

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106477

圆形热电堆红外探测器的结构优化与仿真分析*

武学占¹ 雷程¹ 梁庭¹ 关一浩¹ 马野¹ 白悦杭¹ 齐蕾²

(1.中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051; 2.北方自动控制技术研究所 太原 030006)

摘要: 为了研究采用热电堆原理制作的红外探测器输出电压与关键结构尺寸之间的影响关系,获得高输出电压,提出一种基于圆形结构的微机电系统(MEMS)热电堆红外探测器,以红外探测器结构尺寸 $1.8\text{ mm}\times 1.8\text{ mm}\times 0.35\text{ mm}$,空腔尺寸 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 为建模仿真的研究基础,对红外探测器进行建模,通过改变吸收层覆盖面积、热偶条对数、冷端长度、有无刻蚀规则孔等关键结构尺寸参数,对红外探测器进行热电仿真和热路径分析,最终确定最优红外探测器仿真结果,仿真结果表明,通过改变热电堆红外探测器关键结构尺寸参数,使得设计的红外探测器输出电压值达到 $125.08\text{ }\mu\text{V}$,与传统四端梁结构比较,极大地提高了红外探测器的输出电压。

关键词: 红外探测器;热电堆;有限元分析;塞贝克效应;红外

中图分类号: TN377 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Circular thermopile infrared detector structure optimization and simulation analysis

Wu Xuezhao¹ Lei Cheng¹ Liang Ting¹ Guan Yihao¹ Ma Ye¹ Bai Yuehang¹ Qi Lei²

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to study the influence relationship between the output voltage of the infrared detector made by the thermopile principle and the key structure size, to obtain a high output voltage, a microelectromechanical system (MEMS) thermopile infrared detector based on circular structure was proposed. The size of the infrared detector is $1.8\text{ mm}\times 1.8\text{ mm}\times 0.35\text{ mm}$ and the cavity size was 1.2 mm as the research basis of modeling and simulation. Modeling the infrared detectors, by changing the absorption layer coverage length, thermocouple logarithm, the cold end, presence of etching rules hole size parameters of the key structure, such as the infrared detector thermoelectric heat simulation and path analysis, ultimately determine the optimal infrared detector simulation results, the simulation results show that by changing the thermopile infrared detector size parameters of the key structure. The output voltage of the designed infrared detector is up to $125.08\text{ }\mu\text{V}$, which greatly improves the output voltage of the external infrared detector compared with the traditional four-terminal beam structure.

Keywords: infrared detector; thermopile; finite element analysis; Seebeck effect; infrared

0 引言

随着红外技术的发展,由于其具有安全性、可靠性、寿命长等优势,被广泛应用^[1]。红外技术的典型代表器件是红外探测器,它广泛应用各种领域,在军事领域的应用,如红外夜视、精准制导,在医疗领域如红外耳温枪、红外激光内窥镜治疗仪等,而且广泛应用工艺监控等领域^[2-3]。红外探测器利用热电敏感芯片检测物体的存在或运动,热电敏感芯片根据检测到物体的存在或运动输出电信号^[4]。基于

热电堆原理制作的红外探测器是根据红外辐射理论和塞贝克效应原理工作的^[5-6]。传统的 MEMS 热电堆红外探测器针对的理论模型结构是封闭膜热电堆结构、悬臂梁热电堆结构,以及对吸收层进行黑化处理等,因此在其理论模型中并没考虑热电偶区域的红外吸收和释放孔的影响,在此基础上,王司东等^[7]提出应充分考虑热电偶区域的红外吸收和释放孔的影响。雷程^[8]采用双端梁上下叠加形成串联的热电堆结构解决了占空比低的结构问题,进而设计了一种双端梁结构的热电堆红外探测器。He 等^[9-10]提出锥体拉伸

收稿日期:2021-04-22

* 基金项目:2020年山西省研究生教育创新项目(2020SY371)资助

介质膜上的热电堆结构,相比于平面介质膜上的热电堆结构,输出性能提高了38%左右。热电堆红外探测器芯片的结构从下至上依次为硅基底、复合膜、吸收层、热电堆和钝化层组成。大部分复合膜由 SiO_2 和 Si_3N_4 二者组成,吸收层多选用吸收率高的材料,而热电堆是由多对热电偶串联形成闭合回路组成,热电偶材料应选用塞贝克系数差值大的,一般选用P型多晶硅^[11]和铝较多,还有P型多晶硅和N型多晶硅等。像国内高校中北大学、科研机构中科院微电子所、上海微系统所等对热电堆红外探测器都有较为深入的研究。但是,针对基于热电堆原理的圆形红外探测器芯片的结构优化报道较少。

本文讨论以热电堆原理为基础针对圆形结构红外探测器为研究对象,利用SolidWorks三维设计软件和Ansys workbench19.1有限元热电偶耦合仿真软件分析改变关键结构尺寸参数对热电堆红外探测芯片输出电压的影响。阐明了关键结构参数对输出电压的影响,为今后热电堆红外探测器的结构优化和仿真分析提供了研究方向,同时对红外探测器的设计工作具有工程指导意义和参考作用。

1 理论基础

1.1 塞贝克原理

热电堆红外探测器的热电敏感芯片是基于热电偶串联形成热电堆的光热电转化器件,与单个热电偶相比,多个热电偶组成的热电堆器件输出电压信号高。如图1所示,金属材料导体A与B以串联形式的电路连接时,当金属导体两端有温差时,就会产生电位差,较高温端为热端,较低温端为冷端,这种组合称为热电偶。

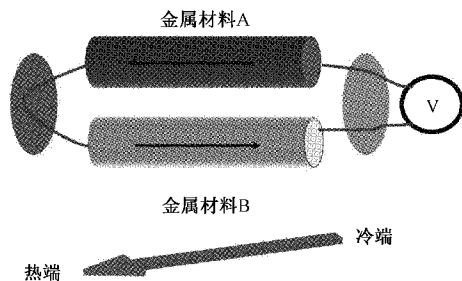


图1 塞贝克效应原理

因此,根据塞贝克效应原理,电势差与温度差关系表达式^[12]如式(1)所示。

$$V_{out} = (a_A - a_B) \Delta T \quad (1)$$

式中: a_A 为金属材料A的塞贝克系数; a_B 为金属材料B的塞贝克系数。

1.2 主要参数

响应率^[13]、探测率^[14]和响应时间^[15]是用于评价热电堆红外探测器的主要参数。

响应率表示因红外光源照射吸收区表面产生热量,然后热量由于热电堆结构而输出电压与输入红外光源的红外

辐射功率的比值,表达式如式(2)所示。

$$R_V = \frac{\Delta U}{P_0} = \frac{\Delta U}{\varphi_0 A_d} = \frac{N a_{AB} \eta}{G_{th}} \quad (2)$$

式中: ΔU 是红外探测器因热产生的输出电压; P_0 是红外光源的辐射功率; φ_0 是红外光源的辐射功率密度; A_d 是吸收层吸收区对应的面积; N 是所有热电偶条的总数量; G_{th} 为红外探测器的总热导。

红外辐射功率密度^[16]表达式如式(3)所示。

$$\varphi_0 = \frac{C_r \cdot \sigma \cdot \epsilon_1 \cdot (T_1^4 - T_0^4) \cdot A_s}{\pi \cdot d_0^2} \quad (3)$$

式中: C_r 是斩波器的均方根转换因子; σ 为史蒂芬-玻尔兹曼常数; ϵ_1 为黑体的发射率; T_0 为当前所处的环境温度; T_1 为黑体温度; A_s 为红外光源发出光源对应的辐射面积; d_0 为黑体到红外探测器的热电堆表面的距离。

探测率表达式如式(4)所示。

$$D^* = R_V \sqrt{\frac{A_d}{4kT_0 R_0}} \quad (4)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$; R_0 为热电堆电阻。

响应时间可被表述为式(5):

$$\tau = \frac{C_{th}}{G_{th}} \quad (5)$$

式中: C_{th} 为红外探测器的总热容。

2 结构设计

如图2所示,以热电堆红外探测器结构尺寸 $1.8 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm} \times 0.35 \text{ mm}$,空腔尺寸 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ 为建模基础,设计圆形热电堆红外探测器。吸收层铺设于探测器整个面上,热偶条排布成圆形发散结构,热端靠近圆中心,冷端处于硅基底上,整个热偶条和红外吸收层位于氧化硅与氮化硅复合形成的支撑膜层上,钝化层氧化硅铺设与热偶条上。具体采用MEMS工艺包括:硅基底上热氧化形成氧化硅,PECVD形成氮化硅吸收层,采用离子掺杂工艺形成P-poly Si层,采用光刻、刻蚀和剥离工艺形成P-poly Si条和Al条的热偶条阵列热电堆,然后,采用PECVD工艺沉积形成钝化层氧化硅,光刻、刻蚀开窗漏出Al焊盘,最后,硅基底背部释放空腔形成支撑膜。

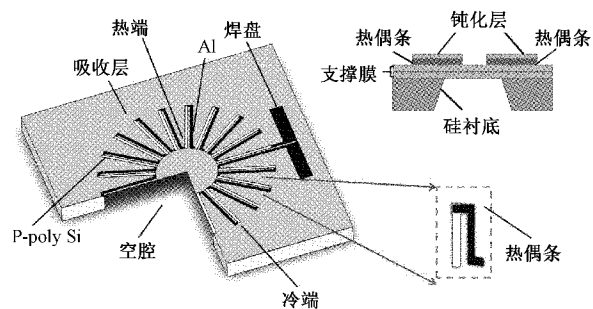


图2 圆形热电堆探测器结构

3 仿真优化

综合考虑传感的结构尺寸和加工条件,圆形热电堆探测芯片选用材料和厚度尺寸如表1的传感器参数值所示。

表1 传感器的各参数厚度值

各材料参量	厚度/ μm
硅基底(Si)	350
支撑层(SiO_2)	1.6
吸收层(Si_3N_4)	0.55
热偶条(P-poly Si/Al)	0.8/0.6
钝化层(SiO_2)	0.4

根据表1传感器的各参数厚度值,以72对热电偶、冷端长度为 $15\mu\text{m}$,热端长度为 $15\mu\text{m}$,热偶条长度为 $400\mu\text{m}$ 为设计基础,通过SolidWorks软件进行初始设计的圆形热电堆红外探测器的结构建模,将该模型导入Ansys workbench19.1仿真软件进行稳态热电模拟仿真分析,通过网格划分后研究了红外辐射条件下探测器结构的温度分布、热梯度和输出电压分布情况。在热电堆探测器吸收层施加热辐射密度为 $4.2922\text{W}/\text{m}^2$,在硅衬底上施加环境温度载荷量为环境温度 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 。

如表2所示,通过改变吸收层尺寸探究吸收区尺寸与热电堆探测器的输出电压大小关系。保证热电堆红外探测器结构尺寸一定的情况下,通过对不同吸收层的吸收区直径下施加热辐射密度观察输出电压变化。

表2 不同吸收区下输出电压值

吸收区直径/ μm	输出电压/ μV
460	35.140
560	48.413
660	66.200
760	75.796
860	87.800
960	96.939
1060	102.570
1230	109.800
1833	111.650

如图3所示,随着热辐射密度施加在不同直径的吸收区上,随着吸收区直径逐渐变大,输出电压也随之变大,当吸收区覆盖至整个面时,输出电压变化平稳且有最大值,即表明吸收层的吸收区覆盖整个面时输出电压为最优值。

考虑到热电偶对数也是影响输出电压性能影响的指标之一,对于热电偶对数的设计,需要考虑到所设计的总电阻是否满足整体热电堆红外探测器设计指标,如满足设计指标,则可根据实际情况调整热电偶对数,进而改变输出电

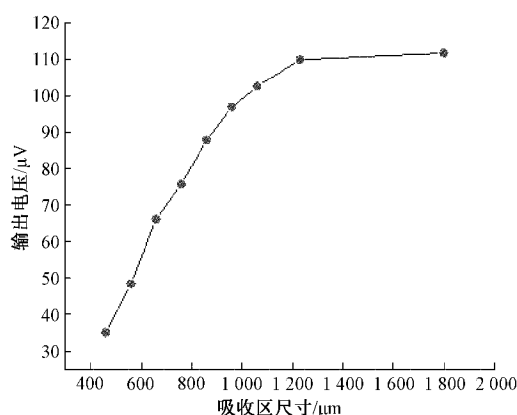


图3 不同吸收区下输出电压值

压。通过吸收层覆盖面的调整,已确定输出电压最优值为全面覆盖氮化硅,所以基于全覆盖氮化硅,改变热偶条对数,输出电压如表3所示。

表3 不同热偶条对数下的输出电压值

热偶条对数/n	60	72	80	90
输出电压/ μV	100.44	111.65	118.08	125.08

如图4所示,随着热偶条对数的增加,输出电压也呈现线性增长,考虑到实际加工芯片结构尺寸和MEMS工艺条件限制,最优值热电偶对数90对。

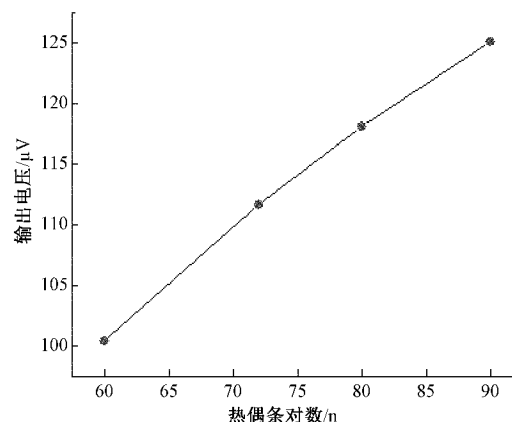


图4 不同对数下输出电压值

选择90对热电偶、吸收层全覆盖为基础,保证其他条件不变,考虑冷端长度对也是影响输出电压性能影响的指标之一,改变冷端的长度,输出电压如表4所示。

表4 不同冷端长度的输出电压值

冷端长度/ μm	15	30	45	60	75
输出电压/ μV	125.08	121.18	113.24	107.11	98.58

通过图5可以发现,不同冷端对应的输出电压可以发现,随着冷端长度的不断增加,输出电压也随之不断减小,

所以当冷端长度为 15 μm 时,输出电压有最优值。

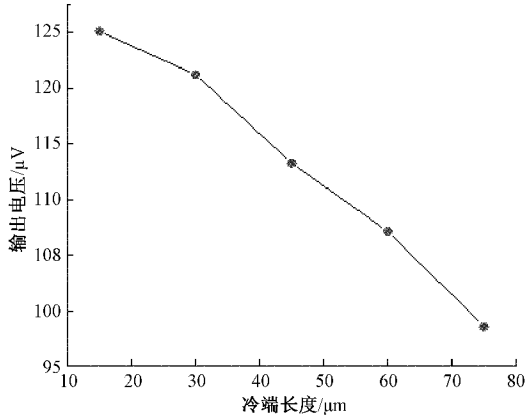


图 5 不同冷端长度下输出电压值

考虑到吸收区开规则性刻蚀孔也是影响输出电压性能影响的指标之一,选择 90 对热电偶、吸收层全覆盖,冷端长度为 15 μm 。如图 6 所示为不同类型的刻蚀孔,保证其他条件不变的情况下,通过吸收层开不同的刻蚀孔,观察输出电压值的变化。如表 5 所示,为不同刻蚀孔下输出电压,其中类型 1 为中心开圆孔,类型 2 为对称开两个圆孔,类型 3 为对称开 4 个圆孔,类型 4 为开 4 个对称的矩形孔,类型 5 为每 4 个对称开 12 个弧形孔。

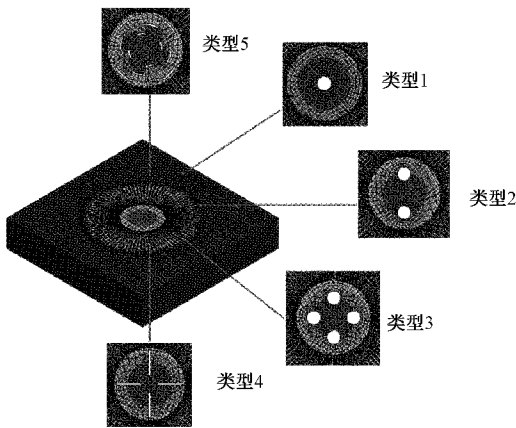


图 6 不同结构的刻蚀孔图

表 5 不同刻蚀孔的输出电压值

刻蚀窗类型/n	1	2	3	4	5
输出电压/ μV	113.44	113.67	111.02	108.26	113.91

通过图 7 不同刻蚀孔类型对应的输出电压值散点图可以知道,随着不同规则性开孔,输出电压相比于不开刻蚀孔的输出电压都是变小的,且变化明显。所以最终确定的优化的结果为吸收层不开刻蚀孔,同时吸收层全覆盖,冷端 15 μm ,热端 10 μm ,热偶条长度 400 μm ,为最终优化结果。

对最优结果进行分析,进行吸收区表面的热路径仿真,仿真后的结果如图 8 所示。

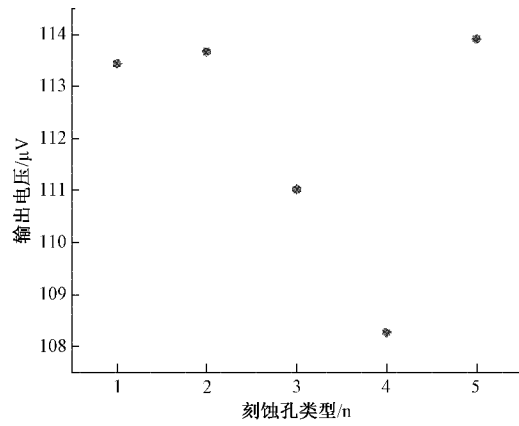


图 7 开刻蚀孔下的输出电压值

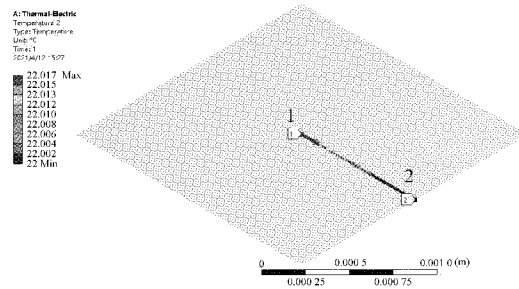


图 8 热路径仿真图

图 8 中显示了热电堆红外探测器吸收区表面的温度从位置 1~2 从高降低的热路径分布情况,最高温度集中在中心区为 22.017 $^{\circ}\text{C}$,最低温度集中在边缘区为 22 $^{\circ}\text{C}$ 。

从图 9 的温度云图可以看出,温度最高点 22.017 $^{\circ}\text{C}$ 处于热电堆的热端位置,而温度最低点 22 $^{\circ}\text{C}$ 处于热电堆的冷端位置,同时也可以看出冷端和热端的平均温差约为 0.017 $^{\circ}\text{C}$ 。

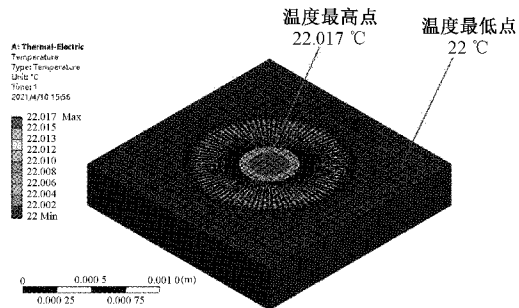


图 9 温度云图

从图 10 可以看出,与 P 型多晶硅条连接的电极定义为零点电势。与 Al 条连接的另一电极,电势在另一个电极方向逐渐增大,本质上反映了半导体材料载流子流动情况;因为每一对热电偶串联形成了热电堆,在加载一端电极 0 V 时的条件下,另一端电极的输出电压为 125.08 μV 。

综上,本文设计的圆形热电堆结构和图 11 所示的传

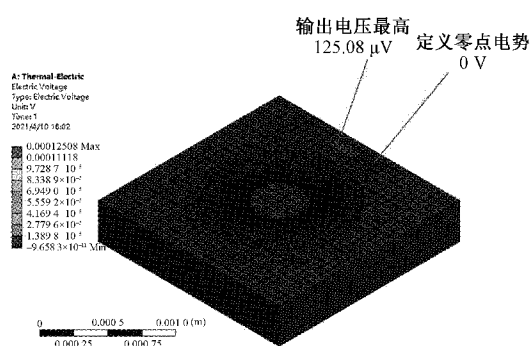


图10 电压云图

统的四端梁热电堆结构比较,发现本文所设计的以热电偶呈圆形发散结构串联排布,增大了占空比。根据传统的四端梁热电堆结构的温度云图如图12所示,可知温度呈现圆形径向扩散,所以传统四端梁结构所设计的冷端和热端温差不是最优值,而本文所设计的圆形热电堆结构的热端能够更加接近温度较高区域,而且所设计的圆形膜避免了方形膜应力集中问题,同时结合吸收区覆盖在器件整个表面的结构设计使得红外探测器的输出电压大大提高。

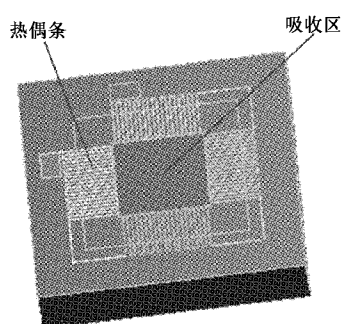


图11 传统四端热电堆梁结构

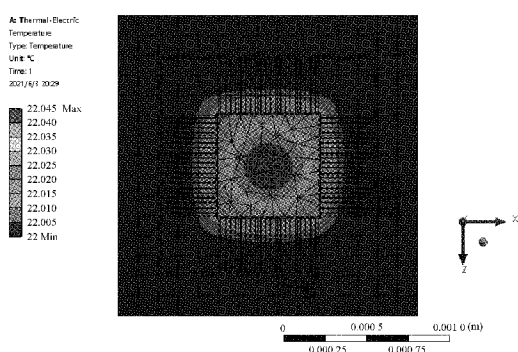


图12 传统四端梁热电堆结构温度云图

4 结 论

本文以输出电压高为目标,采用红外探测器结构尺寸 $1.8\text{ mm} \times 1.8\text{ mm} \times 0.35\text{ mm}$,空腔尺寸 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 为建模仿真的研究基础,设计了圆形红外探测器。对吸收层尺寸、

热偶条对数、冷端长度和吸收层是否开刻蚀孔进行仿真和优化设计分析,利用 SolidWorks 三维模型软件通过改变不同关键结构参数建立不同的优化模型,运用 Ansys workbench19.1 软件对优化后的结构进行分析,验证了传感器优化后结构的科学性和合理性,满足了仿真设计的要求,选用热偶条长度 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、冷端长度 $15\text{ }\mu\text{m}$ 、热端长度 $10\text{ }\mu\text{m}$,吸收层全面覆盖,热偶条对数90对,输出电压有最优值。但是,也存在一些不足之处,因为圆形红外探测器设计的结构尺寸受到了一定限制,导致热电偶对数趋于饱和值,可考虑采用双层热电偶结构增加热电偶对数进而提高占空比,提高输出电压。通过仿真分析开刻蚀孔关键结构参数,发现个别类型的温度分布并不是呈现出规则分布,建议后续研究开刻蚀孔最优的结构参数,将较高温度区域调整在靠近热电偶热端的区域处。本文对圆形热电堆红外探测器结构和设计有一定的参考价值,对红外探测器的设计和仿真工作具有指导意义和参考作用。

参考文献

- [1] 张志强,王萍,于旭东,等.高精度红外热成像测温技术研究[J].仪器仪表学报,2020,41(5):10-18.
- [2] 李意,雷志勇,李青松.红外探测技术的应用与发展[J].国外电子测量技术,2018,37(2):80-83.
- [3] 陈长水,刘荣挺,刘颂豪.红外探测器的最新进展[J].大气与环境光学学报,2013,8(1):1-10.
- [4] AIDA B, CHEN L, HAIYANG M, et al. Study on a high performance MEMS infrared thermopile detector[J]. Micromachines, 2019, 10(12): 877.
- [5] DEHUI X U, WANG Y, XIONG B, et al. MEMS-based thermoelectric infrared sensors: A review[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2017, 12(4): 557-566.
- [6] KE W J, WANG Y, ZHOU H, et al. Design, fabrication, and characterization of a high-performance CMOS-compatible thermopile infrared detector with self-test function[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2018, 28(12): 9.
- [7] 王司东,徐德辉,熊斌,等. MEMS 热电堆传感器的红外探测系统[J].传感器与微系统,2017,36(2):107-109,113.
- [8] 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.
- [9] HE Y, WANG Y, LI T. Improved thermopile on pyramidally-textured dielectric film[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020(99): 1-1.
- [10] HE Y, WANG Y, LI T. Performance enhanced thermopile with rough dielectric film black[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(4): 593-596.
- [11] TIAN W, WANG Y, ZHOU H, et al. Micromachined thermopile based high heat flux sensor[J]. Journal of

- Microelectromechanical Systems, 2019(99):1-7.
- [12] 高璇, 郭涛, 欧文, 等. CMOS 兼容的微机械热电堆红外探测器的设计[J]. 红外技术, 2012, 34(9):535-540.
- [13] LI W, NI Z, WANG J, et al. A front-side microfabricated tiny-size thermopile infrared detector with high sensitivity and fast response [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019(5):1-8.
- [14] 陈媛婧. 悬浮吸收层的 MEMS 热电堆红外传感器的结构设计及制备方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [15] 申宁. 基于标准 CMOS 工艺的微测辐射热计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [16] 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.

作者简介

武学占, 硕士在读, 主要研究方向为微纳器件设计及系统集成。

E-mail: 1305999376@qq.com

雷程, 博士, 高级实验师, 主要从事微纳红外传感、微纳压力传感及微纳器件制造与系统集成相关的研究工作。

E-mail: lcicheng@nuc.edu.com