

中红外-甚长波多模式谐振三波段超材料吸波体 (特邀)

秦 正^{1,2,3}, 梁中翥^{1,2,3}, 史晓燕^{2,3}, 杨福明^{2,3}, 刘文军^{2,3}, 侯恩柱¹, 孟德佳²

(1. 东北师范大学 物理学院, 吉林 长春 130024;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 超材料吸波体可以将入射电磁波集中在亚波长尺度内并进行高效吸收, 因此在光电探测、热发射器、能量收集等领域具有广泛的应用前景。迄今报道的多波段超材料吸波体主要为某一波长范围内多个相近波长的完美吸收, 想要实现大光谱范围内的多波长吸收则需要多个结构的联合工作。基于钛十字形谐振器-氮化硅介质层-钛反射层三层结构, 设计并数值模拟了一种工作波长范围跨越中波红外、长波红外以及甚长波红外的三波段超材料吸波体。利用超材料吸波体激发的传播型表面等离子激元谐振、局域型表面等离子激元谐振以及氮化硅本征吸收模式, 实现了 $4.8\ \mu\text{m}$ 、 $9.1\ \mu\text{m}$ 和 $18\ \mu\text{m}$ 三个波长处 97.3%、94.4% 和 93.6% 的高吸收率。超材料吸波体的工作波长可以通过改变其几何参数进行调节, 且具有偏振和入射角不敏感性。该工作中所用材料均为现有工艺中的常用材料, 在气体检测、红外成像等领域具有应用前景。

关键词: 超材料吸波体; 多波段完美吸收; 表面等离子激元谐振; 阻抗匹配

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220224

Multimode resonance triple-band metamaterial absorber from mid-infrared to very long wavelengths (*invited*)

Qin Zheng^{1,2,3}, Liang Zhongzhu^{1,2,3}, Shi Xiaoyan^{2,3}, Yang Fuming^{2,3}, Liu Wenjun^{2,3}, Hou Enzhu¹, Meng Dejia²

(1. College of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Metamaterial absorbers can confine and completely absorb incident electromagnetic waves to the subwavelength scale and have promising applications in detection, thermal emitters, energy harvesting, cooling, etc. The multiband metamaterial absorbers reported thus far are mainly the perfect absorption of multiple similar wavelengths in a specific wavelength range. Achieving multiwavelength absorption over a wide spectral range requires the combined work of multiple structures. Based on the three-layer structure of the titanium cross resonator-silicon nitride dielectric layer-titanium reflective layer, a triple-band metamaterial absorber with operating wavelengths spanning midwave infrared, longwave infrared, and very longwave infrared was designed and numerically simulated. Using the propagating surface plasmon resonance, the localized surface plasmon

收稿日期: 2022-03-28; 修订日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金 (61735018, 61805242)

作者简介: 秦正, 男, 博士生, 主要从事超材料吸波体以及超表面方面的研究。

导师简介: 梁中翥, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事基于微光机电系统 (MOEMS) 技术的光电探测器件及系统方面的研究。

resonance, and the silicon nitride intrinsic absorption mode excited by the metamaterial absorber, high absorption reached 97.3%, 94.4%, and 93.6% at wavelengths of 4.8 μm , 9.1 μm and 18 μm respectively. Meanwhile, the wavelengths of the three absorption peaks can be flexibly manipulated by changing the geometric parameters of the metamaterial absorber, and the absorber exhibits insensitivity to polarization and incident angle. The materials used in this work are commonly used in existing processes and have application prospects in gas detection and infrared imaging.

Key words: metamaterial absorber; multi-band perfect absorption; surface plasmon resonance; impedance matching

0 引言

超材料是一种亚波长有序排列的人为构造结构,可以在亚波长尺度上调控光的振幅、偏振以及相位^[1],从而实现负折射率、近场增强、完美吸收、诱导透明、完美透镜等自然材料难以实现的功能。其中,超材料吸波体可以在任意目标波段实现完美吸收,相比于传统吸收结构具有更薄的厚度和可调节的工作波长,在太阳能吸收、热发射器、探测器、热开关等方面具有广泛的应用前景^[2]。自 2008 年 Landy 等人提出第一个工作于微波波段的超材料吸波体以来^[3],基于图形化金属-介质-金属三层结构的完美吸收已在从微波到可见光的各个波段得到实现^[3-7]。受限于表面等离子激元响应的物理机制,一般的超材料吸波体往往只有一个吸收峰,因此许多研究致力于采用多谐振器、叠层结构、混合模式等方案实现双波段、三波段以及宽带的完美吸收^[8-10]。其中,多波段超材料吸波体在气体检测、传感器等领域应用广泛。然而现有报道中多波段超材料吸波体的工作波长之间跨度较小,一般限于相同波段的几个相近的波长^[11]。大光谱范围的多波长完美吸收鲜有报道。

文中提出了一种多谐振模式的超材料吸波体,该吸波体具有三个吸收峰,其工作波长横跨中波红外、长波红外和甚长波红外三个显著不同的波段。采用钛十字形谐振器-氮化硅介质层-钛反射层三层结构,利用单一尺寸谐振器支持的传播型表面等离子激元谐振、氮化硅本征吸收、局域型表面等离子激元谐振三个模式实现了三个波段的同时响应。通过基本结构单元的几何参数的研究,揭示了各几何参数对吸波体性能的调控作用。同时,设计的吸波体具有偏振不敏感和入射角不敏感的特性。

1 结构设计

超材料吸波体结构如图 1 所示。该吸波体结构由周期性排列的十字形谐振器和金属反射层以及中间填充的介质层组成。金属采用钛,介质层采用氮化硅,这两种材料都是现有器件中的常用材料。氮化硅是常用的红外吸收层材料,在长波红外具有很强的本征吸收,但单层介质薄膜存在 50% 的吸收上限,且在中波红外为透明介质。采用氮化硅作为超材料吸波体的介质层,不仅可以通过表面等离子激元谐振增强氮化硅的本征吸收,而且可以利用氮化硅红外波段变化的介电常数实现多模式响应。上层十字形谐振器的长度 $L=2\ \mu\text{m}$, 宽度 $W=0.8\ \mu\text{m}$, 周期 $P=2.5\ \mu\text{m}$ 。谐振器阵列可以通过主流的光刻工艺进行大批量的生产加工。上层谐振器和下层反射层的厚度均设置为 200 nm, 氮化硅厚度设置为 500 nm。采用时域有限差分法仿真计算吸波体的性能,入射光设置为沿 Z 轴负方向入射的 TM 线偏振光(电场方向沿 X 轴),X 轴和 Y 轴方向采用周期性边界条件,Z 轴方向采用完全匹配层的边界条件。

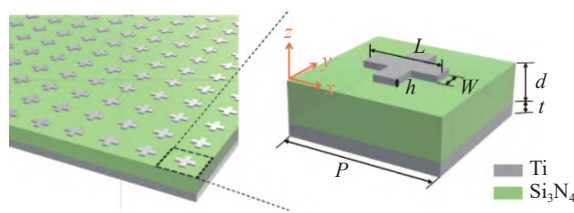


图 1 三波段超材料吸波体结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the three-band metamaterial absorber

2 结果与讨论

2.1 光学性能和物理机制

图 2(a) 红色实线所示为超材料吸波体结构的吸

收谱。可以看到,在仿真波段内超材料吸波体存在三个吸收峰,分别位于中波红外 (3~5 μm)、长波红外 (8~14 μm) 和甚长波红外 ($\lambda > 14 \mu\text{m}$) 三个波段。在 4.8 μm 、9.1 μm 和 18 μm 三个吸收峰处的吸收率分别达到 97.3%、94.4% 和 93.6%。在三个波段吸收率大于 90% 的波长区间分别为 4.55~5.05 μm 、8.79~9.36 μm 和 17.25~18.4 μm 。为了方便后续的讨论,将三个吸收峰依次命名为 m_1 、 m_2 和 m_3 。吸收谱是由 $A=1-R-T$ 计算得到,因为反射层的存在,在全仿真波段有 $T=0$ 。为了说明高效吸收的机制,采用 S 参数计算吸波体结构的等效阻抗,即^[12]:

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

式中: $Z = Z' + iZ''$, 空气的阻抗为 $Z_{\text{air}}=1$ 。等效阻抗的实部和虚部共同决定吸波体的反射率,即 $R = \frac{(Z'-1)^2 + (Z'')^2}{(Z'+1)^2 + (Z'')^2}$, 当吸波体与空气阻抗匹配时反射率为零,可以得到完美吸收。图 2(b) 所示为超材料吸波体的等效阻抗随波长变化曲线。可以看到在三个吸收峰处的等效阻抗分别为: $Z_1=0.855+i0.03$ 、 $Z_2=0.8+i0.04$ 和 $Z_3=0.79+i0.08$, 接近空气的阻抗。在吸收峰之外的波长处吸波体与空气的阻抗失配更大,因此吸收

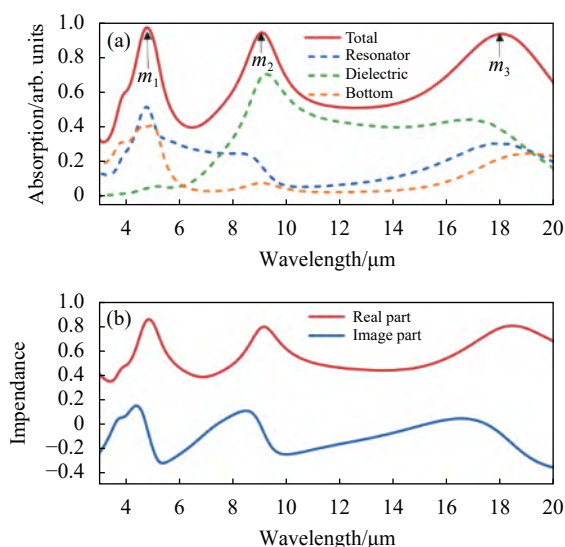


图 2 (a) 超材料吸波体的吸收谱和各层吸收贡献; (b) 超材料吸波体的等效阻抗

Fig.2 (a) Absorption spectrum of the metamaterial absorber and the absorption contribution of each layer; (b) Equivalent impedance of the metamaterial absorber

率降低。

为了说明超材料吸波体的物理机制,分别计算了三个吸收峰处的电磁场分布。不同颜色表示的电磁场的强度为该处电(磁)场强度与入射电(磁)的比值。电场为谐振器与介质层界面处的分布,磁场为 $y=0$ 处 XZ 截面的分布。可以看到, m_1 处电场主要聚集在谐振器短轴的边缘且强度较弱,说明没有明显的电偶极子谐振。而 m_2 和 m_3 处电场主要集中在谐振器长轴的边缘且强度很高,说明在 m_2 和 m_3 处分别激发了电偶极子谐振。如图 3(b) 所示, m_1 处的磁场主要分布在谐振器两侧反射层上方的介质层中,说明这里的吸收由谐振器阵列组成的二维光栅激发的传播型表面等离子激元谐振 (propagating surface plasmon resonance, PSPR) 引起的。对于 PSPR 模式,吸波体的结构参数对其响应波长的影响可以表示为^[13]:

$$k_{\text{PSPR}} = k_0 \sin \theta + i \times \frac{2\pi}{P} \quad (2)$$

而图 3(f) 所示的 m_3 处,磁场主要集中在谐振器下方的介质层中,在谐振器和反射层之间几乎均匀分布,说明这里的吸收是由局域型表面等离子激元谐振 (localized surface plasmon resonance, LSPR) 引起的。即入射电场与谐振器耦合激发的电偶极子谐振,在上下两层金属中形成的反向电流使得入射磁场被局限在介质层中。其响应波长可以用 LC 电路模型来进行解释,即^[4]:

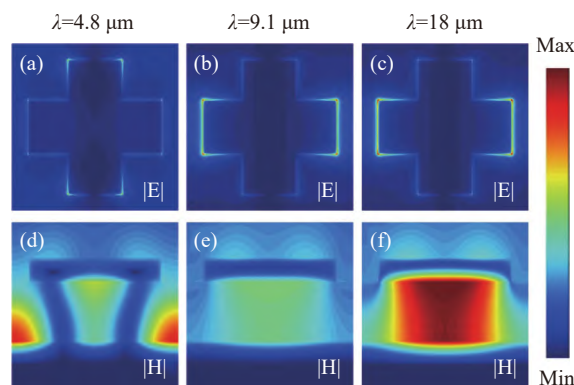


图 3 超材料吸波体吸收峰处的电磁场分布。(a)~(c) m_1 、 m_2 、 m_3 处电场分布; (d)~(f) m_1 、 m_2 、 m_3 处磁场分布

Fig.3 Electromagnetic field distribution at the absorption peak of the metamaterial absorber. (a)~(c) Electromagnetic field distribution at m_1 , m_2 , m_3 ; (d)~(f) Magnetic field distribution at m_1 , m_2 , m_3

$$\lambda_{\text{LSPR}} = 2\pi\sqrt{LC/2} \quad (3)$$

此外, 图 3(d) 所示的 m_2 处磁场分布类似于 m_3 处, 即磁场均匀地分布在谐振器和反射层之间的介质中, 但强度比 m_3 处的弱很多。这是因为氮化硅的强损耗性使得入射光的能量被氮化硅直接吸收而非通过谐振的方式。

计算吸波体每一层的能量吸收贡献, 利用公式^[4]:

$$Q(\omega) = \frac{1}{2}\omega\varepsilon''|E(\omega)|^2 \quad (4)$$

式中: ω 代表角频率; $E(\omega)$ 代表电场强度; ε'' 代表介电常数虚部。如图 2(a) 中虚线所示, 在吸收峰 4.8 μm 处, 上层谐振器和底层金属各贡献了约 50% 和 40% 的吸收。在吸收峰 9.1 μm 处, 介质层氮化硅是主要吸收层, 吸收贡献超过 70%, 与电磁场分布的特点相对应。即超材料吸波体在 9.1 μm 波长处的 LSPR 增强了氮化硅的本征吸收。LSPR 的近场增强使得氮化硅层在 8.2~18 μm 的波长范围内吸收率保持在 40% 以上。在吸收峰 18 μm 波长处, 谐振器、氮化硅层和底层金属都贡献了可观的吸收。因此, 超材料吸波体的三个波段的吸收可以分别归因于 PSPR 模式、LSPR 模式以及 LSPR 增强的氮化硅本征吸收模式。

2.2 几何参数的影响

考察吸波体的几何参数对其性能的影响和调控作用。选取谐振器的长度、宽度和周期这三个参量进行分析。

通过图 4(a) 可以看到, 随着谐振器长度增大, m_1 几乎没有变化, m_2 和 m_3 则出现了不同程度的红移。PSPR 不受谐振器尺寸的影响, 而对于 LSPR, 谐振器长度的增大提高了等效电容, 导致谐振波长的红移。通过图 4(b) 可以看到, 随着谐振器宽度的增大, m_1 的吸收率有所下降, 位置没有变化, 尽管谐振器尺寸不影响 PSPR 模式, 但谐振器占空比的增加会导致耦合效率的降低。 m_2 和 m_3 则出现了不同程度的红移。 m_2 相比 m_3 变化较小的原因是 m_3 处谐振强度较弱且近场增强的氮化硅本征吸收对谐振器尺寸变化的敏感性较弱。通过图 4(c) 可以看到, 吸波体的周期对三个吸收峰都有影响, 其中, m_1 随着周期增大红移, 与公式 (2) 的预测一致; m_2 和 m_3 则随着周期增大蓝移, 这是相邻谐振器之间的等效电容随周期增大而

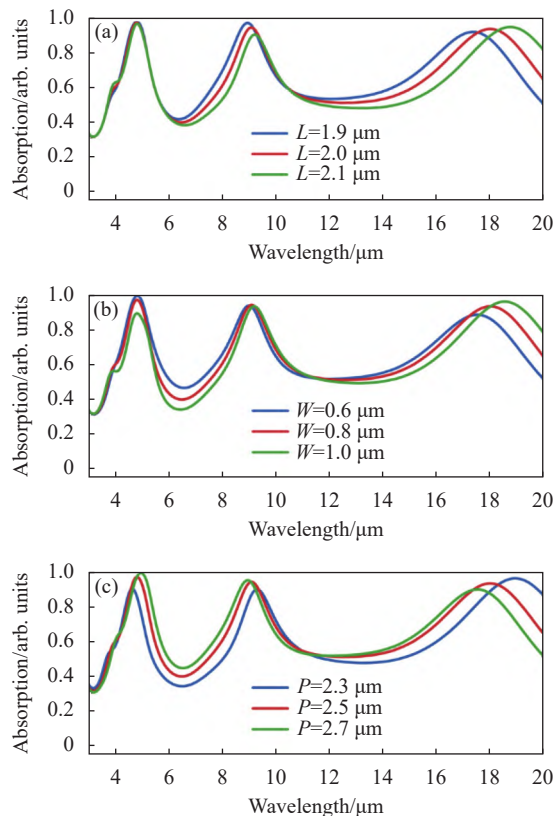


图 4 超材料吸波体的谐振器长度 (a)、宽度 (b)、周期 (c) 对性能的影响

Fig.4 Effects of resonator's length (a), width (b) and period (c) on the optical performance of metamaterial absorbers

减小, 进而导致谐振波长的蓝移。综合上述分析, 可以通过改变吸波体的几何参数来调控三个吸收峰的位置, 以满足实际应用的要求。

为了表征超材料吸波体吸收性能随入射角的变化, 分别在 TM 和 TE 波入射情况下以 10°为步长进行了扫描仿真, 得到的结果如图 5 所示。从图 5(a) 可以看到, TM 波入射时, 入射角小于 30°, 三个吸收峰几乎没有变化; 入射角进一步增大时, 在 m_1 附近出现了新的高阶谐振模式, m_2 和 m_3 也有一定的展宽; 当入射角达到 60°时, 吸波体表现为从中波红外到甚长波红外的宽谱吸收。TE 波入射时, 入射角小于 30°, 三个吸收峰几乎没有变化; 入射角进一步增大时, 三个吸收峰的峰值逐渐下降; 当入射角达到 60°时, 三个吸收峰处的吸收率仍保持在 70% 以上。因此, 提出的超材料吸波体具有较好的偏振和入射角不敏感性。

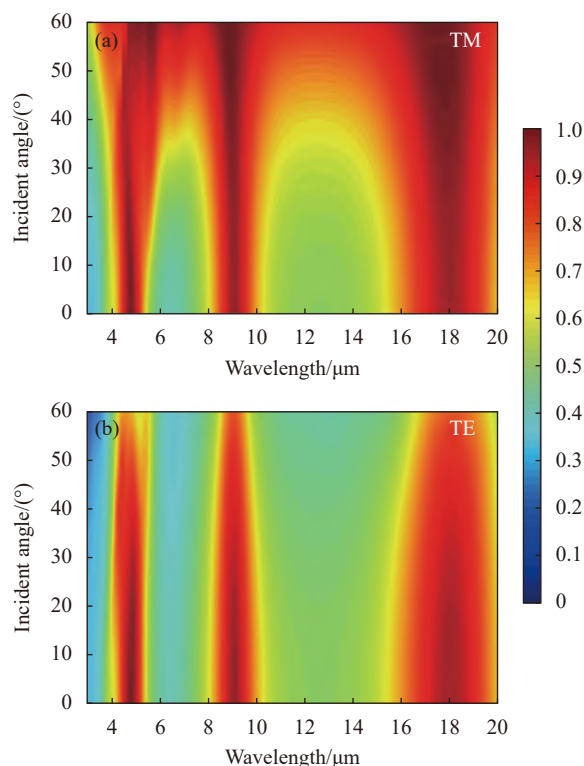


图 5 (a) TM 波入射吸收谱随入射角变化; (b) TE 波入射吸收谱随入射角变化

Fig.5 (a) Dependence of the metamaterial absorber's performance on the incident angle under TM wave incident; (b) Dependence of the metamaterial absorber's performance on the incident angle under TE wave incident

3 结 论

文中提出基于钛十字形谐振器-氮化硅介质层-钛反射层三层结构,理论设计并数值模拟了一种三波段超材料吸波体。通过单一谐振器的传播型表面等离子体谐振、局域型表面等离子体谐振结合氮化硅的本征吸收,实现了跨越中波红外、长波红外以及甚长波红外三个波段的三波长多模式高效吸收。在三个吸收峰在 $4.8\ \mu\text{m}$ 、 $9.1\ \mu\text{m}$ 和 $18\ \mu\text{m}$ 波长处的吸收率分别达到 97.3%、94.4% 和 93.6%。提出的三波段超材料吸波体的工作波长可以通过改变其几何参数进行调节,且具有偏振和入射角不敏感的特性,有望为气体探测、多波段红外成像等应用提供经济和尺寸紧凑的新方案。

参考文献:

- [1] Padilla W J, Averitt R D. Imaging with metamaterials [J]. *Nature Reviews Physics*, 2022, 4(2): 85-100.
- [2] Yu P, Besteiro L V, Huang Y, et al. Broadband metamaterial absorbers [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(3): 1800995.
- [3] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 207402.
- [4] Ye Y Q, Jin Y, He S. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(3): 498-504.
- [5] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor [J]. *Nano Lett*, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [6] Gomes de Souza I L, Rodriguez-Esquerre V F. Omnidirectional broadband absorber for visible light based on a modulated plasmonic multistack grating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105981.
- [7] Liu C, Qi L, Wu M. Triple-broadband infrared metamaterial absorber with polarization-independent and wide-angle absorption [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(8): 2439-2448.
- [8] Wu Y, Wang J, Ren M, et al. Double-wavelength nanolaser based on strong coupling of localized and propagating surface plasmon [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(13): 135108.
- [9] Hou E, Qin Z, Liang Z, et al. Dual-band metamaterial absorber with a low-coherence composite cross structure in mid-wave and long-wave infrared bands [J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36145-36154.
- [10] Yue S, Hou M, Wang R, et al. Ultra-broadband metamaterial absorber from ultraviolet to long-wave infrared based on CMOS-compatible materials [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31844-31861.
- [11] Zhao Y, Huang Q, Cai H, et al. Dual band and tunable perfect absorber based on dual gratings-coupled graphene-dielectric multilayer structures [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5217-5229.
- [12] Tittl A, Harats M G, Walter R, et al. Quantitative angle-resolved small-spot reflectance measurements on plasmonic perfect absorbers: Impedance matching and disorder effects [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(10): 10885-10892.
- [13] Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes [J]. *Nature*, 2007, 445(7123): 39-46.
- [14] Li W, Valentine J. Metamaterial perfect absorber based hot electron photodetection [J]. *Nano Lett*, 2014, 14(6): 3510-3514.