

嵌入式长波红外超宽带完美吸收器

刘坤, 刘媛媛*, 邓芳, 朱路, 刘唤

华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013

摘要 为了实现长波红外光谱的高吸收, 结合阻抗匹配理论和时域有限差分方法设计了一种长波红外超宽带完美吸收器。首先, 分析了金属-介质-金属结构的超材料吸收器, 该吸收器在 $7\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内的平均吸收率大于 91%。然后, 在金属-介质-金属结构的基础上提出了一种嵌入式结构的超宽带完美吸收器, 该吸收器在 $7\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段具有近乎完美的吸收特性, 平均吸收率可达到 97.55%, 且具有偏振不敏感特性; 在入射角度为 50° 时的平均吸收率仍大于 90% (横磁模式下为 90.5%、横电模式下为 93.7%)。研究结果表明, 表面等离子体和法布里-珀罗谐振腔等多种模式的共同作用是获得宽波段完美吸收的主要因素。设计的吸收器在红外光谱内实现了优异吸收, 在能量收集、红外传感器等领域具有潜在的应用价值。

关键词 光学器件; 超材料吸收器; 红外; 宽波段; 谐振腔模式

中图分类号 O431

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2423002

Long-Wave Infrared Ultra-Broadband Perfect Absorber with Embedded Structure

Liu Kun, Liu Yuanyuan*, Deng Fang, Zhu Lu, Liu Huan

School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract For high absorption of long-wave infrared spectra, a long-wave infrared ultra-broadband perfect absorber is designed in light of the impedance matching theory by the finite-difference time-domain method in this paper. First, a metamaterial absorber with a metal-insulator-metal structure is analyzed, and the absorber has an average absorptivity of greater than 91% in the range of $7\sim 14\ \mu\text{m}$. Then, on the basis of the metal-insulator-metal structure, an ultra-broadband perfect absorber with an embedded structure is designed. It has almost perfect absorption characteristics in the range of $7\sim 14\ \mu\text{m}$ with an average absorptivity of over 97.55% and appears to be insensitive to polarization. Its average absorptivity remains over 90% (90.5% in the transverse magnetic mode and 93.7% in the transverse electric mode) when the incident angle is 50° . The research results show that broadband perfect absorption is mainly caused by the combined action of multiple modes such as surface plasmon and the Fabry-Perot resonator. The proposed absorber, with excellent absorption in the range of infrared spectra, holds a promising application prospect in fields such as energy harvesting and infrared sensors.

Key words optical device; metamaterial absorber; infrared; broadband; resonator mode

OCIS codes 230.0250; 160.3918; 300.1030; 250.5403

1 引言

超材料是一种人工制备的复合材料, 可通过对

结构与周期的设计调控其介电常数和磁导率, 被广泛应用于能量收集^[1-3]、热发射器^[4-5]、超透镜^[6]、传感器^[7-9]等领域。2008年, Landy 等^[10]提出了一种

收稿日期: 2021-06-01; 修回日期: 2021-06-03; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61967007, 61963016)、国防科技重点实验室基金(6142113180101)、教育部人文社会科学研究规划基金(18YJAZH150)、江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ170360)、江西省重点研发计划(20201BBF61012)

通信作者: *lyy.78@163.com

微波超材料吸收器,该吸收器利用开口环结构,在 11.48 GHz 实现了接近 96% 的吸收率。目前,超材料吸收器已经在微波波段^[11-13]、可见光波段^[14-18]、红外波段^[19-21]以及太赫兹波段^[22-24]得到了人们的广泛研究。8~14 μm 波段是红外波段的一个重要大气透明窗口,可用于红外探测技术、红外成像等领域。因此,对工作在大气红外透明窗口的超材料吸收器进行研究具有重要意义。

为了有效捕获红外波段,人们设计了不同结构的超材料吸收器。如 Liu 等^[25]提出了一种基于十字形谐振器结构的超材料吸收器,其在 8.32 μm 波长处的吸收率为 94%。Li 等^[26]采用单层纳米盘结构制作的超材料吸收器在 13.22 μm 波长处的吸收率为 97%。但这两种超材料吸收器只研究了如何提高吸收率,吸收频带较窄,限制了其在大气红外能量捕获等领域的应用。为了拓展超材料吸收器的吸收频带,Wang 等^[27]引入复合光栅并调整介质层厚度,在 8~12 μm 波段内实现了大于 80% 的吸收率。Üstün 等^[28]利用金属-介质-金属(MIM)结构设计了一种红外吸收器,该吸收器在 8~13 μm 波段内的吸收率超过了 87%。Li 等^[29]在夹层平面顶部添加钛立方体,提出了一种单尺寸图案化金属结构,在 8~13 μm 波段内实现了完美吸收。但这些复合 MIM 结构吸收器的工作带宽仍然没有完全覆盖大气红外透明窗口(8~14 μm)。Zhou 等^[30]设计了一种共面耦合顶层图案结构,顶层金属结合了开口矩形环与圆环,在大气红外窗口获得了 94% 的平均吸收率,但该结构的吸收率对入射角度比较敏感,且制造顶层图案使用的光刻技术比较复杂,限制了其大规模应用的可能。Luo 等^[31]将 16 个不同尺寸的多层谐振腔组合到一个单元结构中,实现了 8~14 μm 波段范围内的完美吸收。但该吸收器的结构复杂、制备难度大,且对偏振角和入射角比较敏感。Gao 等^[32]设计了一种基于嵌入式介质-金属-介质-金属的超薄宽带吸收器,该结构利用局域表面等离子体共振和腔模共振的耦合作用,实现了紫外到近红外范围(0.2~1.2 μm)的完美吸收。相比完美吸收器,嵌入式结构通过改变嵌入的材料、形状和尺寸可在灵活调整工作波段的同时获得较高的吸收率,且其结构简单,但工作在大气红外透明窗口的嵌入式结构宽带完美吸收器的研究相对较少。

为了在大气红外透明窗口中获得超宽带完美吸收器,结合阻抗匹配理论,本文在 MIM 结构超材料吸收器的基础上,将 MIM 结构嵌入到介质层中,提

出了一种嵌入式结构的超宽带完美吸收器。实验结果表明,该吸收器可实现长波红外波段(7~14 μm)的宽波段完美吸收。采用时域有限差分(FDTD)法对 MIM 结构和嵌入式结构的吸收机制进行了对比分析,并研究了嵌入式结构的几何参数、偏振角和入射角对吸收光谱的影响。

2 基于 MIM 结构的超材料吸收器原理

2.1 MIM 结构超材料吸收器

MIM 结构的超材料吸收器主要包括底部金属层、中介质层和顶部周期性金属图案层。其中,底部金属层作为反射界面,可以防止入射光的透射;中介质层可以激发上层和下层金属-介质交界面的表面等离子体耦合;顶层图案通过调整结构形状及尺寸的变化,完成对入射光的捕获。MIM 结构的吸收器对入射光的高吸收主要由阻抗匹配完成,即在工作波段范围内,通过改变吸收器的介电常数 $\epsilon(\lambda)$ 和磁导率 $\mu(\lambda)$ 使吸收器的结构阻抗和自由空间阻抗相匹配,其中, λ 为入射波长。吸收器结构的阻抗 Z 和自由空间的阻抗 $Z_0(\lambda)$ ^[33-34]可表示为

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

$$Z_0(\lambda) = \sqrt{\mu(\lambda)/\epsilon(\lambda)}, \quad (2)$$

式中, S_{11} 为反射系数的实部, S_{21} 为透射系数的虚部。反射系数 R 可表示为

$$R = \left| \frac{Z - Z_0(\lambda)}{Z + Z_0(\lambda)} \right|^2. \quad (3)$$

由(3)式可知,当 $Z = Z_0(\lambda) = 1$ 时,吸收器的反射率最小,从而满足阻抗匹配条件。即结构阻抗 $Z = 1$ 时,吸收器可实现优异的吸收性能。结合阻抗匹配理论,设计了 MIM 结构的超材料吸收器,其原理如图 1 所示。该吸收器是由两层 MIM 结构与顶部介质层组成,其中,周期 P_1 为 1.4 μm ,中间层和顶层的宽度 w_1 均为 0.9 μm ,Ti 金属层的厚度自下而上依次为 $t_{11} = 0.25 \mu\text{m}$ 、 $t_{12} = 0.05 \mu\text{m}$ 、 $t_{13} = 0.035 \mu\text{m}$,底部介质层 GaAs 的厚度 $d_{11} = 0.4 \mu\text{m}$,中介质层 GaAs 的厚度 $d_{12} = 0.4 \mu\text{m}$,顶部介质层 GaAs 的厚度 $d_{13} = 0.365 \mu\text{m}$ 。由于金属 Ti 在红外范围内具有高损耗特性,可实现优异吸收;介质 GaAs 具有与贵金属相似的吸收特性和较高的介电常数,可加强结构对入射光的吸收。因此,实验中的金属和介质分别选用 Ti 和 GaAs,其介电常数均采用文献[35]中的实验值。

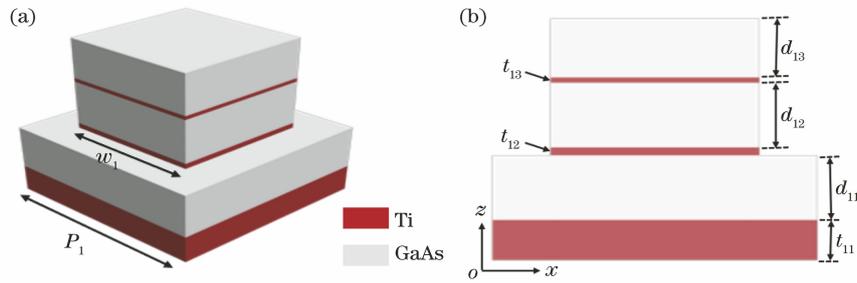


图 1 吸收器的结构。(a)三维视图;(b)侧视图

Fig. 1 Structure of the absorber. (a) Three-dimensional view; (b) side view

采用 FDTD 法研究了超材料吸收器的吸收性能,将 x 方向和 y 方向设置为周期性边界条件,在 z 方向应用完美匹配层(PML)。从能量角度分析吸收特性,将 MIM 结构的吸收率定义为 $A = 1 - R - T$ 。其中, A 为吸收率, R 为反射率, T 为透射率。可以发现, MIM 结构的吸收率由反射率 R 与透射率 T 确定,要实现 MIM 结构的完美吸收,必须尽可能地降低反射率与透射率。由于衬底 Ti 的厚度远大于工作波长的穿透深度,从而阻碍入射光穿过基底,使透射率 T 为 0。此时,吸收器的吸收率 A 只与反射率 R 相关,即 $A = 1 - R$ 。

2.2 MIM 结构超材料吸收器的吸收性能

MIM 结构超材料吸收器的吸收特性如图 2 所

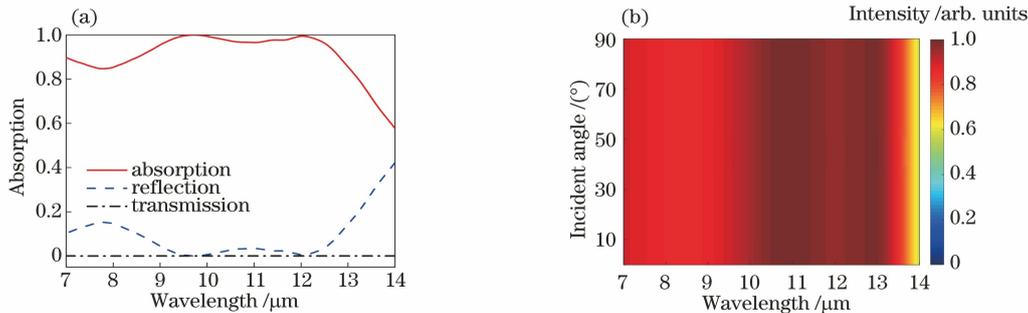


图 2 吸收器的吸收性能。(a)吸收器的吸收率、反射率和透射率;(b)不同偏振角对吸收光谱的影响

Fig. 2 Absorption performance of absorber. (a) Absorption, reflection and transmission of the absorber;

(b) influence of different polarization angles on the absorption spectrum

为了探究超材料吸收器的吸收机理,在入射光为横磁(TM)模式时,仿真得到不同波长处电场 $|E|$ 和磁场 $|H|$ 的能量分布,结果如图 3 所示。图 3(a)和图 3(b)分别为 $\lambda = 9.72 \mu\text{m}$ 和 $12.04 \mu\text{m}$ 时 $x-z$ 平面的电场图,可以明显观察到电场增强区域主要聚集在金属和介质矩形结构的边缘。原因是在入射光的作用下,金属边缘处产生了表面等离子体,进一步激发了局域表面等离子体共振。强电场将能量限制在金属及介质层的边缘处,从而加强了吸收器对光的吸收。

示。图 2(a)为超材料吸收器在 $7 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的吸收曲线,可以发现,该宽波段范围内吸收器的平均吸收率超过了 91%,且在 $9.37 \sim 10.12 \mu\text{m}$ 和 $11.80 \sim 12.20 \mu\text{m}$ 波段内的吸收率大于 99%,涵盖了大部分大气红外透明窗口,对超材料吸收器在红外领域的应用具有重要意义,如红外成像。图 2(b)为 $7 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内不同偏振角入射光下 MIM 结构超材料吸收器的吸收曲线,可以发现,当入射光的偏振角度发生变化时, MIM 结构超材料吸收器的吸收光谱基本保持不变,即 MIM 结构超材料吸收器对入射光具有偏振不敏感性,原因是矩形 MIM 结构具有对称性。

图 3(c)和图 3(d)分别为 $\lambda = 9.72 \mu\text{m}$ 和 $12.04 \mu\text{m}$ 时 $x-z$ 平面下的磁场分布。可以发现,磁场与电场的分布具有明显差异,主要聚集在上下两层金属之间的介质层 GaAs 内,此时的高吸收为腔模式主导。入射光穿过顶部的介质层 GaAs 并从 Ti 衬底反射, Ti 衬底充当反射面的作用,阻止入射光的透射。中间介质层中磁场的增加是由法布里-珀罗(F-P)谐振腔^[36-37]共振引起的。由于 Ti 是高损耗金属,进一步扩展了吸收波段。在 TM 偏振光垂直入射时,其谐振波长 λ 可表示为

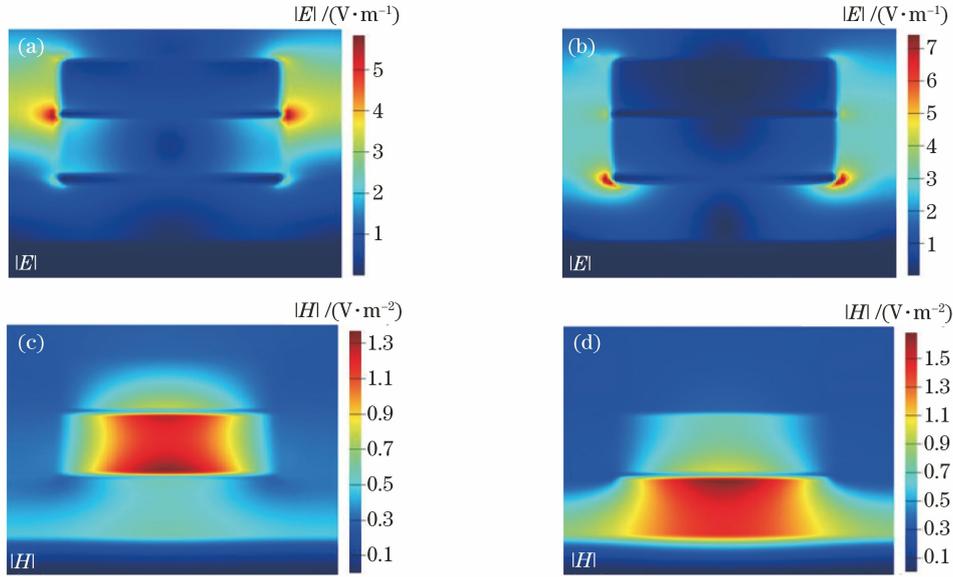


图 3 x - z 平面的电场和磁场分布。(a) $\lambda=9.72 \mu\text{m}$ 时的电场分布;(b) $\lambda=12.04 \mu\text{m}$ 时的电场分布;
(c) $\lambda=9.72 \mu\text{m}$ 时的磁场分布;(d) $\lambda=12.04 \mu\text{m}$ 时的磁场分布

Fig. 3 Electric and magnetic field distribution in the x - z plane. (a) Electric field distribution when $\lambda = 9.72 \mu\text{m}$;
(b) electric field distribution when $\lambda = 12.04 \mu\text{m}$; (c) magnetic field distribution when $\lambda = 9.72 \mu\text{m}$; (d) magnetic
field distribution when $\lambda = 12.04 \mu\text{m}$

$$\omega \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} = m\pi + \varphi, \quad (4)$$

$$\sqrt{\epsilon_d - n_{\text{eff}}^2} k_0 d = n\pi + 2\arctan\left(\frac{\epsilon_d \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{\epsilon_d - n_{\text{eff}}^2}}\right), \quad (5)$$

式中, ω 为 F-P 谐振器的宽度, φ 为谐振器终端处的反射相位, n_{eff} 为吸收器的有效折射率。通过(5)式计算出图 3 (d) 中 F-P 谐振器的共振波长为 $12.02 \mu\text{m}$, 与 FDTD 法计算得到的结果基本相同, 这表明 F-P 谐振腔共振是导致该波长高吸收的主要原因。此外, 磁场在每个共振波长处显示出了相似的场分布, 这表明 F-P 谐振腔模式在整个波段内都起着支配吸收的作用。

虽然 MIM 结构的超材料吸收器在 $7 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内实现了宽带高吸收, 但该吸收器的完美吸收波段仍没有完全覆盖大气红外透明窗口。为了进一步拓宽吸收波段和提高吸收率, 将 MIM 结构嵌入到介质层中, 使吸收器在工作波段内激发多种谐振模式, 进而提高吸收器的吸收性能。

3 嵌入式超宽带完美吸收器的设计与特性分析

嵌入式结构是将 MIM 结构嵌入到中间介质层, 嵌入的金属-介质层可实现工作频带中多种谐振

模式的混合, 在顶部叠加一层金属 Ti 可以进一步拓宽工作波段并增强吸收。此外, 该嵌入式结构可通过调整嵌入金属的尺寸改变吸收峰的宽度和位置。

3.1 嵌入式超宽带完美吸收器的结构与吸收特性

嵌入式超宽带完美吸收器的结构如图 4 所示, 具体结构参数: 单元周期 $P_2 = 2.4 \mu\text{m}$, Ti 金属层的厚度从下到上依次为 $t_{21} = 0.2 \mu\text{m}$, $t_{22} = 0.05 \mu\text{m}$, $t_{23} = 0.05 \mu\text{m}$, $t_{24} = 0.015 \mu\text{m}$, Ti 金属层的宽度分别为 $w_{21} = 1.1 \mu\text{m}$, $w_{22} = 0.65 \mu\text{m}$, $w_{23} = 0.55 \mu\text{m}$ 。平面 GaAs 层的厚度 $d_{21} = 0.45 \mu\text{m}$, GaAs 纳米立方体的宽度 $w_2 = 1.7 \mu\text{m}$, 三个图案化 Ti 金属层之间的距离分别为 $d_{22} = 0.3 \mu\text{m}$, $d_{23} = 0.35 \mu\text{m}$ 。嵌入式结构的制备流程: 首先, 用磁控溅射法在 Si 衬底表面沉积厚度为 $0.2 \mu\text{m}$ 的 Ti; 然后, 利用离子束溅射法在 Ti 表面分别镀厚度为 $0.45 \mu\text{m}$ 的 GaAs 和厚度为 $0.05 \mu\text{m}$ 的 Ti, 并通过光刻技术以及电子束蒸发获得方形 Ti; 最后, 重复上述步骤, 依次沉积厚度为 $0.35 \mu\text{m}$ 的 GaAs, 厚度为 $0.05 \mu\text{m}$ 的 Ti, 厚度为 $0.4 \mu\text{m}$ 的 GaAs 和厚度为 $0.015 \mu\text{m}$ 的 Ti, 并通过光刻和电子束蒸发获得所需的结构。

吸收器的吸收曲线如图 5(a) 所示, 可以发现, 该嵌入式结构在 $7 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的整体吸收率超过 90%, 平均吸收率高于 97%, 可实现长波红外的近乎完美吸收。相对吸收带宽 (BW) $X_{\text{BW}} = 2(\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}) / (\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}})$, 其中, λ_{max} , λ_{min} 分别为

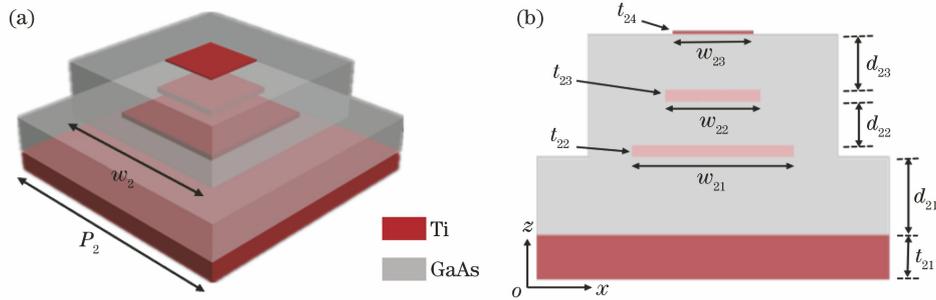


图 4 嵌入式吸收器的结构。(a) 三维视图;(b) 侧视图

Fig. 4 Structure of the embedded absorber. (a) Three-dimensional view; (b) side view

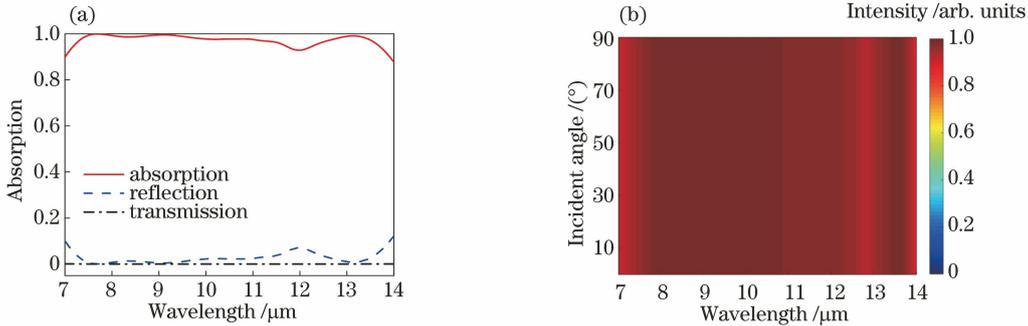


图 5 嵌入式吸收器的吸收性能。(a) 吸收器的吸收率、反射率和透射率;(b) 不同偏振角对吸收光谱的影响

Fig. 5 Absorption performance of embedded absorber. (a) Absorption, reflection and transmission of the absorbers; (b) influence of different polarization angles on the absorption spectrum

最大和最小波长,且在该波段内的吸收率均高于 90%。计算得到设计的超宽带完美吸收器的相对吸收带宽可达到 67%,优于文献[28-31]中吸收器的性能。根据嵌入式结构可知,Ti 金属层中的吸收在整个光谱中占主导地位,原因是 Ti 中的能量损失导致高吸收。由于 Ti 是一种高损耗金属,有助于增强电阻效应,从而以低品质因子产生谐振,有效扩展了工作带宽。图 5(b)为 7~14 μm 波段入射光的偏振状态对嵌入式超宽带完美吸收器吸收性能的影响,可以发现,当入射光的偏振角度发生变化时,超宽带完美吸收器的工作波段和吸收性能几乎没有变化,这表明超宽带完美吸收器对入射光具有偏振不敏感性。

3.2 宽波段高吸收特性

为了研究嵌入式结构宽波段高吸收的机理,仿真计算了入射光为 TM 模式时,在 7.69, 9.10, 10.96, 13.13 μm 波长处电磁场的能量分布,结果如图 6 所示。其中,图 6(a)~图 6(d)为不同波长下 x-z 平面的电场图,可以发现,电场增强区域主要聚集在矩形金属边缘和金属与介质的相交面,而金属与介质的相交面是表面等离子体共振激发的重要条件。这表明嵌入金属与介质相交面电场的增强主要来自于表面等离子体共振,同时激发了局域表面等离子体共振,使能量被限制在金属层表面和嵌入金属与介质的缝

隙处,反射的能量也相应减弱,从而形成较优的吸收性能。图 6(e)~图 6(h)为不同波长下 x-z 平面的磁场分布图。从图 6(e)可以发现,该结构的顶层具有很强的磁场,底层呈现出增强磁场,原因是结构顶层入射光引起了局域表面等离子体共振,同时在结构底层引起传播表面等离子体共振^[38]。而局域表面等离子体共振会导致结构的高吸收,引起的传播表面等离子体共振会进一步增强对入射光的吸收。磁场的加强来自于顶部金属-介质相交面引起的传播表面等离子体共振以及整个结构引起的金属-介质波导模式和谐振腔模式的耦合,其中,磁场不只被束缚在金属层与介质层的相交面,在介质层中也出现了增强磁场。从图 6(f)~图 6(h)中可以发现,磁场主要聚集在两金属层中间的介质内,具有与 MIM 结构超材料吸收器相似的磁场分布。当入射光穿过顶部金属,基层金属起到反射的作用,可以反射顶部金属-介质相交面引起的表面等离子体,顶部金属-介质相交面和底部金属-介质相交面的表面等离子体可以相互作用,从而激发腔模式,增强光吸收。对比不同波长的磁场图可以发现,不同波长作用下嵌入式结构产生的磁场分布相似,这表明谐振腔模式始终存在,且具有支配吸收的地位。不同波长的谐振腔共振也可以形成杂化耦合,从而拓宽吸收带宽,提高吸收率。

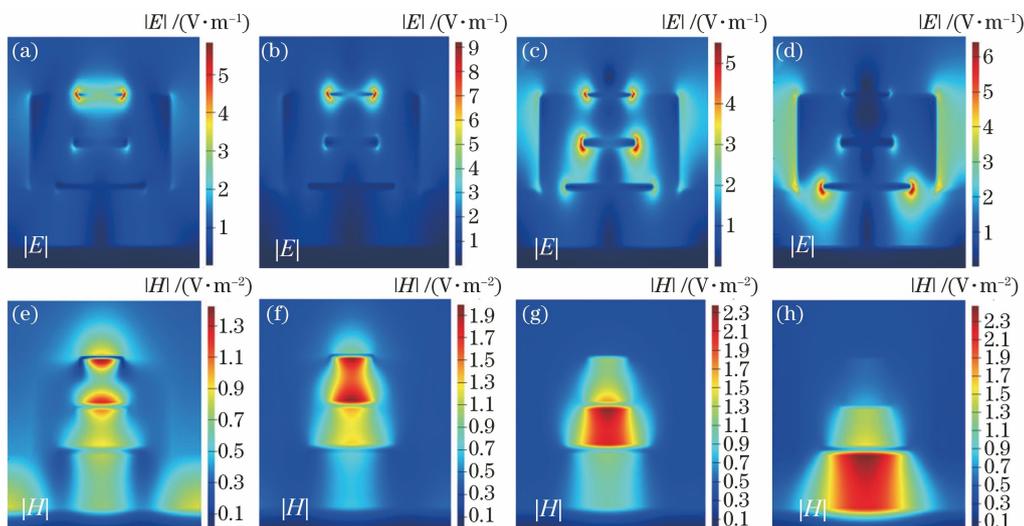


图 6 $x-z$ 平面的电场和磁场分布。(a)~(d) λ 为 $7.69 \mu\text{m}$ 、 $9.10 \mu\text{m}$ 、 $10.96 \mu\text{m}$ 、 $13.13 \mu\text{m}$ 时的电场分布；(e)~(h) λ 为 $7.69 \mu\text{m}$ 、 $9.10 \mu\text{m}$ 、 $10.96 \mu\text{m}$ 、 $13.13 \mu\text{m}$ 时的磁场分布

Fig. 6 Distribution of electric and magnetic fields in the $x-z$ plane. (a)–(d) Electric field distribution when λ is $7.69 \mu\text{m}$, $9.10 \mu\text{m}$, $10.96 \mu\text{m}$, $13.13 \mu\text{m}$; (e)–(h) magnetic field distribution when λ is $7.69 \mu\text{m}$, $9.10 \mu\text{m}$, $10.96 \mu\text{m}$, $13.13 \mu\text{m}$

3.3 物理参数对吸收特性的影响

仿真得到嵌入式结构中中介层厚度 d_{21} 、 d_{23} 和金属层宽度 w_{21} 、 w_{22} 、 w_{23} 以及周期 P_2 对吸收性能

的影响,结果如图 7 所示。从图 7(a)可以发现,随着 d_{21} 的增加,吸收带宽出现红移,即吸收器的最大吸收值是由中介质层的厚度确定。介质层 GaAs

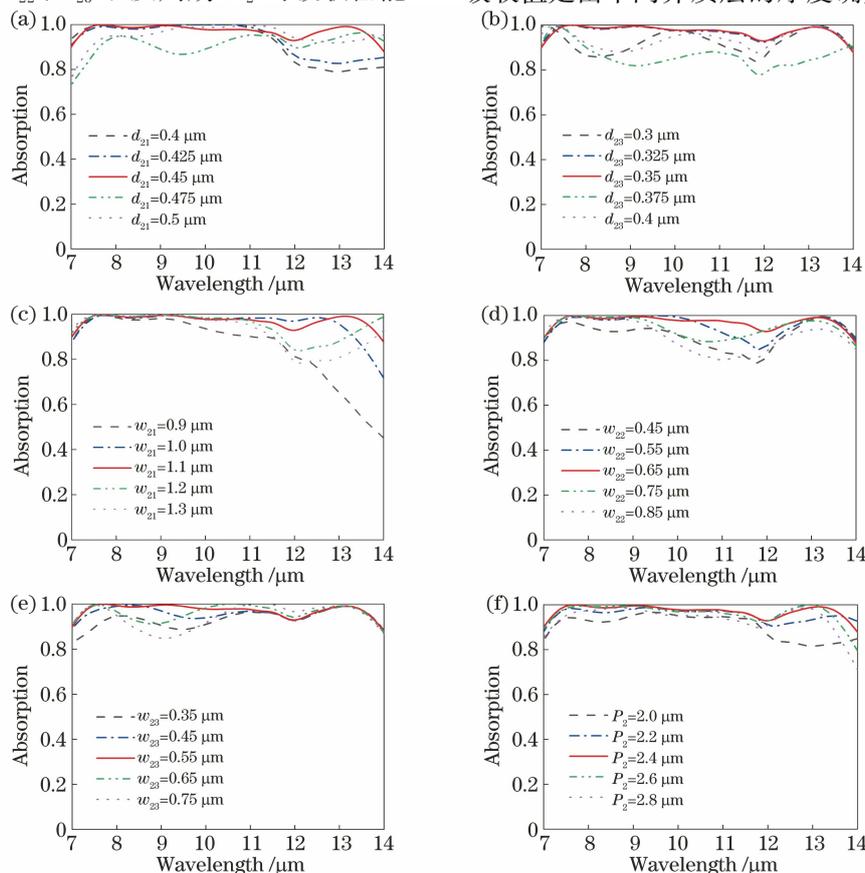


图 7 不同物理参数下的吸收曲线。(a) d_{21} ; (b) d_{23} ; (c) w_{21} ; (d) w_{22} ; (e) w_{23} ; (f) P_2

Fig. 7 Absorption curves under different physical parameters. (a) d_{21} ; (b) d_{23} ; (c) w_{21} ; (d) w_{22} ; (e) w_{23} ; (f) P_2

的厚度 d_{21} 决定了长波长处腔模式的强度。图 7(b) 的介质层厚度 d_{23} 如果较薄或较厚, 都会影响腔模式共振, 当 d_{23} 等于 $0.35 \mu\text{m}$ 时, 吸收器可以获得最优的吸收效果。图 7(c)~图 7(e) 分别为宽度 w_{21} 、 w_{22} 、 w_{23} 对吸收器吸收特性的影响。从图 7(c) 可以发现, 改变金属层宽度 w_{21} 对长波长处的共振波长影响较大, 原因是局域表面等离子体共振可以决定长波长处的吸收。从图 7(d) 可以发现, 金属层宽度 w_{22} 的变化对吸收峰的位置影响不大, 但对吸收器在 $8.70 \sim 12.70 \mu\text{m}$ 波段内的吸收性能影响较大, 原因是局域表面等离子体共振和腔模式的耦合作用会减弱。从图 7(e) 可以发现, 顶部金属层宽度 w_{23} 的变化会引起短波长处吸收峰的变化, 原因是短波长处的吸收主要以局域表面等离子体共振和腔模式为主。保持其他物理参数不变, 调整周期 P_2 , 计算不同周期 P_2 下吸收器的吸收特性, 结果如图 7(f) 所示。可以发现, 当 P_2 小于 $2.4 \mu\text{m}$ 时, 随着 P_2 的增加, 吸收器的平均吸收率也会增加; 当 P_2 超过 $2.4 \mu\text{m}$ 后, 吸收器的平均吸收率随着 P_2 的增加呈下降趋势。原因是随着 P_2 的增加, 吸收器单元之间矩形立方体的距离也会增加, 单元之间的谐振腔逐渐接近理想谐振腔。当周期超过临界值时, 随着 P_2 的增加, 单元之间的腔共振很难被激发, 同时吸收器单元之间引起的局域表面等离子体共振也会减弱, 对入射光的吸收降低。

在保证物理参数固定的环境下, 还需分析吸收器材料与吸收性能的关系。采用金属 Fe 或 W

代替 Ti 层, 得到嵌入式结构的吸收性能如图 8(a) 所示。可以发现, 当金属层材料为 Ti 时, 吸收器显示出优越的吸收性能, 即在工作波段内的平均吸收率高达 97.55% 。当使用金属 Fe 或 W 时, 吸收器具有相对较窄的共振波段和相对较低的吸收率。当顶部和中间共振结构的金属发生变化时, 其吸收性能会大幅度降低, 原因是高介电常数金属会激发更尖锐的局域表面等离子体共振。仅使用 1 个或 2 个谐振器时, 用低介电常数金属(如 Ti) 作为吸收器的谐振器单元在目标频带中具有优异的宽带吸收, 金属层可起到将入射光封锁进介质层的作用。当满足与金属的介电常数和厚度相关的严格耦合条件时, 会激发腔模式, 进而实现对入射光的完全吸收。这表明金属层同时决定谐振腔的 Q 因子和入射光与谐振腔之间的耦合强度。由于 Ti 是一种高损耗金属, 可通过激发低 Q 谐振腔有效扩展工作带宽和提高吸收率。用 Si、Ge 取代吸收器中介质层 GaAs 后的吸收曲线如图 8(b) 所示。可以发现, 当介质层的材料为 Ge 时, 吸收器在短波长处的吸收效果较差, 平均吸收率只有 85% , 吸收带宽略有红移。当介质层的材料为 Si 时, 吸收器的平均吸收率达到了 96% , 在大气红外透明窗口具备良好的吸收性能。当非金属材料采用与贵金属特性类似的 GaAs 时, 吸收器在工作波段内具有更优的吸收表现, 即在 $7 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内具有超过 97% 的平均吸收率, 从而实现对入射光的完美吸收。

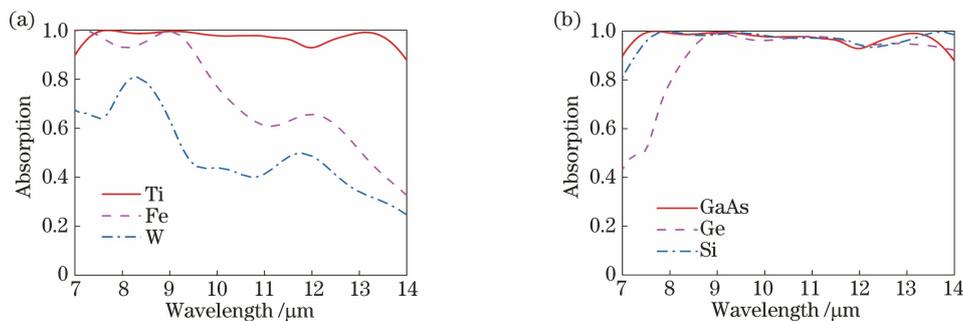


图 8 吸收器的吸收曲线。(a) 不同金属材料; (b) 不同介质材料

Fig. 8 Absorption curve of the absorber. (a) Different metal materials; (b) different dielectric materials

3.4 入射角度对吸收特性的影响

在实际应用中, 研究不同入射角对吸收器吸收特性的影响具有重要意义。因此, 仿真分析了入射角度在 TM 模式和横电 (TE) 模式下对吸收光谱的影响, 结果如图 9 所示。可以发现, 当入射角 θ 从 0° 变化到 30° 时, 嵌入式结构的吸收率几乎没有变化;

当入射角 θ 为 50° 时, 嵌入式结构在 TM 模式和 TE 模式下的平均吸收率分别为 90.5% 和 93.7% ; 当入射角相对较大时, 嵌入式结构在 TM 模式和 TE 模式中的吸收性能具有明显区别。在 TM 模式下, 入射角越大, 吸收率和工作波段就越小。原因是入射磁场的 x 分量随着 θ 的增大而下降, 从而引起吸收

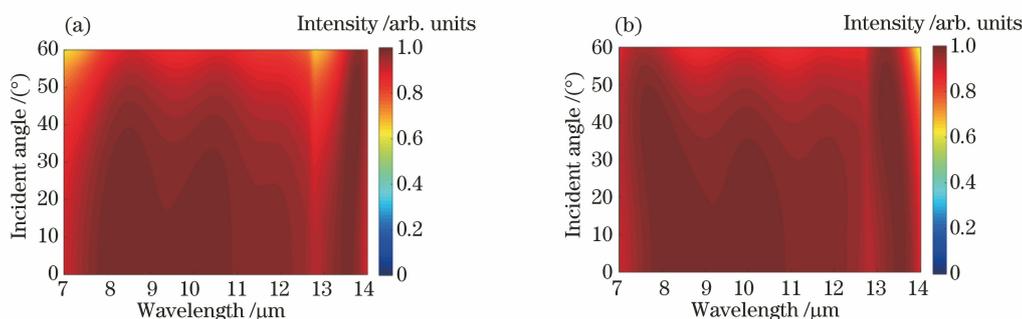


图 9 不同入射角对应的吸收光谱。(a) TM 模式;(b) TE 模式

Fig. 9 Absorption spectra corresponding to different incident angles. (a) TM mode; (b) TE mode

强度的降低。在 TE 模式下,吸收率有略微减小但谐振点几乎不变,原因是入射磁场的 x 分量与腔模式磁场的协同作用决定了入射光与腔模式的耦合强度,而入射磁场的 x 分量不随 θ 的变化而变化。这表明设计的嵌入式结构具备大角度吸收的特性,可以满足多种实际应用的要求。

在相对吸收带宽和平均吸收率方面,对比了所

表 1 不同吸收器的平均吸收率与相对吸收带宽

Table 1 Average absorption rate and relative absorption bandwidth of different absorbers

Ref.	Waveband / μm	Bandwidth /%	Total absorption /%	Dielectric material
[19]	9–13	36	95	Ge
[26]	8–12	40	80	InAs
[27]	8–13	48	87	Si
[28]	8–13	48	95	SiO ₂
[29]	8–14	55	94	Ge, Si ₃ N ₄
[30]	8–14	55	96	Ge
Ours	7–14	67	97.55	GaAs

4 结 论

结合 MIM 结构和嵌入式结构的特性,提出了一种嵌入式 MIM 结构的超宽带完美吸收器,该吸收器具有结构简单和轻薄的优点。基于 FDTD 法的分析结果表明,该嵌入式结构在 7~14 μm 波段内的吸收率均大于 90%,相对吸收带宽可达到 67%,平均吸收率高达 97.55%;且该吸收器对偏振角不敏感,具有大角度吸收的优异特性。此外,该吸收器的宽波段高吸收特性主要来源于 F-P 谐振腔共振、局域表面等离子体共振以及传播表面等离子体共振与腔膜共振的杂化耦合作用。这表明所提出的嵌入式超材料吸收器在长波红外宽波段范围内能实现优异的吸收,对吸收器在热发射器、红外传感器等领域的应用具有一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] Guo C F, Sun T Y, Cao F, et al. Metallic

提出的超宽带完美吸收器与其他宽带吸收器的性能,结果如表 1 所示。可以发现,该嵌入式结构在 7~14 μm 波段内的平均吸收率可达到 97.55%,相对吸收带宽达到 67%,与其他吸收器相比,完美吸收带宽得到了明显拓宽。此外,该吸收器的结构简单且厚度较小,与光刻工艺相兼容,使其大规模生产成为可能。

nanostructures for light trapping in energy-harvesting devices[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3 (4): e161.

- [2] Han S, Shin J H, Jung P H, et al. Broadband solar thermal absorber based on optical metamaterials for high-temperature applications[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(8): 1265-1273.
- [3] Alkurt F O, Altintas O, Ozakturk M, et al. Enhancement of image quality by using metamaterial inspired energy harvester [J]. Physics Letters A, 2020, 384(1): 126041.
- [4] Gong Y K, Wang Z B, Li K, et al. Highly efficient and broadband mid-infrared metamaterial thermal emitter for optical gas sensing[J]. Optics Letters, 2017, 42(21): 4537-4540.
- [5] Li Z G, Stan L, Czaplewski D A, et al. Wavelength-selective mid-infrared metamaterial absorbers with multiple tungsten cross resonators [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5616-5631.
- [6] Haxha S, AbdelMalek F, Ouerghi F, et al.

- Metamaterial superlenses operating at visible wavelength for imaging applications [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16119.
- [7] Abdulkarim Y I, Deng L W, Karaaslan M, et al. Determination of the liquid chemicals depending on the electrical characteristics by using metamaterial absorber based sensor[J]. *Chemical Physics Letters*, 2019, 732: 136655.
- [8] Bakır M, Dalgac Ş, Karaaslan M, et al. A comprehensive study on fuel adulteration sensing by using triple ring resonator type metamaterial [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166 (12): B1044-B1052.
- [9] Wu C, Khanikaev A B, Adato R, et al. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(1): 69-75.
- [10] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [11] Mehrabi M, Rajabalipanah H, Abdolali A, et al. Polarization-insensitive, ultra-broadband, and compact metamaterial-inspired optical absorber via wide-angle and highly efficient performances [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3693-3703.
- [12] Kim Y J, Hwang J S, Yoo Y J, et al. Ultrathin microwave metamaterial absorber utilizing embedded resistors[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(40): 405110.
- [13] Kim Y J, Yoo Y J, Hwang J S, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber based on resistive sheets[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(1): 015103.
- [14] Wang Y, Xuan X F, Zhu L, et al. Multilayer rectangular broadband metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(15): 1523001.
王杨, 轩雪飞, 朱路, 等. 多层矩形宽波段超材料吸收器[J]. *光学学报*, 2020, 40(15): 1523001.
- [15] Zhu L, Jin Y, Li K K, et al. Numerical study of the MSCB nanoantenna as ultra-broadband absorber[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(2): 319-325.
- [16] Zhu L, Jin Y, Liu H, et al. Ultra-broadband absorber based on metal-insulator-metal four-headed arrow nanostructure[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(6): 2153-2159.
- [17] Zhu L, Wang Y, Xiong G, et al. Design and absorption characteristics of broadband nano-metamaterial solar absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0923001.
朱路, 王杨, 熊广, 等. 宽波段纳米超材料太阳能吸收器的设计及其吸收特性[J]. *光学学报*, 2017, 37 (9): 0923001.
- [18] Li Y Y, Chen Q Q, Wu B, et al. Broadband perfect metamaterial absorber based on the gallium arsenide grating complex structure [J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102760.
- [19] Luo Y, Liang Z Z, Meng D J, et al. Ultra-broadband and high absorbance metamaterial absorber in long wavelength infrared based on hybridization of embedded cavity modes[J]. *Optics Communications*, 2019, 448: 1-9.
- [20] Liu Y Y, Liu H, Jin Y, et al. Ultra-broadband perfect absorber utilizing a multi-size rectangular structure in the UV-MIR range [J]. *Results in Physics*, 2020, 18: 103336.
- [21] Liu Y Y, Liu H, Liu K, et al. Ultra-broadband perfect absorber with rectangular multilayer structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2323001.
刘媛媛, 刘唤, 刘坤, 等. 一种矩形层叠结构的超宽带完美吸收器 [J]. *光学学报*, 2020, 40 (23): 2323001.
- [22] Duan G W, Schalch J, Zhao X G, et al. Analysis of the thickness dependence of metamaterial absorbers at terahertz frequencies [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (3): 2242-2251.
- [23] Huang S, Xie Z W, Chen W D, et al. Metasurface with multi-sized structure for multi-band coherent perfect absorption[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7066-7078.
- [24] Yang C H, Jiang M Z, Liu Y C, et al. Tunable bandwidth terahertz polarization converter based on vanadium dioxide hybrid metasurface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1714001.
杨朝晖, 江明珠, 刘永琛, 等. 基于二氧化钒复合超表面的太赫兹带宽可调极化转换器 [J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1714001.
- [25] Liu X L, Starr T, Starr A F, et al. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104 (20): 207403.
- [26] Li J Y, Gan R L, Guo Q S, et al. Tailoring optical responses of infrared plasmonic metamaterial absorbers by optical phonons [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16769-16781.
- [27] Wang S H, Wang Y F, Zhang S, et al. Mid-infrared broadband absorber of full semiconductor epi-layers [J]. *Physics Letters A*, 2017, 381(16): 1439-1444.
- [28] Üstün K, Turhan-Sayan G. Ultra-broadband long-wavelength infrared metamaterial absorber based on a double-layer metasurface structure[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34 (2): 456-

- 462.
- [29] Li L, Chen H J, Xie Z W, et al. Ultra-broadband metamaterial absorber for infrared transparency window of the atmosphere[J]. *Physics Letters A*, 2019, 383(36): 126025.
- [30] Zhou Y, Liang Z Z, Qin Z, et al. Small-sized long wavelength infrared absorber with perfect ultra-broadband absorptivity[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1279-1290.
- [31] Luo Y, Meng D J, Liang Z Z, et al. Ultra-broadband metamaterial absorber in long wavelength infrared band based on resonant cavity modes [J]. *Optics Communications*, 2020, 459: 124948.
- [32] Gao H X, Peng W, Cui W L, et al. Ultraviolet to near infrared titanium nitride broadband plasmonic absorber[J]. *Optical Materials*, 2019, 97: 109377.
- [33] Smith D R, Dalichaouch R, Kroll N, et al. Photonic band structure and defects in one and two dimensions [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(2): 314-321.
- [34] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. *Physical Review E*, 2005, 71(3): 036617.
- [35] Palik E D. *Handbook of optical constants of solids II* [M]. Boston: Academic Press, 1985.
- [36] Bozhevolnyi S I, Søndergaard T. General properties of slow-plasmon resonant nanostructures: nano-antennas and resonators [J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10869-10877.
- [37] Jung J, Søndergaard T, Bozhevolnyi S I. Gap plasmon-polariton nanoresonators: scattering enhancement and launching of surface plasmon polaritons [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(3): 035401.
- [38] Wu D, Liu C, Liu Y M, et al. Numerical study of an ultra-broadband near-perfect solar absorber in the visible and near-infrared region [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 450-453.