

# 基于 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构的可调控红外吸收器设计

伍征义<sup>1</sup>, 李毅<sup>1,2\*</sup>, 陈培祖<sup>1</sup>, 蒋蔚<sup>1</sup>, 徐婷婷<sup>1</sup>, 刘志敏<sup>1</sup>,  
张娇<sup>1</sup>, 方宝英<sup>1</sup>, 王晓华<sup>1,3</sup>, 肖寒<sup>1,4</sup>

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;
3. 上海电力学院 电子与信息工程学院, 上海 200090;
4. 上海健康医学院医学影像学院, 上海 201318)

**摘要:**设计了一种 Au/VO<sub>2</sub> 周期性方形孔洞阵列结构的红外吸收器,利用时域有限差分法研究了吸收器的结构参数对吸收光谱的影响,优选出 VO<sub>2</sub> 和 Au 膜层厚度分别为 140 nm 和 80 nm,孔洞边长和阵列周期分别为 1.1 μm 和 1.2 μm 时,吸收可调控特性最为明显,在 2.3 μm 处其高低温的吸收率差值可达 80.3%.理论模拟计算了光以不同偏振、入射角入射时的吸收,结果表明,正入射时吸收器是偏振无关的;斜入射时吸收器具有广角吸收的特点,与 TM 偏振相比 TE 偏振下吸收器具有更强的角度依赖性.低温时吸收器中的电磁场呈高度局域化分布,表现为强的吸收;而高温时吸收器中的电磁场分布在吸收器表面,吸收被抑制.所设计的吸收器吸收效率高,吸收强度可以调控,可应用于新型可调控智能光电器件.

**关键词:**吸收器;热致相变;表面等离子体共振;时域有限差分;广角;偏振无关

**中图分类号:**TB34, TN214 **文献标识码:**A

## Design of tunable infrared absorber based on Au/VO<sub>2</sub> nanostructures

WU Zheng-Yi<sup>1</sup>, LI Yi<sup>1,2\*</sup>, CHEN Pei-Zu<sup>1</sup>, JIANG Wei<sup>1</sup>, XU Ting-Ting<sup>1</sup>, LIU Zhi-Min<sup>1</sup>,  
ZHANG Jiao<sup>1</sup>, FANG Bao-Ying<sup>1</sup>, WANG Xiao-Hua<sup>1,3</sup>, XIAO Han<sup>1,4</sup>

- (1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China;
3. School of Electric and Information, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
4. College of Medical Imaging, Shanghai University of Medicine & Health Sciences, Shanghai 201318, China)

**Abstract:** An infrared absorber based on Au/VO<sub>2</sub> periodic square hole array is designed in this paper. The effects of structural parameters on the absorption spectrum were calculated by the finite difference time domain method. The theoretical simulation results show that the absorption tunability was the most obvious at Au film thickness of 80nm and VO<sub>2</sub> film thickness of 140nm, and the square hole length and array period were 1.1 μm and 1.2 μm, respectively. The absorption difference between high and low temperature can reach to 80.3% at 2.3 μm. Considering the different polarization and incident angles, it is evident that the absorber was polarization-independent at normal incidence and wide angle at oblique incidence. The angular dependence was much stronger in TE polarization compared with TM polarization. In addition, the absorber presented strong absorption because of the highly localized electromagnetic field distribution under low temperature, but the electromagnetic fields are located at the surface at high temperature, which lead to suppressed absorption. The absorber can be applied to new tun-

收稿日期:2016-04-21,修回日期:2016-09-29

Received date: 2016-04-21, revised date: 2016-09-29

基金项目:国家“863”计划(2006AA03Z348),教育部科学技术研究重点项目(207033),上海市科学技术委员会科技攻关计划(06DZ11415),上海市教育委员会科研创新重点项目(10ZZ94),上海市领军人才培养计划资助项目

**Foundation items:** Supported by National High-Tech Research and Development Program of China (863 Program) (2006AA03Z348), Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education (207033), Key Technologies R&D Program of Shanghai Science and Technology Commission (06DZ11415), Key Program of Science and Technology Research of Shanghai Education Commission (10ZZ94), The Shanghai Talent Leading Program

作者简介(Biography):伍征义(1991-),男,硕士研究生,主要从事光电材料与器件的研究. E-mail:ewazywu@126.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail:optolyclp@263.net

able intelligent photovoltaic device due to the advantages of high absorption efficiency, tunable absorption intensity, and easy implementation.

**Key words:** absorber, thermochromism, surface plasmon resonance, finite difference time domain, wide angle, polarization-independent

**PACS:** 02. 60. Cb, 07. 57. -c, 42. 79. Wc, 85. 60. Bt

## 引言

近年来,基于微纳结构表面的电磁吸收器如超材料吸收器<sup>[1]</sup>、等离子体纳米结构吸收器<sup>[2]</sup>等受到了研究者的广泛关注,通过控制和改变吸收器的材料、形状、几何尺寸以及周围的介质环境<sup>[3]</sup>,便可实现其不同方面的应用,如红外隐身、折射率传感器、太阳能电池、选择性热发射器、光探测器等<sup>[4-7]</sup>. 传统的吸收器虽然具有高效吸收光的特点,但存在着难以制备或制备完成后其光谱吸收响应不可调控的缺点.

VO<sub>2</sub> 作为一种相变材料,在温度升高到 68℃ 附近时会发生绝缘-金属相变,相变前后其光学特性和电学特性都会发生很大改变,并且相变过程是可逆的<sup>[8]</sup>. 这种热致相变特性在光信息存储、应力传感、锂离子电池、智能窗、光调制器等<sup>[9-15]</sup>方面都有着广泛的应用. 将 VO<sub>2</sub> 与贵金属结合制作特殊的表面微结构,利用 VO<sub>2</sub> 热致相变的特点,通过改变材料的温度,便可实现对光学特性的调控. Maaza 等<sup>[16]</sup>研究的 Au-VO<sub>2</sub> 纳米复合材料,当材料的温度由 25℃ 变化至 120℃ 时,其表面等离子体波长从 645 nm 移至 598 nm 处,虽然实现了光的吸收波长的调控,但只局限于可见光波段的光吸收. Xu 等<sup>[17]</sup>在 VO<sub>2</sub> 薄膜中掺入 Ag 纳米颗粒,研究表明材料的表面等离子体波长会随着温度的改变而相应出现蓝移或红移,但是颗粒尺寸太小,制备难度很大. Driscoll 等<sup>[18]</sup>在 VO<sub>2</sub> 薄膜表面制作周期性 Au 开口环结构,通过改变温度诱导 VO<sub>2</sub> 相变,尽管实现了吸收器在远红外波段共振波长的动态调节,但动态调控范围很小且会受光的偏振的影响. Hasan Kocer 等<sup>[19]</sup>设计的 Au/VO<sub>2</sub> 纳米光栅和纳米盘周期性结构阵列,虽然在 VO<sub>2</sub> 相变前后分别获得了 70% 和 64% 的吸收率差,表现出吸收可调控的特点,但未涉及角度依赖性的研究,而且调控范围有待进一步提高. 因此,设计出一种广角度、偏振无关、宽调控范围的吸收器是目前急需解决的问题.

本文结合 VO<sub>2</sub> 热致相变和贵金属表面等离子体共振的原理,设计了一种性能优异、易于制备的特

殊结构的红外吸收器,通过时域有限差分 (FDTD) 法研究了吸收器的结构参数对吸收光谱的影响,模拟计算了不同偏振和不同入射角的光吸收,分析了吸收器在不同入射光偏振态下的电磁场分布,进而解释了其中所蕴含的物理机制.

## 1 结构设计与理论方法

所设计的 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构可调控红外吸收器如图 1(a) 所示,图 1(b) 为它的俯视图. 通过改变吸收器的温度诱导 VO<sub>2</sub> 从绝缘相到金属相的转变来调控吸收器的光学特性.

Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构可调控红外吸收器是以石英玻璃为衬底,在底层 Au 薄膜和上层周期性 Au 方形孔洞阵列之间加入 VO<sub>2</sub> 介质层,吸收器周围的介质环境为空气,方形孔洞沿着 X 和 Y 方向分别以周期性分布, L 为孔洞边长, P 为阵列周期, h<sub>1</sub> 为底层 Au 膜厚度, h<sub>2</sub> 为 VO<sub>2</sub> 介质层的厚度, h<sub>3</sub> 为孔洞的深度. 作为背向反射器,底层 Au 薄膜的厚度 h<sub>1</sub> 设置为 80 nm 以确保光不会透过吸收器,底层 Au 薄膜与上层的 Au 方形孔洞阵列相互作用,形成电偶和磁偶极子从而把入射光高效耦合进吸收器. 选择 Au 为吸收器的金属材料是由于它的稳定性和低的欧姆损耗,吸收器的几何尺寸和结构安排是为了与周围空间形成阻抗匹配,实现最大化的光吸收,并且使得激发的共振是偏振无关的.

采用时域有限差分 (FDTD) 法对吸收器在 1 ~ 4 μm 波段的光吸收特性进行了模拟计算.

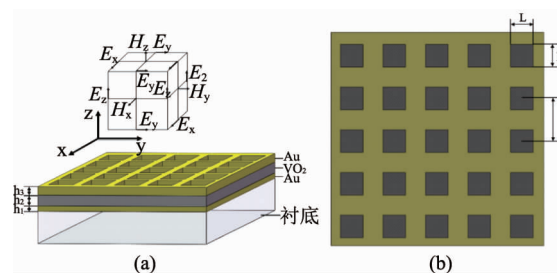


图 1 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构红外吸收器 (a) 三维立体图和 FDTD 离散中的 Yee 元胞, (b) 俯视图

Fig. 1 The infrared absorber based on Au/VO<sub>2</sub> nanostructures (a) Three dimensional map and Yee cells of FDTD discrete, (b) the top view

时域有限差分法是求解 Maxwell 方程微分方程的直接时域方法,它将空间网格化,可将 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构红外吸收器看成由无数个 Yee 元胞构成.如图 1(a)所示,每个电场(磁场)分量周围有四个磁场(电场)分量环绕.对电场和磁场分量在空间和时间上采取交替抽样,将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,并在时间轴上逐步推进求解空间电磁场.

在直角坐标系中,Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构红外吸收器的三维 FDTD 离散求解如下.设观察点 $(x, y, z)$ 为 $H_x$ 的节点,即 $(i, j + 1/2, k + 1/2)$ ,以及时刻 $t = n\Delta t$ ,那么沿着 $x, y, z$ 三个轴向的 Maxwell 旋度方程磁场分量的标量形式第一式的离散为:

$$H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) = CP(m)H_x^{n-1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) + CQ(m)\left[\begin{array}{l} E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1\right) - E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \\ - E_z^n\left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) + E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \end{array}\right], \quad (1)$$

式中 $m = (i, j + 1/2, k + 1/2)$ .其余二式离散后的形式为:

$$H_y^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) = CP(m)H_y^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + CQ(m)\left[\begin{array}{l} E_z^n\left(i + 1, j, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^n\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \\ - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1\right) + E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \end{array}\right], \quad (2)$$

$$H_z^{n+1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) = CP(m)H_z^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) + CQ(m)\left[\begin{array}{l} E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j + 1, k\right) - E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \\ - E_y^n\left(i + 1, j + \frac{1}{2}, k\right) + E_y^n\left(i, j + \frac{1}{2}, k\right) \end{array}\right]. \quad (3)$$

式(2)中 $m = (i + 1/2, j, k + 1/2)$ ,式(3)中 $m = (i + 1/2, j + 1/2, k)$ .

其中系数 $CP(m)$ 和 $CQ(m)$ 分别为:

$$CP(m) = \frac{\frac{\mu(m)}{\Delta t} - \frac{\sigma_m(m)}{2}}{\frac{\mu(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma_m(m)}{2}} = \frac{1 - \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu_0\mu_r(m)}}{1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu_0\mu_r(m)}}, \quad (4)$$

$$CQ(m) = \frac{1}{\frac{\mu(m)}{\delta\Delta t} + \frac{\sigma_m(m)}{2\delta}} = \frac{\frac{\Delta t}{\mu_0\delta}}{\mu_r(m) + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu_0}}, \quad (5)$$

其中, $\sigma_m$ 代表磁损耗, $\mu_0$ 和 $\mu_r$ 分别为真空磁导率和相对磁导率, $\mu(m) = \mu_0\mu_r(m)$ , $\Delta t$ 为时间步长, $\delta$ 为空间步长.

式(1)、(2)、(3)为 FDTD 中磁场的时间推进计算公式,同理可得电场的时间推进计算公式.通过 FDTD 差分方程组即可计算透过吸收器的电磁场值,获得光波通过吸收器的透过率和反射率.为了研究 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构红外吸收器的光学特性,我们利用 FDTD Solution 软件进行了仿真模拟.模拟时 Au 的数据取自 Palik 数据库,VO<sub>2</sub> 的复折射率的数据来自于 Dicken 等<sup>[20]</sup>的研究结果.仿真时,光沿-Z 方向入射到结构表面,吸收器的横截面为 X-Y 面,正入射和斜入射时在 X、Y 方向分别使用周期性边界条件和布洛赫边界条件,Z 方向均使用完美匹配层边界条件.吸收器总的吸收 $A = 1 - R - T$ ,R 为光入射到吸收器后总的反射,T 是指光经过吸收器后总的透射.由于底层 Au 薄膜的厚度为 80 nm,大于该波段光在 Au 中的趋肤深度,那么 $T = 0$ ,因此吸收器总的吸收均用 $1 - R$ 来计算.

## 2 模拟计算与结果讨论

对于 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构红外吸收器而言,它的光学特性主要依赖于膜层厚度、孔洞大小以及阵列周期.综合考虑实际的实验条件,如果膜层太薄,则实验难以制备;膜层太厚,则薄膜的均匀性无法保证,故首先设定 VO<sub>2</sub> 膜层的厚度 $h_2 = 150$  nm、方形孔洞边长 $L = 1.15$   $\mu\text{m}$ 、阵列周期 $P = 1.25$   $\mu\text{m}$ ,研究在不同 Au 膜厚度 $h_3$ 下的吸收光谱,如图 2(a)所示.低温(20℃)状态下( $T < T_c$ ),吸收器具有较高的光学吸收率峰值,高温(85℃)状态下( $T > T_c$ ),吸收器具有较低的光学吸收率.随着 Au 膜层厚度的增加,吸收器的中心波长和吸收峰值没有明显的变化,但吸收带宽会逐渐收窄.经模拟计算发现,Au 膜厚度 $h_1 = 80$  nm 时,吸收器获得最佳的吸收效果,而且在高低温下具有最大的吸收率差值.图 2(a)中吸收

峰是由吸收器结构激发的局域等离子体共振以及它们之间的相互作用引起的. 局域等离子体共振具有特定的振荡频率, 在振荡频率处, 介质与金属的分界面处存在着局域电磁场增强效应, 电磁场能量被高度局域化的限制在介质与金属的分界面附近, 此时吸收器获得最大的吸收. 图 2(b) 是 Au 膜厚度  $h_3 = 80 \text{ nm}$ 、方形孔洞边长  $L = 1.15 \text{ }\mu\text{m}$ 、阵列周期  $P = 1.25 \text{ }\mu\text{m}$  时, 吸收器的吸收光谱随 VO<sub>2</sub> 膜层厚度  $h_2$  的变化关系曲线. 由图 2(b) 可见, 低温 (20℃) 时, 随着 VO<sub>2</sub> 膜层厚度的增加, 吸收器的中心波长明显出现红移, 这说明 VO<sub>2</sub> 介质层的厚度影响共振波长的位置, 改变 VO<sub>2</sub> 膜层的厚度可实现吸收器共振波长的调控. 此外, 中心波长在红移的过程中, 吸收峰的峰值先变大后变小. 高温 (85℃) 时, VO<sub>2</sub> 膜层厚度的变化对吸收光谱的影响很小, 几乎没有改变. 计算表明当 VO<sub>2</sub> 膜层厚度  $h_2 = 140 \text{ nm}$  时, 吸收器高低温的吸收率差值达到最大. 设置 VO<sub>2</sub> 膜层厚度  $h_2 = 140 \text{ nm}$ 、Au 膜厚度  $h_3 = 80 \text{ nm}$ 、阵列周期  $P = 1.25 \text{ }\mu\text{m}$ , 研究 Au 方形孔洞边长  $L$  的变化对吸收光谱的影响. 在图 2(c) 中, 低温 (20℃) 时, 随着孔洞边长的增加, 吸收器的中心波长虽出现蓝移, 但移动的幅度很小, 而且吸收峰的峰值变化也很小. 高低温下, 中心波长处仍呈现大的吸收率差值. 图 2(d) 为 VO<sub>2</sub> 膜层厚度  $h_2 = 140 \text{ nm}$ 、Au 膜厚度  $h_3 = 80 \text{ nm}$ 、方形孔洞边长  $L = 1.1 \text{ }\mu\text{m}$  时, 不同阵列周期  $P$  下吸收器的吸收光谱. 从图 2(d) 可以看出, 阵列周期较小时, 吸收率相对较弱. 随着阵列周期的增大, 吸收光谱的峰值先逐渐增大后又变小, 中心波长的位置基本不变, 这是局域等离子体共振模式存在的结果, 因为局域等离子体共振模式主要受孔洞的大小和形状的影响, 而阵列周期的改变对其影响很小. 另外, 阵列周期  $P = 1.28 \text{ }\mu\text{m}$  时, 除了中心波长  $\lambda = 2.3 \text{ }\mu\text{m}$  处的吸收峰外,  $\lambda = 2.8 \text{ }\mu\text{m}$  处出现了另一个较弱的吸收峰, 但随着阵列周期的减小,  $\lambda = 2.8 \text{ }\mu\text{m}$  处的吸收峰消失, 吸收器获得单一的吸收峰. 出现这种现象的原因是因为阵列周期为  $1.28 \text{ }\mu\text{m}$  时,  $\lambda = 2.8 \text{ }\mu\text{m}$  处吸收器与自由空间的阻抗匹配也得到了增强, 导致中心波长以外的吸收峰的出现, 随着阵列周期的改变, 该波长处的阻抗匹配减弱, 而中心波长处的阻抗匹配进一步增强, 最终只留下中心波长处的吸收峰<sup>[21]</sup>.

该吸收器结构可等效为 LC 谐振子模型, 吸收器的共振波长  $\lambda = 2\pi c \sqrt{LC}$ , 其中  $c$  为真空中的光速,  $L$  是与上下金属层有关的等效电感,  $C$  是与中间

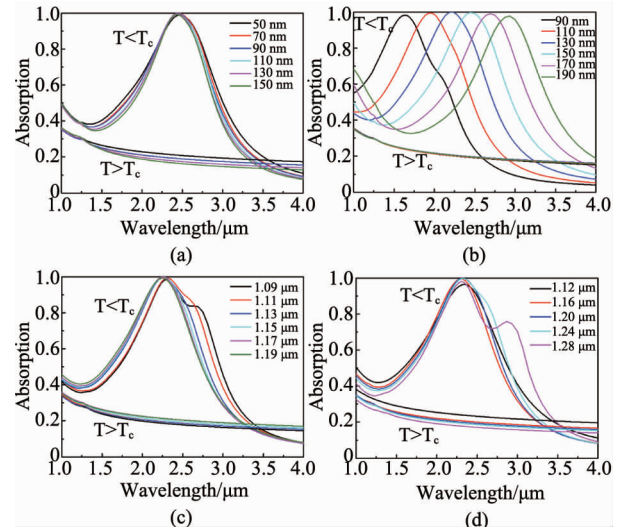


图 2 吸收光谱随结构参数的变化关系 (a) 不同 Au 膜层厚度, (b) 不同 VO<sub>2</sub> 膜层厚度, (c) 不同孔洞大小  $L$ , (d) 不同阵列周期  $P$

Fig. 2 The relationship between absorption spectrum and structural parameters with (a) different film thickness of Au, (b) different film thickness of VO<sub>2</sub>, (c) different hole length  $L$ , and (d) different array period  $P$

介质层有关的等效电容, 适当的调节吸收器的结构参数, 即可使得吸收器在特定波长处的共振吸收达到最大化<sup>[22]</sup>. 为了使吸收器在  $\lambda = 2.3 \text{ }\mu\text{m}$  处较大的人射角和较宽的频带内都具有较高的吸收率, 对吸收器的几何参数进行了优化, 优化后的 VO<sub>2</sub> 膜层厚度  $h_2$  为  $140 \text{ nm}$ , 上层 Au 膜的厚度  $h_3$  为  $80 \text{ nm}$ , 孔洞的边长  $L$  和阵列的周期  $P$  分别为  $1.1 \text{ }\mu\text{m}$  和  $1.2 \text{ }\mu\text{m}$ . 在此结构参数下, 模拟计算了吸收器在光正入射时的吸收特性曲线, 并将其与 Au 膜和 VO<sub>2</sub> 薄膜的光学特性进行比较, 如图 3 所示. 在此波段范围内, Au 膜的吸收率很低几乎为 0, VO<sub>2</sub> 薄膜在高低温下吸收虽有差异, 但差异很小, 最大吸收仅有 52.4%, 因此调控能力很有限. 不同于前两者, 低温 (20℃) 时, Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构红外吸收器其吸收率大于 50% 的波段为  $1.65 \sim 2.8 \text{ }\mu\text{m}$ , 吸收率大于 90% 的波段为  $2.13 \sim 2.49 \text{ }\mu\text{m}$ , 在波长  $\lambda = 2.3 \text{ }\mu\text{m}$  处吸收器获得最大吸收率 99.9%. 这一近乎完全吸收的特点表明吸收器与自由空间形成了阻抗匹配, 使得对入射光的反射最小, 因而能够高效且最大化的吸收入射的红外光; 高温 (85℃) 时, 吸收率最大为 35%. 吸收器在中心波长  $\lambda = 2.3 \text{ }\mu\text{m}$  处, 高低温的吸收率差值为 80.3%, 在  $1.94 \sim 2.64 \text{ }\mu\text{m}$  波段吸收率差值均大于 50%, 这说明介质层 VO<sub>2</sub> 的加入克服了 Au 膜吸收率低和 VO<sub>2</sub> 薄膜高低温吸收差异小的缺点, 使得吸收器随温度的变化对光的吸收具有

良好的调控作用.

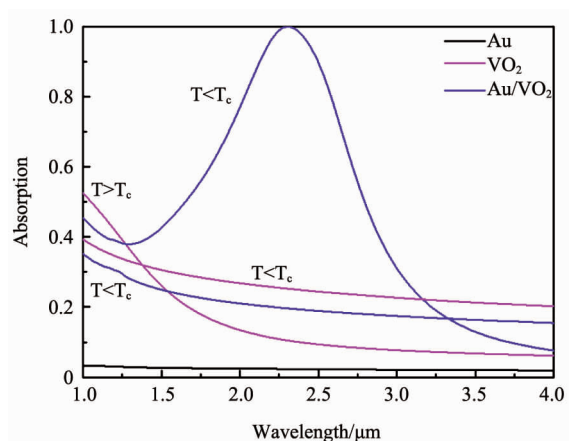


图3 Au 薄膜、VO<sub>2</sub> 薄膜以及 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构吸收器的光吸收特性的比较

Fig. 3 The comparison of optical absorption properties among Au film, VO<sub>2</sub> film and Au/VO<sub>2</sub> nanostructured absorber

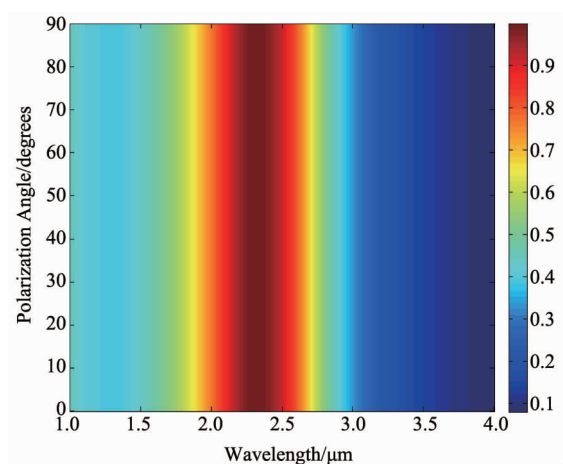


图4 吸收率随偏振角和波长的变化关系

Fig. 4 The simulated absorption rate as a function of polarization angle and wavelength

为了研究吸收器的吸收与光的偏振和波长的关系,用 FDTD Solution 模拟了光正入射时不同偏振角下吸收率随波长的变化关系.由如图4可以看出,随着偏振角从 0° 增加到 90°,吸收器对光的吸收基本不变,均在中心波长  $\lambda = 2.3 \mu\text{m}$  处获得近乎完全的吸收.这说明正入射时,吸收器的光吸收并不依赖于偏振角,吸收器是与光的偏振无关的.这主要是因为所设计的吸收器在  $X$  和  $Y$  方向都是结构对称的,因此偏振角的改变不会影响其对光的吸收.

为了进一步研究吸收器在斜入射时的光吸收情况,模拟了光以不同角度入射时 TM 和 TE 偏振下的

光吸收.如图5所示,(a)和(c)为低温(20°C)时吸收率与光的入射角和波长的关系图.从图中可以看出,两种偏振均表现出广角吸收的特点.对于 TM 偏振光,随着入射角在 0° 到 70° 之间变化,中心波长处的吸收率仍保持在 95% 以上,这是因为磁极化振动方向的磁场分量很稳定.当入射角大于 35° 时,吸收峰开始出现略微的蓝移,这主要是由每个单元中的离相振荡效应引起的<sup>[23]</sup>.另外, TM 偏振下吸收器并不是在正入射时获得最大的吸收率.事实上,对于 TM 偏振,吸收器在入射角为 45° 时获得最大的吸收率 99.9%,而在入射角为 0° 时为 99.2%.这是因为随着斜入射角度的增大,光在吸收器中传播的路程增大,因而在大角度时吸收器对光的吸收更强.而对于 TE 偏振,入射角在 0° 到 50° 之间变化,吸收器在中心波长处的吸收率均高于 91.7%,并且吸收率随着入射角的增大而减小.此外,在入射角为 70°,吸收器对光仍有 66% 的吸收.相比之下, TE 偏振比 TM 偏振具有更强的角度依赖性.实际上,产生近乎完全的吸收是由等离子体共振引起的,而等离子体共振主要是磁共振,因此吸收器对磁场的平面外分量很敏感<sup>[24]</sup>.

图5(b)和(d)给出了高温(85°C)时吸收率与光的入射角和波长的关系.高温时,两种偏振光入射,吸收均被抑制. TM 偏振情况下,吸收器对光的吸收随着斜入射角的变化最大为 51.4%;而对于 TE 偏振,吸收率随入射角的增大而减小,吸收率的最大值仅为 26.7%.由此可见,无论是 TM 偏振还是 TE 偏振,吸收器在高低温下,都表现出了良好的广角吸收可调控特性.温度不同,吸收器产生大的吸收率差值来源于 VO<sub>2</sub> 薄膜中高度局域化的电场和磁场,低温时,VO<sub>2</sub> 具有损耗介质的行为,因而周期性结构产生的共振模能够与入射光进行耦合,进而引起对入射光的强烈吸收.而高温时,VO<sub>2</sub> 的介电常数的虚部很大,以致于场的渗透很小,大部分光被反射回来,因此也就没有共振模产生,对光的吸收大大降低.

吸收器对红外光产生完美吸收来源于结构中局域化的电偶极子和磁偶极子共振.当光入射到吸收器上时,上层 Au 表面会产生局部的等离子体共振,使得正负电荷聚集在 Au 孔洞两侧.由于镜像效应,其镜像电荷会聚集在底层 Au 薄膜表面. Au 孔洞阵列中的电位移矢量和底层 Au 薄膜中的电位移矢量反向,两层金属层中就激发了反向平行电流而产生磁偶极子,磁偶极子会与入射光中磁场产生强烈的

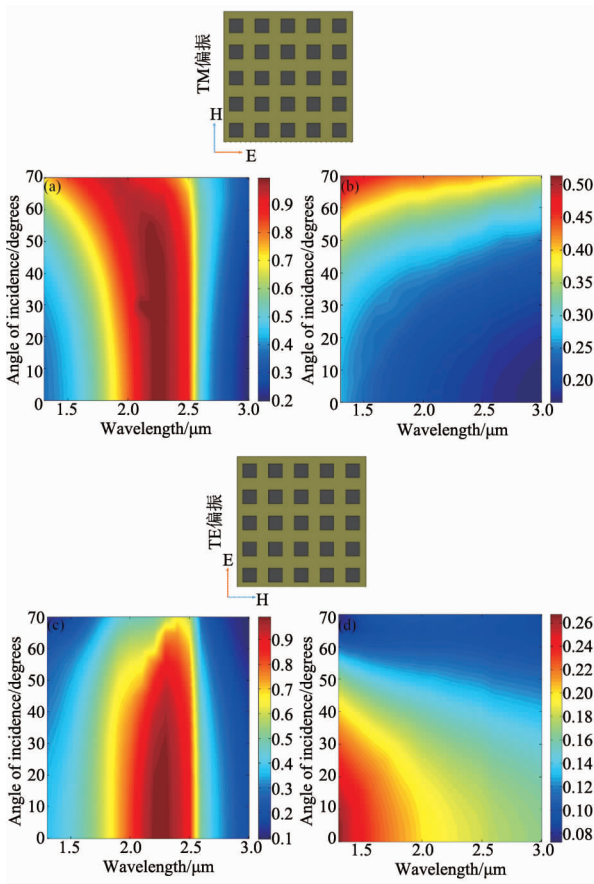


图 5 光斜入射时不同偏振态下吸收率与入射角和波长的关系 (a) 低温(20℃)以 TM 偏振斜入射, (b) 高温(85℃)以 TM 偏振斜入射, (c) 低温(20℃)以 TE 偏振斜入射, (d) 高温(85℃)以 TE 偏振斜入射

Fig. 5 The simulated absorption rate as a function of wavelength and angle of incidence at oblique incidence (a) for low temperature (20℃) at TM polarization, (a) for high temperature (85℃) at TM polarization, (c) for low temperature (20℃) at TE polarization, (d) for high temperature (85℃) at TE polarization

相互作用,进而引发两层金属层之间局域的电磁场增强,导致入射的电磁能量被高效的限制在中间介质层的局部区域<sup>[25]</sup>. 为了进一步理解被限制的电磁场能量,模拟了一个 2 × 2 结构单元在 TM 偏振光正入射情况下,中心波长 λ = 2.3 μm 处吸收器的电磁场分布情况. 吸收器不同区域的电磁场强度,如图 6 所示. 在图 6(a)和(b)中 Y-Z 截面,低温时,电场高度局域化的分布在分界面附近的 VO<sub>2</sub> 层,而高温时,电场主要分布在吸收器表面,而且强度很弱. 同样在图 6(c)和(d)中 X-Z 截面,高低温情况下,磁场的分布同样具有 Y-Z 截面的特点. 因此,对于所设计的吸收器结构,低温时,在共振中心波长处获得最强烈的电磁相互作用,增强的电磁场被局域化的限

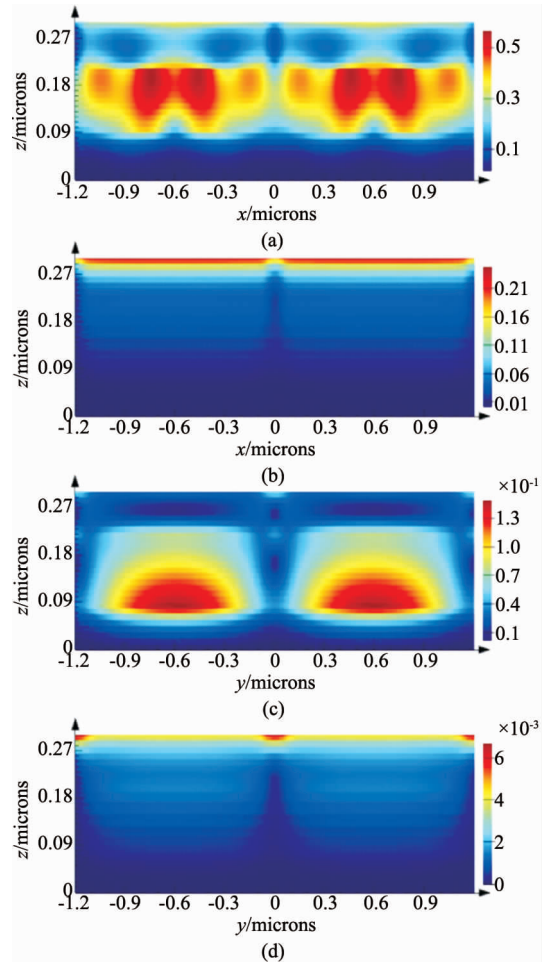


图 6 吸收器不同区域的电磁场分布 (a) 低温(20℃)下 Y-Z 截面的电场强度分布, (b) 高温(85℃)下 Y-Z 截面的电场强度分布, (c) 低温(20℃)下 X-Z 截面的磁场强度分布, (d) 高温(85℃)下 X-Z 截面的磁场强度分布

Fig. 6 The electromagnetic field distribution of absorber in different areas (a) for low temperature (20oC) at Y-Z cross section, (b) for high temperature (85℃) at Y-Z cross section, (c) for low temperature (20℃) at X-Z cross section, (d) for high temperature (85℃) at X-Z cross section

制在 VO<sub>2</sub> 膜层,进而转化为热,最终使得吸收器获得高效吸收<sup>[26]</sup>. 而高温时,介质层 VO<sub>2</sub> 由绝缘相转变为金属相,整个吸收器表现为强反射,大部分光会被反射回来,以致吸收被抑制.

### 3 结论

设计了一种性能优异的红外吸收器,该吸收器以石英玻璃为衬底,在底层 Au 薄膜和上层周期性 Au 方形孔洞阵列之间加入 VO<sub>2</sub> 介质层. 与传统的吸收器相比,所设计的 Au/VO<sub>2</sub> 纳米结构红外吸收器具有广角度、偏振无关、吸收可调控的优点,中心波长处高低温的吸收率差值达到 80.3%. 低温时 VO<sub>2</sub> 具有损耗介质的行为,因而周期性结构产生的

共振模能够与入射光进行耦合,进而引起对入射光的强烈吸收.而高温时  $\text{VO}_2$  的介电常数的虚部很大,以致于场的渗透很小,大部分光被反射回来,因此也就没有共振模产生,光的吸收被抑制.介质层  $\text{VO}_2$  的加入以及 Au 孔洞阵列结构的设计,解决了传统吸收器吸收不可调控和吸收率不高的问题.这种由金属周期性孔洞阵列、相变材料层、金属薄膜层组成的吸收器,因其吸收效率高,易于实现,对于新型智能可调控光电器件的研究和开发具有重要意义.

## References

- [1] NI Bo, CHEN Xiao-Shuang, ZHANG Yang, *et al.* Impact of resonator rotational symmetry on infrared metamaterial absorber[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (倪波, 陈效双, 张杨, 等. 旋转对称性对红外超材料完美吸收器特性的影响, *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(4): 380-385.
- [2] Zhou H, Cao X, Jiang M, *et al.* Surface plasmon resonance tunability in  $\text{VO}_2/\text{Au}/\text{VO}_2$  thermochromic structure [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, **8**(4): 617-625.
- [3] Stewart M E, Anderton C R, Thompson L B, *et al.* Nanostructured plasmonic sensors[J]. *Chemical reviews*, 2008, **108**(2): 494-521.
- [4] Liu N, Mesch M, Weiss T, *et al.* Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano letters*, 2010, **10**(7): 2342-2348.
- [5] Min C, Li J, Veronis G, *et al.* Enhancement of optical absorption in thin-film organic solar cells through the excitation of plasmonic modes in metallic gratings [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(13):133302.
- [6] Tao H, 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.
- [7] Miao J, Hu W D, Jing Y, *et al.* Surface Plasmon-Enhanced Photodetection in Few Layer  $\text{MoS}_2$  Phototransistors with Au Nanostructure Arrays[J]. *Small*, 2015, **11**(20):2392-2398.
- [8] WANG Feng, LI Yi, DING Jie, *et al.* Preparation and optical properties of  $\text{VO}_2/\text{FTO}$  thermochromic composite films [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王锋, 李毅, 丁杰, 等.  $\text{VO}_2/\text{FTO}$  复合热致变色薄膜的制备及其光学特性, *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(2): 143-148.
- [9] Balberg I, Trokman S. High-contrast optical storage in  $\text{VO}_2$  films[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975, **46**(5):2111-2119.
- [10] Hu B, Ding Y, Chen W, *et al.* External - strain induced insulating phase transition in  $\text{VO}_2$  nanobeam and its application as flexible strain sensor[J]. *Advanced Materials*, 2010, **22**(45):5134-5139.
- [11] Liu H, Wang Y, Wang K, *et al.* Design and synthesis of a novel nanothorn  $\text{VO}_2(\text{B})$  hollow microsphere and their application in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, **19**(18): 2835-2840.
- [12] Xiao H, Li Y, Yuan W R, *et al.* Microstructures and thermochromic characteristics of  $\text{VO}_2/\text{AZO}$  composite films [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **76**(2016): 580-586.
- [13] TANG Jia-Yin, LI Yi, SUN Yao, *et al.* Optical properties of  $\text{VO}_2$  nano periodic array [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (唐佳茵, 李毅, 孙瑶, 等. 二氧化钒纳米周期点阵的光学特性, *红外与毫米波学报*), 2016, **35**(2):227-233.
- [14] Hao R, Li Y, Liu F, *et al.* Electric field induced metal-insulator transition in  $\text{VO}_2$  thin film based on FTO/ $\text{VO}_2$ /FTO structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **75**(2016):82-86.
- [15] Fang B Y, Li Y, Tong G X, *et al.* Optical properties of vanadium dioxide thin film in nanoparticle structure [J]. *Optical Materials*, 2015, **47**(2015):225-230.
- [16] Maaza M, Nemraoui O, Sella C, *et al.* Thermal induced tunability of surface plasmon resonance in Au -  $\text{VO}_2$  nanophotonics [J]. *Optics communications*, 2005, **254**(1):188-195.
- [17] Xu G, Huang C M, Tazawa M, *et al.* Nano-Ag on vanadium dioxide. II. Thermal tuning of surface plasmon resonance [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**(5): 053102.
- [18] Driscoll T, Palit S, Qazilbash M M, *et al.* Dynamic tuning of an infrared hybrid-metamaterial resonance using vanadium dioxide [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(2): 024101.
- [19] Kocer H, Butun S, Banar B, *et al.* Thermal tuning of infrared resonant absorbers based on hybrid gold- $\text{VO}_2$  nanostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(16): 161104.
- [20] Dicken M J, Aydin K, Pryce I M, *et al.* Frequency tunable near-infrared metamaterials based on  $\text{VO}_2$  phase transition [J]. *Optics express*, 2009, **17**(20):18330-18339.
- [21] Wu C, Burton Neuner III, Shvets G, *et al.* Large-area wide-angle spectrally selective plasmonic absorber [J]. *Physical Review B*, 2011, **84**(7):075102.
- [22] Wang L P, Zhang Z M. Wavelength-selective and diffuse emitter enhanced by magnetic polaritons for thermophotovoltaics [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(6): 063902.
- [23] Bai Y, Zhao L, Ju D, *et al.* Wide-angle, polarization-independent and dual-band infrared perfect absorber based on L-shaped metamaterial [J]. *Optics express*, 2015, **23**(7):8670-8680.
- [24] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, *et al.* Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers [J]. *Nature communications*, 2011, **2**:517.
- [25] Cao T, Zhang L, Simpson R E, *et al.* Mid-infrared tunable polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial [J]. *JOSA B*, 2013, **30**(6): 1580-1585.
- [26] Zhang B, Zhao Y, Hao Q, *et al.* Polarization-independent dual-band infrared perfect absorber based on a metal-dielectric-metal elliptical nanodisk array [J]. *Optics express*, 2011, **19**(16):15221-15228.