

# 基于相变材料 GST 的红外隐身 多层膜设计与光谱性能研究

黎思睿<sup>1</sup>, 李 佳<sup>1</sup>, 刘 科<sup>1, 2</sup>, 黄奕嘉<sup>1</sup>, 李 玲<sup>1</sup>, 周晓林<sup>1</sup>

(1. 四川师范大学物理与电子工程学院, 成都 610101;  
2. 西南交通大学材料科学与工程学院, 成都 611756)

**摘 要:** 为了实现在不同背景温度条件下的红外隐身, 需要研究具有可调发射率的红外隐身材料. 此外, 多波段兼容隐身技术在现代军事和科技中具有重要的研究价值. 本文设计了一种利用单一多层膜结构实现多光谱可调谐的超材料吸收器. 利用  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) 相变材料的晶态和非晶态不同属性, 该结构实现了在大气窗口  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  波长范围内最大吸收率吸收从 94.93% 到 9.19% 的可控变化. 而且通过控制中间态, 结构对电磁波的吸收率可以实现连续变化. 同时, 该结构具有基于干涉效应的可调结构色, 通过改变顶层薄膜的厚度, 器件的颜色可以发生变化. 因而同时实现了在红外及可见光两个波段对电磁波的独立调控功能. 该超材料吸收器具有红外-可见光兼容隐身的潜在应用.

**关键词:** 多层膜; 吸收器; 结构色; 可调吸收率

**中图分类号:** O04      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.064005

## Design and spectral performance research of infrared stealth multilayer film based on phase change material GST

LI Si-Rui<sup>1</sup>, LI Jia<sup>1</sup>, LIU Ke<sup>1, 2</sup>, HUANG Yi-Jia<sup>1</sup>, LI Ling<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-Lin<sup>1</sup>

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;  
2. School of materials science and engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** In order to achieve infrared stealth under different background temperatures, it is necessary to study infrared stealth materials with adjustable emissivity. In addition, multi-band compatible stealth technology has important research value in modern military, science and technology. In this paper, a metamaterial absorber with a single multilayer structure is designed to realize efficient multi-spectral manipulation.  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) is a phase-changing material. Crystalline GST and amorphous GST have different infrared electromagnetic properties. Utilizing this property of GST, the maximum absorptivity of the designed structure can be controlled from 94.93% to 9.19% in the wavelength range of  $8\sim 13\ \mu\text{m}$ . Moreover, the intermediate GST can be obtained by controlling the external conditions, and the absorptivity of the structure to the electromagnetic wave can be changed continuously. At the same time, the structure has tunable structure color based on interference effect, and the surface color of the device can be tuned by changing the thickness of the top film. Therefore, the independent tuning of electromagnetic wave in both infrared and visible bands is realized at the same time. The metamaterial absorber has the

收稿日期: 2021-05-24  
基金项目: 四川省科技厅面上项目(2018JY0439)  
作者简介: 黎思睿(1996—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事超材料吸收器研究. E-mail: q23fzq@foxmail.com  
通讯作者: 刘科. E-mail: lkworld@uestc.edu.cn; 周晓林. E-mail: Zhoulx\_wuli@163.com

potential application of infrared-visible compatible stealth.

**Keywords:** Multilayer film; Absorber; Structural color; Tunable absorptivity

## 1 引言

传统的红外隐身材料多是在红外大气窗口具有低发射率的材料<sup>[1-6]</sup>. 此类伪装材料的发射率固定且不可控. 当背景温度发生变化时, 背景的辐射温度和材料的辐射温度往往不匹配, 因而失去伪装能力<sup>[7]</sup>. 所以传统的低发射率材料难以适应背景温度变化情况下红外隐身的需求. 为了实现在不同背景温度条件下的红外隐身, 我们需要研究具有可调发射率的红外隐身材料. 根据基尔霍夫定律, 物体的发射率等于热平衡状态下的吸收率<sup>[8]</sup>. 所以要实现发射率可调, 就要实现吸收率可调. 此前, 已有研究者利用外加偏压来改变石墨烯的电导率, 进而改变共振频率, 实现电压调频吸收的可调谐吸收器<sup>[9]</sup>. 众所周知, 石墨烯是一种由单层碳原子构成的二维材料, 具有不同费米能级的石墨烯的表面电导率不同<sup>[10]</sup>. 所以, 利用静电掺杂等技术在一定范围内调节石墨烯的费米能级, 即可实现可调谐超材料吸收器<sup>[10-13]</sup>.

基于石墨烯的可调谐超材料吸收器需要持续地消耗能量来维持它的某一状态. 相变材料是一种能在激光、温度和外加电场等外部条件的刺激下实现从一个状态到另一个状态转换的特殊材料<sup>[14-18]</sup>.  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST) 是一种常用于超材料设计的相变材料, 且数据存储领域 GST 已经被应用了多年<sup>[14]</sup>. GST 是一种可以在晶态和非晶态之间转换的材料<sup>[19]</sup>. 为了表述简单, 我们将 GST 为非晶态时的结构称为 a-GST 结构, 将 GST 为晶态时的结构称为 c-GST 结构, 而将中间态 GST 构成的结构简称为 i-GST 结构. 在红外波段, 不同状态的 GST 拥有不同的电磁性质, 晶态的 GST (c-GST) 在红外大气窗口为损耗材料, 而非晶态的 GST (a-GST) 在此波段为电磁透明材料<sup>[7, 20]</sup>. 更重要地是, 除非再次满足相变条件, 否则在室温下某一状态的 GST 将维持多年, 即不需要额外的能量去维持 GST 的状态稳定<sup>[20]</sup>. 本文正是利用该材料的特殊性质, 提出了一种基于 GST 的具有可调吸收率的红外吸收器, 使之具有热红外隐身的潜在应用价值.

随着科技的进步, 单一波段的隐身技术很难适应不断发展的多波段探测技术, 因此多波段兼

容隐身技术愈发显得重要<sup>[21]</sup>. 已经有许多研究者开展了关于红外-可见、红外-雷达和红外-激光兼容隐身研究<sup>[1, 4, 6, 22]</sup>. 为了让设计的结构能进一步实现可见光隐身, 我们利用结构生色原理获得不同的表面颜色. 结构色主要是利用光和微纳结构之间的相互作用产生颜色, 是基于干涉、衍射和散射的基本光学现象<sup>[23]</sup>. 本文利用薄膜干涉原理, 通过改变结构的薄膜厚度来改变结构的表面颜色, 同时维持结构的红外吸收性能.

我们设计了一种利用单一多层膜结构实现吸收率可调谐, 且具备可调结构色功能的超材料吸收器. 该吸收器可同时实现在红外及可见光两个波段对电磁波的独立调控功能, 使其具有与背景颜色融合的表面颜色且兼具红外隐身能力. 在背景热辐射和颜色不同的情况下, 它可以伪装自己, 实现红外-可见光兼容隐身.

## 2 设计原理与结构

我们设计的结构如图 1 所示, 自下而上为 Au、GST、Ge 和 ZnS. 其中, ZnS 在  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  的折射率为 2.2, Ge 的折射率为 4<sup>[24-25]</sup>. 而 Au 的介电常数可以用 Drude 模型描述:  $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\Gamma)$ , 其中等离子体频率  $\omega_p$  为  $1.37 \times 10^{16}\ \text{rad/s}$ , 碰撞频率  $\Gamma$  为  $3.947 \times 10^{13}\ \text{rad/s}$ <sup>[26]</sup>. 而 a-GST 和 c-GST 在此波段的电磁参数来自文献<sup>[7]</sup>. 我们利用 c-GST 本身的损耗性质和多层膜堆叠结构结合实现高效吸收. 当 GST 为非晶态时, 因为 a-GST 为无损材料, 结构的吸收性能降低. 由此, 我们便可通过控制 GST 的状态来得到具有不同吸收性能的结构. 我们首先设计了 GST 为晶态时, 在  $10.5\ \mu\text{m}$  处具有高吸收性能的多层膜结构.

本文利用传输矩阵法计算整个结构的红外吸收光谱. 传输矩阵法是一种常用于计算多层膜结构的计算方法. 它具有速度快、矩阵元素少、易于编码的特点<sup>[27-28]</sup>. 这些特点使之很容易便能和各种优化算法结合, 用于不同功能的多层膜结构的优化设计<sup>[29]</sup>. 具体的设计和计算方法见我们之前的工作<sup>[30]</sup>. 底层 Au 的厚度固定为足以抑制透射的  $150\ \text{nm}$ , 所以结构的透射近似等于 0. 因此, 吸收性能可利用  $A = 1 - R$  来计算, 其中  $A$  代表吸收率,  $R$  代表透射率. 在使用遗传算法优化设计过程

中, 我们使用适应度函数  $\text{objfun}=R(\lambda)$ , 其中  $\lambda=10.5\ \mu\text{m}$ , 而  $R$  是利用传输矩阵法计算的波长为  $\lambda$  时结构的反射率. 优化变量为薄膜厚度, 即  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$ . 利用遗传算法我们可以得到适应度函数最小时对应的薄膜厚度. 由于遗传算法的随机性, 经过多次优化后, 最佳的厚度为  $H_1=180\ \text{nm}$ ,  $H_2=100\ \text{nm}$  和  $H_3=345\ \text{nm}$ .



图 1 吸波器的示意图, 每层的厚度从顶部到底部分别记为  $H_1, H_2, H_3$  和  $H_4$

Fig. 1 Schematic image of proposed absorber; the thickness of each layer from top to bottom is marked as  $H_1, H_2, H_3$  and  $H_4$ , respectively

表面颜色的调控是利用薄膜干涉条件实现的. 薄膜干涉生色是非常常见且简单的结构色的来源<sup>[31]</sup>. 一般来说, 发生相消干涉的波长对应着反射谷的波长, 同理相长干涉对应着反射峰<sup>[32]</sup>.

我们以最典型的单层薄膜干涉为例. 由于光从光疏介质射向光密介质时, 反射光会有半波损失, 所以薄膜是否附着在折射率较高的衬底上会影响薄膜干涉条件<sup>[23]</sup>. 对于附着在具有较高折射率的衬底上的薄膜, 干涉条件为:

$$2n_f d \cos \theta_b = (m - 1/2) \lambda_1 \quad (1)$$

$$2n_f d \cos \theta_b = m \lambda_1 \quad (2)$$

其中,  $\lambda_1$  为发生相消干涉的波长;  $\lambda_2$  为发生相消干涉的波长;  $m$  为整数;  $\theta_b$  为入射角;  $d$  和  $n_f$  分别代表薄膜的厚度和折射率. 从干涉条件可知, 我们可以通过改变薄膜的厚度来改变发生干涉的波长. 同时, 薄膜的反射光谱也会发生变化, 由此可以得到不同颜色的薄膜.

### 3 结果与讨论

在正入射时, c-GST 结构的红外吸收情况如图 2(a) 中的红实线所示. 吸收器在  $10.5\ \mu\text{m}$  处有 94.93% 的最大吸收率. 且结构在  $8\sim13\ \mu\text{m}$  的平均吸收率为 65.59%. 而 a-GST 结构的红外吸收

情况如图 2(a) 中的黑虚线所示, a-GST 结构在  $8\sim13\ \mu\text{m}$  的最大吸收率仅为 9.19%, 且在该波段平均吸收率低至 4.9%. 这说明此吸收器可在单一结构中通过改变 GST 的状态实现最大吸收率从 94.93% 到 9.19% 的调控.

通过控制退火时间或温度等外部条件使 GST 部分结晶, 可以得到中间态 GST (i-GST)<sup>[7, 20]</sup>. 为了进一步说明所提出结构的吸收率的连续可调性, 我们还设计并模拟计算了不同的中间态 GST 构成的 i-GST 结构. i-GST 的介电常数可由 Lorentz-Lorenz 关系获得<sup>[7, 33]</sup>:

$$\frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + 2} = m \times \frac{\epsilon_c - 1}{\epsilon_c + 2} + (1 - m) \times \frac{\epsilon_a - 1}{\epsilon_a + 2} \quad (3)$$

其中  $m$  代表 GST 的结晶率, 取值范围为  $0\sim1$ ;  $\epsilon_c$  和  $\epsilon_a$  分别代表晶态 GST 和非晶态 GST 的介电常数;  $\epsilon_i$  代表中间态 GST 的介电常数. 由图 2(b) 可得, 当中间态 GST 的结晶率逐渐上升时, 结构的吸收性能也有提升, 当结晶率为 0.25、0.5 和 0.75 时, 结构的最大吸收率分别为 23.15%、43.80% 和 70.51%, 而结构在  $8\sim13\ \mu\text{m}$  的平均吸收分别为 12.33%、25.37% 和 45.34%. 也就是说, 可以通过控制 GST 的相变来连续控制结构的吸收率. 具有这样特点的吸收器可以应用于具有不同背景温度的热红外隐身.

物体的表面颜色与其在可见光波段的反射光谱有关, 而结构色的产生主要与顶部的两层薄膜反射有关. 计算过程中使用的 ZnS 和 Ge 的光学常数来自参考文献<sup>[34-35]</sup>. 如图 2(c) 所示, 该结构的反射光谱在 462 nm 处存在反射率约 50.72% 的反射峰, 也就是说, 在  $8\sim13\ \mu\text{m}$  波段具有可调吸收率的同时, 还兼具特定的颜色.

此外, 因结构色的产生主要与顶部的两层薄膜有关. 如图 1 所示, 我们将顶部两层定义为 Part I, 剩下的底部两层定义为 Part II. 如图 2(c) 所示, 首先, 我们分别模拟计算了只含 Part I 结构的可见光反射光谱 (红虚线), 以及包含 Part I 和 Part II 两部分整体结构的反射光谱 (黑实线). 研究表明, 在波长小于 600 nm 时, 两种结构的可见光反射光谱的差别并不大, 两条曲线基本重合. 其次, 如图 2(d) 所示, 仅存在 Part I 结构的可见光透射光谱 (蓝虚线) 中, 当波长小于 600 nm 时, 透射率非常小; 而当波长大于 600 nm 时, 透射率开始增大, 但不高于 10%. 这一现象与 Ge 在可见光波段的光学性质有关. Ge 在可见光波段有着相

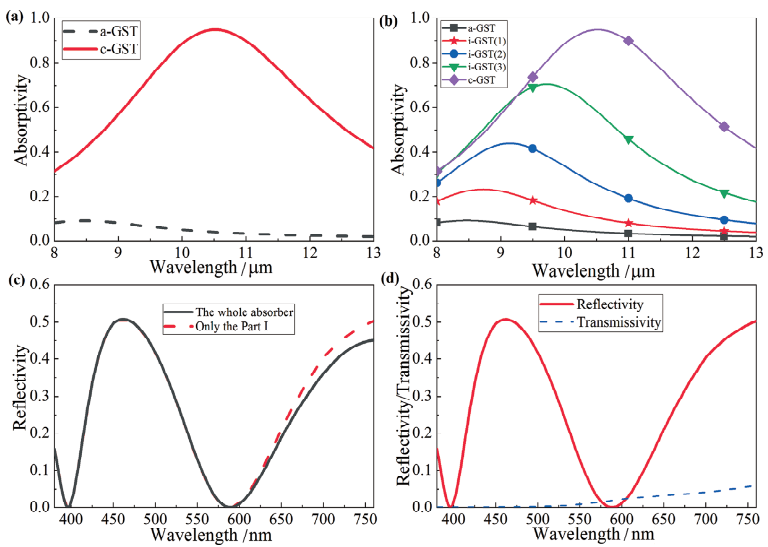


图 2 (a) a-GST 结构(虚线)及 c-GST 结构(实线)的吸收光谱; (b) GST 的结晶率不同时结构的红外吸收光谱, 其中 i-GST 的结晶率分别为 0.75(i-GST(3)), 0.5(i-GST(2)) 和 0.25(i-GST(1)); (c) 整个结构(实线)和仅存在 Part I(虚线)的情况的可见光反射光谱; (d) 仅存在 Part I 结构的可见光反射(实线)和透射(虚线)光谱

Fig. 2 (a) Absorptivity of a-GST structure (dash line) and c-GST structure (solid line) as a function of wavelength; (b) infrared absorptivity of structure with different crystallization fraction of GST, in which the crystallization fraction of i-GST are 0.75(i-GST(3)), 0.5(i-GST(2)) and 0.25(i-GST(1)) respectively; (c) reflectivity of the whole structure (solid line) and reflectivity in the presence of only Part I (dash line) as a function of wavelength; (d) reflectivity (solid line) and transmissivity (dash line) in the presence of only Part I

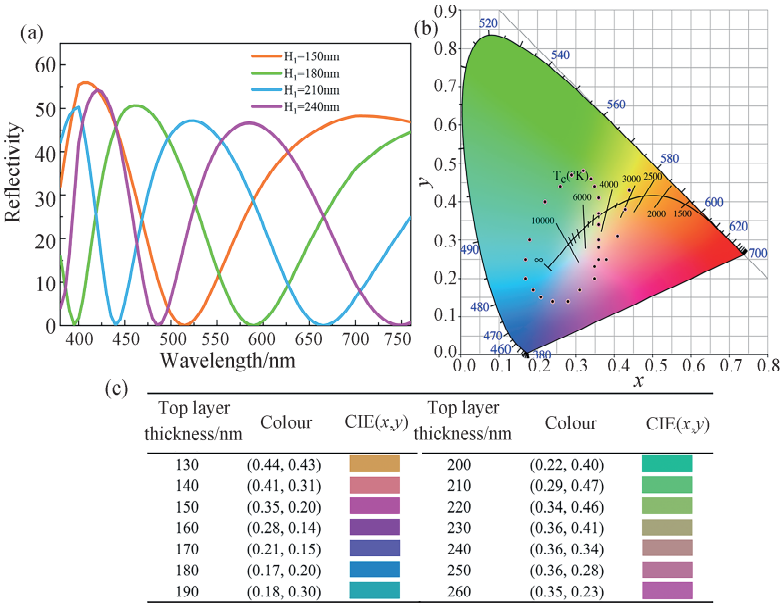


图 3 顶层厚度对可见光反射光谱和表面颜色的影响: (a) 模拟计算的吸波器在顶层厚度  $H_1$  不同的情况下的可见光反射光谱; (b) 在 CIE1931 色度图中用黑点标记的  $H_1$  以 5 nm 为步长从 130 nm 变化到 260 nm 的 CIE( $x, y$ ) 色度坐标; (c) 结构的顶层厚度从 130 nm 变化到 260 nm 的颜色及其对应色度图坐标 CIE( $x, y$ ) (线上彩色)

Fig. 3 The influences of top layer thickness on visible reflection spectra and surface color: (a) simulated reflection spectra of visible region of multilayer structure with different  $H_1$ . Among them,  $H_1$  is 150 nm, 180 nm, 210 nm and 240 nm, respectively; (b) CIE 1931 chromaticity diagram, in which the chromaticity coordinates CIE( $x, y$ ) corresponding to different  $H_1$  from 130 nm to 260 nm with 5 nm intervals are marked with black dots; (c) color and color coordinates CIE( $x, y$ ) for different top layer thicknesses from 130 nm to 260 nm with 10 nm as an interval (color online)

对较高的消光系数, 是损耗材料<sup>[35]</sup>. 因此 Part I 中厚度为 100 nm 的 Ge 薄膜吸收耗损了大部分 ZnS 薄膜透射的光, 即入射的可见光大部分无法穿透 Part I 中的 Ge 薄膜. 由此, 结构色主要由顶层 Part I 产生, 且实现了对可见光的独立调控. 为了进一步说明顶层薄膜厚度对结构色颜色的调控

功能, 顶层 ZnS 的厚度分别设计为 150、180、210 和 240 nm, 反射光谱如图 3(a)所示, 由图 3(a)可知, 不同顶层厚度结构的可见光反射光谱对应的反射峰波长明显不同. 如图 3(b)和 3(c)所示, 计算了顶层厚度  $H_1$  在 130 和 260 nm 之间变化时, 结构的 CIE 坐标值及其对应颜色, 并将其在 CIE 1931 色度图中用黑点标出. 由图 3 可知, 我们可以通过改变顶层 ZnS 的厚度改变结构的表面颜色, 进而使结构与环境融合, 实现伪装. 同时考虑到结构的红外吸收性能, 此结构可以分别通过控制顶层厚度和 GST 的相变过程, 调控相应波段的光谱, 实现可见和红外的兼容隐身.

本文结构的红外吸收主要归功于 GST 本身的损耗特性以及干涉效应. 如前文所述, 在红外波段 c-GST 是损耗材料, 而 a-GST 是无损材料, 这与不同状态 GST 结构的吸收率是对应的. 为了进一步说明结构和材料对吸收性能的影响, 我们计算了不同波长时不同状态的 GST 结构的功率损耗密度分布. 如图 4(a)所示, c-GST 结构中, 吸收大多发生在具有固有损耗的 c-GST 层中, 同时底部的 Au 层中只发生较少部分的吸收. 而如图 4(b)

所示, 在 a-GST 结构中, a-GST 层中并不存在吸收损耗, 只有底层 Au 中存在吸收, 这对应着 a-GST 结构小于 10% 的吸收. 这说明了 c-GST 的固有损耗对结构实现红外吸收的贡献.

为了实现 a-GST 结构的低吸收, 底层金属我们选择了低固有损耗的贵金属 Au. 作为对比, 我们模拟计算了底层金属材料为高损耗的镍铬合金的结构吸收率(结构参数分别为  $H_1=180$  nm,  $H_2=100$  nm,  $H_3=270$  nm 和  $H_4=150$  nm). 如图 4(c)所示, 当 GST 为晶态时, 底层材料 Au 和镍铬合金的结构都有大于 90% 的最大吸收率. 而且底部金属为镍铬合金的 c-GST 结构的吸收带宽更宽, 这是因为镍铬合金本身具有高固有损耗. 如图 4(d)所示, 当结构中的 GST 为非晶态, 底部材料为镍铬合金的结构的最大吸收率仍高达 94.52%, 而平均吸收高达 69.41%. 即底部材料为镍铬合金的结构不能通过调节 GST 的状态调节结构的红外吸收率. 因此, 镍铬合金之类的高损耗金属材料不适合作为吸收率可调的超材料吸收器的底层金属.

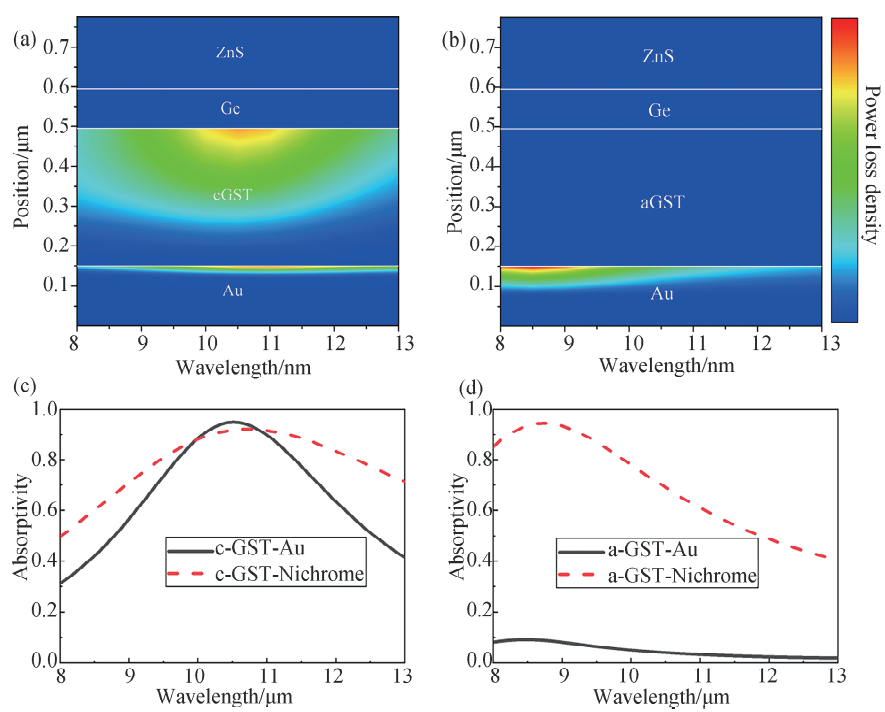


图 4 功率损耗密度随波长和位置变化的分布和不同底部材料的结构的吸收光谱: 在 8~13 μm 范围内, (a) c-GST 结构及 (b) a-GST 结构功率损耗密度随波长和位置变化的分布; 底层材料分别为 Au 和镍铬合金时, (c) c-GST 结构和 (d) a-GST 结构的吸收光谱(线上彩色)

Fig. 4 Simulated contour plots of power loss density as a function of wavelength and absorption spectra of different bottom metal layer materials; simulated contour plots of power loss density as a function of wavelength and position in (a) c-GST and (b) a-GST structure; the absorption spectra of (c) c-GST structure and (d) a-GST structure when the underlying materials are Au and nichrome respectively(color online)

由前面的分析可知,设计的结构可以通过改变顶层薄膜厚度改变结构的表面颜色,实现对可见光的独立调控.因此有必要探究顶层薄膜厚度的变化是否对结构的红外吸收性能有较大影响.图 5(a)计算了顶层 ZnS 厚度在 130~260 nm 范围

内变化时,结构在 8~13  $\mu\text{m}$  的吸收光谱.可以看出,当顶层厚度变化时,结构仍保持着出色的吸收表现,其最大吸收率始终大于 94%.这意味着顶层厚度的变化对吸波器的吸收性能影响较小,不会造成结构的吸收性能明显下降.

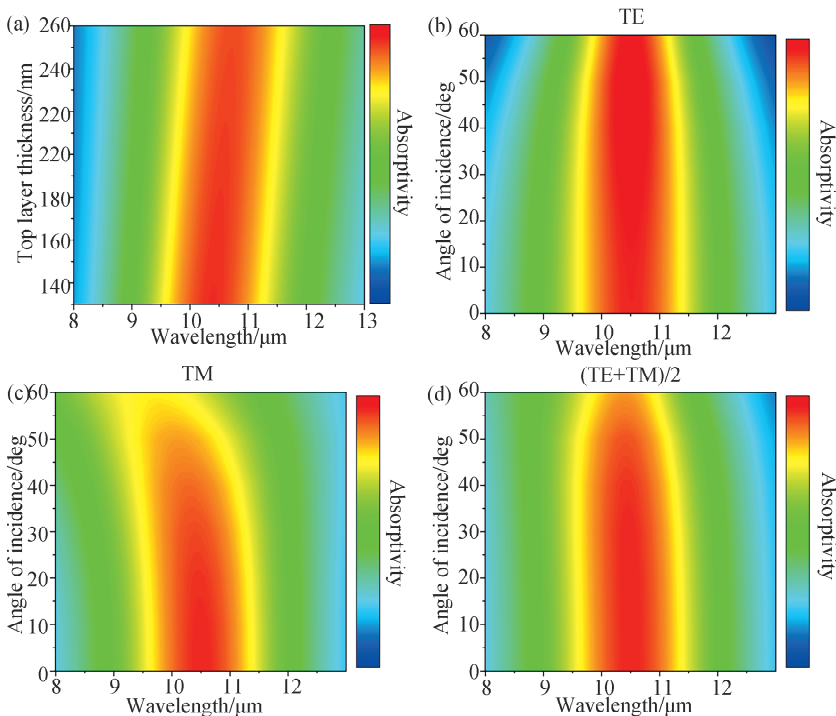


图 5 顶层厚度和入射角对结构吸收性能的影响: (a)模拟计算的吸波器在顶层厚度  $H_1$  不同的情况下的红外吸收率; (b) TE 模式和 (c) TM 模式下入射角为  $0^\circ$  到  $60^\circ$  时的吸收图谱; (d)入射角不同时结构对 TE 和 TM 极化的平均吸收率  $(A_{\text{TE}}+A_{\text{TM}})/2$

Fig. 5 The influences of top layer thickness and incident angle on absorption performance of structure: (a) simulated absorptivity of the multilayer structure in which the top layer thickness  $H_1$  varies from 130 nm to 260 nm with 5 nm as an interval; simulated spectral absorptivity of the multilayer structure as functions of the incident angles for (b) TE and (c) TM waves; (d) average of TE and TM  $((A_{\text{TE}}+A_{\text{TM}})/2)$

在实际应用中,入射角对结构吸收性能的影响同样值得探究.如图 5(b)~5(d)展示了入射角在  $0^\circ$  到  $60^\circ$  变化时,结构在 8~13  $\mu\text{m}$  的吸收光谱.无论是 TE 极化波(图 5(b))还是 TM 极化波(图 5(c)),结构的吸收率都受到入射角的影响,但是受影响的情况不同.对 TE 波而言,结构的红外吸收率的最大值随着入射角增大的而变化,当入射角为  $50^\circ$  时,结构的最大吸收率可达 99.97%,大于正入射时的 94.93%.吸收峰的位置并未发生明显移动,仍约为 10.5  $\mu\text{m}$ .而且随着入射角的增大吸收峰的带宽略有降低,吸收大于 70%的带宽由正入射时的 2.46  $\mu\text{m}$  下降为入射角为  $60^\circ$  时的 1.77  $\mu\text{m}$ .对 TM 波而言,吸收性能随着入射角的增加而逐渐降低,当入射角为  $60^\circ$ ,结构的最大吸收率下降为 81.95%,且吸收峰的位置移动至 9.57

$\mu\text{m}$ .因为红外摄像机同时接受 TE 和 TM 两种极化的辐射,所以我们还计算了吸收器的 TE 和 TM 极化的平均吸收率 $((A_{\text{TE}}+A_{\text{TM}})/2)$ .由图 5(d)可知,吸收器对 TE 和 TM 极化波的吸收率的平均值不敏感.也就是说,我们设计的结构的红外隐身性能对观测角度不敏感.

### 4 总 结

本文设计了一种利用简单的多层膜结构同时实现可调表面结构色颜色和可调红外吸收率的超材料吸收器.通过将传输矩阵法和遗传算法结合,完成了多层膜结构的优化设计.设计的结构表面颜色可以通过改变顶层薄膜的厚度进行变化.同时,我们利用晶态和非晶态的 GST 在 8~13  $\mu\text{m}$  相差较大的介电常数性能,通过改变 GST 的结晶

状态,在单一结构中设计实现了吸收率从 94.93% 到 9.19% 的变化。该结构能在红外及可见光两个波段独立地实现对电磁波的调控,使其具有红外-可见兼容隐身的潜在应用。对电磁隐身超材料的设计和实验制备具有指导和借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] Wang Q, Wang J, Zhao D, *et al.* Investigation of terahertz waves propagating through far infrared/ $\text{CO}_2$  laser stealth-compatible coating based on one-dimensional photonic crystal [J]. *Infrared Phys Techn*, 2016, 79: 144.
- [2] Zhang W, Xu G, Zhang J, *et al.* Infrared spectrally selective low emissivity from Ge/ZnS one-dimensional heterostructure photonic crystal [J]. *Opt Mater*, 2014, 37: 343.
- [3] Zhang J, Shi J, Zhao D, *et al.* Realization of compatible stealth material for infrared, laser and radar based on one-dimensional doping-structure photonic crystals [J]. *Infrared Phys Techn*, 2017, 85: 62.
- [4] Qi D, Wang X, Cheng Y, *et al.* Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications [J]. *Opt Mater*, 2016, 62: 52.
- [5] Chiba K, Takahashi T, Kageyama T, *et al.* Low-emissivity coating of amorphous diamond-like carbon/Ag-alloy multilayer on glass [J]. *Appl Surf Sci*, 2005, 246: 48.
- [6] Wang Z, Cheng Y, Nie Y, *et al.* Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications [J]. *J Appl Phys*, 2014, 116: 054905.
- [7] Qu Y, Li Q, Cai L, *et al.* Thermal camouflage based on the phase-changing material GST [J]. *Light: Sci Appl*, 2018, 7: 26.
- [8] Jean-Jacques G, Manuel N. Field theory for generalized bidirectional reflectivity: derivation of Helmholtz's reciprocity principle and Kirchhoff's law [J]. *J Opt Soc Am A*, 1998, 15: 2735.
- [9] Inoue T, De Zoysa M, Asano T, *et al.* Realization of dynamic thermal emission control [J]. *Nat Mater*, 2014, 13: 928.
- [10] 顾钰,王民,蒲明博,等.基于石墨烯结合亚波长金属结构的太赫兹宽带动态吸收器[J].*光电工程*, 2016, 43: 60.
- [11] Chen M, Sun W, Cai J, *et al.* Frequency-tunable terahertz absorbers based on graphene metasurface [J]. *Opt Commun*, 2017, 382: 144.
- [12] Yao Y, Shankar R, Kats M A, *et al.* Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators [J]. *Nano Lett*, 2014, 14: 6526.
- [13] Thongrattanasiri S, Koppens F H L, Javier Garcia de Abajo F. Complete optical absorption in periodically patterned graphene [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 047401.
- [14] 付永忠.基于AFM和硫系相变材料的超高密度数据存储机理研究[D].镇江:江苏大学,2010.
- [15] 严巍,王纪永,曲睿睿,等.基于相变材料超表面的光学调控[J].*物理学报*, 2020, 69: 96.
- [16] 王曼婷.基于相变材料的光调制器设计[D].北京:北京邮电大学,2019.
- [17] 牛萍娟,薛卫芳,宁平凡,等.基于低维相变薄膜的显示器件光学性质的研究[J].*发光学报*, 2016, 37: 1514.
- [18] 江孝伟,武华.吸收波长和吸收效率可控的超材料吸收器[J].*物理学报*, 2021, 70: 027804.
- [19] 薛卫芳.低维相变薄膜显示器件的光学性质研究[D].天津:天津工业大学,2017.
- [20] Du K K, Li Q, Lyu Y B, *et al.* Control over emissivity of zero-static-power thermal emitters based on phase-changing material GST [J]. *Light: Sci Appl*, 2017, 6: e16194.
- [21] 卢仪,卜小海,李栋先,等.基于光子晶体的红外隐身材料研究进展[J].*激光与光电子学进展*, 2019, 56: 24.
- [22] 张继魁,时家明,苗雷,等.近中红外与  $1.06\ \mu\text{m}$  和  $1.54\ \mu\text{m}$  激光兼容隐身光子晶体研究[J].*发光学报*, 2016, 37: 1130.
- [23] Kinoshita S, Yoshioka S, Miyazaki J. Physics of structural colors [J]. *Rep Prog Phys*, 2008, 71: 076401.
- [24] Icenogle H W, Platt B C, Wolfe W L. Refractive indexes and temperature coefficients of germanium and silicon [J]. *Appl Optics*, 1976, 15: 2348.
- [25] Debenham M. Refractive indices of zinc sulfide in the  $0.405\sim 13\ \mu\text{m}$  wavelength range [J]. *Appl Optics*, 1984, 23: 2238.
- [26] Xu J, Zhao Z, Yu H, *et al.* Design of triple-band metamaterial absorbers with refractive index sensitivity at infrared frequencies [J]. *Opt Express*, 2016, 24: 25742.
- [27] 王志迅.一维光子晶体在红外隐身材料应用方面的设计与实现[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [28] 祁冬.基于微纳多层结构的可见光-红外频谱特性

调控研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[29] Huang Y, Pu M, Zhao Z, *et al.* Broadband meta-material as an "invisible" radiative cooling coat [J]. Opt Commun, 2018, 407: 204.

[30] Li S, Liu K, Long X, *et al.* Numerical study of in-frared broadband multilayer film absorber with tun-able structural colors [J]. Opt Commun, 2020, 459: 124950.

[31] 付国栋. 基于光子晶体构造的纺织品仿生结构生色 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.

[32] Tilley R J D. Colour and the optical properties of materials: an exploration of the relationship be-tween light, the optical properties of materials and colour [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

[33] Chu C H, Tseng M L, Chen J, *et al.* Active dielec-tric metasurface based on phase-change medium [J]. Laser Photonics Rev, 2016, 10: 986.

[34] Klein C A. Room-temperature dispersion equations for cubic zinc sulfide [J]. Appl Optics, 1986, 25: 1873.

[35] Aspnes D E, Studna A A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0eV [J]. Phys Rev B, 1983, 27: 985.

引用本文格式:

中 文: 黎思睿, 李佳, 刘科, 等. 基于相变材料 GST 的红外隐身多层膜设计与光谱性能研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 064005.

英 文: Li S R, Li J, Liu K, *et al.* Design and spectral performance research of infrared stealth multilayer film based on phase change material GST [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 064005.