

# 用于热电堆探测器的宽带超表面完美吸收器设计

姬迪洋<sup>1</sup>, 李腾腾<sup>1</sup>, 雷程<sup>1\*</sup>, 李丰超<sup>1</sup>, 郝亚峰<sup>1</sup>, 郭晋竹<sup>2</sup>, 梁庭<sup>1</sup>

(1. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中电科风华信息装备股份有限公司, 山西 太原 030062)

**摘要:** 宽带超表面完美吸收器以其高吸收率、超薄厚度和易于制备的优势, 在热电堆红外探测器、热成像、微测辐射热计和热光伏太阳能转换多个领域中展现出巨大的应用潜力, 但由于受到入射角度的影响, 通常很难在宽带范围内保持高吸收性能。设计了一种用于红外热电堆的 Ti/Ge/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Ti 中红外宽带超表面完美吸收器, 时域有限差分模拟表明, 该吸收器在 8~14 μm 波长范围内平均吸收率为 90.5%, 且在 8.786 μm 和 13.181 μm 处的吸收率分别为 99.6% 和 97.1%, 相对吸收带宽可达到 15.9%。经理论计算分析得到, 这种高效的吸收行为是由于超表面周期性结构激发的等离子体共振和吸收器自身结构谐振混合的共同作用。与热电堆红外探测器集成后, 热端和冷端之间的温差提升 27%, 器件性能得到有效提升。

**关键词:** 光学器件; 超表面; 高吸收率; 宽带; 热电堆

**中图分类号:** O436

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025041

**引用格式:** 姬迪洋, 李腾腾, 雷程, 等. 用于热电堆探测器的宽带超表面完美吸收器设计[J]. 测试技术学报, 2025, 39(3): 330-336.

Ji Diyang, Li Tengting, Lei Cheng, et al. Broadband metasurface perfect absorber design for thermopile detectors[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(3): 330-336.

## Broadband Metasurface Perfect Absorber Design for Thermopile Detectors

Ji Diyang<sup>1</sup>, Li Tengting<sup>1</sup>, Lei Cheng<sup>1\*</sup>, Li Fengchao<sup>1</sup>, Hao Yafeng<sup>1</sup>, Guo Jinzhu<sup>2</sup>, Liang Ting<sup>1</sup>

(1. State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051;

2. CETC Fenghua Information-Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030062, China)

**Abstract:** Broadband metasurface perfect absorber with the advantages of high absorption rate, ultra-thin thickness and easy to prepare, shows a great potential application in several fields such as thermopile infrared detectors, thermal imaging, microbolometer, and thermal photovoltaic solar energy conversion. But it is usually difficult to maintain the high absorption performance in the broadband range due to the effects of the incidence angle. In this paper, a Ti/Ge/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Ti mid-infrared broadband metasurface perfect absorber for infrared thermopiles is designed, and Finite Difference Time Domain simulations show that the absorber has an average absorptivity of 90.5% in the wavelength range of 8~14 μm, and the absorp-

**收稿日期:** 2024-07-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(62301509, 62304209); 山西省科技重大专项“揭榜挂帅”资助项目(202201030201010); 山西省基础研究计划资助项目(202203021222079, 20210302123203)

**作者简介:** 姬迪洋(2001-), 女, 硕士生, 主要从事超表面及MEMS红外探测研究。E-mail: 18835378932@163.com。

\* **通信作者:** 雷程(1987-), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事MEMS技术研究。E-mail: leicheng@nuc.edu.cn。

tivity at 8.786  $\mu\text{m}$  and 13.181  $\mu\text{m}$  is 99.6% and 97.5%, respectively. The relative absorption bandwidth can reach 15.9%. After theoretical calculation and analysis, this efficient absorption behavior is due to the combined effect of the plasma resonance excited by the metasurface periodic structure and the resonant mixing of the absorber's structure. After integration with a thermopile infrared detector, the temperature difference between the hot and cold ends is improved by 27%, and the device performance is effectively enhanced.

**Key words:** optical devices; metasurface; high absorptivity; broadband; thermopile

## 0 引言

自然界中存在着诸多由光照引起的物理现象,如光照射到物体表面时,可能会被物体吸收,还有可能直接穿过物体或因物体表面材料中晶格原子的排列方式而被物体反射无法吸收<sup>[1-2]</sup>。超表面通过对材料特性及结构参数的精确设计,可实现对入射光透射、反射、吸收行为的调控,能有效调节光的相位、偏振及传播角度等关键参数<sup>[3]</sup>。基于此,研究中红外波段超表面完美吸收器时,可通过优化光与结构的相互作用机制来提升宽谱吸收性能。2008年,Landy等<sup>[4]</sup>提出了第一个近乎完美的超表面吸收器,使超表面的设计与应用成为研究热点。许多研究人员通过设计使超表面吸收器具有宽带的高吸收率,角度不敏感性,并且制备工艺简单的优点。本文通过改变结构层的材料、尺寸和厚度等条件,得到所需的吸收效率,并将其应用到热电堆红外探测器中。

如今热电堆红外探测器已广泛应用于非接触式红外测温仪<sup>[5]</sup>、非色散红外气体探测器<sup>[6-7]</sup>和热像仪<sup>[8-10]</sup>等传感元件。热电堆红外探测器吸收区的吸收性能是近年来的主要研究方向,传统红外探测器吸收区并不能实现高的吸收性能。在大多数热电堆红外探测器中,探测器将冷热结之间的温差转换为输出电压,而这个温差取决于吸收区的吸收性能。因此,吸收区在热电堆芯片的制备中至关重要。而超表面完美吸收器则主要致力于吸收性能的提升。基于此,将超表面完美吸收器与热电堆红外探测器结合用于提升红外探测器的吸收性能。最近,研究学者提出了很多超表面完美吸收器和红外探测器吸收区集成的方案。Lin等<sup>[10]</sup>设计了一种将金属/绝缘/金属型等离子体超表面吸收器集成于蛇形薄膜微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)红外热电堆探测器,使响应度提升20%;Feng等<sup>[11]</sup>基于电子

束光刻的自对准工艺,将绝缘体上的硅纳米线阵列集成到红外探测器中,实现了全硅的近红外探测;Li等<sup>[12]</sup>将纳米森林和金属纳米粒子组成的宽带吸收器集成到热电堆上,吸收器在300~2500 nm吸收率超过90%;Yeh等<sup>[13]</sup>将矩形柱状和椭圆柱状结构阵列集成至互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)热电堆探测器,吸收效率分别提升14.4%和15.2%。

本文提出了一种基于金属/介质/金属的类三明治结构的超表面完美吸收器,其与热电堆红外探测器吸收区集成,在8~14  $\mu\text{m}$ 范围可以实现热电堆红外探测器吸收区所需的人射角不敏感和高吸收特性,入射角度60°不敏感,吸收率超过80%。与现有工作相比,所提超表面吸收器的吸收率在宽波长范围实现大入射角度吸收效率。

## 1 基本原理

### 1.1 理论基础

热电堆结构大多采用氧化硅和氮化硅复合膜作为支撑层,大面积的热电偶阵列在支撑层上。为提升吸收性能,主要有以下两种手段:热结尽可能向中心靠近,热电堆上整层沉积 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 层、 $\text{SiO}_2$ 层或 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 夹层膜结构等常被用作热电堆芯片的红外吸收体<sup>[14-17]</sup>;具有Ge等抗反射层的干涉吸收器结构作为吸收体<sup>[18]</sup>,但其红外吸收效率低,吸收范围窄。因此,提出8~14  $\mu\text{m}$ 红外超表面完美吸收器来提升热电堆红外探测器的吸收效率。热电堆红外探测器是基于塞贝克效应,导体或半导体材料A与B以串联形式的电路连接,当A、B两端有温差时,就会产生电势差,塞贝克效应原理图如图1所示。

基于塞贝克效应,热电堆红外探测器会产生响应电压 $\Delta U$ 为<sup>[19]</sup>

$$\Delta U = NT_{\text{diff}} \alpha_{\text{AB}}, \quad (1)$$

式中： $N$ 为热偶条的对数； $T_{\text{diff}}$ 为热端和冷端的温差； $\alpha_{\text{AB}}$ 为材料A和材料B的塞贝克系数差。根据式(1)可知冷热端温差和输出电压成比例关系，由于热电堆红外探测器热端的温度与吸收区的吸收性能有关，探测器的吸收效率提高，冷热端之间的温度差提升，器件性能可有效提升。

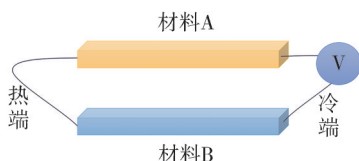


图1 塞贝克效应原理

Fig. 1 Principle of the Seebeck effect

超表面器件根据具体的工作模式，可以将超表面分成透射式、反射式和吸收式3种类型。超表面完美吸收器是一种由超表面组成的吸收式结构，它利用表面等离子元谐振效应来增强自身的电磁场，进而增强吸收率。根据光与物质作用的基本原理，超表面完美吸收器的设计主要遵循以下两个方面：最小化空气和金属材料界面的反射和稳固光耦合实现光能的高吸收。吸收率表达式为<sup>[20]</sup>

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda), \quad (2)$$

式中： $A(\lambda)$ 为吸收率； $R(\lambda)$ 为反射率； $T(\lambda)$ 为透射率。

超表面的特殊性质由表面结构尺寸和各层材料共同决定，这意味着超表面性质的计算会十分复杂，难以给出电磁性质的直接计算。为了增强结构对入射光的吸收，可以从以下三方面进行：最小化入射光的透射，所用基底材料为金属可以很大程度上防止入射光透过；最小化入射光的反射，就必须抑制电磁的消耗，将电磁场局限在器件中；选择与环境阻抗相匹配的材料<sup>[21]</sup>。

## 1.2 结构设计

超表面完美吸收器的结构一般为金属/介质/金属类三明治结构，根据上文分析，所选择的底层金属Ti可以很大程度上防止入射光透过，使透射率趋近于0，同时，由于Ti是高损耗介质，位于顶层可扩大共振峰，使响应带宽增大<sup>[22]</sup>；介质层Ge为无损介质， $\text{Si}_3\text{N}_4$ 和 $\text{SiO}_2$ 为有损介电材料， $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 为损耗层，这有助于防止金属的欧姆吸收，从而实现低欧姆损耗宽带吸收，Ge实现更长波长范围的吸收率调控<sup>[23]</sup>，金属/介质/金属共同调控光吸收效率，从而得到高吸收率。基于此对结构进行设计，其中结构在 $x$ 和 $y$ 方向上的周期

$p=1.6 \mu\text{m}$ ， $\text{Ti}_{\text{top}}$ 的尺寸分别为 $h_1=0.02 \mu\text{m}$ ， $l_1=0.8 \mu\text{m}$ ， $l_2=0.6 \mu\text{m}$ ， $w_1=0.2 \mu\text{m}$ ，Ge的厚度 $h_2=0.30 \mu\text{m}$ ， $\text{Si}_3\text{N}_4$ 的厚度 $h_3=0.15 \mu\text{m}$ ， $\text{SiO}_2$ 的厚度 $h_4=0.15 \mu\text{m}$ ， $\text{Ti}_{\text{bottom}}$ 的厚度 $h_5=0.12 \mu\text{m}$ ，各部分材料的介电常数采用Palik设计的实验值<sup>[24]</sup>。结构尺寸如图2所示。模型建立好后，使用时域有限差分算法(Finite Difference Time Domain, FDTD)对吸收器的吸收效率进行仿真分析。在FDTD软件中设置仿真区域，将光源和反射率、透射率监视器包含在内，在 $x$ 和 $y$ 的方向设置period边界条件，在 $z$ 传播方向设置完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)，结构上方 $8 \mu\text{m}$ 处的平面波沿着 $z$ 轴的负方向入射，并设置波段在 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 。本结构在制备过程中，制备难点主要在于所设计的顶层结构尺寸为纳米级，制备时对光刻工艺精度要求较高，因此在制备顶层结构时可以选择纳米压印等工艺实现，或在设计光刻版图时进行适当的曝光补偿实现纳米级尺寸的图形化。

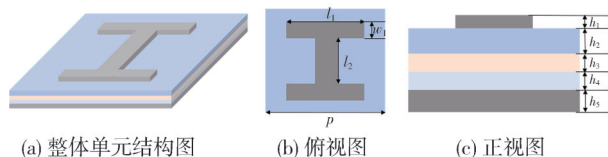


图2 超表面完美吸收器单元结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the metasurface perfect absorber unit structure

## 2 结果与分析

### 2.1 吸收特性分析

采用FDTD研究超表面完美吸收器结构的吸收率，模拟了结构的透射率 $T(\lambda)$ 和反射率 $R(\lambda)$ 特性，利用式(1)描述了透射率 $T(\lambda)$ 、反射率 $R(\lambda)$ 和吸收率 $A(\lambda)$ 之间的关系，并根据透射率 $T(\lambda)$ 和反射率 $R(\lambda)$ 的结果计算了结构的吸收率 $A(\lambda)$ 。根据图3所示，虽然 $8\sim 14 \mu\text{m}$ 范围内所设计的超表面完美吸收器有一个吸收波谷，吸收器表现较弱，但整体平均吸收率仍可达到90.5%。器件的高吸收率主要源自于两个吸收峰的贡献，在吸收峰处吸收率大于95%。经过后期分析，该吸收器在 $8.786 \mu\text{m}$ 和 $13.181 \mu\text{m}$ 处的吸收率分别实现99.6%和97.1%的近完美吸收。并且在两个吸收峰附近 $1.5 \mu\text{m}$ 的波段内吸收率可持续大于90%，其余波段吸收率大于80%，总体吸收性能较好。

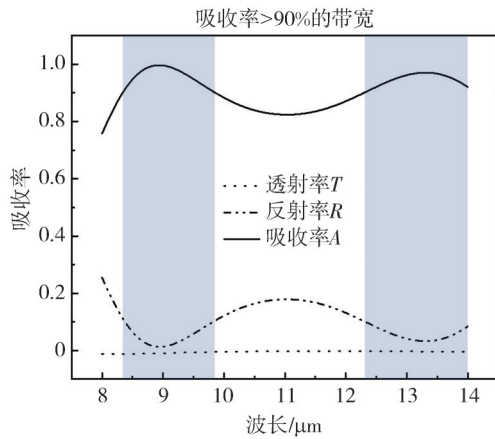


图 3 超表面完美吸收器的吸收光谱图

Fig. 3 Absorption spectra of metasurface perfect absorber

相对吸收带宽( $X_{BW}$ )是信号带宽和中心频率的比,表示为

$$X_{BW} = 2 \left( \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{\lambda_{max} + \lambda_{min}} \right), \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{max}$  和  $\lambda_{min}$  分别为最大和最小波长,且在该波段内的吸收率均高于 90%。相对带宽比例小于 1% 为窄带(Narrow Band),相对带宽比例在 1%~25% 为宽带(Wide Band),相对带宽比例大于 25% 为超宽带(Ultrawide Band)<sup>[25]</sup>。计算本吸收器吸收带宽,得到设计的完美吸收器的相对吸收带宽可达到 15.9%,属于宽带。

对所设计的超表面完美吸收器各层材料和整体器件在 8~14 μm 波段进行吸收率模拟仿真。如图 4(a),可以看到,Ge 主要提升器件整体的吸收率,Ti 虽然单层吸收率低,但是底层 Ti 作为金属层可保证入射的红外光无法穿透,使入射光的透射率趋近于 0,且 Ti 结构化和介质层 Ge、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 材料结合,共同调控光吸收效率,得到了高吸收率。

为了进一步评估顶层 Ti 结构在吸收器中的作用,图 4(b) 绘制了采用不同材料的顶层结构吸收器的吸收率。其中,顶层结构材料为 Ti 和 Al 的吸收率较高,均大于 60%,Ti 材料的吸收器吸收率更集中在 80% 以上,而其他材料吸收率近似,处于较低水平。由于消光系数较高,光波在吸收性介质中传播时对光能的吸收效率增大,因此,使用 Al 作为顶层工字形材料的吸收器在 8~14 μm 范围内具有好的吸收能力。然而,Ti 更适合限制介电层中的电磁场,形成更高的局域电磁场谐振,因此,顶层为 Al 材料的吸收器的吸收能力比 Ti 差。对于使用 Au、Ag 和 W 做顶层材料的吸收

器,Au、Ag 和 W 的整体低的消光系数导致吸收能力比使用 Ti 材料的器件更差。结果表明,使用 Ti 材料对本文吸收器结构的吸收效率更理想。

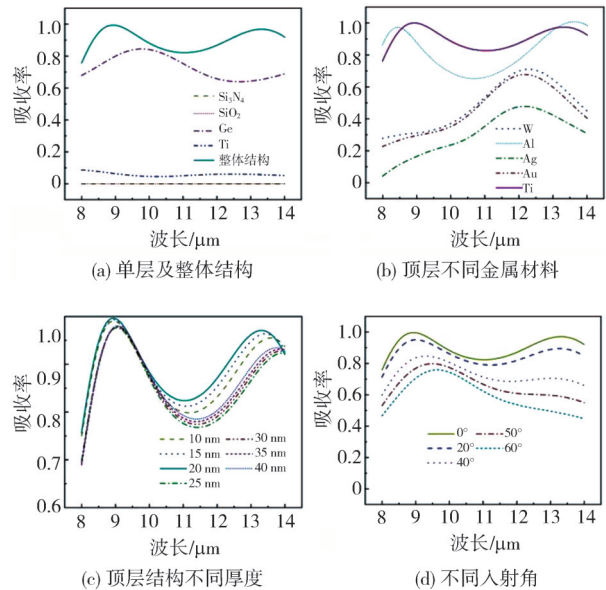


图 4 超表面完美吸收器在 8~14 μm 吸收光谱  
Fig. 4 Absorption spectra of metasurface perfect absorber at 8~14 μm

为了保证上述吸收器结构在工艺厚度误差下仍具有较高的吸收率,图 4(c) 显示了吸收器顶层 Ti 结构厚度误差在 20 nm 内的 7 组吸收光谱。由图可知,本文使用的参数( $h_1=20$  nm)吸收效率最高。当顶层金属 Ti 厚度变化时,也可以明显看出所提出的红外宽带超表面完美吸收器在设计中有较大的误差允许范围,这样的性能极大地降低了实际加工的精度要求<sup>[26]</sup>。

同时,对不同入射角度的吸收效率进行仿真,结果如图 4(d) 所示。当入射光以角度  $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$  照射超表面时,30° 的入射角度下,吸收率几乎保持在 80% 以上。对于入射角在 30°~60° 的范围内,吸收光谱仅略微下降,仍在可以接受的范围内,整体吸收率高于 50%。随着入射角的增大,平均吸收率随带宽起伏逐渐减小,光耦合和吸收的强度减弱。因此,根据图 4(d) 可知,当入射角不断增大时,吸收器在波长 8~9.5 μm 和 11.5~14 μm 区域,不同入射角的吸收率整体处于上升趋势,具有较高的平均吸收率;当波长大于 9.5 μm 时,不同入射角的吸收率整体处于下降趋势,但该吸收器整体吸收率高于 50%。因此,吸收器在一定程度上表现出角度不敏感。

## 2.2 物理机制分析

为了揭示超表面完美吸收器的物理机制,验证超表面完美吸收器的吸收性能,对该吸收器的电磁场进行仿真分析。电场的能量分布如图 5(a)~(c) 所示。入射光波能够与纳米结构中的微小空气间隙相互耦合,由图 5(a)~(c)可知,

本文的这种耦合发生在具有特定“工”字形的纳米结构中,并且分布在相邻单元之间和金属结构周围,使金属结构的角落或相邻单元之间形成局部增强的电场。由于在纳米结构中,表面等离子激元被激发,从而产生由其透导的光吸收<sup>[27]</sup>,即当入射光的频率与表面等离子激元的共振频率匹配时,会发生强烈的光吸收。

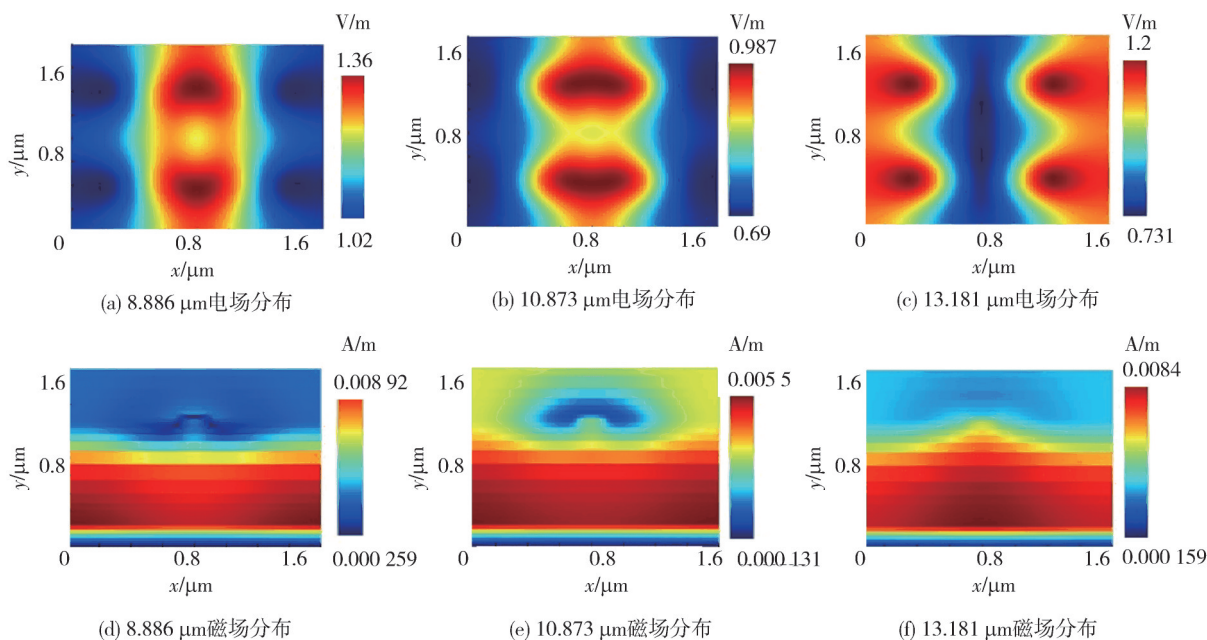


图 5 电场 E 和磁场 H 在不同波长处的分布情况

Fig. 5 Distribution of electric field E and magnetic field H at different wavelengths

磁场的能量分布如图 5(d)~(f) 所示。磁场在结构上方区域被增强,高吸收来源于结构较小尺寸处的局域表面等离子激元共振。从图 5(e) 可以看到,入射光通过激发局域共振可以将其耦合到结构周围,并在结构下方区域中进一步激发传导表面等离子激元,介质层的磁场强度不断增强,将入射光局限在吸收器中,因此,局域表面等离子激元和传导表面等离子激元共振是实现高吸收的原因。从图 5(d)和(f)能够看出,磁场主要汇聚于吸收器中间的介质层之中,在入射光穿过顶部金属时,顶部金属与介质相交面的表面等离子体能够相互作用,进而把磁场聚集在介质层,而底层金属发挥防透射的作用,避免光穿过吸收器,以此来增强光吸收效率。图 5(d)和(f)进行对比发现,在两个吸收峰的作用下,磁场分布较为相似,几乎没有磁场被反射,验证了 Ti 适合限制介电层中的磁场,形成更高的局域谐振增强。而在吸收光谱的波谷处,顶部金属-介质结构表面等离子体共振产生的磁场强度较低,并没有将大部分光聚

集在介质层,因此导致该波长处的吸收率较低。尽管如此,吸收器的吸收率在 8~14  $\mu\text{m}$  保持 70% 以上,与理论设计值的吸收效果趋势相同。因此,波谷处较低的磁场强度对吸收器的整体性能并没有太大影响。

对于超表面的设计来说,本文同时兼顾了入射角度、吸收带宽和吸收效率之间的关系,在保证所需带宽范围内,实现了入射角度不敏感、宽带的较高吸收水平。本文与之前类似文献的比较如表 1 所示,通过比较可以看出,本文所提吸收器具有更好的吸收效果和稳定性。

对于典型的热电堆器件<sup>[28]</sup>,热电偶条热端和冷端之间的温差会产生热电流,从而产生响应电压。对于吸收器集成热电堆吸收区,可以大大增强吸收区对入射光的吸收,吸收效率提升,热偶条的热端和冷端之间的温差提升,从而使响应电压提升。集成前和集成后的平均吸收效率分别为 90.5% 和 45%。通过 ANSYS 仿真软件进行模拟仿真,结果如图 6 所示,与传统热电堆红外探测

器对比,热端和冷端之间的温差提升 27%,有效发挥超表面完美吸收器的吸收性能和稳定性。

表 1 所提结构与调研文献结构的比较

Tab. 1 Comparison of the proposed structure with the structure of the research literature

表面结构	材料	平均吸收率/%	>90%吸收带宽λ/μm	来源
方形	Si/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	90.36	1	文献[29]
圆形	Graphene/Si	90.00	1	文献[30]
梯形	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /MXenes/Ag	93.19	2.8	文献[31]
“工”形	Ti/SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ge/Ti	90.50	3.5	本文

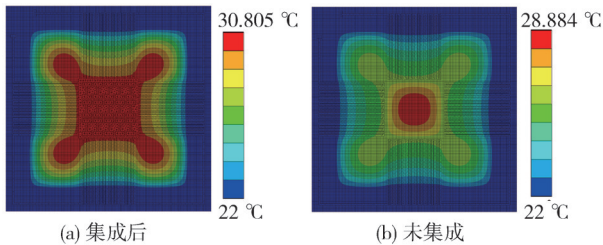


图 6 吸收区与超表面完美吸收器集成前后对比

Fig. 6 Comparison of the absorption region with the metasurface perfect absorber before and after integration

### 3 结论

本文设计了一种基于 Ti/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ge/Ti 的类三明治复合结构红外宽带超表面吸收器,采用“工”形顶层 Ti 结构。仿真结果表明,该吸收器在 8.786 μm 和 13.181 μm 处的吸收率分别实现 99.6% 和 97.1% 的近完美吸收,且在两个波长附近 1.5 μm 的波段内吸收率可持续高于 90%,相对吸收带宽达到 15.9%。值得注意的是,该器件在 0~60° 入射角范围内表现出良好的角度不敏感性,平均吸收率为 90.5%。工艺适应性分析表明,当顶层 Ti 厚度在 20 nm 工艺误差范围内变化时,吸收率的变化与理论设计值的变化趋势相同,对本文吸收器结构的吸收效率影响较小,这样极大地降低了实际加工的精度要求。因此,将所设计的红外宽带超表面完美吸收器与热电堆红外探测器的吸收区集成,吸收率增强使其温差提高 27%,从而提升输出响应。其优越的性能也为红外热成像、微测辐射热计和热光伏太阳能转换等领域的发展提供了重要参考。

#### 参考文献:

[ 1 ] LIU Z, LIU G, HUANG Z, et al. Ultra-broadband perfect solar absorber by an ultra-thin refractory titanium nitride meta-surface[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 179: 346-352.

[ 2 ] 霍德旺. 氮化钛基超表面宽带完美吸收特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[ 3 ] 李腾腾, 朱璞, 郝亚峰, 等. 微结构太赫兹调制技术

研究进展[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 455-466.

LI Tengting, ZHU Pu, HAO Yafeng, et al. Advances in microstructured terahertz modulation techniques[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 455-466. (in Chinese)

[ 4 ] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.

[ 5 ] CHEN C N. Temperature error analysis and parameter extraction of an 8-14 μm thermopile with a wavelength-independent absorber for tympanic thermometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(10): 2310-2317.

[ 6 ] UDINA S, CARMONA M, CARLES G, et al. A micromachined thermoelectric sensor for natural gas analysis: thermal model and experimental results[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 134(2): 551-558.

[ 7 ] RONCAGLIA A, MANCARELLA F, CARDINALI G C. CMOS-compatible fabrication of thermopiles with high sensitivity in the 3 - 5μm atmospheric window[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2007, 125(1): 214-223.

[ 8 ] SCHAUFELBUHL A, SCHNEEBERGER N, MUNCH U, et al. Uncooled low-cost thermal imager based on micromachined CMOS integrated sensor array [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2001, 10(4): 503-510.

[ 9 ] LI Y, ZHOU H, LI T, et al. CMOS-compatible 8 × 2 thermopile array [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 161(1/2): 120-126.

[ 10 ] LIN P S, SHEN T W, CHAN K C, et al. CMOS MEMS thermoelectric infrared sensor with plasmonic metamaterial absorber for selective wavelength absorption and responsivity enhancement[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(19): 11105-11114.

[ 11 ] FENG B, ZHU J, LU B, et al. Achieving infrared detection by all-Si plasmonic hot-electron detectors with high detectivity[J]. ACS Nano, 2019, 13(7): 8433-8441.

- [12] LI M, SHI M, WANG B, et al. Quasi-ordered nano-forests with hybrid plasmon resonances for broadband absorption and photodetection [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(38): 2170279.
- [13] YE H Y, SHEN C H, CHEN C F. Infrared absorption efficiency enhancement of the CMOS compatible thermopile by the special subwavelength hole arrays [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 2966.
- [14] LENGGENHAGER R, BALTES H, PEER J, et al. Thermoelectric infrared sensors by CMOS technology [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1992, 13(9): 454-456.
- [15] JUTZI F, WICAKSONO D H B, PANDRAUD G, et al. Far-infrared sensor with LPCVD-deposited low-stress Si-rich nitride absorber membrane Part 2: Thermal property, and sensitivity [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 152(2): 126-138.
- [16] XU D, XIONG B, WANG Y. Design, fabrication and characterization of a front-etched micromachined thermopile for IR detection [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(11): 115004.
- [17] LEI C, GUAN Y, LIANG T, et al. Micromachined infrared thermopile detector based on a suspended film structure [J]. *Photonic Sensors*, 2023, 13(3): 230309.
- [18] HOU H, HUANG Q, LIU G, et al. Enhanced performances of CMOS-MEMS thermopile infrared detectors using novel thin film stacks [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102: 103058.
- [19] XU D, WANG Y, XIONG B, et al. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: a review [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(4): 557-566.
- [20] LEE D, HWANG J G, LIM D, et al. Incident angle- and polarization-insensitive metamaterial absorber using circular sectors [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27155.
- [21] 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.
- [22] ZHOU Y, QIN Z, LIANG Z, et al. Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime [J]. *Light, Science & Applications*, 2021, 10(1): 138.
- [23] LI X, LI Q, WU L, et al. Focusing on the development and current status of metamaterial absorber by bibliometric analysis [J]. *Materials*, 2023, 16(6): 2286.
- [24] JERRARD H G. Handbook of optical constant of solids [J]. *Optics & Laser Technology*, 1986, 18(2): 104.
- [25] 周书娟. 宽带米波雷达信道化接收技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [26] 娄现超. 基于等离激元的宽带红外近完美吸收器研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [27] NIE S, EMORY S R. Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Science*, 1997, 275(5303): 1102-1106.
- [28] 王楷群. 热电堆红外探测器的设计与性能测试 [D]. 太原: 中北大学, 2010.
- [29] CHEN C, LIU Y, JIANG Z Y, et al. Large-area long-wave infrared broadband all-dielectric metasurface absorber based on markless laser direct writing lithography [J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13391-13403.
- [30] XU W, CHENG H, LUO X, et al. A tunable all dielectric perfect absorber based on hybrid graphene-dielectric metasurface in the mid-infrared regime [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, 55(3): 272.
- [31] WU J H, MENG Y L, LI Y, et al. Ultra-broadband, omnidirectional, high-efficiency metamaterial absorber for capturing solar energy [J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(19): 3515.