

doi:10.3969/j.issn.1000-2162.2024.02.007

# 基于电介质超材料的中红外超窄带吸波器

廖艳林<sup>1</sup>, 周霄鹏<sup>1</sup>, 卢一博<sup>1</sup>, 赵 艳<sup>2</sup>, 谌正良<sup>1</sup>

(1. 安徽大学 纽约石溪学院, 安徽 合肥 230039; 2. 安徽医科大学 生物医学工程学院, 安徽 合肥 230032)

**摘 要:** 电介质超材料因具有极低欧姆损耗受到广泛关注. 提出一种基于电介质超材料的中红外超窄带吸波器, 该吸波器由顶层电介质微结构、中间层电介质膜和基底金属构成. 研究表明: 该吸波器在中红外波段存在带宽为 2.40 nm 的吸收峰; 电场主要分布于顶层硅微结构之间的间隙, 导致吸收损耗功率显著降低, 进而实现吸收带宽压缩; 作为传感器时, 在中红外波段该吸波器的品质因数可达 80. 可见, 该吸波器可应用于中红外热辐射光源和高性能传感器.

**关键词:** 超材料; 中红外; 吸波器; 传感器; 热辐射源

**中图分类号:** TN213

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-2162(2024)02-0040-06

## Mid-infrared ultra-narrowband absorber based on dielectric metamaterial

LIAO Yanlin<sup>1</sup>, ZHOU Xiaopeng<sup>1</sup>, LU Yibo<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>2</sup>, CHEN Zhenggen<sup>1</sup>

(1. Stone Brook Institute at Anhui University, Anhui University, Hefei 230039, China;

2. School of Biomedical Engineering, Anhui Medical University, Hefei 230032, China)

**Abstract:** Dielectric metamaterials have received extensive attention because of their extremely low ohmic losses. A mid-infrared ultra-narrowband absorber based on dielectric metamaterial had been proposed. The absorber consisted of a top dielectric microstructure layer, an intermediate dielectric film and a substrate metal. The research results indicated that the absorber had an absorption peak with a bandwidth of 2.40 nm in the mid-infrared band. The electric field was mainly distributed in the gaps between the top silicon microstructures, leading to a significant reduction in absorption loss power and thus the absorption bandwidth compression. When used as a sensor, the quality factor of the absorber in the mid-infrared band could reach 80. Therefore, this absorber could be applied to mid-infrared thermal emitters and high-performance sensors.

**Keywords:** metamaterial; mid-infrared; absorber; sensor; thermal emitter

超材料吸波器能近似 100% 吸收电磁波, 在传感器<sup>[1-2]</sup>、热辐射源<sup>[3]</sup>、太阳能<sup>[4-5]</sup>、辐射冷却<sup>[6]</sup>等方面有应用前景, 具有很高的商业价值. 超材料吸波器主要由金属微结构构成, 其较宽的吸收带宽限制了超材料吸波器应用的推广<sup>[7-8]</sup>. 为了解决该问题, 研究人员设计了超窄带吸波器<sup>[9-14]</sup>. 超窄带吸波器应用于传感及热辐射源时, 具有显著优势<sup>[9-11, 13]</sup>. 近年来, 电介质超材料因其极低欧姆损耗受到广泛关注<sup>[15-17]</sup>.

**收稿日期:** 2023-06-23

**基金项目:** 安徽省转化医学研究院科研基金资助项目(2023zhyc-C14); 安徽省高等学校省级质量工程项目(2022jyxm072)

**作者简介:** 廖艳林(1978—), 男, 安徽望江人, 安徽大学副教授, 硕士生导师, 博士, E-mail: liaoyl@ahu.edu.cn.

迄今,有分别面向热辐射源<sup>[18]</sup>、传感器<sup>[19]</sup>应用的电介质超材料吸波器的报道,但未见兼顾热辐射源和传感器应用的超材料吸波器报道. 鉴于此,该文提出一种基于电介质超材料的中红外超窄带吸波器,该吸波器在中红外波段具有超窄带吸收特性,可应用于中红外热辐射光源和高性能传感器.

## 1 电介质超材料吸波器的结构

图1为该文提出的电介质超材料吸波器的结构. 吸波器的顶层为硅,其折射率  $n_{\text{Si}}=3.47$ ,中间层为氟化镁,其折射率为  $n_{\text{MgF}_2}=1.4$ ,底层 Au 的介电常数为

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)}, \quad (1)$$

其中:碰撞角频率  $\omega_c$  为  $1.2 \times 10^{14} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ , 等离子体角频率  $\omega_p$  为  $1.32 \times 10^{16} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\omega$  为入射光的角频率. 吸波器置于空气,其折射率  $n_s=1.00$ . 电介质超材料吸波特性可由严格耦合波分析(rigorous coupled wave analysis,简称 RCWA)<sup>[20]</sup>得到. 由于金属基底厚度远大于入射光的穿透深度,因此在数值计算过程中将透射率视为0.

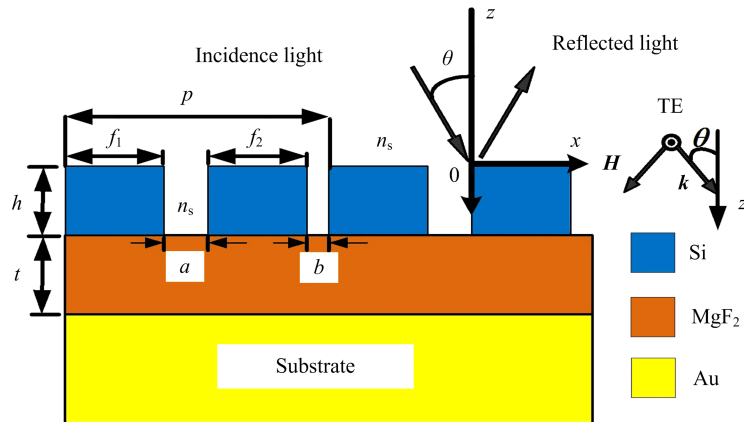


图1 该文提出的电介质超材料吸波器的结构

## 2 结果与讨论

图2为电介质超材料的吸收光谱. 图2涉及的参数为:  $p=1.9000 \mu\text{m}$ ,  $f_1=0.7600 \mu\text{m}$ ,  $f_2=0.7686 \mu\text{m}$ ,  $h=1.20 \mu\text{m}$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $a=0.0570 \mu\text{m}$ ,  $b=0.3144 \mu\text{m}$ ,  $t=1.79 \mu\text{m}$ . 由图2可知,在波长  $4.797 \mu\text{m}$  处有一个 FWHM(full width half maximum)为  $2.40 \text{ nm}$ 、吸收率为  $0.99$  的吸收峰. 根据基尔霍夫定律,在热平衡条件下吸收率与辐射率相等,因此该文提出的窄带吸波器也是一个窄带热辐射源.

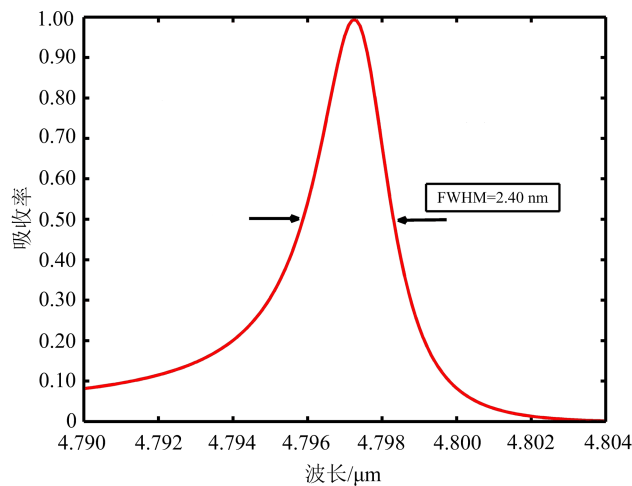


图2 电介质超材料的吸收光谱

图 3 给出了吸收峰波长为  $4.797\text{ }\mu\text{m}$  情况下电场强度大小的分布. 图 3 涉及的参数与图 2 涉及的相同. 从图 3 可看出, 电场分布于顶层硅微结构和中间层氟化镁膜, 但大部分电场分布于顶层硅微结构之间的间隙, 这种电场分布表明该吸波器有极低的散射损耗功率. 氟化镁膜将电场与金属基底隔开, 大幅降低了金属基底的电场强度和吸收损耗功率, 可满足临界耦合条件(吸收损耗功率等于散射损耗功率)<sup>[21]</sup>, 能实现高效的窄带宽电磁波吸收.

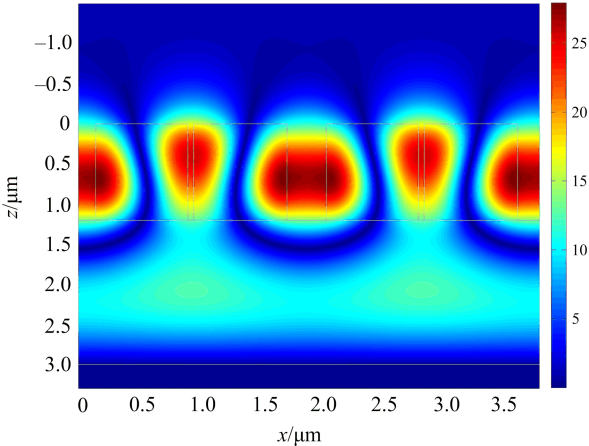


图 3 吸收峰波长为  $4.797\text{ }\mu\text{m}$  情况下电场强度大小的分布

分析不同氟化镁膜层厚度对吸收损耗功率影响. 为满足临界耦合条件, 实现完美吸收, 改变周期内微结构不对称度, 调节散射损耗功率. 定义不对称度  $g = |f_1 - f_2|/f_1$ . 图 4 为氟化镁膜不同厚度下超材料的吸收光谱. 图 4 涉及的参数为:  $p = 1.900\text{ }\mu\text{m}$ ,  $f_1 = 0.760\text{ }\mu\text{m}$ ,  $f_2 = 0.768\text{ }\mu\text{m}$ ,  $h = 1.20\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\theta = 0^\circ$ ,  $a = 0.057\text{ }\mu\text{m}$ ,  $b = 0.314\text{ }\mu\text{m}$ . 由图 4 可见, 氟化镁膜厚度的降低使吸收峰蓝移, 偏离最佳膜厚度会导致吸收率下降, 原因在于膜厚度的降低使电磁场与金属基底相互作用增强, 进而使吸收损耗率增加, 而相应的散射损耗率并没有相应降低, 破坏了临界耦合条件. 表 1 为不同氟化镁膜厚度下相关结构参数.

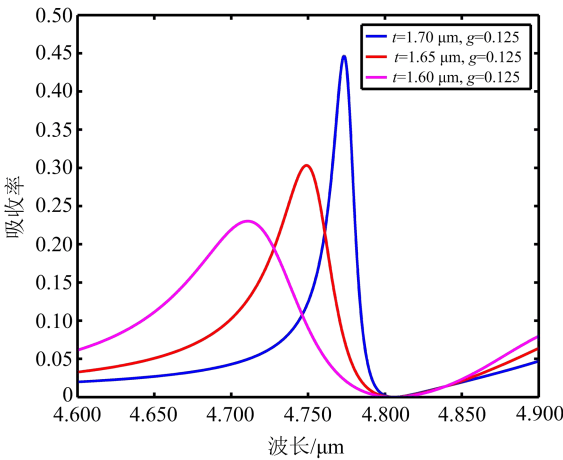


图 4 氟化镁膜层不同厚度下超材料的吸收光谱

表 1 氟化镁膜层不同厚度下相关的结构参数

$t/\mu\text{m}$	$g$	$f_2/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	FWHM/nm
1.70	0.065	0.710 6	0.372 4	3.10
1.65	0.115	0.672 6	0.410 4	3.45
1.60	0.150	0.646 0	0.437 0	3.80

图 5 给出了氟化镁膜不同厚度下不对称度优化后的超材料吸收光谱. 从图 5 可看出, 相对于图 4, 不对称度优化后不同厚度的氟化镁膜均能获得完美吸收.

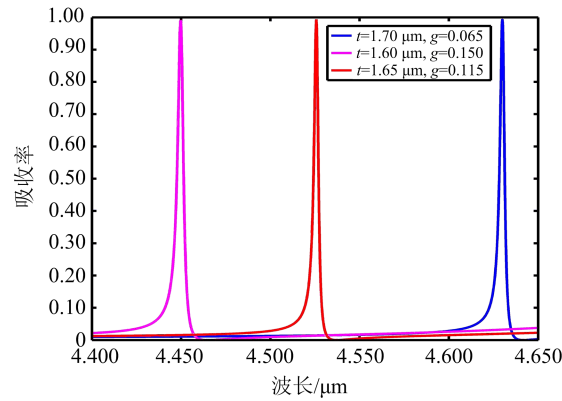


图5 不同氟化镁膜层厚度下不对称度优化后的超材料吸收光谱

分析顶层材料对吸收特性的影响. 图6为锗顶层微结构的超材料吸收光谱. 图6涉及的参数为:  $p=1.6500 \mu\text{m}$ ,  $f_1=0.6600 \mu\text{m}$ ,  $f_2=0.6683 \mu\text{m}$ ,  $h=1.04 \mu\text{m}$ ,  $\theta=0^\circ$ ,  $a=0.0495 \mu\text{m}$ ,  $b=0.2722 \mu\text{m}$ ,  $t=1.87 \mu\text{m}$ , 锗的折射率  $n_{\text{Ge}}=4.0$ . 由图6可知: 在波长  $4.783 \mu\text{m}$  处有一个吸收率为0.994、带宽为1.20 nm的吸收峰; 相对于图2, 锗顶层微结构吸波器具有更窄的吸收带宽.

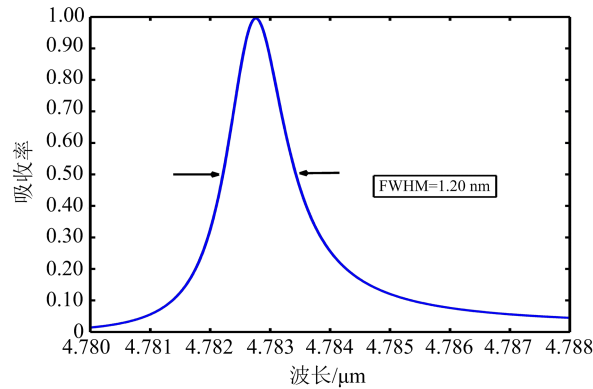
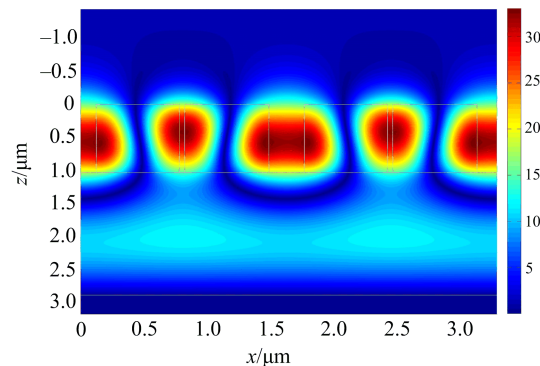


图6 锗顶层微结构的超材料吸收光谱

图7为吸收峰波长为  $4.783 \mu\text{m}$  情况下锗顶层微结构电场强度大小的分布. 对比图3,7可知, 锗顶层微结构的最大局域电场强度比硅顶层微结构的最大局域电场强度大, 这是因为锗顶层微结构有更强的电场局域化, 降低了吸收损耗功率, 进而获得更窄的 FWHM.

图7 吸收峰波长为  $4.783 \mu\text{m}$  情况下锗顶层微结构电场强度大小的分布

从图3的电场分布可看出, 大部分电场分布于硅顶层微结构之间的间隙, 待测物质可进入该间隙, 这为高品质传感提供了可能.

传感器的灵敏度  $S$  和品质因数 (figure of merit, 简称 FOM) 定义式分别为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \quad \text{FOM} = \frac{S}{\text{FWHM}}, \quad (2)$$

其中: $\Delta n$  为环境介质折射率的变化量, $\Delta\lambda$  为对应共振吸收峰的位移。

图 8 为不同  $n_s$  下硅顶层微结构超材料的吸收光谱. 图 8 涉及的参数与图 2 的相同. 从图 8 可看出, 当  $n_s$  增大时, 共振吸收波长红移, 而 FWHM 几乎不随  $n_s$  变化。

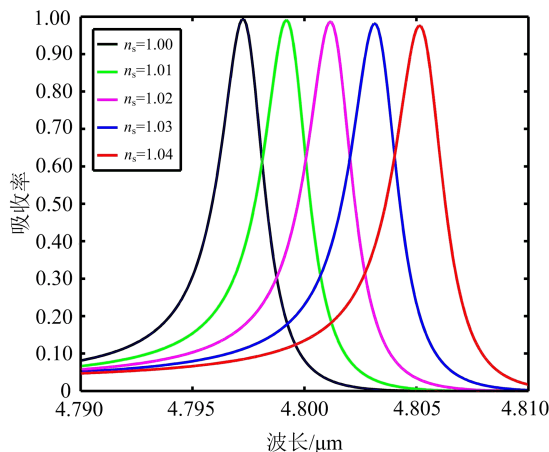


图 8 不同  $n_s$  下硅顶层微结构超材料的吸收光谱

图 9 为吸收峰波长与  $n_s$  关系. 由图 9 可知,  $n_s$  与共振吸收峰间存在线性关系. 根据式(1)和图 8~9 的数据, 计算得该文吸波器作为传感器使用时的  $S$  和 FOM 分别为  $200 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$  和 83.

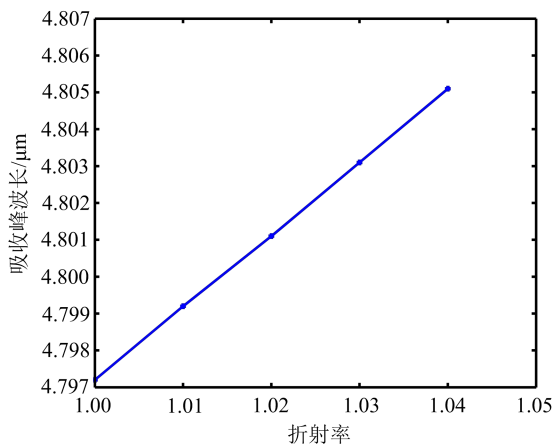


图 9 吸收峰波长与  $n_s$  关系

### 3 结束语

该文提出了一种基于电介质超材料的中红外超窄带吸波器. 研究结果表明:超窄带宽源自电场主要局域在顶层的电介质微结构,该吸波器灵敏度和品质因数数值分别达  $200 \text{ nm} \cdot (\text{RIU})^{-1}$ , 83. 因此,该文所提吸波器可应用于中红外热辐射光源和高性能传感器。

### 参考文献:

- [1] JI Y Q, TANG C J, XIE N Y, et al. High-performance metamaterial sensors based on strong coupling between surface plasmon polaritons and magnetic plasmon resonances[J]. Results in Physics, 2019, 14: 102397.
- [2] CEN C L, CHEN Z Q, XU D Y, et al. High quality factor, high sensitivity metamaterial graphene-perfect absorber based on critical coupling theory and impedance matching[J]. Nanomaterials, 2020, 10 (1): 95-107.
- [3] CAI L, LI Q, YU J B, et al. Simultaneous single-peak and narrowband thermal emission enabled by hybrid metal-polar dielectric structures[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115 (9): 093505.

- [4] SERGEANT N P, PINCON O, AGRAWAL M, et al. Design of wide-angle solar-selective absorbers using aperiodic metal-dielectric stacks[J]. Optics Express, 2009, 17 (25): 22800-22812.
- [5] LI J K, CHEN Z Q, YANG H, et al. Tunable broadband solar energy absorber based on monolayer transition metal dichalcogenides materials using au nanocubes[J]. Nanomaterials, 2020, 10 (2): 257-269.
- [6] DIEM M, KOSCHNY T, SOUKOULIS C M, et al. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime[J]. Physical Review B, 2009, 79 (3): 033101.
- [7] CUI Y X, FUNG K H, XU J, et al. Ultrabroadband light absorption by a sawtooth anisotropic metamaterial slab[J]. Nano Letters, 2012, 12 (3): 1443-1447.
- [8] LONG C, YIN S, WANG W, et al. Broadening the absorption bandwidth of metamaterial absorbers by transverse magnetic harmonics of 210 mode[J]. Scientific Reports, 2016, 6 (1): 21431.
- [9] MENG L J, ZHAO D, RUAN Z C, et al. Optimized grating as an ultra-narrow band absorber or plasmonic sensor[J]. Optics Letters, 2014, 39 (5): 1137-1140.
- [10] MENG L J, ZHAO D, YANG Y Q, et al. Gain-assisted plasmon resonance narrowing and its application in sensing[J]. Physical Review Applied, 2019, 11 (4): 044030.
- [11] GREFFET J J, CARMINATI R, JOULAIN K, et al. Coherent emission of light by thermal sources[J]. Nature, 2002, 416 (6876): 61-64.
- [12] HE X, JIE J L, YANG J B, et al. Suppressing the unwanted resonance mode in a metal-insulator-metal structure using fine-structured gratings[J]. Optics Express, 2019, 27 (11): 15298-15308.
- [13] ZHANG M, FANG J W, ZHANG F, et al. Ultra-narrow band perfect absorbers based on Fano resonance in MIM metamaterials[J]. Optics Communications, 2017, 405: 216-221.
- [14] LI R F, WU D, LIU Y M, et al. Infrared plasmonic refractive index sensor with ultra-high figure of merit based on the optimized all-metal grating[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12 (1): 1-6.
- [15] WU J P, ZHANG F W, LI Q, et al. Strong field enhancement in individual phi-shaped dielectric nanostructures based on anapole mode resonances[J]. Optics Express, 2020, 28 (1): 570-579.
- [16] BHOWMIK B K, BHOWMIK T, PANDEY P K, et al. All-dielectric metasurface based ultranarrow bandpass filter in optical C-band[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2023, 40 (5): 1311-1318.
- [17] UPENDER P, KUMAR A. THz dielectric metamaterial sensor with high Q for biosensing applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23 (6): 5737-5744.
- [18] LAN G L, JIN Z X, NONG J P, et al. Narrowband perfect absorber based on dielectric-metal metasurface for surface-enhanced infrared sensing[J]. Applied Sciences, 2023, 10 (7): 2295.
- [19] ALI M O, TAIT R N, GUPAT S. Conductor-backed dielectric metasurface thermal emitters for mid-infrared spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127 (3): 033105.
- [20] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71 (7): 811-818.
- [21] TIAN J Y, LI Q, BELOV P A, et al. Narrowband perfect absorber based on dielectric-metal metasurface for surface-enhanced infrared sensing[J]. ACS Photonics, 2020, 7: 1436.

(责任编辑 郑小虎)