 微波损耗机制

PACS: 52.35.Hr, 77.84.Lf, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.68.20181960

1 引言

高性能吸波材料在电磁兼容、电磁辐射防护、特种装备反探测等方面能发挥重要作用, 将传统吸波材料与超材料复合是吸波材料发展的重要方向^[1-5]. Landy 等^[6]在 2008 年就设计了由开口环形金属图案阵列、损耗电介质和金属微带线组成的 X 波段超材料吸波体, 对 11.65 GHz 处的入射电磁波的吸收率接近 100%. 基于超材料研发的复合吸波体具有厚度薄、质量轻、吸收强、吸收频带可调^[7-20]等优点, 但由单一尺寸金属图案单元构成的超材料吸波体一般仅在某频点对电磁波具有强吸收, 难以满足实际应用的宽频吸波要求.

为拓宽超材料吸波体的吸收频带, 通常是不同尺寸的金属图案组合而使多个吸收峰相互叠加^[21-23]. 程用志^[24]分别将两个和四个不同尺寸的

十字型金属图案组合, 得到了具有双频点与四频点 (3.76, 3.98, 4.18, 4.34 GHz) 强吸收的吸波体, 且临近的吸收峰能相互叠加, 半峰高的宽度 (吸收率超过 50% 的带宽) 分别达 410 和 810 MHz.

研制宽频吸波材料的另一种有效方法是将超材料与传统吸波材料相复合^[25,26]. Sun 等^[27]将基于方环图案的超材料吸波体与泡沫吸波材料复合, 总厚度为 4 mm 时复合吸波体反射损耗优于-10 dB 的带宽达 2 GHz. 徐永顺等^[28]将基于单层螺旋图案的超材料嵌于两层磁性吸波材料中, 复合吸波体反射损耗优于-10 dB 的频段为 6.69—13.8 GHz, 带宽达 7.11 GHz.

本文将双层螺旋结构的超表面与填充短切碳纤维的吸波材料复合, 研究螺旋环结构的线长、线宽特征尺寸及介质层厚度对复合吸波体反射率的影响规律, 利用全波仿真软件分析复合吸波体电磁场和表面电流密度的分布, 并通过构建双层螺旋超

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0204600) 和国家自然科学基金 (批准号: 51802352) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: denglw@csu.edu.cn

表面/碳纤维吸波体复合结构的等效电路模型, 探讨复合吸波体的多频点谐振特性及微波损耗机理, 可为基于超表面的宽频高性能复合吸波材料提供设计参考.

2 双层金属螺旋环-碳纤维复合吸波体结构与特性

设计的螺旋环超表面-碳纤维复合吸波体结构如图 1 所示. 结构单元的尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 螺旋环初始长度 $a = 2.5\text{ mm}$, 线宽度 $b = 0.25\text{ mm}$, 厚度 $d = 0.01\text{ mm}$, 螺旋环末段金属线沿反螺旋方向伸出引脚, 可利用尖端效应增强相邻螺旋环单元之间耦合. 螺旋环材质为铜, 电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7\text{ S/m}$. 两种电磁参数不同的理想碳纤维吸波材料用两种长度的 T700 短切碳纤维制得, 相对磁导率均为 1, 其介电频谱如图 2 所示, 上层电介质厚度 h 为优化参量.

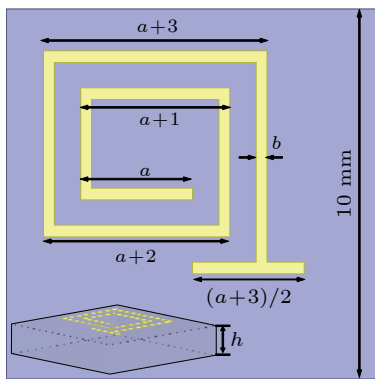


图 1 螺旋环-碳纤维复合吸波体结构示意图

Fig. 1. Structure schematic diagram of spiral-ring with carbon fiber composite microwave absorber.

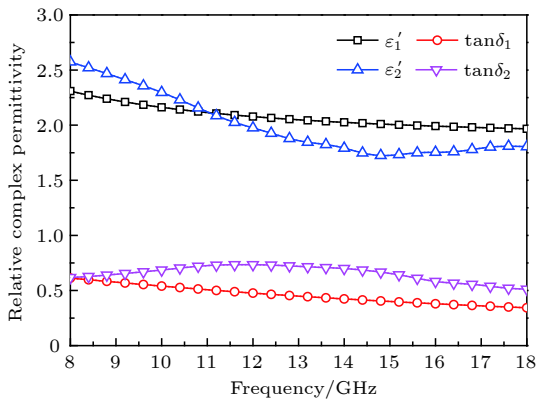


图 2 碳纤维损耗层相对介电常数频谱

Fig. 2. Relative complex permittivity of carbon fiber.

由于吸波体实物是由大量的单个吸波体单元在横、纵两个方向周期性排列形成的一个二维结构. 在 HFSS 仿真软件中, 选择由“主边界”和“从边界”构成的“主从边界条件”, 在该边界条件下, 相邻的边界之间的电场存在相位差, 可用于对无限阵列的仿真模拟. 如图 3 所示, 在平行于 xoy 平面的端口处均设置 Floquet 端口激励, 电磁波垂直入射, 其余四个平面设置为两对主从边界条件, 以此模拟二维周期性结构. 扫描频率范围设置为 $8.0\text{—}18.0\text{ GHz}$.

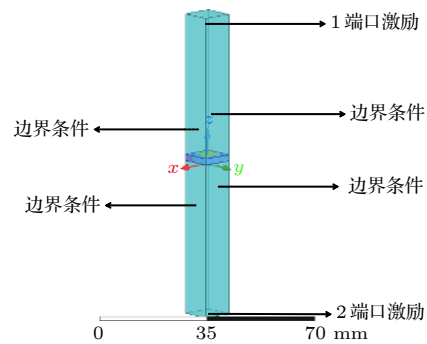


图 3 仿真模型边界条件与激励设置

Fig. 3. Settings of boundary conditions and incentive settings for the simulation model.

设计的双层金属螺旋环与碳纤维吸波材料复合结构、双层碳纤维吸波材料及介质基板 FR-4 上的双层金属螺旋环复合结构 (总厚度均为 3.1 mm) 的吸波性能如图 4 所示. 可见, 双层碳纤维吸波体在 18 GHz 频点处的峰值反射损耗仅为 -7.5 dB ; FR-4 上的双层金属螺旋环复合结构呈现谐振型多峰值的吸波特性; 双层碳纤维吸波层插入螺旋环后, 呈

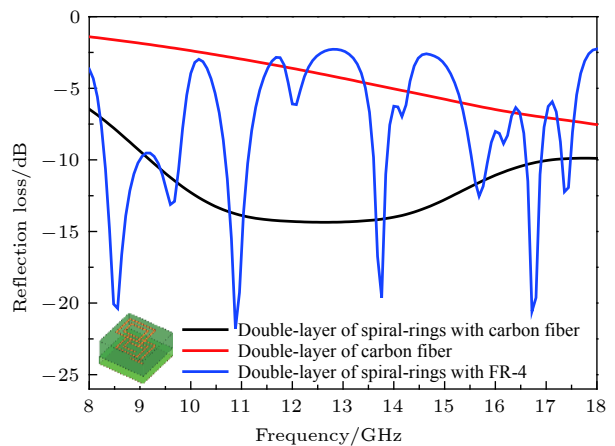


图 4 双层金属螺旋环-碳纤维复合吸波体的反射损耗

Fig. 4. Reflection loss of double layers metal spiral-ring with carbon fiber composite microwave absorber.

现明显的宽频吸波特性和 9.2—18.0 GHz 频段的反射损耗均优于 -10 dB (带宽达 8.8 GHz), 吸收峰值达 -14.4 dB.

螺旋环初始线长 a 、线宽 b 和上层吸波材料厚度 h 对复合吸波体反射率的影响规律见图 5. 初始线长 a 对复合吸波体反射率的影响显著, 随 a 逐渐增加, 吸收峰值有所增加, 优于 -10 dB 的吸收带宽显著增加; 且随 a 增加, 吸收峰对应的频率向低频移动, 即在不增加吸波层厚度的前提下能增强低频段微波的吸收. 线宽 b 对复合吸波体微波反射率的影响较小; 而增加吸收层厚度 h 能有效增强低频段电磁波的吸收. 经优化设计发现, 当螺旋结构尺寸为 $a = 3.0$ mm, $b = 0.3$ mm, $h = 2.1$ mm 时的螺旋形超材料与短切碳纤维吸波材料组成的复合吸波体性能最佳, 反射损耗优于 -10 dB 的频段为 9.20—18.00 GHz, 吸收峰值达 -14.36 dB.

3 等效电路模型与微波损耗机制

利用 S 参数可算得双层螺旋环超表面与碳纤维吸波材料复合结构的复折射率 n 及复阻抗 Z , 计算公式如下 [29]:

$$n = \frac{1}{kd} \cdot \left(\arccos \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) + 2m\pi \right), \quad (1)$$

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

式中 k 是波矢, d 是复合吸波体的厚度, S_{11} 和 S_{21} 分别为反射系数和透射系数, m 为考虑反余弦函数解的多值性引入的整数, Z 为复阻抗. 由复折射率 n 与复阻抗 Z 可进一步计算得到复合吸波体的等效复电磁参数, 计算式如下:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{n}{Z}, \quad (3)$$

$$\mu_{\text{eff}} = n \cdot Z. \quad (4)$$

S 参数的幅值与相位如图 6 所示.

根据 (1)—(4) 式, 结合 S 参数, 计算得到特征阻抗、介电常数、磁导率以及复折射率的频谱特性如图 7 所示.

可见, 复合吸波体的特征阻抗、复电磁参数均出现明显的谐振特性. 复阻抗的实部 $\text{Re}(Z)$ 在 1 附近振荡变化, 虚部 $\text{Im}(Z)$ 在 0 附近振荡变化, 与自由空间的复阻抗 $Z_0 = 1+0j$ 较为接近, 能保证良好

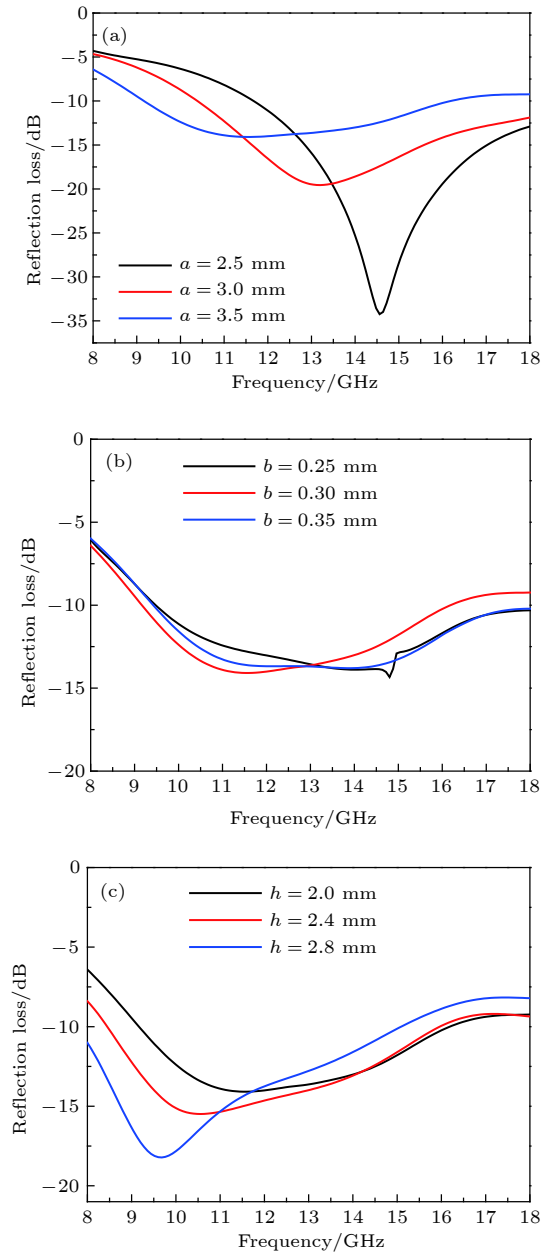


图 5 螺旋环结构参数对双层螺旋环-碳纤维复合吸波体反射损耗的影响 (a) 初始线长; (b) 线宽; (c) 损耗层厚度
Fig. 5. Effects of structure parameters of spiral-ring on the reflection loss of double layers metal spiral-ring with carbon fiber composite microwave absorber: (a) Initial length of line; (b) width of line; (c) thickness of upper dielectric layer.

的阻抗匹配而使入射电磁波能进入复合吸波体. 复合吸波体的等效复介电常数、等效复磁导率在 8—18 GHz 频段具有多个电磁谐振峰: 在 $f_{01} = 9.04$ GHz, $f_{02} = 12.80$ GHz, $f_{03} = 16.48$ GHz 处发生电谐振, 在 $f_{04} = 11.12$ GHz, $f_{05} = 14.64$ GHz 处发生磁谐振复折射率实部在 8—18 GHz 频段存在多个取负值的频段.

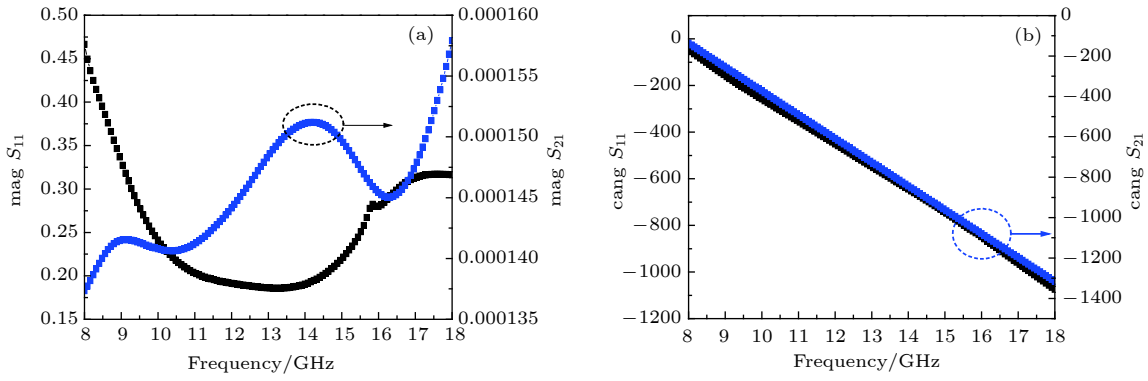


图 6 复合吸波体 S 参数的 (a) 幅值和 (b) 相位的频谱特性

Fig. 6. Spectrum feature of composite microwave absorber's S parameter: (a) Amplitude; (b) phase.

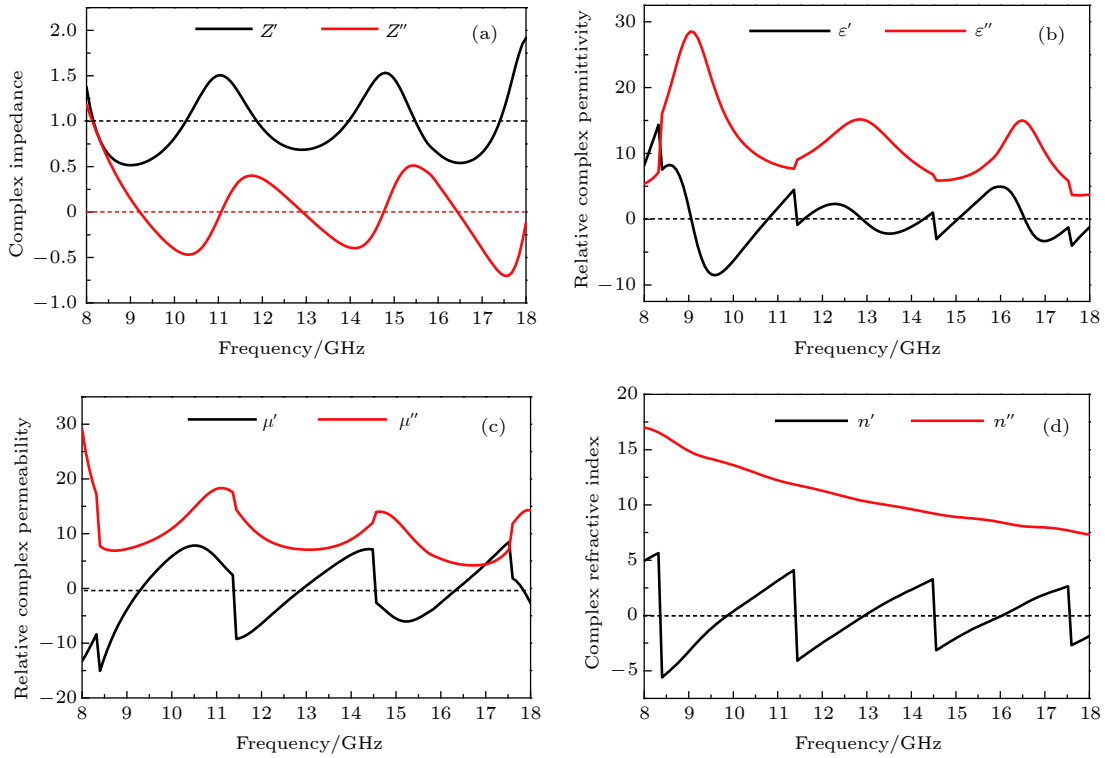


图 7 复合吸波体的 (a) 复阻抗 Z 、(b) 复介电常数、(c) 复磁导率和 (d) 复折射率的频谱特性

Fig. 7. Spectrum feature of composite microwave absorber: (a) Complex impedance Z ; (b) relative complex permittivity; (c) relative complex permeability; (d) complex refractive index.

图 8 为电场强度矢量 E 的分布图, 在低频点 $f_{01} = 9.04$ GHz、中频点 $f_{02} = 12.80$ GHz、高频点 $f_{03} = 16.48$ GHz 三个频点处, 与单一的电损耗吸波材料相比, 螺旋环超材料吸波体的引入使吸波体内部的电场强度矢量 E 的模提高了一个数量级. 从螺旋环超表面复合吸波体等效介电常数频谱曲线可以发现, 引入螺旋环超表面后的复合吸波体相对介电常数虚部显著增强, 8—18 GHz 范围的平均值由 0.96 增加到 11.66, 表明对微波能量的损耗能力显著增强.

进一步提取了复合吸波体在 8—18 GHz 频段两个磁谐振频点 ($f_{04} = 11.12$ GHz, $f_{05} = 14.64$ GHz) 的电流密度 J 矢量分布图. 如图 9 所示, 上、下金属环上的电流密度 J 矢量方向以及下金属环与底部金属接地铜板上的电流密度 J 矢量的方向分别相反, 导致磁谐振发生而吸收微波电磁能量. 在上述谐振频点, 电场强度 (见图 8) 和表面电流密度 (见图 9) 主要分布于红色虚线框所示区域的上下层螺旋线之间, 且随谐振频率升高, 电场和磁场能量分布愈集中.

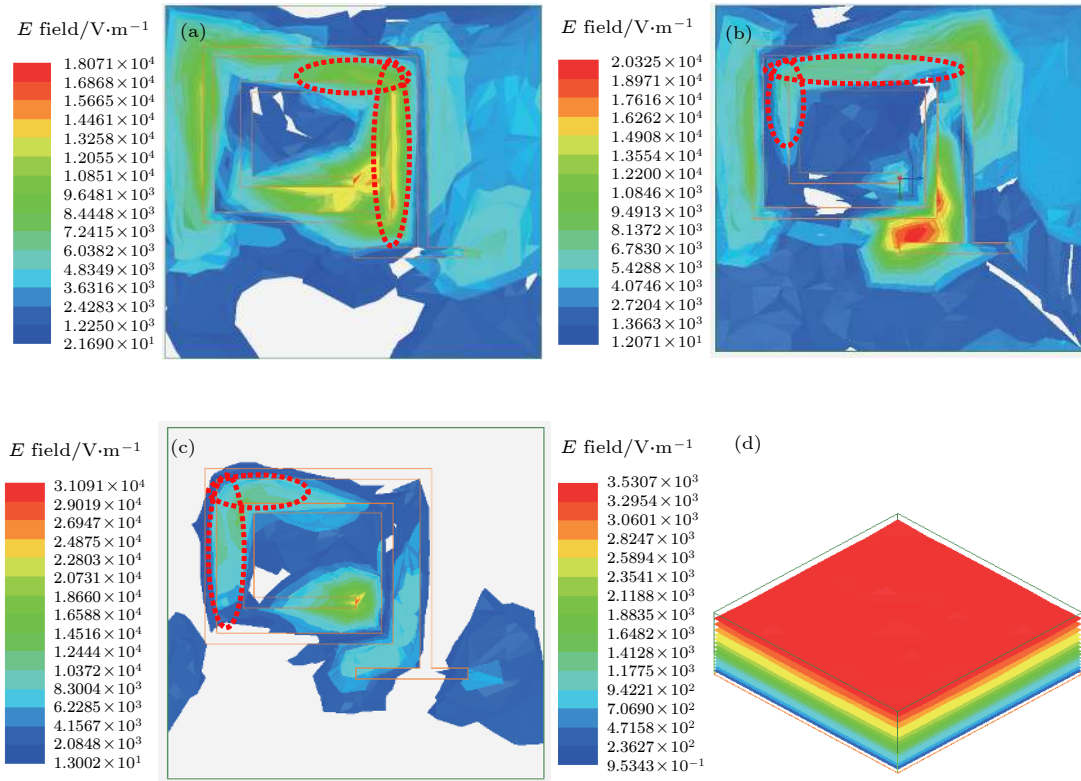


图 8 电场强度 E 幅值分布俯视图 (a) $f_{01} = 9.04$ GHz; (b) $f_{02} = 12.80$ GHz; (c) $f_{03} = 16.48$ GHz; (d) 等厚度有耗介质 ($f_{03} = 16.48$ GHz)

Fig. 8. Top view of electric field amplitude E distribution: (a) $f_{01} = 9.04$ GHz; (b) $f_{02} = 12.80$ GHz; (c) $f_{03} = 16.48$ GHz; (d) dielectric with dielectric loss with the same thickness ($f_{03} = 16.48$ GHz).

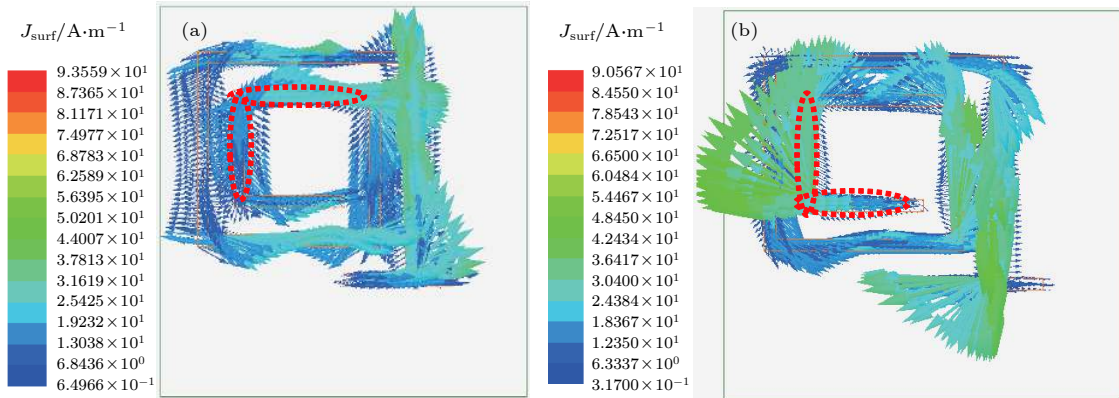


图 9 表面电流密度矢量 J 分布俯视图 (a) $f_{04} = 11.12$ GHz; (b) $f_{05} = 14.64$ GHz

Fig. 9. Top view of distribution for surface current density J : (a) $f_{04} = 11.12$ GHz; (b) $f_{05} = 14.64$ GHz.

上下层螺旋环长直导线的间距 $D = h = 2.1 \times 10^{-3}$ m, 螺旋环导线的截面等效圆半径 $r = \sqrt{\frac{S_{\text{金属线截面}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.01 \times 10^{-3} \cdot b}{\pi}} \approx 3.01 \times 10^{-5}$ m, 满足近似条件: $D \gg r$. 利用等效电路法将上、下金属螺旋环每一组尺寸相同、沿电磁波入射方向正对的两组金属螺旋线等效为平行板电容器和双长直导线电感, 电感 L 为

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r l}{\pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{D}{r} \right) + \frac{1}{4\mu_r} \right], \quad (5)$$

式中 μ_0 是真空磁导率, μ_r 是介质材料的相对磁导率, L 是双长直导线的线长.

值得注意的是, 图 8 和图 9 中电场与磁场在金属线之间的分布是不均匀的, 部分空间没有场的分布; 因此, 实际的等效电容 C_e 与等效电感 L_e 应小于相应的理想值 C, L . 从而提出等效修正因子

$k = k_c \cdot k_l$, 其中 $k_c = \frac{C_c}{C}$, $k_l = \frac{L_c}{L}$. k 值越接近于 1, 说明等效 $L-C$ 电路模型拟合程度越高.

在 $L-C$ 谐振电路中, 谐振频率 f 与电容值 C_c 、电感值 L_c 的关系是

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_c \cdot C_c}}. \quad (6)$$

综合以上各式可以得到第 i 个谐振频率的表达式

$$f_i \approx \frac{c}{2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k\varepsilon_r\mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{b}{h} \cdot \ln\left(\frac{h}{r} + \frac{1}{4\mu_r}\right)}} \cdot \frac{1}{a_i}. \quad (7)$$

利用 (7) 式可得复合吸波体的谐振频点, 取

$c = 3 \times 10^8$ m/s, $b = 0.3$ m, $h = 2.1$ mm, $r \approx 3.01 \times 10^{-2}$ mm, 计算结果如表 1 所列.

根据表 1 的计算结果可得 f_{0i} 与 f_i ($k = 1$) 的变化趋势对比图, 如图 10 所示. $i \in \{1, 2, 3\}$ 时为电谐振频点计算结果对比, 当 $i \in \{4, 5\}$ 时为磁谐振频点计算结果对比. 发现将金属螺旋环结构长度相同、上下排列的两金属线等效为平行板电容器 C 和双长直载流直导线电感器 L , 不同尺寸的金属线构成谐振频率 f 不同的 $L-C$ 振荡电路, 计算的谐振频点与仿真所得的谐振频点较吻合, 说明含螺旋形超表面的复合吸波体的多频点电磁谐振是其宽频吸波性能增强的主要原因.

表 1 复合吸波体谐振频点的等效电路模型计算值

Table 1. Calculation results of resonance frequency of composite microwave absorber.

编号 i	等效电磁参数谐振频点 f_{0i} /GHz	相对介电常数 ε_r	等效电容器/电感线长度 a_i /mm	修正因子 $k = 1$ 时近似谐振频点 f_i /GHz	修正因子 k	f_{0i} 与 f_i 的相对误差
1	9.04	2.216	8.0	9.12	1.02	0.88%
2	12.80	2.054	6.5	11.66	0.83	-8.91%
3	16.48	1.985	5.0	15.42	0.88	-6.43%
4	11.12	2.110	7.0	10.68	0.92	-3.96%
5	14.64	2.009	5.0	15.33	1.10	4.71%

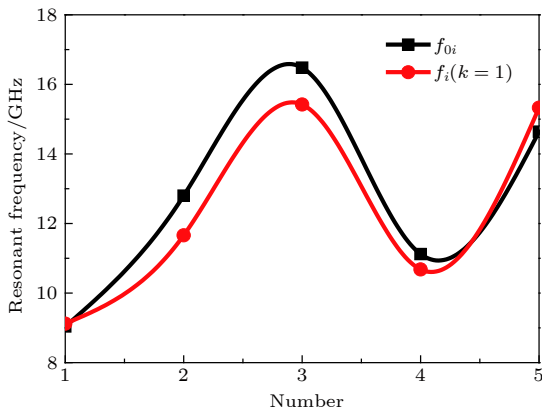


图 10 复合吸波体 f_{0i} 与 f_i ($k = 1$) 的对比

Fig. 10. Comparison of f_{0i} and f_i ($k = 1$).

4 结 论

1) 在双层碳纤维吸波材料中引入双螺旋环超表面层, 得到的复合吸波体吸收峰值达 -14.4 dB, 9.2—18.0 GHz 的反射损耗均优于 -10 dB.

2) 单元结构参数中螺旋环初始线长 a 对复合吸波体的反射率影响显著, 随 a 适当增加, 吸收峰值和吸收带宽均显著增加, 且吸收峰频点向低频移动; 线宽 b 对复合吸波体的反射率影响较小, 适当

增加吸收层厚度 h 能有效增强低频段的反射损耗.

3) 基于 $L-C$ 等效电路模型计算的复合吸波材料在 X 波段和 Ku 波段的多个电、磁谐振频点, 与仿真获得的谐振频点基本相符, 说明多频点电磁谐振是复合吸波体的宽频吸波性能增强的主要原因, 且通过调节螺旋形超材料金属图案的结构参数可以对谐振频点进行调控.

参考文献

- [1] Li J S, Huang H, Zhou Y J, Zhang C Y, Li Z T 2017 *J. Mater. Res.* **32** 1213
- [2] Xiong Y J, Wang Y, Wang Q, Wang C Q, Huang X Z, Zhang F, Zhou D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 084202 (in Chinese) [熊益军, 王岩, 王强, 王春齐, 黄小忠, 张芬, 周丁 2018 *物理学报* **67** 084202]
- [3] Luo H, Feng W L, Liao C W, Deng L W, Liu S, Zhang H B, Xiao P 2018 *J. Appl. Phys.* **123** 104103
- [4] He J, Deng L W, Liu S, Yan S Q, Luo H, Li Y H, He L H, Huang S X 2017 *J. Magn. Magn. Mater.* **444** 49
- [5] He L H, Hu Z W, Deng L W, Huang S X, Liu S, He J, Wen R 2015 *J. Funct. Mater.* **46** 23120 (in Chinese) [贺龙辉, 胡照文, 邓联文, 黄生祥, 刘胜, 贺君, 文瑞 2015 *功能材料* **46** 23120]
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [7] Zhang Y, Duan J P, Zhang W D, Wang W J, Zhag B Z 2016 *Mater. Rev.* **30** 157 (in Chinese) [张勇, 段俊萍, 张文栋, 王万

- 军, 张斌珍 2016 材料导报 **30** 157]
- [8] Gao H T, Wang J J, Xu B C, Li Z, Liu J W 2017 *Mater. Rev.* **31** 15 (in Chinese) [高海涛, 王建江, 许宝才, 李泽, 刘嘉玮 2017 材料导报 **31** 15]
- [9] Song J, Li M H, Dong J F 2017 *Mater. Rev.* **31** 114 (in Chinese) [宋健, 李敏华, 董建峰 2017 材料导报 **31** 114]
- [10] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Lin B Q, Zhou H, Bai P, Gu W, Peng W D, Ma H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087802 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 周航, 柏鹏, 顾巍, 彭卫东, 马华 2011 物理学报 **60** 087802]
- [11] Gao J, Zhang H, Cao X Y, Yang H H, Yang Q, Li W Q 2015 *J. Xidian Univ.* **42** 130 (in Chinese) [高军, 张浩, 曹祥玉, 杨欢欢, 杨群, 李文强 2015 西安电子科技大学学报 **42** 130]
- [12] Liu L Y, Zou H, Li S, Cheng Y Z 2015 *J. Funct. Mater.* **46** 20053 (in Chinese) [刘凌云, 邹浩, 李珊, 程用志 2015 功能材料 **46** 20053]
- [13] Zhan S B, Liu T, Ni S C, Xiao W B, Fu X 2013 *Ordnance Mater. Sci. Engin.* **36** 78 (in Chinese) [占生宝, 刘涛, 倪受春, 肖文标, 付翔 2013 兵器材料科学与工程 **36** 78]
- [14] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, Zheng D H, Gong R Z, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134102 (in Chinese) [程用志, 王莹, 聂彦, 郑栋浩, 龚荣洲, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134102]
- [15] Cheng Y Z, Gong R Z, Nie Y, Wang X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127801
- [16] Zhang H B, Deng L W, Zhou P H, Zhang L, Cheng D M, Chen H Y, Liang D F, Deng L J 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 013903
- [17] Zhao J C, Cheng Y Z 2016 *J. Electron. Mater.* **45** 5033
- [18] Cheng Y Z, He B, Zhao J C, Gong R Z 2017 *J. Electron. Mater.* **46** 1293
- [19] Cheng Y Z, Cheng Z Z, Mao X S, Gong R Z 2017 *Material* **10** 1241
- [20] Luo H, Cheng Y Z 2018 *J. Electron. Mater.* **47** 323
- [21] Sun J B, Liu L Y, Dong G Y, Zhou J 2011 *Opt. Express* **19** 21155
- [22] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, Huang W Q, Li X F, Zhai X 2014 *IEEE Photon. Techn. Lett.* **26** 111
- [23] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, Huang W Q, Li X F, Zhai X 2014 *Appl. Phys. A* **115** 1187
- [24] Cheng Y Z 2015 *Ph. D. Dissertation* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [程用志 2015 博士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
- [25] Li W, Wu T L, Wang W, Guan J G, Zhai P C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 022903
- [26] Guo F, Du H L, Qu S B, Xia S, Xu Z, Zhao J F, Zhang H M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 077801 (in Chinese) [郭飞, 杜红亮, 屈绍波, 夏颂, 徐卓, 赵建峰, 张红梅 2015 物理学报 **64** 077801]
- [27] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2011 *Appl. Phys. A* **105** 49
- [28] Xu Y S, Bie S W, Jiang J J, Xu H B, Wan D, Zhou J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 205202 (in Chinese) [徐永顺, 别少伟, 江建军, 徐海兵, 万东, 周杰 2014 物理学报 **63** 205202]
- [29] Hou Z L, Kong L B, Jin H B, Cao M S, Li X, Qi X 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 017701

Equivalent circuit model and microwave reflection loss mechanism of double-layer spiral-ring metasurface embedded composite microwave absorber*

Li Yu-Han Deng Lian-Wen[†] Luo Heng He Long-Hui He Jun
Xu Yun-Chao Huang Sheng-Xiang

(School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China)

(Received 3 November 2018; revised manuscript received 5 March 2019)

Abstract

High-performance absorbing material can play an important role in electromagnetic compatibility, electromagnetic radiation protection, and anti-detection of special equipment. Combining traditional absorbing material with metamaterial is an important direction for developing absorbing material. The composite absorbing body based on the development of metamaterial has advantages of thin thickness, light weight, strong absorption, and adjustable absorption band, but the super material absorption body composed of single-sized metal pattern elements possesses generally strong absorption only for electromagnetic waves at a certain frequency. It is difficult to meet the requirement for wide frequency absorption in practical applications. In order to broaden the absorption bandwidth of metamaterial, metal spiral-ring metasurface coated short carbon fiber absorber with enhanced microwave absorbing performance is proposed. The absorber is a two-dimensional structure formed by periodically arranging a large number of individual absorber units in the horizontal and vertical direction. In the HFSS simulation software, a “master-slave boundary condition” consisting of “master boundary” and “slave boundary” is provided. Under this boundary condition, the electric field between adjacent boundaries has a phase difference, which can be used to simulate an infinite array. The research results show that the obvious enhancement of both the absorption peak and bandwidth can be observed by embedding the double-layer spiral-ring metasurfaces. The increase of initial length of spiral-rings and thickness of absorber are beneficial to further enhancing the microwave absorption. The reflection loss from 9.2 GHz to 18.0 GHz are under -10 dB (the bandwidth reaches 8.8 GHz), and the peak of S_{11} is -14.4 dB. Besides, we find that the effective electromagnetic parameters and impedance of spiral-ring metasurface embedded microwave absorber present obvious resonant phenomenon at multi-frequencies by calculating S parameters. Furthermore, an equivalent circuit model regarding double-layer spiral-ring embedded absorber is established to reveal the attenuation mechanism of microwave energy. The resonant frequencies derived from this model are well accord with the simulated results. Thereby, the multi-electromagnetic resonant frequencies make the composite microwave absorber combined with double-layer metal spiral-ring and carbon fiber have microwave reflection loss in a wide bandwidth.

Keywords: spiral-ring metasurface, electromagnetic resonant, equivalent circuit model, microwave loss mechanism

PACS: 52.35.Hr, 77.84.Lf, 78.20.Ci

DOI: [10.7498/aps.68.20181960](https://doi.org/10.7498/aps.68.20181960)

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0204600) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51802352).

[†] Corresponding author. E-mail: denglw@csu.edu.cn