

太赫兹微测辐射热计的设计、仿真与制备

苟君, 蒋亚东*, 王军, 喻磊, 黎威志

电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054

* 联系人, E-mail: jiangyd@uestc.edu.cn

2013-05-14 收稿, 2013-08-02 接受

国家自然科学基金(61006036, 61235006)资助

摘要 为提高太赫兹(THz)微测辐射热计的探测灵敏度, 优化设计探测单元的微桥结构: 增加 10 nm 的镍铬(NiCr)金属薄膜用作 THz 辐射吸收层并增大探测单元面积. 采用 IntelliSuite 软件建立不同单元尺寸、不同桥腿宽度的微桥结构的有限元分析模型, 进行力学与热学仿真. 力学仿真表明, 增大探测单元面积, 形变明显增加; 增大桥腿宽度可以小幅改善形变. 热学仿真表明, 通过增大探测单元面积或减小桥腿宽度可以提升桥面温升. 制备出基于不同探测单元结构的 THz 微测辐射热计焦平面阵列, 探测单元的实际形变情况与仿真结果基本相符. 单元面积 $75 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$, 桥腿宽度 $1.3 \mu\text{m}$ 的微桥结构具有较好的力学与热学性能, 适合用作 THz 微测辐射热计的探测单元结构.

关键词

太赫兹微测
辐射热计
力学仿真
热学仿真
制备

太赫兹(THz)波是指频率介于 0.1~10 THz(波长 3 mm~30 μm)的电磁辐射. 近年来超快激光技术和半导体材料科学与技术的迅速发展, 为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源, 促进了太赫兹辐射在光谱学^[1~3]和成像技术^[4]方面的应用. 由于 THz 辐射具有瞬态性、宽带性、低能性、穿透性等独特优点, 使得 THz 成像技术在安全检测、医学诊断、环境监测、植物结构研究、地质勘查、考古及文物鉴定等领域有着巨大的应用价值^[5~8]. 传统的红外微测辐射热计作为当今非制冷热成像的主流技术, 在 THz 辐射源的照射下可以用于 THz 波段的探测与成像^[9~11]. 但由于 THz 辐射的波长较长, 限于器件尺寸, 无法制备 $1/4$ 波长高度的吸收谐振腔, 因此, 红外微测辐射热计的真空腔(1.5~3 μm)在 THz 波段只起到热隔离的作用, 并无谐振增强吸收的效果. 这导致探测单元的 THz 辐射吸收很弱, 难以提供较高的响应与灵敏度^[12]. 因此, 需设计可有效吸收 THz 辐射的微测辐射热计结构.

探测单元微桥结构的力学性能和热学性能是微

测辐射热计性能的重要评价指标. 力学性能决定器件的稳定性, 应力导致器件结构发生相应的形变, 应力的最大值处往往是最容易引起器件失效的地方. 热学性能影响敏感薄膜的温升大小, 决定了信号输出的强弱, 影响微测辐射热计的探测灵敏度. 本文针对传统微测辐射热计在 THz 波段的低吸收与低响应, 优化设计不同的探测单元微桥结构, 利用 IntelliSuite 软件分别建立不同单元尺寸、不同桥腿宽度的微桥结构的有限元分析模型, 进行力学与热学仿真与分析, 研究其应力、形变与温升情况. 同时, 制备出基于不同探测单元结构的 THz 微测辐射热计焦平面阵列, 验证仿真结果并得到最佳的探测单元结构.

1 单元设计

本文的 THz 微测辐射热计基于具有“L 型”桥腿的红外微测辐射热计微桥结构, 这种结构有较长的桥腿长度和较大的有效探测面积. 微桥由桥墩、桥腿和桥面组成, 制作在带有读出电路的衬底上, 桥墩支撑起桥腿和桥面, 使桥腿和桥面悬空, 热敏薄膜制备

引用格式: 苟君, 蒋亚东, 王军, 等. 太赫兹微测辐射热计的设计、仿真与制备. 科学通报, 2014, 59: 727-732

Gou J, Jiang Y D, Wang J, et al. Design, simulation and manufacture of THz microbolometer (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 727-732, doi: 10.1360/972013-575

在桥面上. 桥面层下 1/4 波长($\lambda/4$)处制备一层金属反射层($\lambda=10 \mu\text{m}$). 桥面层与反射层之间为牺牲层, 去除牺牲层后形成一个独立式的热绝缘微桥结构. 氮化硅(Si_3N_4)作为支撑层和保护层, 氧化钒(VO_x)作为热敏薄膜, 铝(Al)作为电极引线和反射层, 牺牲层采用光敏聚酰亚胺材料(Polyimide, PI). 为提高 THz 辐射吸收, 对探测单元进行如下优化和改进.

(1) 在探测单元顶层增加一层 THz 辐射吸收层, 材料为 NiCr 合金, 厚度为 10 nm. 金属薄膜由于电阻损耗可以吸收 THz 辐射^[13], NiCr 合金薄膜用作吸收层时具有热容小、电阻率高以及形成连续薄膜的最小厚度可以低至几纳米等优点.

(2) 增大探测单元面积, 提高探测单元的占空比以增大 THz 辐射的吸收量.

(3) 探测单元面积较大($\geq 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$)时, 在桥面中心处制备条形孔(如图 1 所示), 以便于牺牲层的去除.

微桥结构的热损耗主要是经过桥腿的热传导, 桥腿的形态及其宽度对微桥结构的热导有着直接的影响. 同时, 桥腿作为支撑臂也是整个微桥结构的力学关键. 本文设计 4 种不同尺寸的探测单元, 每种探测单元分别设计两种不同的桥腿宽度($50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$: $1.0 \mu\text{m}$, $1.8 \mu\text{m}$; $75 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$: $1.3 \mu\text{m}$, $2.7 \mu\text{m}$; $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$: $1.8 \mu\text{m}$, $3.6 \mu\text{m}$; $125 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$: $1.8 \mu\text{m}$, $3.6 \mu\text{m}$), 进行探测单元的力学、热学仿真与焦平面阵列器件制备.

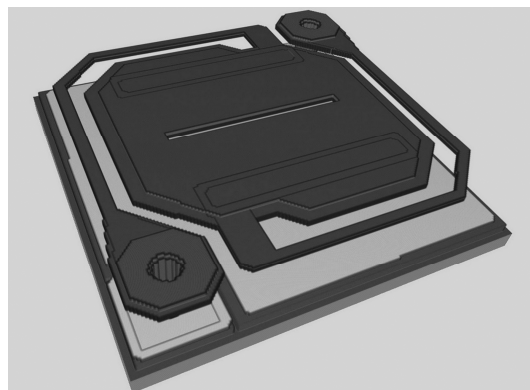


图 1 具有“L型”桥腿的红外微测辐射热计微桥结构

2 力学仿真

采用分析软件 IntelliSuite 分别建立上述结构的有限元分析模型, 研究其应力与形变情况. 太赫兹微测辐射热计的探测单元主要由 Al, NiCr, Si_3N_4 和 VO_x 材料构成. 各材料的力学参数如表 1 所示.

设置衬底为静止状态作为边界条件, 得到各探测单元的形变云图. 以探测单元 1-a 与 1-b 为例, 其形变云图分别如图 2(a)和(b)所示. 可见, 形变主要发生在桥面上和桥面与桥腿的连接区域. 形变沿桥腿向桥墩逐渐变小, 桥墩和与桥墩连接的区域几乎没有形变, 这是因为它们受衬底的约束作用稳定性很高. 而整个桥面和桥面与桥腿的连接区域处于悬空状态, 因此形变较大. 桥面里, 中心的形变最小, 由

表 1 THz 微测辐射热计材料的力学参数表

| 材料 | 杨氏模量 (GPa) | 泊松比 | 密度 (g/cm^3) | 内应力 (MPa) |
|-------------------------|------------|-------|-------------------------------|-----------|
| Al | 70 | 0.3 | 2.7 | +200 |
| NiCr | 200 | 0.26 | 8.9 | +300 |
| Si_3N_4 | 300 | 0.312 | 2.4 | +100 |
| VO_x | 80 | 0.25 | 3.36 | +200 |

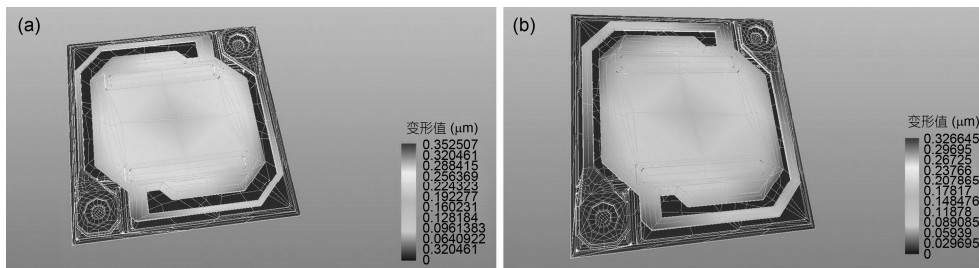


图 2 探测单元 1-a(a)与探测单元 1-b(b)的形变云图

中心向四周形变越来越大,这是因为在多层膜结构中薄膜平面的端部形变最大^[4].形变最大的区域集中在桥腿与桥面的连接处和桥面的两个对角处.可见,最大形变发生在角落区域,因为角落区域受到的剪切力最大.

仿真得到的各组单元的形变数据如表 2 所示.对比表 2 中的数据可以得出:增大探测单元面积,形变峰值大幅增加,这是由悬空的多层薄膜质量和重力随探测单元面积增大而明显增加而引起的.每组探测单元中,桥腿加宽约 1 倍时,桥腿拐角处的形变峰值减小 3%~4%,桥面的形变峰值减小 1%~2%.可见,加宽桥腿可以小幅改善形变.

3 热学仿真

太赫兹微测辐射热计探测单元中各材料的热学参数如表 3 所示.

目前常用作的 THz 光源的量子级联激光器(QCL)的平均辐射功率大约为 10 μW 左右.经过计算,我们设定热学仿真时入射到桥面的辐射热流密度为 $5 \times 10^{-12} \text{ W}/\mu\text{m}^2$.此外,设定衬底温度为 20 .得到各探测单元的温升分布图.以探测单元 1-a 与 1-b 为例,其温升分布图分别如图 3(a)和(b)所示.可见,整个微桥结构的桥面温升最高.温度从桥面至桥墩处呈递减分布,桥墩处几乎没有温升,与衬底一样 (20).

图 4 显示了各探测单元的温升对比.从图 4 可以看出:增大探测单元面积,吸收辐射的面积增大,桥面温升显著增大.相同单元尺寸下,桥腿宽度增加时,桥面温升显著减小.吸收薄膜吸收辐射后,在真空封装条件下热量损失都是经过微桥桥腿流向衬底,桥腿宽度越窄,其热导值越小,经过桥腿的热传导损耗就越小,从而使得探测单元温升增加.可见,要提升

表 2 各组单元的仿真形变数据

| 序号 | 单元尺寸 (μm×μm) | 桥腿宽度 (μm) | 桥面形变峰值 (μm) | 桥腿拐角处形变值 (μm) |
|-----|--------------|-----------|-------------|---------------|
| 1-a | 50×50 | 1.0 | 0.275817 | 0.284075 |
| 1-b | 50×50 | 1.8 | 0.266010 | 0.280327 |
| 2-a | 75×75 | 1.3 | 0.599237 | 0.623909 |
| 2-b | 75×75 | 2.7 | 0.582434 | 0.604787 |
| 3-a | 100×100 | 1.8 | 1.115350 | 1.168980 |
| 3-b | 100×100 | 3.6 | 1.061560 | 1.130690 |
| 4-a | 125×125 | 1.8 | 1.632550 | 1.789450 |
| 4-b | 125×125 | 3.6 | 1.608540 | 1.784960 |

表 3 THz 微测辐射热计材料的热学参数表

| 材料 | 密度 (kg/m ³) | 热导率 (W cm ⁻¹ K ⁻¹) | 比热容 (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | 热膨胀系数 (10 ⁻⁷ /K) |
|--------------------------------|-------------------------|---|---|-----------------------------|
| Al | 2.7 | 2.36 | 292 | 250 |
| Si ₃ N ₄ | 2.4 | 0.045 | 691 | 32 |
| NiCr | 8.9 | 0.907 | 440 | 133 |
| VO _x | 3.36 | 0.05 | 500 | 2 |

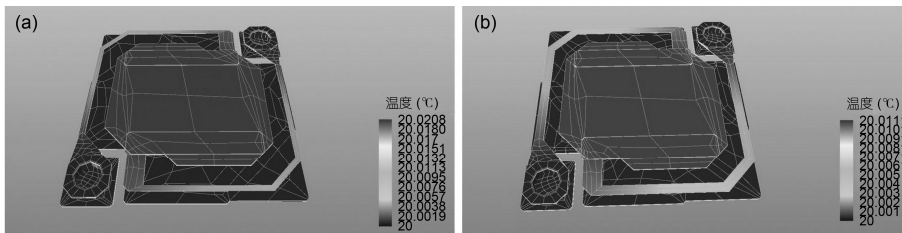


图 3 探测单元 1-a(a)与探测单元 1-b(b)的温升分布图

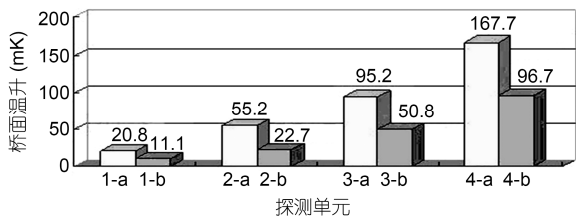


图4 各探测单元的桥面温升

桥面温升, 获得良好的热绝缘效果, 可以采用增大探测单元面积和减小桥腿宽度两种方式.

4 阵列制备

THz 微测辐射热计的力学与热学仿真结果都是在理想情况下得到的, 实际情况需要制备基于不同探测单元结构的 THz 微测辐射热计焦平面阵列来验证. THz 微测辐射热计焦平面阵列共需制备 10 余层图形, 包括 Al 反射层、PI 牺牲层、Al 桥墩层、NiCr 电极层、VO_x层、桥面层、NiCr 吸收层等. 阵列制备的主要工艺流程如图 5 所示.

采用 OLYMPUS LEXT OLS3000 激光共聚焦显微镜对制备的基于不同探测单元结构的焦平面阵列进行观测. 各焦平面阵列在释放牺牲层后的 3D 形貌

如图 6 所示.

图 6 表明, 单元 1-a 和 1-b 的桥面平整度较好, 未发生明显的形变; 单元 2-a 和 2-b 的桥腿拐角处出现轻微的翘曲形变; 单元 3-a 和 3-b 的桥面发生形变, 桥腿拐角处的形变更加明显; 单元 4-a, 4-b 的整体形变进一步加剧. 可见, 探测单元面积的大小显著影响其力学稳定性. 增大单元面积可以增加辐射吸收量, 显著提高热学性能, 但同时也显著地降低了其力学性能.

整体上看, 由于桥腿宽度的增加, 同组内单元 b 的形变较单元 a 有一定改善, 这与仿真结果相符. 但增大桥腿的宽度, 探测单元温升降低十分显著, 换句话说, 增大桥腿宽度很大程度上损害了探测单元的热学性能, 而带来的力学性能的改善却不明显. 因此, 在保证探测单元力学稳定性的情况下, 宜采用较细的桥腿. 单元仿真与阵列制备结果表明, 探测单元面积 75 μm×75 μm, 桥腿宽度 1.3 μm 的探测单元结构具有较好的力学与热学性能, 可以基于此结构开展更深入的研究.

5 总结

本文通过增加 NiCr 薄膜 THz 辐射吸收层, 同时

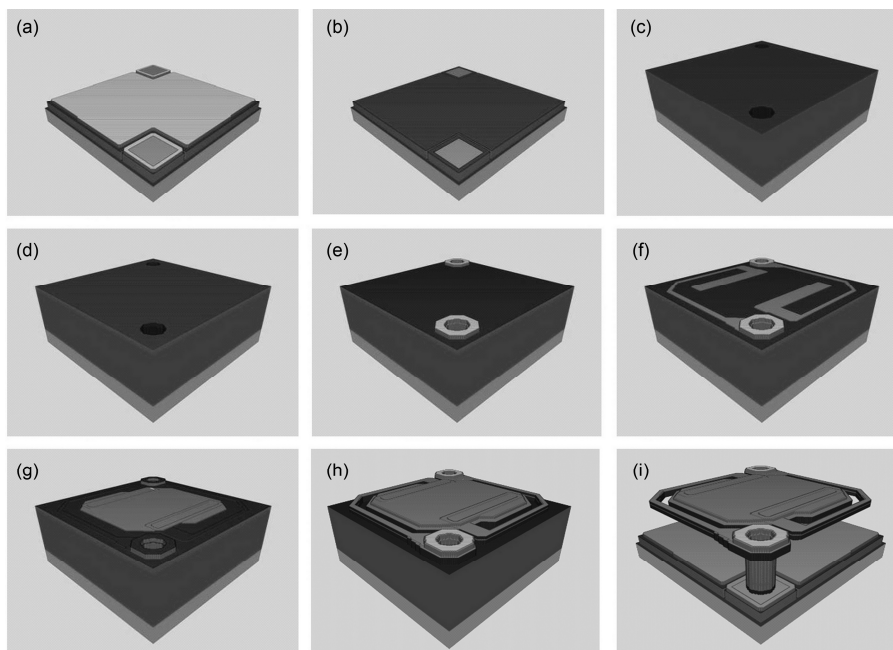


图5 THz 微测辐射热计焦平面阵列的主要制备工艺流程

(a) ROIC 预留电极; (b) 制备反射层; (c) 制备牺牲层; (d) 制备支撑层; (e) 制备桥墩; (f) 制备电极; (g) 制备氧化钒; (h) 制备吸收层; (i) 释放牺牲层

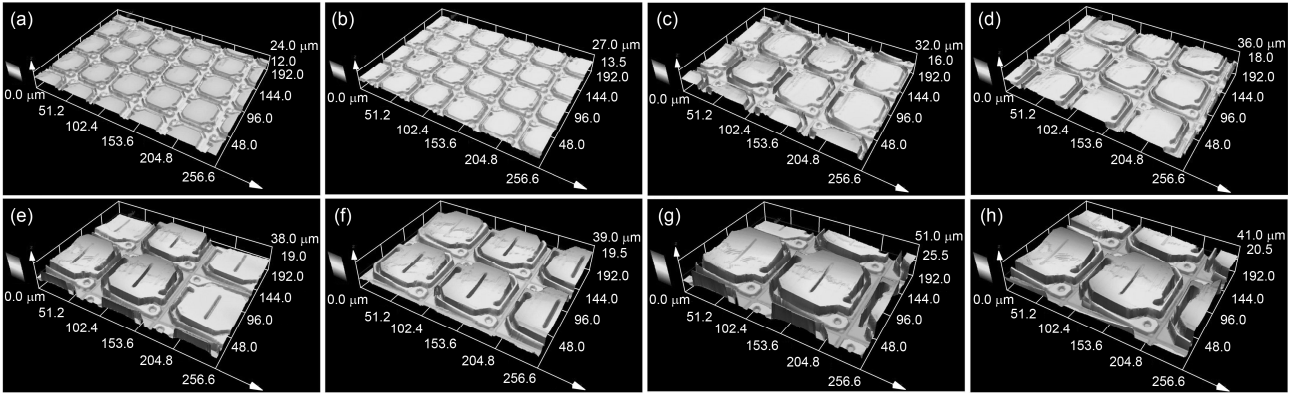


图 6 基于表 2 中不同探测单元结构的 THz 微测辐射热计焦平面阵列的 3D 形貌图

(a) 探测单元 1-a; (b) 探测单元 1-b; (c) 探测单元 2-a; (d) 探测单元 2-b; (e) 探测单元 3-a; (f) 探测单元 3-b; (g) 探测单元 4-a; (h) 探测单元 4-b

增大探测单元面积, 提高 THz 微测辐射热计的探测灵敏度. 设计不同单元尺寸、不同桥腿宽度的微桥结构, 采用分析软件 IntelliSuite 建立其有限元分析模型进行力学与热学仿真, 研究探测单元的应力、形变与温升情况. 由于角落区域较大的剪切力, 形变主要集中在桥腿与桥面的连接处和桥面的两个对角处. 增大探测单元面积, 悬空的多层薄膜质量和重力增加,

形变明显增大. 加宽桥腿可以小幅改善形变. 通过增大探测单元面积和减小桥腿宽度可以提升桥面温升. 对基于不同探测单元结构的 THz 微测辐射热计焦平面阵列进行了制备, 探测单元的实际形变情况与仿真结果相符. 综合考虑探测单元的力学与热学性能, 单元面积 $75 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$, 桥腿宽度 $1.3 \mu\text{m}$ 的微桥结构适合用作 THz 微测辐射热计的探测单元结构.

参考文献

- 1 宝日玛, 吴世祥, 赵昆, 等. 半封闭半开放体系下不同演化程度干酪根的太赫兹光谱特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 458-463
- 2 王卫宁, 岳伟伟, 闫海涛, 等. 氨基酸分子的太赫兹时域光谱. 科学通报, 2005, 50: 2348-2351
- 3 田璐, 周庆莉, 金彬, 等. 润滑油的太赫兹波段光学与光谱特性研究. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 52: 1589-1593
- 4 黎华, 曹俊诚, 太赫兹量子级联激光器制备及其成像应用. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 485-493
- 5 Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications—Explosives, weapons, and drugs. Semicond Sci Technol, 2005, 20: S266-S280
- 6 Kim S M, Hatami F, Harris J S, et al. Biomedical terahertz imaging with a quantum cascade laser. Appl Phys Lett, 2006, 88: 153903
- 7 Taylor Z D, Singh R S, Culjat M O, et al. Reflective terahertz imaging of porcine skin burns. Opt Lett, 2008, 33: 1258-1260
- 8 顾超, 屈绍波, 裴志斌, 等. 基于平行金属线的太赫兹准全向超材料吸波体. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 280-285
- 9 Lee A W M, Williams B S, Kumar S, et al. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320×240 microbolometer focal-plane array. IEEE Photonic Tech Lett, 2006, 18: 1415-1417
- 10 Behnken B N, Lowe M, Karunasiri G, et al. Detection of 3.4 THz radiation from a quantum cascade laser using a microbolometer infrared camera. Proc SPIE, 2007, 6549: 65490C
- 11 Dem'yanenko M A, Esaev D G, Ovsyuk V N, et al. Microbolometer detector arrays for the infrared and terahertz rangs. J Opt Technol, 2009, 76: 739-743
- 12 Coppinger M J, Sustersic N A, Kolodzey J, et al. Sensitivity of a vanadium oxide uncooled microbolometer array for terahertz imaging. Opt Eng, 2011, 50: 053206
- 13 Bolakis C, Grbovic D, Lavrik N V, et al. Design and characterization of terahertz-absorbing nano-laminates of dielectric and metal thin films. Opt Express, 2010, 18: 14488-14495
- 14 杨卓, 许向东, 敖天宏, 等. 双层红外微测辐射热计的微桥结构仿真. 红外与激光工程, 2012, 41: 1677-1683

Design, simulation and manufacture of THz microbolometer

GOU Jun, JIANG YaDong, WANG Jun, YU Lei & LI WeiZhi

State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

The authors made optimal design on micro-bridge structure of uncooled microbolometer operated in terahertz (THz) range to improve detection sensitivity. A nickel-chromium (NiCr) thin film with a thickness of 10 nm acting as THz absorption layer was added and the absorption area of the cell was expanded. IntelliSuite was used for mechanical and thermal simulations by finite element analysis of micro-bridge structures with different unit sizes and different bridge leg widths. Results revealed that deformation was significantly increased with the increased cell area. A small range decrease of deformation was achieved by using wider legs. Temperature rise of bridge was enhanced by increasing the cell area and reducing the width of bridge legs. THz microbolometer focal plane arrays based on the designed structures were manufactured and the results agreed well with the simulations. The structure with a unit size of $75\ \mu\text{m}\times 75\ \mu\text{m}$ and a leg width of $1.3\ \mu\text{m}$ was suitable for THz microbolometer for its good mechanical and thermal properties.

THz microbolometer, mechanical simulation, thermal simulation, manufacture

doi: 10.1360/972013-575