

螺旋环超材料太赫兹吸波器的响应原理及特性

陈哲耕, 许向东*, 谷雨, 敖天宏, 李欣荣, 戴泽林, 孙铭徽, 蒋亚东, 连宇翔, 王福

(电子科技大学 光电信息学院 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要:提出一种表层电磁谐振器呈螺旋环的超材料太赫兹吸波器. 与常规的超材料吸波器不同, 在材料的种类及厚度都不变的情况下, 仅通过改变表面螺旋环的环数或环的起始和终止位置, 就能有效地调节螺旋环超材料的太赫兹响应性能. 研究发现, 该超材料的响应频率的仿真值与驻波理论计算值基本吻合, 说明螺旋环超材料的响应机理可以通过驻波理论解释, 其响应频率具有可预计性. 为了探究螺旋环超材料的响应机理, 还比较研究了闭合圆环及开口圆环超材料吸波器的性能. 结果表明, 螺旋环、闭合圆环、开口圆环三种超材料吸波器具有部分类似的太赫兹响应性能. 但是, 与另外两种超材料不同, 螺旋环超材料的表层电磁谐振器是半径连续变化的螺旋环, 具有更强的耦合作用以及更加简便和灵活的性能调节方式. 研究成果对超材料的理论及设计研究有新的启示.

关键词:螺旋环超材料; 太赫兹吸波器; 机理; 特性

中图分类号: TB39 **文献标识码:** A

Response mechanism and properties of spiral-shaped metamaterial absorbers

CHEN Zhe-Geng, XU Xiang-Dong*, GU Yu, AO Tian-Hong, LI Xin-Rong,
DAI Ze-Lin, SUN Ming-Hui, JIANG Ya-Dong, LIAN Yu-Xiang, WANG Fu

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Information,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Novel spiral-shaped metamaterial absorbers (MAs) were designed. Different from the traditional MAs, the THz responses of the as-designed MAs can be effectively adjusted by altering the number of the spirals and their locations, in which the functional materials and their thicknesses remain unchanged. Results reveal that the response frequencies obtained by CST simulations agree well with those theoretically estimated by standing wave formula, suggesting high predictability of the response frequency for such MAs. In order to better understand the response mechanism of the spiral-shaped MAs, ring-shaped and split ring-shaped MAs were simultaneously investigated. Simulation results indicate that these MAs exhibit some similar response properties. However, different from the ring-shaped and split ring-shaped MAs, the as-designed spiral-shaped MAs exhibit stronger coupling effect and easier adjustment, largely due to the continuous alteration in the spiral radius for the latter. These results are helpful for promoting the theoretical study and design of metamaterials.

Key words: spiral-shaped metamaterials, terahertz absorbers, mechanism, properties

PACS: 78.67.Pt, 81.05.Lg, 71.15.-m

引言

太赫兹 (terahertz, 简称 THz) 波是指频率在 0.1

~ 10 THz、波长在 3000 ~ 30 μm 范围内的电磁波, 对应的光子能量为 0.414 ~ 41.4 meV^[1]. 太赫兹波介于红外和微波之间, 具有其它波段不具备的特殊性

收稿日期: 2017-01-21, 修回日期: 2017-03-29

Received date: 2017-01-21, revised date: 2017-03-29

基金项目: 国家自然科学基金 (61377063, 61071032, 61235006, 61421002)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61377063, 61071032, 61235006, 61421002)

作者简介 (Biography): 陈哲耕 (1992-), 女, 湖北当阳人, 在读硕士研究生, 信息显示与光电技术专业. E-mail: 181814233@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xdxu@uestc.edu.cn

质,如透视性、安全性以及高的时域频谱信噪比^[2-3]等.因此,太赫兹技术在波谱^[4]、生物医学与环境科学^[5]、传感技术^[6]、通信技术^[7]等领域具有广阔的应用前景.但是,由于缺少大功率的太赫兹源和高灵敏的探测器,导致太赫兹技术在很长一段时间内停滞不前,因此太赫兹波也被称为“太赫兹空隙(THz gap)”.

超材料是指一类具有天然材料所不具备的超常电磁性质的人工复合结构或材料^[8].通过设计特定的结构或选择特殊的介质材料,可获得一些性能独特的器件,例如完美透镜^[9]、电磁隐身衣^[10]等.超材料的特性可以用有效介电常数和磁导率来表征,而有效介电常数和磁导率则可通过改变材料在特殊结构中的物理尺寸来调控^[11].近年,超材料吸波器(metamaterial absorbers,简称 MAs)在太赫兹探测领域的研究成果引起了国内外广泛的关注.这是因为,与太赫兹响应较弱的天然材料相比,作为人工材料的超材料具有优良的太赫兹响应性能.2008年,Landy 率先提出具有三层结构的超材料吸波器,在 11.5 GHz 频率内对入射电磁波的吸收率接近 100%^[12],由此揭开了三层超材料研究序幕.遗憾的是,这种超材料结构的底层为金属条,采用了套刻技术,增加了工艺难度.在此之后的研究中,大部分三层超材料的底层材料采用平面金属板^[13].

众所周知,螺旋天线具有较高的增益和良好的圆极化性能,被广泛地应用在微波领域的无线设备的发射端和接收端^[14].据此,我们设想:如果将螺旋天线贴片与超材料结构结合,利用螺旋环形状的特殊性,有望获得独特的太赫兹响应性能.我们注意到,Wang 等人曾提出表面谐振器为不连续的螺旋环的太赫兹超材料滤波器^[15],并认为不连续的螺旋环使表面谐振器具有开口,而这种开口可等效为电容器,由此导致该超材料对特定波段的光具有滤波作用.但是,开口同时还使环上表面电流是断开的,使螺旋环超材料的响应规律及机理探究变得复杂.理论上,连续螺旋环可简化相关的机理探究.遗憾的是,目前为止,国内外还未见表面谐振器为连续螺旋环的超材料太赫兹吸波器的报道,人们对螺旋环吸波器的太赫兹响应原理及特性规律也缺乏了解.重要的是,与传统的太赫兹超材料的繁琐调节方式不同^[11],通过调节连续螺旋环的参数,还有望对超材料的太赫兹响应性能进行更加简便、有效的调节.所以,本文关于表面连续螺旋环超材料的成果提供了超材料理论研究的新思路.

1 模拟方法

为便于比较,采用传统的三层超材料结构,包括表层电磁谐振器、中间介质层及底层金属板.本文设计的表面金属谐振器为螺旋环的超材料太赫兹吸波器如图 1 所示.该超材料由铝和聚酰亚胺两种材料组成,主要因为这两种材料兼具密度低与制备简单的优势,将来可方便地应用在器件中.该超材料的结构参数包括:单元面积为 $a \times a$ ($a = 36 \mu\text{m}$);介质层是厚度(h_1)为 $8 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺(介电常数为 3.5,损耗角正切为 2.7×10^{-3});底层连续金属膜和表层金属图形均采用厚度(h_2)为 $0.3 \mu\text{m}$ 的 Al(其电导率为 $3.56 \times 10^7 \text{ S/m}$);表面金属螺旋环的曲线方程为 $x = (w + t)/g \times \cos(t)$, $y = (w + t)/g \times \sin(t)$,本文设计的螺旋环的环宽为 w/g 、缝宽为 $(2\pi - w)/g$.螺旋环的环数通过改变参数 t 进行调节,我们将决定螺旋环的起始参数 t 定义为 t_1 (图 1(a)中 A 点,图中 $t_1 = 26.704$);将决定螺旋环的终止参数 t 定义为 t_2 (图 1(a)中 B 点,图中 $t_2 = 45.553$),起始位置和终止位置均可通过 t_1 与 t_2 调节,且两者的差值每增加 2π ,螺旋环就增加一圈.螺旋环模型如图 1(a)所示.经多次仿真,所得螺旋环的优化参数为: $w = 3 \mu\text{m}$ 、 $g = 3 \mu\text{m}$,即环宽为 $1 \mu\text{m}$ 、缝宽为 $1 \mu\text{m}$.

使用 CST microwave studio 2013 电磁仿真软件中的频域算法对所构建的模型进行仿真计算,仿真边界条件设定为:超材料沿 X 轴、Y 轴方向为(unit cell)周期边界(即结构单元在 X 和 Y 方向无限周期排布);沿 Z 轴方向为(open space)波矢 K 沿 Z 方向.模拟周期性阵列在平面波下的激励.入射电磁波吸收率的计算公式为:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - R - T \quad (1)$$

其中, S_{11} 为反射系数, S_{21} 为传输系数, $R = |S_{11}|^2$ 为电磁波的反射率, $T = |S_{21}|^2$ 为透射率.由于底层是连续金属板,太赫兹波透过为零,故 $S_{21} = 0$.

2 结果与讨论

2.1 螺旋环环数变化对超材料太赫兹响应的影响

图 2 中的右边插图所示为分别具有一、二、三圈螺旋环的超材料表面结构,三者的终止($t_2 = 45.553$)位置相同,但三种表面结构从上至下的起始参数 t_1 依次比 t_2 减小 2π 、 4π 、 6π .这三种具有不同圈螺旋环的超材料的仿真结果如图 2 和 3 所示.图 2

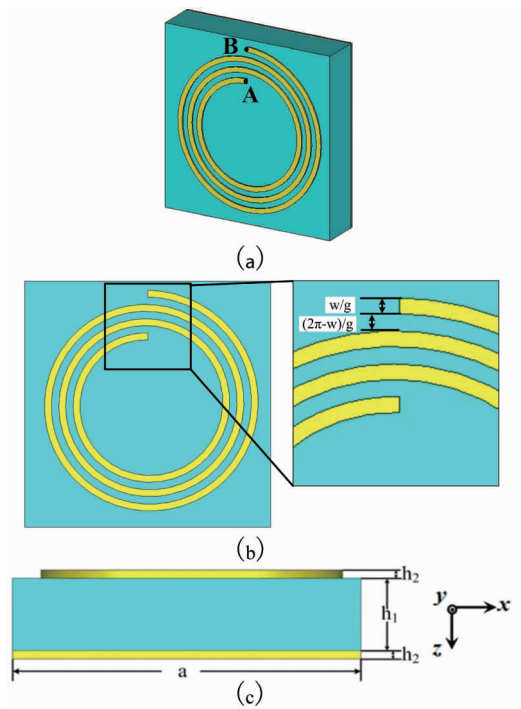


图1 螺旋环超材料吸波器的单元结构示意图:(a) 立体图;(b)螺旋环的表面结构;(c)截面图
Fig.1 Unit cell of spiral-shaped MAs:(a) stereo image;(b) surface structure of spiral-shaped MA;(c) cross-sectional view

为三种螺旋环超材料在太赫兹频段的吸收曲线.图2显示,当表面谐振器仅由一圈螺旋环组成时,超材料在1~4 THz范围只存在一个中心响应频率为1.688 THz、峰值吸收率为53.04%的吸收峰.当表面谐振器连续螺旋环变为两圈时,超材料的响应频率包含低频(1.683 THz)和高频(2.374 THz)两个响应频率,其峰值吸收率分别为98.89%、65.29%.当表面谐振器连续螺旋环增加至三圈时,出现了中心响应频率分别为1.624 THz、2.634 THz、3.236 THz的三个吸收峰,其峰值吸收率分别为86.44%、99.21%、26.98%.考虑到三圈螺旋环超材料的第三个吸收峰强度明显地弱于前面两个(图2),本文后面主要讨论前两个较强的吸收峰.

接着,我们研究具有不同圈螺旋环的超材料的表面电流分布.表面电流分布(图3)仿真结果表明,在电磁场作用下,螺旋环超材料的感应电流沿金属线产生等离子元振荡,形成强烈的局域化电场分布,即电流在表面结构中流动形成驻波分布(驻波节点由三角形在图3中标出),导致超材料对特定频率的太赫兹波产生吸收.图3(a-c)显示,超材料低频模式的共振峰由其最外螺旋层的表面电流震荡引

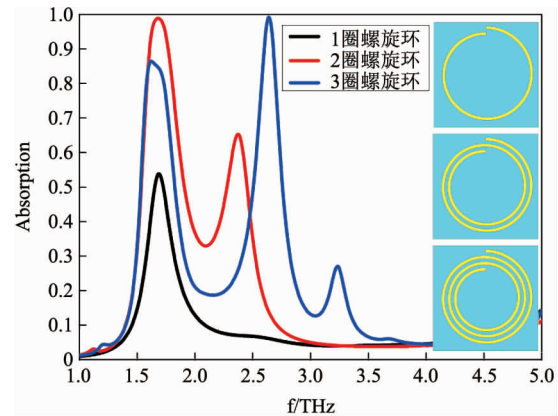


图2 3种不同圈螺旋环的超材料吸波器的吸收系数
Fig.2 Absorbances of three spiral-shaped MAs with different circles

起,所以一圈、两圈、三圈螺旋环超材料的低频响应频率(分别为1.688 THz、1.683 THz和1.624 THz)基本重合(图3).

另一方面,根据驻波理论公式^[16],可计算出相应的谐振频率 f_n :

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{c}{2l_n \sqrt{\epsilon_{re}}} \quad , \quad (2)$$

式(2)中, λ_n 为驻波波长, l_n 是驻波节点间长度,可根据图中驻波节点和螺旋环的曲线方程为 $x = (w + t)/g \times \cos(t)$, $y = (w + t)/g \times \sin(t)$ 通过积分求得, ϵ_{re} 为超材料吸波器的等效介电常数.其中, ϵ_{re} 又可表示为^[17]:

$$\epsilon_{re} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad , \quad (3)$$

式(3)中, ϵ_r 为介质层的介电常数,本文采用的聚酰亚胺介质层的介电常数为3.5,1为真空的介电常数.根据式(3),计算得文中所述吸波器的相对介电常数为2.25.

式(2)显示,超材料的响应频率与驻波波长成反比.考察图3(d)及(e)发现,两圈及三圈螺旋环超材料分别对2.374 THz、2.634 THz产生响应时,其表面电流形成的驻波均分布在螺旋环的最外环和最内环附近.这说明,随着螺旋环的环数增加,最内环形成的驻波缩短,超材料的太赫兹响应频率增高,发生蓝移.通过CST仿真出图3(a~c)对应的低频模式的响应频率仿真值分别为1.688 THz、1.683 THz及1.624 THz.但是,如果把根据图3得到的驻波长度代入式(2),由于三者驻波长度相同,可计算出图3(a-c)的理论吸收峰均为1.715 THz.类似地,通过CST仿真出图3(d-e)对应的高频模式的响应

频率仿真值分别为 2.352 THz 及 2.655 THz. 但是, 如果把根据图 3 得到的驻波长度代入式(2), 图 3 (d-e) 对应的高频模式的响应频率理论值分别为 2.374 THz 及 2.634 THz. 需要说明的是, 由于电流在金属谐振器上分布, 计算时我们采用积分计算驻波长度. 而且, 由于金属线有一定的宽度, 螺旋环内侧长度与外侧长度不同, 所以计算时采用内侧和外侧的平均长度. 但是, 图 3 显示, 表面电流在金属环内外侧的分布并不均匀, 由此导致根据式(2)计算谐振频率与 CST 仿真谐振频率存在偏差, 但是两者的数值及变化趋势基本吻合.

进一步观察图 3(a) 发现, 一圈螺旋环超材料在 1.688 THz 产生低频响应时, 超材料产生的震荡电流分布在驻波节点的两侧, 每一侧分别只存在一个方向的感应电流, 即其左侧部分只存在顺时针方向电流、而右侧部分则只存在逆时针方向电流. 但是, 两圈(图 3(b)) 和三圈(图 3(c)) 螺旋环超材料在低频模式响应时, 金属线的左右两侧均产生方向相反的电流, 如其左侧部分主要是顺时针方向电流、但也存在逆时针方向电流, 右侧部分亦然. 方向相反的电流所产生的感应磁场相互作用, 导致更强的太赫兹吸收. 所以, 多螺旋环超材料在低频模式下对太赫兹吸收的吸收峰强度比单螺旋环超材料的强(图 2).

我们还注意到, 两圈螺旋环超材料的高频(2.374 THz) 吸收峰强度(65.29%), 明显地低于三圈螺旋环超材料的高频(2.634 THz) 吸收峰强度(99.21%)(图 2). 分析表面电流分布结果(图 3(d-e)) 发现, 在高频模式下, 三圈螺旋环超材料的中间螺旋层增强了最外环和最内环联合振荡的耦合作用(图 3(e)), 导致高频响应吸收增强.

2.2 螺旋环终止位置变化对超材料太赫兹响应的影响

值得提及的是, 螺旋环结构的一个特别之处是表面谐振金属环是连续的, 所以有可能通过螺旋环的起始或终止位置的变化对超材料的太赫兹响应性能进行调控. 本文接着对此进行研究. 图 4 的右边插图显示三种三圈螺旋环超材料, 它们的表面螺旋环的起始位置($t_1 = 26.704$) 相同, 但终止位置(t_2) 不同. 其中, 图 4 的右边插图所示吸波器表面结构从上而下终止位置 t_2 分别为 45.453、45.553 和 45.653. 吸收曲线的仿真结果如图 4 所示. 图 4 显示, 当 $t_2 = 45.453$ 时, 三圈螺旋环超材料分别在 1.634 THz 和 2.663 THz 出现峰值吸收率分别为 74.82% 和 99.95% 的强吸收峰; 但是, 当 $t_2 = 45.553$ 时, 三圈螺旋

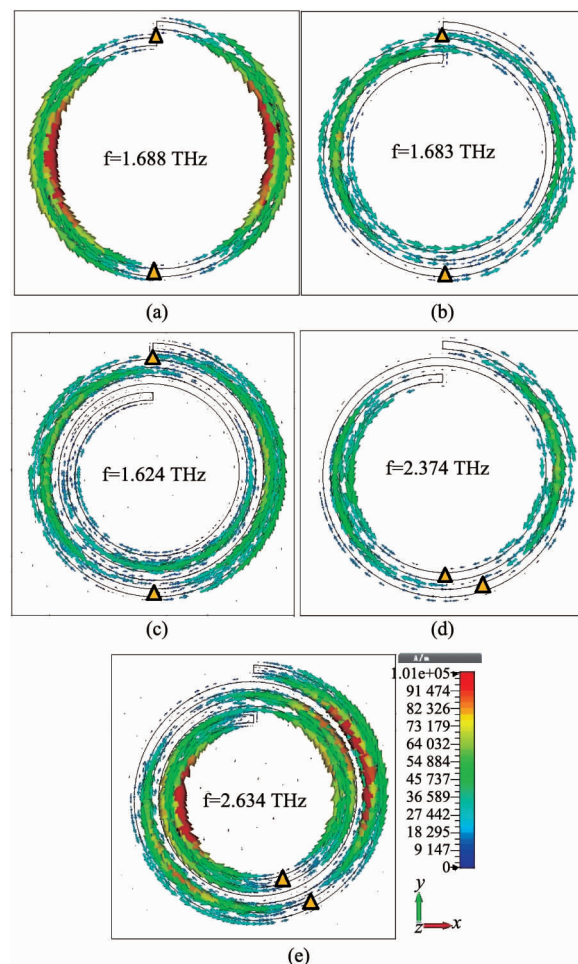


图 3 图 2 的右边插图所示超材料吸波器在不同振荡频率下的表面电流分布:(a)、(b)、(c) 为低频模式,(d)、(e) 为高频模式

Fig. 3 Surface current distributions of the MAs as shown in the right inset of Fig. 2 at different oscillating frequencies: (a), (b), and (c) show the low-frequency modes, (d) and (e) show the high-frequency modes

环超材料的响应频率分别为 1.624 THz、2.634 THz, 其峰值吸收率分别为 86.44%、99.21%. 与 $t_2 = 45.453$ 相比, $t_2 = 45.553$ 时低频及高频吸收峰均发生红移, 而且低频响应频率的吸收强度明显增强、而高频响应的吸收强度却稍微减弱; 当 $t_2 = 45.653$ 时, 三圈螺旋环超材料的响应频率分别在 1.609 THz、2.619 THz, 对应的峰值吸收率为 94.04%、97.79%. 与 $t_2 = 45.553$ 相比, 低频及高频吸收峰均再次发生红移, 同样地低频响应频率的吸收强度进一步增强, 而高频响应的吸收强度则进一步减弱.

由于以上三种结构类似, 图 4 右边插图所示 t_2 为 45.453、45.653 的超材料的表面电流均与 t_2 为 45.553 的超材料的表面电流(图 3(c) 和 3(e) 所示)相似^[18], 所以由表面电流形成的驻波也相似. 但

是,由于形成的驻波的波长与螺旋环的最外圈有关.螺旋环越长,则驻波波长越长.根据式(2)可知,响应频率与驻波波长成反比.所以,随着螺旋环的最外圈长度的增长,驻波波长增长,导致低频及高频吸收峰均出现红移.

图4还显示低频模式的半峰宽(约330 GHz)大于高频模式的半峰宽(约250 GHz).计算表明,当 t_2 为45.453、45.553和45.653时,低频模式下的半峰宽分别为343 GHz、328 GHz和332 GHz,而高频模式的半峰宽则分别为250 GHz、250 GHz和255 GHz.其中,低频模式下的半峰宽比高频模式下的半峰宽约宽80 GHz,由于低频模式下的其中一个驻波节点在螺旋环的终止位置处,当终止位置改变时,产生了附加谐振,表现为低频模式下出现了频带展宽现象,即在原有的低频模式响应频率(1.634 THz、1.624 THz与1.609 THz)附近产生了边频.图4所示吸波器产生边频(1.683 THz、1.673 THz与1.658 THz)的表面电流分布如图5所示.产生的边频相对于原有的低频响应均发生了稍微的蓝移,由于边频和原有的响应频率对应的吸收峰发生部分重叠,由此导致频带展宽的现象.这三种螺旋环超材料在低频模式下的半峰宽(343 GHz、328 GHz和332 GHz)分别占中心频率(1.634 THz、1.624 THz和1.609 THz)的20.99%、20.20%和20.63%.由于频带展宽,导致螺旋环超材料的低频模式下的半峰宽占中心频率的百分比(20.20%~20.99%)比传统的表面贴片开口超材料的结果(11.25%)^[12]增大了接近一倍,据此有望提高探测器的探测灵敏度.值得注意的是,在材料参数不变的前提下,仅通过调节表面螺旋环的起始或终止位置,就可以容易、有效地对螺旋环超材料吸波器的响应频率及吸收率进行调节.这对于其它结构的超材料是难于实现的,也是本文设计的螺旋环超材料的一个独特之处.

2.3 不同单环结构变化对超材料太赫兹响应的影响

虽然半径连续变化的螺旋环超材料罕有国内外文献报道,但是有许多关于半径固定的圆环超材料的报道^[19-20].为了更好地理解新型的螺旋环超材料的响应机理,我们对传统的圆环超材料与新型的螺旋环超材料进行了比较研究,相关超材料结构如图6所示.其中,图6(a)为单螺旋环超材料,而图6(b)及6(c)则表示半径固定、且均与图6(a)螺旋环的起始半径(9.901 μm)相同的单圆环超材料.其中,图6(c)是在图6(b)的基础上开了1 μm 的口(螺旋

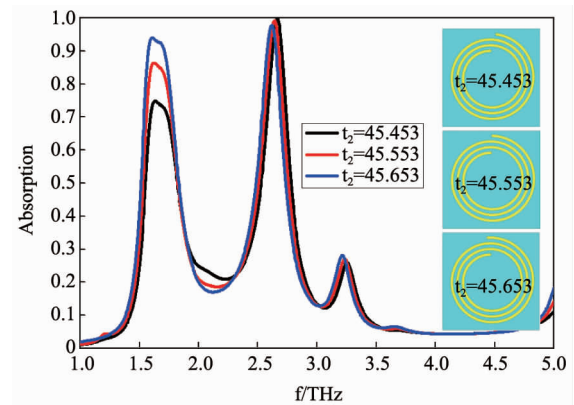


图4 t_2 参数不同的三圈螺旋环超材料吸波器的吸收系数

Fig. 4 Absorbances of the three spiral MAs with different t_2 parameters

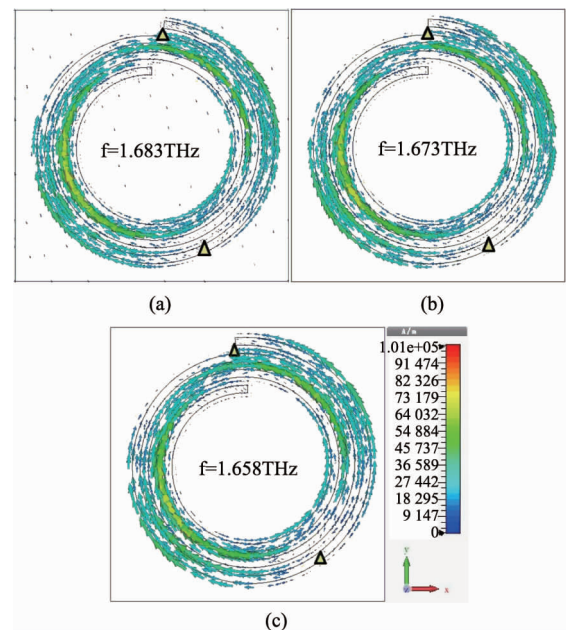


图5 使螺旋环低频模式频带展宽对应频率的表面电流分布:(a)、(b)、(c)分别对应 $t_2 = 45.453$ 、 45.553 、 45.653 的超材料表面结构

Fig. 5 Surface current distributions of the frequency widening bands of low-frequency modes: (a), (b), (c) correspond to the surfaces of the spiral-shaped MAs with $t_2 = 45.453$, 45.553, and 45.653, respectively

环的缝宽也为1 μm).与之相比,图6(d)和6(e)为半径固定、且均为图6(a)所示螺旋环的终止半径(11.996 μm)的单圆环超材料.与图6(c)类似,图6(e)是在图6(d)的基础上进行开口处理.这五种超材料吸波器除了上述表面结构参数不同,其它结构参数都相同.

仿真结果表明(图7),图6(a-e)的不同超材料

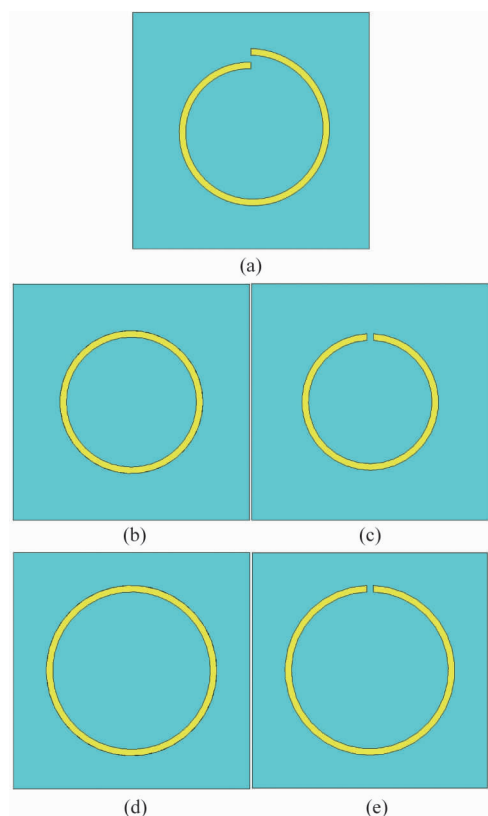


图6 单闭合环、单开口环和单螺旋环超材料吸波器的表面结构:(a)一圈螺旋环超材料的表面结构;(b)、(c)螺旋环起始半径对应圆环和开口圆环超材料的表面结构;(d)、(e)螺旋环终止半径对应圆环和开口圆环超材料的表面结构

Fig. 6 Surface structures of ring-shaped MAs, split ring-shaped MAs, and spiral-shaped MAs: (a) surface structure of spiral-shaped MA; (b), (c) surface structures of the ring-shaped MA and split ring-shaped MA with their radii matching the initial radius of the spiral-shaped MA; (d), (e) surface structures of the ring-shaped MA and split ring-shaped MA, with their radii matching the final radius of the spiral-shaped MA

的中心响应频率分别为 2.575 THz、2.746 THz、2.748 THz、2.207 THz 和 2.202 THz,对应的峰值吸收率分别为 40.62%、35.82%、35.60%、43.08% 和 42.66%。值得注意的是,开口环(图6(c)和(e))分别和闭合环(图6(b)和(d))太赫兹吸波器的中心响应频率和吸收峰值几乎完全相等、吸收曲线几乎重合(图7)。这说明,长度为 $1\ \mu\text{m}$ 的开口对超材料响应的明显地小于厚度为 $8\ \mu\text{m}$ 的介质的影响。据此,可以推测:单圈螺旋环超材料的太赫兹中心响应频率与单圈圆环超材料的太赫兹中心响应频率的差异(图7),不是由于螺旋环开口的原因,而主要是由于圆环的半径是固定的(图6(b-e)),而螺旋

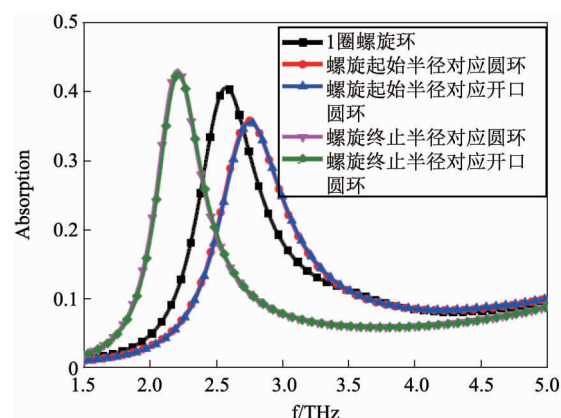


图7 五种不同结构的超材料吸波器(图6所示)的吸收系数

Fig. 7 Absorbances of five different MAs as shown in Fig. 6

环的半径则是连续变化的缘故(图6(a))。

接着,本文进一步考察图6(a)所示螺旋环超材料和圆环半径分别为螺旋环的起始(图6(b))和终止半径(图6(d))对应的两种圆环超材料的表面电流分布。图8显示,由于这三种超材料的表面谐振结构均为环状,所以它们的表面感应电流分布相似。感应电流在表面形成驻波分布,驻波节点由黄色三角形标出。根据式(2)计算得到图6(a)、(b)和(d)所示超材料的响应频率分别为 2.631 THz、2.792 THz 和 2.394 THz,均分别与仿真结果 2.575 THz、2.746 THz 和 2.207 THz 相吻合。这说明,由于简单的单圈螺旋环超材料和单圈圆环超材料的结构类似,形成的驻波分布仅绕着金属线分布。由于驻波长度与金属线长度成正比关系,而且螺旋环超材料的半径是连续变化的,所以其响应频率(2.575 THz)介于螺旋环起始半径对应的圆环超材料响应频率(2.746 THz)和螺旋环终止半径对应的圆环超材料响应频率(2.207 THz)之间。当然,随着螺旋环环数的增加,环与环之间的耦合作用增强,情况也会相应地发生变化。

2.4 闭合圆环环数变化对超材料太赫兹响应的影

为了进一步理解螺旋环超材料的半径连续而产生的独特响应,我们对图9右边插图所示具有不同圈圆环的超材料进行仿真。在图9右边插图中,吸波器的表面结构从上之下依次向内增加一圈圆环,且圆环的半径分别为图2右边插图所示吸波器的螺旋环的相应起始半径($14.090\ \mu\text{m}$ 、 $11.996\ \mu\text{m}$ 、 $9.901\ \mu\text{m}$),相关超材料的太赫兹吸收率、表面电流的仿真

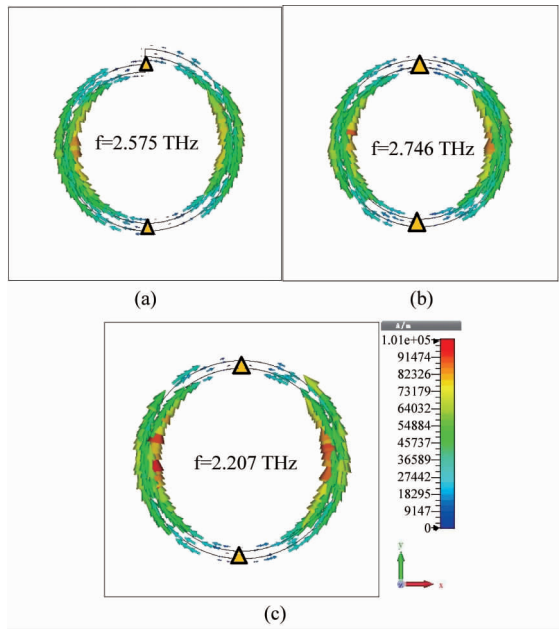


图 8 超材料吸波器(图 6 所示)表面电流分布:(a)一圈螺旋环超材料的表面电流分布;(b)螺旋环起始半径对应圆环的表面电流分布;(c)螺旋环终止半径对应圆环超材料的表面电流分布

Fig. 8 Surface current distributions in the MAs as shown in Fig. 6: (a) spiral-shaped MA, and (b) ring-shaped MA with their radii matching the initial radius of the spiral-shaped MA; (c) ring-shaped MA, which radius is matched with the final radius of the spiral-shaped MA

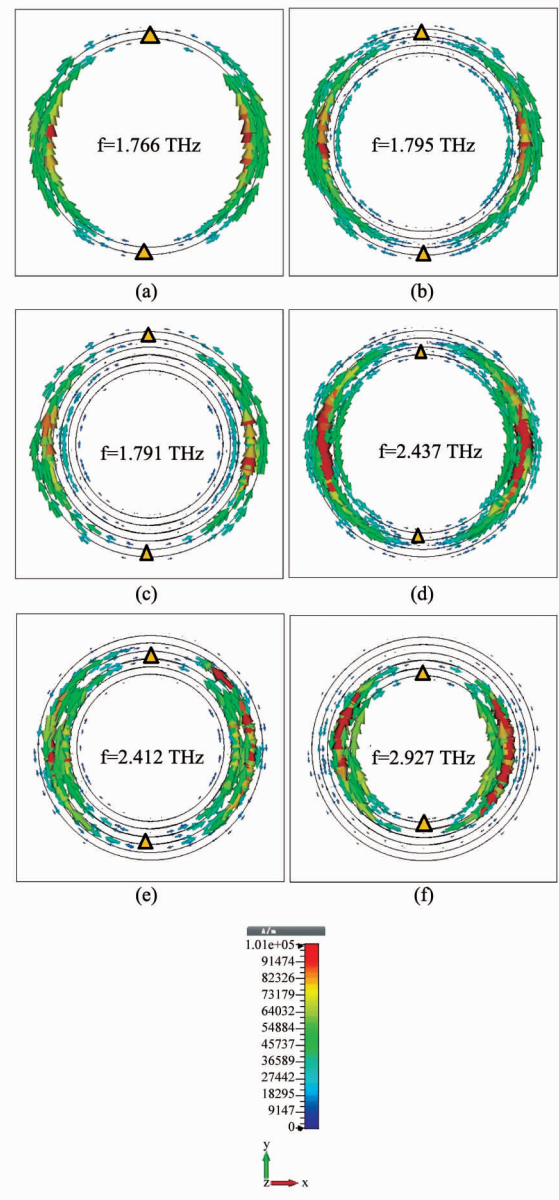


图 10 超材料吸波器(图 9 右边插图所示)在不同振荡频率下的表面电流分布:(a)、(b)及(c)为低频模式,(d)及(e)为中频模式,(f)为高频模式

Fig. 10 Surface current distributions in the MAs as shown in the right inset of Fig. 9 at different oscillating frequencies: (a), (b), and (c) show the low-frequency modes, (d) and (e) show the middle-frequency modes, (f) shows the high-frequency mode

结果分别如图 9-10 所示.

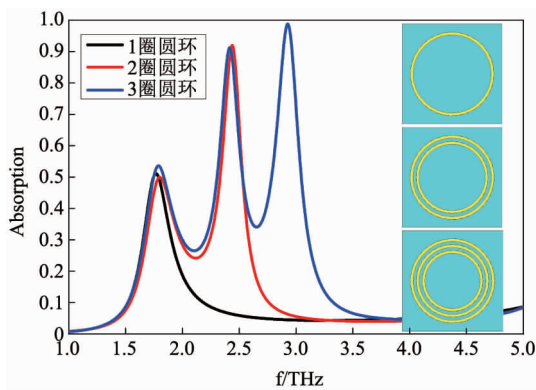


图 9 三种闭合圆环结构的超材料吸波器的吸收系数
Fig. 9 Absorbances of three ring-shaped MAs with different circles

图 9 显示,当表面谐振器仅存在一圈圆环时,圆环超材料的中心响应频率在 1.766 THz,对应的峰值吸收率为 53.04%。当表面谐振器圆环变成独立的三圈圆环时,超材料的中心响应频率存在两个,分别为低频(1.795 THz)和 高频(2.437 THz)响应,其峰值吸收率分别为 49.87%、92.00%,其中低频响

应和一圈圆环超材料的中心响应基本重合.当表面谐振器圆环增加至独立的三圈圆环时,圆环超材料的响应频率出现三个,即低频(1.791 THz)、中频(2.412 THz)和 高频(2.927 THz)响应,其峰值吸收率分别为 53.59%、91.26%、98.80%。

将三圈螺旋环超材料(图 2 右插图)与三圈圆环超材料(图 9 右插图)的响应频率进行比较,我们

发现,虽然两者的低频响应频率均由最外圈环的谐振引起,但是两者不同的是,三圈圆环超材料的低频(1.795 THz)和中频(2.437 THz)响应与两圈圆环超材料的响应基本重合(图9)。这与三圈螺旋环比两圈螺旋环超材料在高频模式的响应频率发生明显蓝移的现象(图2)不同,其原因是:在连续不对称的螺旋环结构中,出现了内圈环与外圈环间的不对称的高频耦合作用。而圆环型超材料对太赫兹波的响应均由表面电流分布在单圈圆环附近形成的驻波引起,所以产生响应时并没有出现圆环间的耦合作用。这正是由于圆环型超材料的半径为固定值、非连续的,而螺旋环的半径则是连续变化的原因造成。从等效谐振电路的角度看,通过表面电流分布,一圈螺旋环和一圈圆环并没有明显的区别,如图8所示。两者的表面电流分布情况相似,电流主要沿着一圈金属环流动,在 $x=0$ 处形成两处驻波节点,一圈螺旋环和一圈圆环都被两驻波节点分成左右两部分,两者的等效电路在结构上并无差异。所以,两者响应的不同主要应归结为金属环的结构差异导致两者的等效电感或电容不同所导致^[21-22]。具体来看,金属环(一圈螺旋环或一圈圆环)通过驻波节点被分成左右两部分,两部分均形成平行板(垂直于 y 轴)电容。表面电流沿着一圈金属环的左右两部分流动(图8),在金属环上形成了等效电感,而等效电感的大小与环的尺寸相关,电容电感并联谐振。其中,一圈螺旋环与起始半径相同的圆环相比,由于两驻波节点距离相差较小,所以等效电容 C 也比较接近,而一圈螺旋环金属部分更短,其等效电感 L 更小。根据共振频率 ω_0 与等效电容 C 及等效电感 L 的对应关系: $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$,螺旋环的共振频率 ω_0 将更高。类似地,一圈螺旋环与终止半径相同的圆环相比,螺旋环共振频率 ω_0 将更低。该推测得到了图7及图8的验证。对于多圈圆环和多圈螺旋环,由于多圈圆环是分立的,环与环之间没有耦合,对THz波的共振吸收是每个分立圆环单独作用的叠加。所以,随着圆环圈数的增加,原来吸收峰的位置和幅度都几乎保持不变(图9)。与多圈圆环的情况不同,多圈螺旋环是连续变化的,这种金属环结构上的不同,使得在评估多圈螺旋环的等效电路时,需要考虑环与环之间的相互影响。通过图3和图5可知,多圈螺旋环的最内环和最外环产生了多圈圆环不具备的耦合作用。所以,当电流在多圈螺旋环金属谐振器上流过时,存在大小相当、方向相反的两种电流,也是并联谐振。但是,由于螺旋环在最内环和最外环间的相互耦合还

形成了新的电容器,导致原有的等效电容值随着螺旋环数的向内增加而减小。另一方面,随着螺旋环圈数的增加,最外圈所形成的等效电感值没有发生改变。所以,随着螺旋圈数的向内增加,电容正对面积减小,电容值变小,所以其共振频率 ω_0 更大。这种差异使连续螺旋环超材料的性能调节更为灵活,吸收峰强度也可随着螺旋环的终止位置而发生变化。另外,根据式(2)和表面电流分布(图10),可计算出图10(a-c)的理论吸收峰为1.862 THz,图10(d-e)的理论吸收峰为2.394 THz,图10(f)的理论吸收峰为2.792 THz,均分别与仿真结果相似。

比较三圈圆环超材料吸收曲线(图9)与三圈螺旋环超材料吸收曲线(图2)还发现在响应强度方面的差异:前者的中频模式的响应强度(91.26%)比低频模式的响应强度(53.59%)高出约37%,而高频模式的响应强度(98.80%)比中频模式的响应强度(91.26%)继续增加、但增加幅度仅约7%,即吸收峰强度随着频率递增。与之不同,三圈螺旋环超材料表面谐振器的不对称耦合作用虽然产生了三个太赫兹响应(1.624 THz、2.634 THz和3.236 THz),但是频率最高的响应(3.234 THz)的强度(26.98%)比中频响应(2.634 THz)的强度(99.21%)低72.23%,中频响应(2.638 THz)的强度(99.21%)比低频响应(1.624 THz)的强度(86.44%)高9.77%,即中频吸收峰的峰值最强(图2)。这与三圈圆环超材料的吸收峰强度随着频率递增的现象明显不同(图9)。三圈圆环超材料的响应强度的差别可以从其低频模式的表面电流分布(图10(c))看出,在驻波节点的左侧部分只存顺时针的电流;不同的是,根据三圈圆环的中频模式(图10(e))和低频模式(图10(f))的电流分布可知,在驻波节点左侧部分顺时针方向占主导,同时也存在逆时针方向电流,此时方向相反的电流所产生的感应磁场相互抵消,产生更强的吸收。三圈螺旋环超材料的低频响应和中频响应也是如此,表面谐振器上的表面电流形成驻波的左侧与右侧均有相反方向的表面电流通过,此时方向相反的电流所产生的感应磁场相互抵消,产生更强的吸收,使得三圈螺旋环超材料的低频和中频的响应强度相差也并不大(约10%)。由此可见,虽然螺旋环超材料对太赫兹的响应方式和圆环超材料对太赫兹的响应方式有相似之处,但是由于连续螺旋环之间的耦合作用,使得螺旋环超材料的低频和中频的太赫兹响应强度的相差更小,与圆环超材料的情况明显不同。

3 结语

设计了一种具有螺旋环结构的新型超材料吸波器. 通过研究不同圈数的螺旋环超材料的太赫兹响应特性,发现螺旋环超材料对入射的电磁波在金属环附近产生驻波,形成损耗,由此产生特定的频率吸收. 而且,这种超材料的吸收响应频率可以通过驻波公式计算得到、具有可预见性. 此外,我们还发现螺旋环超材料与圆环超材料具有类似的吸波机理. 值得注意的是,在形成损耗时,由于螺旋环半径是连续变化的,所以螺旋环能够产生比单独的圆环更强的耦合作用,同时使所产生的谐振不完全对称,其吸收峰的位置更加依赖螺旋环超材料的结构参数. 所以,在材料参数不变的情况下,仅通过表面螺旋环的环数或环的起始和终止位置,就能有效地调节这种螺旋环超材料的太赫兹响应性能,完全有别于传统超材料的调节机理. 本文成果对超材料的理论及设计研究有新的启示.

References

- [1] Wei A, Lee M, Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(19): 2563–2565.
- [2] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs[J]. *Semiconductor Science & Technology*, 2005, **20**(7): S266–S280.
- [3] Ferguson B, Wang S, Gray D, et al. T-ray computed tomography. [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(15): 1312–1314.
- [4] Liu H B, Plopper G, Earley S, et al. Sensing minute changes in biological cell monolayers with THz differential time-domain spectroscopy [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, **22**(6): 1075–1080.
- [5] Abraham E, Younus A, Aguerre C, et al. Refraction losses in terahertz computed tomography [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(10): 2050–2055.
- [6] Brucherseifer M, Nagel M, Bolivar P H, et al. Label-free probing of the binding state of DNA by time-domain terahertz sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(24): 4049–4051.
- [7] Jansen C, Priebe S, M?ller C, et al. Diffuse scattering from rough surfaces in THz communication channels [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(2): 462–472.
- [8] Veselago V G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ [J]. *Physics-Uspokhi*, 1968, **10**(4): 509.
- [9] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966–3969.
- [10] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977–980.
- [11] HUANG Rui, XU Xiang-Dong, AO Tian-Hong, et al. Modulation of response frequency and absorption bandwidth for terahertz metamaterials [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (黄锐, 许向东, 敖天宏, 等. 太赫兹超材料响应频率及频带的调控红, 外与毫米波学报), 2015, **34**(1): 44–50.
- [12] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20): 1586–1594.
- [13] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization [J]. *Physical Review B*, 2008, **78**(24): 1879–1882.
- [14] Zhu J, Eleftheriades G V. A Compact Transmission-Line Metamaterial Antenna With Extended Bandwidth [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2009, **8**(4): 295–298.
- [15] Wang D, Qiu C, Hong M. Coupling effect of spiral-shaped terahertz metamaterials for tunable electromagnetic response [J]. *Applied Physics A*, 2014, **115**(1): 25–29.
- [16] Peng X Y, Wang B, Lai S, et al. Ultrathin multi-band planar metamaterial absorber based on standing wave resonances [J]. *Optics express*, 2012, **20**(25): 27756–27765.
- [17] Bahl I, Bhartia P. *Microwave Solid State Circuit Design* [M]. (郑新, 赵玉洁, 刘永宁等, 译. 北京: 电子工业出版社), 2006: 212–214.
- [18] Kuznetsova S M, Andryeuskii A, Lavrinenko A V. Applicability of point dipoles approximation to all-dielectric metamaterials [J]. *Physical Review B*, 2015, **92**(3): 1–10.
- [19] LU Jun, CHEN Xin-Yi, WANG Jian-Bo. Effects of circular unit of FSS on the performance of wave absorbing materials [J]. *Acta Physica Sinica* (卢俊, 陈新邑, 汪剑波. 圆环单元 FSS 对吸波材料特性的影响研究, 物理学报), 2008, **57**(11): 7200–7203.
- [20] WANG Jian-Bo, XIAO Hong-Liang, CHEN Gui-Bo, et al. Influence of ring FSS on improving characteristics of radar absorbing materials [J]. *Chinese Optics* (汪剑波, 肖洪亮, 陈桂波, 等. 圆环单元 FSS 对改善吸波体雷达吸波特性的影响 中国光学), 2010, **03**(3): 296–300.
- [21] Zhang F, Liu Z, Qiu K, et al. Conductive rubber based flexible metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(6): 061906.
- [22] Zhou J, Economon E N, Koschny T, et al. Unifying approach to left-handed material design [J]. *Optics Letters*, 2008, **31**(24): 3620–3622.