光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022082201

双层伞状开孔的微测辐射热计红外吸收分析

蒋君贤，王　涛，陈　超*，吴志明，王　军

（电子科技大学 光电科学与工程学院，成都 610054）

摘　要： 建立了具有伞状吸收层结构的微测辐射热计探测单元的红外吸收模型。基于光学导纳矩阵法和阻抗匹配理论，采用三维电磁仿真软件 CST，对伞状结构不同开孔尺寸和形状下模型的红外吸收特性进行了分析。结果表明，双层伞状开孔微测辐射热计光学性能与伞状结构开孔大小有密切的关系。该伞状微测辐射热计中引入开孔后，在保持较高的红外吸收特性的基础上，减少了探测单元热容，从而提升了器件响应速度。最终所得探测单元在 8～14 μm 红外波段内的平均吸收率为 85%，满足超大规模小像元非致冷红外焦平面探测器的设计要求。

关键词： 微测辐射热计；光学仿真；小像元；吸收率；微桥结构

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0044－05

Infrared Absorption Analysis of Microbolometer with Two-Layer Umbrella-Shaped Openings

JIANG Junxian, WANG Tao, CHEN Chao, WU Zhiming, WANG Jun

(School of Optoelectronic Science and Engin., University of Electronic Science and Technol. of China, Chengdu 610054, CHN)

Abstract: An infrared absorption model for microbolometer detection units with an umbrella-shaped absorption layer structure are established. Based on the optical admittance matrix method and impedance matching theory, the infrared absorption characteristics of the model under different aperture sizes and shapes of the umbrella structure are simulated using three-dimensional electromagnetic simulation software CST. The results show that the optical performance of the dual-layer umbrella-shaped aperture microbolometer is closely related to the aperture size of the umbrella structure. The introduction of the aperture in the umbrella-shaped microbolometer reduces the heat capacity of the detection unit while maintaining high infrared absorption characteristics, thereby improving device response speed. The resulting detection unit has an average absorption rate of 85% in the 8～14 μm infrared band, meeting the design requirements of large-scale small-pixel non-cooled infrared focal plane detectors.

Key words: microbolometer; optical simulation; small pixel; absorptivity; micro-bridge structure

0　引言

近年来，非致冷红外焦平面探测器在朝着小型化、低功耗、高灵敏、高分辨率方向发展[1-2]，已在越来越多的行业内得到应用。微测辐射热计作为红外辐射能量吸收的核心结构，其设计及制造直接影响着非致冷探测器的性能指标[3]。目前被广泛应用的微桥结构主要有单层和双层微桥结构。传统单层微桥结构的微测辐射热计将光敏层和红外吸收层沉积于一个桥面上，工艺相对简单。但随着探测器技术的发展，像元尺寸不断缩小，单层微桥的悬臂梁需要制备得越来越细长才能达到较高的性能，但过长的悬臂梁结构会极大地降低微测辐射热计单元的占空比[4-5]。而双层结构的微测辐射热计结构，利用双吸收层技术，额外增加了一层悬浮吸收层结构，可极大提高单元占空比。这种通过提高像元填充系数和改变光学谐振腔的设计可获得更高的吸收率，从而提升器件性能。然而由于增加了一层结构，导致探测

收稿日期：2022－08－22.

*通信作者：陈　超　E-mail：chenchao@uestc.edu.cn

单元的热容也随之增加，这将影响器件的响应速度。

本文将展开微测辐射热计结构的相关研究，设计一种像元尺寸为 12 μm 的双层伞状微测辐射热计开孔结构，以达到在不降低器件红外吸收的基础上，尽量降低器件热容，从而满足较高帧频探测的要求。采用三维电磁仿真软件 CST 对像元结构的红外吸收进行了仿真计算，讨论了开孔数目对探测单元红外吸收率的影响，得到器件的红外吸收率及电场强度分布，从而获知模型性能，提高设计效率，为后续器件制备提供参考。

1　理论分析及模型

1.1　基本理论

微测辐射热计目前主要利用光学导纳矩阵理论分析其光学性能，通过改变各层膜厚和衬底与桥面形成的光学谐振腔高度，优化结构获得较高的红外吸收率[6]。本文所设计的伞装双层微测辐射热计单元结构如图 1 所示。

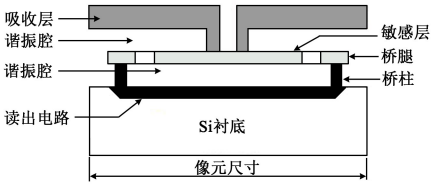


图 1　微测辐射热计膜层结构图[4]

通过光学导纳矩阵法，可计算图 1 所示的结构的薄膜光吸收情况[7-9]，得到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 $T(\lambda)$ 进而得到膜系红外吸收谱 $A(\lambda)$。

根据薄膜光学理论计算膜系吸收率的矩阵方法，引入导纳 Y 和特征矩阵 $\boldsymbol{M}_j$（第 j 层膜的特征矩阵），计算多层介质薄膜的反射率和透射率。

$$\boldsymbol{M}_j=\begin{bmatrix}\cos\delta_j & \mathrm{i}\sin\delta_j/\eta_j\\ \mathrm{i}\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j\end{bmatrix} \tag{1}$$

式(1)为薄膜的特征矩阵。其中 $\delta_j=\dfrac{2\pi}{\lambda}N_j d_j\cos\theta_j$ 为入射光在各膜层中传输所产生的相位变化。考虑到器件工作的实际情况，针对理论计算可以作以下假设：各层是各向同性的均匀薄膜[8]；输入波是横电波(S 波)且垂直入射。对于 S 波且垂直入射时，$\theta_j=0$，整个膜系的特征矩阵 $\boldsymbol{M}$ 为

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}B\\ C\end{bmatrix}=\left\{\prod_{j=1}^{k}M_j\right\}\begin{bmatrix}1\\ \eta_s\end{bmatrix} \tag{2}$$

那么将空气视为入射介质，整个系统反射率和透射率分别为

$$R(\lambda)=\left(\frac{\eta_0 B-C}{\eta_0 B+C}\right)\left(\frac{\eta_0 B-C}{\eta_0 B+C}\right)^{*} \tag{3}$$

$$T(\lambda)=\frac{4\eta_0\eta_s}{(\eta_0 B+C)(\eta_0 B+C)^{*}} \tag{4}$$

其中，η_0 为入射介质的光学导纳，η_s 为出射介质的光学导纳。所以膜系吸收率为

$$A(\lambda)=1-R(\lambda)-T(\lambda) \tag{5}$$

由于光学导纳矩阵计算结果是基于二维膜层，未考虑模型三维尺寸，当采用不同微桥结构时，探测单元对于红外辐射的吸收也有所不同。为了更真实和准确地模拟器件的红外吸收特性，本文采用 CST 仿真软件，建立了三维的微测辐射热计红外吸收模型，进行光学仿真，并引入阻抗匹配原理进行分析论证。阻抗匹配理论[10]是一种基于电磁参数的研究方法，当入射电磁波的波长远远大于吸波结构的尺寸时，可以将其看作均匀介质，即在工作波段范围内，通过改变吸收器的介电常数 $\varepsilon(\lambda)$ 和磁导率 $\mu(\lambda)$ 使吸收器的结构阻抗和自由空间阻抗相匹配，其中，λ 为入射光波长[10]。吸收器结构的阻抗 Z 和自由空间的阻抗 $Z_0(\lambda)$ 可表示为

$$Z=\sqrt{\frac{(1+S_{11})^2-S_{21}^2}{(1-S_{11})^2-S_{21}^2}} \tag{6}$$

$$Z_0(\lambda)=\sqrt{\frac{\mu(\lambda)}{\varepsilon(\lambda)}} \tag{7}$$

式中，S_{11} 为反射系数，S_{21} 为透射系数。反射率 $R(\lambda)$ 可表示为

$$R(\lambda)=\left|\frac{Z-Z_0(\lambda)}{Z+Z_0(\lambda)}\right|^2 \tag{8}$$

由式(8)可知，当 $Z=Z_0(\lambda)=1$ 时，吸收器的反射率最小，满足阻抗匹配条件[10]。由于微桥结构中底层有金属铝的存在，使得结构的透射率接近 0，当结构阻抗 $Z=1$ 时，吸收器可实现优异的吸收性能。

2　光学仿真设计

2.1　微桥结构建模

双层结构因具有较高的占空比而广受关注[11]。本文所设计的 12 μm×12 μm 的双层微测辐射热计结构，如图 2 所示。该结构的膜系及厚度参数如表 1，所选材料相关材料参数来自相关折射率数据库。

表 1 微测辐射热计膜层厚度表

膜层	膜厚/μm
Si_3N_4	0.07
Ti	0.025
Si_3N_4	0.025
Si_3N_4	0.03
VO_x	0.07
Si_3N_4	0.12
真空腔	2
Al	0.33
硅衬底	5

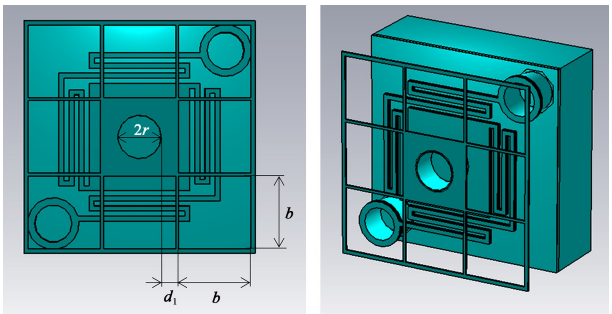


图 2 双层微测辐射热计伞盖 3×3 开孔结构图

伞盖膜层开孔大小为 b，中心孔半径为 r，开孔距离中心孔间距为 d_1，伞盖膜系及厚度如表 2 所示。

表 2 微测辐射热计伞盖膜层厚度表

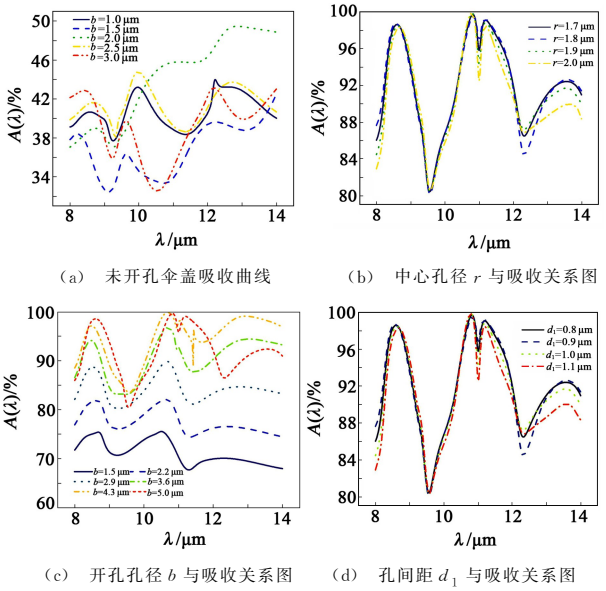
膜层	膜厚/μm
Si_3N_4	0.025
Ti	0.01
Si_3N_4	0.08
真空腔	2

2.2 双层结构光学仿真分析

双层微测辐射热计是在单层的基础上，添加一层吸收层，可以获得更高的填充系数，同时可以增加一次腔共振，以增加微测辐射热计的红外吸收，从而获得更高的响应率。但这会引入额外的热容，降低器件响应速度。因此将双层伞装微测辐射热计单元基础上的伞盖层增设开孔，从而达到降低探测单元热容的目的。本文设计了两种不同开孔数、孔径大小的结构，进行红外吸收仿真分析。首先针对图 2 所示的 3×3 的方孔伞盖吸收结构进行仿真。

为了对比开孔吸收效果，图 3(a)给出了伞盖结构未开孔的红外吸收特性。而伞盖开孔大小 b、孔间距 d_1 以及中心孔 r 大小对结构光学吸收的影响，结果如图 3(b)～(d)所示。

如图 3(b)所示，当开孔大小和孔间距不变时，增大中心孔 r 时吸收曲线的变化与增大孔间距时的变化趋势一致。因此，相比于改变孔间距和中心孔半径，增大开孔大小对于器件红外吸收有明显增强效果，在 8～14 μm 波段红外吸收由 70%增大至 92%。由图 3(c)可得，当孔间距 $d_1=0.9$ μm 与中心孔 $r=1.8$ μm 时，随着开孔大小 b 的增加，器件整体红外吸收在逐步增大，当 b 在 1.5～3.6 μm 范围内增长时，其吸收曲线波峰波谷的位置不会发生明显变化，两个较明显的吸收峰位置分别在 8.5 和 10.5 μm；当 b 继续增大时，吸收峰出现明显增高的同时也会出现杂峰，且增大至 5 μm 时，波谷处的吸收值低于 $b=3.6$ μm 处的值，在 11.2 μm 处出现新的吸收峰且波谷位置右移出现在 12.2 μm 处。如图 3(d)所示，当开孔大小 $b=5$ μm，中心孔半径 $r=1.8$ μm 不变时，可以看出随着孔间距 d_1 的增大，在第一个波峰处的吸收值由 98.8%降低为 98%，且吸收峰的位置右移 0.2 μm，而在第二个波峰处的吸收值略有增加，波谷值明显减小，由 96%降至 92%，新增吸收峰的吸收值也略有减小，但下一个波谷值却相对增加，波长为 13.5 μm 处吸收值也明显降低。



(a) 未开孔伞盖吸收曲线 (b) 中心孔径 r 与吸收关系图

(c) 开孔孔径 b 与吸收关系图 (d) 孔间距 d_1 与吸收关系图

图 3 双层微测辐射热计未开孔伞盖的红外吸收曲线以及开孔和参数对结构光学吸收的影响

通过与非开孔的双层微测辐射热计结构仿真结果对比，双层开孔的器件整体吸收显著大于双层未开孔吸收，即开孔对于器件整体吸收有增强作用。

综上所述，通过分析具有不同伞盖结构微测辐射热计的光吸收性能，验证了开孔形状(方孔)对于红外吸收的影响。为了研究开孔数量对于器件红外吸收的影响，随后又设计了一种 5×5 方孔伞盖的微测辐射热计探测单元，如图 4 所示。分别针对中心

孔 $r=1.5\ \mu m$ 和 $r=2\ \mu m$ 的伞盖，改变其孔径大小和孔间距，进行光学仿真分析，结果如图 5 所示。

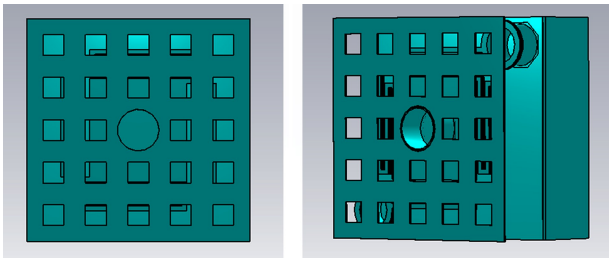


图 4　双层微测辐射热计伞盖 5×5 开孔结构图

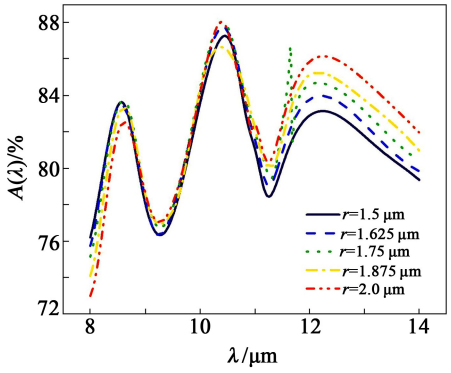
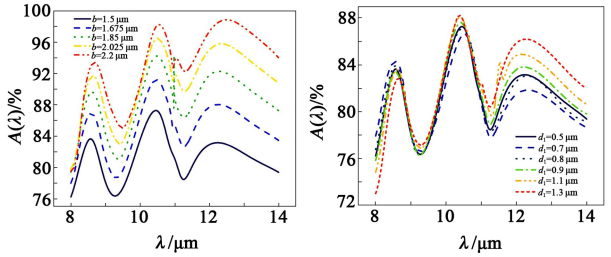


图 5　伞盖开孔中心孔孔径 r 与吸收关系图

图 5 为扫描中心孔 r 的大小与红外吸收的关系。当 r 增大时，在 8～9 μm 范围内呈现与 3×3 方孔相同的趋势，即吸收相对降低且曲线微微右移；而在 9～14 μm 范围内却呈现相反的趋势，r 增大，红外吸收曲线在该波段也呈现增大的趋势，并在波长 12 μm 处的位置吸收增强较为明显，该处吸收峰值由 83%增至 86.2%，且整体无右移趋势。针对此现象，主要研究了当中心孔 $r=1.5\ \mu m$ 时，孔径大小和孔间距对光吸收性能的影响，结果如图 6 所示。

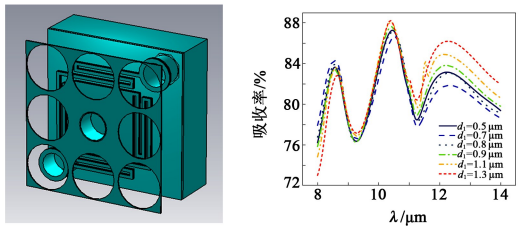


（a）　孔径 b 与吸收关系图　　（b）　孔间距 d_1 与吸收关系图

图 6　孔径 b 和孔间距 d_1 与吸收关系图

如图 6(a)所示，当 $r=1.5\ \mu m$ 时，增大方孔孔径 b，红外吸收曲线明显上升，这与 3×3 方孔伞盖呈现增长趋势相同，最高吸收峰处的吸收值由 87%增至 98%，且整体增长无明显右移趋势，波长为 12.2 μm 处的吸收峰值增长更大，由 83%增至 98.8%，成为最高吸收峰。由图 6(b)可知，当增大孔间距 d_1 时，在 8～9 μm 范围内，随着 d_1 增大，吸收曲线呈现先增大后减小的趋势，而在 9～14 μm 范围内，d_1 增大，吸收曲线呈现先减小后增大的现象。因此，开孔大小和孔间距对平均吸收的影响都表现出在开孔越大和孔间距越大时，红外吸收普遍增强。

针对双层开孔为圆孔的结果可知，圆孔开孔直径 b 由 1.5 μm 逐步增加至 2.5 μm，选取其中六组参数进行分析对比，可以看出当直径 b 由 1.5 μm 增加至 2.5 μm 的过程中，红外吸收曲线也在逐步升高，呈现和方孔伞盖相同的变化趋势，且平均吸收曲线无明显差异，在波峰和波谷位置处的吸收值都逐步增大，如图 7(a)和(b)所示。

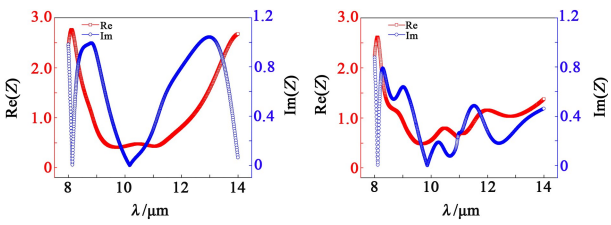


（a）　伞盖开孔圆孔结构图　　（b）　孔径大小 b 与吸收关系图

图 7　伞盖开孔圆孔结构和孔径 b 与吸收关系图

2.3　电场结果分析

由阻抗匹配理论可知，当吸波结构的阻抗等于自由空间的波阻抗时，即二者均为 377 Ω，入射的电磁波反射系数为 0，电磁波可近似认为完全进入到吸波结构的内部，此时，吸波结构可实现对电磁波的完美吸收[10]。因此本文利用 CST 软件仿真数据后处理，得到了有效表面阻抗 Z 与入射的红外波之间的函数关系，如图 8(a)和(b)所示。



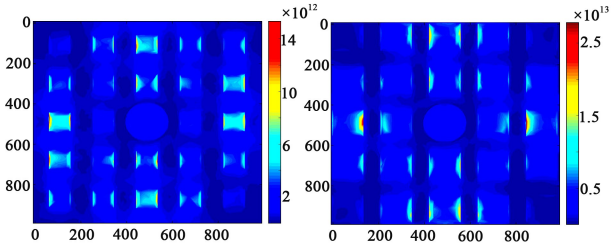
（a）　伞盖孔为 1.5 μm 时　　（b）　伞盖孔为 2.2 μm 时

图 8　两种伞盖孔尺寸下的等效阻抗实部与虚部

图 8(a)和(b)中红色曲线表示 5×5 开孔伞盖微测辐射热计等效阻抗 Z 的实部，蓝色曲线为等效阻抗 Z 的虚部。根据阻抗匹配原理可知，当结构与自由空间阻抗相等时，电磁波可以被吸波结构全部吸收，即在峰值波长对应处，吸波结构的等效阻抗实部几乎等于 1，与此同时，虚部几乎为 0。从图 8(a)

可以看出，3×3 开孔伞盖的微测辐射热计阻抗实部和虚部在 10.46 μm 处分别最接近 1 与 0，即在此时认为达到全波段范围内吸收值最高点。而在 5×5 开孔伞盖微测辐射热计阻抗图 8(b)中，明显可以看出，阻抗实部接近 1，虚部接近 0 的值点增多，可近似认为在 10.54，12.49 μm 等波长处达到最高吸收。此结果与仿真结果相对应，与理论吸收达到最高值，因此可认为在自由空间实现阻抗匹配。

图 9(a)，(b)为中心 $r=1.5$ μm 和 $r=2.2$ μm 时伞盖吸波结构在不同波长下的电场强度分布。



(a) 伞盖孔为 1.5 μm 在 10.46 μm 处 (b) 伞盖孔为 2.2 μm 在 10.54 μm 处

图 9 不同伞盖孔尺寸下 *XOY* 吸收电场强度分布图

3 总结分析

本文设计了 12 μm×12 μm 双层伞盖开孔微测辐射热计单元结构，建立了光学设计模型，并采用 CST 软件，分析了不同结构器件的红外吸收特性。讨论了伞盖开孔大小与数目对红外吸收的影响，结合阻抗匹配理论和电场强度分布图验证了伞盖开孔的光吸收仿真结果。主要结论如下：在工艺可行范围内，伞盖开孔越大，孔数目越多，红外吸收显著增强。伞盖开孔在增强红外吸收的同时可减小热容，从而提升器件响应速度，这在器件制备应用中具有实际意义，满足制备超大规模、高性能快速响应高吸收微测辐射热计的要求。本文所提出的设计方法可在微测辐射热计结构单元器件设计阶段快速、准确、低成本地预估器件性能，缩短研发周期，提高设计精度和效率，为微测辐射热计的实际制备及其光学结构设计提供可靠的参考。

参考文献：

[1] 雷亚贵，王戎瑞，陈苗海. 国外非制冷红外焦平面阵列探测器进展[J]. 激光与红外，2007，37(9)：801-805.
Lei Yagui，Wang Rongrui，Chen Miaohai. Development of foreign uncooled IRFPA detectors[J]. Laser & Infrared，2007，37(9)：801-805.

[2] 冯 涛，金伟其，司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J]. 红外技术，2015，37(3)：177-180.
Feng Tao，Jin Weiqi，Si Junjie. Uncooled infrared FPA-A review and forecast[J]. Infrared Technology，2015，37(3)：177-180.

[3] 阳启明，张剑铭，杨道虹，等. MEMS 技术在非制冷红外探测器中的应用[J]. 半导体技术，2004，29(10)：27-30.
Yang Qiming，Zhang Jianming，Yang Daohong，et al. Application of MEMS technology to fabrication of uncooled infrared detector[J]. Semiconductor Technology，2004，29(10)：27-30.

[4] 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[J]. 红外与激光工程，2012，41(7)：1678-1679.
Yang Zhuo，Xu Xiangdong，Ao Tianhong，et al. Simulation of structures for two-layer infrared microbolometers[J]. Infrared and Laser Engineering，2012，41(7)：1678-1679.

[5] Yutaka Tanaka，Akio Tanaka，Kiyoshi Lida，et al. Performance of 320 × 240 uncooled bolometer type infrared focal plane arrays[J]. Proc. SPIE，2003，5074：414-424.

[6] 雷述宇，李军利. 微测辐射热计单元红外吸收分析[J]. 红外技术，2015，37(8)：672-673.
Lei Shuyu，Li Junli. Analysis of infrared absorption for 25 μm pitch pixel of micro-bolometer[J]. Infrared Technology，2015，37(8)：672-673.

[7] 杨晓瑜，蒋亚东，吴志明，等. 微测辐射热计的优化设计[J]. 电子器件，2007，30(4)：1172-1173.
Yang Xiaoyu，Jiang Yadong，Wu Zhiming，et al. The optimized design of microbolometer[J]. Chinese J. of Electron Devices，2007，30(4)：1172-1173.

[8] 董 良，岳瑞峰，刘理天. 微测辐射热计光学与热学设计[J]. 红外与毫米波学报，2003，22(2)：110-111.
Dong Liang，Yue Ruifeng，Liu Litian. Optical and thermal design for microbolometer[J]. J. Infrared Millim. Waves，2003，22(2)：110-111.

[9] 唐晋发，郑 权. 应用薄膜光学[M]. 上海：上海科学技术出版社，1984：39-67.
Tang Jinfa，Zheng Quan. Applied Thin Film Optics[M]. Shanghai：Shanghai Scientific and Tech. Publishers，1984：39-67.

[10] 刘 坤，刘媛媛，邓 芳，等. 嵌入式长波红外超宽带完美吸收器[J]. 光学学报，2021，41(24)：2-3.
Liu Kun，Liu Yuanyuan，Deng Fang，et al. Long-wave infrared ultra-broadband perfect absorber with embedded structure[J]. J. of Optics，2021，41(24)：2-3.

[11] Howard P E，Clarke J E. DRS U6000 640 × 480 VOX uncooled IR focal plane[J]. Proc. SPIE，2002，4721：48-55.

作者简介：

蒋君贤(1999—)，女，硕士研究生，主要研究方向为非致冷红外焦平面探测器；

陈 超(1980—)，男，博士，副研究员，主要研究方向包括非致冷红外焦平面探测技术、量子及拓扑绝缘体材料新型红外探测器。