

# 基于等离子体超材料的超宽带吸波体设计

杨靖<sup>1\*\*</sup>, 章海锋<sup>1,2,3\*</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 刘佳轩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京邮电大学电子与光学工程学院 微电子学院, 江苏 南京 210023;

<sup>2</sup>南京邮电大学电子科学与技术国家级实验教学示范中心, 江苏 南京 210023;

<sup>3</sup>南京邮电大学信息电子技术国家级虚拟仿真实验教学中心, 江苏 南京 210023

**摘要** 为了在横电(TE)波下获得可调谐的超宽带吸收频谱以及在横磁(TM)波下获得较高的反射率,利用等离子体超材料和集总电阻设计了一种电磁吸波体,并采用全波仿真法对其吸收率、反射率、表面电场图、表面电流图和能量损耗图进行了计算,讨论了其结构参数及电阻对吸收率和反射率的影响。研究表明,通过激励不同的等离子体谐振区域,不但能改善吸收特性,还能获得可调谐的吸收频谱;设计的电磁吸波体不仅能实现对TE波的超宽带吸收,还能实现TE波和TM波的极化分离。

**关键词** 材料; 等离子体超材料; 电磁吸波体; 集总电阻; 可调谐特性

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.091602

## Ultra-Broadband Absorber Based on Plasma Metamaterials

Yang Jing<sup>1\*\*</sup>, Zhang Haifeng<sup>1,2,3\*</sup>, Zhang Hao<sup>1</sup>, Liu Jiaxuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

<sup>2</sup> National Experimental Teaching Demonstration Center of Electronic Science and Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

<sup>3</sup> National Virtual Simulation Experimental Teaching Center of Information and Electronic Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

**Abstract** In order to obtain a tunable ultra-broadband absorption spectrum under transverse electric (TE) waves and a high reflectivity under transverse magnetic (TM) waves, an electromagnetic absorber is designed based on the plasma metamaterials and the lumped resistors. Its absorptivity, reflectivity, surface electric field diagram, surface current diagram and energy loss diagram are calculated by the full wave simulation method. The influences of its structural parameters and resistance on the absorptivity and reflectivity are investigated. The research results show that, by means of the excitation for different plasma resonance ranges, not only the absorption property is improved, but also the tunable absorption spectrum can be obtained. As for the designed electromagnetic absorber, not only the ultra-broadband absorption of TE waves can be realized, but also the polarization splitting of TE and TM waves can be achieved.

**Key words** materials; plasma metamaterials; electromagnetic absorber; lumped resistance; tunable properties

**OCIS codes** 160.3380; 290.4210; 300.1030; 250.2080; 140.3600

## 1 引言

随着科学技术的发展,电磁超材料逐渐成为业界的研究热点之一。基于其新颖的物理特性,电磁

超材料可用来设计一些特殊的微波器件<sup>[1]</sup>和具有特定功能的超表面材料<sup>[2-3]</sup>,其中一个重要应用是电磁吸波体。电磁吸波体<sup>[4-5]</sup>是一种能将入射的电磁波大部分吸收并消耗的功能材料,其呈现出周期性分

**收稿日期:** 2018-03-05; **修回日期:** 2018-03-22; **录用日期:** 2018-04-04

**基金项目:** 中国博士后特优资助项目(2016T90455)、中国博士后面项目(2015M581790)、江苏省博士后面项目(1501016A)、南京邮电大学引进人才科研启动基金(高水平师资)(NY217131)

\* **E-mail:** hanlor@163.com; \*\* **E-mail:** 2370261972@qq.com

布的结构。作为电磁超材料的一种,它具有两个特点:1)入射波的反射率小,绝大部分入射波能够进入到吸波层的内部;2)入射波能量被损耗<sup>[6]</sup>,即电磁波因耗能器件进行能量转变而被消耗。近年来,出现了很多新型的吸波材料且其应用范围广泛,如隐身吸波材料<sup>[7]</sup>、磁性吸波材料<sup>[8]</sup>、吸波材料与天线的应用<sup>[9]</sup>、碳基吸波材料等<sup>[10]</sup>。

Pitarke等<sup>[11]</sup>研究了金属表面的集体电子激发过程,即表面等离子体激元和多极等离子体激元等。雷建国等<sup>[12]</sup>总结了等离子体激元的新应用,发现利用等离子体激元可以产生很多新材料和新器件。Landy等<sup>[13-14]</sup>设计了一种基于电磁超材料理论的电磁谐振吸波体,并在太赫兹频带设计了一种极化不敏感的电磁吸波体,其最终仿真吸收率为95%,实验测得其在频点1.145 THz处的吸收率为77%。Mias等<sup>[15]</sup>将变容二极管引入高阻抗表面,通过改变相邻电阻贴片之间的电容大小来调节谐振频率。Gu等<sup>[16]</sup>通过在金属谐振环上同时加载电阻和电容集总元件,设计了一种平面电磁吸波体,其在1.57~3.07 GHz频带内具有强吸收性质。Cheng等<sup>[17]</sup>设计了一款具有分裂硬币结构的基于集总原件的宽带超材料吸波器,其介质基板材料为常用的FR-4,其吸收率大于90%的带宽达到了1.5 GHz,相对带宽达到了50%,实物测试结果与仿真结果接近。白正元等<sup>[18]</sup>设计了一种新型超薄微波超材料吸波器,以两个相同的金属圆环作为双层复合谐振结构单元,并进行了实验验证,在实现近完美电磁吸收的同时,整体结构保持了低占空比特性。周永光等<sup>[19]</sup>设计了一种加载电阻的开口圆环结构宽频带吸波体,其吸收率大于90%的带宽达到了18.47 GHz,实现了超宽带吸收。

随着电磁吸波体研究的深入,目前研究热点主要集中在如何设计和实现吸收带宽可调谐的电磁吸波体<sup>[20-21]</sup>。展宽吸收带宽的主要技术有加载集总元件<sup>[22]</sup>、多层堆叠结构<sup>[23]</sup>、多单元结构<sup>[24]</sup>等。基于多层堆叠结构与多单元结构的设计方法相对比较复杂。

一般的吸波体在横电(TE)波下实现高吸收率,但很难在横磁(TM)波下实现高的反射率,且其吸收带宽一般不具有可调谐性。为了实现吸收带宽的可调谐性,本文设计了一种能工作在微波频段的基于等离子体超材料的电磁吸波体。固态等离子体在未激励时一般表现为介质特性,而激励时具有类似金属的导电特点<sup>[25-27]</sup>。因此,固态等离子体与其他介质结合能构成等离子体超材料。本文用等离子体超材料构成谐振结构,并通过可编程的逻辑阵列控制等离子体超材料的

激励区域及其激励状态,以实现电磁吸波体工作频段的动态调控。在激励区域选择合适的情况下,设计的电磁吸波体的吸收频域可以有效覆盖整个S波段(2~4 GHz),并可以拓展至L波段(1~2 GHz)和C波段(4~8 GHz),且在TE波的吸收频域内, TM波具有很高的反射率,几乎可以被100%反射。该电磁吸波体可以很好地极化分离入射电磁波。

## 2 单元设计

“7”形的吸波体如图1所示,可以看出,该吸波体结构的单元底层为金属铜板(电导率 $s = 5.8 \times 10^7$  s/m),中间层为无损耗的薄层色谱分析(TLC)基片(相对介电常数 $\epsilon_r = 3.2$ ),由等离子体超材料构成的一个“7”形的谐振结构(即谐振单元1)及两侧两个正三角形与两个截断的“回”字形谐振结构(谐振单元2、3)组成上层贴片。在谐振单元1中间加载一个电阻元件, $R_1 = 190 \Omega$ ;在谐振单元2、3中间加载另一个电阻元件, $R_2 = 500 \Omega$ 。TLC基片的厚度 $h = 12.7$  mm,等离子体超材料层和金属铜板的厚度 $w$ 均为0.1 mm。谐振单元1由一个梯形和一个矩形结构组成,梯形结构的高 $a = 18$  mm,下底边长 $k = 2.4$  mm,上底边长 $k_1 = 1.2$  mm;矩形结构的长 $b = 4.8$  mm,宽 $c = 2.4$  mm。左边正三角形的边长 $d = 6.35$  mm,右边正三角形的边长 $d_1 = 4.08$  mm。左边截断的“回”字形结构的长度 $f = 11.475$  mm,右边截断的“回”字形结构的长度 $f_1 = 7.377$  mm。上层等离子体超材料的介电常数由Drude模型描述:

$$\epsilon_p(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\omega_c}, \quad (1)$$

式中 $\omega$ 为圆频率,等离子频率 $\omega_p = 2.9 \times 10^{14}$  rad/s,碰撞频率 $\omega_c = 1.65 \times 10^{13}$  s<sup>-1</sup>。电磁波沿着一 $z$ 方向垂直入射,TE波的电场平行于 $y$ 轴,磁场平行 $x$ 轴;TM波的磁场平行于 $y$ 轴,电场平行于 $x$ 轴。吸波体的吸收率 $A(\omega)$ 可表示为

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

式中 $R(\omega)$ 为反射率, $T(\omega)$ 为透射率。吸波体的底层为金属铜板, $T(\omega) = 0$ ,故其吸收率为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega). \quad (3)$$

## 3 分析与讨论

图2所示为只激励谐振单元1时加载电阻和未加载电阻条件下TE波的吸收频谱以及激励全部等离子体谐振单元时TE波的吸收频谱和TM波的反

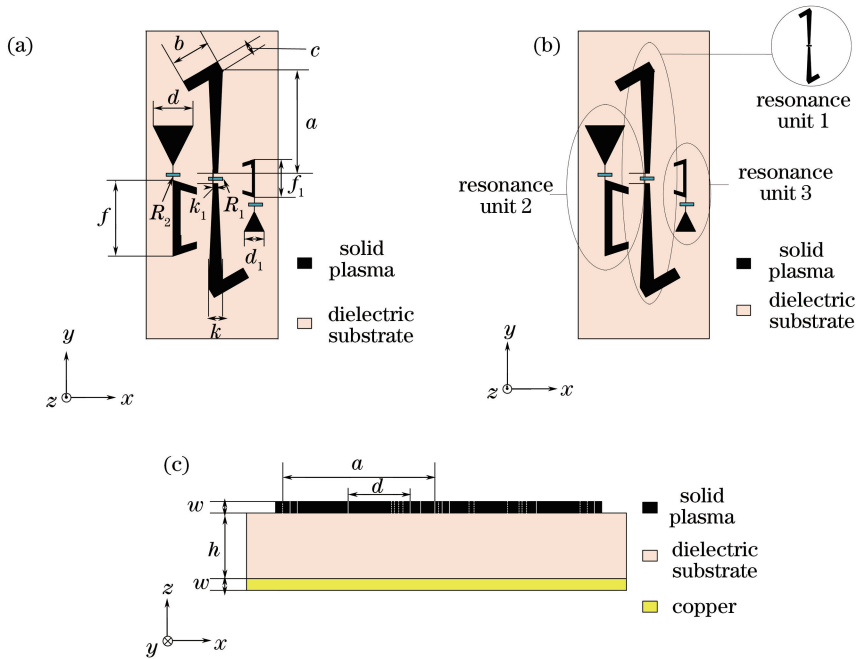


图1 吸波体的结构单元示意图。(a)正视图;(b)谐振单元示意图;(c)侧视图

Fig. 1 Schematic of unit cell for proposed absorber. (a) Front view; (b) schematic of resonance cell; (c) side view

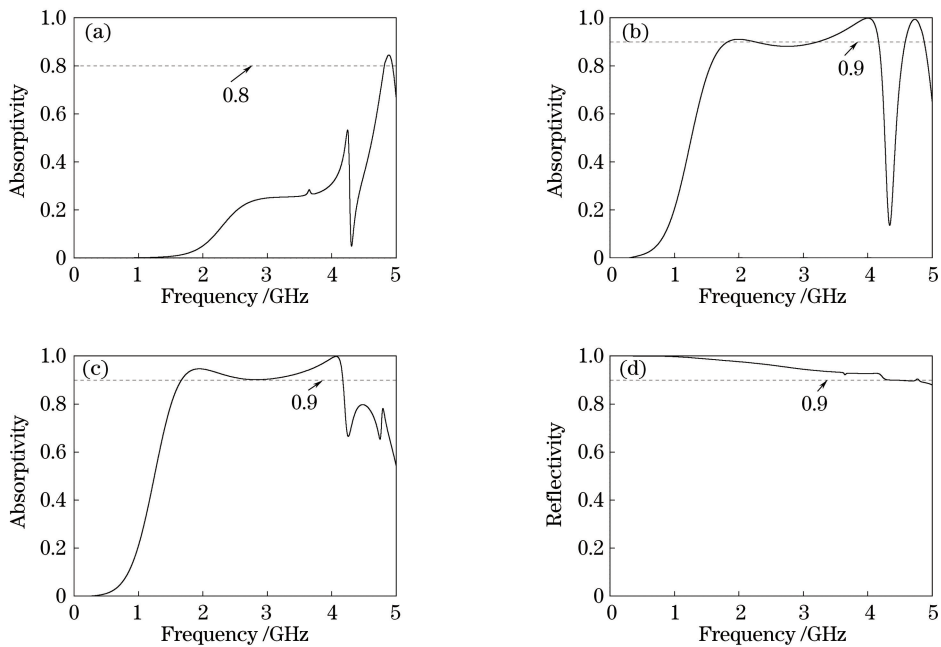


图2 吸波体的吸收和反射频谱。(a)只有谐振单元1被激励且未加载电阻时TE波的吸收频谱;  
(b)只有谐振单元1被激励且加载电阻时TE波的吸收频谱;(c)所有谐振单元和电阻都被激励时TE波的吸收频谱;  
(d)所有谐振单元被激励时TM波的反射频谱

Fig. 2 Absorption and reflection spectra of proposed absorber. (a) Absorption spectrum of TE wave when only resonance unit 1 is excited and resistance is not loaded; (b) absorption spectrum of TE wave when only resonance unit 1 is excited and resistance is loaded; (c) absorption spectrum of TE wave when all resonance units and resistance are excited; (d) reflection spectrum of TM wave when all resonance units are excited

射频谱。如图2(a)所示,只有谐振单元1被激励且中间未加载电阻时,吸收谱中4.8895 GHz处的吸

收率较高,为84.54%。如图2(b)所示,只有谐振单元1被激励且中间加载电阻时,吸收谱中存在三个

吸收率较高的频点,分别位于 1.9801, 4.0041, 4.7355 GHz, 吸收率分别为 91.06%、99.87%、99.39%;此时吸波体的吸收频段为 1.9965~3.9105 GHz,但在 2.2527~3.2285 GHz 之间的吸收效果较差,其吸收率未达到 90%。如图 2(c)、(d)所示,所有的等离子体谐振单元都被激励时,TE 波的吸收谱中存在两个吸收率较高的频点,分别位于 1.9361 GHz 和 4.0701 GHz,吸收率分别为 94.66% 和 99.84%,在频带 1.6687~4.1733 GHz(带宽为 2.5046 GHz)内 TE 波的反射率低于 -10 dB,吸收率高于 90%,相对带宽达到了 85.7%,且在频带 0~4.3671 GHz 内,TM 波的反射率高于 90%。因此,可以通过加载集总元件的方式实现吸波体 TE 波的超宽带吸收,通过在主谐振单元旁设置较小的谐振单元还能实现 TE 波和 TM 波的极化分离。

为了研究该吸波体的物理机制,解释该谐振单元的吸收机理,图 3 给出了该吸波体在 1.9021 GHz、4.0715 GHz 处介质表面和底层反射板的电场分布图及底层反射板上的电流分布图。如图 3(a)所示,电场主要集中在谐振单元 1 的中间即集总电阻旁(如“○”所示),等效为谐振单元 1 中间存在一个正电荷。图 3(c)所示为 1.9021 GHz 处底层金属铜板上的电流分布图,箭头方向为电流流向,可以看出,底面金属反射板上的电流流向沿  $y$  轴正方向,等效为底层金属铜板中间存在一个负电荷。如图 3(e)所示,底层金属板上的电场主要集中在介质基板的两边(“ $F_1$ ”、“ $F_2$ ”),等效于该处存在两个正电荷,而在金属板中间(“ $F_5$ ”)等效存在一个负电荷。工作时该吸波体的上表面和底面反射板可以等效为一个电偶极子,且介质基板上下表面的电流流向相反,故该吸波体的吸收效果主要源于磁谐振。由图 3(b)可知,集中在谐振单元 1 中间(“○”)的电场与 1.9012 GHz 处的电场类似,均相对较强。如图 3(d)所示,电流由单元结构两边向中间汇聚,等效于底层金属板中间存在一个负电荷。如图 3(f)所示,底层金属板上的电场主要集中在“ $F_3$ ”、“ $F_4$ ”处,等效于该处存在两个正电荷,而金属板中间(“ $F_6$ ”)存在一个负电荷。故该吸波体谐振单元的表面和底面反射板可以等效为一个电偶极子,在电磁波入射时会产生磁谐振。综上所述,该吸波体的吸收效果主要源于磁谐振,这种磁谐振会与外部入射的电磁波耦合,损耗入射电磁波的能量,实现该吸波体在这两个频点的有效吸收。

为了进一步研究该吸波体的能量损耗机理,

图 4 给出了该吸波体在 1.9021 GHz、4.0715 GHz 处介质表面的能量损耗图及在 1.9021 GHz 处介质内部能量损耗图。可以看出,该吸波体介质基板的损耗角正切为 0,在介质内部没有能量损耗,入射电磁波的能量主要是由加载到谐振单元上的集总电阻的欧姆损耗造成的。该吸波体上下层间产生磁谐振,感应电流通过加载到谐振单元上的集总电阻产生欧姆损耗,这是该吸波体对电磁波的主要吸收机制。故可以通过加载集总电阻的方式实现该吸波体的超宽带吸收。

为了进一步研究该吸波体的特性,研究了参数  $a$  对吸波体 TE 波吸收频谱的影响,结果如图 5(a)所示,可以看出,当  $a=15$  mm 时,该吸波体吸收率高于 90%的工作频段为 1.6687~4.1733 GHz( $f_1 \sim f_2$ ),相对带宽达到了 85.7%。当  $a=14$  mm 时,该吸波体吸收率高于 90%的工作频段为 1.8324~4.1581 GHz,但相对带宽仅为 77.6%。当  $a=16$  mm 时,该吸波体存在两个吸收峰,分别位于 4.2295 GHz、4.6861 GHz,吸收率分别为 98.58% 和 97.67%;吸收率高于 90%时的吸收频段为 4.1978~4.2633 GHz 和 4.5496~4.8426 GHz。故改变参数  $a$  的值可以调节该吸波体的工作带宽。图 5(b)所示为参数  $e$ (上下两个“7”型结构间的距离)的值为 0.4, 1, 1.6 mm 时 TE 波的吸收频谱,可以看出,当  $e=1.6$  mm 时,该吸波体吸收率高于 90%的工作频段为 1.7711~4.1549 GHz,相对带宽为 80.4%。当  $e=1$  mm 时,该吸波体吸收率高于 90%的工作频段为 1.6916~4.1692 GHz,相对带宽为 84.5%。当  $e=0.4$  mm 时,该吸波体吸收率高于 90%的工作频段为 1.6687~4.1733 GHz,相对带宽为 85.7%。随着  $e$  值的减小,该吸波体吸收率在 90%以上的相对带宽逐渐增大,故改变参数  $e$  的值可以调节该吸波体的工作带宽。

图 5(c)所示为不同参数  $a$  值下 TM 波的反射频谱,可以看出,当  $a=15$  mm 时,该吸波体在 0~4.3671 GHz 频段内的反射率高于 90%;当  $a=16$  mm 时,该吸波体在 0~4.0865 GHz 频段内的反射率高于 90%;当  $a=14$  mm 时,该吸波体在 0~3.7399 GHz 和 3.9261~4.8362 GHz 频段内的反射率高于 90%。故通过改变参数  $a$  的值,在 TE 波的工作频域内,该吸波体在 TM 波下仍然有较好的反射特性。图 5(d)所示为不同参数  $e$  值下 TM 波的吸收频谱。当  $e=0.4$  mm 时,该吸波体在 0~4.3671 GHz 频段内的反射率高于 90%;当  $e=$



1 mm时,该吸波体在  $0 \sim 4.4646$  GHz 频段内的反射率高于 90%;当  $e = 1.6$  mm 时,该吸波体在  $0 \sim 4.7191$  GHz 内的反射率高于 90%。故通过改变参

数  $e$  的值,在 TE 波的工作频域内,该吸波体在 TM 波下仍然有较好的反射特性,且反射特性比较稳定。

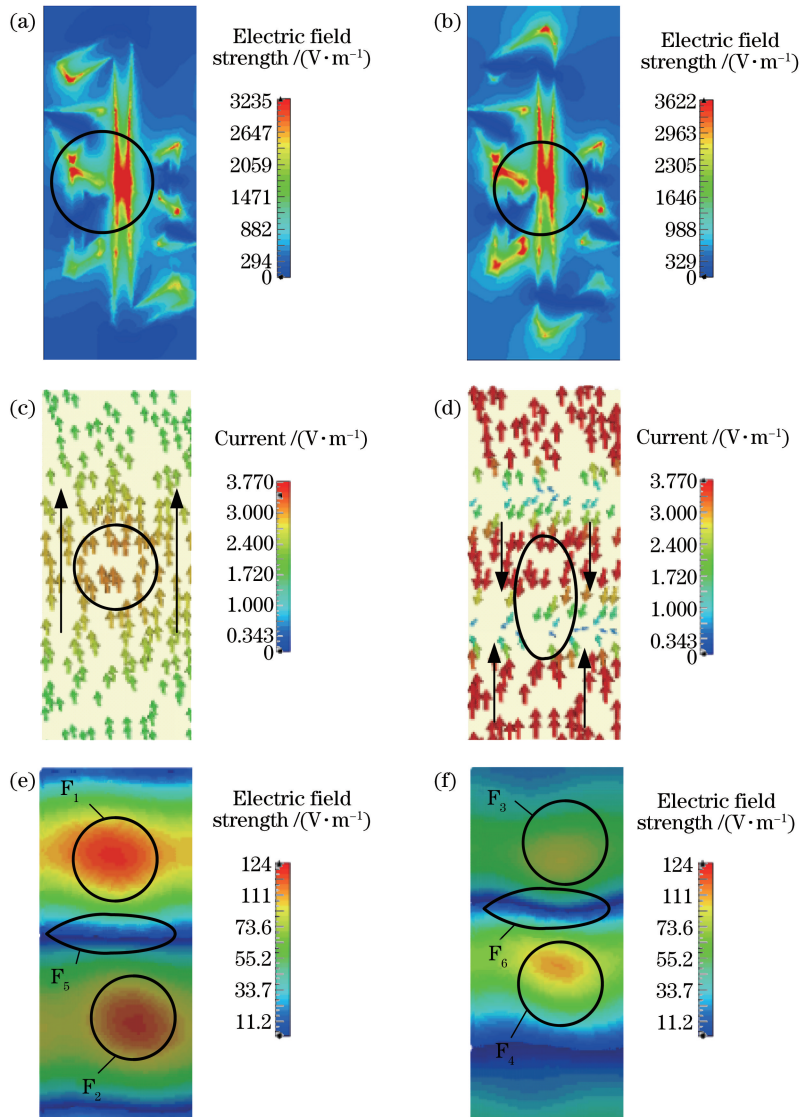


图3 吸波体的电场和表面电流分布图。(a)  $f' = 1.9012$  GHz 和(b)  $f' = 4.0715$  GHz 处介质表面的电场分布;  
(c)  $f' = 1.9012$  GHz 和(d)  $f' = 4.0715$  GHz 处底层反射板的表面电流分布;  
(e)  $f' = 1.9012$  GHz 和(f)  $f' = 4.0715$  GHz 处底层反射板的电场分布

Fig. 3 Electric field and surface current distributions of proposed absorber. Electric field distributions on absorber surface when (a)  $f' = 1.9012$  GHz and (b)  $f' = 4.0715$  GHz; surface current distributions at underlying reflector plate when (c)  $f' = 1.9012$  GHz and (d)  $f' = 4.0715$  GHz; electric field distributions at underlying reflector plate when (e)  $f' = 1.9012$  GHz and (f)  $f' = 4.0715$  GHz

综上所述,只要人为改变等离子体谐振结构的激励区域就可以得到可调谐的吸收频谱,通过相应的参数优化就能拓展该吸波体在 TE 波的工作频域,且该吸波体对 TM 波有较好的稳定的反射特性,故该吸波体可以实现 TE 波和 TM 波的极化分离。

为了说明电阻对该吸波体吸收效果的影响,

图 5(e)、(f) 分别给出了其他参数不变的情况下,  $R_1 = 90, 190, 290 \Omega$  和  $R_2 = 300, 400, 500, 600 \Omega$  时的吸收频谱。当  $R_1 = 190 \Omega$  时,该吸波体吸收率高于 90% 的工作频域为  $1.6687 \sim 4.1733$  GHz,相对带宽为 85.7%。当  $R_1 = 90 \Omega$  时,该吸波体的工作频域为  $1.3986 \sim 4.0944$  GHz,吸收率高于 90% 以上的频域为  $1.3986 \sim 1.7351$  GHz 和  $3.3880 \sim$

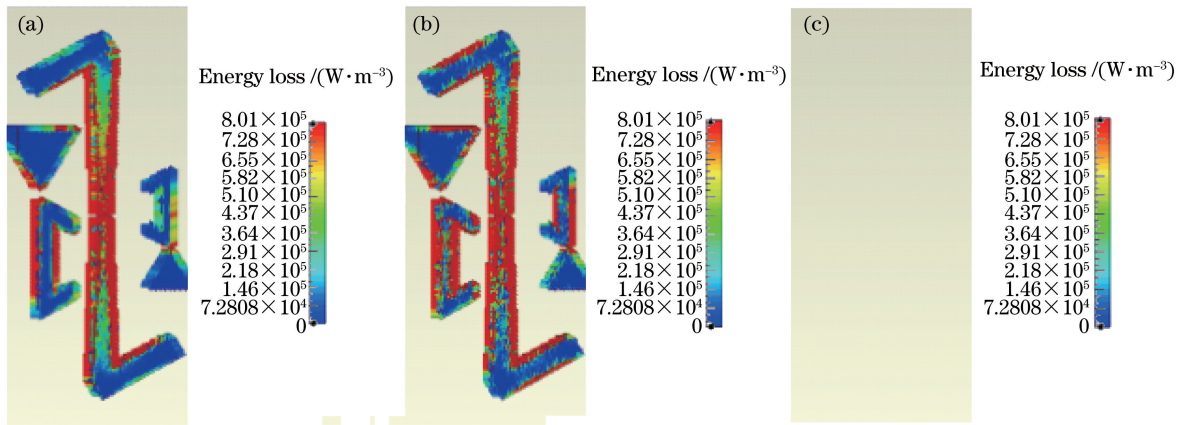


图4 吸波体的能量损耗图。(a)  $f' = 1.9012$  GHz处介质表面；(b)  $f' = 4.0715$  GHz处介质表面；  
(c)  $f' = 1.9012$  GHz处介质内部

Fig. 4 Energy loss diagram of proposed absorber. (a) On absorber surface when  $f' = 1.9021$  GHz;  
(b) on absorber surface when  $f' = 4.0715$  GHz; (c) inside absorber when  $f' = 1.9012$  GHz

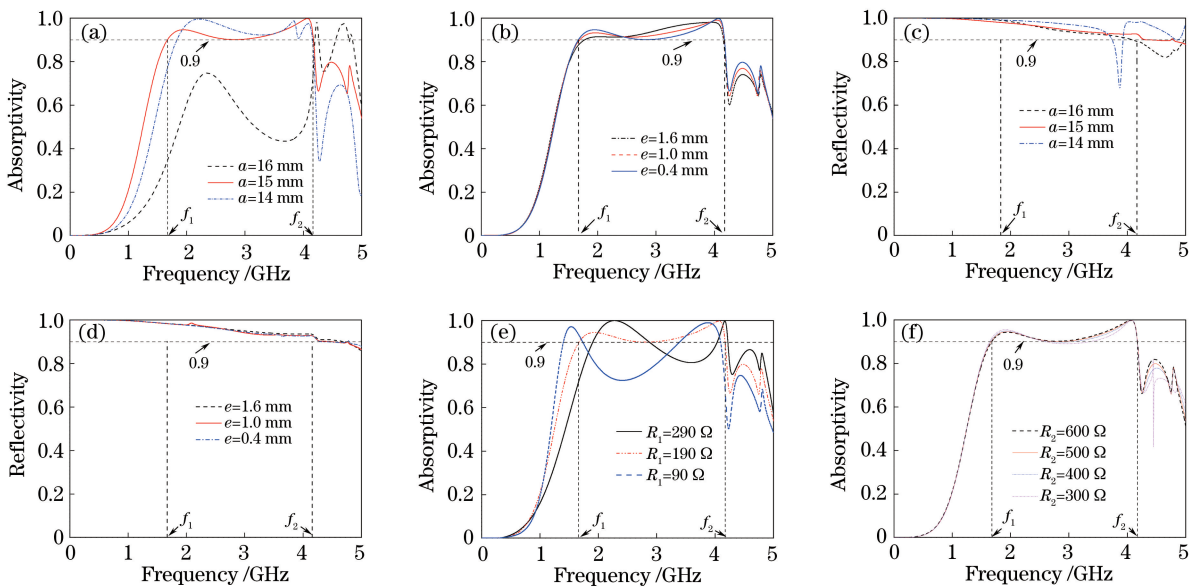


图5 吸收频谱和反射频谱。(a)  $a = 14, 15, 16$  mm时TE波的吸收频谱；(b)  $e = 0.4, 1, 1.6$  mm时TE波的吸收频谱；  
(c)  $a = 14, 15, 16$  mm时TM波的反射频谱；(d)  $e = 0.4, 1, 1.6$  mm时TM波的反射频谱；  
(e)  $R_1 = 90, 190, 290 \Omega$ 时TE波的吸收频谱；(f)  $R_2 = 300, 400, 500, 600 \Omega$ 时TE波的吸收频谱

Fig. 5 Absorption and reflection spectra. (a) Absorption spectra of TE wave when  $a = 14, 15, 16$  mm;  
(b) absorption spectra of TE wave when  $e = 0.4, 1, 1.6$  mm; (c) reflection spectra of TM wave when  $a = 14, 15, 16$  mm;  
(d) reflection spectra of TM wave when  $e = 0.4, 1, 1.6$  mm; (e) absorption spectra of TE wave when  
 $R_1 = 90, 190, 290 \Omega$ ; (f) absorption spectra of TE wave when  $R_2 = 300, 400, 500, 600 \Omega$

4.0944 GHz。当  $R_1 = 290 \Omega$  时，在 1.903 ~ 4.220 GHz的工作频域内，吸收率高于 90% 以上的频域为 1.903 ~ 2.8765 GHz 和 3.3860 ~ 4.220 GHz。显然，改变电阻  $R_1$  的值对该吸波体的工作带宽有明显的调谐作用。当  $R_1 = 190 \Omega$ 、 $R_2 = 300 \Omega$  时，该吸波体的工作频域为 1.6393 ~ 4.1700 GHz，在此频域内，该吸波体的吸收率均高于 88%，吸收率高于

90% 以上的频域为 1.6393 ~ 2.5800 GHz 和 3.3723 ~ 4.1700 GHz。当  $R_2 = 400 \Omega$  时，该吸波体的工作频域为 1.6552 ~ 4.1719 GHz，在此频域内吸收率均高于 89%，吸收率高于 90% 以上的频域为 1.6552 ~ 2.6809 GHz 和 3.0547 ~ 4.1719 GHz。当  $R_2 = 500 \Omega$  时，该吸波体吸收率高于 90% 的工作频域为 1.6687 ~ 4.1733 GHz，相对带宽为 85.7%。当

$R_2 = 600 \Omega$  时,该吸波体吸收率高于 90% 的工作频段为 1.6752~4.1743 GHz,相对带宽为 85.4%。故改变电阻  $R_2$  的值时,该吸波体的工作带宽的变化较小。

当所有的等离子体谐振单元和电阻都被激励时,介质基板 TLC 基片有、无损耗条件下的 TE 波吸收频谱如图 6 所示。当介电常数为 3.2 时,TLC 基片一般分为有损耗和无损耗两种,且一般有损耗的 TLC 基片的损耗角  $t$  的正切为 0.003。由图 6 可知,在 TE 波的工作频段 1.6687~4.1733 GHz 内,介质基板有损耗和无损耗的吸收效果基本相同,无损耗时的吸收效果稍好。故介质基板有损耗对该吸波体的吸收特性基本没有影响,该吸波体对电磁波的有效吸收主要是通过 TLC 基片表面的电阻和等离子体谐振单元对入射电磁波能量的消耗产生的。设计的几何结构可以用更简单的结构代替,但在设计结构和调试该吸波体的吸收效果时,发现基于此结构的吸波体的吸收效果最好,且可以实现 TE 波和 TM 波的极化分离。中间“7”字形结构主要起宽带吸收的作用,两边的三角形和截断的“回”字形结构主要起拓宽高频吸收带宽的作用。

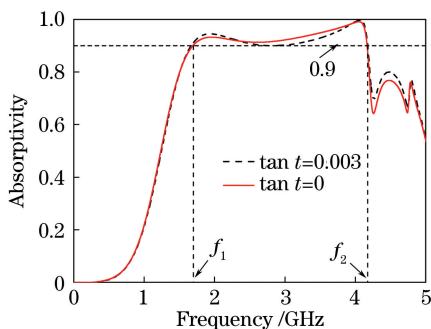


图 6 介质基板无损耗和有损耗时 TE 波的吸收频谱

Fig. 6 Absorption spectrum of TE wave when absorber substrate is with or without energy loss

## 4 结 论

利用等离子体超材料和集总电阻设计了一款电磁吸波体,该吸波体在 TE 波下能得到可调谐的吸收频谱,在 TM 波下能获得高反射率,实现了 TE 波和 TM 波的极化分离。利用全波仿真法对该吸波体的吸收频谱、反射频谱、表面电流图、表面电场图、能量损耗图进行了仿真计算,并研讨了结构参数  $a$ 、 $e$  和电阻对吸收率的影响。研究表明,通过激励不同的等离子体谐振区域,不但可以改善该吸波体 TE 波的吸收特性,还能获得可调谐的吸收频谱。

改变参数  $a$  和  $e$  可以拓宽 TE 波的吸收频谱,且在 TE 波的吸收频域内,TM 波具有很高的反射率。该吸波体在 TE 波的吸收频谱位于 1.6687~4.1733 GHz,其吸波机理是吸波体上下层间产生的磁谐振,感应电流通过加载到谐振单元上的集总电阻产生欧姆损耗。随着参数  $a$  的增大,该吸波体 TE 波的吸收频域先增大后减小;减小参数  $e$  的值时,该吸波体 TE 波的吸收频域逐渐变大;随着电阻  $R_1$  的阻值逐渐增大,该吸波体 TE 波的吸收频域先变大后减小;随着电阻  $R_2$  的阻值逐渐增大,该吸波体的吸收频域变化很小。故只要人为改变等离子体谐振结构的激励区域,就可以得到可调谐的吸收频谱,且可以拓宽该吸波体的吸收频域。

## 参 考 文 献

- [1] Li Y, Mo W C, Yang Z G, *et al.* Generation of terahertz vortex beams base on metasurface antenna array[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 644-648. 李瑶, 莫伟成, 杨振刚, 等. 利用超表面天线阵列产生太赫兹涡旋光束[J]. *激光技术*, 2017, 41(5): 644-648.
- [2] Fan Q B, Xu T. Research progress of imaging technologies based on electromagnetic metasurfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 144208. 范庆斌, 徐挺. 基于电磁超表面的透镜成像技术研究进展[J]. *物理学报*, 2017, 66(14): 144208.
- [3] Huang X C, Fu Q H, Zhang F L. Research advances of metasurface[J]. *Aero Weaponry*, 2016(1): 28-34. 黄新朝, 付全红, 张富利. 超表面研究进展[J]. *航空兵器*, 2016(1): 28-34.
- [4] Liu D L, Liu P A, Yang Q S, *et al.* Research status and development trend of absorbing materials[J]. *Materials Guide*, 2013, 27(17): 74-78. 刘丹莉, 刘平安, 杨青松, 等. 吸波材料的研究现状及其发展趋势[J]. *材料导报*, 2013, 27(17): 74-78.
- [5] Pang J F, Ma X J, Xie X Y. Research progress of electromagnetic wave absorbing materials[J]. *Electronic Components and Materials*, 2015, 34(2): 7-12, 16. 庞建峰, 马喜军, 谢兴勇. 电磁吸波材料的研究进展[J]. *电子元件与材料*, 2015, 34(2): 7-12, 16.
- [6] Wang H T L. Theoretical analysis of wide-angle metamaterial absorber[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014: 1-3. 王黄腾龙. 宽入射角电磁超介质吸波材料吸波机理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 1-3.
- [7] Zhang J, Zhang W Y, Xi Z P. Research progress of

- stealth microwave absorbing materials[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(S4): 504-508.
- 张健, 张文彦, 奚正平, 等. 隐身吸波材料的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(S4): 504-508.
- [8] Liu X X, Chen X, Wang X J, *et al.* Research progress of magnetic absorbing materials[J]. *Surface Technology*, 2013, 42(4): 104-109.
- 刘祥萱, 陈鑫, 王煊军, 等. 磁性吸波材料的研究进展[J]. *表面技术*, 2013, 42(4): 104-109.
- [9] Yang H H, Cao X Y, Gao J, *et al.* An ultrathin wave absorbing material and its application in slot antenna[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2012, 34(11): 2790-2794.
- 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 一种超薄吸波材料及其在缝隙天线中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(11): 2790-2794.
- [10] Li B P, Wang C G, Wang W. Research progress of carbon absorbing materials[J]. *Materials Review*, 2012, 26(7): 9-14.
- 李斌鹏, 王成国, 王雯. 碳基吸波材料的研究进展[J]. *材料导报*, 2012, 26(7): 9-14.
- [11] Pitarke J M, Silkin V M, Chulkov E V, *et al.* Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, 70(1): 1-87.
- [12] Lei J G, Liu T H, Lin J Q, *et al.* New applications of surface plasmon polaritons[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(5): 432-439.
- 雷建国, 刘天航, 林景全, 等. 表面等离子体激元的若干新应用[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(5): 432-439.
- [13] Landy N I, Saiuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [14] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, *et al.* Design, theory, and measurement of a polarization insensitive absorber for terahertz imaging[J]. *Physical Review B: Condensed Matter & Materials Physics*, 2008, 79(12): 125104.
- [15] Mias C, Yap J H. Avaractor-tunable high impedance surface with a resistive-lumped-element biasing grid[J]. *IEEE Transactions Antennas Propagation*, 2007, 55(7): 1955-1962.
- [16] Gu C, Qu S B, Pei Z B, *et al.* Planar metamaterial absorber based on lumped elements [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(11): 117802.
- [17] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, *et al.* Design fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(4): 044902.
- [18] Bai Z Y, Jiang X W, Zhang L. Ultra-thin metamaterial absorber for electromagnetic window shielding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0816003.
- 白正元, 姜雄伟, 张龙. 超薄电磁屏蔽光窗超材料吸波器[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0816003.
- [19] Zhou Y G, Li M Q, Pan X. Broadband absorber based on metamaterials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121602.
- 周永光, 李民权, 潘旭. 基于超材料的宽频带吸波体[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121602.
- [20] Shen C C, Li M Q, Zhou Y G, *et al.* Novel structure design of left-handed material with broadband and low loss[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091602.
- 沈纯纯, 李民权, 周永光, 等. 一种新型的宽频带低损耗左手材料结构设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091602.
- [21] Liu Q N, Dai H X. Absorption properties of polarized light Tamm state in metal-photonic crystal-metal structure[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 205-209.
- 刘启能, 代洪霞. 金属-光子晶体-金属结构中偏振光 Tamm 态的吸收特性[J]. *激光技术*, 2017, 41(2): 205-209.
- [22] Liu L Y, Zhang Z J, Liu L X. Research on broadband metamaterial absorber based on lumped resistance[J]. *Journal of Microwaves*, 2016, 32(5): 50-54.
- 刘凌云, 张政军, 刘力鑫. 基于集总电阻的宽频带超材料吸波器研究[J]. *微波学报*, 2016, 32(5): 50-54.
- [23] Li S J, Cao X Y, Gao J, *et al.* Analysis and design of three-layer perfect metamaterial-inspired absorber based on double split-serration-rings structure [J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2015, 63(11): 5155-5160.
- [24] Zou T B, Hu F R, Xiao J, *et al.* Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 178103.
- 邹涛波, 胡放荣, 肖靖, 等. 基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 178103.
- [25] Xu X C. Research of lateral SPiN solid plasma dipole



- antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 14-18.
- 许小仓. 横向 SPiN 二极管及其等离子体超材料特性 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 14-18.
- [26] Yu Z Y. Solid plasma reconstruction antenna design and implementation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 4-5.
- 余志洋. 等离子体超材料重构天线设计与实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 4-5.
- [27] Shi X Z, Liu S B, Kong X K. Reconfigurable antenna design based on solid state plasma S-PIN diode [C] // Proceedings of the 2017 National Antenna Annual Conference. Beijing : Chinese Institute of Electronics, 2017: 3.
- 史向柱, 刘少斌, 孔祥鲲. 基于固态等离子体 S-PIN 二极管的可重构天线设计 [C] // 2017 年全国天线年会论文集. 北京: 中国电子学会, 2017: 3.