

基于超材料的多频带可调谐太赫兹吸收器

佟艳群^{1,2*}, 汪诗妍^{1,2}, 宋效先^{1,2,3}, 杨磊², 姚建铨^{1,3}, 叶云霞^{1,2}, 任云鹏^{1,2},
张雅婷^{1,2,3}, 辛姗姗², 任旭东^{1,2*}

(1. 江苏大学微纳光电子与太赫兹技术研究院, 江苏 镇江 212013;

2. 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

3. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要:设计了一种多频带可调谐的太赫兹超材料吸收器。在超材料吸收器的结构中,引入光敏半导体硅材料,设计特殊的顶层金属谐振器,分析开口长度、线宽、介质层厚度等参数尺寸对太赫兹超材料吸收器的吸收光谱特性影响。根据光照与光敏半导体硅电导率之间的关系,研究太赫兹超材料吸收器的频率调谐特性。仿真结果得到太赫兹波段的 12 个吸收频率调制,其中有 10 处吸收峰的吸收率超过 90% 近完美吸收,且有 6 处吸收率达到 99% 的完美吸收,而且吸收率调制深度和相对带宽分别达到 85.9% 和 85.5%,具有很强的可调谐特性。设计的光激励太赫兹超材料吸收器结构简单,具有多频带可调谐和完美吸收特性,扩大了吸收器的应用范围。

关键词:太赫兹吸收器;超材料;光激励;多频带可调谐

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Multi-band tunable terahertz absorber based on metamaterial

TONG Yan-Qun^{1,2*}, WANG Shi-Yan^{1,2}, SONG Xiao-Xian^{1,2,3}, YANG Lei², YAO Jian-Quan^{1,3},
YE Yun-Xia^{1,2}, REN Yun-Peng^{1,2}, ZHANG Ya-Ting^{1,2,3}, XIN Shan-Shan², REN Xu-Dong^{1,2*}

(1. Institute of Micro-nano Optoelectronics and Terahertz Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A multi-band tunable terahertz metamaterial absorber is proposed. In the structure of the metamaterial absorber, a photosensitive semiconductor silicon material was added and a special top metal resonator was designed. Analyzed the influence of the parameters such as the opening length, line width and dielectric layer thickness on the absorption spectral characteristics of the terahertz metamaterial absorber. According to the relationship between illumination and the conductivity of photosensitive semiconductor silicon, the frequency tuning characteristics of the terahertz metamaterial absorber was studied. The simulation results obtain 12 absorption frequency modulations in the terahertz band, the absorption rate of 10 absorption peaks of them exceeds 90% near perfect absorption, and 6 absorptions rate up to 99% perfect absorption. Moreover, the absorptivity modulation depth and relative bandwidth reaches 85.9% and 85.5% respectively, with strong tunable characteristics. The photo excited terahertz metamaterial absorber has a simple structure, multi-band tunable and perfect absorption characteristics, and expands the application range of the absorber.

Key words: terahertz absorber, metamaterials, photo excited, multi-band tunable

PACS: 42.70.Gi, 81.05.Lg, 78.20.Ci

收稿日期: 2020-02-05, 修回日期: 2020-06-15

Received date: 2020-02-05, Revised date: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405200, 51775253), 江苏省六大人才高峰创新团队项目(TD-KTHY-005), 中国博士后科学基金(2015M580395, 2019M651725), 江苏省自然科学基金(BK20180862, BK20170559, BK20190839)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (51405200, 51775253), Six Talent Summit Innovation Team Projects in Jiangsu Province (TD-KTHY-005), China Postdoctoral Science Foundation (2015M580395, 2019M651725), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20180862, BK20170559, BK20190839)

作者简介(Biography): 佟艳群(1981-), 女, 四川眉山人, 副教授, 博士, 主要从事光与物质相互作用研究。Email: tongyanqun@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: tongyanqun_99@163.com, renxd@mail.ujts.edu.cn

引言

超材料吸收器是一种对入射的电磁波实现高吸收率的功能器件^[1-2]。在医学、生物、军事和航空航天等领域,太赫兹超材料吸收器具有广阔的应用前景^[3-4],可实现电磁波隐身、热成像、图像探测及调控等功能^[5-7],目前太赫兹超材料吸收器的研究受到普遍重视。

可调谐太赫兹超材料吸收器突破在特定频率下对入射波的完美吸收,在超材料吸收器几何结构固定不变的情况下能够在多个波带的完美吸收,扩大吸收器的应用范围。目前,研究人员将石墨烯、相变材料和半导体材料添加到超材料吸收器结构中,通过调节电压、温度或光照等外界条件实现超材料吸收器的调制^[8-10]。与石墨烯、相变材料相比,在超材料吸收器中嵌入光敏半导体材料,吸收器总体结构简单,能在室温情况下实现吸收器的较大吸收率调制深度,利用光敏半导体材料的电导率随入射光功率变化的机理,通过改变半导体材料的电导率来实现超材料吸收器吸收率和吸收频率的调制。如 Xu 等人^[11-12]将光敏材料硅嵌入到超材料的基本单元结构中,通过改变光敏硅的电导率,实现了吸收光谱的共振峰由 1.17 THz 至 0.68 THz 的宽带红移和吸收频率从 0.68 THz 至 1.41 THz 的宽带蓝移,吸收率达到 98%。程用志等人^[13]利用光敏材料硅实现了太赫兹频率在 0.442 THz 到 0.852 THz 范围内动态调节且吸收率达到 99.9% 的完美吸收。Zhao 等人^[14]在超材料吸收器中添加 GaAs,通过控制 GaAs 的电导率,实现了吸收率 80% 以上的双频吸收到单频吸收的调制,但在这些光激励可调太赫兹超材料吸收器中,存在可调谐的吸收频率少且吸收率低的问题,达不到完美吸收,减少了吸收器的应用范围。而多带可调超材料吸收器可以扩大太赫兹调谐的频带范围,在多个吸收频率实现完美吸收,目前通常采用单带叠加方法实现多带可调,孟庆龙等人^[15]在超材料结构中叠加四个金属条并引入光敏介质 GaAs,吸收器实现了从四频带到双频带的调控,吸收率超过 95%。Zhang 等人^[16]分别通过叠加两个矩形和两个圆环形金属谐振腔并在不同临界区适当放置光导硅,获得双频宽带至双频宽带的调制且吸收率达到 98%,然而多带可调超材料吸收器结构复杂,制作不方便,同样吸收率低,达不到完美吸收。

本文设计一种结构新颖简单的多频带可调谐太赫兹超材料吸收器。通过改进超材料结构,在顶层

金属谐振环开口处添加光敏半导体硅,讨论超材料的结构参数对超材料吸收器的影响,在最佳结构参数下改变入射光强度调节光敏硅的电导率,在 0.5~6 THz 范围内,获得 12 个吸收峰的调制,其中有 6 处吸收率达到 99% 的完美吸收,且有 10 处吸收峰的吸收率超过 90% 近完美吸收。另外,吸收率调制深度和相对带宽分别达到 85.9% 和 85.5%,具有很强的可调谐特性。

1 超材料吸收器的结构设计

超材料吸收器的结构如图 1 所示,共三层组成,分别为顶层的金属开口谐振环,中间的电介质层和底层的金属板。其中,中间电介质层选择聚酰亚胺,介电常数为 3.5;顶层金属膜和底层金属板的材料是有耗金属金,电导率 $\sigma = 4.561 \times 10^7 \text{ S/m}$;顶层设计为开口谐振环,是由一个圆环形和条形组成的环扣结构,引入光敏半导体硅填充在谐振环开口处,光敏半导体硅的介电常数为 11.7,在无光照的条件下^[17],半导体硅的电导率设置为 $\sigma = 1 \text{ S/m}$,在有光照的情况下,改变入射光强度调节光敏硅的电导率,其电导率随着光照强度的增加而增加。

超材料吸收器的吸收谱根据吸收率公式 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ 得出, $R(\omega) = |S_{11}|^2$ 为超材料的反射率, $T(\omega) = |S_{21}|^2$ 为超材料的透射率,其中 S_{11} 和 S_{21} 为平面波激励下的反射系数和透射系数。在整个太赫兹频率范围内,由于底层金属板的存在,且金属板的厚度远远大于电磁波的趋肤深度,所以超材料整体结构的透射率为零^[18-19]。因此,整体超材料结构的吸收率只与反射率有关,超材料的吸收率公式可简化为 $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ 。

本文利用 CST 微波工作室软件 (CST MWs Studio) 对设计的太赫兹超材料吸收器进行数值模拟获得太赫兹超材料吸收器的吸收谱,设置太赫兹波垂直入射超材料,电矢量沿 x 方向,磁矢量沿 y 方向。

2 结果与分析

2.1 超材料结构参数对太赫兹波吸收的影响

超材料谐振单元中开口环复合结构等效为常见的 LC 振荡电路^[20]。当入射太赫兹偏振电场方向与开口环复合结构平行时,会在特定的频率出现比较明显的谐振峰,该谐振峰的频率 $f = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$,其中, L 为开口环复合结构的等效电感, C 为开口环复合结构的等效电容^[21]。本文设计的等效电路模型如图

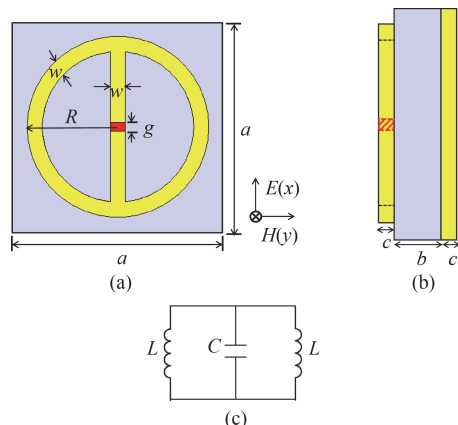


图1 超材料吸收器结构示意图 (a)吸收器结构单元, (b)单元结构侧视图, (c)超材料谐振器的等效电路图

Fig.1 Structure diagram of metamaterial absorber (a) Absorber structural unit, (b) cell structure side view, (c) equivalent circuit diagram of metamaterial resonator

1(c)所示,根据等效电路理论可知,填充硅的金属条开口处的电容可表示为^[22-24]:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r c w}{g}, \quad (1)$$

式中: ε_0 是真空介电常数; $\varepsilon_s = a\varepsilon_r + (1-a)\varepsilon_{si}$ 为等效介电常数; a 是填充系数; ε_r 为聚酰亚胺的介电常数; ε_{si} 为半导体硅的介电常数; c, w, g 分别为开口谐振环结构的尺寸参数。金属开缝环的等效电感表示为:

$$L = \frac{\mu_0 \pi R^2}{c}, \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; R, c 为图1所示的开口谐振环结构的尺寸参数。

这里设置顶层金属圆环的外半径 $R = 30 \mu\text{m}$, 环的径向宽度和中间金属条宽度 $w = 5 \mu\text{m}$, 金属条开口间隙 $g = 3 \mu\text{m}$ 。结构单元的周期 $a = 70 \mu\text{m}$; 中间电介质层的厚度 $b = 7 \mu\text{m}$; 底层金属板厚度与顶层金膜厚度相同, 都为 $c = 0.2 \mu\text{m}$ 。图2为无光照时太赫兹超材料吸收器的反射谱和吸收谱, 从图2中可以看出, 当吸收器无光照入射时, 超材料的吸收谱上出现了八个吸收峰, 在 0.821 THz 、 1.852 THz 、 3.085 THz 、 3.929 THz 、 4.773 THz 、 4.997 THz 、 5.204 THz 和 5.681 THz 处分别获得了 98.2% 、 30.8% 、 80.9% 、 98.5% 、 14.1% 、 76.8% 、 19.9% 和 43.9% 的吸收率。而且在 0.821 THz 和 3.929 THz 处的吸收峰峰值最高, 吸收率分别达到 98.2% 和 98.5% 的近完美吸收。与现有的成果相比^[25], 本文设计的吸收器能在结构简单的情况下获得较多的吸收峰。

为了更好地理解这种吸收机制, 对吸收率较高

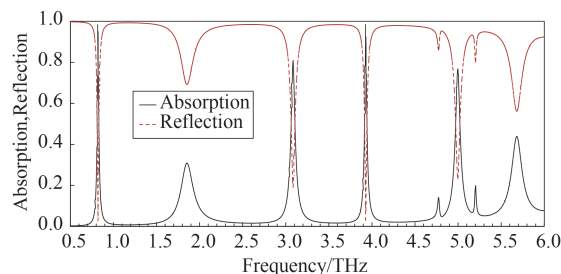


图2 无光照时太赫兹超材料吸收器的反射谱和吸收谱

Fig.2 Reflection and absorption spectra of terahertz metamaterial absorbers without illumination

的 0.821 THz 和 3.929 THz 两个吸收频率处的顶层谐振环和底层金属板进行了表面电流监控。图3分别绘制了两个频率的上下表面电流分布, 可以看出, 两个频率的顶层谐振环内都存在流向相反的环形电流, 因此产生的磁共振相互抵消, 即不存在磁共振响应。在顶层谐振环和底层金属板之间也存在着反向的电流, 因此会产生磁共振。无光照时光敏硅处于半导体状态, 因此在金属谐振环开口处存在电荷累积, 会产生电共振。所以无光照时, 吸收峰的产生一方面是金属开口处存在电容, 会与入射的电磁波产生电共振, 从而产生共振谐振峰。另一方面顶层超材料谐振器与底层金属板因入射电磁波的影响会产生磁共振, 从而产生共振谐振峰。

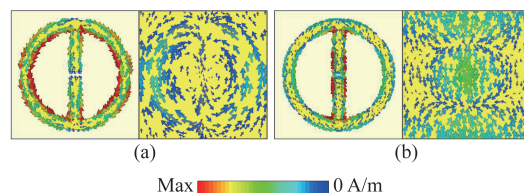


图3 无光照时吸收器的上下表面电流分布 (a) 0.821 THz , (b) 3.929 THz

Fig.3 The upper and lower surface current distribution of the absorber without illumination (a) 0.821 THz , (b) 3.929 THz

为了研究在无光照的情况下超材料结构参数对太赫兹波吸收的影响, 改变超材料结构的开口间隙、线宽和介质层厚度。如图4(a)所示, 当开口间隙改变时, 整个曲线随着开口间隙的增加而发生蓝移, 且吸收强度只在 20% 范围内发生轻微变化, 根据等效 LC 谐振模型 ($f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$) 来解释, 等效电容 C 会随着开口间隙的增大而减小, 使吸收峰移至高频。

图4(b)显示了不同线宽变化时的吸收光谱, 表明随着线宽的增加, 位于 5.658 THz 的吸收峰红移, 其余吸收峰均发生蓝移, 而且在 0.821 THz 和 3.929

THz处的吸收峰可以达到98.2%和98.5%的高吸收值,在5.204 THz和5.658 THz处产生了73.2%和52.4%的吸收强度的变化,这种较大吸收强度的改变主要是由于入射波与超材料结构、底层金属板的电磁耦合强度的改变。

由图4(c)可知,随着介质层厚度的增加,位于0.796 THz处的吸收峰发生25 GHz的蓝移获得98.2%的吸收率,其余吸收峰均发生红移,基于Maxwell Equations本身具有的标度不变性的特点,介质层变厚,相对波长也要保持增加,才能使波长和介质层厚度比例相对不变,因此共振吸收峰红移。在4.359 THz处的吸收峰发生430 GHz的位移并获得98.5%的吸收率,在1.917 THz和5.971 THz处的吸收峰值随着介质层厚度的增加而减小,在3.144 THz、4.973 THz和5.137 THz处的吸收峰随着介质层厚度的增加而先增大后减小。这主要是因为随着厚度的增加,顶层相对自由空间阻抗接近于相对介质层的等效阻抗,两者的有效阻抗相互匹配^[26],这时在低频和部分高频处达到较好的匹配状态,吸收率增大。

2.2 光敏半导体硅在不同光强下对太赫兹波吸收特性的影响

在上述超材料吸收器中,通过改变超材料的结构参数实现了吸收器的吸收频率和吸收强度的调制,但这种调控方法在实际应用中还存在着制作不方便和成本高等明显的缺陷。因此,本文通过对超材料中光敏半导体硅进行不同光强的照射来实现超材料吸收器的调制,光照频率范围为可见光至近红外光,如图5(a)所示,灵敏度(K_i)是指光敏硅不受光照射时的电阻值与受光照射时的电阻值的相对变化值,显示采用波长为800 nm的近红外激光灵敏度最佳。当不同的光强照射光敏半导体硅时,光敏半导体硅的电导率会发生改变^[27]。由5(b)可知,光照强度与光敏硅中的电流密度成正比,电流密度公式为 $J = \rho E$,其中 ρ 为电导率, E 为电场,电流密度与电导率也成正比关系,因此光照强度与电导率成正比,即随着光照强度的增加,光敏硅中的载流子浓度会不断上升,从而使光敏硅的导电性增强,其电导率就会提高,光敏硅就会逐渐从半导体状态转变为导体状态,进而影响超材料的共振频率^[28]。

对图1中太赫兹超材料吸收器进行数值模拟时,保持超材料其他的结构参数以及外部条件恒定,并且通过上述对超材料结构参数的分析,选择可同时获得两个最高吸收率的结构参数,即环的径向宽度

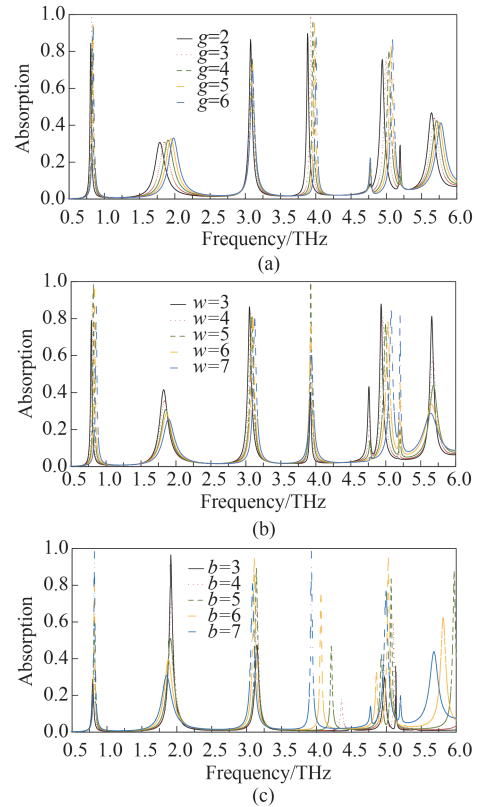


图4 不同结构参数下超材料的吸收光谱 (a)不同开口长度的吸收率曲线图,(b)不同线宽的吸收率曲线图,(c)不同介质层厚度的吸收率曲线图

Fig. 4 Absorption spectra of metamaterials with different structural parameters (a) Absorption curves of different opening lengths, (b) absorption curves of different line widths, (c) absorption curves of different thickness of dielectric layers

和中间金属条宽度 $w = 5 \mu\text{m}$,金属条开口间隙 $g = 3 \mu\text{m}$,中间电介质层的厚度 $b = 7 \mu\text{m}$ 。改变入射光强即改变图1中光敏半导体硅的电导率,获得的太赫兹超材料吸收谱线如图6所示,当光敏半导体硅的电导率从 1 S/m 增长到 $1.9 \times 10^6 \text{ S/m}$ 时,可以调制出12个明显的吸收峰,在0.821 THz、1.197 THz、1.846 THz、3.091 THz、3.546 THz、3.929 THz、4.584 THz、4.785 THz、4.997 THz、5.174 THz、5.499 THz和5.676 THz处分别获得了98.2%、99.7%、99.4%、98.4%、99.6%、98.5%、93.0%、57.9%、99.3%、55.2%、99.1%和99.7%的吸收率,有10处的吸收率大于90%近完美吸收,更有6处峰值的吸收率达到99%以上的完美吸收。而且在图6中我们可以观察到,超材料吸收器在0.821 THz和3.929 THz处的吸收率随着硅的电导率的增大而减小,在1.846 THz、3.091 THz、4.584 THz、4.785 THz、4.997 THz、5.174 THz和5.676 THz处的吸收率随硅的电导率的增大而增

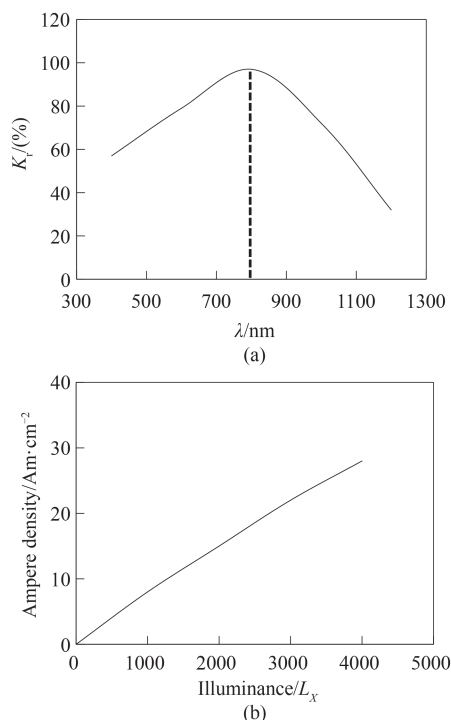


图5 光敏硅的特性 (a)光谱特性, (b)光照特性

Fig. 5 Characteristics of photosensitive silicon, (a) spectral characteristics, (b) illumination characteristics

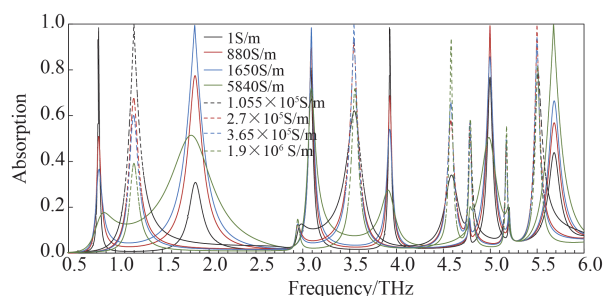


图6 硅在不同电导率下的太赫兹超材料吸收谱

Fig. 6 Terahertz metamaterial absorption spectra of silicon at different conductivities

大。而且随着硅的电导率增大,在5.676 THz处的吸收峰发生红移,调制至5.499 THz处。当硅的电导率增大至 1.055×10^5 S/m和 3.65×10^5 S/m时,在0.821 THz和1.846 THz处的两个吸收峰在1.197 THz处融合成一个明显的强吸收峰,在3.091 THz和3.929 THz处的两个吸收峰在3.546 THz处也融合成一个明显的强吸收峰。此光激励太赫兹超材料吸收器实现了多频带大范围可调,而且扩大了应用范围。

为了进一步研究本文所设计的超材料吸收器的可调谐性能,分别对吸收率调制深度(D)和相对带宽(B)进行分析,表达式如下^[29]:

$$D = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max}}, \quad (3)$$

$$B = \frac{f_1 - f_2}{f_1}, \quad (4)$$

式中 A_{\max} 和 A_{\min} 分别为在不同电导率时超材料吸收率的最大值和最小值, f_1 和 f_2 分别为高频和低频对应的最大吸收率时的频率。根据公式计算结果,设计的太赫兹超材料吸收器的吸收率调制深度(D)和相对带宽(B)分别为85.9%和85.5%,显示出较强的可调和特性。

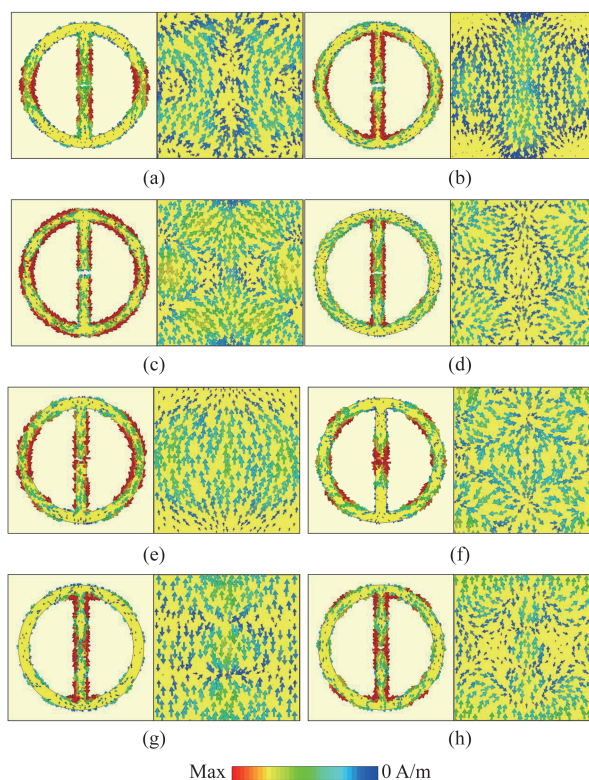


图7 光照时吸收器的上下表面电流分布 (a)4.997 THz, $\sigma = 880$ S/m; (b)1.846 THz, $\sigma = 1650$ S/m; (c)3.091 THz, $\sigma = 1650$ S/m; (d)5.676 THz, $\sigma = 5840$ S/m; (e)1.197 THz, $\sigma = 1.055 \times 10^5$ S/m; (f)5.499 THz, $\sigma = 2.7 \times 10^5$ S/m; (g)3.546 THz, $\sigma = 3.65 \times 10^5$ S/m; (h)4.584 THz, $\sigma = 1.9 \times 10^6$ S/m

Fig. 7 The upper and lower surface current distributions of the absorber with illumination (a)4.997 THz, $\sigma = 880$ S/m; (b)1.846 THz, $\sigma = 1650$ S/m; (c)3.091 THz, $\sigma = 1650$ S/m; (d)5.676 THz, $\sigma = 5840$ S/m; (e)1.197 THz, $\sigma = 1.055 \times 10^5$ S/m; (f)5.499 THz, $\sigma = 2.7 \times 10^5$ S/m; (g)3.546 THz, $\sigma = 3.65 \times 10^5$ S/m; (h)4.584 THz, $\sigma = 1.9 \times 10^6$ S/m

为了研究受光照时吸收峰产生的机理,对吸收率超过90%的吸收频率进行了表面电流监测,结果如图7所示。随着光照强度的增加,光敏半导体硅的

载流子浓度增加,在超材料谐振环处的电荷累积增多,进而影响超材料结构的有效电容,随之引起超材料吸收强度的变化。在图7(a-d)中,光敏硅还处于半导体状态,金属谐振环存在方向同向的电流,说明入射的电磁波激发顶层的金属谐振环产生强烈的电偶极子共振,存在的流向相反的电流使金属环上的磁共振相互抵消,而且在顶层谐振环和底层金属板之间存在着反向的电流,会产生磁共振,因此在4.997 THz、1.846 THz、3.091 THz和5.676 THz处的完美吸收是偶极子共振和磁共振共同作用产生的结果。在图7(e-h)中,硅的电导率大于 1.055×10^5 S/m时,半导体材料硅已过渡到金属状态,电荷可以顺利的通过半导体硅,顶层的超材料结构将不存在电容响应,因此只有磁共振。而电导率的持续增大主要是让一些高吸收率的频率达到完美吸收。

3 结论

设计了一种结构简单的光激励多频带可调谐太赫兹超材料吸收器,在顶层类似环扣结构的金属谐振环开口处添加光敏半导体硅,通过调节顶层超材料结构的开口间隙、线宽和中介质层厚度,在0.5~6 THz范围内,无光照时单个超材料吸收器可获得至少8个吸收峰,但最多同时也只能获得2个完美吸收峰,且吸收峰只是较为简单的平移或较之前的吸收峰的吸收增强,调节范围有限。为了增强可调节度,基于最佳结构参数,有光照时通过控制入射光强度调节光敏半导体硅的电导率,当光敏半导体硅的电导率从1 S/m增长到 1.9×10^6 S/m时,实现了12个吸收峰的调制,其中有6个吸收峰的吸收率超过99%,有10个吸收峰的吸收率超过90%,对应的吸收率调制深度和相对带宽分别为85.9%和85.5%。与其他可调太赫兹超材料吸收器相比,本人设计的太赫兹超材料吸收器结构简单,能够实现多频带调制,且调制效果明显,具有较强的可调谐特性,大大增加了太赫兹调制器、太赫兹探测器及雷达探测的应用对象,为日后多频带吸收器的研究设计提供了一种新思路。

References

- [1] Kong H, Li G, Jin Z, *et al.* Polarization-independent metamaterial absorber for terahertz frequency[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Tera- hertz Waves*, 2012, **33** (6) : 649-656.
- [2] Grant J, Ma Y, Saha S, *et al.* Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17):3476.
- [3] Khuyen B X, Tung B S, Yoo Y J, *et al.* Ultrathin metamaterial-based perfect absorbers for VHF and THz bands [J]. *Current Applied Physics*, 2016, **16**(9):1009-1014.
- [4] ZHANG Yong, ZHANG Bin-Zhen, DUAN Jun-Ping, *et al.* Application of metamaterials in perfect absorber [J]. *Materials Engineering*(张勇, 张斌珍, 段俊萍, 等. 超材料在完美吸波器中的应用. *材料工程*), 2016, **44**(11):120-128.
- [5] Sabah C, Dincer F, Karaaslan M, *et al.* Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application [J]. *Optics Communications*, 2014, **322**:137-142.
- [6] Wang H, Prasad Sivan V, Mitchell A, *et al.* Highly efficient selective metamaterial absorber for high-temperature solar thermal energy harvesting [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, **137**:235-242.
- [7] Ma B, Liu S, Kong X, *et al.* A novel wide-band tunable metamaterial absorber based on varactor diode/graphene [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, **127**(5):3039-3043.
- [8] He X, Zhong X, Lin F, *et al.* Investigation of graphene assisted tunable terahertz metamaterials absorber [J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(2):331.
- [9] Luu D H, Van Dung N, Hai P, *et al.* Switchable and tunable metamaterial absorber in THz frequencies [J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2016, **1**(1):65-68.
- [10] Pitchappa P, Manjappa M, Ho C P, *et al.* Metamaterials: active control of electromagnetically induced transparency analog in terahertz MEMS metamaterial [J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, **4**(4):540-540.
- [11] Xu Z, Gao R, Ding C, *et al.* Photoexcited switchable metamaterial absorber at terahertz frequencies [J]. *Optics Communications*, 2015, **344**:125-128.
- [12] Xu Z, Gao R, Ding C, *et al.* Photoexcited broadband blue-shift tunable perfect terahertz metamaterial absorber [J]. *Optical Materials*, 2015, **42**:148-151.
- [13] CHENG Yong-Zhi, ZUO Xuan, HUANG Mu-Lin, *et al.* Design of optical drive wide-band tunable terahertz absorber [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Wave*(程用志, 左轩, 黄木林, 等. 光驱动宽频带可调谐太赫兹吸波器设计. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(01):99-104.
- [14] Zhao X, Fan K, Zhang J, *et al.* Optically tunable metamaterial perfect absorber on highly flexible substrate [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, **231**:74-80.
- [15] NENG Qing-Long, ZHANG Yan, ZHANG Bin, *et al.* Characteristics of light-controlled tunable multiband terahertz metamaterial absorber [J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*(孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性. *激光与光电子学进展*), 2019, **56**(10):253-258.
- [16] Zhang J, Wang G, Zhang B, *et al.* Photo-excited broadband tunable terahertz metamaterial absorber [J]. *Optical Materials*, 2016, **54**:32-36.
- [17] Wang Y, Liu X, Wen C Z, *et al.* Broadband tunable hybridized metamaterials absorber at terahertz regime [J]. *Ferroelectrics*, 2018, **528**(1):38-44.
- [18] Cheng Y, Gong R, Cheng Z. A photoexcited broadband switchable metamaterial absorber with polarization-insensitive and wide-angle absorption for terahertz waves [J]. *Op-*

- tics Communications*, 2016, **361**:41–46.
- [19] ZHANG Zhang, YU Jian-Da, YAO Jian-Chuan, *et al.* Characteristics of terahertz metamaterial multifrequency absorber [J]. *Journal of Zaozhuang University* (张璋, 于建达, 姚建铨, 等. 太赫兹超材料多频吸收器特性研究. 枣庄学院学报), 2017, **34**(5):33–39.
- [20] Song Y J, Sarabandi K. Equivalent circuit model for metamaterial-based electromagnetic band-gap isolator [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, **11**: 1366–1369.
- [21] Qin B, Li Z, Hu F, *et al.* Highly sensitive detection of carbendazim by using terahertz time-domain spectroscopy combined with metamaterial [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, **8**(2):149–154.
- [22] CHENG Wei, LI Jiu-Sheng. Design of a light adjustable terahertz wave absorber [J]. *Electronic Components and Materials* (程伟, 李九生. 一种光可调太赫兹波吸收器的设计. 电子元件与材料), 2013, **32**(7):34–36.
- [23] Jeppesen C, Mortensen N A, Kristensen A. Capacitance tuning of nanoscale split-ring resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(19):193108.
- [24] Zhu J, Han J, Tian Z, *et al.* Thermal broadband tunable Terahertz metamaterials [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(12):3129–3133.
- [25] LI Ai-Yun, LIU Feng-Chu, WANG Meng, *et al.* Terahertz multifrequency absorber based on metamaterial [J]. *Laser Journal* (李爱云, 刘凤收, 王猛, 等. 基于超材料的太赫兹波段多频吸收器. 激光杂志), 2019, **40**(04):28–30.
- [26] LIU Wei, YANG Qi-Li, YAN Xin, *et al.* Modulation method of adjustable terahertz absorber [J]. *Electronic Components and Materials* (刘伟, 杨其利, 闫昕, 等. 可调控太赫兹吸收器调制方法. 电子元件与材料), 2019, **38**(01):82–86.
- [27] SUN Chuan-You, SUN Xiao-Bin. Fundamentals of sensing technology [M]. Electronic Industry Press (孙传友, 孙晓斌. 感测技术基础. 电子工业出版社), 2015.
- [28] CHU Qi-Hang, YANG Mao-Sheng, CHEN Jun, *et al.* Characteristics of controllable terahertz multiband absorber [J]. *Chinese Laser* (初启航, 杨茂生, 陈俊, 等. 可调控的太赫兹多频带吸波器特性研究. 中国激光), 2019, **46**(12):1214003.
- [29] SHEN X P, CUI T J. Photoexcited broadband redshift switch and strength modulation of terahertz metamaterial absorber [J]. *Journal of Optics*, 2012, **14**(11): 114012.