

基于 VO₂ 圆环结构的温控宽带超材料吸波器

任英楠, 曹斌照, 李禹蓉, 费宏明, 刘欣, 张明达, 杨毅彪

(太原理工大学物理与光电工程学院, 山西太原 030024)

摘 要: 设计了一种基于不同半径的二氧化钒(VO₂)圆环加载于介质层上的宽带可调超材料吸波器, 利用 VO₂ 随温度变化的相变特性, 实现了外部温度对吸收曲线的动态调节. 通过仿真计算表明, 该吸波器在外部温度为 350K 时在 8.09 ~ 11.23THz 带宽范围内吸收率可达 90% 以上, 表现出高吸收特性; 而外部温度为 300K 时在相同频段内吸收率始终低于 20%, 从而实现了电磁波吸收的可调功能. 进一步对吸波器的等效阻抗和电场分布进行分析讨论, 阐明 VO₂ 对吸收性能的调节机制. 此外, 文章讨论了结构参数、偏振角以及入射角对吸收的影响. 其结果表明, 合理选择结构参数可实现吸收性能与偏振角、入射角的无关性. 本文的结论对于设计其它类型的超宽带可调吸波器具有重要的指导意义.

关键词: 超材料吸波器; 太赫兹; 宽带; 可调节

中图分类号: TB34

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2021)01-0171-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200711

A Temperature-Controlled Broadband Metamaterial Absorber Based on the Vanadium Dioxide Rings

REN Ying-nan, CAO Bin-zhao, LI Yu-rong, FEI Hong-ming, LIU Xin, ZHANG Ming-da, YANG Yi-biao

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: A broadband tunable metamaterial absorber based on vanadium dioxide (VO₂) rings with different radius loaded on the dielectric layer is designed. The phase transition characteristics of VO₂ with temperature are used to realize the dynamic adjustment of the absorption curve of external temperature. Simulation calculations show that the absorber can reach more than 90% in the bandwidth of 8.09 ~ 11.23THz when the external temperature is 350K, showing high absorption characteristics; while the absorption coefficient in the same frequency band is always lower than 20% when the external temperature is 300K, achieving the adjustable function of electromagnetic wave absorption. The equivalent impedance and electric field distribution of the absorber are further analyzed and discussed, and the adjustment mechanism of VO₂ on the absorption is clarified. In addition, the article discusses the effects of structural parameters, polarization angles, and angles of incidence on the absorptivity. The results show that reasonable selection of parameters of the structure can achieve the independence of the absorbing performance from the polarization angle and the angle of incidence. The conclusions of this paper have promising potential for designing other types of ultra-wideband tunable absorbers.

Key words: metamaterial absorber; terahertz; broadband; tunable

1 引言

随着电磁波在民用和军事等方面的广泛应用, 电磁污染问题越来越严重, 研究电磁波的吸收问题成为普遍公认的重要课题. 以吸波机制为主的吸波器是消除电磁污染、实现电磁防护等最有效的工具. 随着新穎材料的日益推出, 其性能得到不断的提高^[1-3].

进入本世纪以来, 超材料受到人们的极大关

注^[4,5]. 超材料作为一类人工复合材料, 具有常规材料所不具备的许多超常的物理性质, 例如负折射现象、完美透镜效应、逆多普勒效应等, 主要应用于电磁隐身、完美成像、高性能天线及其它电磁器件等^[6,7]. 基于超材料设计的吸波器成为当前的研究热点之一. 与传统电磁吸波器相比, 超材料吸波器在提高吸波性能、实现微型化方面有更好的应用前景. 2008年 Landy^[8]等提出一种由金属谐振器、电介质层和金属薄膜组成的新结构,

首次从实验上实现了利用超材料对特定电磁波的完美吸收,自此开启了众多学者对超材料吸波器研究的热潮.然而在吸波器的早期设计中存在一些严重的缺陷,诸如入射角度窄、偏振敏感和单一吸收频带等.之后的研究主要针对上述问题开展突破,实现的吸收频率从单频段到双频段^[9,10],甚至多频段^[11,12]以及达到超宽带^[13]吸收,工作频段相继涵盖光学^[14,15]、红外^[16,17]、太赫兹^[18,19]、微波^[20]等范围.其中,基于 VO₂设计的各种吸波器也有所报道. VO₂是一种相变材料,具有绝缘体-金属相变特征,相变温度为 68℃.在其相变过程中,其电导率迅速增大,且这个过程是可逆的.由于 VO₂具有这种特殊的性质,在吸波器的设计中有利于实现灵活调控.例如,Wang^[21]等人提出在耶路撒冷十字结构的周围添加 VO₂材料的 L 构成田字形贴片,当温度高于相变温度时形成一个吸收峰,而温度低于相变温度时则形成两个吸收峰;Zhao^[22]等人以三个 I 型结构为谐振单元,同时叠加 VO₂薄层和 VO₂谐振单元构造出多层吸波器结构,通过调节温度实现了从 0.76 ~ 0.86THz 到 1.12 ~ 1.25THz 的宽带调节;Dao^[23]等人直接采用 VO₂车轮结构作为谐振单元,实现了在温度为 350K 时的 4.29 ~ 5.52THz 的宽带吸收.以上文献中设计的可调吸波器,虽然均实现了对吸收频带的调节,但仍存在仅有单个吸收峰、吸收谱带宽较窄、结构较为复杂等不足之处.本文针对上述问题,提出了一种在介质基片结构上加载两种不同半径 VO₂圆环的新型超材料吸波器,不仅结构简单,易于实验制作,而且可通过调节温度对吸波器实现“开关”功能,并实现了带宽更宽、偏振和入射角不敏感等更优的吸波性能.

2 结构与仿真

本文中设计的超材料吸波体结构如图 1 所示,属于典型的“三明治”型结构.底层由连续的金膜构成,采用 Au 作为反射层;中间是介质层,采用电磁参数为 $\epsilon_r = 4.3(1 + 0.025i)$ 的一种人工合成介质;顶层是谐振单元,由四个不同半径的 VO₂圆环共面排列组成,其中两个外半径为 R 的大圆环位于结构的主对角线上,而两个外半径为 r 的小圆环位于副对角线上.优化后的结构参数如下:结构单元 $P = P_x = P_y = 50\mu\text{m}$,金属薄膜厚度 $h_g = 0.2\mu\text{m}$,介质层厚度 $h_s = 4\mu\text{m}$,VO₂圆环厚度 $h_r = 0.2\mu\text{m}$,大圆环外半径 $R = 12\mu\text{m}$,小圆环外半径 $r = 8\mu\text{m}$,圆环宽度 $w = 3.5\mu\text{m}$.由于 VO₂在温度控制下会发生相变,在仿真过程中,VO₂的介电常数通常可以采用 Drude 模型来描述^[22]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 - i\gamma\omega} \quad (1)$$

式中的高频介电常数 $\epsilon_\infty = 12$,碰撞频率 $\gamma = 5.75 \times 10^{13}$

rad/s,而等离子频率 $\omega_p(\sigma)$ 与电导率相关,用公式 $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$ 来表示,式中的 $\sigma_0 = 3 \times 10^5 \text{S/m}$, $\omega_p^2(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15} \text{rad/s}$.本文主要研究 VO₂在相变前后对吸波器的调制作用,VO₂在 300K 时属于半导体相,温度高于相变温度时表现为金属性质,根据参考文献 [23] 中的数据选择: $T = 300\text{K}$, $\sigma = 2 \times 10^2 \text{S/m}$; $T = 350\text{K}$, $\sigma = 2 \times 10^5 \text{S/m}$.

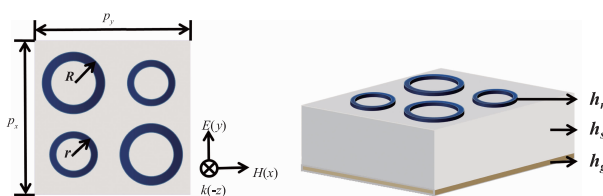


图1 超材料吸波器单元结构

使用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对设计结构进行仿真.电磁波沿 z 轴垂直入射吸波器结构的表面, x 轴和 y 轴方向均设置为周期性边界条件,其中电场 E 沿 y 轴方向,磁场 H 沿 x 轴方向,规定为 TE 模式,如图 1 所示;当电场 E 沿 x 轴方向,磁场 H 沿 y 轴方向时规定为 TM 模式.仿真得到的 S 参数可以用于计算该吸波体对太赫兹波的吸收率.根据电磁理论可知,吸收率公式为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$,其中反射率 $R(\omega) = |S_{11}|^2$,透射率 $T(\omega) = |S_{21}|^2$.严格地说,还存在极化转换部分,应当减掉.但由于该结构的谐振环满足空间对称性,极化转换很小,可忽略不计.鉴于底层金属薄膜的厚度远大于太赫兹波的趋肤深度,阻止了太赫兹波的透射,因而可以忽略透射率 $T(\omega)$,最终吸收率的公式简化为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$,当反射率接近 0 时可以实现完美吸收.

3 仿真结果与分析

首先对图 1 所示的吸波器结构分别在 300K 与 350K 时入射电磁波的频率和吸收率关系进行了仿真,并与采用金属圆环代替 VO₂圆环得到的结果进行比较,如图 2(a) 和 (b) 所示.从图 2(a) 中可以看出,当 VO₂ 的温度为 300K 时吸收率在 6 ~ 12THz 范围内始终低于 20%,大部分电磁波被反射回去,此时相当于吸波器处于“关闭”状态;而当 VO₂ 的温度为 350K 时却呈现出截然不同的吸收特性,在相同频率范围内吸收率总体上显著提高,特别是在 8.09 ~ 11.23THz 的带宽范围内吸收率始终保持在 90% 以上,此时的吸波器相当于“打开”状态,绝对带宽高达 3.14THz,相对带宽达到 32.5%,具有良好的宽带吸收性能.图 2(b) 展示了谐振单元分别为 VO₂圆环和相同尺寸的金(金)圆环时的吸收谱线.可以清楚地看到,虽然单纯的金属圆环加载

的结构呈现了三个高吸收峰,但带宽较窄.这是因为此种情况下谐振单元是由两种不同半径的金属圆环构成,相当于两个金属谐振器,除了各自圆环可以产生独立的谐振频率外,同时在两种不同环之间的相互耦合可激发其它高次谐波.如果等效于电路模型的话,每种独立模式对应于一组等效电容和电感,它们的耦合还会产生出其它模式是相类似的;对于 VO₂在温度高于相变温度时虽然也表现为金属性质,但与金相比,其介电常数的频散特性更为明显(详见式(1)),因而通过各自圆环尤其是不同环产生电磁谐振时,更易于在多个频点满足谐振条件以及频带展宽,从而使吸收频带总体上得到展宽.由此可见,VO₂不仅有利于改善吸收率,更能够实现吸收带宽的调制.为了对比本文所采用的两对角线不同尺寸圆环结构优越于同一尺寸大圆环或小圆环结构,分别对谐振圆环材料为金属和 VO₂、谐振结构分别为两种不同半径圆环相结合、全为同一半径大圆环以及全为同一半径小圆环时的吸收频谱进行了仿真,如图 2(c)和(d)所示.从图 2(c)可以看出,谐振结构全为大圆环时,只有一个高吸收峰,谐振结构全为小圆环时,在所选吸收频段内没有出现高吸收峰,而大小圆环相结合的结构表现出三个高吸收峰.图 2(d)将谐振结构换为 VO₂圆环结构后,大小圆环相结合的结构表现出更宽的频带和更好的吸收性能.由此可见,本文所涉及的大小圆环相结合的结构相比单一的大圆环和小圆环结构有更加明显的优势.

对于 VO₂加载结构在两种温度下吸波能力的区别可以用电磁理论中阻抗匹配原理来说明,如图 3 所示.设吸波体的相对等效波阻抗为 Z ,自由空间的相对阻抗为 $Z_0 = 1$,吸波器的等效阻抗由以下公式所得^[24]:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_r(\omega)}{\varepsilon_r(\omega)}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2)$$

其中, S_{11} 和 S_{21} 分别为反射系数和透射系数.而表面反射率为:

$$R = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right| \quad (3)$$

当 $Z = Z_0$ 时,称阻抗匹配,此时 $R(\omega) = 0$,即可达到完美吸收.

在图 3 中,当 VO₂温度为 300K 时,吸波器等效阻抗的实部在 6 ~ 11THz 范围内几乎为 0,但存在着虚部,故由式(3)不难得出其反射率较大,因而 $A(\omega)$ 很小;当 VO₂的温度为 350K 时,等效阻抗在 8.09 ~ 11.23THz 范围内其实部 $\text{Real}(Z)$ 在 1 上下波动,同时虚部 $\text{Imag}(Z)$ 则接近于 0,由式(3)可见此时反射率很小,故而 $A(\omega)$ 很大,这表明吸波器在该频段的等效阻抗与自由空间的阻抗达到较好的匹配,从而实现了较宽频带的高吸收率.对于图 3(a)与(b)等效阻抗的差别,主要源于等

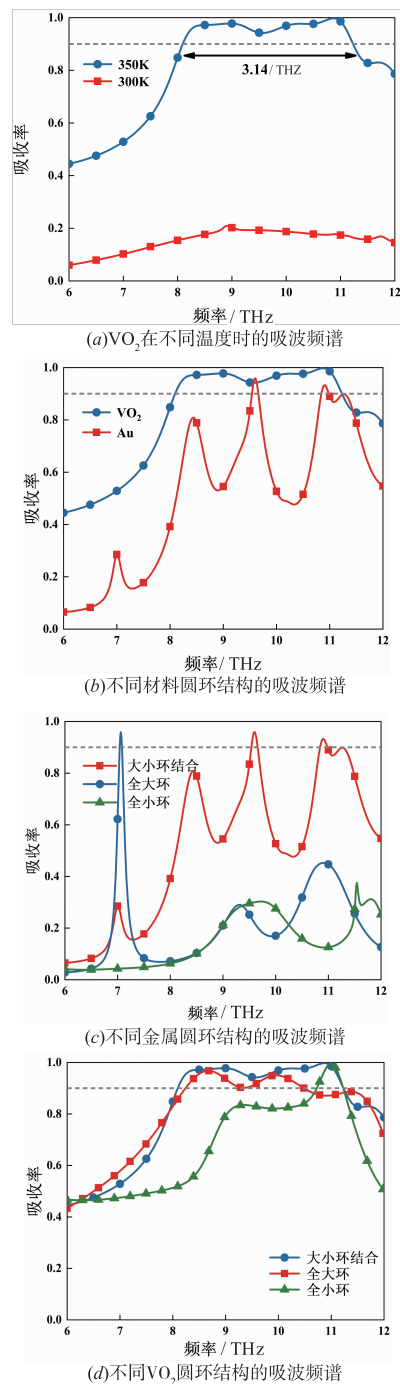


图2 不同情形下吸波体的吸波频谱

效介电常数的不同. VO₂的等效介电常数可表示为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' + i \frac{\sigma(\omega)}{\omega} \quad (4)$$

由上式可见,其等效介电常数既与其电导率有关,又与入射波的频率有关,因此在 VO₂处于不同温度时,即使在相同频段的太赫兹波其 S 参数也各不相同,又由式(2)不难看出, S 参数的不同,必然导致等效阻抗也不同.

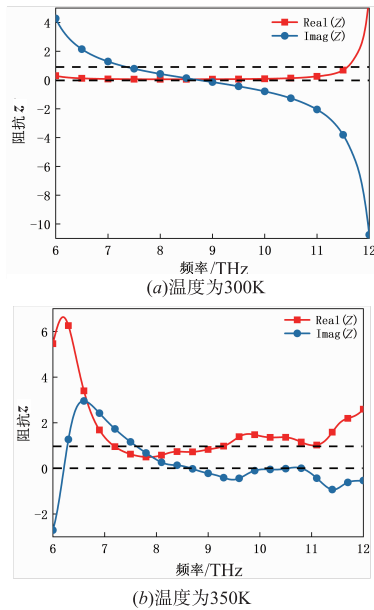


图3 不同温度时的等效阻抗

为了进一步揭示吸波器的吸波机制,分别选取两个谐振频率 $f_1 = 8.97\text{THz}$ 和 $f_2 = 10.87\text{THz}$,对谐振频率处的圆环表面的电场分布进行描述,仿真结果如图4所示.对于第一个谐振频率 $f_1 = 8.97\text{THz}$,电场主要沿竖直方向集中在大圆环的上下两侧以及圆环内部,电场作用的效果使圆环上极性相反的电荷分布形成一对等效电偶极子,而在小圆环处也存在强度较弱的电场,分布在小圆环外侧,且沿 45° 和 135° 的对角线形成两对等效电偶极子.因此对于该频率的电磁波的吸收主要是由电偶极子激励,通过电磁场相互转化产生电磁谐振.对比图4(a)和图4(b)可知, $f_2 = 10.87\text{THz}$ 的谐振频率下大圆环的电场分布为高阶模式,一般高阶模都出现在较高的频率处,图4(b)中小圆环的电场分布与图4(a)中大圆环的场分布情况有所不同,虽然也是上下两侧场强较大,在圆环内部、内侧以及外部分别产生极性相反的三对等效电偶极子,大圆环内的场相对于前者较强,表明存在着相邻谐振环的耦合模.综上所述,吸波器的宽带吸收取决于金属相 VO_2 的电磁谐振在多频点产生,进而实现更宽频带的高效吸收.

接下来分析该吸波器与偏振方向及入射角的关系,分别取电场强度与 x 轴夹角为 $0 \sim 80^\circ$ 的方向、TE模时入射角为 $0 \sim 80^\circ$ 的入射波方向进行仿真,其结果如图5所示.图5(a)为入射波的频率取为 $6 \sim 12\text{THz}$ 范围内吸收率与偏振角度的关系.从中可以看到,随着偏振角度从 0° 增至 80° ,在 $8.09 \sim 11.23\text{THz}$ 带宽范围内吸收率的大小均未发生明显变化,这表明该吸波器具有良好的偏振无关性,适应各种偏振角度的电磁波入射.这主要源于所设计的吸波器不仅关于主副对角线具有

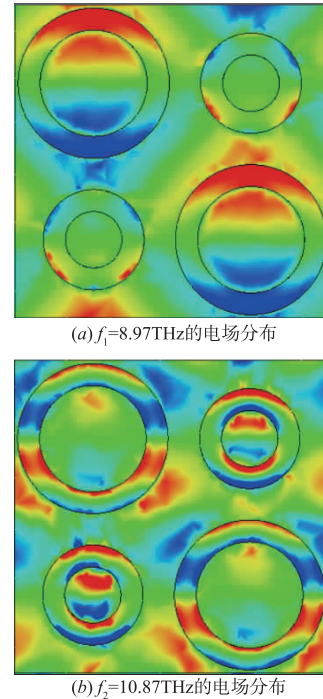


图4 温度为350K时,不同谐振频率下电场分布(Z分量)

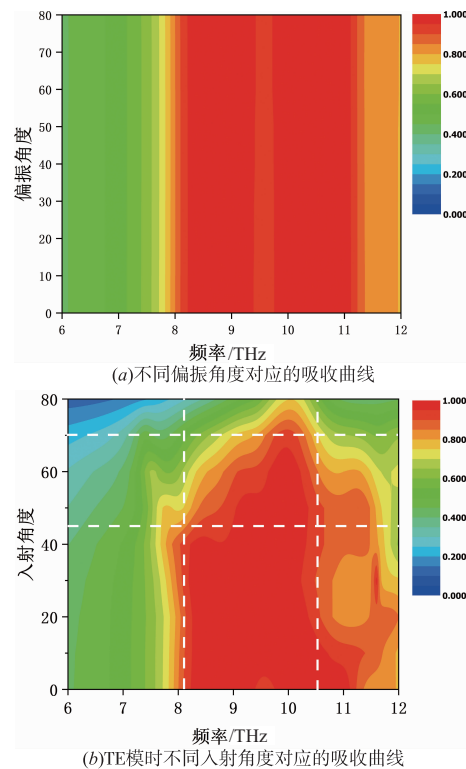


图5 偏振角度和入射角度对超材料吸波器的吸收特性的影响

对称性,而且圆环形的谐振器对于不同偏振方向的电磁波所引起的谐振响应差异不大.图5(b)为TE模时不同入射角度时在相同频率范围内对应的吸收率.可以看到,入射角较小时在 $8.09 \sim 11.23\text{THz}$ 带宽范围内吸

收率达到 90% 且基本不变,但是当入射角度大于 45° 时,吸收率开始有所减小,虽然吸收带宽逐渐变窄,但斜入射情况下依然能实现 2.41THz 的宽带吸收. 随着入射角度进一步扩大至 70°,低频处的吸收率有明显下降,但在 9.5 ~ 10.5THz 的良好吸收基本未受到影响. 这是因为当电场沿 y 轴,磁场强度的水平分量随入射角的增大而减小,导致耦合和吸收率的减小. 由此可见,该吸波器的吸收性能在较大的入射角范围内受到的影响较小,即使在入射角度为 70° 也能保持 1THz 的宽带吸收,完全具备宽角度入射的优良特性. 由于结构的对称性, TM 模时不同入射角度的吸收曲线与 TE 模时基本一致,在此不再赘述.

吸波器的结构参数对吸收曲线的影响也不容忽视,分别对大圆环半径 R 、小圆环半径 r 、圆环宽度 w 以

及圆环厚度 h ,取不同值时的吸收频谱曲线进行了仿真,其结果如图 6 所示. 从图 6(a) 可以看到,当大圆环半径分别取 10 μm 、11 μm 、12 μm 不同值时,低频吸收峰的吸收率随之明显升高,吸收带宽也随之增大. 在图 6(b) 中,改变小圆环的半径时,虽然吸收带宽随着 r 的增加会有所展宽,但吸收率也有所下降,因此选择 $r = 8\mu\text{m}$ 既保证了吸收带宽,又保证了良好的吸收性能. 在图 6(c) 中,圆环宽度的变化对吸收带宽的影响较大. 当宽度 w 分别为 3 μm 、3.5 μm 、4 μm 、4.5 μm 时,可以清楚看出 $w = 3.5\mu\text{m}$ 时,都优于其他情况. 而圆环厚度对吸收性能的影响如图 6(d) 所示,在 $h_r = 0.2\mu\text{m}$ 时吸波器的性能最佳,实现的宽带吸收最好. 总之,可以通过调节吸波器的结构参数,不断优化吸收性能,达到 THz 波段的超宽带吸收.

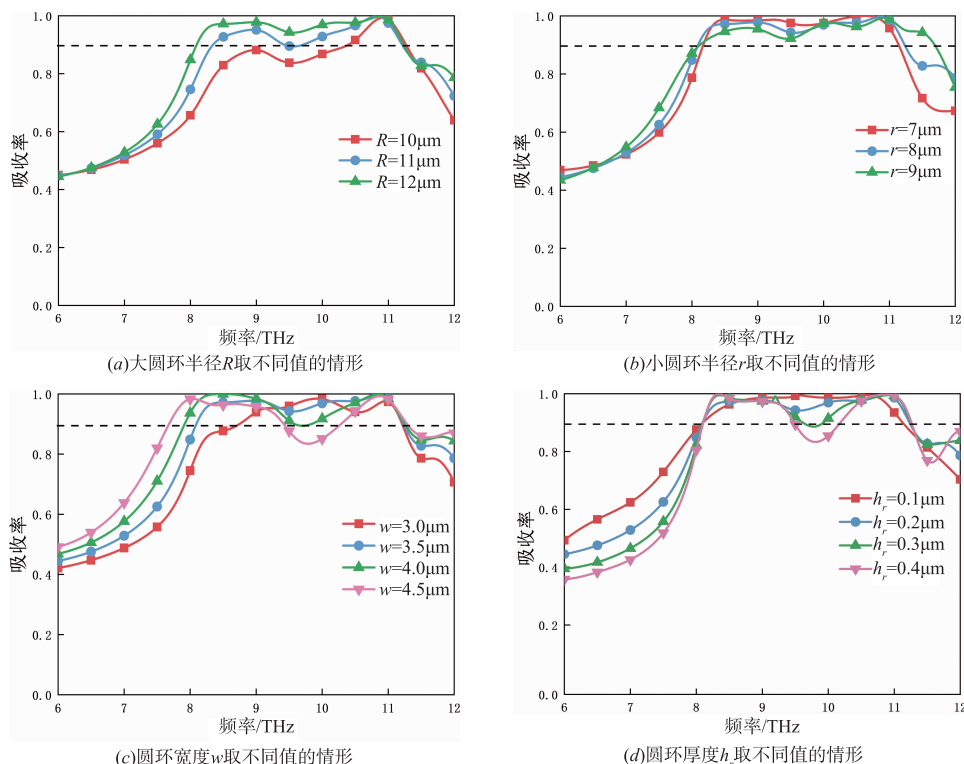


图6 吸波器不同结构参数对吸收曲线的影响

4 结论

本文基于相变材料 VO₂ 提出一种宽带可调超材料吸波器,不仅实现对吸收率的调制,同时也实现了对吸收带宽的调制. 当温度低于相变温度时,吸收率保持在 20% 以下,关闭吸波器的吸收功能;而当温度升至相变温度以上时,开启吸波器,在 8.09 ~ 11.23THz 的超宽频带实现吸收率高于 90% 的良好吸收. 通过分析吸波器的等效阻抗和谐振频率处的电场分布,定性解释了该吸波器具有宽带及高吸收率的机理. 对偏振角度和

入射角度的分析,则说明了该吸波器具备良好的偏振无关和宽角度入射特性. 此外还分析了吸波器的主要结构参数对吸收曲线的影响. 本文的研究结论对于设计高性能可调吸波器以及温度传感具有一定的指导意义.

参考文献

- [1] 娄明连, 阚涛, 谢玉荣. 结构型铁磁基复合电波吸收体研究[J]. 电子元件与材料, 1998, 17(3): 18-20.
- [2] 崔晓冬, 刘顺华, 管洪涛, 等. 双层吸波材料吸波特性研究[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(5): 725-729.

- [3] Hu T, 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): 241103.
- [4] Shalaev, Vladimir M. Optical negative-index metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(1): 41–48.
- [5] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966–3969.
- [6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977–980.
- [7] 崔万照, 马伟, 邱乐德, 等. 电磁超介质及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 8–14.
- [8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. A perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [9] Tak J, Jin Y, Choi J. A dual-band metamaterial microwave absorber [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(9): 2052–2057.
- [10] Yao G, Ling F, Yue J, et al. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1518–1527.
- [11] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, et al. Design of a four-band and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1–8.
- [12] Meng T H, Hu D, Zhu Q F. Design of a five-band terahertz perfect metamaterial absorber using two resonators [J]. *Optical Communication*, 2018, 415: 151–155.
- [13] Soheilifar M R. The wideband optical absorber based on plasmonic metamaterials for optical sensing [J]. *Optik*, 2019, 182: 702–711.
- [14] Luo M H, Shen S, Zhou L, et al. Broadband, wide-angle, and polarization-independent metamaterial absorber for the visible regime [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16715.
- [15] Tuan T S, Hoa N T Q. Numerical study of an efficient broadband metamaterial absorber in visible light region [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 1–10.
- [16] Kim J, Han K, Hahn J W. Selective dual-band metamaterial perfect absorber for infrared stealth technology [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6740–6740.
- [17] Xu H X, Hu L Z, et al. Dual-band metamaterial absorbers in the visible and near-infrared regions [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 2019, 123(15): 10028–10033.
- [18] Cumali S, Batuhan M, Hakan A, et al. Cross-like terahertz metamaterial absorber for sensing applications [J]. *Pramana Journal of Physics*, 2018, 91(2): 17.
- [19] Meng H Y, Wang L L, et al. A simple design of a multi-band terahertz metamaterial absorber based on periodic square metallic layer with T-shaped gap [J]. *Plasmonics*, 2018, 13(1): 269–274.
- [20] Bakir M, Karaaslan M, Unal E, et al. Microwave metamaterial absorber for sensing applications [J]. *Opto-Electronics Review*, 2017, 25(4): 318–325.
- [21] 王可欣, 王斌科, 田昌会, 屈绍波. Au/VO₂ 结构可调控红外吸收器 [J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2018, 19(5): 36–40.
- [22] Zhao Y, Huang Q P, Cai H L, et al. A broadband and switchable VO₂-based perfect absorber at THz frequency [J]. *Optical Communication*, 2018, 426: 443–449.
- [23] Dao R N, Kong X R, Zhang H F, et al. A tunable broadband terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide [J]. *Optik*, 2019, 180: 619–625.
- [24] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from in homogeneous metamaterials [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(3): 036617.

作者简介



任英楠 女, 1996 年出生, 现为太原理工大学物理与光电工程学院在读硕士研究生. 研究方向: 电磁超材料及其应用.
E-mail: yingnan_ren@163.com



曹斌照 (通信作者) 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 研究生导师, 研究方向: 微波、太赫兹电磁波在波导系统中的传输及新型电磁材料的应用.
E-mail: caobinzhao@tyut.edu.cn