

面向空间应用的 10 THz 焦平面 成像系统冷光学设计*

李家辉^{1,3} 马跃学^{2,3} 朱皓天^{1,3}
全加^{2,3} 刘子尧²

1(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院理化技术研究所 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 空间被动探测的目标信号通常非常微弱, 并且探测系统需要实现高灵敏度和低噪声的要求. 此时, 冷光学的引入成为必然——通过将光学器件 (例如透镜和反射镜) 集成到低温环境中, 并结合低温探测器, 实现探测需求. 但由于星载设备的冷量有限, 对传统的光学设计提出了约束与实现难度. 基于冷光学理论, 提出了一种基于多重反射的冷光学模型, 并依据该模型对窗口尺寸进行了优化. 完成了 10 THz 焦平面阵列成像系统方案设计与漏热计算, 系统采用脉冲管耦合节流制冷的空间制冷技术. 完成了冷光学实验, 理论模型与实验结果相互印证. 研究结果可以为中国太赫兹冷光学技术的发展提供关键技术支持.

关键词 太赫兹, 冷光学, 空间制冷, 漏热计算

中图分类号 TN015

Cold Optical Design of 10 THz Focal Plane Imaging System for Space Applications

LI Jiahui^{1,3} MA Yuexue^{2,3} ZHU Haotian^{1,3}
QUAN Jia^{2,3} LIU Ziyao²

1(CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In passive space exploration, the target signals are typically extremely weak and the detection system needs to achieve high sensitivity and low noise requirements. To satisfy these demands, cold

* 国家重点研发计划项目 (2023YFB3905603) 和国家自然科学基金项目 (62171432) 共同资助

2025-06-02 收到原稿, 2025-08-21 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

optics has become indispensable. This method integrates optical components (such as lenses and mirrors) into cryogenic environments and combines them with cryogenic detectors to fulfill the detection needs. However, conventional optical design is constrained by the limited cooling capacity of spaceborne instruments. The research presents a cold optical model based on multi-reflection and optimizes the window size design according to this model. The cold optical experiment conducted in this research demonstrates a strong correlation between the predicted results and the experimental results, thereby confirming the effectiveness of the proposed model. The optimization of the window size is a critical factor in reducing thermal leakage and improving the overall performance of the system. From an optical perspective, the optical path delivers the desired signal; however, from a thermal perspective, it also introduces heat, imposing a thermal load on the cryogenic system. Engineering design must therefore strike a balance between these competing optical and thermal constraints. This research not only advances the field of cold optics but also provides a practical solution for the design of high sensitivity, low-noise detection systems in space applications. The proposed model and experimental validation offer a robust foundation for the development of more efficient and reliable cold optical systems, contributing to the advancement of space exploration technology. The method and results presented in this paper can serve as a reference for further research and development in the field of cold optical systems.

Key words Terahertz, Cold optical, Space refrigeration technology, Heat leakage calculation

0 引言

太赫兹波 (Terahertz, THz) 作为电磁波频谱的一部分, 波长范围为 $30\sim 3000\ \mu\text{m}$, 对应的频率范围为 $0.1\sim 10\ \text{THz}$, 介于微波和红外之间, 也被称为亚毫米波^[1]. 太赫兹波的频谱信息丰富, 许多分子在太赫兹具有吸收峰^[2], 例如 H_2O 分子、 CO 分子等, 广泛应用于天文、遥感等领域. 空间探测需要实现高灵敏度和低噪声的要求, 而采用冷光学技术是解决该问题的有效方法. 具体来说, 根据斯蒂芬-波耳兹曼定律, 物体的温度越高, 其自身辐射越强. 因此, 让光学系统工作在低温条件下可以降低仪器自身的热辐射, 减少系统的噪声, 提高系统的信噪比. 特别是在探测微弱信号时, 冷光学技术已经成为提高探测灵敏度的必要手段^[3,4]. 随着科学技术的不断进步, 越来越多的空间载荷均需要冷光学技术来满足其高性能的探测需求.

空间应用的冷光学系统与地基冷光学系统的关键区别是制冷机提供冷量的不同. 由于空间系统体积和重量受限, 制冷剂补给困难, 制冷机的制冷能力有限, 导致可供冷光学系统的冷量不足. 有限的冷量可能会导致光学系统无法降至所需的低温, 或者无法保持温度稳定. 当制冷机提供的冷量小于系统的漏热时, 系统甚至完全无法工作. 因此, 研究太赫兹波段空间应用的冷光学技术具有重要意义.

关于空间冷光学研究, 国际上最具代表性的是詹

姆斯·韦伯太空望远镜 (JWST)^[5,6]. JWST 主镜发射时折叠, 入轨后展开, 展开后的直径为 $6.5\ \text{m}$. JWST 的遮阳板共有 5 层, 用来阻挡太阳光直射, 多层设计逐级降低热量传递, 确保主镜能够工作在 $40\ \text{K}$ 的温区. JWST 所搭载的中红外仪器 (MIRI), 具备成像、光谱分析的功能, 是唯一需要主动制冷的载荷. 根据科学目标需求, 采用了高频脉冲管制冷机耦合节流制冷的复合制冷技术, 将探测器制冷到 $6\ \text{K}$, 避免热辐射淹没来自宇宙的微弱信号.

中国空间冷光学研究方面, 中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院理化技术研究所和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等开展了镜头在低温环境下的形变特性、冷光学装调、杜瓦屏窗口设计、杜瓦组件设计、空间制冷技术等相关研究工作^[7-12]. 对比国际上的冷光学技术, 中国在相关技术领域起步较晚, 目前多处于理论研究阶段, 与美国 NASA 和欧洲 ESA 等存在一定的差距. 未来需要开展更加深入和细致的研究, 而且由于空间制冷存在技术壁垒, 开展冷光学研究和实验具有重要意义.

本文聚焦应用于空间探测的 $10\ \text{THz}$ 焦平面成像系统. 该系统采用焦平面阵列探测器, 即阻挡杂质带 (Blocked Impurity Band, BIB) 探测器. 在 $4\sim 8\ \text{K}$ 的工作温区, 该探测器通过吸收层与阻挡层的结构实现超高灵敏度, 实现被动太赫兹成像. 制冷方式采用高频脉冲管制冷耦合节流技术的复合制冷方式. 受到

空间应用功耗限制, 该制冷方式在 4 K 温区的冷量仅能达到百毫瓦量级, 因此系统漏热的计算尤为重要。

1 冷光学理论

冷光学研究的基本原理是黑体辐射定律。根据该定律, 所有的物体均会持续辐射能量, 且温度越高, 辐射能量越强。在探测目标信号时, 光学器件自身发出的辐射会成为噪声。对于空间制冷系统来说, 制冷机的体积和重量均受到限制, 制冷能力也有限, 若热辐射太多, 制冷系统可能无法降到目标温度。通过降低光学器件的温度可以减小其热辐射, 提高系统的信噪比和灵敏度, 黑体的辐射谱线如图 1 所示。从图 1 可以看出, 温度越低, 黑体辐射能力下降越明显。黑体的单色光谱辐射通量密度可以用黑体辐射定律来描述, 其在真空中的表达式为

$$L(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1)$$

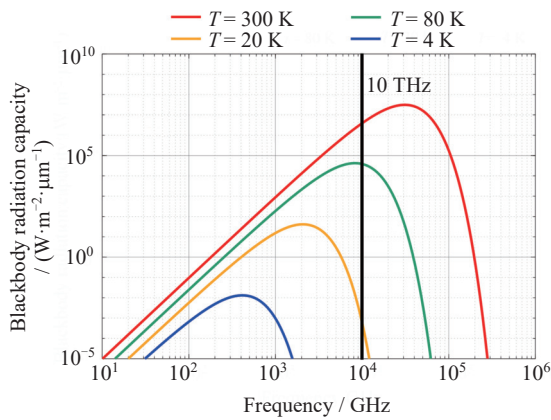
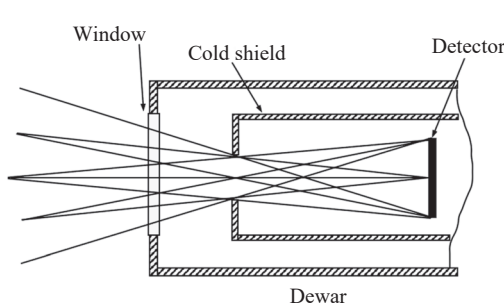
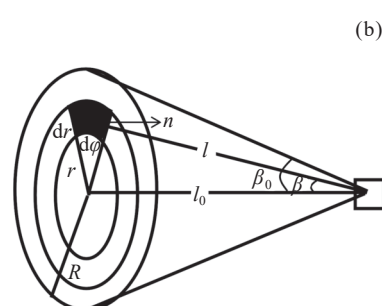


图 1 黑体辐射谱线

Fig. 1 Blackbody radiation spectral line diagram



(a)



(b)

图 2 冷光学焦平面系统 (a) 与辐射传输等效模型 (b)

Fig. 2 Cold optical focal plane system model (a) and radiation transfer equivalent model (b)

其中, $L(\lambda, T)$ 为黑体的单色光谱辐射通量密度, 单位为 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, 这里 T 为热力学温度, λ 为波长; h 为普朗克常数, 其值约为 $6.626196\times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; c 为真空中光速, 其值约为 $2.997925\times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; k 为玻尔兹曼常数, 其值约为 $1.380649\times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

冷光学系统通常放置在低温杜瓦中, 杜瓦系统的主要功能是为冷光学系统提供稳定的低温真空工作环境。其结构主要包括冷屏、冷板、支撑杆组件、冷屏窗口等。如图 2(a) 所示, 接收端为焦平面探测器, 冷屏开窗, 信号通过光路进入到探测器位置, 窗口开窗后会通过光路引入热量, 对于功率受限的空间冷光学系统而言, 开窗越大, 引入的热量越大, 温度越难以控制; 开窗越小, 信号的能量越弱。因此在光学设计时, 不仅要满足探测性能的需求, 也需要考虑冷光学的约束。为实现冷光学系统的控温要求, 漏热计算是关键环节。

推导漏热计算公式, 模型如图 2(b) 所示, 等效黑体面上微面元在探测面上的辐射照度为

$$dE = \varepsilon L(T) \cdot \frac{\cos^2 \beta}{l^2} \cdot r dr d\varphi \quad (2)$$

其中, E 为辐射照度, $L(T)$ 为黑体的单色光谱辐射通量密度, ε 为发射率。由几何关系可得

$$E = \varepsilon L(T) \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\beta_0} \sin \beta \cos \beta d\beta = \varepsilon \pi L(T) \sin^2 \beta_0 \quad (3)$$

考虑窗口的透过率, 光线不会完全透过。透过率是和波长相关的参数, 引入热量 Q , 其表达式为

$$Q = \int_0^\infty \tau_\lambda E d\lambda \cdot S \quad (4)$$

其中, τ_λ 为窗口透过率; S 为辐射面积, 即窗口的面积。窗口片使用了太赫兹波段下常用的材料高密度聚乙烯 (HDPE), 实验室通过傅里叶光谱仪对厚度为

2 mm 和 4 mm 的 HDPE 材料进行了 1~200 μm 波段的透射率测试, 测试结果如图 3(a) 所示. HDPE 在低于 15 μm , 即高于 20 THz 的波段透过率较低, 对于太赫兹波段有较好的透过率. HDPE 的窗口片实物如图 3(b) 所示.

2 冷光学系统设计

光学系统光路如图 4 所示, 共有 4 个反射镜, 每个反射镜均起到会聚波束的作用, 最终将信号聚焦到探测器位置. 第四反射镜和探测器均置于低温杜瓦

内. 太赫兹镜头的 F 数应尽量小, 以提高能量收集能力, 本系统 F 数为 3, 焦距为 1.5 m. 系统的点列图如图 5 所示. 低温杜瓦内部为冷光学部分, 外部为常温光学部分, 具体制冷机结构参见文献 [12].

图 6(a) 为 10 THz 冷光学部分, 低温杜瓦分为 300, 80, 20 和 4 K 共 4 个温区, 第四反射镜 M4 与 80 K 温区冷屏装配在一起, 从而获得 80 K 的低温. 图 6(b) 为系统实物.

针对探测器和光路全耦合的最终工作状态分析, 适当简化. 如图 7 所示, 光路透过两个 HDPE 窗口, 经 M4 反射镜反射到达探测器. 假设 M4 将所有能量

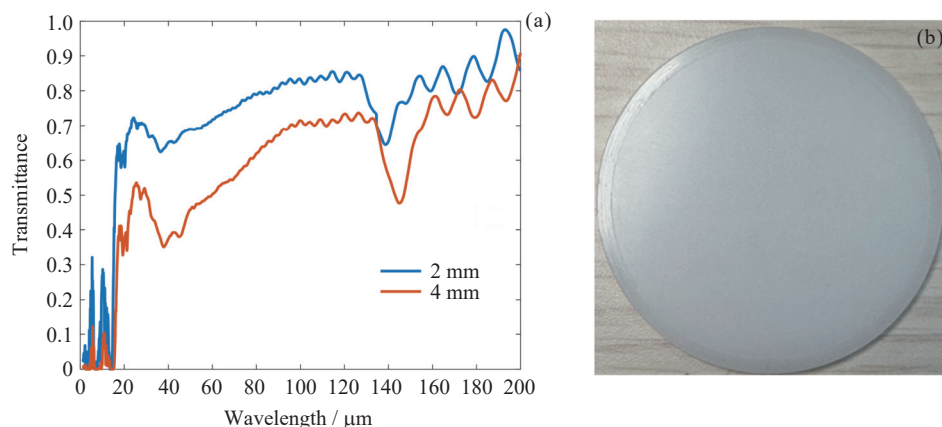


图 3 2 mm 和 4 mm 厚 HDPE 太赫兹波段的透射率 (a) 与 HDPE 实物 (b)

Fig. 3 Transmittance of 2 mm and 4 mm thick HDPE in terahertz band (a) and physical picture of HDPE (b)

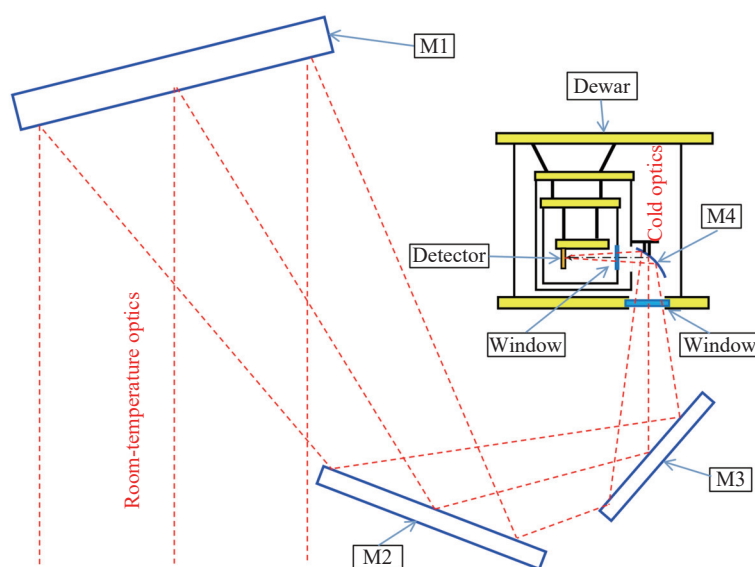


图 4 光学系统光路

Fig. 4 Optical system optical path

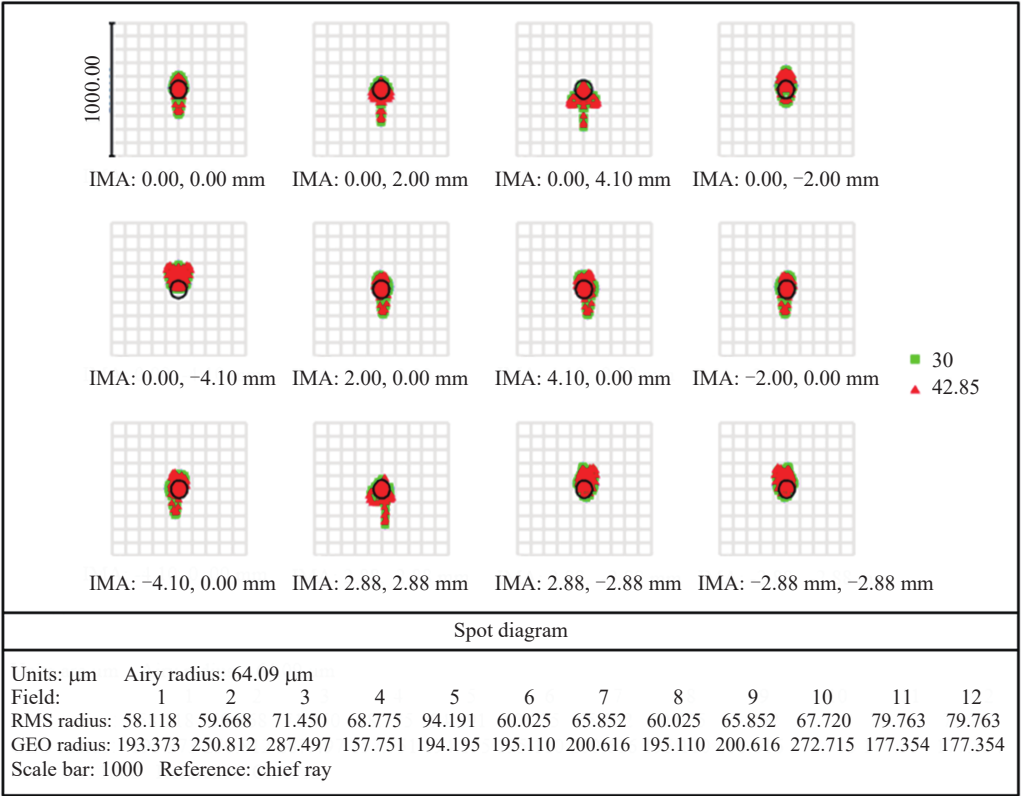


图 5 系统点列图
Fig. 5 Spot diagram

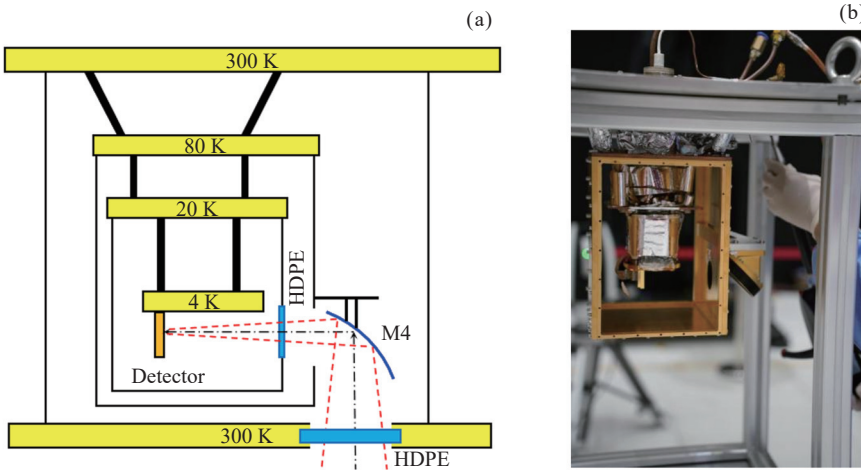


图 6 10 THz 冷光学部分 (a) 与系统实物 (b)
Fig. 6 10 THz cold optical part (a) and physical diagram of the system (b)

完全反射, 对于焦平面系统, 光路引入的热量与光学系统指标 F 数有关, 式 (4) 可改写为

$$Q = \frac{\pi}{4F^2} S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1)} d\lambda. \quad (5)$$

其中, τ_{λ} 为考虑多重反射的窗口片透过率, 与波长相

关; F 为光学系统的 F 数; S 为窗口面积; T 为环境温度; λ 为波长; h 为普朗克常数; c 为真空中光速; k 为玻尔兹曼常数.

两窗口间的多重反射模型如图 8 所示. 其中 τ_1 为 4 mm 厚的 HDPE 窗口片的透过率, τ_2 为 2 mm 厚

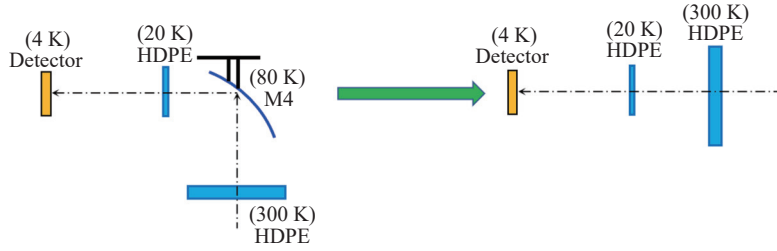


图 7 探测器和光路模型

Fig. 7 Detector and optical path model

的 HDPE 窗口片的透过率, 透过率 τ_1 和 τ_2 如图 3(a) 所示; Γ_1, Γ_2 分别为两窗口的反射率. 反射率 Γ 、折射率 n 、相对介电常数 ε_r 之间的关系为

$$\Gamma = \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_r}}{1 + \sqrt{\varepsilon_r}} \right|^2, \quad (6)$$

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (7)$$

HDPE 材料的折射率为 1.54, 计算可得, 反射率 $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma = 0.045$. 光线每透过一次窗口均会产生一次反射, 两窗口之间会形成多重反射, 计算光线经过两窗口的透过率 τ_{12} , 其表达式为

$$\tau_{12} = \tau_1 \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \Gamma_1 \Gamma_2 + \tau_1 \tau_2 \Gamma_1^2 \Gamma_2^2 + \dots = \frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2}. \quad (8)$$

与上述情况相同, 探测器和窗口之间也会形成多重反射, 但探测器不会发生透射, 只有反射和吸收, 重新改写式 (5), 有

$$Q = \frac{\pi}{4F^2} S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\alpha_\lambda \tau_1 \tau_2}{(1 - \Gamma_1 \Gamma_2)(1 - \Gamma_d \Gamma_2)} \cdot \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)} d\lambda. \quad (9)$$

其中, 300 K 黑体辐射强度的峰值在 $9.6 \mu\text{m}$, λ_1 取 $1 \mu\text{m}$, λ_2 取 $200 \mu\text{m}$; Γ_d 为探测器的反射率, 探测器接收信号的部位是硅材料, 反射率 Γ_d 取 $0.3^{[13]}$; α_λ 为探测器的吸收率, 其值 $\alpha_\lambda = 1 - \Gamma_d = 0.7$; S 为窗口面积, 300 K 窗口直径为 80 mm, 初步设计 20 K 窗口直径为 45 mm. 当探测器与光路耦合时, 计算 4 K 温区引入热量 Q 为 152 mW, 初步实验系统无法降温至 4 K 温区. 考虑到制冷机的有限的冷量, 将 20 K 窗口直径优化为 39 mm, 计算 4 K 温区引入热量 Q 为 115 mW.

通过上述公式可以对最主要的 4 K 温区漏热进行定量分析, 以快速获取漏热的大致范围, 初步判断系统能否降温至目标温度并达到热稳态. 若漏热超过

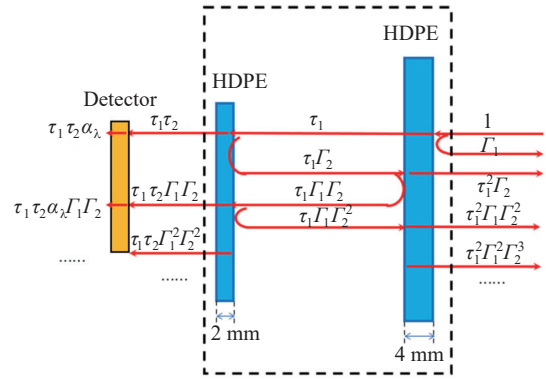


图 8 多重反射模型

Fig. 8 Multi-reflection model

系统所能提供的制冷量, 系统将无法降至目标温度. 同时, 采用有限元方法对探测器光路耦合后的系统温度场进行稳态分析, 可得到具体结构的温度梯度分布, 判断各关键部位能否达到目标温度. 杜瓦内为真空环境, 忽略热对流的影响, 冷屏材料为铝合金 AL1060, 支撑杆为钛合金 TC4, 冷屏经多层包裹绝热处理, 发射率取值为 0.03. 整体仿真结果如图 9 所示.

反射镜的温度分布如图 10(a) 所示. 中心偏下的位置温度最高, 为 85.1 K. 靠近上侧温度最低, 为 85.0 K. 如图 10(b) 所示, 4 K 温区冷板温度最低为 4.41 K. 探测器接收信号的硅片处于正面的中心, 硅片的温度最高, 正面中心的温度为 4.56 K. 探测器靠近冷板的温度最低, 为 4.46 K, 满足探测器 4~8 K 的工作温度. 仿真结果显示, 光学器件和探测器可达到相应的温度.

3 实验测试

3.1 冷光学实验

在上述基础上, 集成后的低温测试平台如

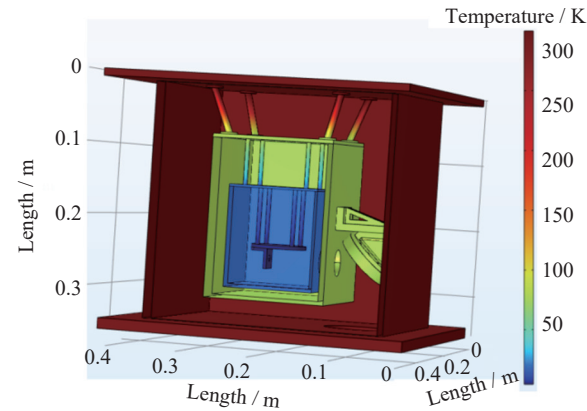


图 9 温度场计算结果

Fig. 9 Temperature field calculation results

图 11(a) 所示, 冷指杜瓦内为 10 THz 系统冷光学部分. 测试平台通过温度计监控 80 K 冷屏、80 K 反射镜、4 K 冷板等的温度. 制冷机在 80 K 温区和 20 K 温区的制冷量充足, 而在 4 K 温区的制冷量较小, 因此更关注 4 K 温区的冷量和漏热. 实验测试杜瓦内部结构如图 11(b) 所示, 显示了 80 K 冷板、20 K 冷板、4 K 冷板、探测器和窗口的结构. 冷屏冷板与框架结构均进行了表面镀金处理, 并包裹多层镀铝涤纶薄膜用来绝热, 降低表面发射率, 以降低辐射漏热.

利用上述测试平台开展如下 4 个实验 (见图 12).

(1) 杜瓦全封闭实验: 在 80 K 冷屏上装 M4 支撑和 M4 底座, 且在冷屏与真空杜瓦上光路接口均关闭

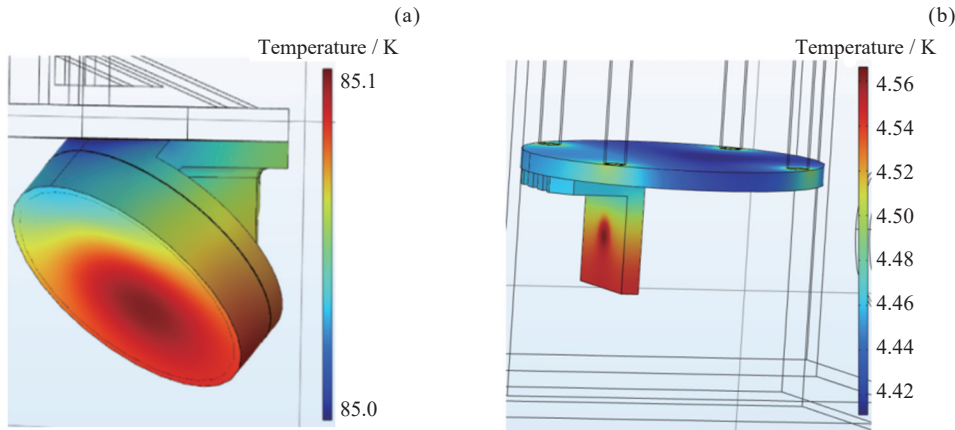


图 10 M4 计算结果 (a) 与 4 K 温区计算结果 (b)

Fig. 10 Calculation results of M4 (a) and 4 K temperature zone (b)

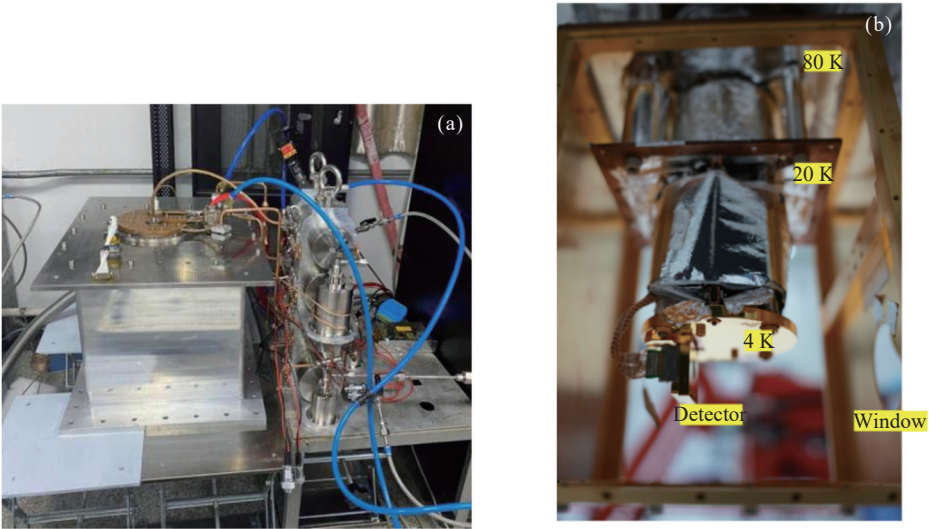


图 11 实验测试平台 (a) 与杜瓦内部结构 (b)

Fig. 11 Experimental test platform (a) and internal structure of the Dewar (b)

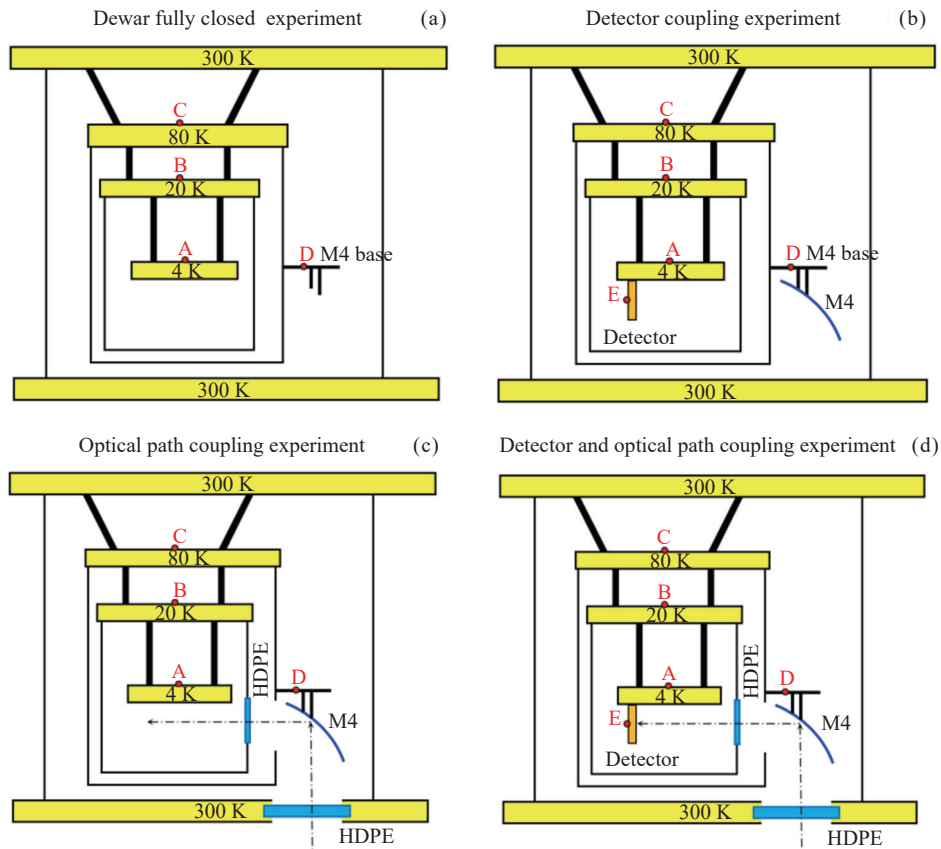


图 12 利用测试平台开展的 4 个实验

Fig. 12 Four experiments conducted using the test platform

的状态下开展实验.

(2) 探测器耦合实验: 在杜瓦全封闭实验的基础上安装探测器, 进行实验.

(3) 光路耦合实验: 杜瓦开窗, 在 80 K 冷屏上安装 M4 反射镜的整体结构, 在 300 K 和 20 K 冷屏上安装窗口片, 材料为 HDPE. 4 K 冷板上未安装探测器, 引入光路进行实验.

(4) 探测器光路全耦合实验: 在光路耦合实验的基础上, 探测器安装在 4 K 冷板上进行实验, 也是冷光学系统最终的工作状态. 各实验均布置温度计进行测试, 获得各级冷板与探测器温度.

表 1 给出了实验测温结果和仿真结果的对比. 由表 1 可以看出, 温度场仿真结果与实验相比较为符合, 但存在一定误差, 主要有以下三个原因: 一是材料热物性参数设置与实际物性存在一定差别; 二是几何模型对一些结构 (如螺纹、螺钉) 做了简化; 三是实验温度计安装和标定存在误差. 从 20 K 杜瓦环境到

4 K 探测器的线缆会引入传导漏热, 传导漏热 Q_c 计算公式为

$$Q_c = n \frac{\kappa (T_1 - T_2)}{L} A. \quad (10)$$

其中, n 为导线数量, κ 为材料热导率, T_1 为 20 K, T_2 为 4 K, L 为导线长度, A 为导线横截面积. 探测器导线采用低温磷青铜线缆, 磷青铜是低温系统中常用的低热导率材料, 在 4~20 K 的温度下, 热导率 $\kappa \leq 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [14]. 共有 37 根导线, 长度 L 为 20 cm, 单根直径为 0.24 mm. 通过式 (10) 计算导线传导漏热为 1.3 mW. 通过式 (9) 模型计算得到光路漏热为 115 mW, 同时通过测量探测器工作电流和电压计算得到探测器自发热量为 8.5 mW, 因此 4 K 温区总漏热计算值为 124.8 mW.

通过增加热负载的实验测试探测器光路全耦合 4 K 温区的总漏热, 其原理是在该冷光学系统的 4 K 冷板上安装一个阻值为 100 Ω 的热负载, 通过系

表 1 实验结果和仿真结果对比

Table 1 Comparison of experimental measurement results and simulating results

		4 K cold plate (Point A)	20 K cold plate (Point B)	80 K cold plate (Point C)	M4 (Point D)	Detector (Point E)
Fully closed	Simulation/K	4.4	—	88.2	88.7	—
	Experiment/K	4.5	—	89.0	92.0	—
Detector coupling	Simulation/K	4.4	19.5	88.2	—	—
	Experiment/K	4.6	20.6	89.0	—	—
Optical path coupling	Simulation/K	4.4	19.8	83.0	85.0	—
	Experiment/K	4.4	20.2	88.0	90.0	—
Detector and optical path coupling	Simulation/K	4.4	19.2	83.0	85.1	4.5
	Experiment/K	4.7	19.6	88.0	90.4	4.4

统的响应来反推其原有的漏热. 具体来说, 逐步增大热负载的功率, 最终在 2 mW 的加热功率下, 系统温度开始上升, 说明系统的制冷能力已经饱和. 制冷机 4 K 温区的冷量为 130 mW, 可以推断出原有的总漏热为 128 mW, 满足漏热小于冷量的需求. 表 2 给出了 4 K 温区的模型计算结果与实验结果, 可以看出, 二者是相吻合的.

3.2 系统集成成像实验

80 K 冷屏上安装 M4 反射镜, 300 K 和 20 K 冷屏上安装窗口片, 4 K 冷板上安装焦平面阵列探测器, 使系统达到最终工作状态. 将面源黑体放置在光路中, 测试成像. 成像系统测试的结构和结果如图 13 所

示, 面源黑体的成像结果清晰完整, 图像对称. 图像右下角的 5 个标识点证明探测器已稳定在 4~8 K 的工作温区. 冷光学系统的漏热小于制冷量, 集成后的系统正常工作.

表 2 4 K 温区的模型计算结果与实验结果比较

Table 2 Comparison of theoretical calculations and experimental measurements at 4 K

Project	Detector and optical path coupling
Model calculation/mW	124.8
Experiment/mW	128.0
Cooling power/mW	130.0

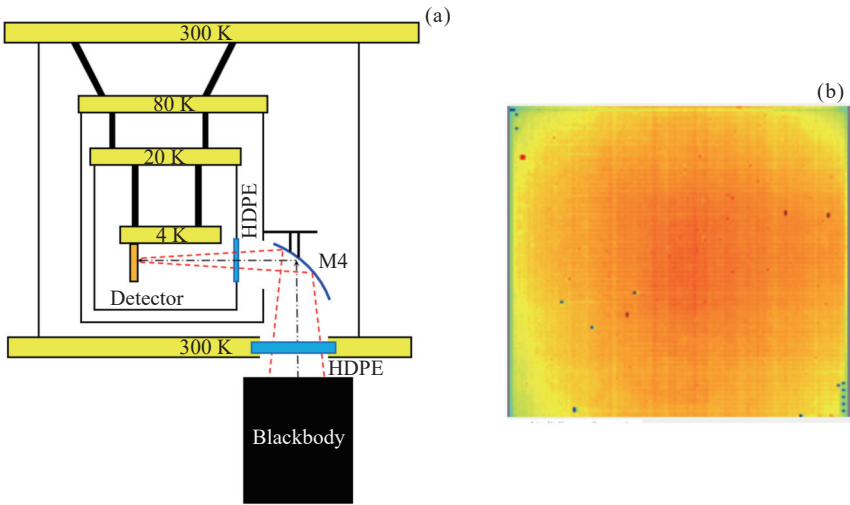


图 13 测试系统结构 (a) 与成像结果 (b)

Fig. 13 Structural diagram of the test system (a) and imaging results (b)

4 结论

提出了一种基于多重反射的冷光学模型, 针对空间应用的 10 THz 成像系统的设计进行了计算, 对窗口片尺寸进行了优化. 设计并完成了 5 个实验, 包括杜瓦全封闭实验、探测器耦合实验、光路耦合实验、探测器光路全耦合实验和成像实验. 实验表明, 理论与实验结果一致性较好. 通过成像实验, 验证了冷光学系统整体链路的可行性. 对于 4 K 空间制冷系统漏热, 主要影响因素是开窗大小, 从光学角度来看, 光路引入的是有用信号, 从热学角度来看, 光路也引入了热量, 对制冷系统来说是一种负担, 工程需要在光学和热学两种约束下求解问题. 该工作为中国太赫兹冷光学技术的发展提供了关键技术支撑.

致谢 中国电科第五十研究所的陈栋、彭肃家和王晓东等在 BIB 探测器方面提供了技术支持, 汇睿光电的刘飞、郭青纯和王冬等在光学器件加工方面提供帮助.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910-928
- [2] WANG Zhenzhan, WANG Wenyu, DONG Xiaolong, *et al.* Martian atmosphere study using THz limb sounder[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(5): 778-786 (王振占, 王文煜, 董晓龙, 等. 太赫兹火星大气临边探测仿真研究[J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(5): 778-786)
- [3] WERNER M W. The spitzer space telescope[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(1): 011008
- [4] GOLDSMITH P F, LIS D C. Early science results from the Heterodyne Instrument for the Far Infrared (HIFI) on the herchel space observatory[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, **2**(4): 383-392
- [5] GARDNER J P, MATHER J C, CLAMPIN M, *et al.* The James Webb space telescope[J]. *Space Science Reviews*, 2006, **123**(4): 485-606
- [6] PONTOPPIDAN K M, BARRIENTES J, BLOME C, *et al.* The JWST early release observations[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2002, **936**(1): L14
- [7] CHEN Yonghe. Research on Space Cryogenic Optical System for SWIR/MWIR Astronomical Observation[D]. Shanghai: University Chinese Academy of Sciences, 2017 (陈永和. 应用于中短波红外天文观测的空间低温光学系统研究[D]. 上海: 中国科学院大学, 2017)
- [8] ZHU Haiyong, CHEN Junlin, ZENG Zhijiang, *et al.* Stray light analysis of long-wave infrared refrigeration dewar components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, **51**(8): 223-233 (朱海勇, 陈俊林, 曾智江, 等. 长波红外制冷杜瓦组件杂散光分析[J]. *中国激光*, 2024, **51**(8): 223-233)
- [9] ZHANG Zhinan. Key Technology of Cryogenic Optics of Littrow Infrared Imaging Spectrometer[D]. Xi'an: University Chinese Academy of Sciences, 2023 (张智南. 基于利特罗结构的红外光谱成像仪低温光学关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 2023)
- [10] LI Mingxu, WANG Shuxin, LIU Qiang, *et al.* Design and verification of the space-cold optical long-wave infrared camera[J]. *Infrared*, 2022, **43**(7): 21-28 (李明旭, 王书新, 刘强, 等. 空间冷光学长波红外相机的设计与验证[J]. *红外*, 2022, **43**(7): 21-28)
- [11] LIU Qingzhi, YI Hua, JIANG Hai, *et al.* Thermal control design and flight test of a satellite-borne cryogenic optical system[J]. *Chinese Optics*, 2023, **16**(3): 542-549 (刘庆志, 易桦, 江海, 等. 星载低温光学系统热控设计与飞行验证[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, **16**(3): 542-549)
- [12] LIU Ziyao, YANG Bin, PAN Zijie, *et al.* The thermal performance model of a 105 mW@4.41 K⁴He Joule-Thomson cryocooler designed for space applications[J]. *Cryogenics*, 2024, **144**: 103965
- [13] CHEN Wuyuting, HAN Pengyu, LING Kuomei, *et al.* Terahertz broadband antireflection photonic device with graded refractive indices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(8): 088401 (陈吴玉婷, 韩鹏昱, LING Kuomei, 等. 具有缓变折射率的太赫兹宽带增透器件[J]. *物理学报*, 2012, **61**(8): 088401)
- [14] TUTTLE J, CANAVAN E, DIPIRRO M. Thermal and electrical conductivity measurements of Cda 510 phosphor bronze[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, **1219**(1): 55-62

作者简介



李家辉 男, 2000 年 8 月出生于山东省临沂市, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹星载辐射计冷光学和准光学技术.
E-mail: lijiahui221@mailsucas.ac.cn



朱皓天(通信作者) 男, 1989 年 10 月出生于江苏省南京市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为太赫兹科学与技术, 从事太赫兹星载辐射计系统及其关键技术研究.
E-mail: zhuhaotian@nssc.ac.cn