

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2024.11.007

基于氧化钒薄膜的双层红外焦平面阵列的设计与仿真

行琳^{1,2}, 王晗^{1,2}, 王如志^{1,2}

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124;
2. 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:随着红外探测器对高灵敏度、快速响应、低成本等性能要求日益增加,新型非制冷型微测辐射热计引起了人们极大关注与兴趣。设计了双层伞状镂空吸收层的微测辐射热计单元结构,对不同结构的性能进行了仿真分析。研究了吸收层厚度和面积对红外吸收率、热时间常数以及电压响应率的影响。结果表明,70 nm厚度的双层伞状结构吸收层红外吸收率达82.5%以上。优化后的设计模型,吸收层面积106.4 μm^2 、厚度70 nm,其响应时间为0.54 ms,展现出快速响应和高稳定性。电学仿真结果表明,在2 μA 偏置电流下,该结构具备7.384 $\times 10^{-8}$ W/K的有效热导率和2.461 $\times 10^5$ V/W的响应率,适用于制备高性能快速响应非制冷红外焦平面探测器,为非制冷红外探测器的制备和电路设计提供了可行的理论指导。

关键词:微测辐射热计;氧化钒;非制冷红外探测;有限元仿真

中图分类号:TN215;TB34

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2024)11-0058-08

Design and Simulation of Double Layers Infrared Focal Plane Arrays Based on Vanadium Oxide Films

XING Lin^{1,2}, WANG Han^{1,2}, WANG Ruzhi^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Key Laboratory of Novel Functional Materials, Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: With the increasing requirements of infrared detectors for high sensitivity, fast response, low cost and other performance parameters, the new uncooled microbolometer has attracted great attention and interest. In this paper, a micro-radiometric thermopile unit structure with a bilayer umbrella-shaped hollow absorption layer was designed, and the performances of different structures was analysed by simulation. The effects of the thickness and area of the absorber layer on the infrared absorption rate, thermal time constant and voltage response rate were investigated. The results show that the infrared absorption rate of the absorbing layer of the bilayer umbrella structure with a thickness of 70 nm exceeds 82.5%. The response time of the optimized design model with an absorbing layer area of 106.4 μm^2 and a thickness of 70 nm, with a response time of 0.54 ms, demonstrating fast response and high stability. Electrical simulation results show that the structure possesses an effective thermal conductivity of 7.384 $\times 10^{-8}$ W/K and a response rate of 2.461 $\times 10^5$ V/W under a bias current of 2 μA , which is suitable for preparing high-performance fast-response uncooled infrared focal-plane detectors and provides a good solution for the preparation and circuit design of uncooled infrared detectors. This provides feasible theoretical guidance for the preparation and circuit design of uncooled infrared detectors.

Key words: microbolometer; vanadium oxide; uncooled infrared detection; finite element simulation

收稿日期:2024-07-17

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2024B0101080002)

Fund: Supported by Guangdong Provincial Key Areas R&D Programme Project(2024B0101080002)

作者简介:行琳(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为红外芯片仿真。

通信作者:王如志(1973—),男,博士,教授,主要研究方向为新能源材料、新型半导体材料的设计、制备与器件应用。

引用格式:行琳,王晗,王如志,等.基于氧化钒薄膜的双层红外焦平面阵列的设计与仿真[J].有色金属工程,2024,14(11):58-65.

XING Lin, WANG Han, WANG Ruzhi. Design and Simulation of Double Layers Infrared Focal Plane Arrays Based on Vanadium Oxide Films [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(11): 58-65.

随着红外技术的不断发展和市场需求的增加,微测辐射热计以其高灵敏度、快响应、低成本、无需制冷、宽波段响应、简单可靠及微型化集成等特点,已成为红外辐射探测领域不可或缺的重要技术,广泛应用于民用与军事等领域^[1-3]。单层微测辐射热计仅包含一个吸收层,而双层微测辐射热计则在此基础上增加了一个额外的吸收层。双层结构通过两个吸收层之间的真空腔效应,显著提高了吸收效率和响应性能,特别是在低能量辐射下表现更为突出^[4]。然而,这种设计通常会带来制造成本的增加和器件的热容增大,从而导致响应速度降低。

本文基于双层伞状微测辐射热计,设计了一种像元尺寸为 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ 的双层伞状微测辐射热计镂空结构,在保持器件红外吸收能力的同时,降低器件热容以满足更高的电压响应需求。通过 COMSOL Multiphysics 计算软件对像元结构进行了详细的红外吸收、热学和电学特性的仿真模拟。讨论了不同吸收层厚度、面积及结构对探测器性能的影响,进一步优化设计出符合实际应用要求的最佳结构。

1 理论分析及模型

1.1 基本理论与吸收模型

用光学导纳矩阵法来分析具有多层结构的光学薄膜的光学特征。根据膜系在不同波长红外辐照时的特征矩阵,求出反射率 $R(\lambda)$ 和透射率 $T(\lambda)$:

$$R(\lambda) = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (1)$$

$$T(\lambda) = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (2)$$

式中: η_0 为入射介质即真空的光学导纳,由式(1)和式(2)得到膜系红外吸收光谱 $A(\lambda)$:

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) \quad (3)$$

1.2 热学温度模型

在红外辐射作用下,物体的温度变化 ΔT ^[5-7] 由以下公式定义:

$$|\Delta T| = \frac{\varepsilon \varphi}{K_{\text{eff}} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{\text{th}}^2}} \quad (4)$$

式中:温度梯度 ΔT 为探测器与基底之间的温度差, φ 为辐射热通量, ε 为器件的发射率, ω 为传感器吸收辐射有关的角频率, τ_{th} 为热时间常数, K_{eff} 为微测辐射热计的有效热导率。

微测辐射热计的电压响应度 R_v 定义为单位输

入光辐射功率获得的输出功率,其中 I_b 是偏置电流,可以用式(5)表示:

$$R_v = \frac{\eta R I_b}{K_{\text{eff}} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_{\text{th}}^2}} \quad (5)$$

C_{tot} 为器件总的热容,热时间常数^[8-9]的求解:

$$\tau_{\text{th}} = \frac{C_{\text{tot}}}{K_{\text{eff}}} \quad (6)$$

1.3 模型建立

伞状微测辐射热计通过增加有效吸收面积、降低热导率和提高光吸收率,显著提升了探测器的灵敏度。本文对传统微测辐射热计的伞状结构进行了性能研究,设计了不同的布局 and 面积的吸收层。图 1 展示了两种结构。图 1(a) 为传统微测辐射热计的侧视图,图 1(b) 为主视图,图 1(c) 为设计的双层微测辐射热计俯视图,图 1(d) 为结构的主视图。相较于实际结构,本文结构进行了部分简化,伞状结构采用吸收层镂空结构,以减少热容。

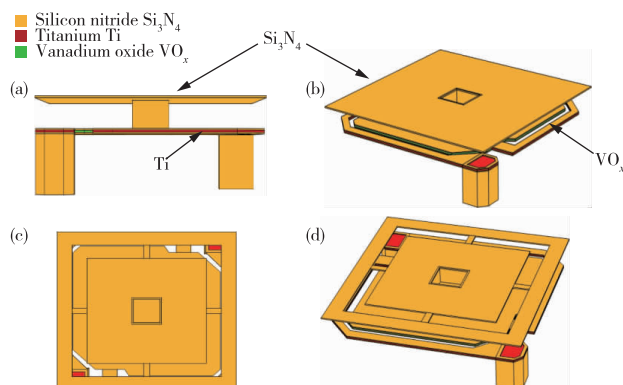


图 1 (a)传统双层微测辐射热计的侧视图;(b)主视图;
(c)双层微测辐射热计镂空俯视图;(d)主视图

Fig. 1 (a) The side view of the traditional double-layer microbolometer; (b) Main view; (c) Top view of skeletonized double-layer microbolometer; (d) Main view

本文设计的微测辐射热计单元结构尺寸为 $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$,采用 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{VO}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ 夹层真空谐振腔结构。 Si_3N_4 作为伞状结构的吸收层材料、桥面结构支撑层与钝化层材料;Ti 用作桥腿电极材料。伞状吸收层材料与双层结构的材料相同。其中, VO_x 的面积为 $89.85\ \mu\text{m}^2$,桥腿的宽度为 $0.5\ \mu\text{m}$,桥腿长度为 $20.12\ \mu\text{m}$ 。 Si_3N_4 桥面的总厚度为 $100\ \text{nm}$, VO_x 的厚度为 $70\ \text{nm}$,Ti 电极的厚度为 $70\ \text{nm}$ 。伞状结构的下层真空腔的高度为 $2\ \mu\text{m}$,上层真空腔的厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 。材料的相关参数如表 1 所示,对应的材料折射率来自折射率数据库。

表 1 单元结构材料各项参数

Table 1 Parameters of unit structural materials

Material	Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Heat conductivity/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal capacity($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Temperature coefficient of resistivity/ K^{-1}
Si_3N_4	3 200	2	330	—
VO_x	4 340	5	500	-0.022
Ti	4 510	17	126	—

2 仿真计算与结果分析

2.1 吸收特性有限元分析

双层微测辐射热计增加了额外吸收层,实现了更高的填充系数,提高响应率。然而,双层设计会增加热容,降低器件的响应速度。为了研究吸收层对单元结构性能的影响,本文在双层结构的伞状吸收层上引入镂空结构。设计了不同吸收层厚度和镂空面积的伞状结构,对其进行红外吸收性能、热响应及热电偶特性的仿真分析。

针对氧化钒微型辐射热计的多层膜结构,将三

维结构简化为二维模型,假设电磁波垂直入射,各层为连续均匀的平面膜,探究在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段内改变各层膜厚对红外吸收率的影响。为了对比不同厚度与镂空面积吸收效果,图 2(a)和图 2(b)为伞状结构不同厚度的红外吸收特性,表 2 为不同伞状吸收层厚度的吸收变化。图 2(c)和图 2(d)为伞状镂空面积对光学吸收的影响。其中 T. 250 表示吸收层厚度为 140.8 nm ,吸收面积(不变)为 $140.8 \mu\text{m}^2$ 结构模型;A. 140.8 表示吸收面积为 $140.8 \mu\text{m}^2$,吸收层厚度(不变)为 70 nm 为结构模型。

如图 2(a)所示,当无镂空面积及其他参数保持

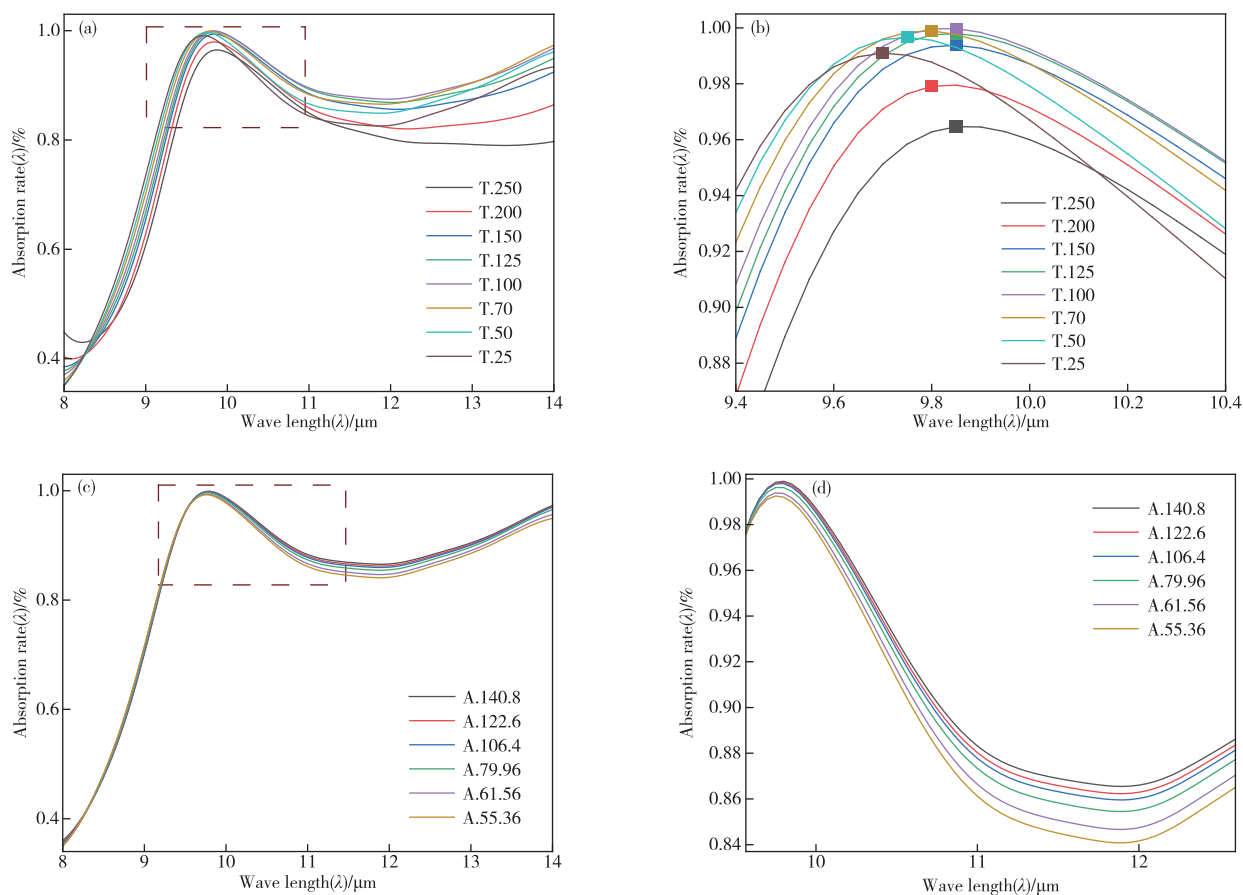


图 2(a) 双层微测辐射热计不同伞状吸收层厚度的红外吸收曲线; (b) 为 (a) 图局部放大图; (c) 不同镂空面积对结构光学吸收的影响; (d) 为 (c) 图局部放大图

Fig. 2(a) Infrared absorption curves of the bilayer microbolometer with different thickness of umbrella-shaped absorption layers; (b) Localised enlargement of Fig. (a); (c) The effect of different hollow areas on the optical absorption of the structure; (d) Localised enlargement of fig. (c)

不变时,在波长 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 范围内,吸收率曲线的波峰波谷位置基本不变,且峰值集中在 $9.8\ \mu\text{m}$ 附近,最大吸收率保持在 96% 以上。如表 2 所示,当吸收层厚度为 $100\ \text{nm}$ 时,平均吸收率达到 83.84% ,此时吸收率最高,最大吸收率为 99.985% 。从图 2 也可以看出,波长为 $8\sim 9.8\ \mu\text{m}$ 内,吸收率曲线随着厚度增加呈反比关系,吸收率逐渐减小。这可能是由于厚度增加,反射率增大的缘故。图 2(b)中,在波长为 $9.8\sim 14\ \mu\text{m}$ 、 $25\sim 100\ \text{nm}$ 膜厚,随着厚度的增加吸收率逐渐增加,在 $100\sim 250\ \text{nm}$ 范围内,吸收率曲线随着膜厚的增加逐渐减少。总体而言,在波长为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 范围内,平均吸收率从 $25\ \text{nm}$ 膜厚的 81.81% 增加到 $100\ \text{nm}$ 厚度的 83.84% ,随后

再减少到 $250\ \text{nm}$ 厚度的 77.18% , $100\ \text{nm}$ 厚度的吸收层在无镂空厚度中吸收效果最好。

根据图 1(d) 的模型仿真,当吸收层厚度为 $70\ \text{nm}$ 时,改变吸收层面积,对器件红外吸收的影响不显著。由图 1(d) 放大图可以看出,从无镂空面积 $140.8\ \mu\text{m}^2$ 到镂空后的面积 $55.36\ \mu\text{m}^2$,镂空面积的增加,使器件整体红外吸收率逐渐减少。从表 3 可以看出,在波长为 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 范围内,平均红外吸收率从 83.74% 略微下降到 82.5% ,变化较小。在 $9.8\ \mu\text{m}$ 附近,吸收曲线出现波峰,最大吸收率也随之降低,但整体仍保持在 99% 以上。与非镂空的双层微型辐射热计结构的仿真结果对比显示,双层镂空结构的器件面积变化对吸收率的影响较小。

表 2 不同伞状吸收层厚度的吸收变化

Table 2 Variation in absorption for different umbrella-shaped absorber layer thicknesses

Thickness/nm	25	50	70	100	125	150	200	250
Max absorption/%	99.1	99.67	99.89	99.98	99.8	99.38	97.95	96.47
Average absorption/%	81.81	83.01	83.74	83.84	83.12	82	79.15	77.18

表 3 不同伞状吸收层面积的吸收率变化

Table 3 Variation of absorption rate for different umbrella-shaped absorber layer areas

Area/ μm^2	55.36	61.56	79.96	106.4	122.6	140.8
Max absorption/%	99.25	99.39	99.62	99.79	99.85	99.89
Average absorption/%	82.5	82.82	83.23	83.46	83.59	83.74

2.2 热学特性有限元分析

假设器件的初始温度为 $293.15\ \text{K}$,支撑柱底部的温度为 $293.15\ \text{K}$,并在距离器件 $200\ \mu\text{m}$ 上方施加 $5\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 的辐射热源,以观察辐射对传感层的影响。通过改变吸收层的厚度、尺寸和几何形状,研究它们对器件性能参数的影响。对结构进行了优化,探究对传感材料温升的影响,通过调整相关参数,在热容和响应时间之间找到最佳结构。

图 3(a)为吸收层厚度 $100\ \text{nm}$ 时,器件在 $30\ \text{ms}$ 达到热平衡状态后的温度分布图。图 3(b)可以观察到不同厚度的吸收层(吸收层面积为 $140.8\ \mu\text{m}^2$) 在相同热源作用下的温度随时间变化情况。表 4 总结了器件达到稳定状态时的最高温度(Max. T) 和的热时间常数(τ_{th})。记录最高温度(Max. T) 和温度从初始状态达到最高温度 63% 的热时间常数(τ_{th})。 $0\sim 30\ \text{ms}$ 的时间范围内,温度迅速上升后达到稳定

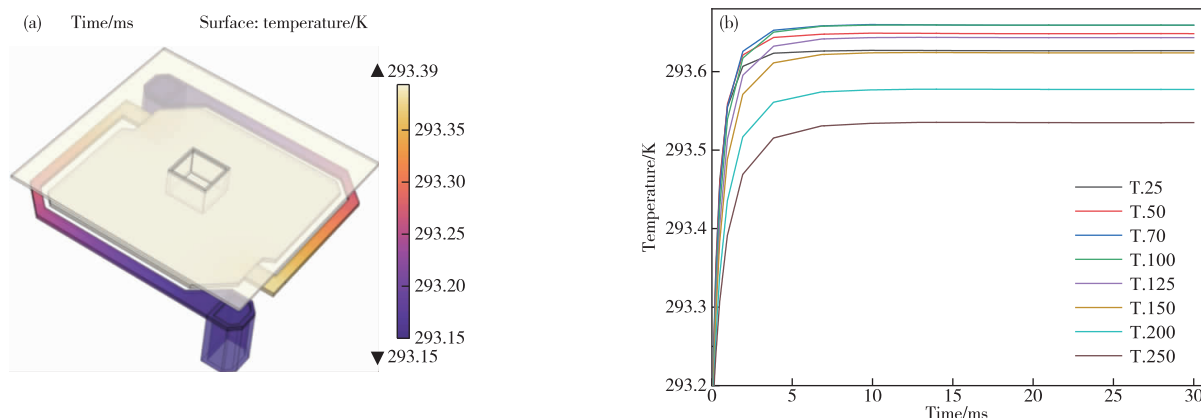


图 3 (a) $100\ \text{nm}$ 厚度的 $30\ \text{ms}$ 的温度分布图; (b) 不同厚度吸收层的温度随时间的变化,无镂空面积

Fig. 3 (a) Temperature distribution at $30\ \text{ms}$ for a thickness of $100\ \text{nm}$; (b) Temperature variation over time for absorption layers of different thicknesses, without hollow areas

状态。随着吸收层厚度的增加,最高温度呈现出先增加后减少趋势。热时间常数从 0.45 ms 逐渐增大至 0.98 ms。当吸收层厚度为 100 nm 时,温度升高至 293.659 K,温度变化为 0.509 K。而吸收层厚度为 70 nm 时,温度变化与 100 nm 的相同,但其热时间常数为 0.58 ms,比 100 nm 的热响应时间更短。吸收层厚度为 250 nm 的伞状结构的热响应时间较长为 0.98 ms,温升较小为 0.385 K,70 nm 的厚度温升为 250 nm 温升的两倍左右,表明该结构在相同热源下吸收的热量较少且有效热导小。为了使器件具有优良性能,需要考虑具有显著温度变化和快速热响应时间的结构。可以看出,在 25~250 nm 的吸收层厚度范围内,吸收层厚度为 70 nm,面积为 $140.8 \mu\text{m}^2$ 时,温升变化最大,热时间常数较小,吸收与热响应性能最佳。

图 4(a)为双层伞状微测辐射热计吸收层厚度 70 nm、吸收面积 $106.4 \mu\text{m}^2$ 、器件达到稳定状态时的温度分布图。当吸收层厚度不变时,随着吸收层面积从 $140.8 \mu\text{m}^2$ 逐渐减少到 $55.36 \mu\text{m}^2$,传感层的温度变化与其面积减少趋势相一致,即最高温度从 293.659 K 减少到 293.342 K,从图 4(a)到 4(b)温度分布图可以清晰的观察到传感层温度的下降。在吸收面积发生减少时,整体结构的热响应发生了变化,其中热时间常数从 0.58 ms 减少至 0.42 ms,减少了 0.16 ms,相比于吸收厚度变化引起的 0.53 ms,减少程度较小且不明显。吸收层面积 $106.4 \mu\text{m}^2$ 、厚度为 70 nm 的双层结构,最高温度为 293.530 K,响应时间为 0.54 ms,温度变化了 0.38 K。基于热时间响应最佳模型的温度变化,优先选择热响应时间较短的伞状吸收层面积为 $106.4 \mu\text{m}^2$ 、厚度为 70 nm 的结构模型(表 5)。

表 4 不同伞状吸收层厚度时间常数和最高温度的变化

Table 4 Variation of time constant and maximum temperature with different thicknesses of umbrella-shaped absorption layers

Thickness/nm	25	50	70	100	125	150	200	250
Thermal time constant/ms	0.45	0.52	0.58	0.66	0.73	0.78	0.89	0.98
Maximum temperature/°C	293.627	293.648	293.659 1	293.659 2	293.643	293.624	293.577	293.535

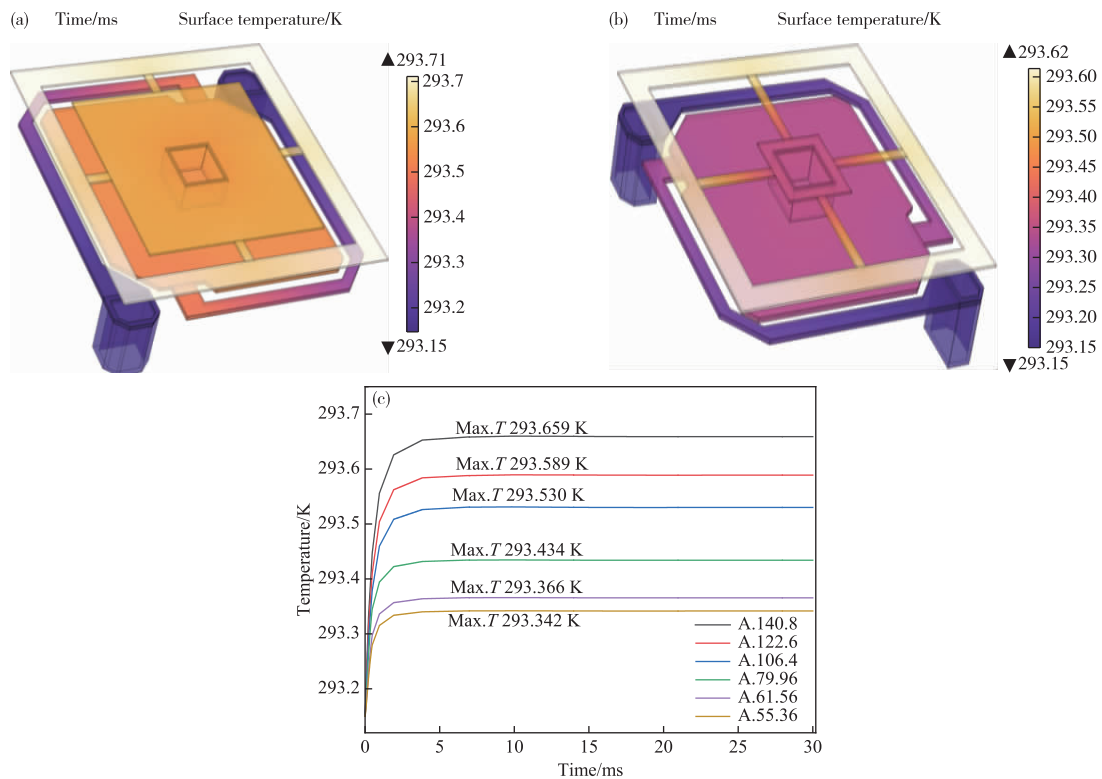


图 4 (a)70 nm 厚度,吸收面积为 $106.4 \mu\text{m}^2$ 的 30 ms 的温度分布图;(b)吸收面积为 $55.36 \mu\text{m}^2$ 的温度分布图;

(c)70 nm 的厚度下,不同镂空面积吸收层的温度随时间的变化

Fig. 4 (a)Temperature distribution map at 30 ms for a thickness of 70 nm and an absorbing area of $106.4 \mu\text{m}^2$; (b)Temperature distribution map with absorption area of $55.36 \mu\text{m}^2$; (c)Temperature variation over time for absorption layers with different hollow areas at a thickness of 70 nm

表 5 不同伞状吸收层面积时间常数和最高温度的变化

Table 5 Variation of time constant and maximum temperature with different areas of umbrella-shaped absorption layers

Area/ μm^2	55.36	61.56	79.96	106.4	122.6	140.8
Thermal time constant/ms	0.42	0.42	0.43	0.54	0.56	0.58
Maximum temperature/ $^{\circ}\text{C}$	293.342	293.366	293.434	293.530	293.589	293.659

综上所述,改变双层伞状吸收层的厚度显著影响其热响应时间和有效热导率。较厚的吸收层增加了器件的热容,增大了热响应时间。改变吸收层面积则会显著影响器件的温度,增大吸收层的面积会增加辐射能量的吸收,也会增加器件总的温度。优化吸收层的厚度和面积是提升微型辐射热计灵敏度和响应速度的关键,需要在热容和热响应时间之间找到最佳平衡,以提高器件性能。

2.3 热电特性有限元分析

在本文设计的微测辐射热计的工作条件下,VO_x电阻的温度系数对后端电路设计会产生一定的

影响。通过热电响应仿真,可以研究器件在实际工作状态下的电响应特性。仿真中器件的初始温度为 293.15 K,施加 0.1 V 的电学偏置,辐射源在电压偏置后 0.08 s 开始作用,持续时间为 0.1 s。图 5 为不同吸收层厚度和面积在热电耦合时的温度变化曲线。从图 5 可以观察到,在电压作用下,器件产生焦耳热后,温度迅速升高并达到稳态;随后施加红外辐射,器件吸收能量,温度再次上升并达到新的稳态;无辐射作用时,温度又恢复初始稳定。不同结构的吸收层在吸收红外辐射后,温度变化趋势与热学仿真结果趋势相同,两者验证了仿真结果的一致性和稳定性。

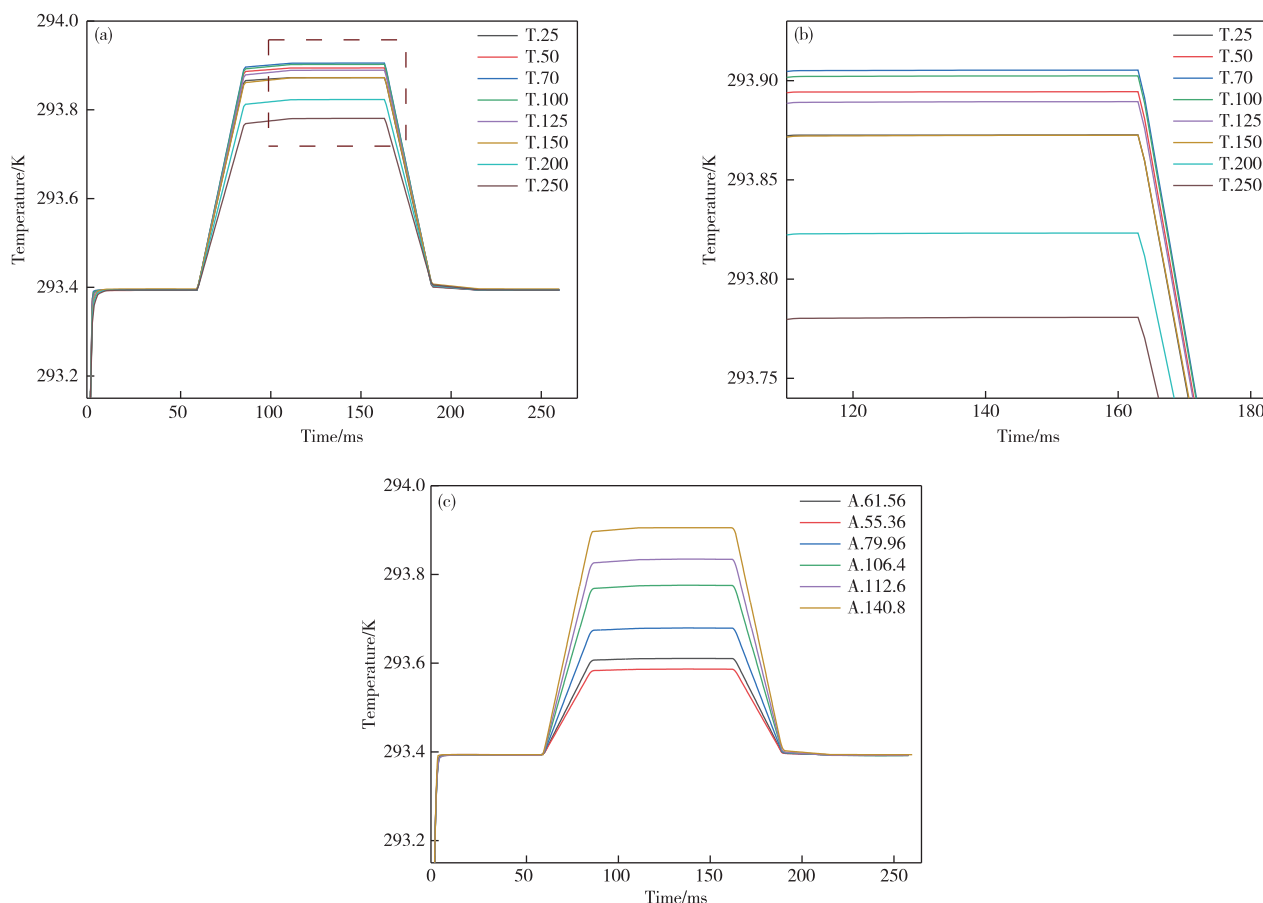


图 5 (a)不同吸收层厚度的热电耦合温度分布图;(b)热电耦合温度分布局部放大图;(c)不同吸收层面积的热电耦合温度分布图

Fig. 5 (a)Thermoelectric coupling temperature distribution map of different absorption layer thickness;(b)Local enlargement of thermoelectric coupling temperature distribution;(c)Thermoelectric coupling temperature distribution of different absorption layer area

图 6 为两种伞状吸收层结构的电势分布,探究了吸收层面积对于器件电性能的影响。吸收层面积为 $140.8 \mu\text{m}^2$ 、厚度为 70 nm 的模型,在结构两端施加 $0.2 \mu\text{A}$ 的偏置电流,传感层的初始电阻约为 $0.248 \text{ M}\Omega$,电导率为 66.734 S/m ,初始电压为 49.789 mV 。而对于吸收层面积为 $106.4 \mu\text{m}^2$ 、厚度为 70 nm 的模型,相应的传感层初始电阻约为 $0.4977 \text{ M}\Omega$,电导率约为 66.734 S/m ,初始电压约为 99.533 mV 。

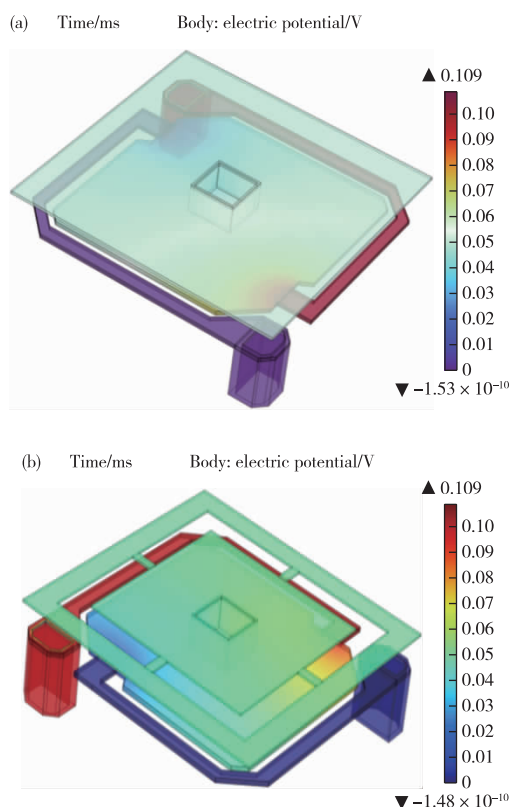


图 6 (a)伞状吸收层面积 $140.8 \mu\text{m}^2$ 的结构的电势分布图;
(b)伞状吸收层面积 $106.4 \mu\text{m}^2$ 的结构的电势分布图

Fig. 6 (a)Potential distribution map of the structure with an umbrella-shaped absorption layer area of $140.8 \mu\text{m}^2$ (b)Potential distribution map of the structure with an umbrella-shaped absorption layer area of $106.4 \mu\text{m}^2$

对吸收层面积为 $106.4 \mu\text{m}^2$ 、厚度为 70 nm 的模型结构进行的电压响应率分析,在不同偏置电流下,该结构的电压响应率随频率变化的曲线如图 7 所示。随着偏置电流从 $0.2 \mu\text{A}$ 增加到 $2 \mu\text{A}$,电压响应率逐渐增加,并且随着频率的增加而迅速降低。例如,当频率为 1 Hz 时,在 $0.5 \mu\text{A}$ 偏置电流下,最高响应率为 $6.153 \times 10^4 \text{ V/W}$;而在 $2 \mu\text{A}$ 偏置电流下,频率为 1 Hz 时,最高响应率达到 $2.461 \times 10^5 \text{ V/W}$ 。结果表明,增加偏置电流可以显著提高结构

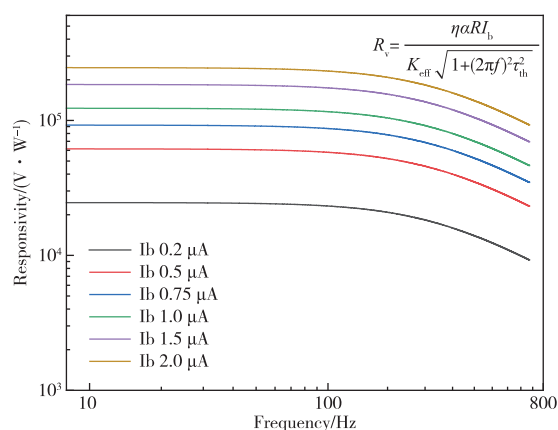


图 7 吸收层面积 $106.4 \mu\text{m}^2$ 、厚度 70 nm 的模型结构电压响应率

Fig. 7 The voltage responsivity of the model structure with an absorption layer area of $106.4 \mu\text{m}^2$ and a thickness of 70 nm

的电压响应率,特别是在较低频率下。

3 结论

非制冷型微测辐射热计具有广阔的应用前景,为了进一步提升器件的灵敏度和性能,需要研究红外探测器的关键参数对其性能的影响。本文设计了一种尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的双层伞状镂空吸收层微测辐射热计单元结构,并对其进行了光学、热学和电学设计仿真,分析了吸收层厚度和面积对红外吸收率、热时间常数及电压响应率的影响。研究发现,厚度为 70 nm 的双层伞状结构吸收层的红外吸收率均可达 82.5% 以上。通过热学结构优化,确定了吸收层面积为 $106.4 \mu\text{m}^2$ 、厚度为 70 nm 的最优设计模型,热时间常数为 0.54 ms ,具备快速响应和高稳定性的特性。电学仿真显示,考虑 $2 \mu\text{A}$ 的偏置电流,该结构具有 $7.384 \times 10^{-8} \text{ W/K}$ 的有效热导率和 $2.461 \times 10^5 \text{ V/W}$ 的响应率,符合制备超大规模、高性能快速响应非制冷红外焦平面探测器的要求。本研究提出的结构优化设计方法为非制冷红外焦平面探测器的制备及其读出电路设计提供了可靠的理论支持与技术方案。

参考文献:

- [1] CHRISTENSEN P R, SPENCER J R, MEHALL G L, et al. The Europa Thermal Emission Imaging System (E-THEMIS) investigation for the europa clipper mission[J]. Space Science Reviews, 2024, 220(4). DOI: 10.1007/s11214-024-01074-1.
- [2] JEON T, NATEGHI A, CHOI C, et al. Compact Mid-Infrared Spectrometer using continuously variable

- infrared filter and microbolometer array for simple and fast measurement of molecular Mid-IR Spectra [J]. *Advance Optical Material*, 12 [2024-08-07]. DOI: 10.1002/adom.202302241.
- [3] HE Y S, LIU Y C, LU M S, et al. Uncooled infrared detection using CMOS transistor-based sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 324(1): 2445-2451.
- [4] ALKORJIA A, KOPPULA A, ALMASRI M. Metasurface-enabled uncooled silicon germanium oxide infrared microbolometers for long-wave infrared detection [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23: 16616-16624.
- [5] APONTE K, XU Y, RANA M. Design and simulation of microbolometer with dual cavity for high figure of merits [J]. *Micromachines*, 2023, 14. DOI: 10.3390/mi14050948.
- [6] ABDULLAH A, KOPPULA A, ALKORJIA O, et al. Micromachined uncooled $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_{1-x-y}$ microbolometer integrated metasurface for uncooled infrared detection [J]. *IEEE*, 2019. DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808347.
- [7] NANDI S, MISRA A. Carbon nanotube-based uncooled bolometers; advances and progress [J]. *ACS Materials Letters*, 2023, 5(1): 249-274.
- [8] ZHANG Q, MA Y, LU Y, et al. Modulating electrolyte structure for ultralow temperature aqueous zinc batteries [J]. *Nature Communications* [2024-08-07]. DOI: 10.1038/s41467-020-18284-0.
- [9] BAHADRA E, AL-KHALLI N, HEZAM M, et al. Electro-optical characterization of an amorphous germanium-tin ($\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$) microbolometer [J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2023. DOI: 10.1007/s10762-023-00909-2.