

基于非线性电路的双频带脉冲波选择性超表面吸收器设计

钱莹洁¹, 刘海宏¹, 程用志^{1,3,4*}, 罗 辉^{1,3,4}, 陈 浮^{1,3,4}, 李享成^{2,3,4}

(1. 武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北武汉 430081; 2. 武汉科技大学耐火材料与冶金国家重点实验室, 湖北武汉 430081; 3. 武汉科技大学高温电磁材料与结构教育部重点实验室, 湖北武汉 430081; 4. 湖北隆中实验室, 湖北襄阳 441000)

摘 要: 本文提出一种基于非线性电路的双频带脉冲波形选择性超表面吸收器(MetaSurface Absorber, MSA)。设计的双频带MSA单元结构由放置在同一平面上两个形状相同但线宽不同且集成二极管与电阻电容并联的非线性电路的金属方环形谐振器、中间介质层以及金属接地面构成。仿真结果表明,在 $-20\sim 10$ dBm功率范围内,双频带MSA随功率的增加对短脉冲波吸收率先增大再减小。当功率为 -5 dBm时,设计的双频带MSA对脉冲波吸收率在 3.2 GHz和 4.1 GHz分别可达 97% 和 92% ,连续波吸收率只有 28% 和 39% 。另外,MSA吸收率随脉冲宽度的增大逐渐减小。进一步研究表明,该双频带MSA在功率为 -5 dBm的TE模和TM模脉冲波,斜入射角为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内吸收率超过 70% 。还研究了非线性电路中电阻、电容参数对设计的MSA脉冲波和连续波吸收率的影响。本文所提出的双频带脉冲波选择性MSA显示了其在无线通信以及抗电磁干扰领域具有潜在的应用前景。

关键词: 超表面;非线性;波形选择性;双频带;脉冲波;连续波

基金项目: 国家自然科学基金(No.52304410, No.51972242);湖北省自然科学基金创新群体项目(No.2020CFA038);湖北省重点研发项目(No.2020BAA028);湖北省重大项目(功能性涂层材料, No.2023BAA003);湖北省青年拔尖人才培养计划

中图分类号: TN95;TB34

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)06-2067-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230193

Design of a Dual-Band Pulse Wave Selective Metasurface Absorber Based on Nonlinear Circuits

QIAN Ying-jie¹, LIU Hai-hong¹, CHENG Yong-zhi^{1,3,4*}, LUO hui^{1,3,4}, CHEN Fu^{1,3,4}, LI Xiang-cheng^{2,3,4}

(1. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

2. State Key Laboratory of Refractory Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology,

Wuhan, Hubei 430081, China;

3. Key Laboratory of High Temperature Electromagnetic Materials and Structure of MOE,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

4. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang, Hubei 441000, China)

Abstract: In this paper, a dual-band metasurface absorber (MSA) based on nonlinear circuits that can selectively absorb pulse wave in the same frequencies is proposed. The unit-cell of the designed dual-band MSA consists of two metal square-ring shaped resonators with the same shape but different wire width, the middle dielectric layer and the metal ground plane. The simulation results show that the absorptance of the dual-band MSA increases firstly and then decreases with the increase of the input power at $-20\sim 10$ dBm. When the power is at -5 dBm, the absorptance of the designed dual-band MSA of the pulse wave reaches 97% and 92% at 3.2 GHz and 4.1 GHz, respectively, and that of the continuous wave is only 28% and 39% . In addition, the absorptance of the MSA decreases with the increase of pulse width. Further, simulated results indicate that the dual-band MSA can absorb more than 70% of pulse wave with an input power of -5 dBm at a wide incident angle of $0^\circ\sim 60^\circ$ for both TE and TM mode. The effects of resistance, capacitance on the absorptance of the nonlinear circuit MSA for the incident pulse and continuous wave are also studied. The proposed dual-band waveform selective

MSA shows a potential prospect in the fields of wireless communication and anti-electromagnetic interference.

Key words: metasurface; nonlinearity; waveform selectivity; dual-band; pulse wave; continuous wave

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.52304410, No.51972242); Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of Hubei Province (No.2020CFA038); The Key Research and Development Project of Hubei Province (No.2020BAA028); Major Project of Hubei Province (Functional Coating and Materials, No.2023BAA003); Young Top-Notch Talent Cultivation Program of Hubei Province

1 引言

超表面是由超材料发展而来的二维平面人工亚波长周期结构,其单元尺寸远小于工作波长^[1].通过超表面单元结构的巧妙设计可以实现对电磁波的任意操控并呈现出各种奇特的现象,用于制备各种新奇的电磁波调制器件^[1,2].超表面吸波器(MetaSurface Absorber, MSA)是其中一项重要的应用,一般由金属导电图案、中介质层与底层金属接地面构成,呈周期性排列^[3,4].MSA具有厚度薄,重量轻以及易于制备等特点,广受研究人员的关注.MSA不仅可以用来解决电磁兼容以及电磁干扰等问题,还可以处理电磁污染,并且在能量收集和探测等方面有广阔的应用前景^[3].

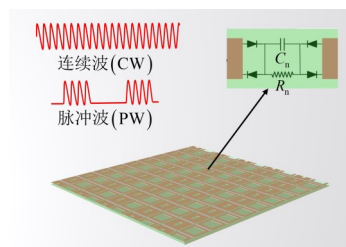
迄今为止,已经报道了许多关于MSAs的研究^[3-6],可以实现各种功能,例如,多频带、超宽带、极化不敏感以及宽角度、频率重构、性能可调等,但很少考虑到日常生活中普遍存在的高功率电磁波,脉冲波以及其它形式的电磁波吸收问题.因此,研究人员针对不同的应用场景与需求从动态可调^[6,7]、功率大小^[8-10]以及电磁波形式^[11,12]、自适应^[13]等方面开展了进一步研究.文献[13]提出了一种新型自调节超表面,通过改变结构单元中变容二极管的偏置电压主动调节谐振频率,从而在抑制高功率表面电流的同时实现宽带吸收.文献[14]提出了一种具有非线性传输特性的高性能能量选择表面能够实现高功率电磁防护.然而,面对当前电子设备终端日益增长而造成的各种不同波形的电磁污染问题,绝大部分MSA显得无能为力.Wakatsuchi等人首次提出了一种新型超表面^[15,16],通过非线性电路的合理设计能够将入射的短脉冲和连续波显著的区分开来.该类非线性电路超表面结构简单,并且无源,无需外加电压控制,易于制备,但只能工作于单频带,面对日益增长的微波频率下的多频谱应用显得无能为力.

为此,本文提出了一种新型的基于非线性电路的双频带脉冲波选择性MSA.该设计利用在同一平面的奇数行和偶数行分别放置形状相同但大小不同的子单元来实现双频带吸收.在环形金属谐振器间隙加载电容式非线性电路实现对脉冲波的选择性吸收.该双频带MSA对脉冲波的吸收率先增大接近100%再减小,对连续波的吸收率不超过40%.当增加脉冲宽度时,脉冲波吸收率呈下降趋势.短脉冲和连续波之间的吸收率

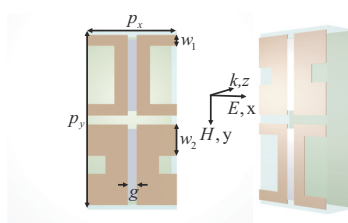
过渡明显.对称性结构单元保证了吸波性能具有良好的极化稳定性,不同极化模式下斜入射角度 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内设计的MSA对脉冲波也能保持良好的吸收特性.

2 MSA设计与分析

本文所提出的双频带MSA周期阵列和基本单元结构如图1所示.图1(a)为设计的双频带MSA二维周期性阵列.基本单元由顶层边长相同而线宽不同的两个环形结构金属谐振器,中介质层与底部金属接地面组合而成,如图1(b).顶层金属方环形谐振器间隙中加载非线性电路.中间层是材料为Rogers RO4350的介质基板,相对介电常数为3.66.金属底板的存在使得其透射率为0.优化后的结构参数 $p_x=18$ mm, $p_y=36$ mm, $w_1=2$ mm, $w_2=6$ mm, $t_s=2$ mm, $t_p=0.017$ mm, $g=2.5$ mm.其中 p_x 和 p_y 表示一个单元结构的周期, w_1 和 w_2 分别表示两个不同方环形金属谐振器的线宽, t_s 是介质基板的厚度, t_p 是金属底板和金属谐振器的厚度, g 表示两个方环形金属谐振器的间隙宽度.



(a) 二维周期阵列及其对应的电容电阻并联的非线性电路



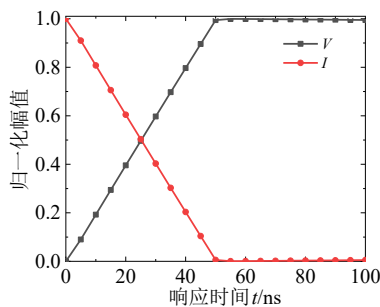
(b) 基本单元结构俯视图与立体视图

图1 设计的电容式非线性电路双频带MSA示意图

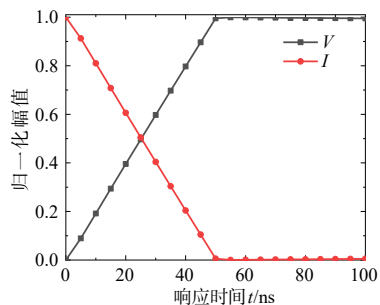
设计的电容式非线性电路双频带MSA基本单元结构如图1(b)所示,在两个方环形谐振器缝隙加载的非线性电路由四个整流二极管中间并联电容电阻构成,在这里设计较大的电阻值 $R_n=100$ k Ω 目的是为了抑制

连续波的吸收,电容值为 $C_n=100$ pF,该电容式非线性电路的弛豫时间为 $\tau=R_n C_n=10$ μ s.

当电磁波入射时,会在顶层每个金属方环形表面贴片上产生感应电流,此时贴片的边缘带正电荷或负电荷. 电流通过二极管从贴片流入电容器. 入射电磁波可以用余弦函数 $\cos(2\pi ft)$ 表示,表面电流由二极管进行整流,整流后变成 $|\cos(2\pi ft)|$,其中, t 表示时间,省略其他振幅、相位等变量. 整流信号功率经过傅里叶变换,产生具有递减幅度的无限频率分量,其中最多的就是零频率或静电场. 四个二极管共同工作时,对静电场的整流进一步增强,效率远超单个二极管的半波整流作用^[11]. 此外,二极管内部连接并联电容电阻,将二极管的整流与电容器的时域响应相结合,如图 2 所示.



(a) 3.2 GHz 时域响应变化曲线



(b) 4.1 GHz 时域响应变化曲线

图 2 双频带 MSA 中并联电路产生的感应电压和电流随响应时间的变化关系曲线

从图 2(a, b) 中可以看出,在两个不同的谐振频点 3.2 GHz 和 4.1 GHz, 当一个 50 ns 的短脉冲入射到设计的 MSA 中时,方环形阵列缝隙中的感应电压逐渐增大,对应的电流强度逐渐减小,持续 50 ns 后,电压和电流分别达到最大值和最小值,并且在下一个短脉冲到来之前保持最大值和最小值不变. 由于整流信号包含频率分量,电容器从一开始的能量存储状态逐渐充电,使得电容器在初始时间段允许电流进入,随着时间增加电流减少^[16]. 值得注意的是,该 MSA 的两个谐振频点

并非固定在 3.2 GHz 和 4.1 GHz. 通过对单元结构中方环形线宽值的合理调整,可以实现该 MSA 在其他频点处对脉冲波形的选择性吸收^[17]. 我们采用商业软件 (ANSYS Electronics Desktop 2020 R2) 对设计 MSA 单元结构进行电磁与电路联合模拟仿真. 首先对 MSA 结构单元按照一定的尺寸进行建模,其几何参数可通过等效电路理论进行合理化设计. 此时为节省仿真所需时间提高效率,采用集总端口代替非线性电路. 再在一定频率范围内计算反射系数,分析其合理性并进行参数优化以获得最终的有效结果. 下一步将电磁模型连接电路模块,进行电路仿真. 电磁模块的 Floquet 端口处有入射和反射端,集总端口连接非线性电路. 电路仿真时,在 2~6 GHz 频率范围内每隔 0.1 GHz 步长进行扫描,脉冲波的波源采用宽度 50 ns 的短脉冲,连续波采用正弦波,两种波形的频率和功率相同. 整流二极管在实际电路模拟仿真时采用 SPICE 模型,具体参数参考文献^[16].

由于底部金属板的存在防止电磁波透过, T 为 0. 吸收率公式可简化为 $A=1-R$. 在电路模拟中,电压和电流在电容作用下动态变化,因此改变功率可实现对该 MSA 吸收率的动态调节. 其中反射率可通过反射功率在时间上积分并除以入射功率在时间上的积分得到,则吸收率的公式如下^[17]:

$$A = 1 - R = 1 - \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ref}} dt / \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{in}} dt \quad (1)$$

3 结果与讨论

3.1 不同功率和波形对双频带 MSA 吸收率的影响

首先考虑 MSA 对入射不同功率的连续波和脉冲波吸收特性的影响,数值模拟结果如图 3 所示. 由图 3(a) 可知,该 MSA 在 3.1 GHz 和 4.2 GHz 附近对脉冲波的吸收率随着输入功率的增大先逐渐增加到一定程度再适当地减小. 由图 3(d) 所示当入射波功率只有 -20 dBm 时,上述两个频率下脉冲波吸收率均不超过 45%,而功率为 -5 dBm 时,吸收率超过 90%. 当功率再次增大到 0 dBm 时,吸收率不再继续增大,反而有所减小,再增大功率时,吸收率持续减小. 这是由于当功率较低时,在方环形谐振器结构诱导产生的电压低于二极管的阈值电压,使其失去整流作用,此时的 MSA 相当于一个普通的导电表面. 同理,当功率较高 (≥ 10 dBm) 时,二极管被击穿失去整流作用,此时非线性电路会出现短路现象,从而导致对脉冲波的吸收降低. 只有当功率在合适的范围内,二极管可以正常工作,起到整流作用,加快入射电磁波转换成静电场,产生两个强吸收峰. 由图 3(b) 和 (e) 可看出,该 MSA 对连续波的吸收性能受功率的影响很小,在 3.2 GHz 和 4.1 GHz 时,

连续波吸收率总是保持在 28% 和 39% 左右. 当功率增大到 10 dBm 时, 连续波吸收率略微增大到 40% 左右. 其他频率时吸收率更低. 这是由于该 MSA 电容器在连续波入射下充满电导致其成为了一个短路的导电表面. 图 3(c) 给出了 MSA 对脉冲波和连续波吸收率的差

值随频率变化的曲线. 可以看出, 当功率为 -20 dBm 时, 脉冲波和连续波的吸收差值较小 (<0.1). 当功率增加时, 该 MSA 对脉冲波和连续波的吸收有较明显的差别, 在 -5 dBm 时, 吸收率差值达到 68% 左右. 由图 3(f) 可知, 该双频带 MSA 具有良好的脉冲波选择性吸收性能.

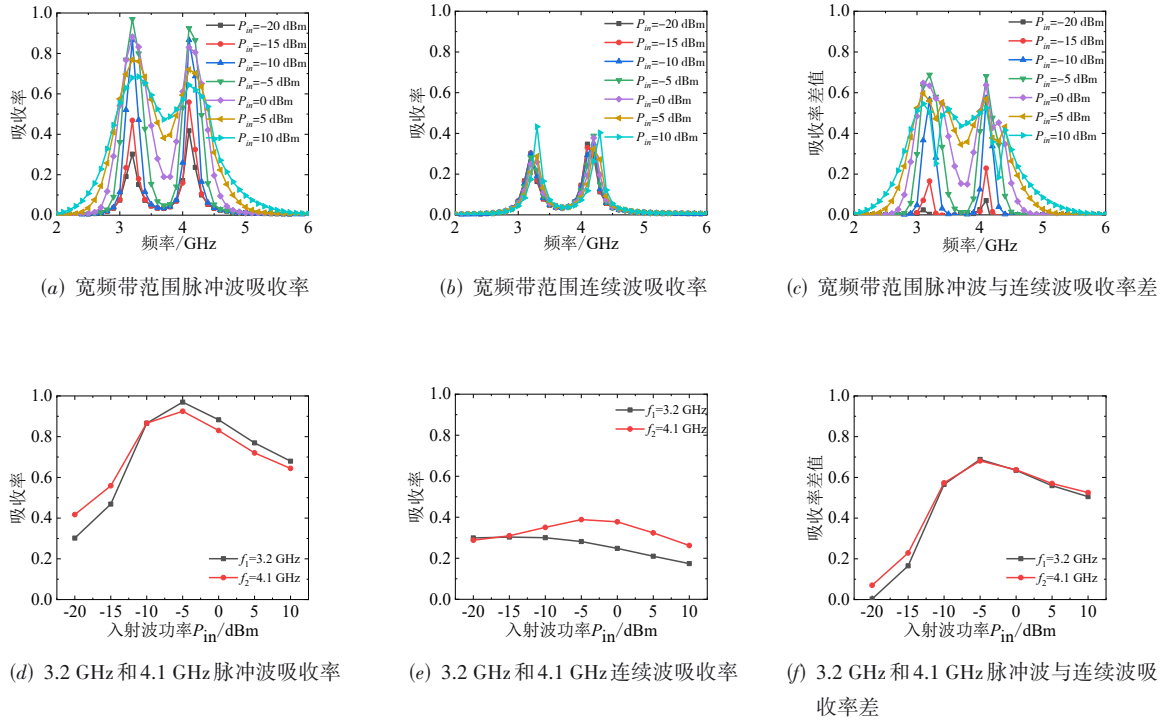


图 3 设计的双频带 MSA 在不同功率脉冲波和连续波波入射时的吸收率曲线

以上结果表明, 设计 MSA 具有良好的双频带脉冲波吸收特性. 然而脉冲波和连续波吸收率之间的差值仅在较窄的功率范围内达到最大. 这是因为动态范围受到二极管电阻性成分变化的限制. 通过在二极管桥的内部增加一个额外的串联电阻可以显著拓展功率范围^[18].

3.2 不同脉冲宽度的脉冲波形对双频带 MSA 吸收率的影响

图 4 可以看出双频带 MSA 在输入功率为 -5 dBm 脉冲波和连续波之间有很明显的转换. 当脉冲宽度为 50 ns 时, 在 3.2 GHz 和 4.1 GHz 处的吸收率为 99% 和 94%. 随后增加脉冲宽度, 吸收率逐渐降低. 吸收曲线在 $10 \mu\text{s}$ 时几乎饱和, 这与使用的电容 C_n 和电阻 R_n 得出的时间常数 $R_n C_n$ 一致. 此结果进一步验证非线性电路双频带 MSA 对特定脉冲波形的选择性吸收特性.

3.3 不同极化模式斜入射波对双频带 MSA 脉冲波吸收率的影响

图 5(a) 讨论了在 TE 模下改变入射角从 $0^\circ \sim 80^\circ$ 变化时输入功率为 -5 dBm 的脉冲波吸收率. 可以看出入

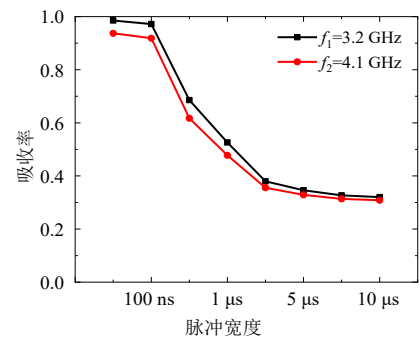


图 4 设计的 MSA 在 3.2 GHz 和 4.1 GHz 对 -5 dBm 功率不同脉冲宽度的脉冲波吸收率

射角度在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内变化时, 双频带 MSA 的脉冲波吸收率随着入射角度的增加略微降低, 但始终保持 70% 以上的吸收率. 随后再增大入射角度 ($>60^\circ$), 吸收率下降明显. 这是由于当 TE 模斜入射时, 磁场强度的水平分量随入射角的增大而减小, 导致耦合减弱, 使 MSA 结构形成的表面电流减小, 从而导致桥接二极管的整流作用减弱, 最终导致脉冲波吸收性能的减小.

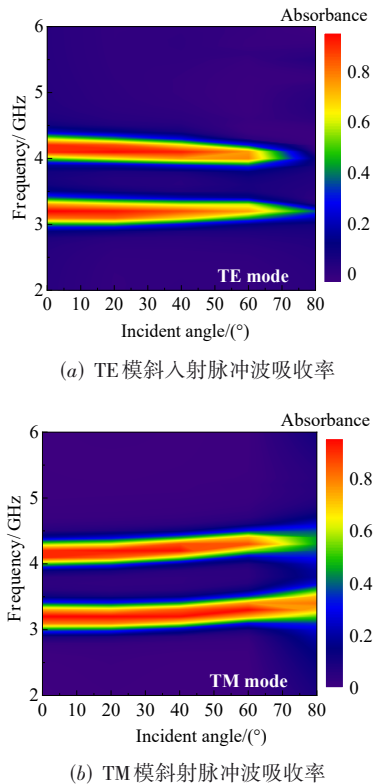


图5 设计的双频带MSA在TE和TM模输入功率为 -5 dBm时脉冲波在不同斜入射角下的吸收率

如图5(b)所示,当TM模式 $\theta < 60^\circ$ 时,双频带MSA吸收率基本保持不变,当 $\theta > 60^\circ$ 时,吸收率随斜 θ 的增大而逐渐减小,并且吸收峰位置向高频发生微小的偏移.这是由于TM模极化波的行为类似TM表面波.此时,由于脉冲波吸收率有所下降,导致脉冲波与连续波吸收率差值不明显,从而使得波形选择性能变差.例如, $\theta = 80^\circ$ 时,虽然在3.2 GHz附近MSA仍保持80%以上的脉冲波吸收性能,但在4.1 GHz附近吸收率下降至45.2%,而连续波吸收率增大,导致该MSA在此频点不能选择性吸收脉冲波.但值得注意的是在一定的宽入射角度($\theta < 60^\circ$)范围内,设计的MSA吸收率总是保持在70%以上.

3.4 双频带MSA非线性电路集总元件参数对脉冲波与连续波吸收特性的影响

图6给出了非线性电路中的不同电阻值 R_n 对脉冲波和连续波吸收率变化曲线.由图6(a)可知,固定电容值 $C_n = 100$ pF,改变 R_n 从 0Ω 到 $10 \text{ M}\Omega$,MSA对脉冲波的吸收率几乎没有影响,在3.2 GHz和4.1 GHz,吸收率分别保持在97%和92%.这是由于入射的脉冲波在MSA中产生的静电场能量主要通过二极管内部的电阻给消耗掉,而不是并联的 R_n .如图6(b),当电阻小于 $1 \text{ k}\Omega$ 时,MSA对连续波吸收率始终保持在90%以上.这是

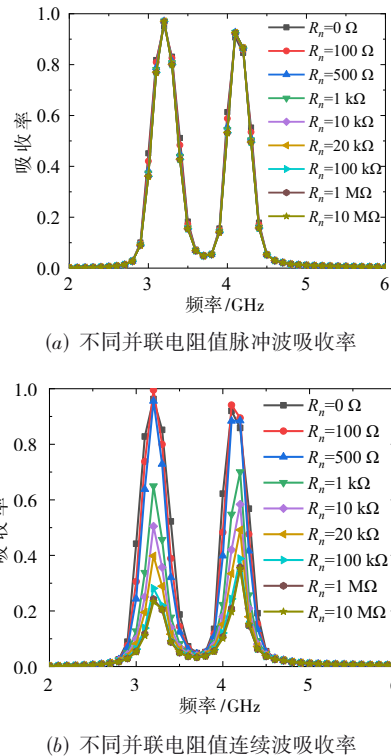
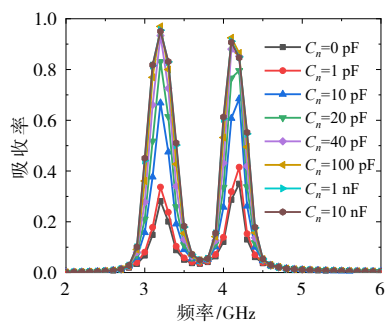


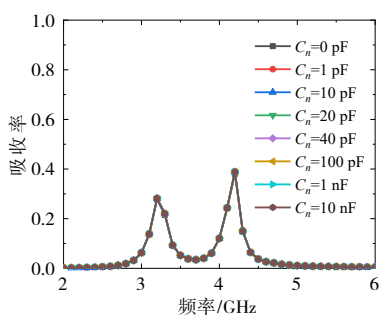
图6 双频带MSA对不同电阻值下短脉冲和连续波吸收率

由于当 R_n 较小时,整个MSA等效成了一个近似的阻抗匹配表面,从而实现了连续波的强吸收特性.当并联的 R_n 值进一步增大时,该MSA对连续波的吸收率逐渐下降,当阻值增大到 $100 \text{ k}\Omega$ 时,吸收率仅有25%.说明该MSA必须要有足够大的电阻值才能抑制其对连续波的吸收,从而能实现在相同频率下对脉冲波具有良好的选择吸收特性.

图7给出非线性电路中并联电容 C_n 值对脉冲波、连续波吸收率的变化曲线.由图7(a)可知,固定电阻值 $R_n = 100 \text{ k}\Omega$,脉冲波吸收率随 C_n 的增大增加到一定值后基本保持不变.当 C_n 小于 1 pF 时,两个谐振频率处的吸收率很低,不到30%.这是由于此时的时间常数 τ 未达到入射波的脉冲宽度,对脉冲波只有少部分的吸收.再增加 C_n 到 100 pF 时, $\tau = 10 \mu\text{s}$,远大于入射短脉冲宽度,此时吸收率达到最大.再增加 C_n 值时,该双频带MSA对脉冲波吸收率基本保持不变,由于时间常数 τ 仍超过入射脉冲宽度,所以依旧有很好的脉冲波吸收性能.如图7(b),改变 C_n 值,双频带MSA对连续波的吸收率几乎不变,且在谐振频点3.2 GHz和4.1 GHz处分别为28%和39%.这是由于入射的连续波在环形结构中诱导的表面电流对该类型MSA中桥接的二极管进行持续的充电,使得整个电路处于高阻态,从而使其对连续波的吸收能力减弱.



(a) 不同并联电容值时的脉冲波吸收率



(b) 不同并联电容值时的连续波吸收率

图7 双频带MSA对不同电容值下短脉冲和连续波吸收

4 结论

本文提出了一种基于非线性电路的双频带MSA,可以在两个相同频率下实现对特定脉冲波形的选择性吸收.该双频带MSA结构简单,通过在平面周期性表面的奇数行和偶数行分别放置金属方环形线宽尺寸不同的子单元,解决传统MSA单一工作频带的问题,实现在不同输入功率作用下的双频带脉冲波选择性吸收.结果表明,在 $-20\sim 10$ dBm功率范围内,双频带MSA对脉冲波的吸收率随功率的增大先增加后减少,而对连续波的吸收显著降低.进一步的结果表明该双频带MSA具有宽入射角度脉冲波吸收性能.增大双频带MSA电阻 R_n 值使得其连续波吸收率下降.增大并联电容 C_n 值使得该双频带MSA对脉冲波的吸收率提高.另外,合适的时间常数 $R_n C_n$ 对该双频带MSA的选择性吸收性能至关重要.我们设计的非线性电路MSA脉冲波形选择性吸收特性使我们能够根据不同波形(不同脉冲宽度)控制两个或多个相同频率的EM特性,在多频谱范围内创建许多微波应用,例如波形选择天线和无线通信^[19,20].

参考文献

[1] HE Q, SUN S L, XIAO S Y, et al. High-efficiency metasurfaces: Principles, realizations, and applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800415.

[2] 罗宇轩,程用志,陈浮,等.基于沙漏形人工表面等离子体和交指电容结构的双频滤波器设计[J].*物理学报*, 2023, 72(4): 044101.
LUO Y X, CHENG Y Z, CHEN F, et al. Dual-band filter design based on hourglass-shaped spoof surface plasmon polaritons and interdigital capacitor structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(4): 044101. (in Chinese)

[3] YOUSAF A, MURTAZA M, WAKEEL A, et al. A highly efficient low-profile tetra-band metasurface absorber for X, Ku, and K band applications[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2022, 154: 154329.

[4] WANG Q, CHENG Y Z. Compact and low-frequency broadband microwave metamaterial absorber based on meander wire structure loaded resistors[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2020, 120: 153198.

[5] CHENG Y Z, LUO H, CHEN F. Broadband metamaterial microwave absorber based on asymmetric sectional resonator structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(21): 214902.

[6] LI Y, LIN J, GUO H J, et al. A tunable metasurface with switchable functionalities: From perfect transparency to perfect absorption[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(6): 1901548.

[7] WU Z H, ZHAO J M, CHEN K, et al. An active metamaterial absorber with ultrawideband continuous tunability[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 25290-25295.

[8] TANIKAWA M, USHIKOSHI D, ASANO K, et al. Metasurface sensing difference in waveforms at the same frequency with reduced power level[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 14283.

[9] HU N, WANG K, ZHANG J H, et al. Design of ultrawideband energy-selective surface for high-power microwave protection[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(4): 669-673.

[10] KIM S, WAKATSUCHI H, RUSHTON J J, et al. Switchable nonlinear metasurfaces for absorbing high power surface waves[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(4): 041903.

[11] ASANO K, NAKASHA T, WAKATSUCHI H. Simplified equivalent circuit approach for designing time-domain responses of waveform-selective metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116: 171603.

[12] WAKATSUCHI H, RUSHTON J J, LEE J, et al. Experimental demonstration of nonlinear waveform-dependent metasurface absorber with pulsed signals[J]. *Electronics*

Letters, 2013, 49(24): 1530-1531.

- [13] KIM S, LI A, LEE J, et al. Active self-tuning metasurface with enhanced absorbing frequency range for suppression of high-power surface currents[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(5): 2759-2767.
- [14] ZHOU L, LIU L L, SHEN Z X. High-performance energy selective surface based on the double-resonance concept[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(11): 7658-7666.
- [15] WAKATSUCHI H, KIM S, RUSHTON J J, et al. Waveform-dependent absorbing metasurfaces[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(24): 245501.
- [16] WAKATSUCHI H. Waveform-selective metasurfaces with free-space wave pulses at the same frequency[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(16): 164904.
- [17] 程用志, 钱莹洁, 李志仁, 等. 基于环形谐振器集成非线性电路的脉冲波超表面吸收器设计[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(10): 3812-3820.
- CHENG Y Z, QIAN Y J, LI Z R, et al. The design of metasurface absorber based on the ring-shaped resonator lumped with nonlinear circuit for a pulse wave[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(10): 3812-3820. (in Chinese)
- [18] IMAI S, HOMMA H, TAKIMOTO K, et al. Design and analysis for the SPICE parameters of waveform-selective metasurfaces varying with the incident pulse width at a constant oscillation frequency[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 7202.
- [19] USHIKOSHI D, TANIKAWA M, ASANO K, et al. Experimental demonstration of waveform-selective metasurface varying wireless communication characteristics at the same frequency band of 2.4GHz[J]. Electronics Letters, 2020, 56(3): 160-162.
- [20] USHIKOSHI D, HIGASHIURA R, TACHI K, et al. Pulse-driven self-reconfigurable meta-antennas[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 633.



刘海宏 男, 2000年4月生于湖北省襄阳市. 现为武汉科技大学硕士研究生. 主要研究方向为电磁超材料滤波器.

E-mail: 1106832161@qq.com



程用志 男, 1984年5月出生. 现为武汉科技大学信息科学与工程学院教授、硕士生导师. 研究方向为微波技术与天线、超表面/超材料电磁波调控技术与应用等.

E-mail: chengyz@wust.edu.cn

作者简介



钱莹洁 女, 1997年4月出生于安徽省铜陵市. 现为武汉科技大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为电磁超表面吸波器.

E-mail: 850576766@qq.com