

文章编号: 1671-7449(2026)02-0185-08

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(2): 185-192.

应用于MEMS热电堆红外探测器的超表面吸收体

邵泊游¹, 王丙寅², 王志强², 雷程^{1*}, 李丰超¹

(1. 中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 内蒙动力机械研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 随着红外技术的不断发展和应用需求的不断增加, MEMS热电堆红外探测器作为目前应用最广泛的红外探测器之一, 其关键性能也需进一步提升。设计了一种可集成于MEMS热电堆热端吸收区的超表面吸收体, 在8~12 μm 宽波段内, 红外吸收率可达到75%。将结构单元进行2 $\times$ 3阵列后, 可在140 μs 内使表面温度提升28 mK。该超表面吸收体整体厚度仅362 nm, 不影响MEMS热电堆芯片悬浮支撑膜的机械性能, 且制备工艺与MEMS热电堆兼容, 可为实现与超表面结合的高性能MEMS热电堆芯片的大批量生产提供有力参考。

关键词: 超表面; 热电堆; 红外探测器; 红外吸收; 有限元分析

中图分类号: TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2025080

引用格式: 邵泊游, 王丙寅, 王志强, 等. 应用于MEMS热电堆红外探测器的超表面吸收体[J]. 测试技术学报, 2026, 40(2): 185-192.

SHAO Boyou, WANG Bingyin, WANG Zhiqiang, et al. Metasurface absorber for application to mems thermopile infrared detectors[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(2): 185-192.

Metasurface Absorber for Application to MEMS Thermopile Infrared Detectors

SHAO Boyou¹, WANG Bingyin², WANG Zhiqiang², LEI Cheng^{1*}, LI Fengchao¹

(1. Key Laboratory of Micro/Nano Devices and Systems, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Inner Mongolia Power Machinery Institute, Huhhot 010010, China)

Abstract: With the continuous development of infrared technology and increasing application demands, the key performance of MEMS thermopile infrared detectors, as one of the most widely used infrared detectors, needs to be further improved. A metasurface absorber that are integrated into the absorption region at the hot end of the MEMS thermopile is designed, and the infrared absorption reaches 75% in the 8~12 μm wide band. The surface temperature is increased by 28 mK in 140 μs by a 2 $\times$ 3 array of structural units, and the overall thickness is only 362 nm, and the preparation process is compatible with MEMS thermopiles, which provides a strong reference for realizing the mass production of high-performance MEMS thermopile chips with the combination of the metasurface.

Key words: metasurface; thermopile; infrared detector; infrared absorption; finite element analysis

【收稿日期】2025-02-18

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(62301509, 62304209); 山西省基础研究计划资助项目(202203021222079, 20210302123203); 山西省科技重大专项“揭榜挂帅”项目(202301030201003)

【作者简介】邵泊游(2000—), 男, 硕士生, 主要从事MEMS热电堆红外探测器研究。E-mail: 2108234979@qq.com。

*【通信作者】雷程(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事MEMS技术, 微纳压力传感及微纳器件制造与系统集成等研究。E-mail: leicheng@nuc.edu.cn。

0 引言

红外辐射是指大于可见光而小于微波的电磁波,由物体的热能引发^[1]。随着MEMS技术的发展,MEMS热电堆红外探测器灵敏度高、功耗低、尺寸小,且相较于其他红外探测器具有无需设计偏置电路、无需制冷、受外界环境影响小等优势,是目前应用十分广泛的MEMS红外探测器^[2-5]。

影响MEMS热电堆红外探测器性能的主要因素是热电堆对红外光的吸收程度。因此,设计制备应用于热电堆吸收区的红外吸收层为提升探测器性能的主要研究方向^[6]。目前,对于热电堆吸收层的研究主要在于制备炭黑、黑硅^[7]等黑色物质增加红外光吸收^[8]。但黑色物质制备一致性差,结构脆弱易损坏,故热电堆大多以SiN_x为主的薄膜作吸收层。但此类薄膜的红外吸收率受膜层厚度以及组成影响较大,对红外光的最高吸收率仅约为50%^[9]。因此,对于热电堆红外探测器吸收区设计还有较大的优化空间。

超表面结构是一种具有亚波长厚度的二维周期性结构,由大量的纳米或微米级尺寸的结构单元组成^[10],可通过改变超表面的亚波长单元结构几何形状大小、排列方式和材料参数,实现对特定波段光的反射率、透射率和吸收率的调控^[11-14]。此前因超表面结构单元尺寸过小,对设备的精度要求高,故工艺制备难度较大。随着MEMS工艺的不断优化发展,微米级甚至纳米级尺寸的超表面结构已经可以被精确制备^[15]。

Dao等^[16]设计了一种以圆盘为结构单元的超表面结构作为热释电探测器的吸收层,实现了3.5~4 μm间的4个窄波段红外光的高吸收率。Zhou等^[17]设计了一种以十字型结构为结构单元的超表面吸收体,实现了对中红外波段的高红外吸收率。Zhang等^[18]将制备的红外超表面吸收剂添加到硅上液晶(LCoS)芯片作为红外吸收层,实现了对近红外波段的高吸收率。

本文所设计的应用于MEMS热电堆红外探测器的超表面吸收体,主要针对中红外波段的红外吸收。同时,为保证探测器整体的机械性能稳定并降低成本,对超表面吸收体的材料和结构尺寸进行调控,实现对红外光高吸收的同时,保证吸收体的厚度尽可能薄。

1 基本原理

MEMS热电堆探测器是基于塞贝克效应实现温差和电能相互转换的探测器^[19]。塞贝克效应是指当两种不同电导体组成一个回路时,若两端接触处存在温度差,回路就会产生一个电动势,从而驱动电流流动。塞贝克效应原理如图1所示。

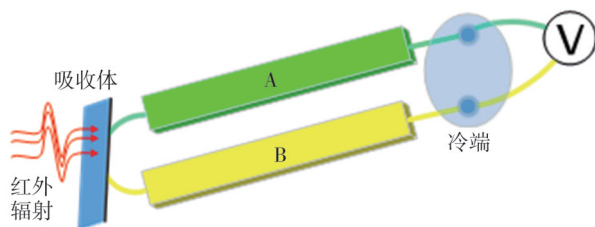


图1 塞贝克效应原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Seebeck effect

根据塞贝克效应,热电堆芯片的响应电压 ΔU 可表示为^[20]

$$\Delta U = N\Delta T(\alpha_a - \alpha_b) = N\Delta T\alpha_{ab}, \quad (1)$$

式中: N 为热偶条对数; ΔT 为温差; α_a, α_b 分别为两种热偶材料的塞贝克系数; α_{ab} 为塞贝克系数差。

由式(1)知,热电堆的响应电压 ΔU 与冷热端温差 ΔT 呈正相关,且 ΔT 增大通常是由于热电堆吸收区的红外光增多。因此,提升热电堆吸收区对红外吸收率就可以提升热电堆探测器的性能。

超表面结构中的亚波长单元可以设计为特定的形状和尺寸,使其在特定频率下产生局域表面等离子体共振,从而有效地将入射电磁波的能量捕获并局限在超表面的特定区域^[21-23]。同时,底层的金属反射层将电磁波的透射率降低至0。这样,入射的电磁波就会被超表面结构吸收并转换成热能被器件吸收^[24-26]。

2 材料选择与结构设计

超表面吸收体通常选择金属/介质层/金属的三明治结构^[27]。底层金属需要将入射光尽可能的阻挡并反射。铝的反射率高,成本低,制备工艺成熟,同时,铝的导热性较好,可以将转化成的热能快速向热端扩散,提高响应时间,故底层金属选择铝。中间介质层选择高介电常数、高热导率的锆,增强超表面吸收红外光的能力,提升热点转换效率。顶层金属选择金,因为金在红外光中的损耗最小^[28]。最终,超表面吸收体材料选择铝/锆/金,基本单元示意图如图2所示。

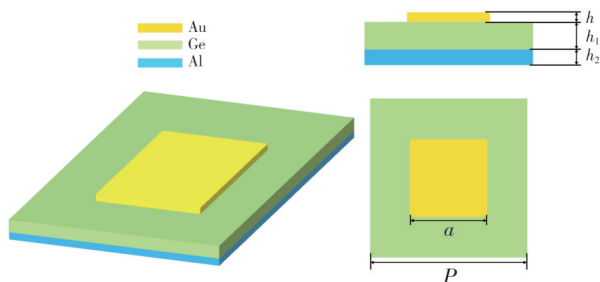


图 2 超表面结构基本单元示意图

Fig. 2 Schematic diagram of basic unit of metasurface structure

本文将通过FDTD仿真软件对结构进行光学吸收率仿真以确定尺寸参数,并进行光热耦合仿真评估超表面吸收体对热电堆吸收区的温度提升。

3 仿真分析及设计优化

3.1 光学仿真分析

因铝反射层的存在,仅有极微量红外光穿过超表面吸收体,故进行光学分析时,只对超表面吸收体进行仿真分析。前期仿真结果知,80 nm厚的铝的红外透射率可低于1%,当铝厚度低于50 nm时,部分波段的透射率将超过2%。故将底层铝厚度设定为80 nm。

仿真区域如图3所示,将 x 方向和 y 方向设置为周期性边界条件(Periodic),此时FDTD所选择的仿真区域大小即为超表面结构 x 方向和 y 方向的周期大小, z 方向设置为完美匹配层边界条件(PML)。

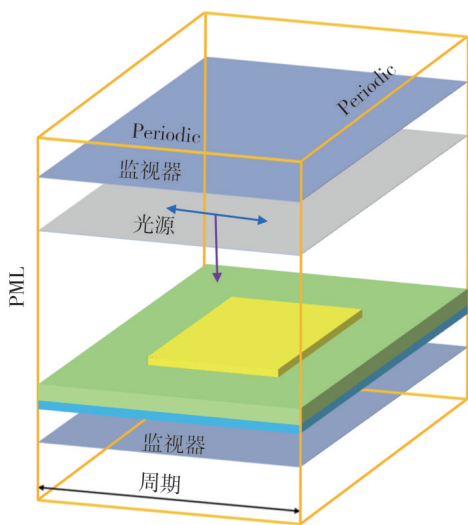
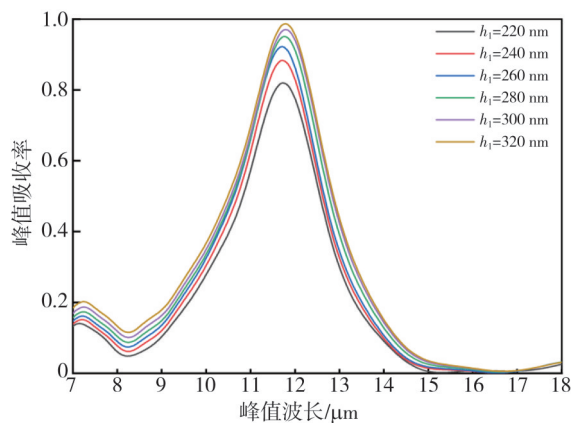


图 3 超表面仿真设置

Fig. 3 Metasurface simulation setup

在结构上方设置平面波光源,分别在光源上方和超表面结构下方设置监视器,用于监视结构的反射率 R 和透射率 T ,因此,吸收率 $A = 1 - R - T$ 。

为评估介质层厚度对吸收率的影响,设定顶层金结构为边长 $a = 1 \mu\text{m}$,厚度 $h = 20 \text{ nm}$ 的正方形, x, y 方向的周期 P 均为 $2 \mu\text{m}$,改变介质层厚度 h_1 ,观察介质层厚度对峰值波长和峰值吸收率的影响,结果如图4所示。



(a) 吸收曲线

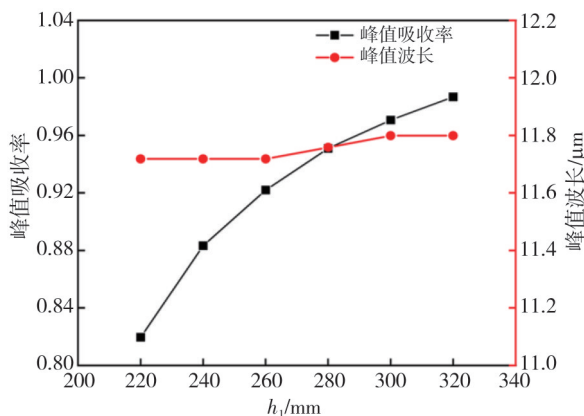


图 4 介质层厚度对红外光吸收情况的影响

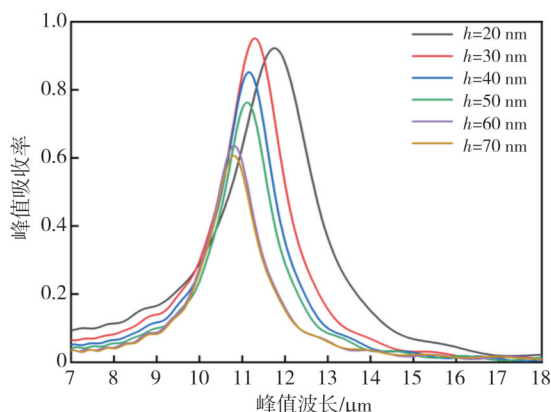
Fig. 4 Influence of dielectric layer thickness on infrared light absorption

由图4可知,在220~320 nm范围内介质层厚度增大,峰值吸收率上升,而峰值波长变化较小。考虑到热电堆悬浮膜的机械稳定性和吸收区向热端的传热,最终确定介质层锗厚度为260 nm。

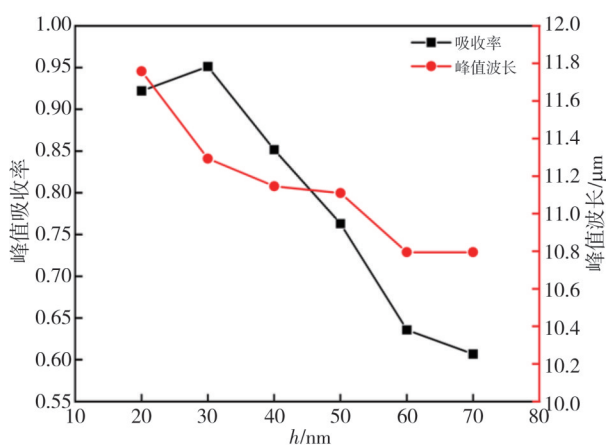
为评估顶层金的厚度对红外吸收率的影响,保持其他结构参数不变,改变顶层金属厚度,对其进行扫描仿真,观察顶层金厚度 h 对峰值波长和峰值吸收率的影响,结果如图5所示。

由图5可知,在此范围内峰值吸收率先增大后减小,峰值波长也会随着 h 增加而减小,在仿真结果和工艺误差的综合考虑下,最终确定顶层金

厚度为 22 nm。



(a) 吸收曲线

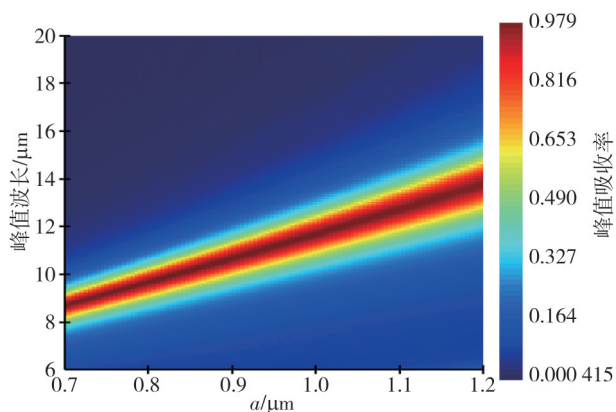


(b) 顶层金厚度对峰值波长和峰值吸收率的影响

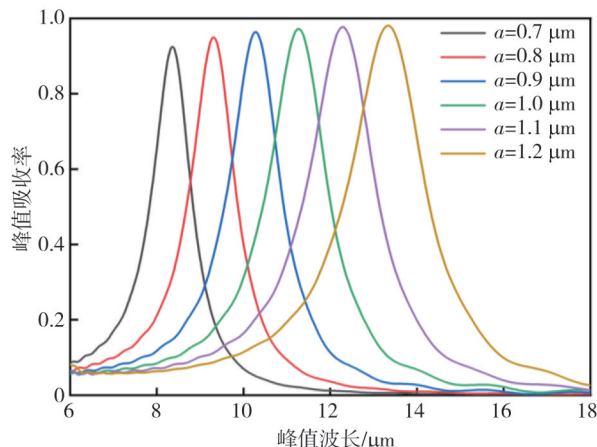
图 5 顶层金厚度对红外光吸收情况的影响

Fig. 5 Influence of top gold layer thickness on infrared light absorption

为评估顶层金边长对红外吸收率的影响,保持其他结构参数不变,改变顶层金边长,对其进行扫描仿真,观察顶层金边长 a 对峰值波长和峰值吸收率的影响,结果如图 6 所示。



(a) 金边长对波长和改变时的红外吸收率的影响



(b) 不同顶层金边长下,峰值波长对峰值吸收率的影响

图 6 顶层金边长对红外光吸收情况的影响

Fig. 6 The influence of top gold side length on infrared light absorption

由图 6 可知,金边长 a 对峰值吸收率影响较小,但对峰值波长影响较大,因此,可通过改变顶层金边长来对特定波段红外光实现高吸收。最终,由 80 nm 厚的 Al 作底反射层,260 nm 厚的 Ge 作介质层,22 nm 厚的 Au 作顶层金属,组成应用于 MEMS 热电堆的超表面吸收体。材料导热性优秀且整体厚度仅 362 nm,不仅可保证制备成本,也可保证吸收体热量完全被热电堆吸收,同时对 MEMS 热电堆支撑膜的机械性能具有较小影响。

3.2 设计优化

MEMS 热电堆红外探测器通常需要在较宽波段内具备高吸收红外光的能力,因此,需要对超表面吸收体进行设计优化实现宽波段吸收。本文将不同边长的正方形结构集成在一个单元结构内,实现不同峰值波长的窄带叠加,增加带宽。但相邻两个正方形的间距会对整体的吸收效果产生影响,因此,对间距 t 为 350 nm 和 500 nm 的超表面吸收体进行仿真对比,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,不同顶层金属间距下的吸收峰叠加情况不同,是因为磁场受到正上方 Au 和左右两边 Au 的共同影响导致吸收峰的位置和吸收系数都发生改变。为验证这一原理,对顶层金属间距 350 nm 的超表面吸收体进行电磁特性仿真。

在超表面结构的侧视截面处设立电磁场监视器,超表面结构在吸收峰处的电磁场分布如图 8,图 9 所示。电磁场强度位于表面金属下方与介质层的界面处以及下方的介质层,说明电磁场集中于表面金属的下方区域,这也表明超表面结构产生局域表面

等离子体共振。此外,在吸收峰峰值波长处,电磁场场强最大值不仅存在于某一顶层金的底部和边缘,在相邻 Au 的底部和边缘处也存在一定的场强,说明超表面结构成功将入射光束捕获在顶层金属底部和介质层中,同时也进一步说明了每个吸收峰的位置

和吸收系数都受多个顶层金属的共同影响。本文旨在实现高带宽的高红外吸收,因此,选定将 $a=0.7$ 、 0.8 、 0.9 、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的顶层正方形金属集成在一起,间距确定为 350 nm ,整个单元尺寸为 $5.15\text{ }\mu\text{m}\times 2\text{ }\mu\text{m}\times 362\text{ nm}$,结构如图 10 所示。

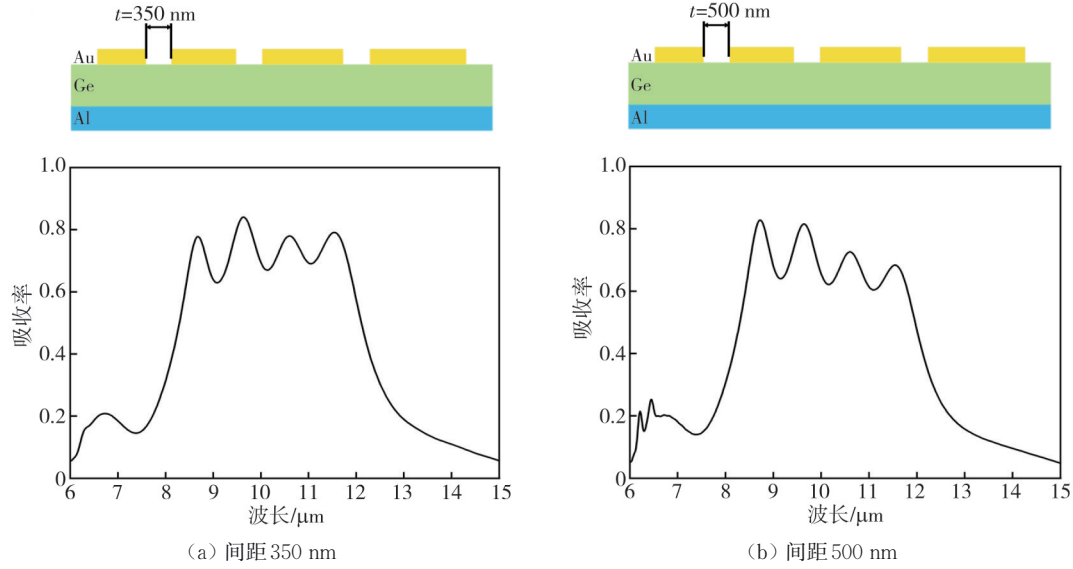


图 7 不同间距下的红外吸收率

Fig. 7 Infrared absorption rate under different spacings

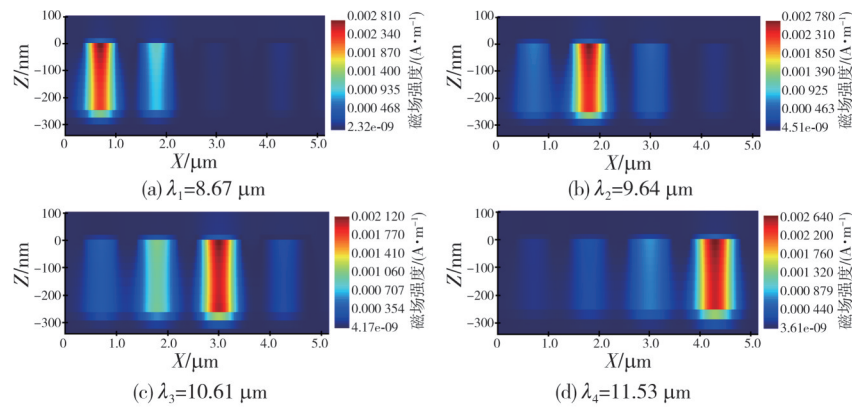


图 8 XZ 平面吸收峰处磁场分布图

Fig. 8 Magnetic field distribution at absorption peak in XZ plane

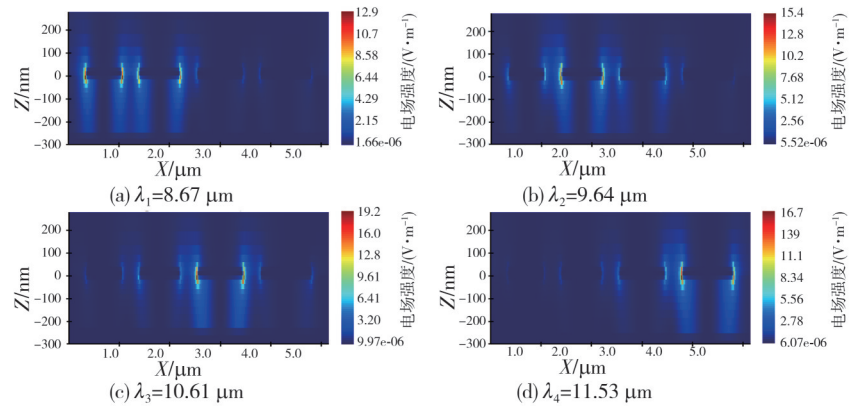


图 9 XZ 平面吸收峰处电场分布图

Fig. 9 Electric field distribution at absorption peak in XZ plane

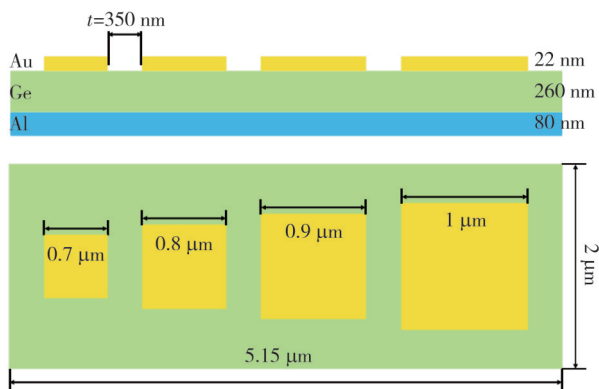


图 10 超表面结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of metasurface structure

3.3 入射角度分析

因热电堆红外传感器所接收到的红外光并非全部都是垂直入射的,且视场角对MEMS红外探测器的性能有很大影响,因此,热电堆红外传感器的吸收体需很少受入射角度的影响。对光源入射角度进行参数扫描仿真,同时将边界条件改为Bloch,观察超表面吸收体吸收系数随入射角度的变化,结果如图11所示。

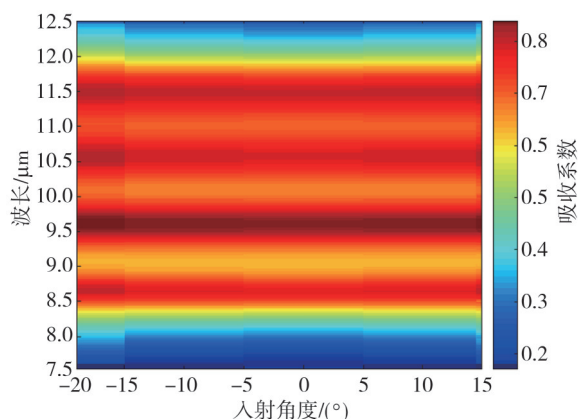


图 11 入射角度对吸收系数的影响

Fig. 11 Effect of angle of incidence on absorption coefficient

由图11可知,入射光角度在 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间时,吸收峰位置和吸收峰系数大小并未发生明显变化。因此,可说明角度的改变对超表面吸收体的吸收系数影响较小,可忽略不计,符合设计要求。

3.4 热学分析

MEMS热电堆红外探测器是利用物体在红外辐射下产生的热效应进行检测的传感器,因此,需评估超表面吸收体将吸收红外光转换为热的能力。使用Lumerical HEAT模块进行光热耦合仿真。为模拟MEMS热电堆实际结构,将超表面吸收体进行阵列并在下方增加 SiO_2 和 SiN_x 层作为

MEMS热电堆的悬浮支撑膜,同时为提高仿真效率,仅将超表面结构阵列成 2×3 个单元。最后,将吸收体一侧悬空作热端,另一侧边缘增加硅衬底作冷端,以光学仿真结果作为热源进行光热耦合仿真分析,每个单元的光功率输入为44 nW,底部硅衬底设为室温。仿真结果表明,该情况下的吸收体表面温度可上升28 mK,且距离硅衬底越远处温度升高越大。说明将超表面吸收体集成在热电堆支撑膜上可明显提升热电堆热端温度,且可与冷端形成明显的温差,进而显著提升热电堆的输出电压。温度分布云图如图12所示。

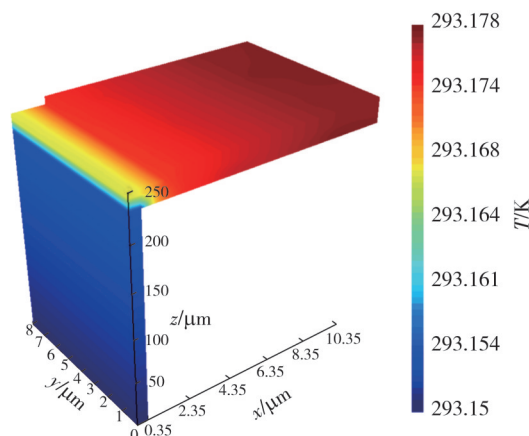


图 12 稳态温度分布

Fig. 12 Steady-state temperature distribution

继续研究吸收体的瞬态热情况,光源设定在 $2\mu\text{s}$ 时开启, $180\mu\text{s}$ 时关闭,记录吸收体的温度上升情况。由图13可知,超表面吸收体表面温升可在 $140\mu\text{s}$ 内达到稳态最高温度28 mK,因MEMS热电堆芯片的响应时间通常在几毫秒到几十毫秒之间,微秒级的响应时间完全不影响MEMS热电堆的性能,故满足设计要求。

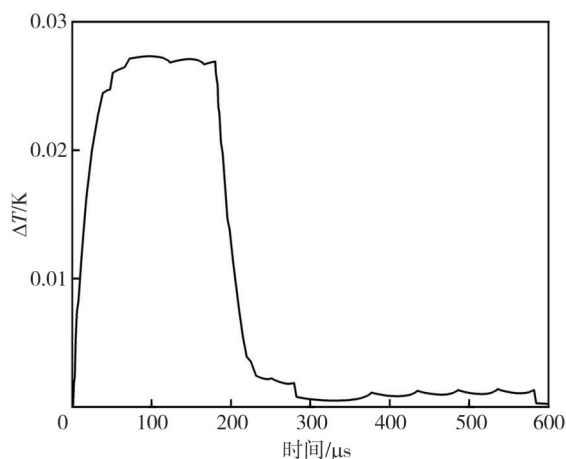


图 13 瞬态响应

Fig. 13 Transient response

4 工艺流程设计

应用于 MEMS 热电堆红外探测器的超表面吸收体的工艺制备流程如图 14 所示。a) 在实际制备过程中, 热电堆器件的热偶层制备完成后, 使用 PECVD 工艺在器件表面沉积氮化硅隔离层; b) 通过磁控溅射和 lift-off 工艺制备 80 nm 的 Al;

c) 使用蒸镀和 lift-off 工艺制备 260 nm 的 Ge; d) 先涂敷光刻胶, 随后运用纳米压印技术形成顶层 Au 图形, 最后通过磁控溅射和 Lift-off 工艺制备 22 nm 的顶层 Au; e) 制备完成后, 使用 PECVD 工艺在表面沉积钝化层; f) 使用 RIE 刻蚀工艺将热电堆焊盘刻蚀裸露; g) 最后, 背腔刻蚀释放悬浮膜完成器件制备。

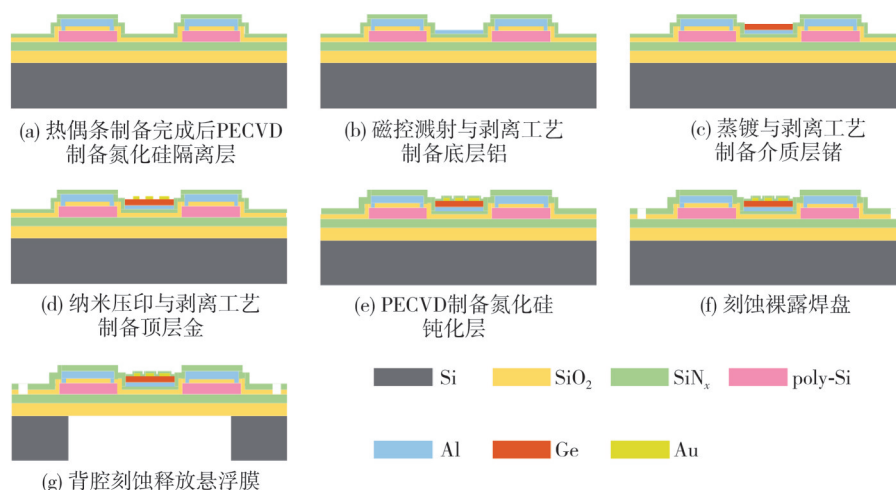


图 14 工艺制备流程

Fig. 14 Process preparation flow

5 结 论

本文针对 MEMS 红外热电堆芯片红外吸收率低的问题, 设计了一种可制备于热电堆热端吸收区的超表面红外吸收体。本文所设计的超表面红外吸收体主要特点是将不同尺寸的顶层金属集成在一起, 实现了 $8\sim 12\mu\text{m}$ 宽波段 75% 的高红外吸收率, 且吸收率受光入射角度的影响可忽略不计。仅阵列 2×3 个单元即可在 $140\mu\text{s}$ 内将结构表面温度提升 28 mK, 保持较好温度响应的同时不影响热电堆芯片的性能。同时, 吸收体厚度仅为 362 nm, 可保证支撑膜的机械性能稳定; 制备工艺简单, 绝大部分 MEMS 产线均可满足工艺需求, 为实现高性能的 MEMS 红外热电堆芯片的制备提供了有力参考。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

[1] 帅永, 齐宏, 艾青, 等. 热辐射测量技术[M]. 哈尔

滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.

[2] 林振钰, 张志杰, 李岩峰, 等. 薄膜热电偶研究进展[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(12): 963-969.

LIN Zhenyu, ZHANG Zhijie, LI Yanfeng, et al. Research progress of thin-film thermocouples [J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(12): 963-969. (in Chinese)

[3] LI M, SHI M, WANG B, et al. Quasi-ordered nanoforests with hybrid plasmon resonances for broadband absorption and photodetection [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(38): 2102840.

[4] 莫然. 高精度红外测温系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

[5] LIANG F, CAI C, ZHANG K, et al. Infrared gesture recognition system based on near-sensor computing[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(7): 1053-1056.

[6] CUI Y, HE Y, JIN Y, et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers [J]. Laser & Photonics Reviews, 2014, 8(4): 495-520.

[7] TAN Q, TANG L, MAO H, et al. Nanoforest of black silicon fabricated by AIC and RIE method [J]. Materials Letters, 2016, 164: 613-617.

[8] WANG K, LIU S, LI J, et al. Enhancing the light

- absorptance of stain-etched black silicon decorated by TiN nanoparticles [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, 32(9): 11503-11510.
- [9] 雷程. 双端梁MEMS热电堆红外探测器关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [10] MOHAMMADI E, GHAFARI M, BEHDAD N. Wide dynamic range, angle-sensing, long-wave infrared detector using nano-antenna arrays [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 2488.
- [11] TIAN J, LI Q, BELOV P A, et al. High-Q all-dielectric metasurface: super and suppressed optical absorption [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(6): 1436-1443.
- [12] QU G, YANG W, SONG Q, et al. Reprogrammable meta-hologram for optical encryption [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5484.
- [13] WANG J, WANG X C, GAO X, et al. Polarization insensitivity electromagnetically induced reflection in graphene metasurface [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2021, 12(3): 362-368.
- [14] DEHBASHI R, FATHI D, MOHAJERZADEH S, et al. Equivalent left-handed/right-handed metamaterial's circuit model for the massless Dirac fermions with negative refraction [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 16(2): 394-400.
- [15] ZHU A Y, CHEN W T, SISLER J, et al. Compact aberration-corrected spectrometers in the visible using dispersion-tailored metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801144.
- [16] DAO T D, ISHII S, DOAN A T, et al. An on-chip quad-wavelength pyroelectric sensor for spectroscopic infrared sensing [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(20): 1900579.
- [17] 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.
- [18] ZHANG Y, WU Z, XIA J, et al. Infrared metasurface absorber based on silicon-based CMOS process [J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32937-32947.
- [19] 雷程, 关一浩, 梁庭, 等. 一种双端排布热电堆结构设计及仿真优化 [J]. *传感技术学报*, 2022, 35(5): 573-580.
- LEI Cheng, GUAN Yihao, LIANG Ting, et al. Structural design and simulation optimization of double-ended array thermopile sensors [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(5): 573-580. (in Chinese)
- [20] BAO A, LEI C, MAO H, et al. Study on a high performance MEMS infrared thermopile detector [J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 877.
- [21] MAYER K M, HAFNER J H. Localized surface plasmon resonance sensors [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3828-3857.
- [22] COMIN A, MANNA L. New materials for tunable plasmonic colloidal nanocrystals [J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(11): 3957-3975.
- [23] LUO X. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 594201.
- [24] WU T, LI W, CHEN S, et al. Wideband frequency tunable metamaterial absorber by splicing multiple tuning ranges [J]. *Results in Physics*, 2021, 20: 103753.
- [25] ZHANG Y, DONG H, MOU N, et al. High-performance broadband electromagnetic interference shielding optical window based on a metamaterial absorber [J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26836-26849.
- [26] KAUR M, SINGH H S. Design and analysis of a compact ultrathin polarization- and incident angle-independent triple band metamaterial absorber [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(5): 1920-1929.
- [27] GHADERI M, SHAHMARVANDI E K, WOLFFENBUTTEL R F. CMOS-compatible mid-IR metamaterial absorbers for out-of-band suppression in optical MEMS [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(7): 1696.
- [28] LIU T, QU C, ALMASRI M, et al. Design and analysis of frequency-selective surface enabled microbolometers [C]//*Infrared Technology and Applications XLII*, 2016: 1-10.