

太赫兹超材料响应频率及频带的调控

黄锐, 许向东*, 敖天宏, 何琼, 马春前, 温粤江, 孙自强, 蒋亚东

(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,
光电探测及传感集成教育部重点实验室, 四川成都 610054)

摘要:自然界中很多材料在太赫兹 (THz) 频段没有电磁响应, THz 超材料的出现为太赫兹技术的发展和應用带来了新的机遇. 但目前超材料太赫兹响应的调节方式比较繁琐, 影响了理论与应用研究的开展. 作者提出一种调制太赫兹超材料响应的简易新方法, 即将超材料的结构单元整体按比例地放大和缩小. 仿真结果表明, 已满足阻抗匹配条件的超材料结构经整体比例变化之后, 仍然满足阻抗匹配条件; 而且, 调整后超材料的吸收频率与尺寸变化的倍数成反比; 令人惊奇的是, 超材料的响应频带也随着单元尺寸的整体缩小而变宽. 通过这种简易的尺寸变化方式, 我们可以利用普通的超材料结构, 得到一定范围内对任意入射频率具有完美吸收 (吸收峰值大于 98%) 的太赫兹超材料. 这种调制方式使超材料的设计变得更加简化, 为超材料的理论与应用 (特别是在器件中的应用) 研究提供了更广阔的空间.

关键词:超材料; 太赫兹; 吸收频率; 响应频带; 调控
中图分类号:0441;0451 **文献标识码:**A

Modulation of response frequency and absorption bandwidth for terahertz metamaterials

HUANG Rui, XU Xiang-Dong*, AO Tian-Hong, HE Qiong, MA Chun-Qian,
WEN Yue-Jiang, SUN Zi-Qiang, JIANG Ya-Dong

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, Ministry of Education Key Laboratory of Photoelectric Detection & Sensor Integration Technology, School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), Chengdu 610054, China)

Abstract: Most materials in nature do not have electromagnetic response in the terahertz (THz) frequency range. THz metamaterials that were invented recently provide an opportunity for the development and application of THz technology. However, the conventional methods for modulating the THz metamaterials are complicated. In this paper, we present a novel and simple way to adjust the THz metamaterials just by zooming in and out the THz metamaterial's unit. Simulation results show that THz metamaterials are still impedance-matching, even after the ratio change. In addition, the resonance frequency changes inversely with the unit ratio. Absorption bandwidth will be widened when the THz metamaterial's unit is shrunk. According to our approach, any response frequency of THz metamaterials (a value of absorption peak is greater than 98%) can be acquired within specific frequency bands. This modulation simplifies the THz metamaterial design and broadens the applications of metamaterials in detectors.

Key words: metamaterials, Terahertz, response frequency, absorption bandwidth, modulation

PACS: 87.50.U-, 78.67.Pt, 77.55.-g

引言

受限于有效的太赫兹源和探测技术, 太赫兹 (THz) 研究在很长一段时间内停滞不前. 近年, 随着

材料科学、激光工程和纳米技术的快速发展, 太赫兹工程技术取得长足进步, 成为当今的国际研究重点和热点. 一些具有十分独特性能的材料或器件, 例如完美透镜^[1]、隐身斗篷^[2,3]、电磁波完美吸收^[4]等,

收稿日期: 2013-05-13, 修回日期: 2014-07-08

Received date: 2013-05-13, revised date: 2014-07-08

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

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

作者简介 (Biography): 黄锐 (1989-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事超材料设计、制造及应用研究. E-mail: huangrui8@163.com

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

相继被研制出来,极大地促进了理论及应用研究的发展。

太赫兹探测器通过检测穿过物体的太赫兹光子的变化情况,实现对物体的形貌或成分的探测.这种探测器具有检测速度快、精度高、透过性强、损伤小等其它探测技术无法具备的优点,在军事及民用当中具有广泛的应用前景^[5-7].遗憾的是,目前太赫兹探测器的发展受到较大的限制,其原因主要是缺乏有效吸收太赫兹光子的材料.电磁超材料^[8,9]的出现很可能使太赫兹应用技术,尤其是使太赫兹电磁波成像关键技术获得突破发展。

电磁超材料是指一些具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料^[10].超材料的特性可以用有效介电常数和磁导率来表征^[11],而超材料的有效介电常数和磁导率则可通过材料在关键物理尺寸上的结构有序设计来调控.2008年,Landy最先提出具有三层式结构的吸收器,并进行了理论和实验研究,该超材料吸波体在11.5 GHz频率内对入射电磁波的吸收率近100%^[4].在此基础上,Hu Tao设计出入射波角度可调的超材料吸波体,实验和仿真结果均证明在1.6 THz波段的吸波率高达97%,并且在 $0^\circ \sim 80^\circ$ 的广角范围内维持吸波率在99%以上^[12].此外,李磊等人研究了超材料金属谐振环的形貌变化对超材料的太赫兹响应性能的影响^[13].Lee Butler等人研究了介质厚度以及单元尺寸变化对超材料的太赫兹响应特性的影响^[14].上述研究表明,通过改变超材料的几何尺寸能够获取具有不同响应频率的太赫兹超材料.遗憾的是,上述研究均未说明其中具体的变化规律.此外,超材料的厚度主要取决于介质层的厚度,而目前三层太赫兹超材料的介质厚度通常在 $4 \sim 8 \mu\text{m}$ 左右^[4,12,15].较厚的膜层将使器件发生形变、失效,从而限制了超材料在器件,尤其是太赫兹探测器当中的应用。

目前为止,常用的超材料性能的调节方式是通过改变超材料的形貌、金属及介质材料的搭配等来实现^[16-18].由于阻抗匹配^[19]将随参数而变化,若仅改变结构的某一个参数,很可能由此使超材料的阻抗失配,影响太赫兹响应吸收.所以,形貌、材料等参数需要重新整体地进行协调.而且,这种常规方式的工作量大、效率低,不利于理论与应用研究的深入开展^[13,14,20,21].除此之外,是否还有其它更加简便、有效的调控途径呢?本文提出一种崭新的超材料性能调控方法,即在形貌及材料搭配不变的情况下,按比例地缩小或放大超材料的单元结构,就能实现太赫

兹超材料的吸收频率及频段的有效调控.此方法可以轻松地获得对特定频段光子的选择吸收.重要的是,还能使超材料变得更薄,响应频带更宽,更加有利于器件应用。

1 模拟方法

目前三层的超材料由表层电谐振器、介质层及底层金属层组成,其中,底层金属层可分为金属线型和平面型,分别如图1所示.图1(a)超材料的单元结构参数: $a = 34 \mu\text{m}$ 、 $b = 50 \mu\text{m}$.从上至下,第一层为电谐振器结构层,其中,电谐振器的长宽都为 $c = 30 \mu\text{m}$,线宽和开口为 $w = 3 \mu\text{m}$;中间层为厚度为 $t = 8 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺(介电常数为3.5,损耗角正切0.0027)介质层;底层为金属线,其长 $d = 48 \mu\text{m}$ 、宽 $e = 4 \mu\text{m}$,该金属线陷入聚酰亚胺中;超材料的下方为对太赫兹透明的GaAs衬底^[15].其中,表层电谐振器与底层金属线都为电导率 $\delta = 4.561 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、厚度200 nm的金.图1(b)超材料的单元结构参数: $a = 36 \mu\text{m}$ 、 $b = 25.9 \mu\text{m}$ 、 $c = 10.4 \mu\text{m}$ 、 $w = 3 \mu\text{m}$ 、 $d = 1.4 \mu\text{m}$ 、 $t_1 = t_2 = 8 \mu\text{m}$,表层及底层都为厚200 nm的金.中间层及衬底都为聚酰亚胺^[12].

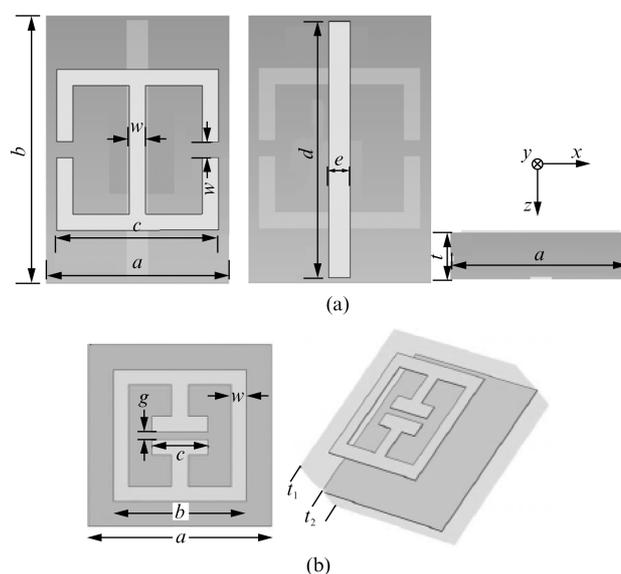


图1 超材料单元结构 (a)金属线结构, (b)平面结构
Fig. 1 Unit structures of metamaterial absorbers with (a) wire structure, and (b) Plane structure

使用 CST microwave studio 2011 电磁仿真软件中的频域算法对所构建的模型进行计算,结构单元 X 及 Y 方向边界设定为 (unit cell) 周期边界,即结构单元在 X 和 Y 方向无限周期排布,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, $R = |S_{11}|^2$ 为电磁波的反射率, $T = |S_{21}|^2$ 为透射率, S_{11} 为反射系数, S_{21} 为传输系数.

2 结果与讨论

对图 1 超材料结构进行仿真的结果如图 2 所示. 由图 2(a) 可见, 图 1(a) 所示超材料的反射系数 S_{11} 在 1.133 THz 时为极小值 0.078, 对应的传输系数 S_{21} (0.098) 也很小. 由仿真的 S 参数提取超材料吸波体的等效阻抗实部, 在此频率下沿 Z 轴正向传播的等效阻抗实部为 0.872, 沿 Z 轴负向传播的等效阻抗实部为 0.125. 可见在 1.133 THz 时, 超材料吸波体一侧与自由空间近似阻抗匹配, 另一侧与自由空间阻抗不匹配, 从而在吸收频带内同时实现反射率和传输率最小, 吸收率最大. 通过式 (1), 计算获得吸收率的最大值 (98.40%), 其响应频带 (定义为吸收率大于 90% 的频率范围) 为 21.6 GHz. 由图 2(b) 可见, 图 1(b) 所示超材料在 1.624 THz 时, 反

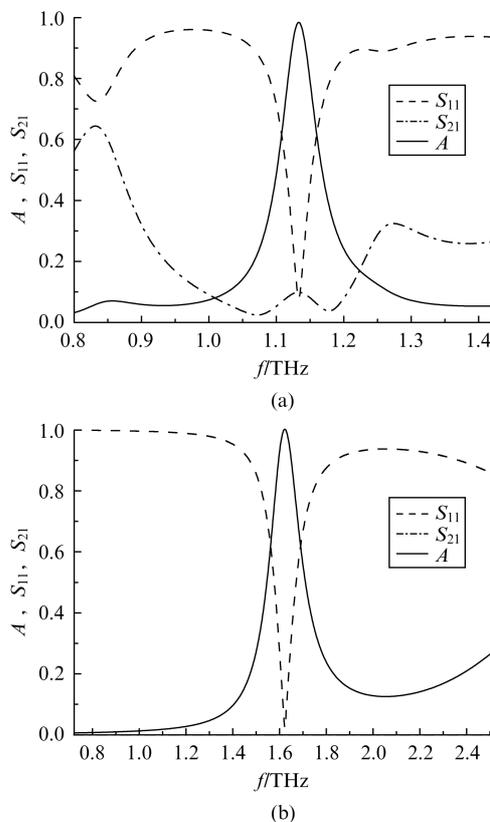


图 2 超材料仿真结果 (a) 金属线结构 (图 1(a)) (b) 平面型结构 (图 1(b))

Fig. 2 Simulation results of metamaterials with (a) wire structure (Fig1(a)) and (b) plane structure (Fig1(b))

射系数 S_{11} 为最小值 0.023, 传输系数 S_{21} 为 0, 沿 Z 轴正向传播的等效阻抗实部为 1.014, 沿 Z 轴负向传播的等效阻抗实部为 0.005, 满足阻抗匹配, 此时吸收率达到最大 (99.94%), 响应频带为 56.5 GHz.

前人虽然设计出了如图 1 所示的太赫兹超材料, 但是, 这些超材料只有特定的响应频率, 如 1.133 THz、1.624 THz^[12,15]. 若需得到其它响应频率的太赫兹超材料, 需要重新设计结构、并优化其中的结构参数.

对图 1(a) 的单元结构, 在其它参数不变的情况下, 如果只减小介质层厚度, 将原来厚度为 8 μm 的介质层减小到 6 μm , 其 S 参量及吸收如图 3(a) 所示. 结果显示, 在介质厚度由 8 μm 减小到 6 μm 后, 其吸收频率为 1.126 THz, 介质层的改变对响应频率的位置影响不大. 但是, 沿 Z 轴正向传播的等效阻抗实部为 1.378, 沿 Z 轴负向传播的等效阻抗实部为 0.107, 此时的阻抗匹配程度明显低于 8 μm . 由于反射增强, 使吸收率由变化前的 98.41% (图 2(a)) 明显地减少到 86.56% (图 3(a)). 类似地, Lee

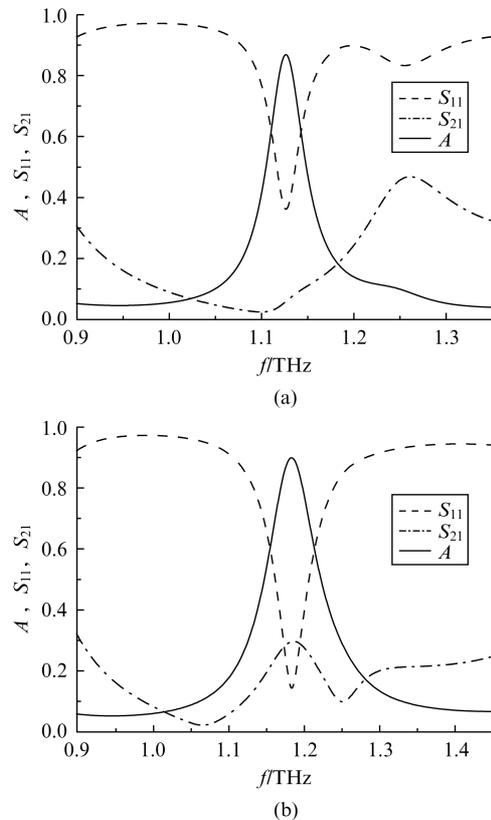


图 3 超材料单元单一参数变化的 S 参量及吸收 (a) 介质为 6 μm , (b) 电谐振器变为 28×28

Fig. 3 S parameter and light absorption of metamaterials if (a) the thickness of polyimide is 6 μm , and (b) the size of electric resonator has been changed into 28×28

Butler 的研究也发现介质厚度由 $8\ \mu\text{m}$ 减小到 $7\ \mu\text{m}$ 后,超材料的太赫兹吸收率由 99.00% 减小到 93.00% [14]. 由此可见,如果仅改变介质层的厚度,将使原有的阻抗匹配条件受到破坏,而且也难以由此获得对其它频率光子的响应吸收.

对于图 1 所示的单元结构,在其他参数不变的情况下,如果只将电谐振器的单元尺寸缩小为 $28\ \mu\text{m} \times 28\ \mu\text{m}$ (原来 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$),其线宽、缝宽及其他参数保持不变,其 S 参量及吸收如图 3(b) 所示. 这种变化之后,超材料的吸收频率变为 $1.182\ \text{THz}$,响应频率随着电谐振器的减小向高频移动(蓝移). 沿 Z 轴正向传播的等效阻抗实部为 0.806 ,沿 Z 轴负向传播的等效阻抗实部为 0.194 ,同样地,此时的阻抗匹配程度低于 $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$. 由于透射增强,这种尺寸变化使吸收率降低到 89.36% (图 3(b)). 我们注意到,这种超材料单元尺寸缩小导致超材料吸收频率蓝移的现象也曾类似地被 Lee Butler 等人发现 [14]. 所以,如果仅改变表层电谐振器的大小,虽然能改变超材料的响应频率,但也将破坏原有的阻抗匹配条件. 图 3(a) 及 (b) 结果清楚表明:如果仅改变超材料的某一结构参数,将破坏原有的匹配条件,导致超材料的太赫兹吸收率明显减小. 若需重新得到某一特定频率的匹配参数,需要花费更长的时间协调、优化其它的结构参数.

为此,我们在超材料形貌及组成材料不变的情况下,将图 1(a) 结构整体调节为原来 ($a = 34$ 、 $b = 50$ 、 $c = 30$ 、 $w = 3$ 、 $t = 8$ 、 $d = 48$ 、 $e = 4$, Au 层的厚度为 200nm) 的 2 倍 ($a = 68$ 、 $b = 100$ 、 $c = 60$ 、 $w = 6$ 、 $t = 16$ 、 $d = 96$ 、 $e = 8$, Au 层的厚度变为 $400\ \text{nm}$,其它变化类推)、 $3/2$ 倍、 $1/2$ 倍及 $1/5$ 倍,相应的 S 参量及吸收率分别如图 4(a)、(b)、(c)、(d) 所示.

图 4 表明,当超材料单元结构的几何参数变为原来的 2 倍时,中心吸收频率变为 $0.569\ \text{THz}$,为原来频率 ($1.133\ \text{THz}$) 的 $1/2$ 倍,沿 Z 轴正向传播的等效阻抗实部为 0.741 ,沿 Z 轴负向传播的等效阻抗实部为 0.111 ,近似满足阻抗匹配条件,其吸收峰值达 93.94% . 当超材料单元结构的几何参数变为原来的 $3/2$ 倍时,中心吸收频率变为 $0.747\ \text{THz}$,为原来频率 ($1.133\ \text{THz}$) 的 $2/3$ 倍,沿 Z 轴正向传播的等效阻抗实部为 1.070 ,沿 Z 轴负向传播的等效阻抗实部为 0.023 ,满足阻抗匹配条件,其吸收峰值达 98.29% . 当超材料单元结构的几何参数变为原来的 $1/2$ 倍时,中心吸收频率变为 $2.256\ \text{THz}$,为原来频率 ($1.133\ \text{THz}$) 的 2 倍,沿 Z 轴正向传播的等

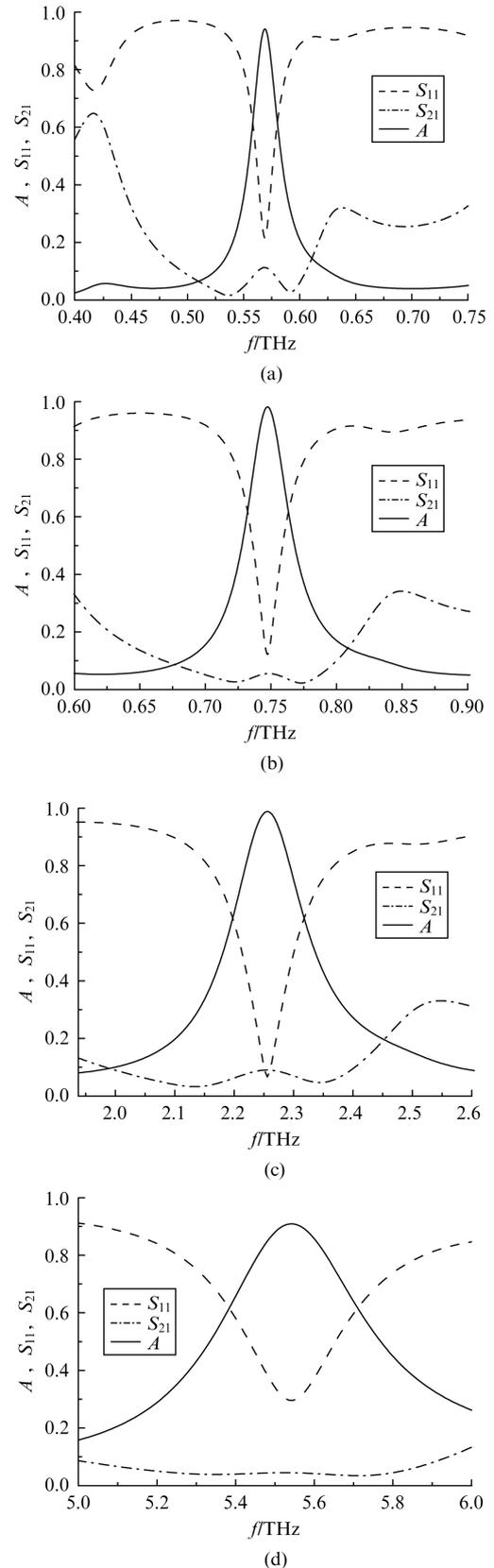


图 4 超材料单元结构整体比例变化后的仿真结果 (a) 2 倍, (b) $3/2$ 倍, (c) $1/2$ 倍, (d) $1/5$ 倍
Fig. 4 Simulation results of metamaterials after the unit has been changed into (a) 2, (b) $3/2$, (c) $1/2$, and (d) $1/5$

效阻抗实部为 1.090, 沿 Z 轴正负传播的等效阻抗实部为 0.149, 仍然满足阻抗匹配条件, 其吸收峰值达 98.81%. 当超材料单元结构的几何参数变为原来的 1/5 倍时, 中心吸收频率变为 5.540 THz, 约为原来频率 (1.133 THz) 的 5 倍, 沿 Z 轴正向传播的等效阻抗实部为 0.542, 沿 Z 轴负向传播的等效阻抗实部为 0.022, 由于电谐振器过薄使阻抗匹配程度减弱, 其吸收峰值达 90.84%. 将图 1 的两种超材料单元结构按比例进行变化 (0.2 倍到 2 倍), 响应频率的变化情况总结在图 5 中.

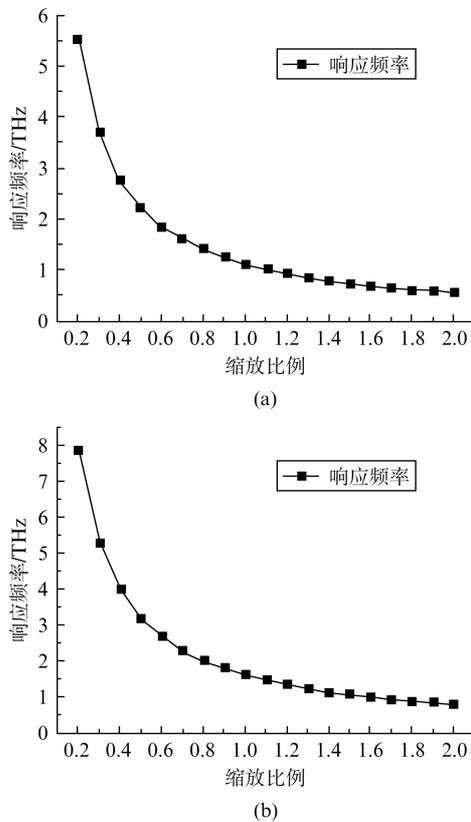


图 5 超材料单元结构的整体按比例进行变化 (0.2 倍—2 倍) 导致超材料响应频率的变化 (a) 图 1(a) 金属线结构超材料, (b) 图 1(b) 平面型超材料

Fig. 5 Frequency responses of metamaterials after the unit size has been changed from 0.2 times to 2 times (a) wire structure as shown in Fig1(a), and (b) plane structure as shown in Fig1(b)

从图 5 可以看出, 当图 1(a) 所示超材料的单元结构从 0.2 倍到 2 倍按比例变化之后, 响应频率从 5.540 THz 减小到 0.569 THz. 类似地, 对于图 1(b) 所示超材料, 其单元结构从 0.2 倍到 2 倍按比例变化之后, 响应频率从 7.846 THz 减小到 0.810 THz. 结果显示, 当结构整体缩小时, 吸收频率向高频移动 (蓝移); 而当结构整体放大时, 吸收频率则向低频

移动 (红移). 由此, 我们推断出单元尺寸整体变化导致的超材料的中心频率变化满足如下公式:

$$f_2 = \frac{f_1}{k} \quad (2)$$

其中, k 为超材料的单元结构整体缩小或放大的倍数, f_1 为变化前超材料的吸收频率, f_2 为按比例变化结构后的超材料的吸收频率.

3 吸收率及频带

值得注意的是, 图 4 还显示, 当超材料结构整体缩小为原来的 1/2 之后, 超材料的吸收频带为 48.0 GHz (图 4(c)), 与原来的 21.6 GHz (图 2(a)) 相比响应频带明显加宽. 将图 1 所示两个超材料单元结构分别从 0.2 倍到 2 倍比例变化之后, 响应频率峰值及吸收频带的仿真结果总结得到图 6.

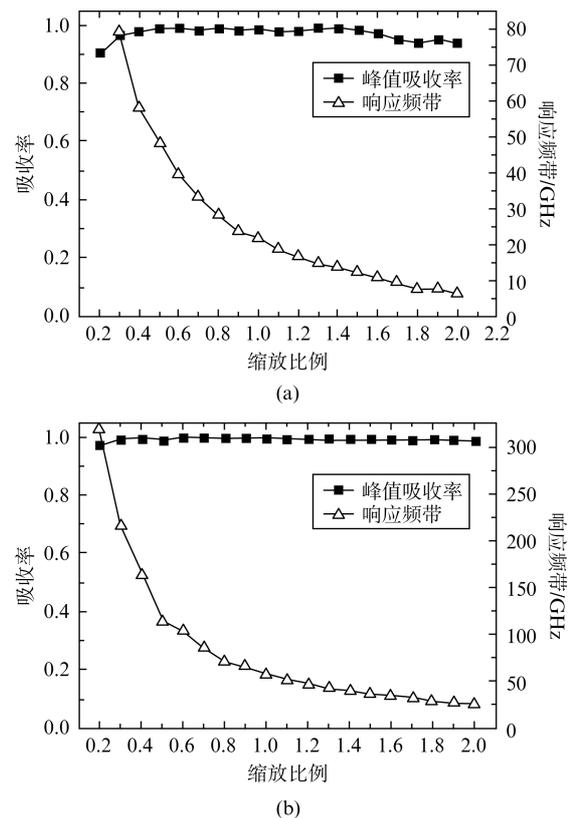


图 6 比例变化后吸收率峰值及响应频带 (a) 图 1(a) 金属线结构超材料, (b) 图 1(b) 平面型超材料

Fig. 6 THz absorbance and absorption bandwidth of metamaterials after the unit size has been changed to (a) wire structure as shown in Fig1(a), and (b) plane structure as shown in Fig1(b)

图 6 中, 实心方块为吸收率峰值随超材料单元比例变化的变化曲线, 空心三角为响应频带随超材料比例变化的变化曲线. 可以看出, 随着超材料的整体比

例变化,图 1(a)所示结构的吸收率在 90.8 ~ 99.1% 之间变化,而图 1(b)所示结构的吸收率在 97.9 ~ 99.98% 之间变化.此结果清楚地表明,这种方式的 结构变化没有破坏吸收峰值处的阻抗匹配条件.图 6 还显示,随着结构尺寸的缩小,响应频带逐渐增宽.响应频带越宽,越有利于太赫兹探测器应用.我们注意到,图 6(a)在小于 0.3 倍和大于 1.6 倍时,超材料的吸收率均有所下降.这是由于表面电谐振器过薄与过厚引起的.仿真结果表明,可以通过增加或减小电谐振器厚度的方式,将吸收率重新调节上去.

图 7 及 8 为缩放比例分别为 3/2 倍、1 倍、1/2 倍时,图 1(a)及(b)所示超材料在相应响应频率的电磁波作用下的表面电流分布的仿真结果.图 7 及 8 表明,随着超材料的缩小,其底层金属(金属线或金属平面)的电流逐渐增强,而表层电谐振器的电流却逐渐减弱.通过继续对介质厚度进行仿真,我们发现:表层电谐振器电流的减小是由于介质厚度的减小引起的.但是,单纯的介质厚度减小不能增强底层金属的电流强度.本文研究结果(图 7 及 8)表明,在介质厚度减小的情况下,通过缩小电谐振器的尺寸,可以使底层金属的电流强度获得增强,由此重新实现超材料的“完美”吸收,克服了单纯介质厚度变化在性能调控方面的缺陷.

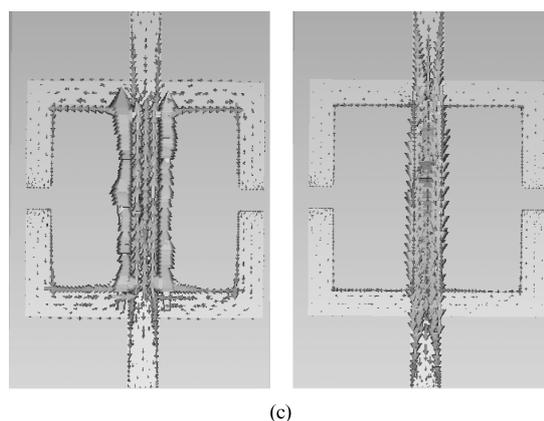
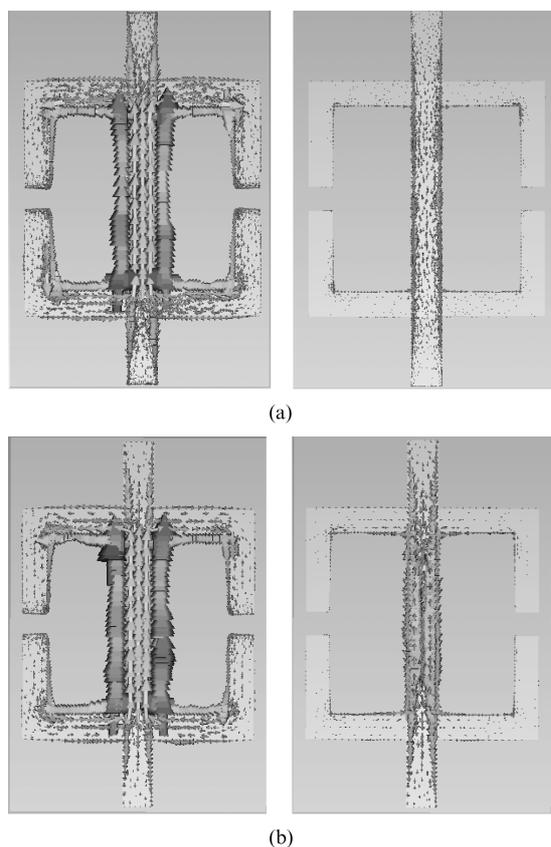


图 7 图 1(a)超材料的表面电流(a)3/2 倍 0.747 THz, (b)1 倍 1.133 THz, (c)1/2 倍 2.256 THz

Fig. 7 Surface currents of metamaterials as shown in Fig. 1(a) (a) 3/2, at 0.747 THz, (b) 1, at 1.133 THz, and (c) 1/2, at 2.256 THz

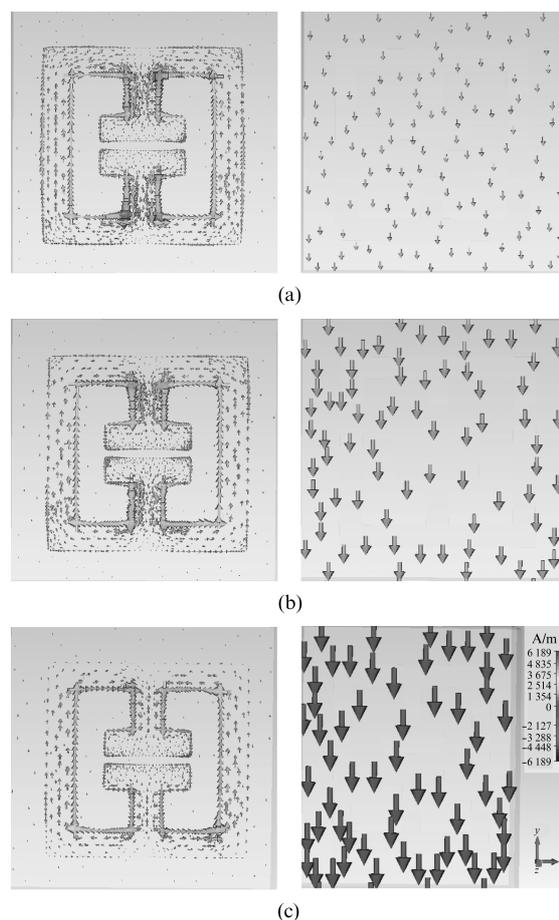


图 8 图 1b 超材料的表面电流(a)3/2 倍 1.082 THz, (b)1 倍 1.624 THz, (c)1/2 倍 3.17 THz

Fig. 8 Surface currents of metamaterials as shown in Fig. 1(b) (a) 3/2, at 1.082 THz, (b) 1, at 1.624 THz, and (c) 1/2, at 3.17 THz

图 1 所示两种超材料单元结构的区别,不仅在于其底层金属为线型结构或连续金属膜,还在于其

表层电谐振结构也明显不同(其响应频率也不同). 同样的比例仿真结果显示,无论底层为金属线结构,还是平面结构,都符合公式 2 的比例调控的频率变化和图 6 所示的响应频带的变化规律. 但是,相对底层为金属线,平面金属层的超材料不但工艺简单,而且频率的调控范围更宽. 这些结果再次证明,通过比例变化确实能够有效地调控超材料的吸收频率和响应频带.

4 结论

提出了一种通过整体按比例地缩小或放大超材料的结构单元来调控超材料的太赫兹吸收频率的新方法. 研究表明,超材料的中心吸收频率随着结构单元尺寸的缩小而增大,其频率变化符合 $f_2 = f_1/k$ 的规律. 而且,响应频带随着结构单元尺寸的缩小而增宽. 所以,在无需设计新的太赫兹超材料结构的前提下,仅通过超材料单元结构整体比例变化就能得到理想的吸收频率,并且仍然满足阻抗匹配条件. 如对图 1(a) 所示的金属线型超材料结构,可以通过按比例地放大或缩小结构,将原先为 1.13 THz 的中心吸收频率,调制到 0.6 ~ 3.7 THz 任意值,并且使其吸收率峰值保持在 95.3% 以上. 对于平面型超材料的可调制范围更广,可将原先为图 1(b) 所示的超材料结构原先的 1.6 THz 中心吸收频率,调制到 0.8 ~ 7.8 THz 任意值,并使其吸收率峰值保持在 97.9% 以上. 本文所介绍的新方法没有破坏阻抗的匹配条件,所以无需全面地重新协调超材料其它的结构参数,使超材料的设计更加灵活、简单. 而且,由于尺寸缩小还将使超材料变得更薄、更轻,同时其响应频带变得更宽,从而为超材料的探测器应用提供了新的研究途径.

References

- [1] Pendry J B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens [J]. *Contemporary Physics*, 2000, **85** (18): 3966 - 3969.
- [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977 - 980.
- [3] Ma H, Qu S B, Xu Z, et al. The design of metamaterial cloaks embedded in anisotropic medium [J]. *Chin. Phys. B*, 2009, **18**(3): 1025 - 1028.
- [4] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100** (20): 207402.
- [5] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nat. Mater.*, 2002, **1**: 26 - 33.
- [6] Sakuma H, Ikushima K, Komiyama S, et al. Spectral measurement of weak THz waves with quantum Hall detectors [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2006, **48**(3): 235 - 239.
- [7] CAO Jun-Cheng. Terahertz semiconductor detectors [J]. *Physics* (曹俊诚. 太赫兹半导体探测器研究进展. 物理), 2006, **35**(11): 953 - 956.
- [8] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77 - 79.
- [9] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, et al. Left-handed materials composed of only S-shaped resonators [J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(5): 057605.
- [10] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509 - 514.
- [11] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials [J]. *Science*, 2004, **303** (5663): 1494.
- [12] Hu T, Bingham C M, Strikwerda A C, et al. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication and characterization [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, **78**(24): 241103.
- [13] LI Lei, ZHOU Qing-Li, SHI Yu-Lei et al. The influence of different opening shapes of split-ring resonator on its transmittance in terahertz band [J]. *Acta Phys. Sin.* (李磊, 周庆莉, 施宇雷, 等. 在太赫兹波段的开口共振环的不同开口形状对透过率频率谱的影响. 物理学报), 2011, **60**(1): 019503.
- [14] Lee B, David S W, Wilbert B, et al. Design, Simulation, and Characterization of THz Metamaterial Absorber [J]. *Proc. SPIE*, 2012, **8363**: 83630J.
- [15] Hu T, Landy N I, Bingham C M, et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization [J]. *Optics Express*, 2008, **16** (10): 7181 - 7188.
- [16] Radkovskaya A, Shamonin M, Stevens C J, et al. Resonant frequencies of a combination of split rings: experimental, analytical and numerical study [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2005, **46**(5): 473 - 476.
- [17] Aydin K, Bulu I, Guven K, et al. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs [J]. *New J. Phys.*, 2005, **7**(1): 168.
- [18] Labidi M, Tahar J B, Choubani F. Meta-materials applications in thin-film sensing and sensing liquids properties [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(s4): A733 - A739.
- [19] GU Chao, QU Shao-Bo, PEI Zhi-Bin, et al. Design of a wide-band and quasi-omnidirectional tabulate metamaterial absorber in the terahertz [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (顾超, 屈绍波, 裴志斌, 等. 太赫兹宽频带准全向平板超材料吸波体的设计. 红外与毫米波学报), 2011, **30** (4): 350 - 353.
- [20] Kearney B, Alves F, Grbovic D, et al. A $\text{I}/\text{SiO}_2/\text{Al}$ single and multiband metamaterial absorbers for terahertz sensor applications [J]. *Opt. Eng.*, 2013, **52**(1): 013801.
- [21] Azad A K, Taylor A J, Smirnova E, et al. Characterization and analysis of terahertz metamaterials based on rectangular split-ring resonators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92** (1): 011119.