

缺陷组合嵌入 VO₂ 薄膜结构的可调太赫兹吸收器*

陈旭生 李九生†

(中国计量大学, 太赫兹研究所, 杭州 310018)

(2019年10月7日收到; 2019年11月5日收到修改稿)

提出一种多缺陷组合嵌入 VO₂ 薄膜结构的可调太赫兹吸收器, 它由上表面金属图案层、基体和底层金属板三层结构组成, 在上表面和基体之间嵌入二氧化钒介质. 计算结果表明在 $f = 4.08$ THz 和 $f = 4.33$ THz 两频点吸收率分别为 99.8% 和 99.9%. 通过改变外界环境温度可控制二氧化钒相变, 从而使两个频点吸收率从 99.8% 变化到 1.0%. 改变入射角和偏振态, 计算结果表明在入射角 0°—40°, 吸收器在 TE 和 TM 两种极化波下吸收率都能在 98% 以上. 该太赫兹波吸收器具有高吸收、动态调谐、极化不敏感等特性, 本文所设计的可调太赫兹吸收器在太赫兹波相关领域, 例如探测器、开关、动态调制器、隐身技术等方面具有很好的应用前景.

关键词: 太赫兹波, 二氧化钒, 多缺陷组合, 太赫兹吸收器

PACS: 78.20.Ci, 81.05.Xj, 78.47.jh

DOI: 10.7498/aps.69.20191511

1 引言

超材料吸收器具有厚度薄、尺寸小、结构简单和吸收率高的优点, 可广泛应用于电磁隐身^[1,2]、传感器^[3,4]、热成像^[5]、太阳能光伏^[6,7]、光催化剂^[8–10]等领域. Landy 等^[11]研究出一种超材料吸收器, 通过对所设计的吸收器结构参数扫描优化, 使得电磁波照射到吸收器中后不发生反射也不透射, 实现完全吸收. 在众多学者持续努力下, 多频点与宽带超材料吸收器都有了很大的发展. Li 等^[12]利用闭合三圆环在太赫兹波段实现了三频段近完美吸收. Grzeskiewicz 等^[13]利用微结构金属与 SU-8 组合在太赫兹波段实现了单频点吸收. Bakshi 等^[14]利用简单的 H 形金属镂空结构实现了太赫兹多频带吸收. Mohanty 等^[15]将简化的 PI 形和 U 形金属条组合实现了太赫兹波段多频吸收. Karimi 等^[16]利用矩形石墨烯阵列实现了太赫兹波段宽带吸收,

并利用等效电路模型进行了阐述说明. Biabanifard 和 Abrishamian^[17]将多层条状石墨烯进行组合, 不同层石墨烯对应不同费米能级, 实现了太赫兹波段宽带吸收. Wang 等^[18]利用石墨烯与多缺陷金属环相结合在太赫兹波段实现了宽带吸收. Daraei 等^[19]运用等效电路模型阐述了两层尺寸不同的石墨烯圆盘阵列在太赫兹波段的宽带吸收原理. 在固定频点吸收不可调谐的缺点日渐凸显, 实现吸收率等可调谐的太赫兹吸收器在太赫兹波相关领域, 例如探测器、开关、动态调制器、隐身技术等方面具有很好的应用前景.

本文设计了多缺陷组合嵌入 VO₂ 薄膜结构可调太赫兹吸收器, 在顶层超材料和基体之间嵌入了一层 VO₂ 层, 通过控制外界环境温度促使 VO₂ 从绝缘态相变成金属态, 可实现不改变器件结构对吸收器吸收率的动态调谐. 研究结果表明该吸收器在 $f = 4.08$ THz 与 $f = 4.33$ THz 处吸收率分别为 99.8% 和 99.9%, 通过改变工作环境温度可实现

* 国家自然科学基金 (批准号: 61871355, 61831012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jshli@126.com

吸收率从 99.9% 变化为 1%, 且在入射角 $0^\circ-40^\circ$ 对 TE 和 TM 两种极化不敏感.

2 结构设计

图 1 所示为本文设计的多缺陷组合嵌入 VO_2 薄膜结构可调太赫兹吸收器, 它由上表面金属图案层、二氧化钒层、基体和金属底板组成. 顶层金属图案由缺陷圆环、缺陷十字架以及中心圆环三部分构成, 顶层金属图案与底层金属板所用材料都为金, 电导率为 $\sigma_{\text{gold}} = 4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$, 厚度为 $0.5 \mu\text{m}$. 二氧化钒层材料为 VO_2 薄膜, 其厚度为 $0.2 \mu\text{m}$. 基体所用材料为 Si, 相对介电常数 $\epsilon = 11.9$, 厚度为 $35 \mu\text{m}$. 图 1(b) 为吸收器的单元结构俯视图.

为了研究所设计吸收器的双频吸收机理, 在室温下, 分别对不同组合结构进行了仿真计算, 得到三种结构的吸收率曲线 (图 2). 为了分析不同组合

结构的吸收机理, 对每个结构各自高吸收频率点在 TE 模式下进行电场分析 (图 3). 组合一结构只有中心圆环和缺陷圆环, 低频率点的吸收峰在 4.06 THz 处吸收率达到 93%, 此时的能量主要集中在中心圆环的上下部位; 高频率点的吸收峰在 4.27 THz 处吸收率只有 73.8%, 能量主要集中在缺陷圆环的缺口处和圆环的边缘处. 组合二结构只有缺陷圆环和缺陷十字架, 低频率点的吸收峰在 4.03 THz 处吸收率只有 76.3%, 大部分能量出现在左右两个十字架枝节和带缺陷圆环的间隙处, 在缺陷圆环的外边缘也出现了部分能量团; 高频率点的吸收峰在 4.33 THz 处吸收率达到 99.5%, 与低频率点相比, 此处频率点在缺陷处和缺陷圆环边缘处能量都有所加强; 此外这种模式还出现了第三个吸收峰, 在 4.38 THz 处吸收率为 93.8%. 组合三结构为中心圆环和缺陷十字架, 低频率点吸收峰在 4.06 THz 处的吸收率为 88.6%, 能量主要集中在中心圆环和缺陷十字架的间隙处; 高频率点吸收峰

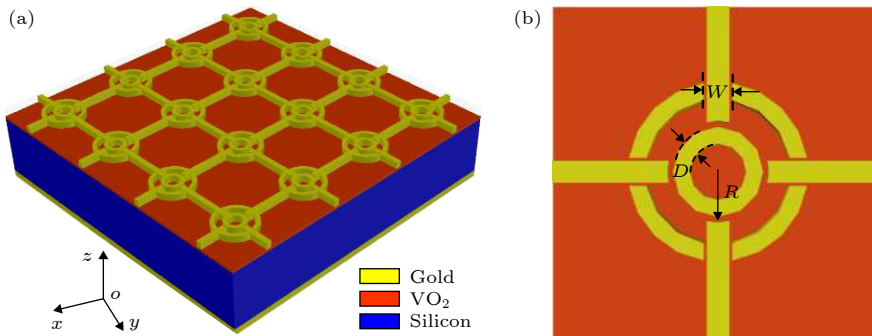


图 1 多缺陷组合结构可调太赫兹吸收器 (a) 单元结构三维立体图; (b) 单元俯视图

Fig. 1. Adjustable terahertz absorber with multiple defects: (a) Three-dimensional of unit structure; (b) top view of unit structure.

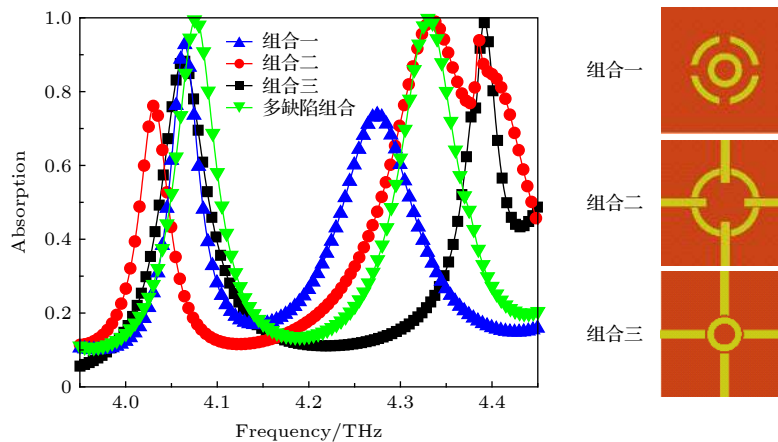


图 2 不同组合形成的吸收器吸收曲线

Fig. 2. Absorption curves of the absorber formed by different combinations.

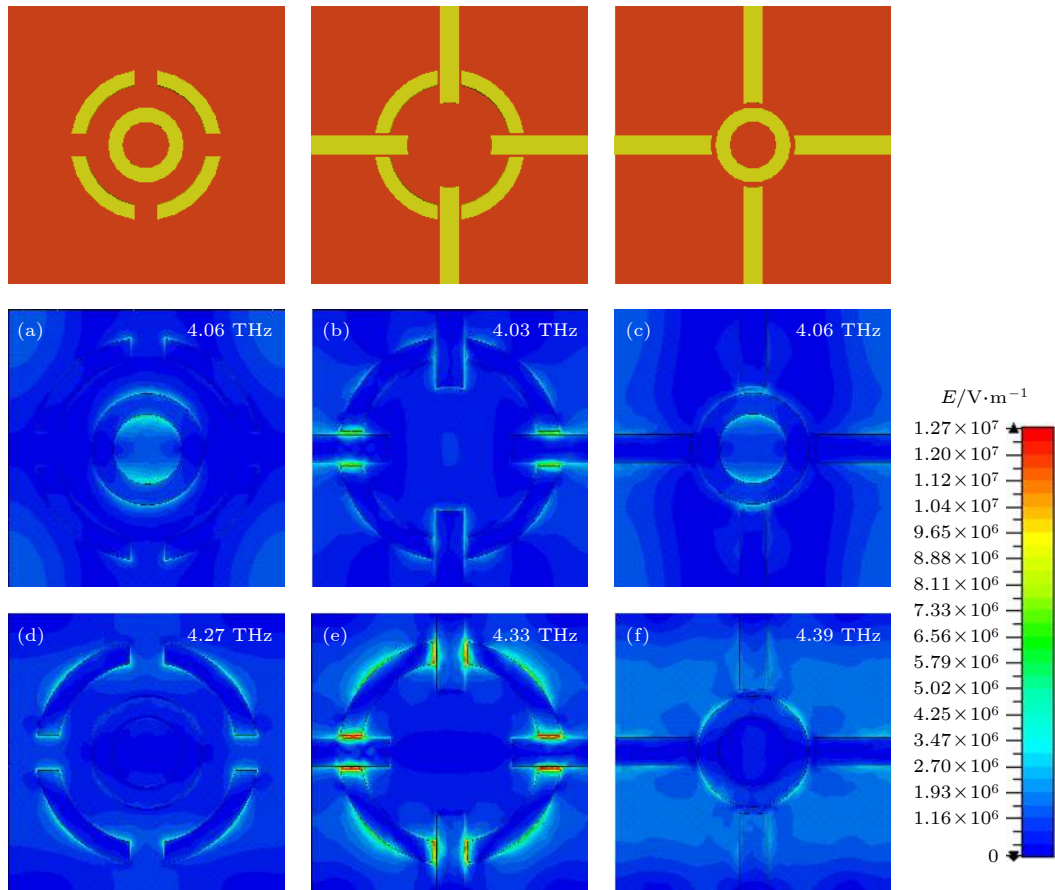


图 3 TE 模式下电场 E 分布图 (a) 组合一, $f = 4.06$ THz; (d) 组合一, $f = 4.27$ THz; (b) 组合二, $f = 4.03$ THz; (e) 组合二, $f = 4.33$ THz; (c) 组合三, $f = 4.06$ THz; (f) 组合三, $f = 4.39$ THz

Fig. 3. Electric field distribution in TE mode: (a) Combination 1, $f = 4.06$ THz; (d) combination 2, $f = 4.27$ THz; (b) combination 2, $f = 4.03$ THz; (e) combination 2, $f = 4.33$ THz; (c) combination 3, $f = 4.06$ THz; (f) combination 3, $f = 4.39$ THz.

在 4.39 THz 处吸收率达到 98.7%，上下两个十字架枝节和中心圆环的外边缘出现了能量团. 综上所述可见, 低频率点吸收主要受中心圆环影响, 其次还受到缺陷圆环影响; 高频率点吸收主要受缺陷圆环的影响, 受中心圆环的影响较小. 将上述三种多缺陷组合成一个整体, 该结构可实现在太赫兹波 $f = 4.08$ THz 和 $f = 4.33$ THz 处吸收率达到 99.8% 和 99.9%. 将三种模式的组合进行整合后在 TE 模式下吸收器电场分布与电流分布如图 4, 图 4(a) 为 $f = 4.08$ THz 处电场分布, 吸收能量集中在中心圆环上下处, 在缺陷圆环边缘也出现了少许能量; 图 4(b) 为 $f = 4.33$ THz 处电场分布, 能量主要集中在缺陷圆环的边缘和缺口间隙处; 图 4(c) 为 $f = 4.08$ THz 处的电流分布, 可观察到电流集中在带缺陷圆环、十字架与中心圆环; 图 4(d) 是高频率点 $f = 4.33$ THz 处电流分布, 电流主要分布在外围缺陷圆环和十字架组合上, 中心圆环几乎没有电流分布. 可见低频率处的吸收峰受到了中心圆环的影

响, 同时外围缺陷圆环和十字架的组合对低频率处的吸收率也有影响; 高频率点的吸收峰主要受到外围缺陷圆环和十字架的影响.

对影响吸收频率点的重要参数进行扫描分析, 计算结果如图 5 所示. 从图 5(a) 中看出, 随着 R 增大, 低频率点发生蓝移, 吸收率也稍微降低. 当 $R = 8.5 \mu\text{m}$ 时, 吸收器的吸收率最高, 达到 99.2%; 当 $R = 9.0 \mu\text{m}$ 时, 吸收器吸收率为 98.9%; 当 $R = 9.5 \mu\text{m}$ 时, 吸收器的吸收率为 98.9%; 当 $R = 10 \mu\text{m}$ 时, 吸收器的吸收率为 98.8%. 在这个过程中发现吸收器的高频率点并没有发生明显的移动, 吸收率保持不变. 可以得出这样的结论, 缺陷十字架与中心距离 R 主要对吸收器的低频率点产生影响, 调节 R 大小, 可以实现吸收器的低频率点吸收率的优化. 此外, 本文还对缺陷圆环缺陷宽度 W 和中心圆环宽度 D 进行了仿真计算. 从图 5(b) 中可以看出, 缺陷宽度 W 对吸收器的低频率点几乎没有影响, 主要对吸收器的高频率点产生影

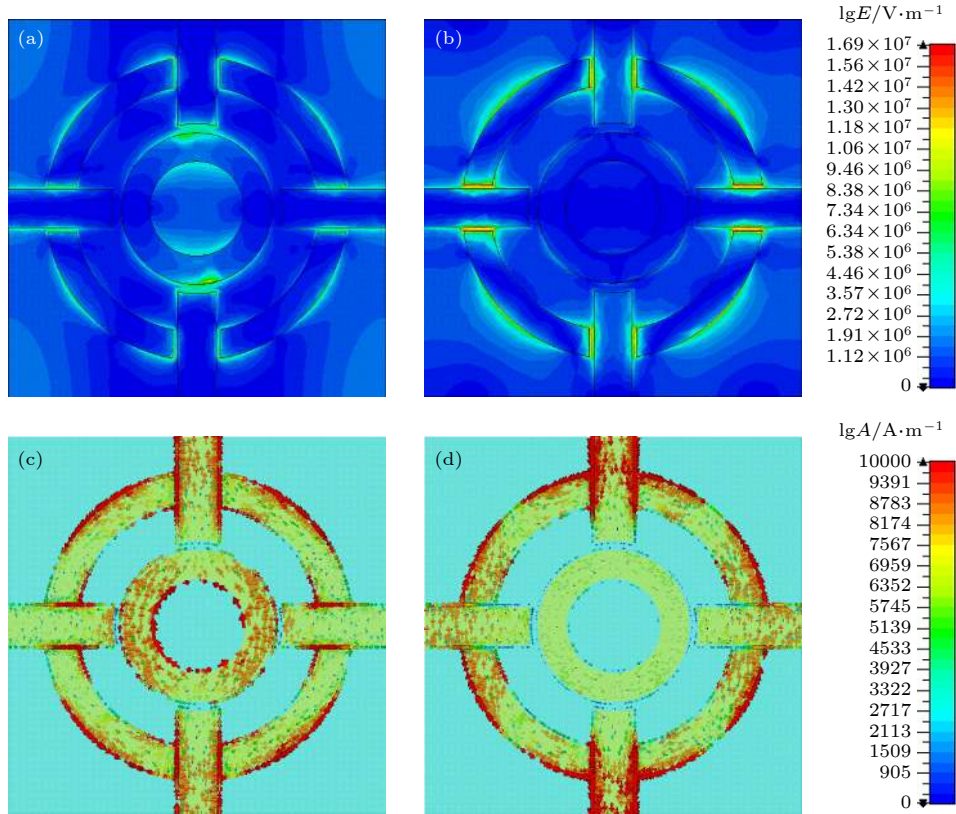


图 4 多缺陷组合 TE 模式下电场 E 和电流 A 分布图 (a) $f = 4.08$ THz, 电场分布; (b) $f = 4.33$ THz, 电场分布; (c) $f = 4.08$ THz, 电流分布; (d) $f = 4.33$ THz, 电流分布

Fig. 4. Electric field and current distribution in TE mode with multiple defects: (a) $f = 4.08$ THz, electric field distribution; (b) $f = 4.33$ THz, electric field distribution; (c) $f = 4.08$ THz, current distribution; (d) $f = 4.33$ THz, current distribution.

响. $W = 4.5 \mu\text{m}$, $f = 4.31$ THz 处吸收率为 98.6%; $W = 5.0 \mu\text{m}$, $f = 4.33$ THz 处吸收率为 99.9%; $W = 5.5 \mu\text{m}$, $f = 4.34$ THz 处的吸收率为 99.0%; $W = 6.0 \mu\text{m}$, $f = 4.35$ THz 处吸收率为 97.6%. 可见随着 W 增加, 高频率点发生了蓝移. 中心圆环宽度 D 与吸收器吸收率的关系如图 5(c) 所示. 从图 5(c) 中可以观察到, 保持中心圆环圆心不变, 改变圆环宽度 D 从 $2 \mu\text{m}$ 变化到 $4 \mu\text{m}$, 吸收器在低频率点产生蓝移, 而高频率点产生红移, 且两个频率点上的吸收率均下降, 这是因为中心圆环宽度变化实际上改变了缺陷十字架与圆环之间间隙的宽度, 金属之间电磁共振强度也随着距离的增大而减弱, 当宽度 $D = 2.5 \mu\text{m}$ 时, 共振强度最大, 吸收效果最好. 该吸收器优化得到的基本尺寸参数如下: 周期为 $40 \mu\text{m}$, 顶层金属图案中缺陷圆环缺口宽度为 $W = 5 \mu\text{m}$, 缺陷圆环宽度为 $2 \mu\text{m}$, 其外半径为 $16 \mu\text{m}$, 中心圆环宽度为 $D = 2.5 \mu\text{m}$, 其外半径为 $8 \mu\text{m}$, 缺陷十字架与单元中心位置距离为 $R = 8.5 \mu\text{m}$, 缺陷十字架宽度为 $4 \mu\text{m}$.

3 结果与分析

VO_2 薄膜是一种比较典型的相变材料, VO_2 由绝缘态向金属态转变时, 电导率会有 3—5 个数量级的变化^[20]. 根据材料介电函数与电导率的关系^[21]可以得到相变过程中不同温度所对应的 VO_2 薄膜的电导率关系为

$$\sigma = -i\epsilon_0\omega(\epsilon_C - 1), \quad (1)$$

其中, σ 为复合体系的电导率, ϵ_0 为真空介电常数, 复合体系的介电函数 ϵ_C 与温度相关. 图 6 所示为 VO_2 电导率随温度变化的曲线, 随着温度升高到达相变点 $68 \text{ }^\circ\text{C}$, VO_2 电导率发生骤变; 温度继续上升至 $80 \text{ }^\circ\text{C}$, VO_2 电导率成稳定状态, 此时相变完成, 并且过程可逆. 利用前文优化后的结构参数结合器件工作温度变化, 计算得到不同温度下吸收器的吸收率曲线如图 7(a) 所示, 当室温 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 吸收器在 $f = 4.08$ THz 和 $f = 4.33$ THz 处吸收率分别为 99.8% 和 99.9%. 随着温度升高, 吸收

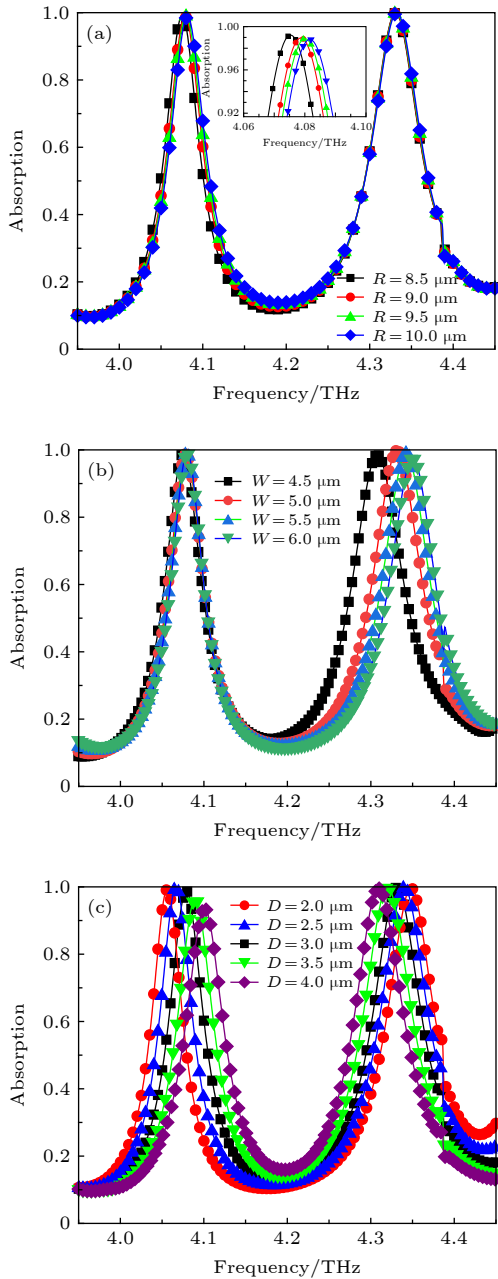


图5 结构参数改变对应的吸收率曲线 (a) 缺陷十字架距离中心距离 R ; (b) 缺陷圆环缺陷宽度 W ; (c) 中心圆环宽度 D

Fig. 5. Absorption curves corresponding to the change of structural parameters: (a) Defect cross distance from center R ; (b) defect ring width W ; (c) center ring width D .

器的两处频点的吸收率逐渐降低. 当 $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $f = 4.08\text{ THz}$ 与 $f = 4.33\text{ THz}$ 处吸收率分别为 79.8% 和 65.1%, 当温度升高到 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时, VO_2 已相变成金属相, 吸收器吸收率变为 1.0%. 在这渐变的过程中, 吸收器吸收峰发生轻微蓝移, 这是由于 VO_2 在绝缘态往金属态发生相变过程中电导率在不断变大导致的. 根据吸收器理论, 吸收率 $A =$

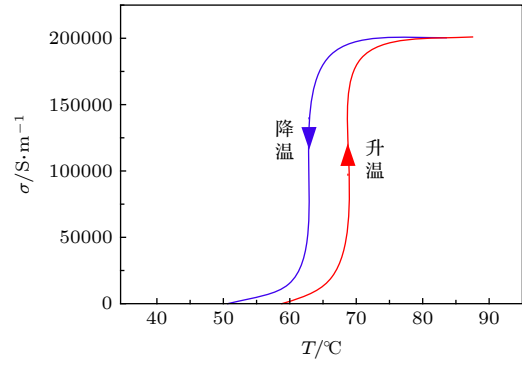


图6 VO_2 的电导率随温度的变化

Fig. 6. Changes of VO_2 conductivity with temperature.

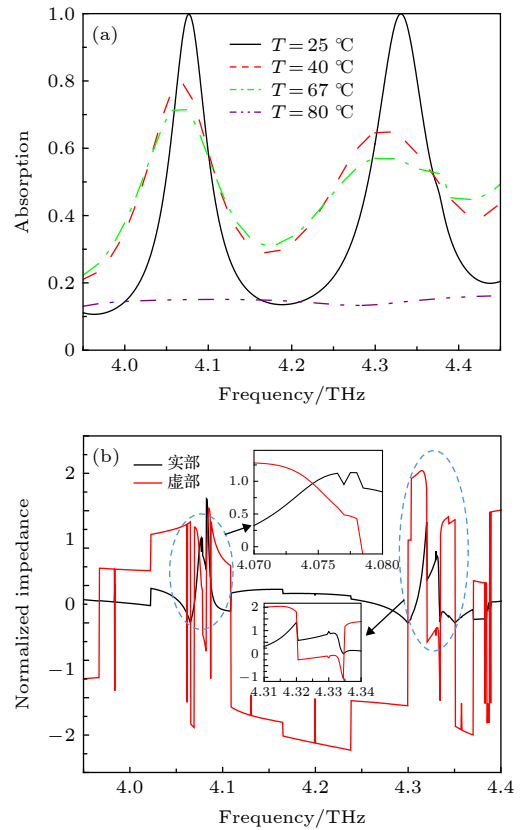


图7 (a) 不同温度下吸收器的吸收率; (b) 吸收器的归一化表面阻抗

Fig. 7. (a) Absorption of the absorber at different temperatures; (b) normalized surface impedance of the absorber.

$1 - R - T$, 反射率 $R = |S_{11}|^2$, 透过率 $T = |S_{21}|^2$, S_{11} 和 S_{21} 分别为吸收器的反射系数和透射系数. 其中 S_{11} 是由吸收器材料与自由空间的阻抗匹配程度决定的, 二者之间匹配达到完美状态, 也就是电磁波没有反射现象, 完全进入到了吸收器中. 为了减小 S_{21} , 通常根据金属底板的趋肤深度, 在吸收器底部加一层一定厚度的金属板, 这样可以有效地阻止电

磁波从器件中透射出去. 图 7(b) 是利用前文优化后的结构参数并在室温下吸收器归一化表面阻抗后的实部与虚部, 其中, 归一化阻抗可以表达为

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}. \quad (2)$$

在 $f = 4.08$ THz 与 $f = 4.33$ THz 处表面阻抗实部与虚部分别为 0.995 与 0.048, 1.05 与 -0.016. 这表明所设计吸收器的归一化表面阻抗与自由空间的阻抗形成良好匹配, 吸收器达到了完美吸收.

在设计整个吸收器时将偏振敏感性也列入了考虑范围, 所以吸收器为中心对称结构. 为了验证这一效果, 对 TE 和 TM 两种模式下太赫兹波不同入射角照射吸收器的吸收光谱进行仿真分析, 结果图 8 所示. 由图 8 可见, 入射角在 0° — 40° 吸收器的吸收率可达到 98% 以上, 当太赫兹波入射角为 55° 时, 吸收率下降至 90% 以下. 所设计的吸收器具有偏振不敏感特性, 该吸收器在隐身材料、传感等领域都有很好的应用价值.

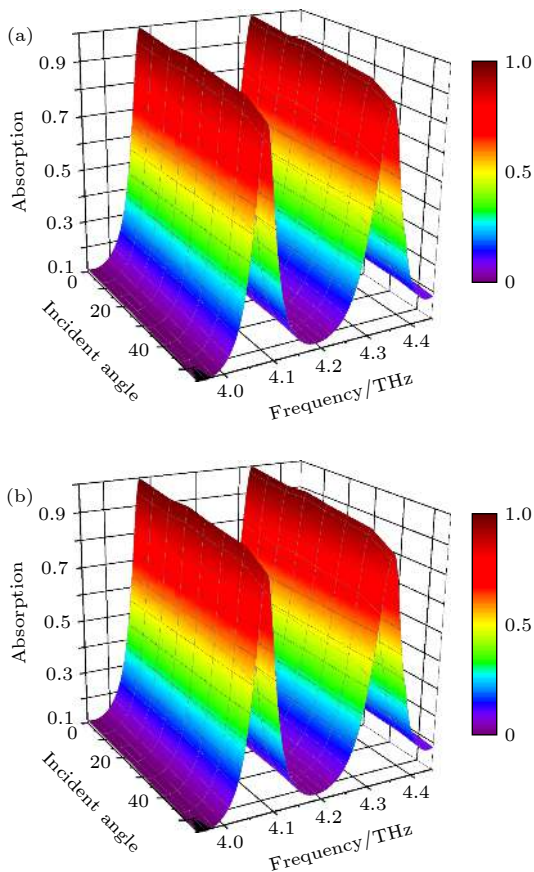


图 8 太赫兹吸收谱 (a) TE 模式; (b) TM 模式

Fig. 8. Terahertz absorption spectrum: (a) TE mode; (b) TM mode.

4 结 论

提出一种多缺陷组合嵌入 VO_2 薄膜结构可调太赫兹吸收器, 分析了吸收器的吸收机理并优化了结构参数, 在 0° — 40° 入射角范围内 $f = 4.08$ THz 和 $f = 4.33$ THz 频率处的吸收率达到 99.8% 以上. 通过改变外界环境温度可以调控吸收器的吸收效率. 计算结果表明该吸收器对 TE 和 TM 两种极化波不敏感. 所设计的可调太赫兹吸收器在太赫兹波相关领域, 例如探测器、开关、动态调制器、隐身技术等方面具有很好的应用前景.

参考文献

- [1] Iwaszczuk K, Strikwerda A C, Fan K, Zhang X 2012 *Opt. Express.* **20** 635
- [2] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, Pilon D 2008 *Phys. Rev. B* **78** 241103
- [3] Karaaslan M, Bakır M, Akgöl O, Unal E 2017 *Opto-Electronics Rev.* **25** 318
- [4] Chen C, Sheng Y, Wang J 2017 *Opt. Commun.* **406** 145
- [5] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [6] Wan C, Ho Y, Nunez-Sanchez S, Chen L F, Lopez-Garcia M, Pugh J R, Zhu B F, Selvaraj P, Mallick T K, Sundaram S, Cryan J M 2016 *Nano. Energy.* **26** 392
- [7] Lin K, Chen H, Lai Y, Yu C, Lee Y, Su P, Yen Y T, Chen B 2017 *Nano. Energy.* **37** 61
- [8] Park J, Kim H J, Nam S H, Kim H, Choi H, Jang Y J, Lee J S, Shin J, Lee H, Baik J M 2016 *Nano. Energy.* **21** 115
- [9] Lu Y, Dong W, Chen Z, Pors A, Wang Z, Bozhevolnyi S I 2016 *Sci. Rep.* **6** 30650
- [10] Tan F, Li T, Wang N, Lai S K, Tsoi C C, Yu W, Zhang X 2016 *Sci. rep.* **6** 33049
- [11] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [12] Li A Y, Liu F S, Wang M, Wang Y P, Yang Q L 2019 *Laser. J.* **40** 28 (in Chinese) [李爱云, 刘凤收, 王猛, 王岳平, 杨其利 2019 *激光杂志* **40** 28]
- [13] Grzeskiewicz B, Sierakowski A, Marczewski J, Pałka N, Wolarz E 2018 *Opt-electronics. Rev.* **26** 329
- [14] Bakshi S C, Mitra D, Minz L 2018 *Plasmonics* **13** 1843
- [15] Mohanty A, Acharya O P, Appasani B, Mohapatra S K 2018 *Photonic. Nanostruct.* **32** 74
- [16] Karimi P, Maddahali M, Bakhtafrouz A, Shahabadi M 2019 *IET Optoelectronics* **13** 5
- [17] Biabanifard M, Abrishamian M S 2018 *Appl. Phys. A* **124** S26
- [18] Wang L S, Ding C L, Xia D Y, Ding X Y, Wang Y 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **479** 012038
- [19] Daraei O M, Safari M M, Bemani M 2019 *eprint arXiv:1902.05254*
- [20] Ding F, Zhong S M, Bozhevolnyi S I 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701204
- [21] Walther M, Cooke D G, Sherstan C, Hajar M, Freeman M R, Hegmann F A 2007 *Phys. Rev. B* **76** 125408

Tunable terahertz absorber with multi-defect combination embedded VO₂ thin film structure*

Chen Xu-Sheng Li Jiu-Sheng[†]

(Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(Received 7 October 2019; revised manuscript received 5 November 2019)

Abstract

The metamaterial absorber has the advantages of thin thickness, small size, simple structure and high absorption. As is different from the traditional metamaterial absorber, the adjustable material is used for designing the structure, which can realize the dynamic modulation of the device by changing the external factors without changing the device structure. In this paper, an adjustable terahertz absorber with multi-defect combination embedded VO₂ thin film is proposed. It is composed of three layers: the upper metal pattern layer, the substrate and the bottom metal plate. Vanadium dioxide medium is sandwiched between the upper surface and the substrate. The absorption performance of the absorber composed of different defect combinations is studied, and the electric field distribution of each combination is analyzed. At the same time, the influences of defects on the absorption performance of the absorber are compared with each other and analyzed. After comprehensive analysis, the defects are combined into the final proposed structure, and the electric field distribution and surface current distribution are analyzed. The relevant parameters affecting the performance of the absorber are scanned and analyzed, and the final optimized structural parameters are obtained. The results show that the absorption rate at $f = 4.08$ THz and $f = 4.33$ THz are 99.8% and 99.9%, respectively. The phase transition of vanadium dioxide can be controlled by changing ambient temperature, so that the absorption rates of two frequency points can be changed from 99.8% to 1.0%. In addition, the surface normalized impedance of the proposed absorber is analyzed, which shows that the normalized surface impedance of the designed absorber matches the impedance of the free space well. By changing the incident angle and polarization of terahertz wave, the results show that the absorption rate of the absorber under TE and TM polarization wave both can be more than 98% with the incident angle ranging from 0° to 40°. The proposed terahertz wave absorber has the characteristics of high absorption, dynamic tuning and insensitive polarization. It has good application prospects in terahertz wave related fields such as detectors and stealth technology.

Keywords: terahertz wave, vanadium dioxide, multi-defect combination, terahertz absorber

PACS: 78.20.Ci, 81.05.Xj, 78.47.jh

DOI: 10.7498/aps.69.20191511

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61871355, 61831012).

[†] Corresponding author. E-mail: jshli@126.com