

## 通过附加金属条调节超材料的太赫兹响应

姚洁, 许向东\*, 陈哲耕, 戴泽林, 李欣荣, 敖天宏, 范凯, 王蒙, 邹蕊娇  
(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:**针对传统超材料的太赫兹响应调控难度大、程序复杂的缺点,提出调节超材料太赫兹响应特性的一种新方法.该方法是在传统三层超材料的结构与材料参数均不变的情况下,在中间介质层中引入一条附加的金属条,仅通过调节该金属条的位置和线宽,就能实现超材料对入射太赫兹波的响应频率、吸收峰值等的有效调节.结果显示,当附加金属条由底层向表层的方向移动时,超材料的响应频率红移.当金属条位于介质的中间位置时,超材料的吸收率达到最大(99.98%).而且,当金属条的线宽增大时,超材料的响应频率红移,吸收增强.此外,当太赫兹入射角 $\leq 45^\circ$ 时,该超材料的中心响应频率稳定、吸收率峰值较高.但是,当入射角 $> 45^\circ$ 时,超材料的响应频率蓝移、吸收率峰值明显下降.根据这种新方法,能够对超材料的太赫兹响应进行有效控制,同时避免设计超材料结构的复杂过程.

**关键词:**超材料;太赫兹;响应频带;吸收频率;调控  
**中图分类号:**TB39 **文献标识码:**A

## Adjustment of terahertz response of a metamaterial by an additional metal strip

YAO Jie, XU Xiang-Dong\*, CHEN Zhe-Geng, DAI Ze-Lin, LI Xin-Rong,  
AO Tian-Hong, FAN Kai, WANG Meng, ZOU Rui-Jiao  
(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Information,  
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract:** Considering the difficulty and complexity in adjusting the terahertz (THz) response of the traditional metamaterials (MMs), we proposed a novel method to adjust the THz response characteristics of MMs. Our MMs possess the same structural and material parameters as those of the traditional three-layer MMs, but differently, an additional metal strip is introduced in the middle dielectric layer. Through changing the position and line width of the additional metal strip, the response frequency and absorption for incident THz wave can be effectively adjusted. Results show that if the additional metal strip moves from near the bottom metal to the surface metal, the response frequency is red shifted. If the additional metal strip is located in the middle of the dielectric layer, the absorption reaches maximum (99.98%). If the width of the additional metal strip is enlarged, the response frequency is red shifted, and the absorption is increased. In addition, if the incident angle is  $\leq 45^\circ$ , both the central response frequencies of the traditional and novel MMs remain stable, and their absorptions are high. However, if the incident angle is  $> 45^\circ$ , their central response frequencies blue shift, and their absorptions decrease significantly. According to this novel method, the THz responses of MMs can be effectively adjusted, and the complex process for designing the MM structure can also be thus avoided.

**Key words:** metamaterials, terahertz, response frequency, absorption bandwidth, modulation

**PACS:** 78.67.Pt, 87.50.U-, 42.25.Bs, 62.25.Fg, 74.25.Nf

## 引言

太赫兹 (THz) 波是指在电磁波谱中位于微波与红外波之间的频率为  $0.1 \sim 10$  THz ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ) 的电磁波, 对应的波长范围为  $3 \text{ mm} \sim 30 \text{ }\mu\text{m}$ 、能量范围为  $0.4136 \sim 41.36 \text{ meV}$ <sup>[1]</sup>. THz 在电磁波谱中的特殊位置决定了它是宏观理论向微观量子理论的过渡区, 也是电子学向光子学的过渡区. 与其它电磁辐射相比, THz 波具有穿透性强、能量低、对水敏感、时域频谱信噪比高等特性. 所以, THz 技术在生物样本检测<sup>[2]</sup>、无线通信<sup>[3]</sup>、雷达成像<sup>[4]</sup>、传感<sup>[5]</sup>、医疗器械 (THz-CT)<sup>[6]</sup> 等诸多领域具有广泛的应用前景.

电磁超材料 (metamaterial) 是一种人工复合材料<sup>[7]</sup>, 这种材料能和特定频率的电磁波作用, 由此产生一些在天然材料中无法观察到的特殊物理现象, 如负折射率<sup>[8]</sup>、完美透镜<sup>[9]</sup>、逆多普勒效应<sup>[10]</sup> 等. 2008 年, Landy 率先提出了“完美吸收器” (perfect absorber) 的概念, 即通过合理地设计器件的物理尺寸及材料参数, 使入射电磁波的电磁分量与其产生耦合, 在  $11.5 \text{ GHz}$  达到了接近  $100\%$  的电磁波窄带吸收<sup>[11]</sup>. 但是, 由于该超材料的底层金属采用条状结构, 制备时需要“套刻”技术, 由此增加了工艺难度, 而且该超材料仅能与特定入射角的电磁波相耦合. 为此, Hu Tao 设计了底层为连续金属膜、入射波角度可调的超材料吸波体, 在  $1.6 \text{ THz}$  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  $99\%$  以上的吸波率<sup>[12]</sup>.

目前为止, 超材料的电磁响应特性的调节方式主要是改变超材料的谐振金属图形<sup>[13]</sup>, 或者是调整金属与介质材料的搭配<sup>[14]</sup>、单元尺寸<sup>[15]</sup> 等. 通过这些途径, 能够获取具有不同响应特性的 THz 超材料. 然而, 特定结构的传统超材料只能对特定的电磁波产生响应. 也就是说, 当超材料的材料、结构、尺寸确定之后, 超材料对电磁波的响应特性也将固定. 这种固定性使超材料对太赫兹响应的调节变得困难、复杂. 为此, 黄锐等人提出了通过整体按比例缩小或放大超材料的结构单元, 能够灵活地对超材料的 THz 响应进行有效调节<sup>[16]</sup>. 但是, 按比例缩放超材料单元将使超材料的金属图形以及膜层厚度也按比例发生变化, 增加工艺难度. 据此, 敖天宏等人提出了在结构不变的条件下, 通过改变介质层的厚度或介电常数来调节超材料响应的方法<sup>[17]</sup>. 遗憾的是, 特定介质材料的寻找也是一个漫长的探索过程. 所以, 虽然前人提出了调控 THz 超材料响应的一些方

法, 但是它们大多基于超材料的结构尺寸或材料参数的改变, 实现起来较为复杂. 为此, 本文在超材料的结构图形、金属与介质的种类及厚度均不变的前提下, 在介质层中引入一层附加的金属条, 仅通过调节该金属条的位置及线宽, 探索调节超材料的 THz 响应频率、频带、吸收率等特性的新方法.

## 1 模拟方法

传统超材料一般包括表层电谐振器、中间介质层及底层金属层三层材料. 作为对比, 本文研究的传统超材料也由表层呈环状的电谐振器、中间为聚酰亚胺介质层、底层为连续金属膜三部分构成, 如图 1 所示. 传统超材料的缺点是电磁响应单一、太赫兹响应调节困难. 为此, 本文在传统超材料 (图 1) 的介质层中新增加了一根金属条, 由此设计出一种新型的超材料, 如图 2 所示. 重要的是, 在新型超材料 (图 2) 中, 通过改变金属条在介质中的位置以及其线宽大小, 使之与底层及表层金属层的耦合情况发生变化, 从而调控超材料的 THz 响应特性. 本文设计的新型超材料 (图 2) 的具体参数包括: 介质基板选用聚酰亚胺 (PI, 介电常数为  $\epsilon = 3.5$ , 损耗角正切  $\tan\delta = 0.0027$ ); 单元的几何形状为底面面积为  $a \times a$  ( $a = 34 \text{ }\mu\text{m}$ )、厚度为  $t = 2.8 \text{ }\mu\text{m}$  的长方体; 金属层均采用金 (Au, 电导率  $\delta = 4.561 \times 10^7 \text{ S/m}$ ), 厚度均为  $200 \text{ nm}$ ; 表层金属结构为内径  $r = 11 \text{ }\mu\text{m}$ 、外径  $R = 14 \text{ }\mu\text{m}$  的 Au 环; 中间介质中附加的金属条的线宽  $e = 4 \text{ }\mu\text{m}$ , 厚度也为  $200 \text{ nm}$ . 该金属条距上下金属层的距离分别为  $t_1, t_2$  (图 2 (b) 中,  $t_1 = t_2 = 1.3 \text{ }\mu\text{m}$ ).

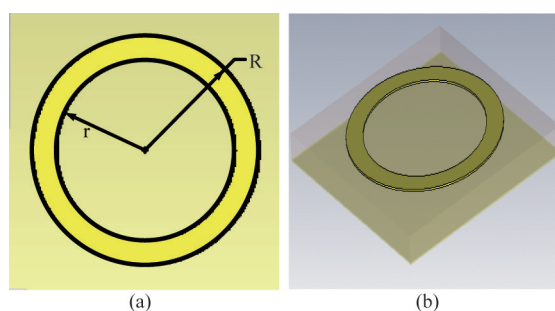


图 1 传统的超材料单元结构 (a) 俯视图, (b) 立体图  
Fig. 1 Unit cell of traditional metamaterials (a) Top view, (b) Stereogram

## 2 结果与讨论

采用 CST microwave studio 2011 电磁仿真软件中的时域算法, 分别对传统 (图 1) 及新设计 (图 2)

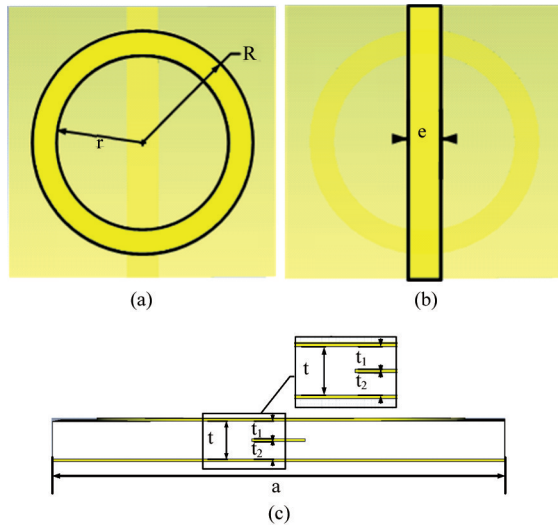


图2 含有附加金属条的新型超材料的单元结构:(a)俯视图中表层环的结构,(b)俯视图中附加金属条的结构,(c)截面图

Fig.2 Unit cell of the novel metamaterials with an additional metal strip: (a) Top view for ring, (b) Top view for strip, (c) sectional view

的超材料结构进行仿真. 结构单元 X 方向的边界条件设为 (magnetic ( $H_t = 0$ )), Y 方向的边界设定为 (electric ( $E_t = 0$ )), Z 方向的边界设定为 (open (add space)) 周期边界, 波矢 K 沿 Z 方向. 超材料吸收率的计算公式为:

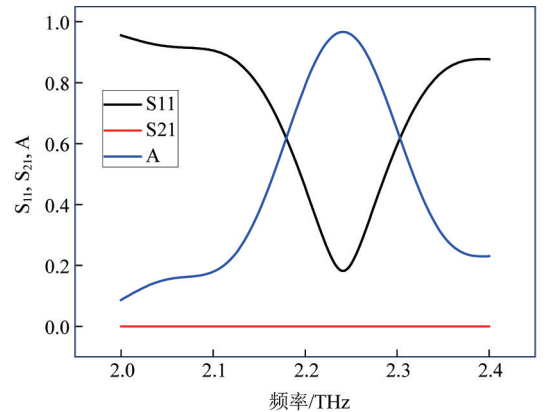
$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - R - T \quad (1)$$

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. 由于本文超材料的底层连续金属膜的厚度大于 THz 波的趋肤深度, THz 波不能透过连续金属膜传播,  $S_{21} = 0$ . 所以, 式(1)简化为:

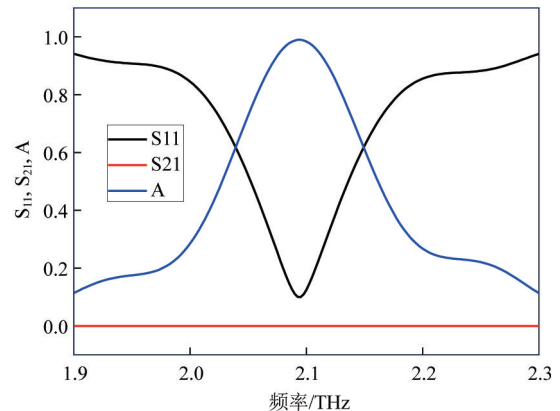
$$A = 1 - |S_{11}|^2 = 1 - R \quad (2)$$

首先, 我们研究图 1 所示的传统“夹心型”超材料结构的太赫兹响应性能. 仿真结果 (图 3 (a)) 显示, 图 1 所示的传统超材料的中心响应频率为 2.24 THz, 反射系数  $S_{11}$  为 0.182. 根据式(2), 计算得到该超材料的吸收率的最大值 (本文定义为“吸收峰值”) 为 96.68%, 其响应频带 (本文定义为吸收率大于 90% 的频率范围) 为 0.04 THz (2.22 ~ 2.26 THz). 在此基础上, 对设计的含有一层附加金属条的新型超材料 (图 2) 进行仿真, 结果如图 3 (b) 所示. 图 3 (b) 显示, 当在介质层中增加了一层附加的金属条之后, 超材料在 2.06 THz 处吸收率达到最大值 (99.63%), 其响应频带为 0.05 THz (2.04 ~ 2.09 THz). 这说明, 在超材料的形状、尺寸及膜层总厚度

均不变的情况下, 仅在传统的三层超材料结构的介质层中增加一金属条, 就能使超材料的中心响应频率从 2.24 THz 向低频方向移动到 2.06 THz, 红移了 0.18 THz, 响应频带由 0.04 THz 变为 0.05 THz. 而且, 吸收峰值由 96.68% 增强到 99.63%.



(a)



(b)

图3 (a)图1所示传统“夹心型”超材料,(b)图2所示新型超材料的仿真结果

Fig.3 Simulation results of (a) traditional metamaterials as shown in Fig. 1, (b) novel metamaterials as illustrated in Fig. 2

值得注意的是, 虽然图 1 所示的传统超材料在 2.24 THz 的吸收峰值也高达 96.68%. 但是, 其结构尺寸及材料参数一旦确定, 这种超材料的响应频率 (2.24 THz) 与带宽 (0.04 THz) 将被固定. 若需得到其它响应频率与带宽的太赫兹超材料, 则需要重新设计结构、并优化其结构与材料参数. 显然, 这种传统的调节方法程序繁琐、效率低.

考虑到附加金属条具有较高的灵活性, 能否仅通过改变该金属条的位置或线宽, 就能实现超材料的 THz 响应的有效调控? 为此, 我们接着考察金属条在 Z 轴中的位置变化对超材料的 THz 响应性能的影响. 我们固定介质层的厚度  $t = 2.8 \mu\text{m}$ 、附加金

属条的线宽  $e = 4 \mu\text{m}$ , 逐渐改变图 2 所示的新型超材料的附加金属条在 Z 轴的位置 ( $t_2$ ), 其 S 参量及吸收率分别通过仿真及式(2)进行计算, 结果如图 4 所示. 图 4 显示, 当金属条从靠近底层连续金属膜的位置逐渐地向表层方向移动, 当  $t_2$  分别为 500 nm、1 000 nm、1 500 nm、2 000 nm、2 500 nm 时, 超材料的中心响应频率分别为 2.21 THz、2.13 THz、2.04 THz、1.83 THz、1.42 THz.

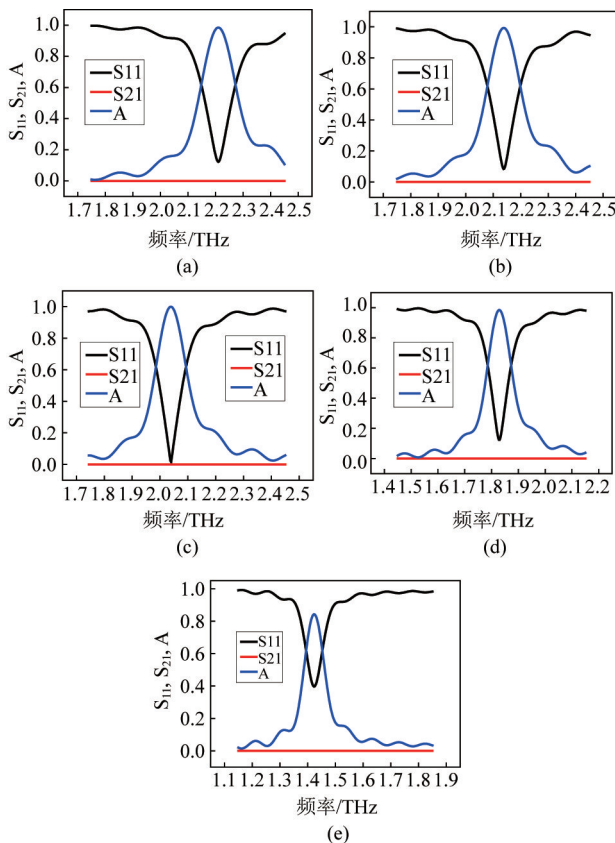


图 4 金属条在不同位置时超材料的仿真结果: (a)  $t_2 = 500 \text{ nm}$ , (b)  $t_2 = 1\ 000 \text{ nm}$ , (c)  $t_2 = 1\ 500 \text{ nm}$ , (d)  $t_2 = 2\ 000 \text{ nm}$ , (e)  $t_2 = 2\ 500 \text{ nm}$

Fig. 4 Simulation results of metamaterials with the additional metal strip at different locations: (a)  $t_2 = 500 \text{ nm}$ , (b)  $t_2 = 1\ 000 \text{ nm}$ , (c)  $t_2 = 1\ 500 \text{ nm}$ , (d)  $t_2 = 2\ 000 \text{ nm}$ , (e)  $t_2 = 2\ 500 \text{ nm}$

图 4 的仿真结果被总结在图 5 中. 其中, 黑线、红线、蓝色分别为超材料的中心频率、频带、吸收率随附加金属条的位置变化而变化的曲线. 图 5 说明, 当金属条由底层向表层方向移动时, 超材料的中心响应频率发生红移. 而且, 红移量随着距离的增大而增大. 这可能与金属条与表层及底层金属的耦合作用变化有关. 此结论将得到本文后面研究成果的证实.

接着, 我们继续考察附加金属条的位置变化对超材料的响应频带及吸收峰值的影响. 图 4 与图 5 结果显示, 当  $t_2$  分别为 500 nm、1 000 nm、1 500 nm、2 000 nm 时, 超材料的响应频带分别为 0.008 THz、0.008 THz、0.007 THz、0.006 THz, 超材料在相应中心频率处的吸收峰值分别为 98.50%、99.30%、99.98%、98.46%. 当  $t_2 = 2\ 500 \text{ nm}$  时, 由于超材料的吸收峰值仅为 84.24% ( $< 90\%$ ), 所以其响应频带为 0 THz. 为了更好地评价附加金属条的位置对超材料的响应频带及吸收峰值的影响, 我们采用如下公式计算频带及吸收峰值的均方差<sup>[18]</sup>:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2]} \quad (3)$$

其中,  $\bar{x}$  表示  $x_i$  的平均值. 计算表明, 图 5 所示的中心响应频率、响应频带、吸收峰值的均方差分别为  $2.83 \times 10^{-1}$ 、 $2.99 \times 10^{-2}$ 、 $5.95 \times 10^{-2}$ . 这说明, 金属条位置的改变对超材料中心响应频率的影响大于其对响应频带和吸收峰值的影响. 当附加金属条与表层金属环的间距较大时, 可将它们对超材料响应的贡献看成简单叠加. 但是, 当附加金属条距离底层连续金属膜的间距为 2 500 nm 时, 金属条的上表层距离表层金属环的下表层仅 100 nm. 此时, 超材料的阻抗匹配性将减弱, 导致超材料的吸收峰值发生明显的变化.

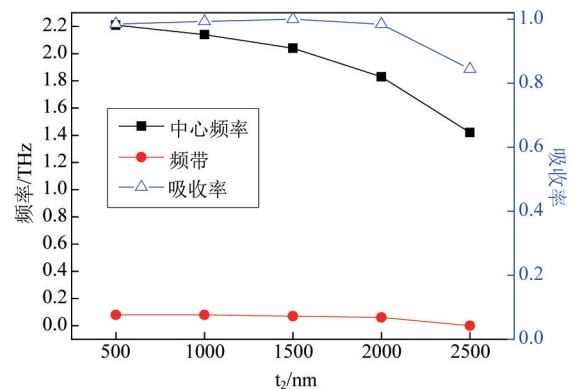


图 5 金属条在不同位置时, 超材料的响应频率、频带及吸收率的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the response frequency, frequency band, and absorbance of the metamaterials with the additional metal strip at different locations

在固定金属条在 Z 轴的位置  $t_2 = 1\ 500 \text{ nm}$  的情况下, 本文接着考察附加金属条的线宽变化对超材料的太赫兹响应特性的影响. 当附加金属条的线宽  $e$  分别为  $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$  时, S 参量

及超材料吸收峰值分别通过仿真及公式(2)进行计算,结果如图6所示.

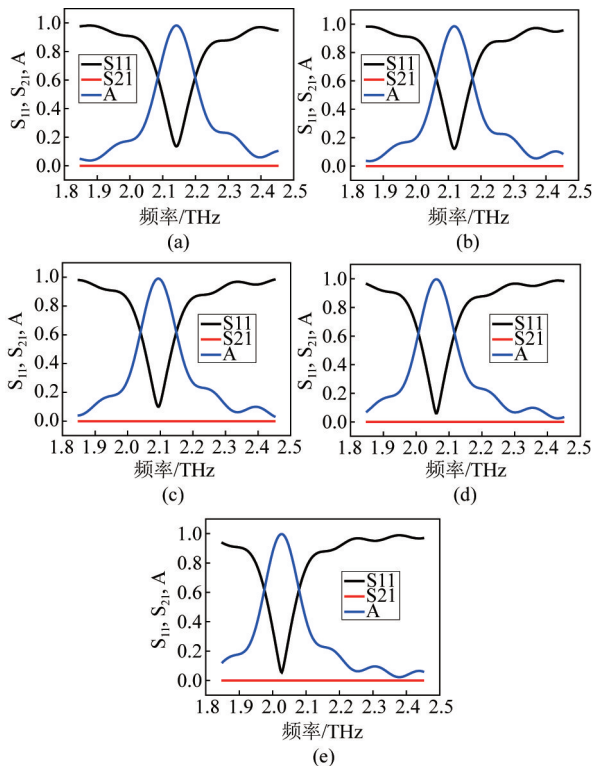


图6 金属条不同线宽时,超材料的仿真结果:(a) $e = 1 \mu\text{m}$ , (b) $e = 2 \mu\text{m}$ , (c) $e = 3 \mu\text{m}$ , (d) $e = 4 \mu\text{m}$ , (e) $e = 5 \mu\text{m}$   
Fig. 6 Simulation results of the metamaterials with the additional metal strip in different line widths: (a) $e = 1 \mu\text{m}$ , (b) $e = 2 \mu\text{m}$ , (c) $e = 3 \mu\text{m}$ , (d) $e = 4 \mu\text{m}$ , (e) $e = 5 \mu\text{m}$

我们把图6的仿真结果总结在图7中.其中,黑线、红线、蓝色分别为超材料的中心响应频率、频带、吸收峰值随附加金属条的位置变化而变化的曲线.图7表明,当固定金属条位置 $t_2 = 1500 \text{ nm}$ 时,在金属条的线宽由 $1 \mu\text{m}$ 增加到 $5 \mu\text{m}$ 的过程中,超材料的中心响应频率向低频方向移动(即吸收频率红移).当金属条的线宽 $e$ 分别为 $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 时,超材料的中心响应频率分别为 $2.14 \text{ THz}$ 、 $2.12 \text{ THz}$ 、 $2.09 \text{ THz}$ 、 $2.06 \text{ THz}$ 、 $2.03 \text{ THz}$ .

此外,当金属条的线宽 $e$ 分别为 $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 时,超材料的响应频带分别为 $0.007 \text{ THz}$ 、 $0.007 \text{ THz}$ 、 $0.007 \text{ THz}$ 、 $0.007 \text{ THz}$ 、 $0.007 \text{ THz}$ ,超材料在相应中心频率处的吸收峰值分别为 $98.17\%$ 、 $98.53\%$ 、 $98.99\%$ 、 $99.64\%$ 、 $99.70\%$ .据(3)式,计算获得在金属条的线宽发生变化时,超材料的中心响应频率、响应频带、吸收峰值的均方差分别为 $3.91 \times 10^{-2}$ 、 $0$ 、 $6.01 \times 10^{-3}$ .这说明,金属条的线宽变化对中心响应频率的影响大于其对吸收峰值的

影响,而超材料的响应频带与金属条线宽大小的改变无关.

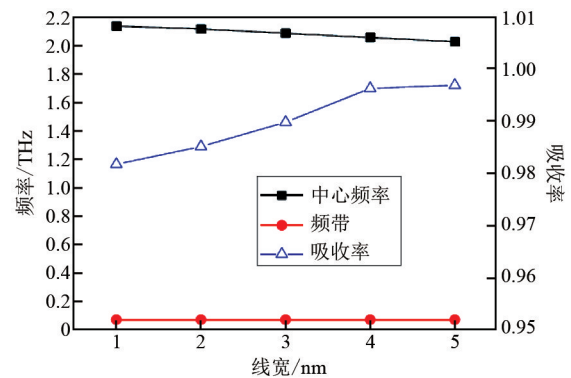


图7 金属条不同线宽的响应频率、频带及吸收率的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the response frequency, frequency band and absorbance of the metamaterials with the additional metal strip in different line widths

为了深入研究附加的金属条对超材料 THz 响应的影响,本文继续分析不同情况下的表面电流、损耗等关键参数.首先,我们考察金属条在 Z 轴上的位置变化对不同金属层的表面电流的影响.为此,在介质层厚度 $t$ 为 $2.8 \mu\text{m}$ 、金属条线宽 $e$ 为 $4 \mu\text{m}$ 时,逐渐改变图2所示的新型超材料的附加金属条在 Z 轴的位置( $t_2$ ).当 $t_2$ 为 $500 \text{ nm}$ 、 $1000 \text{ nm}$ 、 $1500 \text{ nm}$ 、 $2000 \text{ nm}$ 、 $2500 \text{ nm}$ 时,图8从左至右分别显示表层、中间、及底层金属的表面电流.结果显示,在金属条由靠近底层逐渐地向表层方向移动的过程中,超材料中表层金属环、附加金属条以及底层连续金属膜上的表面电流均增大.其中,附加金属条与表层金属环之间的耦合作用不断增强,两者重叠部分的表面电流强度逐渐增大,方向与 y 轴的夹角也不断变大,由此导致超材料的响应频率发生红移(图5).其中,当金属条的位置为 $t_2 = 1500 \text{ nm}$ 时,附加金属条与底层连续金属膜和表层金属环的耦合作用最强,超材料的吸收峰值达到最大( $99.98\%$ ).

当金属条位置 $t_2$ 分别为 $500 \text{ nm}$ 、 $1000 \text{ nm}$ 、 $1500 \text{ nm}$ 、 $2000 \text{ nm}$ 、 $2500 \text{ nm}$ 时,超材料沿 Z 轴的损耗如图9所示(注:为便于展示,图9中的损耗图旋转了 $90^\circ$ .下面的图11也类似).结果显示,在附加金属条由靠近底层连续金属膜的位置逐渐向表层方向移动的过程中,超材料沿 Z 轴的损耗主要分布在以环为轨迹的表层金属环与附加金属条之间的介质中.损耗强度随着 $t_2$ 的增加而增强,损耗体积减少.但是,当 $t_2 = 2500 \text{ nm}$ 时,附加金属条距离表层

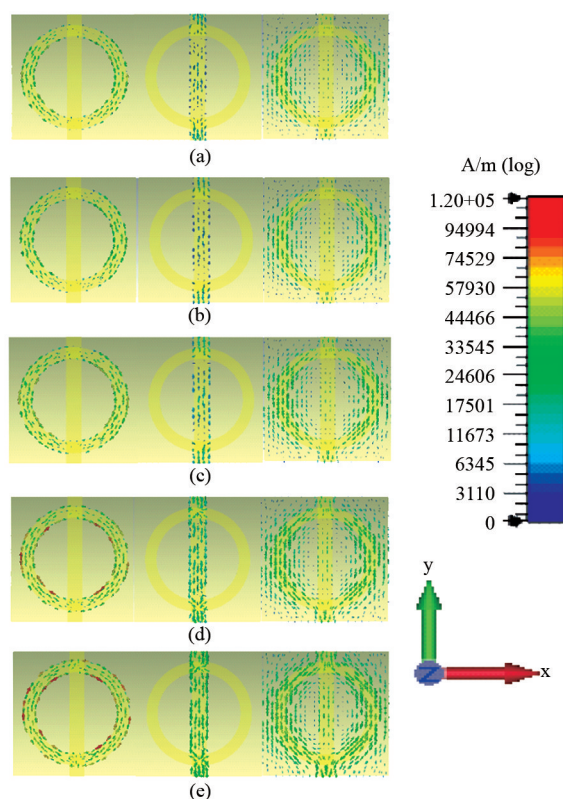


图8 金属条在不同位置时,超材料的表面电流分布:(a)  $t_2 = 500$  nm, (b)  $t_2 = 1\ 000$  nm, (c)  $t_2 = 1\ 500$  nm, (d)  $t_2 = 2\ 000$  nm, (e)  $t_2 = 2\ 500$  nm

Fig.8 Simulation results of the surface current distribution of the metamaterials with the additional metal strip at different locations: (a)  $t_2 = 500$  nm, (b)  $t_2 = 1\ 000$  nm, (c)  $t_2 = 1\ 500$  nm, (d)  $t_2 = 2\ 000$  nm, (e)  $t_2 = 2\ 500$  nm

金属环的距离仅 100 nm. 此时,附加金属条与底层连续金属膜之间的耦合作用远小于该金属条与表层金属环之间的耦合作用,导致超材料的阻抗匹配性减弱、超材料的吸收峰值减小.

在固定金属条在 Z 轴的位置  $t_2 = 1\ 500$  nm 的情况下,本文接着考察该金属条的线宽变化对超材料的太赫兹响应特性的影响. 我们改变图 2 所示本文设计的新型超材料的附加金属条的线宽  $e$ , 当  $e$  分别为  $1\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$  时,图 10 从左至右分别显示表层、中间、及底层金属的表面电流. 结果显示,当金属条线宽逐渐增大时,底层连续金属膜、附加金属条、表层金属环的表面电流均不断增大. 而且,附加金属条与底层连续金属膜和表层金属环之间的耦合作用均逐渐增强,导致超材料的吸收峰值不断增大. 此外,附加金属条与表层金属环重叠部分的表面电流强度也逐渐增强,表面电流的方向与  $y$  轴的夹角也不断变大,使超材料的响应频率也

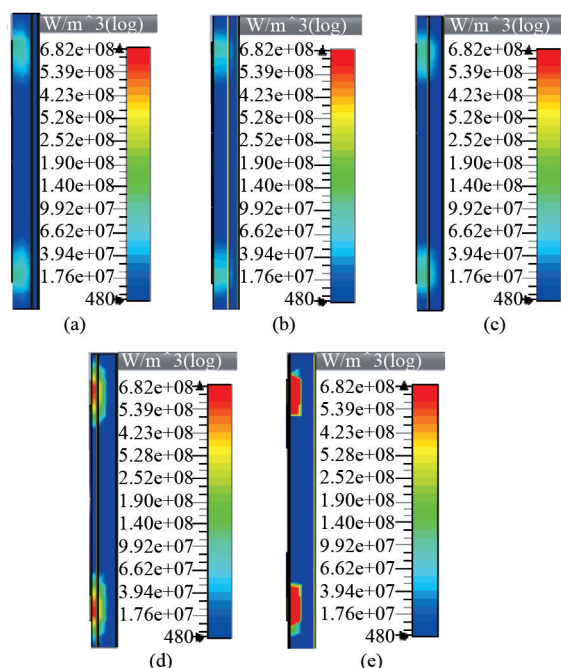


图9 金属条在不同位置时,超材料在 Z 轴的损耗仿真结果:(a)  $t_2 = 500$  nm, (b)  $t_2 = 1\ 000$  nm, (c)  $t_2 = 1\ 500$  nm, (d)  $t_2 = 2\ 000$  nm, (e)  $t_2 = 2\ 500$  nm

Fig.9 Simulation results of the loss of the metamaterials in the Z axis with the additional metal strip at different locations: (a)  $t_2 = 500$  nm, (b)  $t_2 = 1\ 000$  nm, (c)  $t_2 = 1\ 500$  nm, (d)  $t_2 = 2\ 000$  nm, (e)  $t_2 = 2\ 500$  nm

发生红移.

当金属条线宽  $e$  分别为  $1\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$  时,超材料沿 Z 轴的损耗如图 11 所示. 在金属条线宽增宽过程中,超材料沿 Z 轴的损耗主要分布在以环为轨迹的表层金属环与附加金属条之间的介质中. 损耗强度随着线宽的增大而逐渐增强,但损耗体积基本不变. 因此,超材料对 THz 波的响应随着附加金属条线宽的增大而增强,吸收增强.

最后,还对太赫兹入射角变化对超材料响应的影响进行了研究. 图 1 所示的传统超材料及图 2 所示的本文设计的新型超材料对不同入射角的太赫兹响应的仿真结果如图 12 所示. 其中,结构单元 X、Y、Z 方向的边界条件均设定为 (open(add space)) 周期边界,波矢  $K$  沿 Z 方向,采用 CST 中的频域算法进行计算.

图 12 (a) 显示,当入射角分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  时,传统超材料 (图 1) 的中心响应频率分别为  $2.23\ \text{THz}$ 、 $2.23\ \text{THz}$ 、 $2.24\ \text{THz}$ 、 $2.24\ \text{THz}$ 、 $2.25\ \text{THz}$ 、 $2.25\ \text{THz}$ , 对应的吸收峰值分别为  $95.50\%$ 、 $96.36\%$ 、 $98.69\%$ 、 $99.98\%$ 、 $95.18\%$ 、 $73.15\%$ . 与之相比,当入射角发生相同变化时,新型

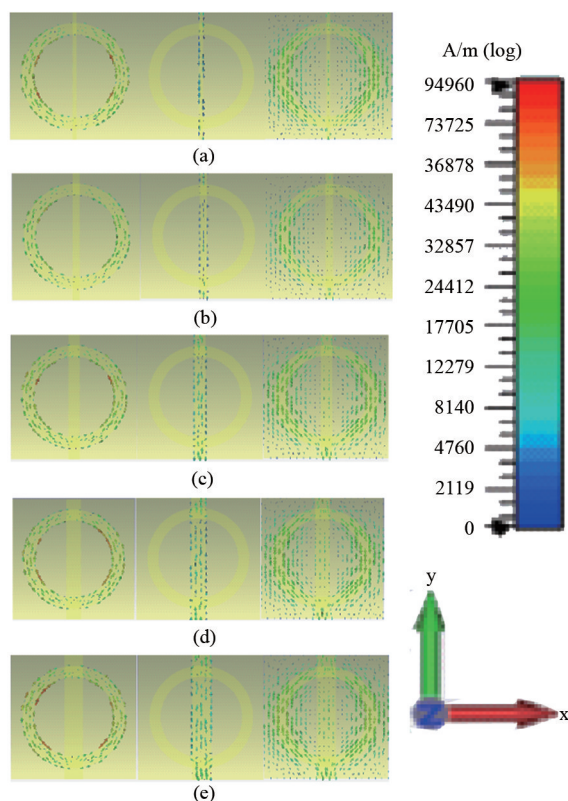


图 10 金属条不同线宽时,超材料的表面电流分布的仿真结果:(a)  $e = 1 \mu\text{m}$ , (b)  $e = 2 \mu\text{m}$ , (c)  $e = 3 \mu\text{m}$ , (d)  $e = 4 \mu\text{m}$ , (e)  $e = 5 \mu\text{m}$

Fig. 10 Simulation results of the surface current distribution of the additional metamaterials with metal strip in different line widths: (a)  $e = 1 \mu\text{m}$ , (b)  $e = 2 \mu\text{m}$ , (c)  $e = 3 \mu\text{m}$ , (d)  $e = 4 \mu\text{m}$ , (e)  $e = 5 \mu\text{m}$

超材料(图 2)的中心响应频率则分别为 2.07 THz、2.07 THz、2.07 THz、2.07 THz、2.08 THz、2.21 THz,对应的吸收峰值分别为 98.25%、98.71%、99.87%、98.95%、91.25%、68.30%。这说明,在 THz 波入射角逐渐增大的过程中,当入射角  $\leq 45^\circ$  时,新型超材料的中心响应频率稳定为 2.07 THz,没有明显变化;而且,对应的 THz 吸收峰值也高达 98.25~99.87%。但是,当入射角增大至  $60^\circ$  和  $75^\circ$  时,新型超材料的中心响应频率分别为 2.08 THz、2.21 THz,发生不同程度的蓝移;对应的吸收峰值也分别降低为 91.25%、68.30%,强度明显下降。为便于比较,我们把这两种超材料的仿真结果总结在图 12(b)中。该图清楚地显示,在入射角  $\leq 45^\circ$  时,两种超材料的中心响应频率稳定、吸收峰值也较高,说明两种超材料均对入射角  $\leq 45^\circ$  的 THz 波的辐射角度不敏感性。值得提醒的是,在入射角  $\leq 45^\circ$  时,本文设计的超材料(图 2)的响应频率的稳定性强于传统超材料(图 1),对应的 THz 吸收峰值也较高。但是,当

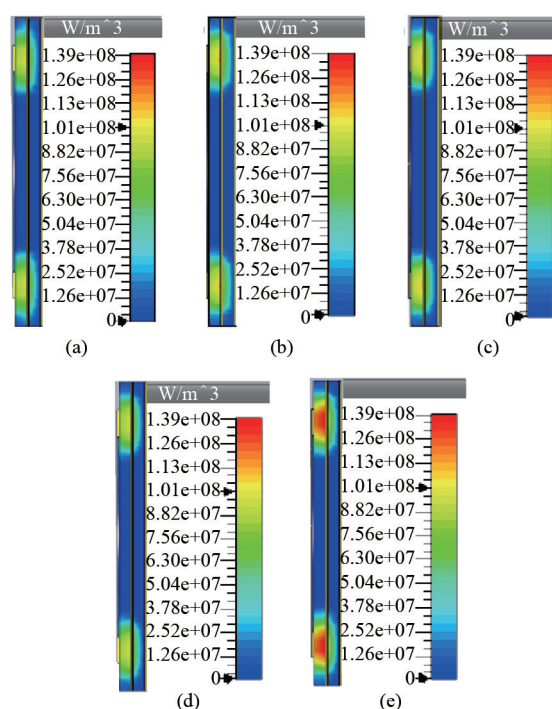


图 11 金属条不同线宽时,超材料在 Z 轴的损耗仿真结果:(a)  $e = 1 \mu\text{m}$ , (b)  $e = 2 \mu\text{m}$ , (c)  $e = 3 \mu\text{m}$ , (d)  $e = 4 \mu\text{m}$ , (e)  $e = 5 \mu\text{m}$

Fig. 11 Simulation results of the loss of the metamaterials in the Z axis with the additional metal strip in different line widths: (a)  $e = 1 \mu\text{m}$ , (b)  $e = 2 \mu\text{m}$ , (c)  $e = 3 \mu\text{m}$ , (d)  $e = 4 \mu\text{m}$ , (e)  $e = 5 \mu\text{m}$

入射角  $> 45^\circ$  时,两种超材料的响应频率、吸收峰值均明显变差。这种 THz 响应特性与新型超材料的结构中附加一层金属条有关。

### 3 结论

设计了在传统超材料的介质层中引入一层附加金属条的一种新型超材料,通过调节该金属条的位置和线宽,就能对超材料的太赫兹响应特性进行有效调节。研究表明,随着金属条的位置由底层向表层移动和金属条的线宽  $e$  的增大,超材料的中心响应频率均发生红移,但频带基本不变。而且,金属条的位置变化比线宽变化对超材料响应频率的影响更明显。其间,附加金属条与底层金属膜之间的耦合作用逐渐减弱,而与表层金属环之间的耦合作用却逐渐增强。而且,附加金属条与表层金属环之间重叠部分的表面电流强度逐渐增大,方向与  $y$  轴的夹角也不断变大,使超材料的响应频率红移。当金属条位于介质层的中间位置( $t_2 = 1.3 \mu\text{m}$ )时,超材料的吸收峰值达到最大(99.98%)。此外,随着附加金属条线宽  $e$  的增大,金属条与底层及表层金属的耦合作用均

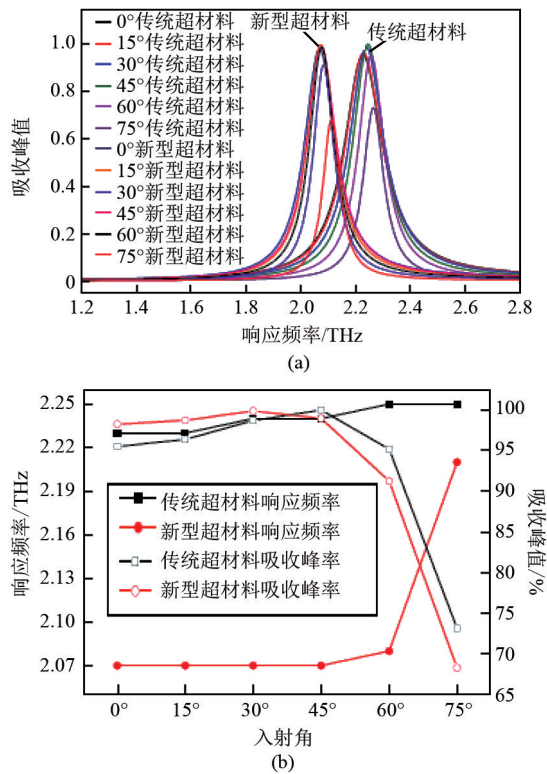


图 12 不同入射角度对超材料吸收的影响:(a)传统及新型超材料的仿真结果,(b)两种超材料仿真结果的比较  
 Fig.12 Effects of different incident angles on (a) the absorption and central frequency of the traditional and novel metamaterials, (b) comparison between the simulated results of the traditional and novel metamaterials

增强,从而使超材料的吸收峰值增大.在这种新设计的超材料结构中,超材料沿 Z 轴的损耗主要分布在以环为轨迹的金属环与金属条之间的介质当中.另外,当太赫兹入射角  $\leq 45^\circ$  时,传统及新型超材料的中心响应频率稳定、吸收峰值高,而且含附加金属条的新型超材料的性能更优.但是,当入射角  $> 45^\circ$  时,两种超材料的响应频率稳定性及吸收峰值均变差.本文介绍的方法没有破坏超材料的阻抗匹配条件,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.

## References

- [1] Lee A W, Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2563–2565.
- [2] Liu H B, Plopper G, Earley S, et al. Sensing minute changes in biological cell monolayers with THz differential time-domain spectroscopy [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2007, **22**(6): 1075–1080.
- [3] Jansen C, Priebe S, Möller C, et al. Diffuse scattering from rough surfaces in THz communication channels [J]. *IEEE Trans. Terahertz. Sci. Technol.*, 2011, **1**(2): 462–472.
- [4] Chan W L, Moravec M L, Baraniuk R G, et al. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 974–976.
- [5] Brucherseifer M, Nagel M, Bolivar P H, et al. Label-free probing of the binding state of DNA by time-domain terahertz sensing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(24): 4049–4051.
- [6] Abraham E, Younus A, Aguerre C, et al. Refraction losses in terahertz computed tomography [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(10): 2050–2055.
- [7] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. *Sov. Hys. Usp.*, 1968, **10**(4): 509–514.
- [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] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966–3969.
- [10] Seddon N, Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect [J]. *Science.*, 2003, **302**(5650): 1537–1540.
- [11] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(20): 207402.
- [12] Tao H, 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] 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.
- [14] Labidi M, Tahar J B, Choubani F. Meta-materials applications in thin-film sensing and sensing liquids properties [J]. *Opt. Express.*, 2011, **19**(104): A733–A739.
- [15] Lei Li, Qing-Li Z, Yu-Lei, et al. The influence of different opening shapes of split-ring resonator on its transmittance in terahertz band [J]. *Acta. Phys. Sinica.*, 2011, **60**(1): 019503–019503.
- [16] HUANG Rui, XU Xiang-Dong, AO Tian-Hong, et al. Modulation of response frequency and absorption band width 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 [J]. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(1): 44–50.
- [17] AO Tian-Hong, XU Xiang-Dong, HUANG Rui, et al. Control of terahertz response properties of metamaterials by dielectric layer [J]. *J. Infrared. Millim. Waves* (敖天宏, 许向东, 黄锐, 等. 介质层对超材料太赫兹响应特性的控制规律 [J]. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(3): 333–339.
- [18] Gauch H G, Hwang J T, Fick G W. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values [J]. *Agron. J.*, 2003, **95**(6): 1442–1446.