

Au/VO₂ 结构可调控红外吸收器

王可欣, 王斌科[✉], 田昌会, 屈绍波

(空军工程大学基础部, 西安, 710051)

摘要 设计了一种基于 Au/VO₂ 结构的可调控红外吸收器,由谐振贴片、介质夹层和金属背板 3 层结构组成。利用 VO₂ 的温控相变特性,将部分田字形 Au 贴片结构替换为 VO₂,通过改变环境温度对吸收器的吸收峰值、位置和带宽进行调控。由于 VO₂ 具有温控相变特性,吸收器会在不同温度下表现出不同的吸波效果。当温度高于相变温度时,吸收器在远红外大气窗口形成一个吸收率为 99.68% 的吸收峰;当温度低于相变温度时,吸收器在中、远红外大气窗口分别形成吸收率为 89.29% 和 99.83% 的吸收峰。利用表面电流和磁场分布对吸收器的吸波机理进行分析,发现反向平行分布的表面电流激发出磁偶极子,进而产生强烈的磁谐振,达到吸波效果。最后分析了电磁波的极化方式和入射角度以及介质材料属性对吸波效果的影响,发现此吸收器具有较好的极化稳定性和大角度吸收性,并且吸收峰随着介电常数的增大向长波方向漂移。

关键词 红外吸收器;VO₂;可调控;温控;广角;极化无关

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.05.007

中图分类号 TN219 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)05-0036-05

Tunable Infrared Absorber Based on Au/VO₂ Structure

WANG Kexin, WANG Binke[✉], TIAN Changhui, QU Shaobo

(Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: An infrared absorber based on Au/VO₂ structure is designed in this paper. This tunable metamaterial absorber consists of three individual layers of resonating patch, sandwich dielectric layer, and metallic background. Using the temperature-controlled phase change characteristics of VO₂, some of the Tian-shaped Au structure is replaced by VO₂, and the absorption peak, position and bandwidth of the absorber can be controlled by changing the ambient temperature. Because of the thermo-control phase transformation property of the VO₂, the absorber is characteristic of different absorption effects at different temperatures. When the temperature is higher than the phase transition temperature, the absorber can form an absorption peak of 99.68% in the far infrared atmospheric window; when the temperature is lower than the phase transition temperature, the absorber can form two absorption peaks with absorption rates of 89.29% and 99.83% respectively in the middle and far infrared atmospheric windows. This paper analyzes the absorption mechanism of the absorber based on the surface current distribution and the surface magnetic field. From the mentioned above the paper finds that the anti-parallel distribution of surface current excites a magnetic dipole, which generates a strong magnetic resonance, achieving the effect of absorption.

收稿日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(61331005;11274389)

作者简介: 王可欣(1993—),男,吉林吉林人,硕士生,主要从事红外低发射率材料及光电技术研究。E-mail: 2430765550@qq.com

通信作者: 王斌科(1964—),男,陕西岐山人,教授,主要从事红外低发射率材料及光电技术研究。E-mail: 18092571960@163.com

引用格式: 王可欣,王斌科,田昌会,等. 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. WANG Kexin, WANG Binke, TIAN Changhui, et al. Tunable Infrared Absorber Based on Au/VO₂ Structure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(5): 36-40.

In the end, this paper researches the effect of electromagnetic wave polarization mode, incident angle and media material properties on the absorption properties of the absorber. The results show that the absorption is insensitive to polarization mode and incident angle. What's more, The absorption peak shifts its way in long wavelength direction with the increase of the dielectric constant.

Key words: infrared absorber; VO₂; tunable; thermally-control; wide angle; polarization-unrelated

电磁超材料是利用亚波长人工结构组成的具有奇异电磁特性的新型材料^[1-3]。超材料吸收器在2008年首次提出^[4],广泛应用于微波、太赫兹、红外甚至可见光波段。传统的超材料吸收器虽然具有高效吸收的特点,但存在着难以制备或制备完成后光吸收响应不可调控的缺点。

Vanadium dioxide (VO₂)是一种具有 ps 级绝缘体-金属相变特性的金属氧化物,在热、光或者应力的作用下可以由单斜晶相变为金红石相,相变前后其电导率、磁化率、光吸收、折射率和比热容等性质均发生突变,并且相变过程是可逆的。热激发相变温度(T_c)约为 68°C,接近室温^[5]。将 VO₂ 与贵金属结合制作特殊的微纳结构,利用热致相变的特点,通过改变材料所处环境的温度,可以实现对红外吸波特性的调控。文献[6]设计了基于 Ag/VO₂ 结构的可调控吸波结构,工作在近红外波段,当温度高于相变温度时吸收峰的位置将会发生红移;文献[7]基于 Au/VO₂ 设计了2种在红外波段具有可调控功能的吸波结构,当温度升高超过相变温度时,吸收率分别由 90%、96%下降到 20%、32%;文献[8]设计了基于 W/VO₂ 的可调控吸收器,不同温度下吸收率相差 89.74%,并分析了结构参数对吸波效果的影响;文献[9]设计了一种 Au/VO₂ 周期性方形孔洞阵列结构的红外吸收器,在 2.3 μm 处其高低温的吸收率差值可达 80.3%;文献[10]通过 VO₂ 替换部分 Au 可以对吸收峰位置和吸收峰值进行调控。上述文献所设计的基于 VO₂ 结构的可调控吸波器在红外波段取得了一定的效果,但也存在例如仅具有单峰吸收的效果而且吸收峰位置不处于红外大气窗口内等不足之处。

本文设计了一种由谐振贴片、介质夹层和金属背板3层结构组成的红外吸收器,谐振贴片部分由金属 Au 和相变材料 VO₂ 组合而成,工作在中、远红外大气窗口。

1 结构设计

本文设计的可调控红外吸收器结构见图1。它是由3层结构组成:①耶路撒冷形 Au 结构和4个 L 形 VO₂ 结构组合而成的田字形贴片结构,参数为:

$L_1=1.4\ \mu\text{m}$ 、 $L_2=0.8\ \mu\text{m}$ 、 $W_1=0.15\ \mu\text{m}$ 、 $W_2=0.2\ \mu\text{m}$ 、 $H_1=0.1\ \mu\text{m}$;②中间介质层的材料为 SiO₂,其介电常数 $\epsilon_r=3.9$,损耗角正切值 $\tan\delta=0.025$,厚度 $H_2=0.3\ \mu\text{m}$,周期 $D=2.5\ \mu\text{m}$;③底层为 Au 背板,厚度 $H_3=0.1\ \mu\text{m}$,周期 $D=2.5\ \mu\text{m}$ 。结构参数均为优化后结果。

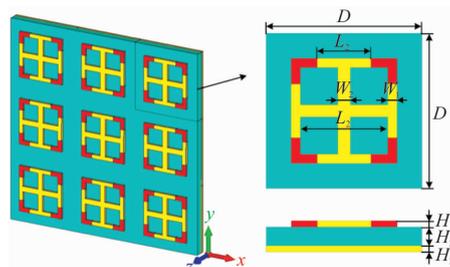


图1 吸收器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of absorber

由于 VO₂ 具有温控相变的特性,当温度 $T < T_c$ 时为介质属性,介电常数 $\epsilon=9$,损耗角正切值 $\tan\delta=0$ ^[11];当温度 $T > T_c$ 时为金属属性,介电常数采用 Drude 模型表示,介电常数和入射电磁波频率满足: $\epsilon(\omega)=1-[\omega_p^2/\omega(\omega+i\gamma)]$ 。VO₂ 等离子体频率 $\omega_p/2\pi=456\ \text{THz}$,碰撞频率 $\gamma/2\pi=48\ \text{THz}$;对于 Au,同样利用 Drude 模型分析,其等离子体频率 $\omega_p/2\pi=2\ 176\ \text{THz}$,碰撞频率 $\gamma/2\pi=6.5\ \text{THz}$ ^[12]。

为了分析结构参数对吸波性能的影响,建立 LC 等效电路模型见图2。吸收器的谐振频率 $f_m=1/2\pi\sqrt{LC}$,其中 L 为等效电感,C 为等效电容,分别由顶层贴片和底层背板间的平行板电容 C_m 和贴片之间的间隙电容 C_g 组成。L 同样由顶层金属与底层金属之间的互感 L_m 和顶层金属中自由电子漂移形成的电感 L_k 组成,见式(1~2)。

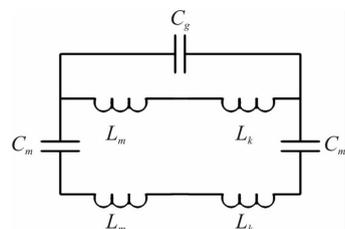


图2 等效电路图

Fig.2 Effective circuit model

$$C=C_m+C_g=\epsilon_{\text{SiO}_2}\epsilon_0\frac{c_1S}{H_2}+\epsilon_{\text{air}}\epsilon_0\frac{L_2H_1}{D-L_1-2W_1} \quad (1)$$

$$L = L_m + L_k = \frac{\mu_0 W_2 H_2}{L_1 + 2W_1} + \frac{W_2}{\omega_p^2 \delta \epsilon_0 (L_1 + 2W_1)} \quad (2)$$

式中: ϵ_{SiO_2} , ϵ_{air} 分别为绝对介电常数; S 为 z 轴方向上顶层贴片和底层背板的重叠区域面积; c_1 表示金属表面的非均匀电荷分布的数值常数; μ_0 为真空磁导率; ω_p 为 Au 的等离子体频率; δ 为 Au 的趋肤深度。

2 吸波效果影响因素分析

在基于时域有限差分法的 CST 电磁仿真软件中, 建立图 1 模型, x 轴和 y 轴方向边界条件均设为 unit cell, 电磁波沿 z 轴负方向垂直入射, 采用频域求解器在 TE 偏振波垂直入射下提取出 S 参数, 其中 S_{11} 为反射系数, S_{21} 为透过系数, $R(\omega) = |S_{11}|^2$ 为反射率, $T(\omega) = |S_{21}|^2$ 为透过率, 吸收率 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$, 由于结构参数优化后背板的厚度 $H_3 = 0.1 \mu\text{m}$, 在红外波段内大于 Au 的趋肤深度, 所以电磁波不能透过, 保证了透过率 $T(\omega) = 0$, 因此吸收率可表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ 。理论上吸收器可以实现接近 100% 的吸收。

2.1 电磁波极化方式

由图 3 可见, 当温度 $T > T_c$ 时, VO_2 为金属属性, 吸收器仅在远红外大气窗口波段的 $9.57 \mu\text{m}$ 处形成一个吸收率为 99.68% 的吸收峰; 当温度 $T < T_c$ 时, VO_2 为介质属性, 吸收器不仅在远红外大气窗口波段的 $9.57 \mu\text{m}$ 处形成一个吸收率为 99.83% 的吸收峰, 而且在中红外大气窗口波段的 $4.17 \mu\text{m}$ 处形成一个吸收率为 89.29% 的吸收峰。可见温度的改变会对 2 个红外大气窗口内的吸收峰值、带宽产生影响。

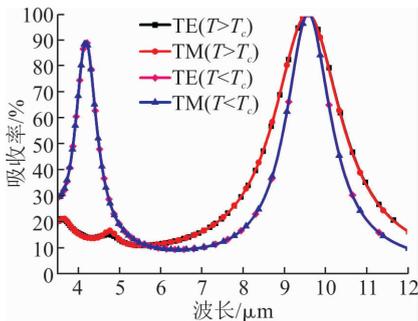


图 3 不同温度下不同偏振模式对应的吸收率曲线

Fig. 3 The absorbance for different polarization mode at different temperature

电磁波入射时其偏振模式是不确定的, 不同偏振模式的电磁波入射到同一吸收结构上可能表现出不同的吸波特性。由图 3 可见, 在不同温度情况下, 当 TE 偏振波和 TM 偏振波分别入射到该结构上时, 吸收率曲线基本相同, 表明该结构对入射电磁波的极化方式不敏感。

2.2 电磁波入射角度

在实际情况下, 很多时候电磁波并不是垂直入射, 而是具有一定的角度。图 4 为 TE 偏振波沿 z 轴负方向以不同的角度入射时的吸收率曲线。从图 4(a) 可以看出, 当温度小于相变温度时的吸收率曲线时, 随着角度从 0° 增加到 35° , 2 个吸收峰发生细微变化; 当入射角度大于 35° 时, 短波位置由 1 个吸收峰变为 2 个吸收峰, 长波位置吸收峰值和带宽下降明显。这主要是因为随着角度增大, 入射波磁场在 $x-y$ 平面上的分量减小, 磁谐振减弱。从图 4(b) 中可以看出, 当温度大于相变温度时, 随着角度从 0° 增加到 60° , 吸收峰值均保持在 90% 以上, 带宽略有下降; 当入射角度从 60° 增加到 75° 时, 峰值和带宽下降明显。这是因为随着入射角增大, 入射波的磁场在结构表面的分量会逐渐减小, 对感应电流的驱动能力减弱, 无法产生强烈的磁谐振, 因此吸波效果减弱。总的来看, 本文设计的吸收器在中、远红外大气窗口的吸波效果较好, 并且具有大角度吸收性。

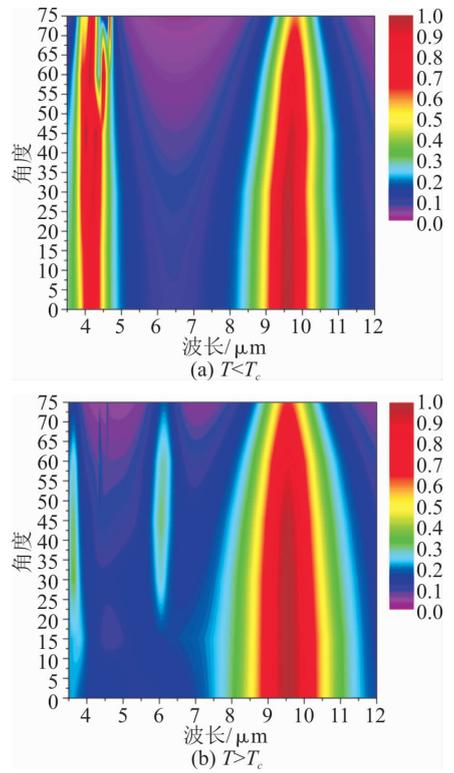


图 4 不同入射角对应的吸收率曲线

Fig. 4 The absorbance for different incident angle

2.3 介质材料

吸波器中间介质层的材料同样会对吸波效果产生影响, 我们选取 4 种介质材料 $\text{F}_4\text{B}-2$ 、 Y_2O_3 、 SiO_2 和 FR_4 , 它们的介电常数分别为 2.65、3.06、3.9 和 4.9。分别计算出 2 种温度情况下的吸波曲线见图 5。随着介质材料介电常数的增大, 吸收率曲线整体向长波方向漂移, 当介质材料为 SiO_2

时吸收峰正好落在 2 个大气窗口内,并且具有较高的吸收率。因此介质材料选用 SiO₂。

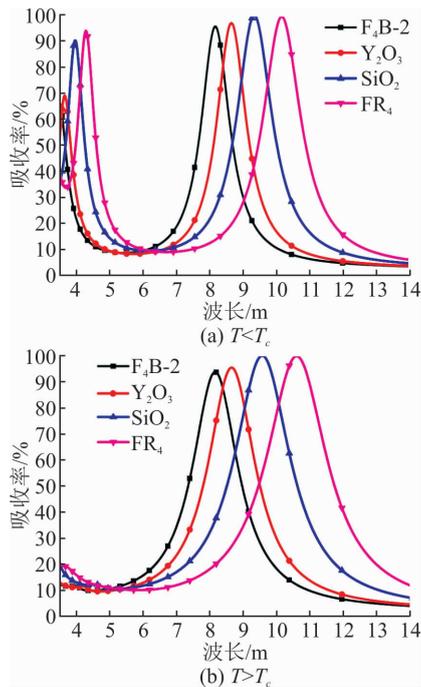


图 5 不同介质材料对应的吸收率曲线
Fig. 5 The absorptance for different medium

3 吸收机理分析

吸收器对红外波段电磁波产生的吸收来源于结构中局域化的电偶极子和磁偶极子共振。当电磁波入射到吸收器表面时,上层贴片结构表面产生局部的等离子体共振,使得大量的正负电荷聚集在结构表面。由于镜像效应,其镜像电荷会聚集在底层金属背板。表面谐振结构中的电位移矢量和底层金属背板中的电位移矢量反向,2 层金属结构中就激发了反向平行的电流,从而产生了磁偶极子,磁偶极子会与入射电磁波中的磁场产生强烈的磁谐振作用,进而引发两层金属结构之间局域的电磁场增强,导致入射的电磁波能量被限制在中间介质层的局部区域,因此在特定红外波段达到了吸波的效果^[9]。

为了对吸收器的吸波机理进行分析,利用 CST 软件提取吸收器的表面电流和磁场分布见图 6~7。

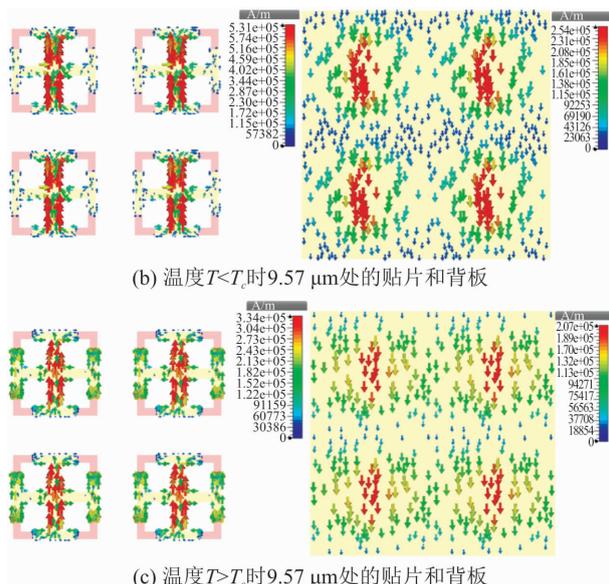
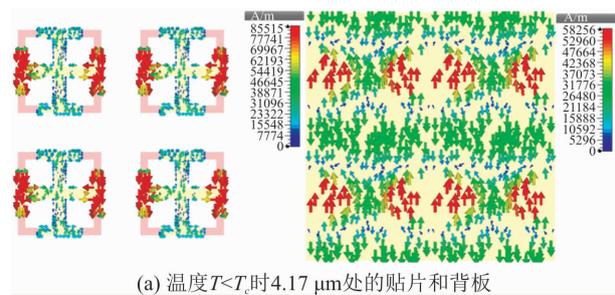


图 6 表面电流分布图

Fig. 6 Surface current distribution

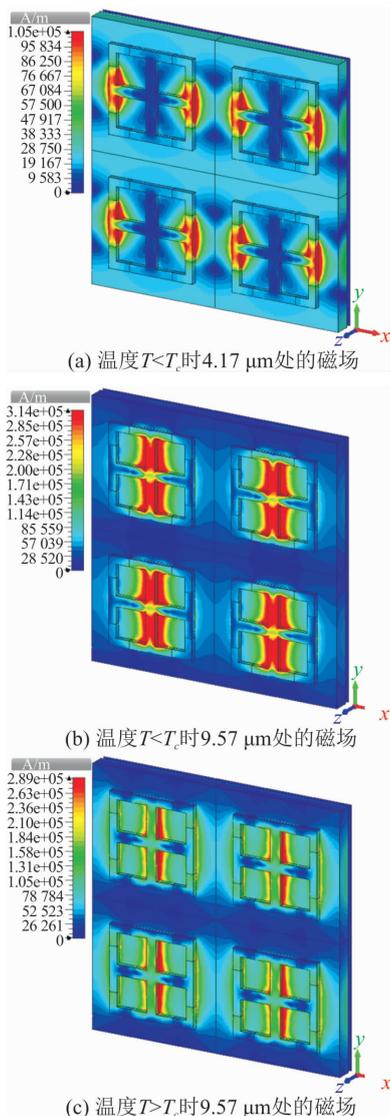


图 7 磁场分布图

Fig. 7 The magnetic field distribution

当温度 $T < T_c$ 时, VO_2 为介质属性, 从图 6(a) 和图 7(a) 可以看出, 中红外波段时在耶路撒冷十字结构的 2 个短臂上产生垂直方向的电流, 在金属背板的对应位置上则产生反向电流, 反向平行分布的电流激发出磁偶极子, 将入射电磁波限制在介质层中, 达到吸波的目的; 从图 6(b) 和图 7(b) 可以看出, 远红外波段时在耶路撒冷十字结构的长臂上产生垂直方向的电流, 在金属背板的对应位置上则产生反向电流, 反向平行分布的电流激发出磁偶极子。当温度 $T > T_c$ 时, VO_2 为金属属性, 从图 6(c) 和图 7(c) 可以看出, 远红外波段时, 当温度高于相变温度, 在耶路撒冷十字结构的长臂位置处上下 2 层金属结构产生反向平行分布的电流, 同样激发出磁偶极子, 达到吸波的目的。

在不同温度的情况下, VO_2 会表现出不同的性质, 值得注意的是不同温度下的吸收率曲线的吸收峰在远红外波段的 $9.57 \mu\text{m}$ 位置处重合, 此吸收峰是由位于 FSS 单元耶路撒冷长臂上的电流感应出的磁谐振产生, 所以在不同温度情况下, 耶路撒冷长臂的材料属性保持不变, 吸收峰的位置不发生改变。

4 结语

本文设计了一种可调控红外吸收器, 具有广角度、偏振无关、吸收可调控等优点。当温度大于相变温度时, 吸收器在远红外大气窗口具有峰值为 99.68% 的吸收峰; 当温度低于相变温度时, 吸收器在中、远红外大气窗口具有吸收率为 89.29% 和 99.83% 的双吸收峰。利用表面电流和磁场分布对红外吸收器的吸收机理进行了分析, 并对电磁波的极化方式、入射角度和介质材料属性对吸收效果的影响进行了研究。本文的工作对可调控红外吸收器的设计、新型智能可调控光电器件的开发拓展新思路。

参考文献(References):

[1] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental Verification of a Negative Index of Refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.

[2] SCHURING D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.

[3] LIU Z, LEE H, XIONG Y, et al. Far-Field Optical Hyperlens Magnifying Sub-Diffraction-Limited Objects [J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1686-1686.

[4] LANDY N I, SAJUJIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.

[5] 孙丹丹, 陈智, 文歧业, 等. 二氧化钒薄膜低温制备及其太赫兹调制特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(1): 393-398.

SUN D D, CHEN Z, WEN Q Y, et al. VO_2 Low Temperature Deposition and Terahertz Transmission Modulation[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(1): 393-398. (in Chinese)

[6] DICKEN M J, AYDIN K, PRYCE I M, et al. Frequency Tunable Near-infrared Metamaterials Based on VO_2 Phase Transition [J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 18330-18339.

[7] KOCER H, BUTUN S, BANAR B, et al. Thermal Tuning of Infrared Resonant Absorbers Based on Hybrid Gold- VO_2 Nanostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 7181-7188.

[8] LIU M Z, YI L I, ZHANG J, et al. Design and Fabrication of a Tunable Infrared Metamaterial Absorber Based on VO_2 Films [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2017, 50(38):.

[9] 伍征义, 李毅, 陈培祖, 等. 基于 Au/ VO_2 纳米结构的可调控红外吸收器设计[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(6): 694-700.

WU Z Y, LI Y, CHEN P Z, et al. Design of Tunable Infrared Absorber Based on Au/ VO_2 Nanostructures [J]. *Journal of Infrared Millim Waves*, 2016, 35(6): 694-700. (in Chinese)

[10] YANG J, QU S, MA H, et al. Dual-Band Tunable Infrared Metamaterial Absorber with VO_2 Conformal Resonators[J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 518-522.

[11] CHOI H S, AHN J S, JUNG J H, et al. Mid-Infrared Properties of a VO_2 Film Near the Metal-Insulator Transition[J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 1996, 54(7): 4621.

[12] NAOREM R, DAYAL G, RAMAKRISHNA S A, et al. Thermally Switchable Metamaterial Absorber with a VO_2 Ground Plane [J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 154-157.

(编辑: 徐敏)