

文章编号: 1001-3806(2019)02-0256-07

## 一种带宽展宽的等离子体超材料吸波体的设计

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

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程、微电子学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学 电子科学与技术国家级实验教学示范中心, 南京 210023; 3. 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, 南京 210023)

**摘要:** 为了在 TE 波下获得带宽可展宽(11GHz~14GHz 频带内)且可调谐的吸收曲线, 提出了一种新型超材料吸波体, 其周期性结构单元采用蜂窝状特有的六边形结构。对该吸波体的参量分析图进行了计算, 研究了变量  $g$  和  $d$  的数值不同时, 对吸波体吸收频带及吸收带宽的影响, 并解释了蚀刻“十”字形结构吸波体带宽展宽的成因。结果表明, 该吸波体在 9.17GHz~9.5GHz 低频频域的吸收率达到 90% 以上, 当不同的等离子体谐振区域被激励时, 可以实现吸波体的时分频域吸收以及改善吸波体的吸收性能, 改变变量  $g$  和  $d$  可以实现对吸收频带的动态调控; 可以通过在方形结构中蚀刻“十”字形结构的方式拓宽高频频域的吸收带宽, 其在 12.08GHz~13.91GHz 频域的吸收率高于 90%, 改变变量  $s$  可以明显展宽吸收频带, 且该吸波体对入射电磁波的角度不敏感。该吸波体的设计思路为拓宽吸波体的吸收带宽提供了一种有效的方法。

**关键词:** 光学器件; 超材料吸波体; 全波仿真法; 带宽展宽

**中图分类号:** O436; O53 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.02.020

### Design of a band enhanced absorber based on plasma metamaterial

ZHANG Hao<sup>1</sup>, MA Yu<sup>1</sup>, ZHANG Haifeng<sup>1,2,3</sup>, YANG Jing<sup>1</sup>, LIU Jiaxuan<sup>1</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. National Electronic Science and Technology Experimental Teaching Demonstrating Center, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 3. National Information and Electronic Technology Virtual Simulation Experiment Teaching Center, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to achieve the absorption curve with broadening (within 11GHz~14GHz band) and tunable bandwidth under TE wave, a new metamaterial absorber was proposed whose periodic structural unit adopted honeycomb-shaped hexagonal structure. The parametric analysis chart of the absorber was calculated. The effects of variables  $g$  and  $d$  on absorbing band and absorbing bandwidth were studied. The cause of bandwidth broadening of the etched cross-shaped absorber was also explained. The results show that, absorption rate of the absorber in the low frequency domain at 9.17GHz~9.5GHz is over 90%. When different plasma resonance regions are excited, the time-frequency domain absorption of the absorber can be realized. And the absorptive capacity of the absorber can be improved. By changing the variables  $g$  and  $d$ , the dynamic control of the absorption band can be realized. The absorption bandwidth in the high frequency domain can be widened by etching cross-shaped structure in a square structure. Its absorption rate in the frequency domain of 12.08GHz~13.91GHz is higher than 90%. By changing the variable  $s$ , the absorption band can be obviously widened. The absorber is insensitive to the angle of incident electromagnetic wave. The design idea provides an effective way to broaden the absorption bandwidth of absorbers.

**Key words:** optical devices; metamaterial absorber; full-wave simulation; band enhancement

## 引言

吸波材料由于呈现低反射率的特性, 可以有效地损耗进入其内部的电磁波, 使得其在电磁防护与电磁屏蔽方面有着广阔的应用前景, 常见的吸波材料有铁氧体吸波材料<sup>[1-2]</sup>、磁性吸波材料<sup>[3]</sup>、手性材料<sup>[4-6]</sup>等。电磁超材料通常被定义为一种人造介质, 具有自然界

基金项目: 国家级大学生创新训练计划资助项目 (SZDG2017009)

作者简介: 张浩 (1996-), 男, 大学本科生, 现主要从事超材料吸波器、电磁超材料的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: hanlor@163.com

收稿日期: 2018-04-17; 收到修改稿日期: 2018-06-29

存在物质所不具备的不同寻常的特性,它们由周期性亚波长金属元素阵列组成。近年来,有关电磁超材料的研究引起了相当的关注,并开创了一个新的科学研究领域,而电磁超材料的许多外来电磁特性已经在许多应用领域得到了证明和应用,目前广泛研究的超材料主要包括左手材料<sup>[7-9]</sup>、磁超材料<sup>[10-12]</sup>,电超材料<sup>[13-14]</sup>、光子晶体<sup>[15-16]</sup>等。

美国学者 LANDY 等人<sup>[17]</sup>在 2008 年提出了一种开口谐振环结构的 3 层电磁超材料吸波体,并在 THz 频带设计出了一种超材料完美吸波体,而电磁超材料吸波体作为一种新型的吸波材料逐渐被学者们所熟知并被广泛应用于军事、民用领域。对于吸波体的实际应用,吸收带宽往往是重要的性能指标之一,而早期所设计的吸收体的窄吸收带宽<sup>[18-19]</sup>大大限制了它们在许多工业和军事领域的实际应用,随着吸波体应用领域研究的深入,目前,已经提出了多种技术解决吸波体吸收带宽较窄的问题。WANG 等人<sup>[20]</sup>通过在设计的吸波体中采用正方形板和电介质交替堆叠的方式,使得吸波体由单频点的吸收实现了带宽为 300GHz 的宽带吸收。LI 等人<sup>[21]</sup>通过多个谐振结构组合的方式设计了一种带宽展宽的吸波体,其结构单元中采用 4 个高介电常数的“E”形谐振单元,其在两种极化状态下吸收带宽均达到 1GHz。DING 等人<sup>[22]</sup>设计了一种多层金属介质四角锥台形吸波体,通过采用多个平行于金属表面的吸收层在 7.8GHz ~ 14.7GHz 频率范围内实现了宽带吸收(吸收率  $A$  的值高于 90%)。CHENG 等人<sup>[23]</sup>提出一种基于集总电阻的分裂的硬币型超材料吸波体,当吸波体未加载电阻时,仅有两个较高的吸收频点,通过加载集总电阻,该吸波体在 3.1GHz ~ 5.6GHz 频率范围内实现了吸收率高于 90% 的宽带吸收。然而,传统的带宽可展宽的超材料吸波体很难实现吸收曲线的动态调控,即吸波体时分分频域的吸收特性。

等离子体超材料(plasma metamaterial, PM)作为一种新型的超材料,由于等离子体本身的优良特性<sup>[24-25]</sup>,逐渐走进人们的视野,等离子体的介电常数可以用  $\varepsilon_p(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\omega_c}$  来描述(其中  $\omega$  是入射波频率),人们可以通过改变等离子体频率  $\omega_p$  和碰撞频率  $\omega_c$  的大小,设计出工作频率可调控的吸波体。本文中采用的固态等离子体为 GaAs,如参考文献[24]和参考文献[25]中所述。本文中利用 PM 设计出一种带宽可拓宽的新型超材料吸波体,其中等离子体频率  $\omega_p = 2.85 \times 10^{14}$  rad/s,碰撞频率  $\omega_c = 1.6 \times 10^{13}$  s(等离子体

参量取值参照参考文献[24]和参考文献[25]),结构上采用蜂窝状特有的六边形结构,并通过等离子体谐振结构(plasma resonator, PR)激励区域的调控,即等离子体被激励时,磁导率较高,其特性接近于金属,等离子体未被激励时表现与介质类似的特性<sup>[26]</sup>,从而实现吸波体的时分分频域吸收。

## 1 吸波体的模型设计

图 1 是 PM 吸波体的单元结构示意图。图 1a 是 PR 的示意图,图 1b 是侧视图,图 1c 是周期结构单元示意图。从图中可以看出,PM 吸波体的底层采用电导率  $\sigma = 5.8 \times 10^7$  s/m 的金属铜板,介质基板位于 PR 和反射板之间,上层由一个“ $\Omega$ ”形 PR、一个方形 PR 和两个“U”形 PR 构成。介质基板则采用相对介电常数  $\varepsilon_r = 4.3$  的 FR-4,其损耗角正切为 0.025,介质基板的边长  $L = 36$  mm,宽  $P = 25.98$  mm,厚度  $H = 3.6$  mm,上层 PR 的厚度  $W = 0.0138$  mm,“ $\Omega$ ”形 PR 是由三角形的边和直径  $C = 6.7$  mm、宽度  $B = 0.8$  mm 的半圆环经过组合设计而成,“ $\Omega$ ”形 PR 的宽  $X = 45$  mm,“ $\Omega$ ”形 PR 的结构线宽  $E = 1.38$  mm,方形 PR 的长  $R = 8.5$  mm,宽  $F = 8.54$  mm,两个“U”形 PR 的长  $N$  分别是 6.4 mm 和 13.734 mm ( $1.962d$ , 其中  $d = 7$  mm),宽分别为  $M = 6.42$  mm 和  $Q = 7.98$  mm,两个 PR 的间距  $g = 0.8$  mm,

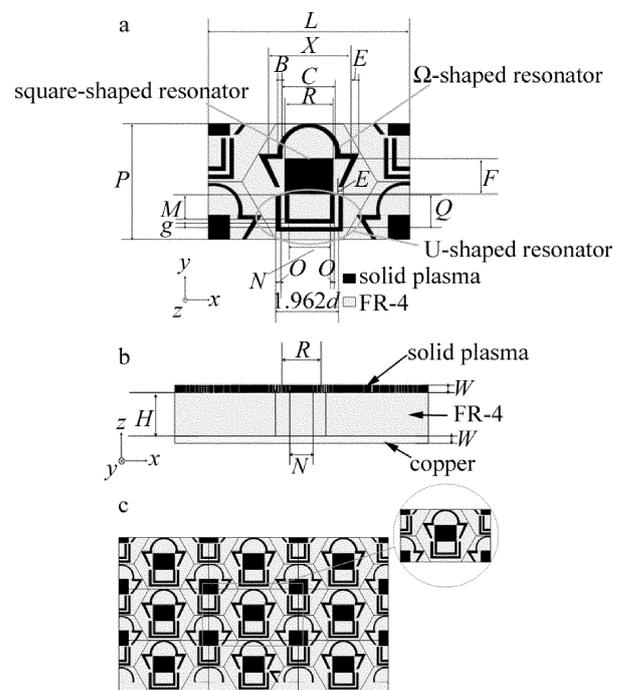


Fig. 1 Schematic of the proposed absorber  
a—the designed plasma resonators (top layer) b—the side view c—periodic arrangement of the proposed absorber

两个“U”形 PR 的宽度均为  $O=0.79\text{mm}$ , PM 吸波体中的其它相关变量如表 1 所示。电磁波波矢垂直于吸收平面,电场和磁场方向如图 1a 所示,电场  $E$  与  $y$  轴平

行,磁场  $H$  与  $x$  轴平行,由于本文中设计的吸波体为反射型吸波体,所以吸收率  $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ ,其中  $R(\omega)$  是反射率。

Table 1 The variables of the proposed absorber

variable	$X$	$B$	$C$	$d$	$E$	$F$	$g$	$H$	$L$	$M$	$N$	$O$	$P$	$Q$	$R$	$W$
value/mm	45	0.8	14.96	7	1.38	8.54	0.8	3.6	36	6.42	6.4	0.79	25.98	7.98	8.5	0.0138

## 2 数值分析与研究

图 2 是不同 PR 被激励时的吸收曲线。图 2a 是只有“ $\Omega$ ”形 PR 和方形 PR 被激励时(等离子体激励状态 1)的吸收曲线,从图 2a 中可以看出,吸收曲线中位于 9.34GHz 和 10.76GHz 处有两个吸收频点,其  $A$  值分别为 87.34% 和 97.02%。图 2b 是两个“U”形 PR 被激励、“ $\Omega$ ”形 PR 和方形 PR 不被激励时(等离子体激励状态 2)的吸收曲线,从图 2b 中可以看出,吸收曲线中有两个吸收峰值,其  $A$  值分别为 97.36% 和 97.8%,

分别位于 9.43GHz 和 11.17GHz。对比图 2a 和图 2b 中的吸收曲线,结构单元中所激励的 PR 不同,其吸收频点的位置和吸收峰的强度均发生了变化。图 2c 是所有 PR 被激励时(等离子体激励状态 3)的吸收曲线,从图 2c 中可以看出,该吸波体在频带 9.17GHz ~ 9.5GHz 内,  $A$  值高于 90%,且在 9.24GHz 和 9.45GHz 处有两个吸收峰值较高的吸收频点,其  $A$  值分别为 98.81% 和 94.01%。由图 2c 对比图 2a 和图 2b 可知,当“ $\Omega$ ”形 PR、方形 PR 和两个“U”形 PR 同时被激励时,PM 吸波体的吸收性能显著改善,同时吸收带宽进一步拓宽。所以,可以通过人为地调控 PR 的激励状态,实现对吸波体吸收频域的动态调控,即实现吸波体分时分频域的吸收,以及改善 PM 吸波体的吸收性能。

图 3 是 PM 吸波体在频率点  $F_1 = 9.24\text{GHz}$  和  $F_2 = 9.45\text{GHz}$  处、介质基板厚度为 3.59mm 横截面的电场分布图和背面反射板的电流分布图(图中只标注了该吸波体周期结构单元的电场和表面电流的主要集中区域)。由图 3a 和图 3c 可知,当电磁波垂直入射且频率分别为  $F_1 = 9.24\text{GHz}$  和  $F_2 = 9.45\text{GHz}$  时,其电场主要分布于 PR 底部的介质基板中(如图中  $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3$  所示),显然,该吸波体的工作机理是通过介质谐振,入射的电磁波通过介质表面的 PR,使得电磁波的能量在介质基板中被损耗。同时,图 3e 中给出了介质基板为有损耗和无损耗的吸收曲线,从图中可以看出,当介质基板无损耗时(见图 3e 中虚线),位于 9.24GHz 和 9.45GHz 处的频点  $A$  值仅为 58.54% 和 84.02%,显然,其是通过介质基板使得入射电磁波的能量在介质基板中得以损耗,这与电场图的分析结果相对应。由图 3b 可以看出,底面金属反射板上的电流都向方形谐振单元的中心汇聚(如图中圆圈区域所示),此时可以等效为方形 PR 中间存在着一个负电荷,而从图 3a 可以看出,电场主要集中方形 PR 的边缘和“U”形 PR 的底部(如图中  $a_1, a_2$  所示),此时可以等效为介质上表面存在一个正电荷,因此,该 PM 吸波体的上表面 PR 和底面的反射板可以等效成一个电偶极子,在上表面和底面之间形成磁谐振,将入射电磁波的能量损耗于

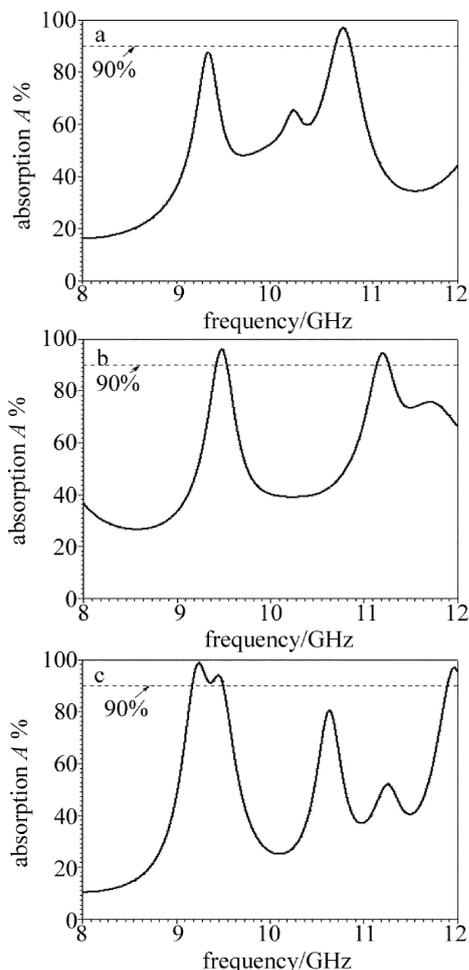


Fig. 2 Absorption curves of designed absorber

a—absorption curve excited by  $\Omega$ -shaped and square shaped resonators b—absorption curve excited by two U-shaped resonator c—absorption curve excited by all resonators

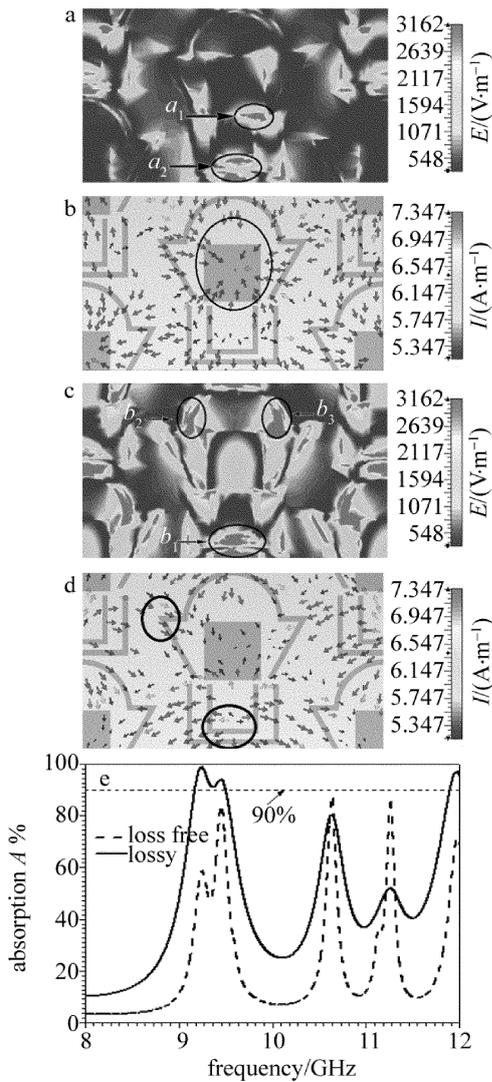


Fig. 3 a—the distributions of electric field at 9.24GHz b—the distributions of surface current at 9.24GHz c—the distributions of electric field at 9.45GHz d—the distributions of surface current at 9.45GHz e—absorption curve of different dielectric substrates

介质基板中,同理,频率点  $F_2 = 9.45GHz$  处的吸收机理和频率点  $F_1 = 9.24GHz$  处吸收机理相同。

图 4 中给出了不同变量对该吸波体性能的影响。图 4a 是变量  $g$  (两个“U”形 PR 的上下间距) 的值为 0.5mm, 0.6mm, 0.7mm 和 0.8mm 时的吸收曲线(其它参量不变), 当  $g = 0.5mm$  时, 吸收曲线中有两个  $A$  值较高的频率点, 分别位于  $F_1 = 9.21GHz$  和  $F_2 = 9.47GHz$ ,  $A$  值分别为 95.63% 和 91.6%; 位于频率点  $F_0 = 9.35GHz$  处,  $A = 82.75%$ , 随着  $g$  的增大, 该吸波体各频率点  $A$  值逐渐增大, 当  $g = 0.8mm$  时, 吸波体的吸收性能最佳, 其在 9.17GHz ~ 9.5GHz 吸收频带内,  $A$  值高于 90%。图 4b 是  $A$  与  $g$  的关系图, 从图中可以看出, 该吸波体在 9GHz ~ 10GHz 内的吸收频带随着  $g$

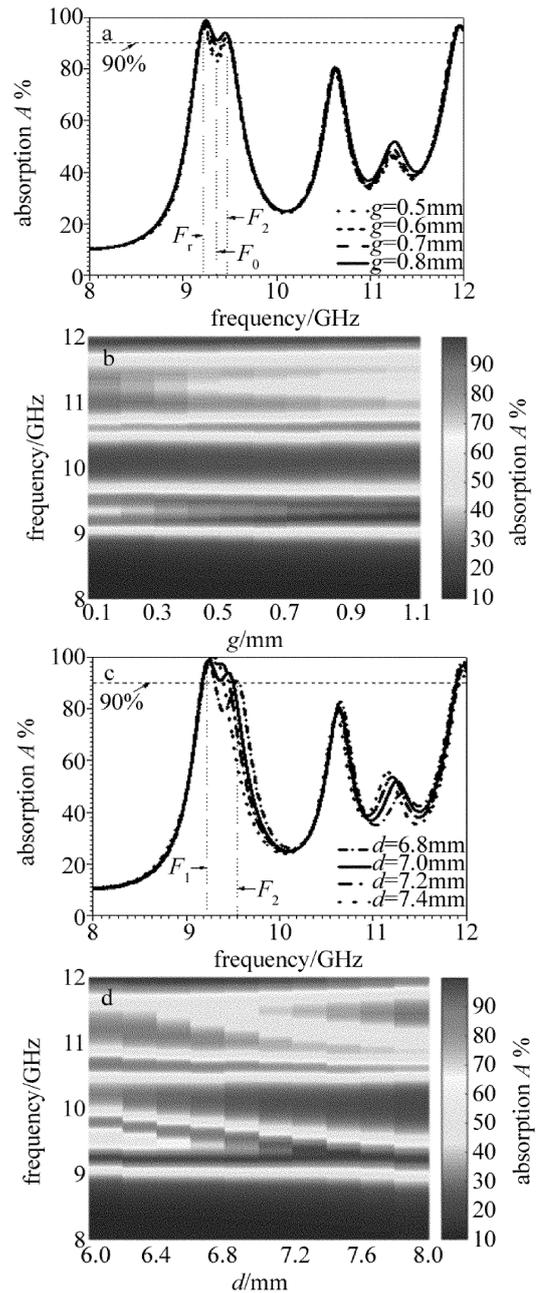


Fig. 4 a—absorption curves for  $g = 0.5mm, 0.6mm, 0.7mm, 0.8mm$  b—the diagram of  $g$  vs.  $A$  c—absorption curves for  $d = 6.8mm, 7mm, 7.2mm, 7.4mm$  d—the diagram of  $d$  vs.  $A$

的增大逐渐减小, 吸收频带的上边缘随着  $g$  的增大发生略微的红移(即频率点  $F_1$  处的吸收峰值向低频移动), 吸收频带的下边缘随着  $g$  的增大发生略微的蓝移(即频率点  $F_2$  处的吸收峰值向高频移动), 而频率点  $F_0$  处  $A$  值随着  $g$  的增大逐渐增大, 当  $g = 0.8mm$  时, 频率点  $F_0$  处的  $A$  值达到 90% 以上, 此时该吸波体的工作带宽最宽。同时, 随着  $g$  的增大, 位于 12GHz 附近的吸收频域逐渐向高频移动, 且  $A$  值达到 90% 以上。显然, 变量  $g$  对于该吸波体吸收频带的调谐起重

要作用。图 4c 是变量  $d$  的值分别为 6.8mm, 7mm, 7.2mm, 7.4mm 时的吸收曲线, 当  $d = 6.8\text{mm}$  时, 该吸波体位于 9.23GHz 有一个  $A$  值较高的频点, 其吸收峰值为 98.59%; 当  $d = 7\text{mm}$ , 该吸波体  $A$  值高于 90% 的吸收频带为 9.17GHz ~ 9.5GHz, 且有两个较高的吸收频点, 分别位于  $F_1 = 9.24\text{GHz}$  和  $F_2 = 9.45\text{GHz}$  处,  $A$  值分别为 98.81% 和 94.01%。随着  $d$  的增大, 该吸波体的吸收曲线发生明显的红移。图 4d 是  $A$  与  $d$  的关系图, 从图中可以看出, 该吸波体在 9GHz ~ 10GHz 的吸收频带随着变量  $d$  的增大先逐渐增大再逐渐减小, 且该频段的吸收频带发生明显的红移。 $d = 7\text{mm}$  时, 该吸波体的工作带宽最宽, 同时, 随着  $d$  的增大, 9GHz ~ 10GHz 吸收频带的下边缘发生波动 (即频率点  $F_1$  的吸收峰值先发生红移后发生蓝移再发生红移), 其吸收频带的上边缘发生明显的红移 (即频率点  $F_2$  随着  $d$  的增大, 逐渐向低频移动, 当  $d = 7.4\text{mm}$  时, 频率点  $F_2$  消失), 显然, 变量  $d$  是影响该吸波体吸收带宽的重要变量。所以, 可以通过人为地改变 PR 的激励区域 (如改变变量  $g$  和  $d$  的值) 实现对吸收曲线的动态调控, 并且展宽该吸波体的吸收带宽。

为了展宽该吸波体的吸收带宽, 图 5 中给出了进一步设计的吸波体结构示意图以及相应的吸收曲线。图 5a 是 PR 的示意图, 图 5b 是侧视图。从图 5a 中可以看出, 方形 PR 中截去了间距  $s = 1.7\text{mm}$  的“十”字形结构, 内部的“U”形 PR 的线宽  $V = 0.7\text{mm}$ , 宽  $U = 5.82\text{mm}$ , 其相应的吸收曲线如图 5c 所示。对比图 2c 可以看出, 低频工作频域的吸收性能有所下降, 在 9.18GHz ~ 9.53GHz 吸收频带范围内,  $A$  值达到 84% 以上, 而该吸波体高频吸收频带范围内的吸收带宽明显拓宽, 在 12.08GHz ~ 13.91GHz 吸收频带范围内,  $A$  值高于 90%, 在 11.95GHz ~ 14GHz 吸收频带范围内,  $A$  值达到 84% 以上。

图 6 中给出了带宽展宽的吸波体在频率点  $F_3 = 12.32\text{GHz}$  处、介质基板厚度为 3.59mm 时横截面的电场分布图和背面反射板的电流分布图。由图 6a 对比图 3a 和图 3c 可知, “十”字形结构处的电场分布明显增强 (如图 6a 中圆圈区域所示); 由图 6b 对比图 3b 和图 3d 可知, 金属板上的电流方向改变, 沿  $y$  轴正方向流动 (如图 6b 中箭头所示), 显然, 从图 6a 和图 6b 中可以看出, 通过在方形结构中蚀刻“十”字形结构, 使得该吸波体的磁谐振损耗明显增强, 所以吸波体在 11GHz ~ 14GHz 频带内的吸收带宽明显展宽。

为了说明“十”字形结构线宽 (变量  $s$ ) 对吸波体吸

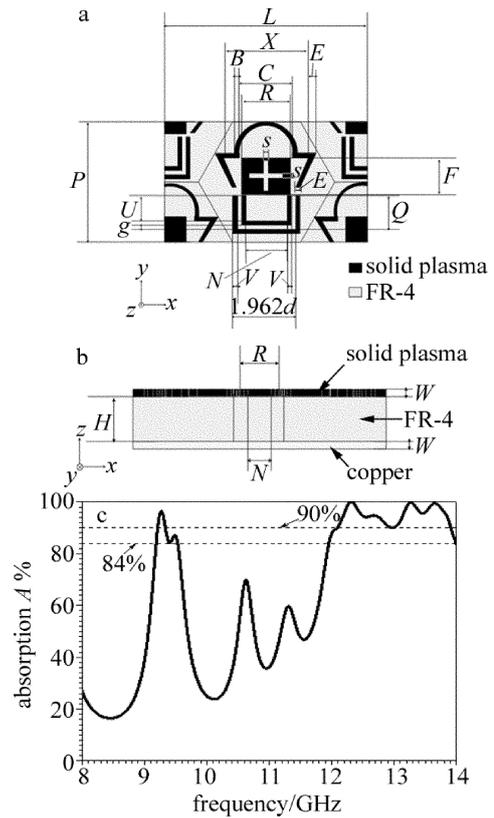


Fig. 5 Schematic and absorption curve of the proposed band enhanced absorber  
a—schematic of plasma resonators (top layer) b—the side view  
c—the simulated absorption curve

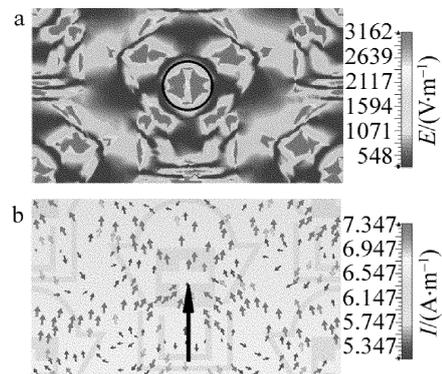


Fig. 6 a—the distributions of electric field at 12.32GHz b—the surface current of bottom metallic plate at 12.32GHz

收频域的影响, 图 7a 中给出了变量  $s$  的值为 1.3mm, 1.5mm, 1.7mm, 1.9mm 的吸收曲线 (其它参量不变)。当  $s = 1.3\text{mm}$  时, 该吸波体吸收频带为 12.49GHz ~ 13.61GHz ( $A$  值高于 90%), 吸收曲线中位于 12.69GHz 和 13.39GHz 处有两个  $A$  值较高的频率点,  $A$  值分别为 97.33% 和 99.97%, 位于频率点  $F_3 = 12.98\text{GHz}$  处,  $A$  值为 92.51%, 随着  $s$  的增大, 频率点  $F_3$  处的  $A$  值逐渐降低, 该频率点  $A$  值在  $s = 1.7\text{mm}$  时降低至 90%, 当  $s = 1.7\text{mm}$  时, 吸波体的吸收性能最

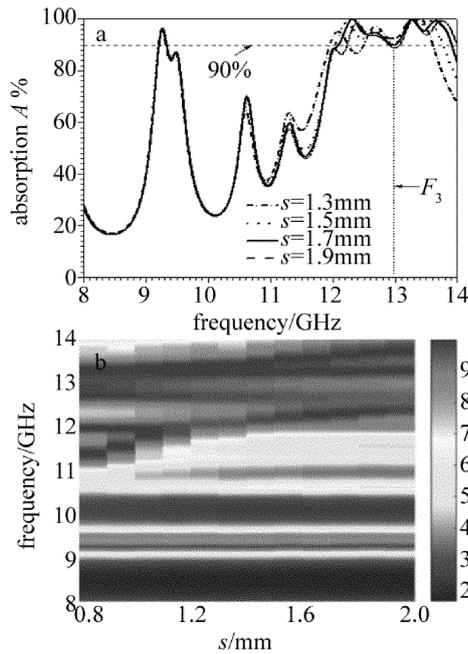


Fig. 7 a—absorption curves for  $s = 1.3\text{mm}, 1.5\text{mm}, 1.7\text{mm}, 1.9\text{mm}$  b—the diagram of  $s$  vs.  $A$

佳,其  $A$  值达到 90% 以上的吸收频带为 12.08GHz ~ 13.91GHz,其位于 12.31GHz,13.26GHz 和 13.65GHz 处有 3 个吸收频率点, $A$  值分别为 99.95%,99.87% 和 99.47%,同时,随着  $s$  的增大,该吸波体的吸收频带和吸收带宽均发生变化。图 7b 是  $A$  与  $s$  的关系图,从图中可以看出,在低频工作范围内 (9.17GHz ~ 9.53GHz),随着  $s$  的增大,吸收曲线中的工作频域近乎一条直线,说明该吸波体  $A$  值保持不变,在高频工作范围内 (11GHz ~ 14GHz),随着  $s$  的增大,该吸波体的工作频域先增大后减小 ( $s = 1.7\text{mm}$  时,吸收带宽最宽,为 1.83GHz),同时 11GHz ~ 14GHz 的吸收频带随着  $s$  的增大,逐渐向高频移动。显然,优化变量  $s$  的值可以拓宽该吸波体的吸收带宽。

电磁波大角度入射稳定一直以来都是设计吸波体所关注的一个重要性能,图 8 是入射角  $\varphi$  (波数  $k$  与  $y$ - $O$ - $z$  面的夹角) 变化的吸收曲线。图 8a 是入射角从  $0^\circ$  增加到  $30^\circ$  的吸收曲线,从图中可以看出,在 11.92GHz ~ 13.89GHz 吸收频带范围内,该吸波体  $A$  值 (高于 80%) 在相对较大的入射角内保持稳定 ( $0^\circ \sim 20^\circ$ ),当入射角  $\varphi = 30^\circ$  时, $A$  值高于 80% 的吸收频带为 12.58GHz ~ 13.89GHz (11.92GHz ~ 13.89GHz 频带范围内)。图 8b 是  $\varphi$  与  $A$  的关系图 ( $0^\circ \sim 80^\circ$ ),从图中可以看出,随着入射角逐渐增大,该吸波体的吸收带宽逐渐减少,当入射角增大到  $60^\circ$  时,该吸波体在 12.91GHz ~ 13.93GHz 频带范围内, $A$  值达到 76%,由

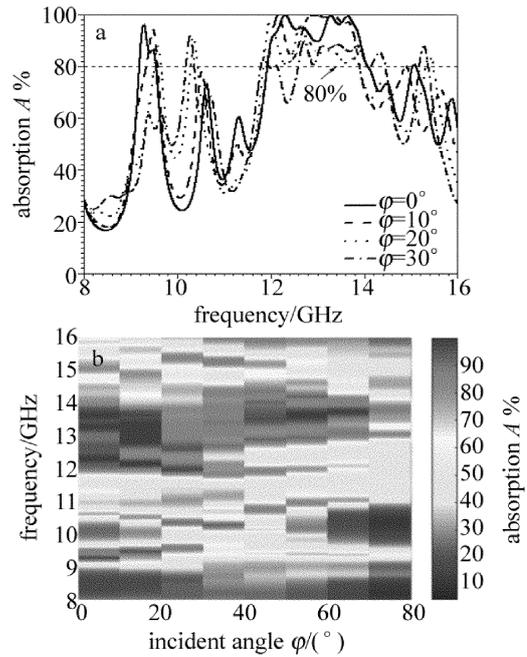


Fig. 8 a—absorption curves for  $\varphi = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \text{ and } 30^\circ$  b—the diagram of  $\varphi$  vs.  $A$

此可知,该吸波体对入射电磁波的角度不敏感。

### 3 结 论

提出了一种带宽可展宽 (11GHz ~ 14GHz 频域内) 的 PM 吸波体,其结构单元采用蜂窝型特有的六边形结构,对该吸波体的参量分析图进行了计算,探讨了变量  $g$  和  $d$  数值不同时对吸收性能的影响,计算可得:不同的 PR 被激励时,该吸波体的吸收性能改善,同时能实现吸波体在 TE 波的分时分频域吸收。PM 吸波体的吸收频带位于 9.17GHz ~ 9.5GHz,该吸波体是通过介质谐振和磁谐振将入射的电磁波能量损耗于介质基板中。改变  $g$  和  $d$  的数值能够实现对吸收曲线的动态调控。该吸波体各频率点处的  $A$  值随着变量  $g$  的增大逐渐增大,而在 9GHz ~ 10GHz 内的吸收频带逐渐减小。随着变量  $d$  的增大,该吸波体的吸收曲线发生明显的红移,在 9GHz ~ 10GHz 的吸收频带随着  $d$  的增大先增大后减小。所以,可以通过人为地调控 PR 的激励区域实现对吸收曲线的动态调控,为了拓宽吸波体的吸收带宽,通过在原有结构的基础上蚀刻“十”字形结构,使得吸波体在 11GHz ~ 14GHz 频带内的吸收带宽明显展宽,解释了蚀刻“十”字形结构吸波体带宽展宽的成因,并进一步探讨了变量  $s$  和入射角度 (对吸收带宽和吸收频带的影响),计算可得:随着  $s$  的增大,该吸波体的吸收频带发生明显的蓝移,吸收带宽进一步展宽,而且该吸波体对入射电磁波的角度不敏感。

## 参 考 文 献

- [1] HATAKEEYAMA K, INUI T. Electromagnetic wave absorber using ferrite absorbing material dispersed with short metal fibers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1984, 20(5):1261-1263.
- [2] LIMA U R, NASAR M C, NASAR R S, *et al.* Ni-Zn nanoferrite for radar-absorbing material[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2008, 320(10):1666-1670.
- [3] MARIN P, CORTINAD, HERNANDO A. Electromagnetic wave absorbing material based on magnetic microwires[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11):3934-3937.
- [4] HODGKINSON I, WU Q H. Inorganic chiral optical materials[J]. Advanced Materials, 2001, 13(12/13):889-897.
- [5] SIONCKE S, VERBIEST T, PERSOONS A. Second-order nonlinear optical properties of chiral materials[J]. Materials Science and Engineering, 2003, R42(5/6):115-155.
- [6] SHIM J M, SHAN S C, KOŠMRLJ A, *et al.* Harnessing instabilities for design of soft reconfigurable auxetic/chiral materials[J]. Soft Matter, 2013, 9(34):8198-8202.
- [7] WANG J F, QU Sh B, MA H, *et al.* Tunable planar left-handed metamaterials based on split-ring resonator pairs[C]//IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications. New York, USA: IEEE, 2015:1-3.
- [8] ZHOU H, WANG C, PENG H. A novel double-incidence and multi-band left-handed metamaterials composed of double Z-shaped structure [J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2016, 27(3):2534-2544.
- [9] LIU S H, GUO L X, LI J Ch. Left-handed metamaterials based on only modified circular electric resonators[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(21):2220-2225.
- [10] RYBIN O, SHULGA S. Profile miniaturization and performance improvement of a rectangular patch antenna using magnetic metamaterial substrates[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2016, 26(3):254-261.
- [11] ZHANG Y, TANG H, YAO Ch, *et al.* Experiments on adjustable magnetic metamaterials applied in megahertz wireless power transmission[J]. AIP Advances, 2015, 5(1):2075-2084.
- [12] KIRIUSHECHKINA S V, KOTEI'NIKOVA O A, RADKOVSKAYA A A. Peculiarities of propagation of electroinductive waves in magnetic metamaterials [J]. Physics of Wave Phenomena, 2017, 25(2):101-106.
- [13] TARKHANAYAN R H. Effective permittivity and permeability of magnetic metamaterials with periodic array of 2-D electronic layers in quantum hall effect conditions[J]. Journal of Electromagnetic Waves & Applications, 2008, 22(7):1005-1012.
- [14] WANG R L, WANG J F, LI Y F, *et al.* Dual-band suspended stripline filter based on electric metamaterials[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2017, 59(9):2297-2302.
- [15] WEI Y Sh, SU AN, XU J Y, *et al.* Characteristics of dual-channel optical filter in quaternary heterostructure photonic crystal [J]. Laser Technology, 2018, 42(2):212-212 (in Chinese).
- [16] ZHANG X D, CHEN N, NIE F K, *et al.* Dispersion characteristics analysis of photonic crystal fibers based on structure parameters and filling modes [J]. Laser Technology, 2018, 42(1):48-52 (in Chinese).
- [17] LANDY N I, SAIUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20):207402.
- [18] ZHANG H, ZHANG H F, YANG J, *et al.* Design of an absorber based on plasma metamaterial [J]. Laser Technology, 2018, 42(5):704-708 (in Chinese).
- [19] WU D, LIU Y, LI R, *et al.* Infrared perfect ultra-narrow band absorber as plasmonic sensor [J]. Nanoscale Research Letters, 2016, 11(1):483-491.
- [20] WANG B X, WANG L L, WANG G Z, *et al.* Theoretical investigation of broadband and wide-angle terahertz metamaterial absorber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(2):111-114.
- [21] LI L, WANG J, DU H, *et al.* A band enhanced metamaterial absorber based on E-shaped all-dielectric resonators [J]. AIP Advances, 2015, 5(1):017147.
- [22] DING F, CUI Y, GE X, *et al.* Ultra-broadband microwave metamaterial absorber [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(10):103506.
- [23] CHENG Y Zh, 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.
- [24] KONG X K, LI H M, BIAN B R, *et al.* Microwave tunneling in heterostructures with electromagnetically induced transparency-like metamaterials based on solid state plasma[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2016, 74(3):30801.
- [25] KONG X K, MO J J, YU Zh Y, *et al.* Reconfigurable designs for electromagnetically induced transparency in solid state plasma metamaterials with multiple transmission windows[J]. International Journal of Modern Physics, 2016, B30(14):1650070.
- [26] BALANIS C A. Antenna theory: analysis and design[M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 1982:989-990.