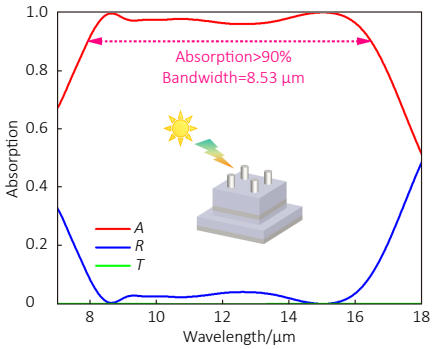
OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering

Article

2026 年 6 月, 第 53 卷, 第 6 期

长波红外波段嵌入式结构高效超材料吸收器设计



沈晓波[1]，王　杨[2*]

[1]淮南师范学院电子工程学院，安徽 淮南 232038；
[2]淮南师范学院机械与电气工程学院，安徽 淮南 232038

摘要：大气窗口中的长红外波段，在红外成像、红外隐身等技术领域拥有重要应用潜力。本文结合多层堆叠构型与嵌入式微结构设计理念，设计了一种适配长红外波段的嵌入式结构宽光谱高效吸收器。该吸收器单元结构以 Si_3N_4-Ti-Si_3N_4 三层堆叠为基底，并在上层 Si_3N_4 介质层中嵌入 Ti 圆柱结构，金属与介质形成的嵌入式复合堆叠结构，可有效拓宽吸收带宽并提升吸收效率。该吸收器在长红外波段表现出优良的吸收性能，在 7.92~16.45 μm 波长范围内，吸收率稳定保持在 90% 以上，对应的吸收带宽达到 8.53 μm。同时，其兼具宽谱吸收、偏振不敏感及宽角吸收特性，60°斜入射条件下，TM 模式与 TE 模式的平均吸收率分别维持在 90% 和 76%。深入分析表明，该吸收器的宽谱高吸收特性，主要来自局域表面等离激元共振 (LSPR)、腔体共振及传播表面等离激元共振 (PSPR) 的协同耦合作用。凭借优异的综合吸收性能，该吸收器在红外成像、红外探测、红外传感等领域具有潜在的应用价值。

关键词：超材料；吸收器；红外；宽波段

The English title and abstract appear at the end of the paper.

DOI: 10.12086/oee.2026.260052 | CSTR: 32245.14.oee.2026.260052 | 中图分类号：O431 | 文献标识码：A

沈晓波，王杨. 长波红外波段嵌入式结构高效超材料吸收器设计 [J]. 光电工程，2026，**53**(6): 260052

Shen X B, Wang Y. Design of high-efficiency metamaterial absorber with embedded structure for the long-wave infrared region[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(6): 260052

1　引　言

长波红外 (Long-wave infrared, LWIR，6~18 μm) 作为大气窗口的核心波段，在红外成像、目标探测、太阳能光热发电等领域具有重要的应用前景[1-5]。传统红外吸收材料受天然材料电磁参数本征特性的影响，普遍面临窄带宽、厚尺寸、角度敏感等技术瓶颈。尽管采用单一谐振单元的超材料吸收器 (metamaterial absorber, MA) 可通过表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 实现高吸收率，但单一谐振模式使其难以突破带宽限制[6-11]，无法满足宽带应用场景的使用需求。

作为一种具备亚波长周期结构的人工电磁材料，超材料通过精确设计单元结构的等效介电常数和磁导率，能够突破天然材料电磁调控的极限，从而为宽带红外吸收技术开辟了新途径。自 Landy 等人在 2008 年首次实现微波波段接近完美吸收的电磁吸收器以来[12]，研究者们通过多谐振器单元耦合、复合介电层设计及拓扑结构优化等策略[13-18]，逐步扩展了超材料吸收器的吸收带宽与性能。例如，Qin 等人利用十字形谐振器，依托传播表面等离子体共振 (propagating surface plasmon resonance,

收稿日期：2026-02-15；修回日期：2026-04-27；录用日期：2026-04-30；网络出版日期：2026-06-25

基金项目：国家自然科学基金 (62366015)；安徽省教育厅自然科学研究重大项目 (2025AHGXZK20085)；安徽省高校优秀青年教师培育项目 (YQYB2025028)；淮南师范学院校级项目 (2025HX478, 2023hsjyxm04)

*通信作者：王杨，yangwang91@163.com

版权所有©2026 中国科学院光电技术研究所

PSPR) 与局域表面等离子体共振 (localized surface plasmon resonance, LSPR) 的耦合机制，在红外波段 (7.5~13.25 μm) 内获得了 91.7% 的平均吸收效率[19]。Liang 等人设计了一种 Cr-Ge-Si_3N_4-Ti 纳米十字结构超材料吸收器，结合损耗介质与 SPR 的耦合作用，将吸收带宽拓展至 7.23 μm (8.98~16.21 μm)[20]。Hou 等人面向长波红外波段，通过对腔体共振、LSPR 与法布里−珀罗 (F−P) 共振模式的联合调控设计一种复合结构超材料吸收器，在 6~14 μm 波段内实现 85.3% 的平均吸收效率，并在 7~13 μm 范围内将平均吸收率提升至 91.2%[21]。Chen 等人设计了一种基于纳米矩形结构的三层 (Ti-Si-Ti) 薄介质层吸收器，该器件在 6.1 μm 和 19.2 μm 两个特征波长处的吸收率分别达到 97.05% 和 98.95%。随后，他们又利用 PSPR 效应及损耗材料二氧化硅 (SiO_2) 的本征吸收特性，设计出一种具有复合介质结构的四层 (Ti-Si-SiO_2-Ti) 吸收器，7.5~13.25 μm 波段内可实现 91.7% 的平均吸收效率[22]。Jia 等人还通过全介质氮化硅 (Si_3N_4) 材料的多层渐变结构设计，实现了 7.15~31.62 μm 波段内吸收率超过 90%[23]。同时，研究者还通过引入温度相变材料二氧化钒 (VO_2)，利用图案化设计实现共振效应增强吸收并对超材料吸收器的波段进行调控[24-25]。

然而，目前宽带超材料吸收器设计仍面临三大核心挑战：其一，多数设计方案依赖多尺寸谐振单元的平面集成 (如多环、多圆盘结构)，水平方向的集成会增大单元尺寸，不利于器件微型化发展[26-28]；其二，尽管多层结构可通过谐振效应的耦合作用在一定程度上提升吸收率并拓宽带宽，但过多的结构层数会导致器件架构趋于复杂，阻碍其工程化应用[29-30]；其三，部分高性能器件的制备需依赖贵金属材料 (如金、银)，制造成本高昂且可扩展性较差[31-33]，从而限制了这类器件的大规模工程应用。

针对上述问题，基于多模共振耦合与复合介质层调控设计理念，结合阻抗匹配理论，提出一种宽带高吸收嵌入式多层超材料吸收器。该吸收器的谐振单元由 Si_3N_4 矩形、Ti 矩形及 Si_3N_4 矩形堆叠构成，且在上层 Si_3N_4 内集成 Ti 圆柱结构。首先，通过多层谐振单元与嵌入式圆柱结构设计，在亚波长单元内同时激发 LSPR、PSPR 及腔体共振，实现多共振峰的宽带叠加。其次，采用 Ti-Si_3N_4 复合结构，引入低介电常数 Si_3N_4 层与高损耗金属 Ti 层，其中 Ti 层可增强 SPR 场的局域束缚能力，Si_3N_4 层通过本征吸收及能量耦合效应拓宽带宽；同时，通过对两层材料进行阻抗匹配优化设计，有效降低界面反射损耗。最后，借助单元结构的中心对称设计，保证吸收器在 0°~60°入射角范围内较优的吸收效果，满足复杂应用场景下的角度适应性要求。

2 结构设计与研究方法

当能量入射至吸收器结构表面时，吸收率 (A) 可表示为 A=1−R−T，其中 T 和 R 分别为透射率与反射率。显然，吸收器的吸收性能主要由反射和透射效应调控。提升吸收性能主要可通过降低反射与抑制透射两种途径实现。为了抑制吸收器的透射率，选用金属 Ti 作为基底，其厚度设置为 200 nm。该厚度超过了入射波可穿透的深度，因此可使透射率 T≈0。在此条件下，吸收器的吸收率表达式可简化为 A=1−R。根据阻抗匹配理论，反射率的表达式可写为[34]

$$R(\omega)=\left|\frac{Z(\omega)-Z_0}{Z(\omega)+Z_0}\right|^2, \tag{1}$$

其中：ω为入射频率，Z 为结构阻抗，Z_0 为自由空间阻抗。吸收器的等效阻抗可通过参数 S 计算得出，其表达式为[35-38]

$$S_{11}=S_{22}=\frac{\mathrm{i}}{2}\left(\frac{1}{Z}-Z\right)\sin(nkd), \tag{2}$$

$$S_{21}=S_{12}=\frac{1}{\cos(nkd)-\dfrac{\mathrm{i}}{2}\left(Z+\dfrac{1}{2}\right)\sin(nkd)}, \tag{3}$$

$$Z_{\mathrm{r}}=\frac{Z(\omega)}{Z_0}=\pm\sqrt{\frac{(1+S_{11})^2-S_{21}^2}{(1-S_{11})^2-S_{21}^2}}, \tag{4}$$

其中：n、k 和 d 分别为吸收器的折射率、波矢和厚度；S_{11}、S_{22}、S_{12} 及 S_{21} 均为参数 S，分别表示端口 1 和 2 的反射系数，以及反向和正向的传输系数。由上述分析可知，当 Z=Z_0 时表明结构阻抗与自由空间阻抗达成最优匹配状态，对应的吸收效率可实现理想值 1。由此可以看出，归一化阻抗 Z_{r} (Z_{r}=Z_{r}'+jZ_{r}''，其中 Z_{r}'为实部，Z_{r}''为虚部) 的取值越接近 1，吸收器的阻抗匹配效果越佳。当 Z_{r}'趋近于 1 且 Z_{r}''趋近于 0 时，反射损耗降至最低，电磁波能最大限度地穿透至吸收材料内部，从而使得入射能量在吸收器结构内部被吸收，吸收效果最佳。因此，吸收器可以通过调整材料结构与几何参数，实现对归一化阻抗实部与虚部的调控，并通过对这些参数优化，有望在宽频范围内实现较为优秀的阻抗匹配效果，从而达

到超宽波段内的高效吸收。

吸收器的整体结构如图 1(a) 所示，其单元结构的周期为 P。单元结构的示意图如图 1(b) 和图 1(c) 所示，该吸收器的核心结构为三层介质-金属-介质结构 (Si_3N_4-Ti-Si_3N_4)，三层结构的厚度分别为 H_2、H_3 和 H_4，对应于氮化硅层、钛层和上层氮化硅层。三层结构的长和宽均为 W (图 1(b))。同时，该三层结构沉积于氮化硅矩形基底与钛矩形基底之上，其基底的厚度分别为 400 nm 和 100 nm。此外，中间 Ti 层表面集成有四个 Ti 圆柱，圆柱的直径为 D、高度为 H_1 (图 1(c))。这种嵌入式构型使 Si_3N_4/Ti 界面由二维平面接触转变为三维分布的体型接触，显著增大了接触面积，有助于金属界面的电磁能量更高效地耦合至介质层，从而降低界面反射损耗。同时，通过调节 H_1 在 H_2 中的嵌入深度与位置，可实现对吸收峰频率及带宽的灵活调控。采用时域有限差分方法 (finite-difference time-domain, FDTD) 分析吸收器的吸收性能，x 与 y 方向为周期边界条件，z 方向为完美匹配层 (perfectly matched layer，PML)，Ti 与 Si_3N_4 的材料参数分别采用 Palik[39] 和 Kischkat[40]。入射光采用平面波，波长范围为 7~18 μm，mesh 设置为 3 nm。吸收器几何参数取值详见表 1。此外，所设计吸收器的制备流程如图 1(d) 所示。首先，采用磁控溅射法在 Ti 基底层上依次沉积 Si_3N_4 层与 Ti 层，并通过光刻技术刻蚀形成 Ti 圆柱阵列；随后，再次利用磁控溅射沉积 Si_3N_4 层，并借助光刻工艺完成吸收器阵列结构。

3 结果与讨论

3.1 吸收特性与机理分析

首先，探究了所设计吸收器结构在电磁波正入射条件下的吸收性能。如图 2(a) 所示，该吸收器的吸收光谱在 8.61 μm、14.76 μm 和 15.27 μm 波长处分别呈现出吸收率为 99.5%、99.9% 和 99.8% 的吸收峰。此外，在 7.92~16.45 μm 范围内，该吸收器的吸收效率均高于 90%，且透射率趋近于 0，对应的吸收带宽达 8.53 μm。这一高吸收和宽带充分体现了该吸收器在中红外波段电

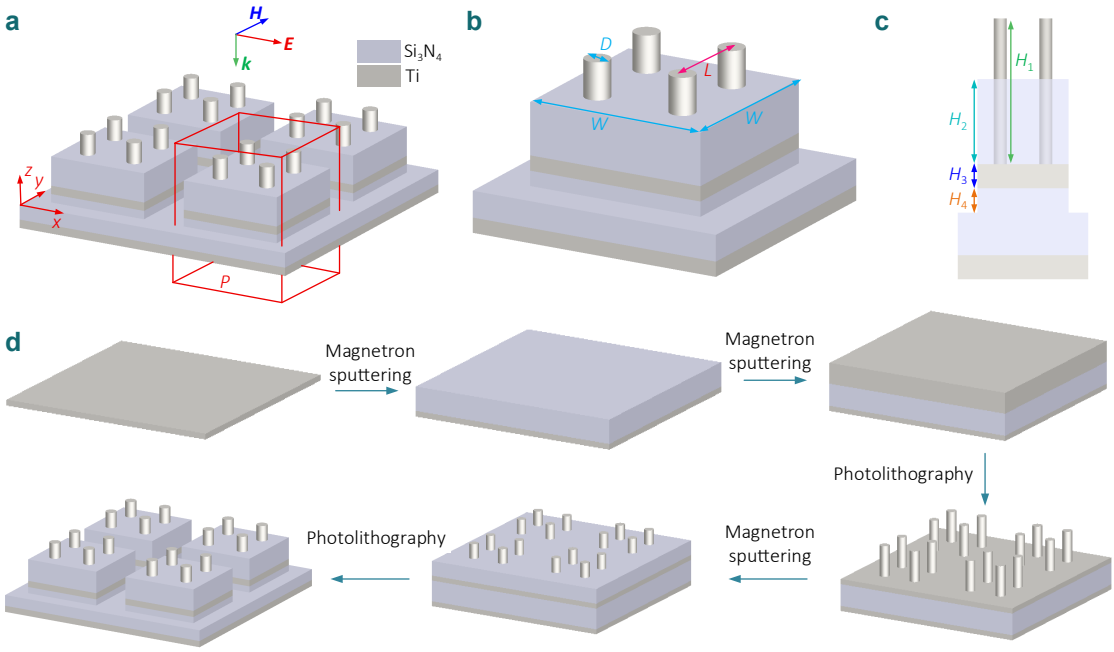


图 1 吸收器结构。(a) 吸收器阵列结构；(b) 单元结构；(c) 单元结构侧视图；(d) 制备流程示意图

Fig. 1 Absorber structure. (a) Absorber array structure; (b) Absorber unit structure; (c) Side view of the unit cell; (d) Schematic of the fabrication process

表 1 优化后的几何参数

Table 1 The optimized geometric parameters of the absorber

P/μm	D/μm	W/μm	H_1/μm	H_2/μm	H_3/μm	H_4/μm	L/μm
1.8	0.2	1.4	1.2	0.7	0.2	0.2	0.7

磁波捕获方面的优异性能。

此外，图 2(b) 为吸收器的相对阻抗谱，在 7.92 ~ 16.45 μm 的波段范围内，吸收器相对阻抗的实部取值趋近于 1，虚部数值趋近于 0，这也印证了该吸收器的结构阻抗与自由空间阻抗具备良好的匹配特性。良好的阻抗匹配有效抑制了入射波的反射，从而提升了该波段内的吸收效率，这一现象也与吸收光谱的测试结果一致。进一步通过参数 S 计算等效介电常数 (ε_{eff}) 与等效磁导率 (μ_{eff})[41-44]，结果如图 2(c) 和 2(d) 所示。可见在 7.92 ~ 16.45 μm 的波段范围内，所设计的吸收器的等效介电常数与等效磁导率相近，进一步验证了波段内的阻抗匹配特性。

为探究所设计吸收器实现宽带高吸收特性的物理机制，针对谐振波长 (8.61 μm、14.76 μm、15.27 μm) 下的电场强度|$\boldsymbol{E}$|与磁场强度|$\boldsymbol{H}$|分布规律开展了研究。图 3 (a-c) 为谐振波长 (8.61 μm、14.76 μm、15.27 μm) 下吸收器在 *x*-*y* 平面内上层 Si_3N_4 表面的电场分布图。在 8.61 μm 波长处，电场沿着 *x* 轴在介质 (Si_3N_4) 与金属钛 (Ti) 圆柱的交界边缘处局域。这表明电场在水平方向上被束缚于两个圆柱之间，相邻两个圆柱在水平方向存在耦合效应，且近场相互作用得到增强。当入射波长为 14.76 μm 和 15.27 μm 时，电场主要在 Ti 圆柱结构与 Si_3N_4 矩形的边缘位置局域，尤其在 Si_3N_4 矩形的边缘间隙处更为明显。另外，谐振波长 (8.61 μm、14.76 μm、15.27 μm) 下吸收器在 *x*-*z* 平面内电场分布如图 3 (d, e) 所示。当入射波长为 8.61 μm，电场主要汇聚于 Ti 圆柱的边缘部位。在短波长 (8.61 μm) 区域内 (图 3(a) 和图 3(d))，电场增强效应主要源于入射光子入射至 Ti 圆柱界面，入射的光子与自由电子发生共振，进而在 Ti 圆柱表面激发 SPR[45-47]，共振过程中能量被局域于 Ti 表面，促使表面电场产生显著增强效应。另外，在金属图案 (Ti 圆柱) 边缘处的共振能量被束缚，从而在有限的空间区域内形成了 LSPR。共振将入射能量进一步束缚在圆柱边缘处，同时能量进一步耦合到 Si_3N_4 介质层内，且圆柱之间存在耦合作用，从而增强结构的吸收。对于非磁性材料，吸收的电磁功率可以表示为 $P_{\text{abs}} = (1/2)\omega\varepsilon'' |\boldsymbol{E}|^2$，

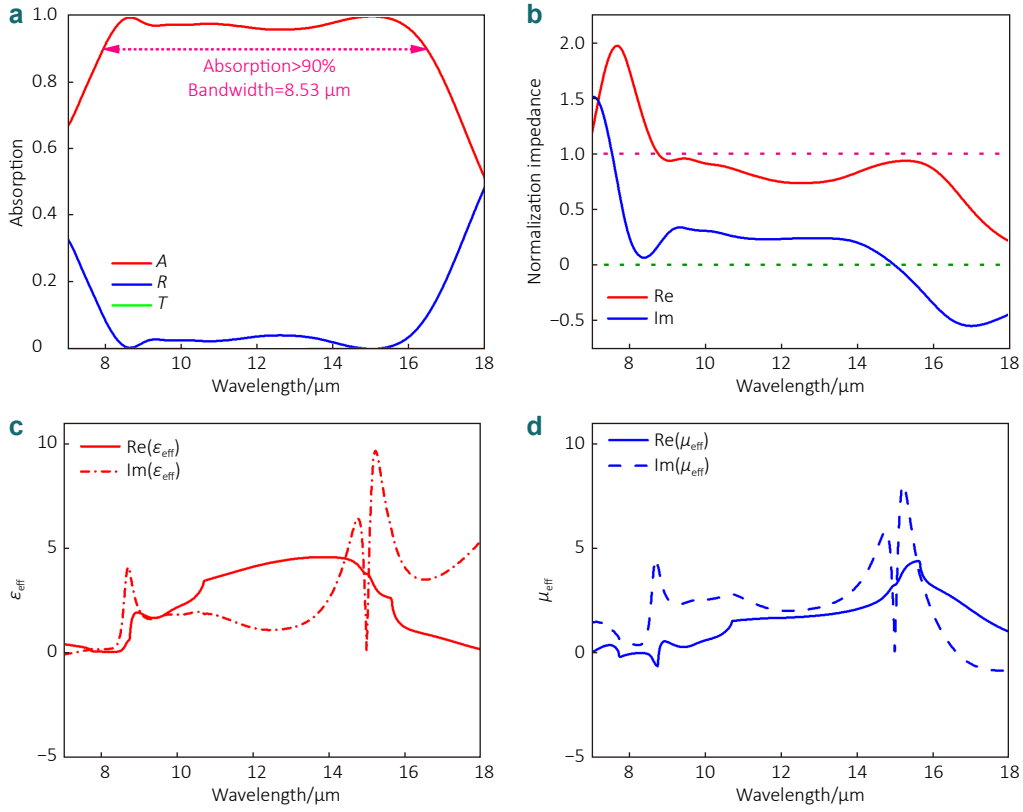


图 2 吸收光谱与等效参数。(a) 吸收光谱；(b) 相对阻抗谱；(c) 等效介电常数；(d) 等效磁导率

Fig. 2 Absorption spectra and equivalent parameters. (a) Absorption spectrum; (b) Relative impedance spectrum; (c) Effective permittivity; (d) Effective permeability

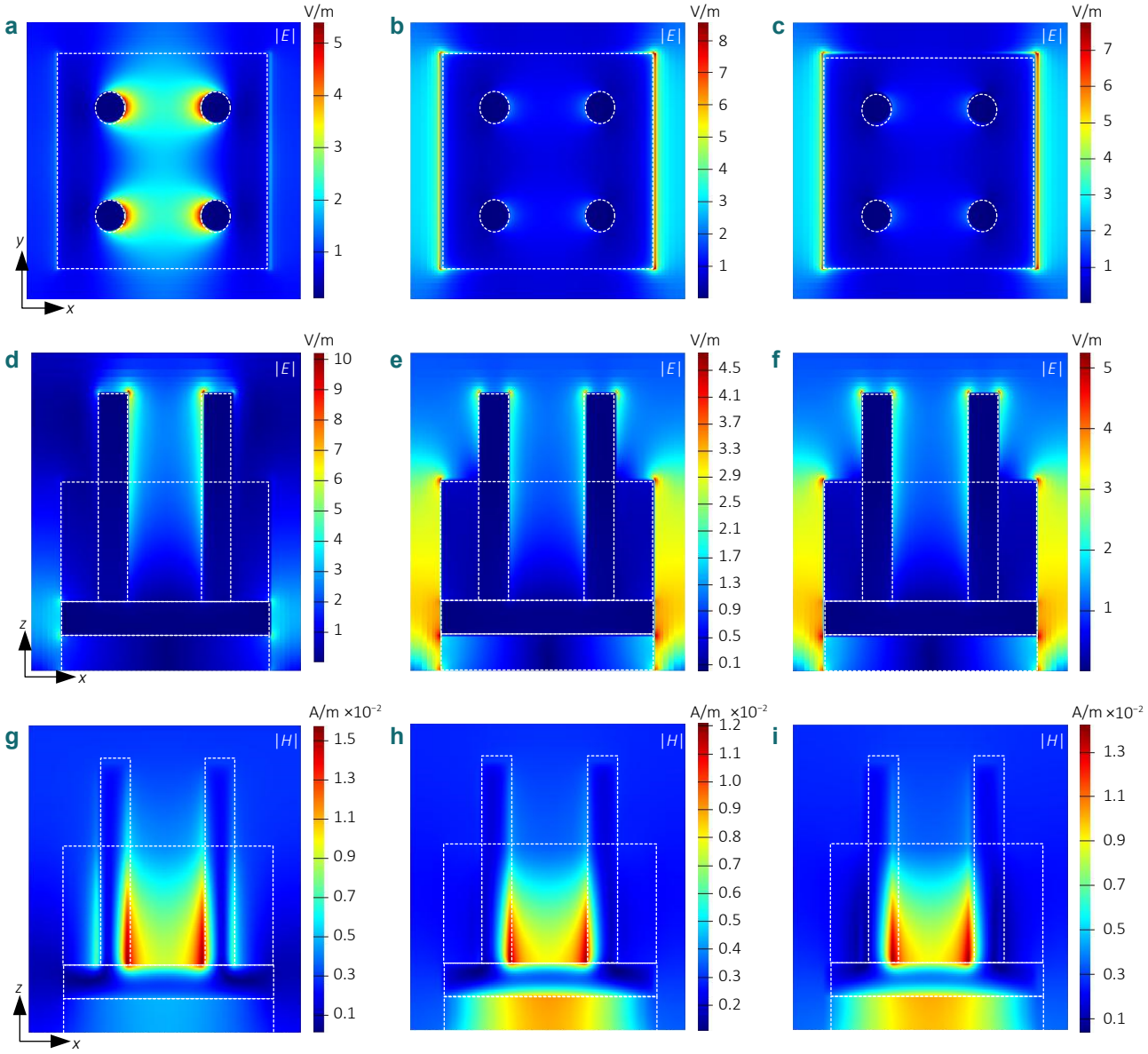


图 3 电场与磁场分布图。上层 Si_3N_4 表面 *x-y* 平面上波长分别为 (a) 8.61 μm、(b) 14.76 μm、(c) 15.27 μm 时的电场分布；单元结构在 *x-z* 平面上波长分别为 (d) 8.61 μm、(e) 14.76 μm、(f) 15.27 μm 时的电场分布；单元结构在 *x-z* 平面上波长分别为 (g) 8.61 μm、(h) 14.76 μm、(i) 15.27 μm 时的磁场分布

Fig. 3 Electric field and magnetic field distribution diagram. Top-view $|\boldsymbol{E}|$ distributions on the *x-y* plane of the upper Si_3N_4 surface at wavelengths of (a) 8.61 μm, (b) 14.76 μm, and (e) 15.27 μm, respectively; Electric field distributions of the unit cell on the *x-z* plane at the corresponding wavelengths of (d) 8.61 μm, (e) 14.76 μm, and (f) 15.27 μm, respectively; Magnetic distributions of the unit cell on the *x-z* plane at the corresponding wavelengths of (g) 8.61 μm, (h) 14.76 μm, and (i) 15.27 μm, respectively

其中ω为角频率，ε''为介电常数的虚部，$|\boldsymbol{E}|$为材料内部总电场的振幅[48]。因此，在 8.61 μm 时，由 LSPR 共振主导高吸收。当波长为 14.76 μm 和 15.27 μm 时 (图 3(b,c) 和图 3(e,f))，电场主要在 Ti 圆柱边缘及两个单元结构之间的间隙位置局域化。从共振机制看，Ti 圆柱边缘的电场由于 LSPR 导致在边缘处局域；而缝隙间的电场增强主要源于相邻单元间的空气间隙，入射光作用下间隙内部可激发腔体共振从而使得共振能量被局域在缝隙内，进一步增强区域内的电场强度。另外，等效介电常数曲线 (图 2(c)) 在 13~16 μm 范围内呈现出明显的振荡趋势，表明材料在该频率下具有明显的色散或共振特性；此波段内等效介电常数的虚部呈现正值且较大，说明存在较

强的能量损耗[49-50]，进一步增强吸收。由于共振效应引起的场局域化主要发生在纳米结构表面附近，而本征损耗主要发生在材料内部。因此，此波段内吸收增强主要由腔体共振与 Ti 的能量损耗所主导，且共振效应占主导地位。

进一步探究入射光激发下吸收器结构内磁场变化规律。图 3 (g-i) 给出了不同谐振波长 (8.61 μm、14.76 μm、15.27 μm) 下，磁场|***H***|在 *x*–*z* 平面内的分布情况。当入射波长为 8.61 μm 时，磁场主要在上层的两个 Ti 圆柱之间 Si_3N_4 介质层内局域，这也与电场分布结果一致；随着波长的增加 (14.76 μm、15.27 μm)，磁场主要在上层两个 Ti 圆柱之间的 Si_3N_4 介质层，以及底部 Si_3N_4 介质层区域局域。该现象主要源于 Ti-Si_3N_4 界面处激发的 PSPR[51-52]，该共振将能量局域于介质层内部，进而显著提升了吸收效率。等效磁导率曲线 (图 2(d)) 的实部在整个频谱范围内基本保持正值且相对稳定，在 14.76 μm 与 15.27 μm 附近出现微小波动，这意味此波段内发生了较强的磁响应，与磁场分布一致。总的来说，当入射波长较小 (8.61 μm) 时，吸收器的高吸收由金属表面的 LSPR 占主导作用；当入射波长增大时 (14.76 μm、15.27 μm)，吸收器的高吸收主要由金属表面的 LSPR、缝隙单元内的腔体共振及介质-金属间的 PSPR 共同作用。同时，材料的固有能量损耗与不同波长下的各共振模式间频率叠加，有效地提升光吸收并拓展吸收带宽。

3.2 入射源的偏振角度与斜入射角度对吸收性能的影响

偏振角度敏感性作为吸收器的关键性能参数，其强度直接制约着吸收器在复杂光学环境中的应用场景范围。电磁波垂直入射条件下，不同偏振角度 (0° 为 TM 模式，90° 为 TE 模式) 对应的吸收光谱如图 4(a) 所示。随着偏振角度增加，吸收器在 7~18 μm 波段内的吸收行为基本保持不变，各曲线基本重合。同时采用平均吸收率 A_{avg} 来评价该波段的偏振响应特性，其表达式为 $A_{avg}=\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} A(\lambda)\mathrm{d}\lambda/(\lambda_{max}-\lambda_{min})$，$\lambda_{max}$ 和 λ_{min} 分别表示最大波长和最小波长。图 4(b) 为偏振角度从 0° 到 90° 时的平均吸收曲线。明显地，平均吸收率随偏振角度改变基本稳定在 91.9%，表明所设计的吸收器具备偏振不敏感特性。这一特性主要得益于结构自身的对称性，使其在不同偏振角度下均呈现相似的光学响应，因此受入射偏振影响较小。

宽角度吸收特性同样是吸收器的核心性能指标，其表现优劣显著制约着应用场景的拓展。因此，为深入研究该吸收器的宽角度吸收特性，对 TM 模式与 TE 模式下不同入射角度的吸收特性开展仿真分析。图 5(a) 展示了 TM 模式下，不同斜入射角度对应的吸收光谱。当斜入射角度小于 40° 时，吸收率和吸收带宽几乎不受入射角度的影响；当入射角增大到 60° 时，吸收带宽与吸收率均出现明显下降，此时整个波段内的平均吸收约为 90%。图 5(b) 反映了 TE 模式中入射角度变化对吸收光谱的影响规律。与此对应，当入射角度在 20° 以内时，吸收率和吸收带宽几乎不受斜入射角度影响，吸收光谱基本重合。然而，当斜入射角度大于 20° 时，随着入射角度不断增大，吸收带宽与吸收率均呈现明显下降趋势。当入射角提升至 60° 时，下降幅度最为突出，此时平均吸收率仅为 76%。因此，在 TM 和 TE 模式斜入射条件下，所设计的吸收器均显示出了宽角度吸收特性。尽管

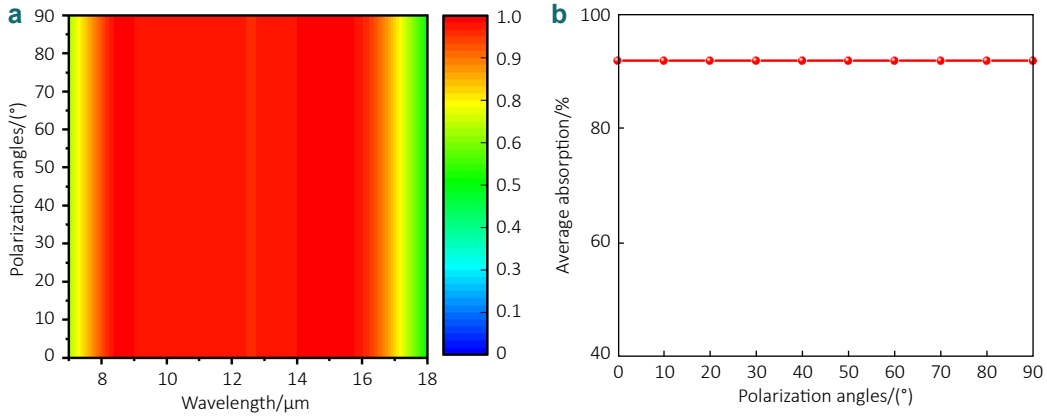


图 4 不同偏振角度时的吸收率和平均吸收率。(a) 吸收光谱，(b) 平均吸收率曲线

Fig. 4 Absorption and average absorption at different polarization angles. (a) Absorption spectra; (b) Average absorption curve

在 TM 模式与 TE 模式均显示出了宽角度吸收能力，但两种模式下的吸收行为仍表现出明显区别。斜入射条件下二者吸收特性的差异，主要源于磁场方向的不同。TM 模式的磁场方向具备入射角无关性，该特征可对不同入射角度对应的感应电流实现有效调控[52]，进而使各入射角下均能维持优异的阻抗匹配状态。与之相反，TE 模式下的磁场分布对入射角度表现出显著的敏感性，宽角度入射时结构内部感应电流幅值降低，同时能量耦合作用被削弱，最终导致大入射角下 TE 模式的吸收效率小于 TM 模式。

综上所述，该吸收器兼具高吸收率、宽工作波段、大角度不敏感及偏振不依赖等优异性能，在高光谱成像与动态成像、宽波段光电探测及光伏器件与光热催化等领域展现出广阔的应用前景[53-55]。特别是在动态目标探测与非垂直入射场景中，其宽角度稳定性有效克服了传统吸收器在非正入射条件下性能衰减的难题。表 2 总结了本吸收器与已有同类器件的性能对比结果，可见本设计在吸收带宽、吸收效率及结构材料等方面均具有明显优势。

3.3 吸收器的结构几个参数对吸收性能的影响

通过调控吸收器的图案构型与几何参数，可精准实现对其吸收带宽和吸收率的协同调控。首先，为探究 Ti 圆柱高度 H_1 对吸收特性的影响，固定其余几何参数，仅改变 H_1 取值，对应的吸收光谱如图 6(a) 所示。当 H_1<1.2 μm 时，吸收带宽与吸收率随 H_1 增大而同步上升；当 H_1>1.2 μm 时，H_1 继续增大则导致吸收波段发生红移。当 H_1 较低 (低于上层 Si_3N_4 层厚度) 时，LSPR 难以有效激发，吸收率偏低；随着 H_1 升高，LSPR 被激发，能量局域于金属表面，吸收性能显著提升；而当 H_1 达到 1.6 μm 后，Ti 圆柱高度改变整体结构阻抗，影响与自由空间的阻抗匹配，从而引发吸收波段红移。其次，为探究 Ti

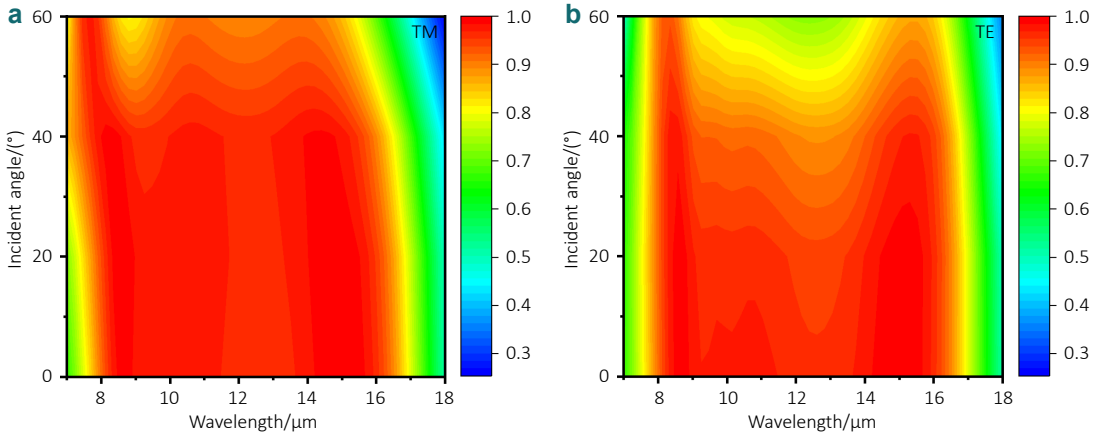


图 5 不同模式下斜入射光谱。(a) TM 模式；(b) TE 模式

Fig. 5 Oblique incidence spectra under different modes. (a) TM mode; (b) TE mode

表 2 先前工作与本工作的对比

Table 2 Comparison of this work with previous work

Ref.	Band range with absorption >90%	Average absorption	Incident angle (average absorption)	Polarization insensitivity	Materials
[19]	7.5~13.25 μm	94% (7.5~13.25 μm)	60° (TM 90%, TE 70%)	Yes	Ti/Si/Al
[20]	8.98~16.21 μm	94% (8.98~16.21 μm)	60°	Yes	Cr/Ge/Si_3N_4/Ti
[21]	9~10.6 μm,11.5~13 μm	85.3% (6~14 μm)	—	No	Ti/Si
[56]	8~14 μm	94.5% (8~14 μm)	60° (TM 82%, TE 80%)	Yes	Ti/Ge
This work	7.92~16.45 μm	91.9% (7~18 μm)	60° (TM 90%, TE 76%)	Yes	Ti/Si_3N_4

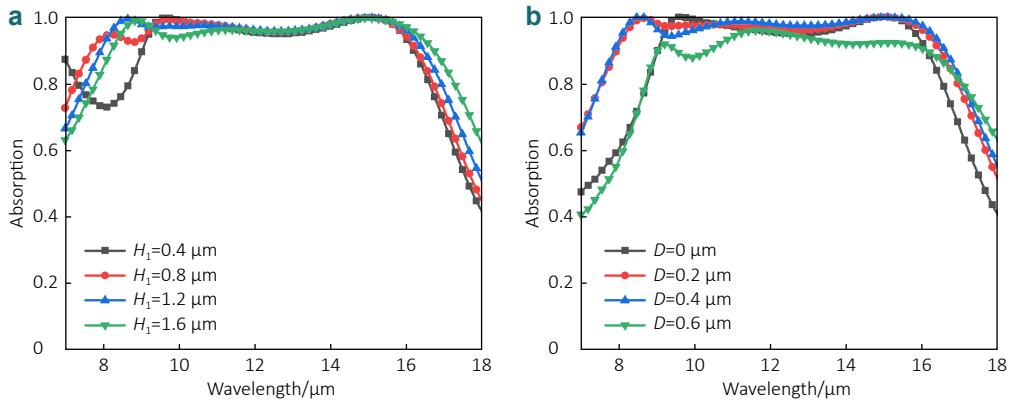


图 6 不同 (a) H_1 和 (b) D 时的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectra under different (a) H_1 and (b) D

圆柱直径 D 对吸收特性的影响，固定其余几何参数，仅调整 D 取值，对应的吸收光谱如图 6(b) 所示。当 D=0 μm 时，吸收器为三层结构 (Si_3N_4-Ti-Si_3N_4)，Ti 圆柱上的 LSPR 完全失去作用，吸收性能较差。当 D 增大至 0.2 μm 和 0.4 μm 时，吸收光谱表现出良好的一致性，原因在于该直径范围内 Ti 圆柱的共振能量能顺利耦合至 Si_3N_4 层，从而拓宽吸收带宽并提升吸收率。当 D 增大至 0.6 μm 时，吸收带宽显著下降，这是因为过大的圆柱直径削弱了相邻 Ti 圆柱间的能量耦合作用，导致吸收性能同步下降。

为进一步探究上层 Si_3N_4 层厚度 H_2 对吸收性能的影响，固定其余几何参数，仅改变 H_2 取值，所得吸收光谱如图 7(a) 所示。当 H_2<0.7 μm 时，吸收带宽与吸收率随 H_2 增大而同步提升；当 H_2>0.7 μm 时，两者则呈下降趋势。这一变化归因于 Si_3N_4 层的本征吸收及其与金属层的能量耦合：厚度过薄时，本征吸收效应不足、能量耦合较弱，导致吸收性能偏低；厚度过大时，则会削弱 Ti 圆柱边缘的能量耦合效应，进而造成吸收性能下降。图 7(b) 为结构周期 P 对应的吸收光谱。当 P=1.4 μm 时，相邻单元之间无空气间隙，腔体共振模式无法有效激发，因此全波段吸收率均处于较低水平。随着 P 增大 (P<1.8 μm)，吸收带宽与吸收率均呈上升趋势；但当 P 进一步增大至 2.2 μm 时，二者出现下降趋势，原因在于腔体共振效应与腔体宽度相关，过大的宽度会削弱共振强度，导致吸收率降低、吸收带宽变窄。

为进一步探究 Ti 圆柱之间的间距 L 对吸收性能的影响，固定其余几何参数，仅改变 L 取值，所得吸收光谱如图 8(a) 所示。随着 L 增大，吸收器的吸收带宽相应拓宽，且在整个波段内吸收率变化较小，表明该结构对制造公差具有良好的容错能力。另外，Si_3N_4 与 Ti 矩形宽度和长度 W 对吸收的影响如图 8(b) 所示。当 W 从 1.2 μm 增大至 1.4 μm 时，吸收带宽达最大值；W 继续增大则

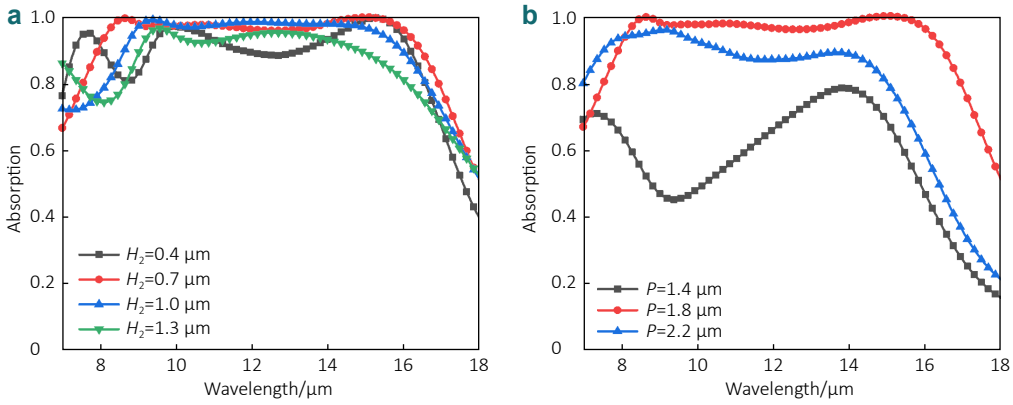


图 7 不同 (a) H_2 和 (b) P 时的吸收光谱

Fig. 7 Absorption spectra under different (a) H_2 and (b) P

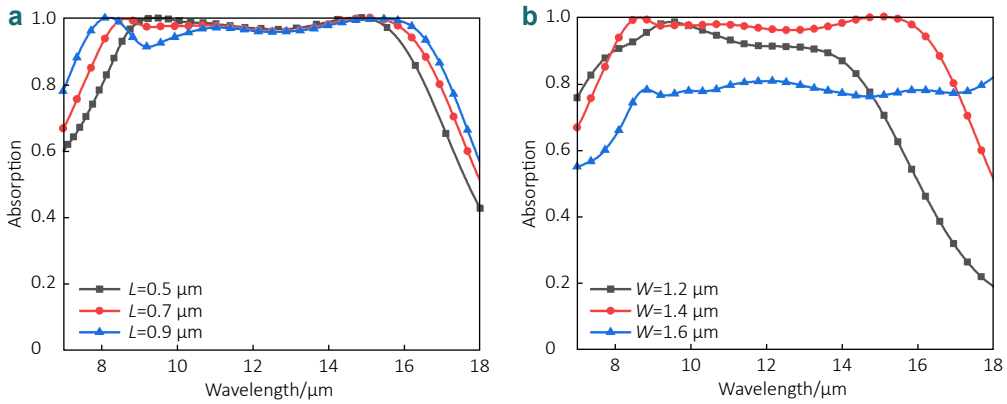


图 8 不同 (a) *L* 和 (b) *W* 时的吸收光谱

Fig. 8 Absorption spectra under different (a) *L* and (b) *W*

导致单元缝隙宽度降低，从而影响腔体共振效应，导致吸收率与带宽同步下降。

4 结 论

基于多层堆叠结构与阻抗匹配理论，设计出嵌入式结构的超材料吸收器，其单元由 Si_3N_4-Ti-Si_3N_4 三层堆叠及嵌入上层 Si_3N_4 的 Ti 圆柱构成。高损耗 Ti 金属可激发 PSPR 以增强吸收，Si_3N_4 在红外波段拥有良好的本征吸收与 SPR 耦合效应，Ti 与 Si_3N_4 复合结构由此实现吸收效率提升与吸收带宽拓展。FDTD 方法模拟结果显示，嵌入式结构吸收器在 7~18 μm 波段范围内表现出较为优秀的吸收性能，同时在 7.92 ~16.45 μm 波段内吸收率保持 90% 以上，实现了 8.53 μm 的宽吸收带宽。基于对称图案化结构设计，该吸收器展现出优异的偏振不敏感特性，在不同入射偏振角度下平均吸收率均稳定维持在 91.9%。此外，该吸收器还展现出较为优秀的宽角度吸收性能，在 60°斜入射条件下，该吸收器在 TM 与 TE 偏振模式下的平均吸收率仍可分别维持在 90% 和 76%。机理分析显示，该吸收器所呈现的宽波段、高吸收特性，主要归因于 Ti 圆柱表面激发的 LSPR、结构单元间的腔体共振以及金属−介质界面处的传播型 PSPR。各类共振模式间的协同耦合效应，进一步强化了器件的吸收强度，并有效拓宽了其吸收带宽。该吸收器集宽谱吸收、高吸收率、偏振不敏感与宽角度吸收的优秀性能，在能量收集、高光谱成像与动态成像、宽波段光电探测等领域具有潜在应用价值，并为高性能吸收器结构设计与性能优化提供了重要的理论参考与设计思路。

作者贡献

沈晓波：研究资料的收集、分析，实验的设计与完成，论文写作；王杨：实验设计、论文修改。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

1. Abouelez A E, Eldiwany E A, Swillam M A. Silicon-based ultra-broadband mid-IR and LWIR near-perfect metamaterial absorber[J]. *Opt Quant Electron*, 2024, **56**(7): 1103.
2. Luo F Y, Li C L, He X H. Ultra-broadband metamaterial absorber for collecting electromagnetic waves from the ultraviolet to the mid-infrared[J]. *Int J Therm Sci*, 2024, **203**: 109141.
3. Zhang W Q, Chen Y X, Wei J, et al. Long-wavelength infrared metamaterial absorber with polarization and angle insensitivity using compact hybrid cylindrical structures[J]. *Nanoscale*, 2025, **17**(6): 3353−3359.
4. Qu Y L, Chen Y, Chen S J, et al. Study on a simple long-wave infrared ultra-wideband metamaterial absorber with a high tolerance of manufacturing errors[J]. *Photonics Nanostruct-Fundam Appl*, 2025, **63**: 101357.
5. Wang C Y. Design, calculation, and measurement of a single resonant mode metamaterial absorber and its tunable performance[J]. *Opt Mater*, 2024, **148**: 114810.
6. Ma J, Wu P H, Li W X, et al. A five-peaks graphene absorber with multiple adjustable and high sensitivity in the far infrared band[J]. *Diamond Relat Mater*, 2023, **136**: 109960.
7. Anwar S, Khan Q, Ali G, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber with enhanced sensing capabilities[J]. *Eur Phys J D*, 2023, **77**(4): 69.
8. Babu K V, Sree G N J, Das S, et al. A perfect metamaterial absorber (MMA) using SiO_2 substrate with high absorption for terahertz applications: design and equivalent circuit analysis[J]. *J Electron Mater*, 2024, **53**(9): 5566−5579.
9. Elalaouy O, Das S, El Ghzaoui M, et al. An ultra-thin polarization-sensitive quad-band metamaterial absorber (QMMA) with ten absorption peaks for diversified advanced millimeter-wave wireless applications[J]. *J Electron Mater*, 2025, **54**(11): 10733−10752.

10. Younis F, Khan O, Ahmad J, et al. A highly efficient triple band metasurface enabled absorber for 5G/6G millimeter wave applications[J]. *Sci Rep*, 2025, **15**(1): 29455.
11. Baqir M A, Choudhury P K. Design of hyperbolic metamaterial-based absorber comprised of Ti nanospheres[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2019, **31**(10): 735−738.
12. Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**(20): 207402.
13. Cheng S B, Li W X, Zhang H F, et al. High sensitivity five band tunable metamaterial absorption device based on block like Dirac semimetals[J]. *Opt Commun*, 2024, **569**: 130816.
14. Zuo J K, Pan M Y, Duan H G, et al. Review on new infrared stealth structural materials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(5): 220218.
左建坤, 潘美妍, 段辉高, 等. 新型红外隐身结构材料研究综述[J]. 光电工程, 2023, **50**(5): 220218.
15. Chen B Y, Yu S J, Lu W Q, et al. Mid-infrared bimodal wide metamaterial absorber based on double-layer silicon nitride structure[J]. *Mater Res Bull*, 2024, **174**: 112751.
16. Zhang Z G, Xie Z W, Tian M Y, et al. An application of catenary in the design of dual-frequency graphene absorbers[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(7): 250077.
张志庚, 谢征微, 田明阳, 等. 悬链线图案化石墨烯双频可调谐吸收器[J]. 光电工程, 2025, **52**(7): 250077.
17. Sharma S, Kazemi F, Singh P, et al. An ultra broadband metamaterial absorber based on metal-dielectric-metal technology for THz spectrum[J]. *Nano Commun Netw*, 2024, **42**: 100531.
18. Qian Y J, Liu H H, Cheng Y Z, et al. Design of a dual-band pulse wave selective metasurface absorber based on nonlinear circuits[J]. *Acta Electron Sin*, 2024, **52**(6): 2067−2073.
钱莹洁, 刘海宏, 程用志, 等. 基于非线性电路的双频带脉冲波选择性超表面吸收器设计[J]. 电子学报, 2024, **52**(6): 2067−2073.
19. Qin Z, Meng D J, Yang F M, et al. Broadband long-wave infrared metamaterial absorber based on single-sized cut-wire resonators[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(13): 20275−20285.
20. Liang S R, Xu F, Yang H, et al. Ultra long infrared metamaterial absorber with high absorption and broad band based on nano cross surrounding[J]. *Opt Laser Technol*, 2023, **158**: 108789.
21. Hou E Z, Liang Z Z, Shi X Y, et al. Polarization-sensitive metamaterial absorber based on the composite grating structure in the long-wave infrared band[J]. *Opt Laser Technol*, 2024, **175**: 110676.
22. Chen X T, Liang Z Z, Shi X Y, et al. Wide-angle ultra-wideband metamaterial absorber based on complex dielectric layer in long and very long-wave infrared[J]. *Opt Commun*, 2024, **566**: 130455.
23. Jia J Y, Xiao Y F, Yang L L, et al. Ultrabroad and wide - angle high - temperature - stability infrared metamaterial absorber based on all - dielectric silicon nitride (Si_3N_4)[J]. *Adv Photonics Res*, 2026, **7**(1): e202500200.
24. Wu L, Cao X, Cao C, et al. Ultra-broadband thermal tunable plasmonic metamaterial absorber based on vanadium dioxide (VO_2) from ultraviolet to near-infrared regime[J]. *Int J Therm Sci*, 2026, **223**: 110660.
25. Wang J, Liu M S, Yang H, et al. Tunable mid-infrared ultra-wideband absorption device with annular-square open metamaterials based on VO_2 phase change[J]. *Micro Nanostruct*, 2025, **208**: 208353.
26. Rabbani G, Islam M T, Hoque A, et al. Orthogonal centre ring field optimization triple-band metamaterial absorber with sensing application[J]. *Eng Sci Technol Int J*, 2024, **49**: 101588.
27. Luo F Y, He X H, Li C L. High-efficiency solar metamaterial absorber based on multilayer circular ring arrays[J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2025, **287**: 113623.
28. Huang M H, Wei K H, Wu P H, et al. Terahertz broadband absorber based on a combined circular disc structure[J]. *Micromachines*, 2021, **12**(11): 1290.
29. Routray P, Ghosh D. Design and modeling of a miniaturized multilayer metamaterial absorber with oblique angle and polarization insensitivity[J]. *IEEE Lett Electromagn Compat Pract Appl*, 2024, **6**(1): 29−34.
30. Wang J W, Fan C Z, Liao Y H, et al. Pattern-to-absorption prediction for multilayered metamaterial absorber based on deep learning[J]. *IEEE Microw Wirel Technol Lett*, 2024, **34**(5): 463−466.
31. Zhang H B, Li D X, Chengguan Y X, et al. Metamaterial absorbers with Au nanoctahedrons hybrid Ag nanowires for highly efficient UV–Vis absorption and SERS sensing[J]. *Appl Surf Sci*, 2024, **661**: 160054.
32. Armghan A, Aliqab K, Alsharari M. Polarization and wide-angle incidence MXene-based metamaterial absorber for visible and infrared wavelengths[J]. *Opt Quant Electron*, 2024, **56**(7): 1265.
33. Ngobeh J M, Sorathiya V, Altameem T, et al. A numerical approach for optimizing ultrawideband absorber performance with MXene multilayer metamaterials for solar engineering applications[J]. *Appl Phys A*, 2025, **131**(4): 232.
34. Ding F, Dai J, Chen Y T, et al. Broadband near-infrared metamaterial absorbers utilizing highly lossy metals[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 39445.
35. Bilal R M H, Baqir M A, Hameed M, et al. Triangular metallic ring-shaped broadband polarization-insensitive and wide-angle metamaterial absorber for visible regime[J]. *J Opt Soc Am A*, 2022, **39**(1): 136−142.
36. Li W X, Xu F, Cheng S B, et al. Six-band rotationally symmetric tunable absorption film based on AlCuFe quasicrystals[J]. *Opt Laser Technol*, 2024, **169**: 110186.
37. Sun C L, Liu H T, Yang B, et al. An ultra-broadband and wide-angle absorber based on a TiN metamaterial for solar harvesting[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2023, **25**(1): 806−812.
38. Chen Z Y, Cheng S B, Zhang H F, et al. Ultra wideband absorption absorber based on Dirac semimetallic and graphene metamaterials[J]. *Phys Lett A*, 2024, **517**: 129675.
39. Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solids* III[M]. San Diego: Academic Press, 1998.
40. Kischkat J, Peters S, Gruska B, et al. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride[J]. *Appl Opt*, 2012, **51**(28): 6789−6798.
41. Babu K V, Sree G N J, Das S, et al. A graphene material-based wideband metamaterial absorber exploiting slotted substrate integrated waveguide (SIW) for multifarious terahertz applications: design, analysis, and circuit modelling approach[J]. *Diamond Relat Mater*, 2025, **157**: 112585.
42. Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Sci China Phys Mech Astron*, 2015, **58**(9): 594201.
43. Feng Q, Pu M B, Hu C G, et al. Engineering the dispersion of metamaterial surface for broadband infrared absorption[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(11): 2133−2135.
44. Pu M B, Hu C G, Wang M, et al. Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(18): 17413−17420.
45. Lai R N, Shi P C, Yi Z, et al. Triple-band surface plasmon resonance metamaterial absorber based on open-ended prohibited sign type monolayer graphene[J]. *Micromachines*, 2023, **14**(5): 953.
46. Kumar R, Singh B K, Tiwari R K, et al. Perfect selective metamaterial absorber with thin-film of GaAs layer in the visible region for solar cell applications[J]. *Opt Quant Electron*, 2022, **54**(7): 416.

47. Wu X L, Zheng Y, Luo Y, et al. A four-band and polarization-independent BDS-based tunable absorber with high refractive index sensitivity[J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2021, **23**(47): 26864−26873.
48. Li W, Guler U, Kinsey N, et al. Refractory plasmonics with titanium nitride: broadband metamaterial absorber[J]. *Adv Mater*, 2014, **26**(47): 7959−7965.
49. Liu Z Q, Liu G Q, Liu X S, et al. Spatial and frequency-selective optical field coupling absorption in an ultra-thin random metasurface[J]. *Opt Lett*, 2023, **48**(7): 1586−1589.
50. Li S, Tan W Y, Liu X S, et al. Efficient photothermal therapy with spatially localized high-temperature generation by refractory absorber[J]. *Appl Phys Lett*, 2023, **123**(13): 131701.
51. Li W X, Cheng S B, Zhang H F, et al. Multi-functional metasurface: ultra-wideband/multi-band absorption switching by adjusting guided-mode resonance and local surface plasmon resonance effects[J]. *Commun Theor Phys*, 2024, **76**(6): 065701.
52. Shen Z, Ni J F. Multi-resonant full-solar-spectrum perfect metamaterial absorber[J]. *Nanomaterials*, 2024, **14**(23): 1959.
53. Li S, Wu Z Y, Liu X S, et al. Monochromatic polarization - sensitive photothermoelectric detection via plasmonic quasi - BICs[J]. *Laser Photonics Rev*, 2025, **19**(17): e00477.
54. Li M, Shi M, Wang B, et al. Quasi - ordered nanoforests with hybrid plasmon resonances for broadband absorption and photodetection[J]. *Adv Funct Mater*, 2021, **31**(38): 2102840.
55. Li S, Liu X S, Zong S, et al. Direction-switchable self-thermophoresis motor with chiral antihelical resonators[J]. *ACS Photonics*, 2024, **11**(9): 3822−3828.
56. Zhou Y, Liang Z Z, Qin Z, et al. Small–sized long wavelength infrared absorber with perfect ultra–broadband absorptivity[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(2): 1279−1290.

作者简介



沈晓波 (1982-)，男，博士，副教授，主要从事多传感器信息融合技术、语音与视频图像处理技术、声波传感探测技术、人工智能神经网络算法及微纳器件方面研究。

E-mail：shenhnnu@163.com



【通信作者】王杨 (1991-)，男，博士，讲师，主要从事微纳器件及机器学习优化设计方法、太阳能电池研究。

E-mail：yangwang91@163.com

Design of high-efficiency metamaterial absorber with embedded structure for the long-wave infrared region

Shen Xiaobo[1], Wang Yang[2*]

[1] School of Electronic Engineering, Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China;
[2] School of Mechanical and Electrical Engineering, Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China

Abstract

Objective Long-wave infrared (LWIR, 6-18 μm), as the core band of the atmospheric window, holds significant potential for applications in fields such as infrared imaging, target detection, solar photothermal power generation, and electromagnetic stealth. Traditional infrared absorbing materials, limited by the intrinsic electromagnetic properties of natural materials, generally face technical bottlenecks including narrow bandwidth, large thickness, and angle sensitivity. As an artificial composite material with subwavelength periodicity, metamaterials can break the limit of electromagnetic regulation of natural materials by precisely designing the equivalent permittivity and permeability of the unit structure, thus paving a new way for broadband infrared absorption technology. Researchers have gradually expanded the absorption bandwidth and performance of metamaterial absorbers through strategies such as coupling of multi-resonator units, design of composite dielectric layers, and optimization of topological structures. Nevertheless, the design of broadband metamaterial absorbers still faces three core challenges: first, most design schemes rely on the planar integration of multi-sized resonant units (such as multi-ring and multi-disk structures), and such horizontal integration tends to increase the unit cell size, which is unfavorable for device miniaturization; second, although multi-layer structures can improve absorptivity and broaden the bandwidth to a certain extent through resonant coupling,

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62366015), Key Natural Science Research Project of Anhui Universities (2025AHGXZK20085), Outstanding Young Faculty Development Project of Anhui Provincial Department of Education (YQYB2025028), and University Project of Huainan Normal University (2025HX478, 2023hsjyxm04)

*Correspondence: Wang Y, E-mail: yangwang91@163.com

an excessive number of structural layers complicates the device architecture, hindering its engineering applications; third, the fabrication of some high-performance devices depends on noble metals (e.g., gold and silver), resulting in high manufacturing costs and poor scalability, which limits their large-scale engineering applications. Therefore, this work aims to design a metamaterial absorber with a simple structure, high absorptivity, and broad operational bandwidth, which is expected to have important practical application prospects in infrared imaging, infrared stealth, infrared sensing and other fields.

Methods To address the above issues, a broadband high-absorption embedded multilayer metamaterial absorber is proposed based on the concepts of multimode resonance coupling, composite dielectric layer regulation, and impedance matching theory. First, through the design of multilayer resonant units and embedded cylindrical structures, localized surface plasmon resonance (LSPR), propagating surface plasmon resonance (PSPR) and cavity resonance are simultaneously excited within the subwavelength unit, enabling broadband superposition of multiple resonance peaks. Second, a Ti-Si_3N_4 composite structure is adopted, which introduces a low-permittivity Si_3N_4 layer and a high-loss metal Ti layer. The Ti layer enhances the local confinement of the surface plasmon resonance (SPR) field, while the Si_3N_4 layer broadens the bandwidth through intrinsic absorption and energy coupling effects. Meanwhile, the optimized impedance matching design for the two material layers effectively reduces interface reflection loss. Finally, the centrosymmetric design of the unit structure ensures excellent absorption performance over an incident angle range of 0° to 60°, satisfying the angle adaptability requirements in complex application scenarios. The finite-difference time-domain (FDTD) method is used to analyze the absorption performance and explore the physical mechanisms underlying the broadband high-absorption characteristics, providing a theoretical basis for the design of the absorber.

Results and Discussion The resonant unit of the metamaterial absorber consists of stacked Si_3N_4, Ti, and Si_3N_4 rectangular layers, with Ti cylindrical structures integrated within the upper Si_3N_4 layer. FDTD simulations show that the absorption spectrum of the absorber exhibits absorption peaks of 99.5%, 99.9%, and 99.8% at wavelengths of 8.61 μm, 14.76 μm, and 15.27 μm, respectively. In addition, the absorber maintains an absorption of over 90% in the wavelength range of 7.92 μm to 16.45 μm, corresponding to an absorption bandwidth of 8.53 μm, and exhibits excellent impedance matching within this band. The absorber features polarization insensitivity, with an average absorption of 91.9% across the 0° to 90° polarization angle range. This polarization insensitivity is mainly due to the structural symmetry of the designed absorber, which results in similar optical responses at all polarization angles, thus reducing the influence of polarization angle. Furthermore, the absorber exhibits wide-angle absorption characteristics; under 60° oblique incidence, the average absorptivity for the TM and TE modes remains at 90% and 76%, respectively. Mechanism analysis demonstrates that the broadband and high-absorption characteristics of the absorber mainly arise from the synergistic coupling of LSPR, cavity resonance, and PSPR.

Conclusion Based on multilayer stacked structures and impedance matching theory, a broadband high-absorption metamaterial absorber is designed, whose unit consists of a three-layer Si_3N_4-Ti-Si_3N_4 stack with Ti cylinders embedded in the upper Si_3N_4 layer. The high-loss metal Ti can excite SPR to enhance broadband absorption, and Si_3N_4 exhibits favorable intrinsic absorption and SPR coupling effects in the infrared band; thus, the Ti-Si_3N_4 composite structure achieves improved absorption efficiency and a broadened absorption bandwidth. FDTD simulations show that the designed absorber exhibits excellent absorption performance in the 7 μm to 18 μm band, with an absorption rate exceeding 90% in the wavelength range of 7.92 μm to 16.45 μm, corresponding to an absorption bandwidth of 8.53 μm. The adoption of a symmetric patterned structure design endows the absorber with polarization insensitivity, and the average absorption rate remains at 91.9% at all polarization angles. In addition, the absorber also demonstrates excellent wide-angle absorption performance; under 60° oblique incidence, the average absorption rates of the TM and TE modes reach 90% and 76%, respectively. Mechanism investigation demonstrates that the broadband and high-absorption characteristics of the absorber mainly arise from LSPR excited on the surface of Ti cylinders, cavity resonance between units, and PSPR at metal-dielectric interfaces. The coupling between various resonances further enhances the absorption performance and broadens the absorption bandwidth. This absorber integrates the excellent properties of broadband absorption, high absorption rate, polarization insensitivity, and wide-angle absorption, showing potential application value in fields such as energy harvesting and optical detection. It also provides an important reference for the structural design and performance optimization of broadband high-absorption metamaterial absorbers in the infrared band.

Keywords: metamaterials; absorber; infrared; broadband

Shen X B, Wang Y. Design of high-efficiency metamaterial absorber with embedded structure for the long-wave infrared region[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(6): 260052; DOI: 10.12086/oee.2026.260052

Opto-Electronic Journals Group
www.oejournal.org

扫描二维码，获取 PDF 全文