

# 混合谐振模式宽带长波红外超表面吸收器研究

罗奕<sup>1,2</sup>, 梁中翥<sup>1\*</sup>, 孟德佳<sup>1</sup>, 陶金<sup>1</sup>, 梁静秋<sup>1</sup>, 秦正<sup>1,2</sup>,  
侯恩柱<sup>1,2</sup>, 秦余欣<sup>1</sup>, 吕金光<sup>1</sup>, 张宇昊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了满足红外探测器器件集成化和对红外宽光谱范围吸收的需求, 设计了一种工作在长波红外波段(8~14  $\mu\text{m}$ )的超宽带、高吸收、极化不敏感的超材料吸收器。通过在金属-介质-金属三层异质的超材料吸收器结构的顶部金属周围镶嵌一层介质形成超表面, 以增加谐振强度和吸收带宽。在8~13.6  $\mu\text{m}$ 的带宽范围内, 该结构有超过90%的平均吸收率, 覆盖了大部分长波红外大气窗口波段, 对红外探测领域有着重要意义。研究表明: 镶嵌的金属-介质组成的介质波导模式和谐振腔模式的结合以及传播型表面等离激元模式的激发是形成宽带高吸收的主要原因, 并且谐振模式的谐振波长可以通过相关参数来进行调控。本文的研究结果为可调谐宽带长波红外吸收材料的设计提供参考, 该设计方法可推广到中波红外波段、甚至长波红外或其它波段。

**关键词:** 超材料吸收器; 长波红外; 介质波导; 谐振腔模式

中图分类号: TN21 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20201301.0131

## Study on long wavelength infrared broadband metasurface absorber via hybrid resonant mode

LUO Yi<sup>1,2</sup>, LIANG Zhong-zhu<sup>1\*</sup>, MENG De-jia<sup>1</sup>, TAO Jin<sup>1</sup>, LIANG Jing-qiu<sup>1</sup>, QIN Zheng<sup>1,2</sup>,  
HOU En-zhu<sup>1,2</sup>, QIN Yu-xin<sup>1</sup>, LV Jing-guang<sup>1</sup>, ZHANG Yu-hao<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** In order to meet the requirements of integration of infrared devices and the wideband absorption of

收稿日期: 2019-03-28; 修订日期: 2019-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61735018, No. 61376122, No. 61805242); 中国科学院青年创新促进会优秀会员基金(No. 2014193); 吉林省科技发展计划重点科技攻关项目(No. 20170204077GX); 吉林省中青年科技创新领军人才及团队项目(No. 20190101012JH); 应用光学国家重点实验室自主基金; 长春光机所-杜克大学国际合作基金; 长春光机所-复旦大学合作基金

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61735018, No. 61376122, No. 61805242); Excellent Member Fund of Youth Innovation Promotion Association of CAS (No. 2014193); Scientific and Technological Development Project of Jilin province (No. 20170204077GX); Leading Talents and Team Project of Scientific and Technological Innovation for Young and Middle-aged Groups in Jilin Province (No. 20190101012JH); Independent fund of State Key Laboratory of Applied Optics; Overseas Students Science and Technology Innovation and Entrepreneurship Projects; Project of CIOMP-Duke Collaborative Research; Project of CIOMP-Fudan University Collaborative Research

infrared light, a novel ultra-broadband, high-absorbance and polarization-independent metamaterial absorber working in the long-wave infrared region ( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ) is designed. By inserting a dielectric layer around the top metal of a metal-dielectric-metal metamaterial absorber to form a metasurface, the resonance intensity and absorption bandwidth can be improved. The structure has an average absorptivity greater than 90% in the range of  $8.0 \mu\text{m}$  to  $13.6 \mu\text{m}$ , covering most of the long-wave infrared atmospheric window bands, which is of great significance to infrared devices. The results indicate that the excitation of Propagating Surface Plasmon (PSP) modes and embedded cavity modes generated by the combination of dielectric-loaded surface plasmon polaritons waveguide and cavity modes contribute to broadband absorption. Moreover, the resonant wavelength of the resonance mode can be tuned by relevant parameters. The results of this paper provide a reference for the design of tunable broadband long-wavelength infrared(LWIR) absorbers. It is suggested that this design method can be extended to the medium wavelength infrared band, the very long-wavelength infrared band and others.

**Key words:** metamaterial absorber; long wavelength infrared; dielectric-loaded waveguide; cavity mode

## 1 引言

随着等离激元光子学和微纳加工工艺的不断发展,人们对基于等离激元超材料结构的电磁吸收器的研究正方兴未艾。传统的电磁吸收器是依靠材料的固有损耗来实现对光的吸收,往往需要较长的光路,这会导致器件体积大和设计灵活性较差。基于等离激元超材料结构的电磁吸收器可以通过设计人工“超原子”来实现与自由空间的阻抗匹配,不仅有着更好的吸收性能,也更容易满足光电器件集成化的需求<sup>[1-5]</sup>。由于具有较强的局域场增强效应和对光近乎完美的吸收性能,各种超材料吸收器的设计方法层出不穷。2008年Landy等人提出了第一种工作在微波频段的完美吸波体<sup>[6]</sup>。随后,这种基于电磁响应的设计方法在太赫兹(Terahertz, THZ)超材料吸收器中得到了广泛的应用<sup>[7]</sup>。对于红外(Infrared, IR)区域,由于金属在高频区域的等离子体共振,典型的超材料吸收器是基于金属-绝缘体-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)谐振结构的周期性阵列,它依赖于入射光与MIM谐振器产生的表面等离子体共振的耦合<sup>[8-40]</sup>。在过去十年中,由于微测辐射热计的爆炸发展,工作在红外波段的超材料吸收器也引起了广泛的关注<sup>[11-43]</sup>。

等离激元超材料吸收器由于其吸收来源于电

磁谐振,因而常常会面临着吸收带宽不足的问题,这极大地限制了超材料吸收器在需要宽带或多波段吸收领域的应用。常见的扩大吸收带宽的策略是在同一水平面上混合多个谐振器<sup>[14-15]</sup>,可以利用相邻谐振器吸收谱的相互叠加,来扩大整个吸收带宽。但是这种方法较难保证吸收器亚波长的尺寸及较大的占空比。另一种方法是在垂直方向上累积多个谐振器<sup>[16-17]</sup>,但是其厚度较大,并不适用于紧凑结构,此外,还会增加探测器件的热容,从而降低性能。此外,一些算法,例如遗传算法,可用于产生宽带超级单元<sup>[18-49]</sup>,但这种方法需要复杂的迭代,加工工艺复杂。最近,一种基于嵌入式绝缘体-金属-绝缘体的超薄吸收体设计方法已经得到证实<sup>[20]</sup>。这种方法利用表面等离激元谐振(Surface Plasmon Resonance, SPR)和局域SPR的混合作用在 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的近红外波段实现了宽带吸收。尽管取得了一些成果,但是在长波红外(LWIR)大气窗口( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波长)范围工作的具有高吸收效率的宽带吸收结构却很少被报道。

基于对拓宽超材料吸收器带宽的研究需求,本文提出了一种工作在长波红外范围内( $8 \sim 14 \mu\text{m}$ )宽带高吸收结构的设计方法。通过介质波导和谐振腔模式相结合产生的混合谐振模式以及传播型表面等离激元模式的激发来实现宽带吸收超表面。此外,该纳米结构与采用软纳米压印

光刻技术的微纳加工工艺或光刻工艺相兼容,使得低成本大规模生产该材料具有很高的可行性。这种吸收结构有望在微测辐射热计、热发射器、太阳能收集和化学传感应用中有许多潜在的应用。

## 2 宽带超材料吸收器的设计与分析

### 2.1 宽带超材料吸收结构

图1给出了超材料吸收器的结构示意图。整

个结构设计成 MIM 三明治夹层结构,包括一层连续的底部钛(Ti)金属反射层,往上接着是一层平面锗(Ge)介质间隔层,第三层是由 Ti 纳米圆盘镶嵌在 Ge 圆盘介质中组成的超表面层。底部金属反射层厚度  $t_1 = 0.25 \mu\text{m}$ ,中介质间隔层厚度  $t_2 = 0.55 \mu\text{m}$ ,顶部金属圆盘厚度和半径分别为  $t_3 = 0.03 \mu\text{m}$ ,  $r_1 = 0.40 \mu\text{m}$ 。顶部介质圆盘半径为  $r_2 = 0.60 \mu\text{m}$ 。

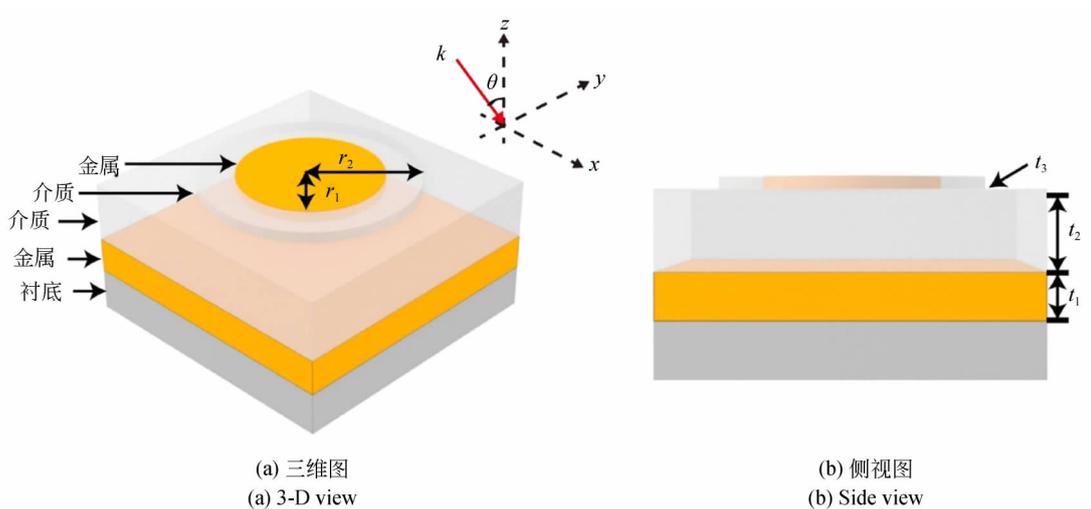


图1 超材料吸收器的结构图

Fig.1 Schematic illustration of the metamaterial absorber

本文选择 Ti 作为金属材料,是由于它在红外区具有高损耗特性。Ge 在长波红外波段具有透明的特性,可被用作无损耗介质材料<sup>[21]</sup>。Ti 和 Ge 的复介电常数通过 Drude-Lorentz 拟合给出<sup>[22]</sup>。底部金属反射的厚度远大于长波红外中电磁波的趋肤深度,从而可抑制通过多层结构传输的任何入射光,导致目标波段的透射几乎为零。为了保证足够的耦合效应,顶部 Ti 金属层厚度应该足够薄。采用时域有限差分法(FDTD)模拟了吸收器的吸收曲线及场分布。在 FDTD 数值模拟中,X、Y 方向采用周期性边界条件,Z 方向采用完全匹配层(PML)。吸收(A)通常用公式  $A = 1 - R - T$  计算,其中 R 和 T 代表反射和透射。由于底部金属层的厚度远大于其趋肤深度,因此透射等于零,这表明  $A = 1 - R$ 。

### 2.2 吸收性能和机理的分析

通过 FDTD 数值仿真计算,给出了镶嵌超表面结构和未镶嵌介质的单一纳米盘结构的吸收曲线,如图2所示。从图中可以看出,在不改变其他结构参数的条件下,在金属盘周围加了圆环介质后,不仅仅增强了谐振强度,也在一定程度上拓宽了吸收带宽。吸收光谱中有两个完美吸收峰,分别位于  $9.01 \mu\text{m}$  和  $12.27 \mu\text{m}$  处。此外结构在  $8 \sim 13.6 \mu\text{m}$  的波长间隔中有超过 90% 的平均吸收率,其中在  $8.7 \sim 9.3 \mu\text{m}$  和  $11.9 \sim 12.5 \mu\text{m}$  波长间隔中平均吸收率超过 99%,覆盖了大部分长波红外大气窗口波段,对红外器件,例如微测辐射热计有着重要意义。这个波段被描述为热成像区域,探测器可以在温度略高于室温的条件下获得物体完整的被动成像。

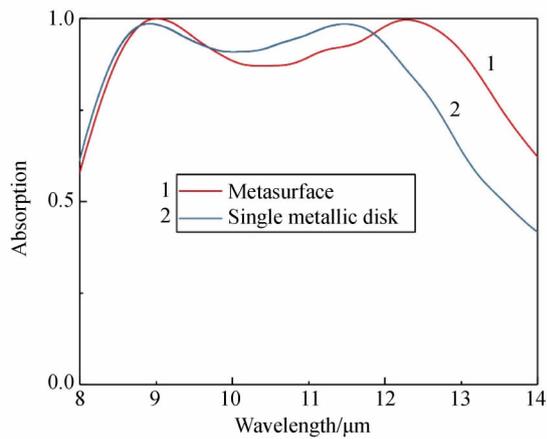
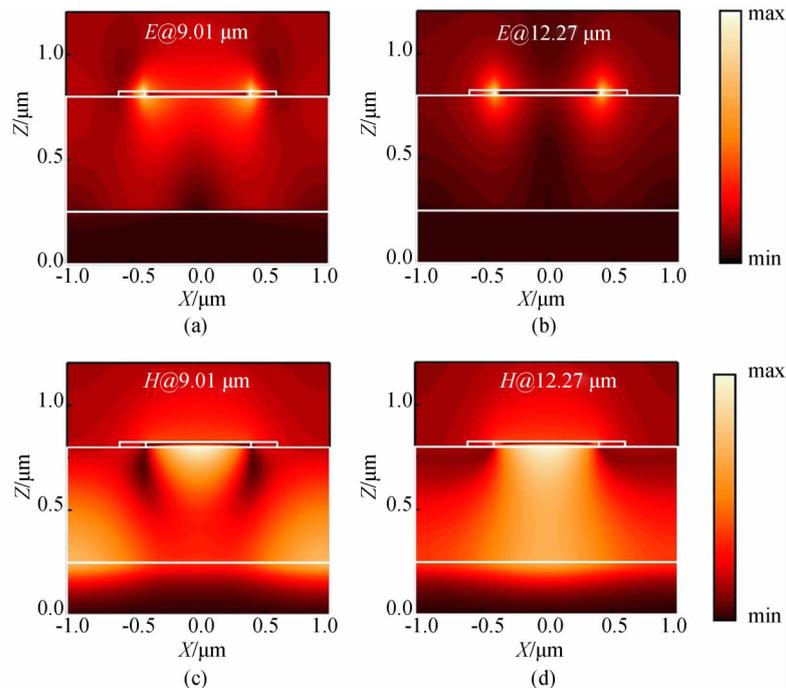


图 2 吸收器的吸收光谱模拟图

Fig. 2 Simulated absorption spectra of the absorber

吸收器的基本工作原理可以用阻抗匹配的理论来解释: 在吸收频率范围, 通过控制超材料吸收器的介电常数  $\varepsilon(\omega)$  和磁导率  $\mu(\omega)$  可以实现其等效阻抗与自由空间的完全匹配。利用反射系数  $R(\omega)$  和透射系数  $T(\omega)$  的实部和虚部, 等效阻抗可表示为:

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{\mu(\omega)}{\varepsilon(\omega)}} = \sqrt{\frac{(1 + R(\omega))^2 - T(\omega)^2}{(1 - R(\omega))^2 - T(\omega)^2}} \quad (1)$$

图 3 (a) ~ (b)  $x-z$  平面谐振波长处的电场分布图; (c) ~ (d)  $x-z$  平面谐振波长处的磁场分布图Fig. 3 (a) ~ (b) Electric field  $|E|$  distributions (colour bar in the  $x-z$  plane) at different resonant wavelengths. (c) ~ (d) Magnetic field  $|H|$  distributions (colour bar in the  $x-z$  plane) at different resonant wavelengths

而金属纳米盘和周围环形介质层组成的超表面的反射系数小于金属纳米盘和自由空间的反射系数, 这就导致了镶嵌超表面结构的纳米盘与单一纳米盘相比, 不仅能更好地实现与自由空间阻抗的匹配, 而且能在更宽的频率范围内匹配。因此镶嵌超表面结构后反射到周围区域的电磁功率更低, 从而具有更高的吸收性能。

为了进一步了解本文中超材料吸收器的谐振性质和吸收机理, 图 3(彩图见期刊电子版) 给出了在各个谐振波长处的电磁场分布, 其中图 3(a) ~ 3(b) 表示  $x-z$  平面谐振波长处的电场分布图, 吸收的能量可以通过电场来计算:

$$P = \frac{1}{2} \iint_A w \varepsilon'' |E|^2 dx dz = \frac{1}{2} 2\pi f \varepsilon'' |E|^2, \quad (2)$$

其中  $\varepsilon''$ ,  $w$  和  $A$  分别代表介电常数虚部、角频率和横截面积, 由公式可知在谐振频率处吸收器吸收的能量和电场强度的平方成正比。由图 3(a) ~ 3(b) 可知, 电场主要分布在金属纳米盘和环形介质的交界处。从  $x-z$  平面的电场分布来看, 这两种谐振都是在纳米圆盘上激发的电偶极子谐振,

从而将光的能量耦合进纳米圆盘角与周围介质交界处。图3(c)~(d)是 $xz$ 平面的磁场分布。总的来说,从图中可以观察到两种不同的谐振模式。整个谐振器可以看成是被磁场墙封锁的谐振腔,能支持谐振腔模式的产生。当入射光穿透上层金属时,下层金属起到镜面的作用,能反射下层金属-介质界面激发的表面等离子激元,上层金属-介质界面和下层金属-介质界面之间的表面等离子激元会发生相消干涉从而激发谐振腔模式,导致对光的强烈吸收。嵌入的介质层和金属纳米圆盘的结合通常被视作介质波导,谐振腔模式可以进一步和介质波导模式相耦合产生介质波导-谐振腔混合模式,使得磁谐振增强。对于 $9.01\ \mu\text{m}$ 的短波长处,磁场增强来源于底部金属-介质分界面处产生的传播型表面等离子激元(Propagating Surface Plasmon, PSP)模式和顶部产生的介质波导-谐振腔混合模式的结合,其中磁场不仅被强烈限制在顶部金属纳米盘下面的间隙区域,在单元结

构之间也存在着强烈的场增强。而对于 $12.27\ \mu\text{m}$ 的长波长处,产生了很强的磁谐振,并且磁场被限制在中间介质间隔层之中,这表明介质波导-谐振腔混合模式对强吸收占据主导地位。

### 2.3 几何参数的影响

超材料吸收器设计的另一个重要难题是吸收光谱对设计参数不可避免的偏差灵敏度低。这些偏差可能发生在微纳加工工艺如薄膜沉积、光刻、刻蚀、剥离等步骤中,薄膜厚度值可能随着沉积和蚀刻速率的变化而变化,并且由于光刻和剥离过程中产生的缺陷,超材料表面的结构尺寸可能和设计值有所偏差。因此,应根据设计参数可能的变化来检查吸收率曲线的变化。图4说明了一些重要几何参数的变化对超材料吸收器吸收性能的影响,其中图4(a)~4(d)分别表示不同金属圆盘半径( $r_1$ )、不同介质盘半径( $r_2$ )、不同介质层厚度( $t_2$ )、不同顶部金属厚度( $t_3$ )情况下的吸收曲线。

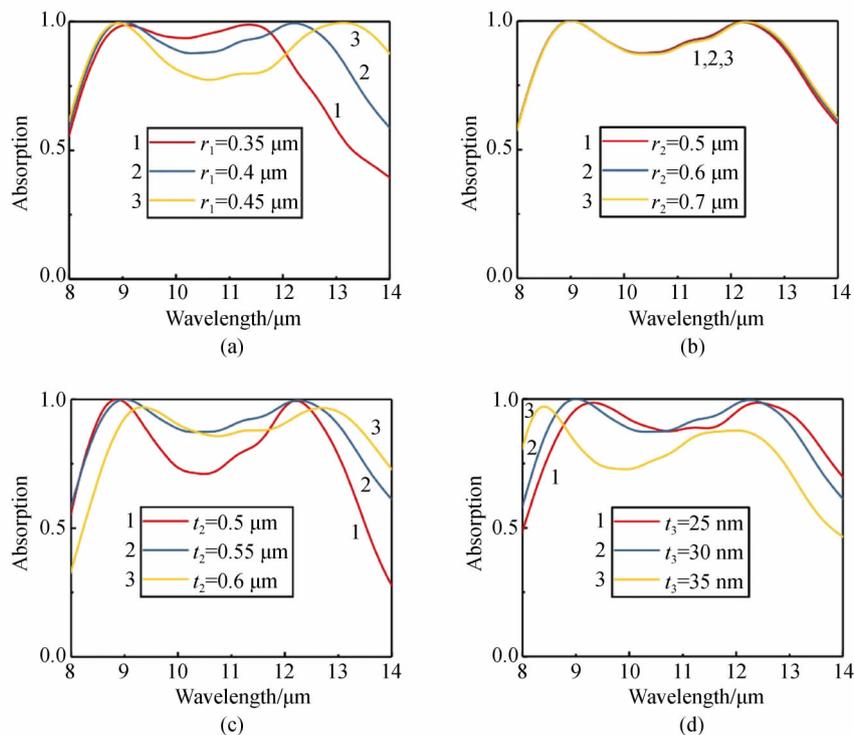


图4 结构参数对吸收性能的影响:(a)金属圆盘半径( $r_1$ ), (b)介质圆盘半径( $r_2$ ), (c)介质间隔层厚度( $t_2$ ), (d)金属圆盘厚度( $t_3$ )

Fig. 4 Effects of the geometric parameters on the absorption performance: (a) the radius of the metallic nanodisk ( $r_1$ ), (b) the radius of the dielectric nanodisk ( $r_2$ ), (c) the thickness of the dielectric ( $t_2$ ), (d) the thickness of the metallic nanodisk ( $t_3$ )

图 4 表明了这两种谐振的谐振波长可以通过调节相关参数来进行调控。从图 4(a) 可以看出, 金属圆盘半径的变化对短波长处的谐振峰影响不大, 而长波长处的谐振峰位置则会随着金属圆盘半径的增加而发生红移。这可以从谐振峰的来源进行解释, 短波长处的谐振峰主要来源于底部金属-介质交界处产生的 PSP 模式, 受到顶部金属半径的影响较小, 故改变顶部金属半径, 短波长处谐振峰的位置几乎不变; 而长波长处的谐振峰主要来源于谐振腔模式, 谐振腔模式是由上下金属表面反射的多重波之间发生相互干涉产生的, 因而金属盘半径对谐振腔模式有着显著影响。随着金属盘半径的增加, MIM 谐振器趋向一个连续的三明治结构, 这会导致其具有较高的吸收带宽和较低的平均吸收率。此外, 在其它参数不变的情况下, 金属纳米盘的半径还决定了吸收带宽长波长极限的位置。

图 4(b) 和 4(d) 表明在顶部金属-介质镶嵌结构组成的超表面中, 介质圆盘半径对超表面吸收性能影响较小而超表面厚度对吸收性能影响较大。由于在整个吸收器结构中除了顶部超表面含有两种成分, 其他部位都具有相同的成分, 等效媒质可以视作空气、底部金属反射层和中间介质间隔层的集合。由于底部金属反射层足够厚可以封锁工作波长范围所有的透射, 阻抗关系可以用透射系数( $T$ ) 和反射系数( $R$ ) 来描述<sup>[23]</sup>:

$$R = \frac{\eta - \eta_e}{\eta + \eta_e}, \quad (3)$$

$$T = \frac{2\eta}{\eta + \eta_e}, \quad (4)$$

$$\eta \simeq (1 + j) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = (1 + j) \frac{1}{\sigma\delta_s}, \quad (5)$$

其中  $\eta$  和  $\eta_e$  分别是金属-介质镶嵌超表面和等效媒质的固有阻抗,  $\omega$ 、 $\mu$  和  $\sigma$  分别是超表面的角频率、磁导率和电导率,  $\delta_s$  是电磁波在金属中的趋肤深度。由公式 (3) ~ (5) 可知, 影响吸收器吸收性能的主要因素是电磁波在金属中的趋肤深度, 而与超表面的横截面积无关, 随着介质圆盘半径的变化, 吸收光谱几乎不变。而超材料吸收器的性能对顶部金属厚度的变化表现出敏感性, 随着金属厚度的增加, 吸收峰出现蓝移以及吸收率发生波动, 这与理论分析是一致的。此外, 较薄的顶部

金属可确保腔的损耗低, 而顶部金属较厚则意味着耦合较弱, 因而取了一个折中的厚度值。

图 4(c) 表明介质间隔层厚度对超材料吸收器的性能影响较大。干涉理论可以很好地解释这一现象, 介质间隔层厚度决定了有效腔长度, 即介质层厚度是控制超材料吸收器最大吸收值和反射系数的关键因素。若在特定频率处实现最大吸收时的介质层厚度为  $d$ , 根据干涉理论有<sup>[24]</sup>:

$$d = \frac{\arctan\left(\frac{a - \frac{n_r}{n_i}b + \exp\left(2\pi m \frac{n_i}{n_r}\right)}{b + \frac{n_r}{n_i}a}\right)}{2n_r k} + \frac{m\pi}{n_r k}, \quad (6)$$

其中  $a$  和  $b$  分别是反射系数的实部和虚部,  $n_r$  和  $n_i$  分别是介质层折射率的实部和虚部,  $m$  是大于等于零的整数, 随着介质层厚度的增加, 会激发出不同阶(不同  $m$  值) 模式促进对光的吸收。

介质材料中  $n_i$  通常远小于  $n_r$ , 从而公式 (6) 可化为:

$$d \approx \frac{\arctan\left(\frac{-b}{a}\right)}{2n_r k} + \frac{m\pi}{n_r k}. \quad (7)$$

对于最低阶( $m=0$ ) 的吸收波段, 介质层厚度直接与反射系数的相位  $\arctan\left(\frac{-b}{a}\right)$  以及波数  $k$  相关。当  $m>0$  时, 随着介质层厚度的增加, 吸收峰出现在  $m$  的不同值处, 根据公式 (7) 可知, 这是由于在整个介质层中会出现  $2\pi$  的相位延迟。在本文超材料吸收器结构中吸收峰值频率是多种因素作用的结果, 这些因素涉及谐振腔的共振频率和由介质层中的相位延迟引起的频移。因此, 随着介质层厚度的增加, 吸收峰呈现出轻微的红移。

## 2.4 斜入射吸收率

在超材料吸收器的实际应用中, 常常要考虑多角度入射对吸收性能的影响。根据结构的对称性, 进一步研究了偏振和角度对吸收光谱的影响。图 5(a) 和 5(b) 分别表示了 TE 极化( $x$  极化) 和 TM 极化( $y$  极化) 波斜入射时的吸收曲线, 入射角从  $0^\circ$  到  $60^\circ$  变化, 以  $20^\circ$  的间隔增加。可以看到, 当入射角达到  $40^\circ$  时, 两种极化情况下的平均吸收率变化很小。当入射角较大时, 吸收结构对

TE 极化波和 TM 极化波具有不同的响应行为。在 TE 极化情况下,入射角越大,吸收率和带宽越小。这是由于入射磁场的水平分量随着  $\theta$  的增加而减小,从而导致耦合强度和吸收强度降低。对于 TM 偏振光,由图 5(b) 可知,虽然吸收率发生轻微下降,但谐振频率基本不变。这是由于入射

光与谐振模式之间的耦合强度取决于入射磁场水平分量与谐振模式磁场之间的相互作用,而入射磁场的水平分量不随  $\theta$  发生变化,因而耦合强度和吸收变化很小。结果表明,在小于  $60^\circ$  斜入射时,该结构对 TM 和 TE 极化都有较高的吸收性能。

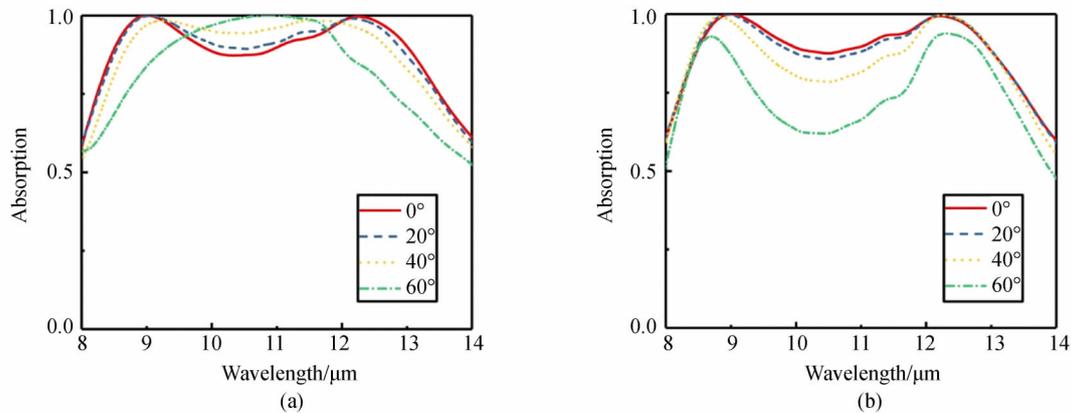


图5 入射角度对吸收性能的影响:(a) TE极化波,(b) TM极化波

Fig.5 Influence of incident angle on absorption: the incident angles for TE-polarized (a) and TM-polarized (b)

### 3 结论

本文提出了一种基于嵌入金属-介质超表面结构的超宽带、偏振无关、大角度入射的超材料吸收器。该结构在  $8 \sim 13.6 \mu\text{m}$  的带宽范围中有超过 90% 的平均吸收率,其中在  $8.7 \sim 9.3 \mu\text{m}$  和  $11.9 \sim 12.5 \mu\text{m}$  波长间隔中平均吸收率超过 99%。超材料吸收器的优异吸收性能主要取决于

镶嵌的由金属-介质组成的介质波导模式和谐振腔模式的结合以及传播型表面等离激元模式的激发。同时,通过改变相关的几何参数,可以灵活地调整谐振波长和工作带宽,实现波长选择性超材料吸收器。在小于  $40^\circ$  斜入射时,该结构在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  的带宽范围仍然保持着超过 85% 的平均吸收率。本文的工作为可调谐宽带长波红外吸收材料的设计提供了参考,该设计方法可推广到中波红外波段、甚长波长红外等其它波段。

### 参考文献:

- [1] 梁秋群. 金属纳米结构表面等离激元杂化和吸收特性的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.  
LIANG Q Q. Study on plasmon hybridization and optical absorption properties of metallic nanostructures [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [2] 曹水艳. 表面等离子体结构聚焦和吸收特性的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
CAO SH Y. Study on the property of focusing and absorption of plasmonic nanostructures [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [3] 陈超瑜, 马妍, 方群. 微流控器官芯片的研究进展 [J]. 分析化学, 2019, 47(11): 1711-1720.  
CHEN CH Y, MA Y, FANG Q. Advances in microfluidic organ-on-a-chip systems [J]. Chinese Journal of Analytical

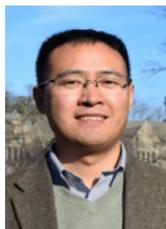
- Chemistry*, 2019, 47(11): 1711-1720.
- [4] 范一强, 王洪亮, 高克鑫, 等. 模块化微流控系统与应用 [J]. 分析化学, 2018, 46(12): 1863-1871.  
FAN Y Q, WANG H L, GAO K X, LIU J J, *et al.*. Applications of modular microfluidics technology [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(12): 1863-1871.
- [5] FANG X, MACDONALD K F, ZHELUDEV N I. Controlling light with light using coherent metadevices: all-optical transistor, summator and inverter [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4, 292.
- [6] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.*. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [7] GRANT J, MA Y, SAHA S, *et al.*. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3476-3478.
- [8] 王月, 安西涛, 任伟, 等. 纳米金膜及金壳表面局域等离激元对上转换荧光波长的选择调控 [J]. 发光学报, 2019, 40(6): 743-750.  
WANG Y, AN X T, REN W, *et al.*. Wavelength Dependent Modulation of Upconversion Luminescence via Localized Surface Plasmon Resonance of Gold Nanofilm and Nanoshell [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(6): 743-750.
- [9] 李雪, 张然, 袁新芳, 等. 基于金纳米棒@二氧化硅表面等离子体共振增强的有机太阳能电池 [J]. 发光学报, 2018, 39(11): 1579-1583.  
LI X, ZHANG R, YUAN X F, *et al.*. Surface Plasmon Resonance-enhanced Organic Solar Cells Based on Au Nanorods @ SiO<sub>2</sub> Core-shell Structures [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1579-1583.
- [10] 安西涛, 王月, 牟佳佳, 等. 超薄金壳包覆 NaYF<sub>4</sub>: Yb, Er@ SiO<sub>2</sub> 纳米结构的可控合成与表面增强上转换荧光 [J]. 发光学报, 2018, 39(11): 1505-1512.  
AN X T, WANG Y, MOU J J, *et al.*. Controllable Synthesis and Surface-enhanced Upconversion Luminescence of Ultra-thin Gold Shell Coated NaYF<sub>4</sub>: Yb, Er@ SiO<sub>2</sub> Nanostructures [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1505-1512.
- [11] MAIER T, BRÜCKL H. Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 3012-3014.
- [12] MAIER T, BRUECKL H. Multispectral microbolometers for the midinfrared [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3766-3768.
- [13] MA W, JIA D L, WEN Y ZH, *et al.*. Diode-based microbolometer with performance enhanced by broadband metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 2974-2977.
- [14] LIU X L, TYLER T, STARR T, *et al.*. Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(4): 045901.
- [15] MA W, WEN Y ZH, YU X M, *et al.*. Broadband metamaterial absorber at mid-infrared using multiplexed cross resonators [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30724-30730.
- [16] ADOMANIS B M, WATTS C M, KOIRALA M, *et al.*. Bi-layer metamaterials as fully functional near-perfect infrared absorbers [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(2): 021107.
- [17] GUO W L, LIU Y X, HAN T CH. Ultra-broadband infrared metasurface absorber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20586-20592.
- [18] DAI SH W, ZHAO D, LI Q, *et al.*. Double-sided polarization-independent plasmonic absorber at near-infrared region [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13125-13133.
- [19] HUBAREVICH A, KUKHTA A, DEMIR H V, *et al.*. Ultra-thin broadband nanostructured insulator-metal-insulator-metal plasmonic light absorber [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9753-9761.

- [20] WU SH L, GU Y, YE Y, *et al.*. Omnidirectional broadband metasurface absorber operating in visible to near-infrared regime [J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21479-21489.
- [21] HAN Q, FU Y Q, JIN L, *et al.*. Germanium nanopillar arrays showing near-100% absorption in the visible regime [J]. *Nano Research*, 2015, 8(7): 2216-2222.
- [22] PALIK E D. *Handbook of Optical Constants of Solids. Volume III* [M]. New York: Academic Press, 1998.
- [23] HAI L D, QUIV D, TUNG N H, *et al.*. Conductive polymer for ultra-broadband, wide-angle, and polarization-insensitive metamaterial perfect absorber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 33253-33262.
- [24] CHEN H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7165-7172.

#### 作者简介:



罗奕(1994—),男,湖北鄂州人,硕士研究生,2016年于东北大学获得学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究生,主要从事微纳器件的设计与制造方面的研究。E-mail: luoyidarling@163.com



梁中翥(1978—),男,四川广安人,博士,研究员,博士生导师,2007于吉林大学获得理学博士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,主要从事红外探测及微光机电系统研究。E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn

## 《发 光 学 报》

### —EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862,84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号:CN 22-4116/04

国际标准刊号:ISSN 1000-7032

国内邮发代号:12-312

国外发行代号:4863BM

http://www.fgxb.org