

实验室主页：  
[lodetech.ustc.edu.cn](http://lodetech.ustc.edu.cn)

# Design of near infrared camera based on HgCdTe detector cooled to 80K by Stirling refrigerator

Wen-qing Qu, Jia-ming Li, Kun Ge, Feng zeng, Hao-ran Ma, Jian Wang\*

中国科学技术大学光电探测技术实验室

核探测与核电子学国家重点实验室/深空探测实验室（天都实验室）



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

实验室主页：  
[lodetech.ustc.edu.cn](http://lodetech.ustc.edu.cn)

# 红外天文观测仪器--从红外天光背景测量到红外相机

曲文庆、李家铭，葛堃，曾峰，马浩然，王坚\*

中国科学技术大学光电探测技术实验室

核探测与核电子学国家重点实验室/深空探测实验室（天都实验室）



中国科学技术大学  
University of Science and Technology of China

- 项目背景
- 红外天光背景测量
- 红外相机研制
- 结论与展望

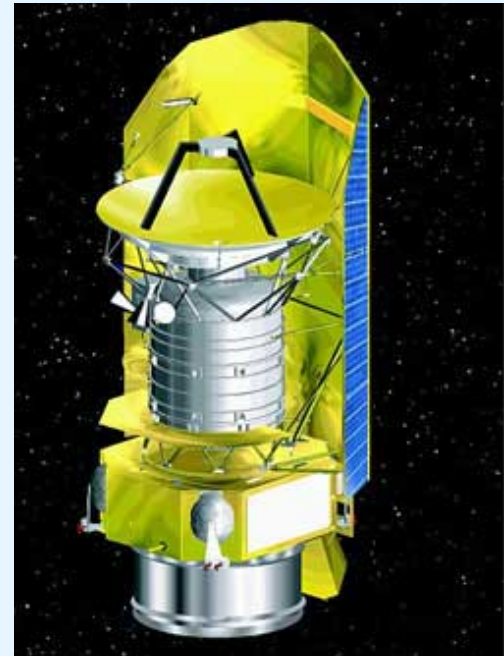
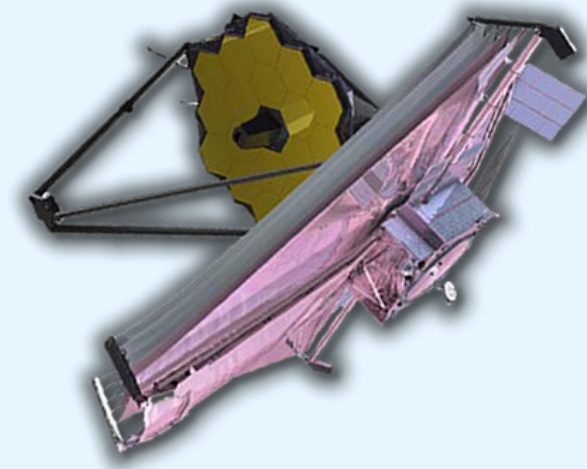
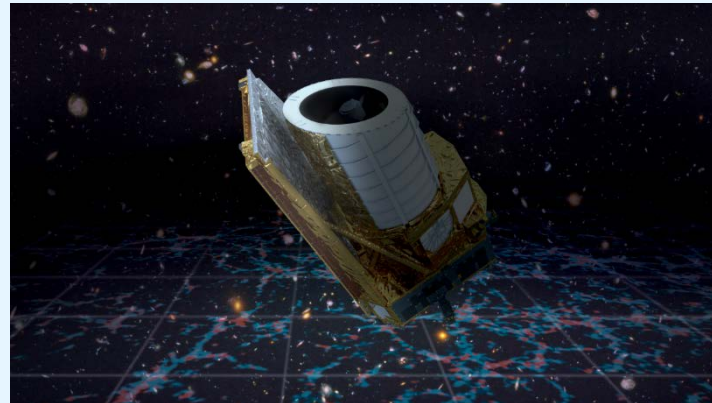
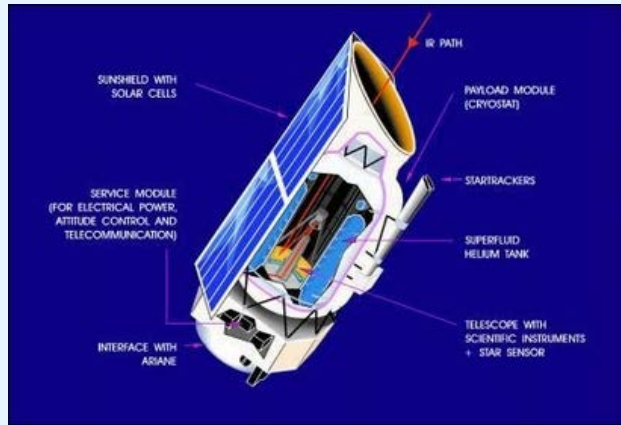
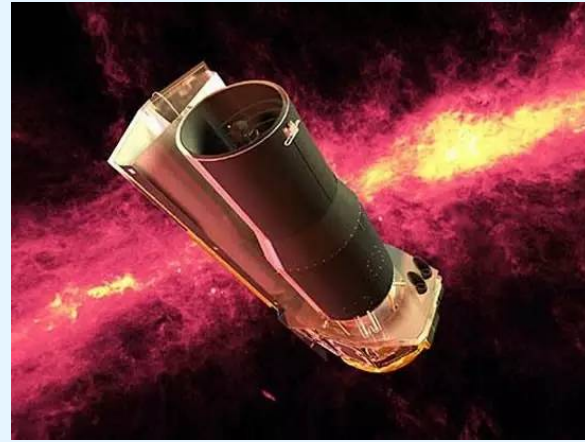
# 项目背景

- 红外天文学：观测到红外辐射的天体
  - 天文学和天体物理学的一个重要分支
- 测量波段：0.9–1000微米
- 红外天文积累了大量的研究成果，拓展了对宇宙物质组成和结构的认识
  - 空间观测，美国夏威夷岛和智利高原等优秀台址
  - 红外天文望远镜和配备的先进红外观测设备
- 国际上红外天文观测研究迅猛发展
  - 红外探测器InGaAs, InSb, MCT
  - 国内受限于天文级红外探测器



## • 红外太空望远镜

- 红外太空望远镜几乎可以观测到所有的红外线光谱
- 红外线天文卫星 (IRAS)
- 斯皮策太空望远镜
- 红外线太空天文台 (ISO)
- 赫歇尔太空天文台
- 詹姆斯韦伯太空望远镜
- 欧几里德太空望远镜

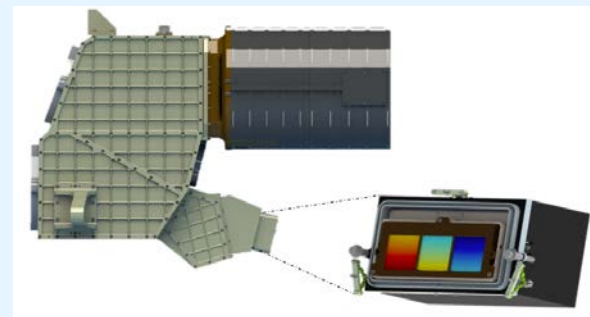


# 红外太空望远镜

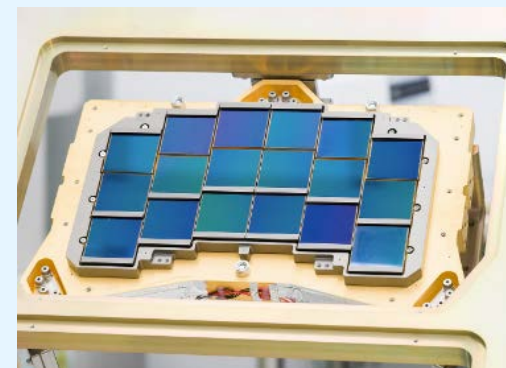
名称	口径	覆盖波长	说明
红外线天文卫星 (IRAS)	0.6m	12-100 $\mu\text{m}$	红外天文观测的开山之作，主要的科学任务是对12 $\mu\text{m}$ 、25 $\mu\text{m}$ 、60 $\mu\text{m}$ 和100 $\mu\text{m}$ 的红外星体进行观测
斯皮策太空望远镜 (Spitzer Space Telescope)	0.85m	3-180 $\mu\text{m}$	美国国家航空航天局2003年发射的一颗红外天文卫星，是大型轨道天文台计划的最后一台空间望远镜。
红外线太空天文台 (ISO)	0.6m	2.5-240 $\mu\text{m}$	计划开始于1979年，于1995年11月发射升空，一直工作到所携带的氦在1998年5月耗尽为止
赫歇尔太空天文台	3.5 m	60 - 670 $\mu\text{m}$	第一个在空间中对整个远红外线和亚毫米波进行观测的天文台，安装有空间中最大的反射望远镜，直径3.5米
詹姆斯韦伯太空望远镜	6.5m	0.6 - 28 $\mu\text{m}$	接替哈勃太空望远镜和斯皮策太空望远镜
欧几里得太空望远镜	1.2m	0.55-2 $\mu\text{m}$	2023年7月1日发射升空

# 规划中的太空望远镜

SPHEREx望远镜，近红外空间望远镜，预计2024年发射，以研究宇宙学、星系演化、恒星形成等领域；红外相机为两个1x3的探测器，探测器有2048x2048个像素，像素大小为18微米。



Nancy Grace Roman Space Telescope望远镜是美国航空航天局（NASA）的一项太空任务，预计于2025年发射。它将是目前为止最大的太空望远镜，主要用于观测暗能量、暗物质和行星外生命的迹象等领域。使用的是H4RG-10探测器，每个探测器有4096x4096个像素，像素尺寸为18微米，有两台相机，每台有16个探测器拼接用于成像、2个探测器用于光谱。

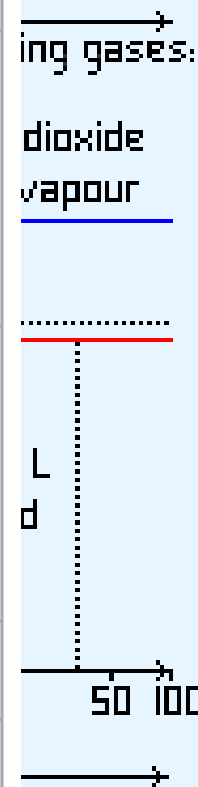


- 大部分的红外天文学仍然依赖在地面上的望远镜，通过狭窄的“窗口”，对地球大气层是透明的波长，观测到有限的红外线光谱

波长范围 (微米)	天文学的波段	望远镜
0.65 - 1.0	R波段和I波段	所有主要的光学望远镜
1.25	J波段	大部分主要的光学望远镜和大部分专门的红外线望远镜
1.65	H波段	
2.2	K波段	
3.45	L波段	大部分专门的红外线望远镜和一些光学望远镜
4.7	M波段	
10	N波段	
20	Q波段	一些专门的红外线望远镜和一些光学望远镜
450	亚毫米波段	亚毫米波望远镜

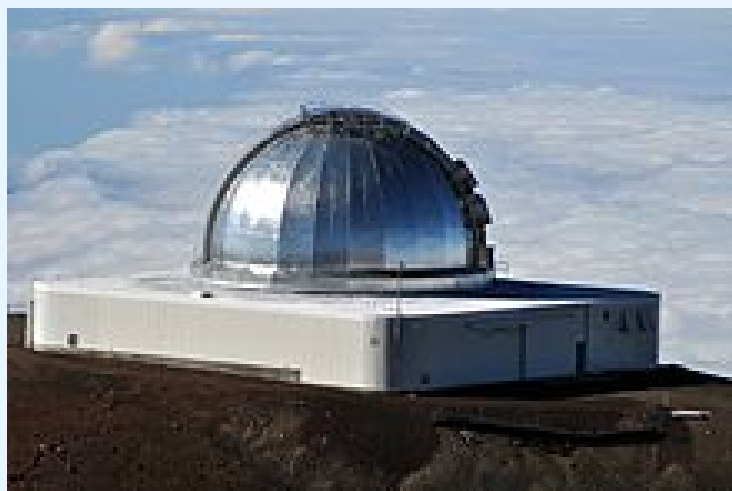
Transmissi  
window

Atmospheric transmission (%)



- 地面红外望远镜

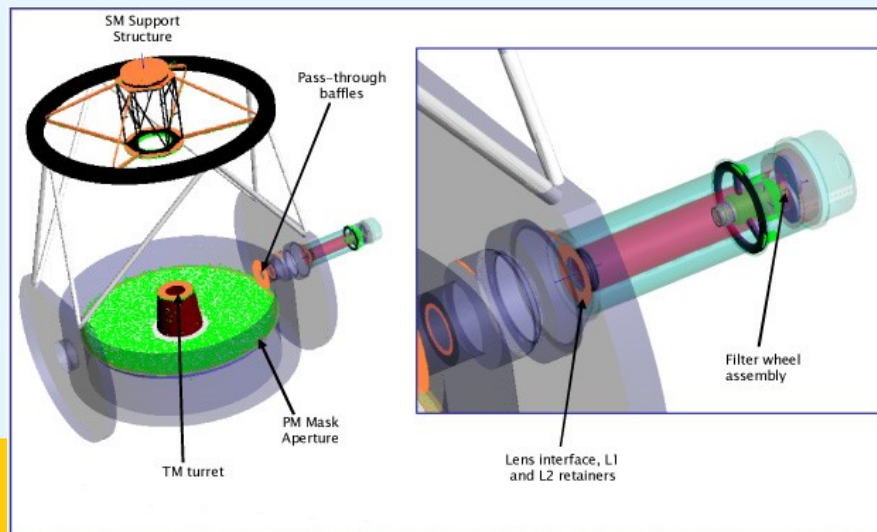
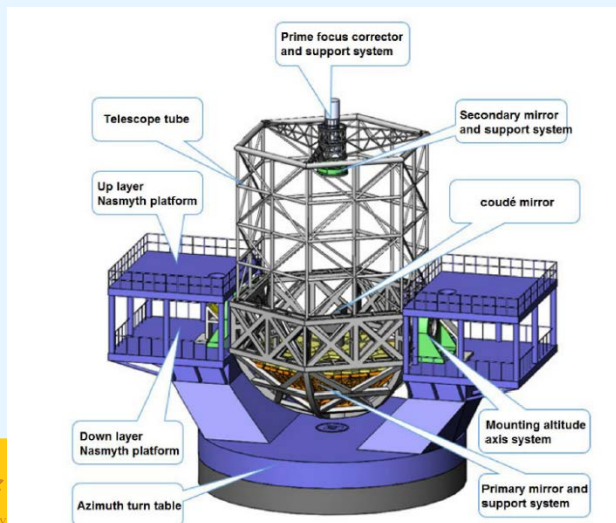
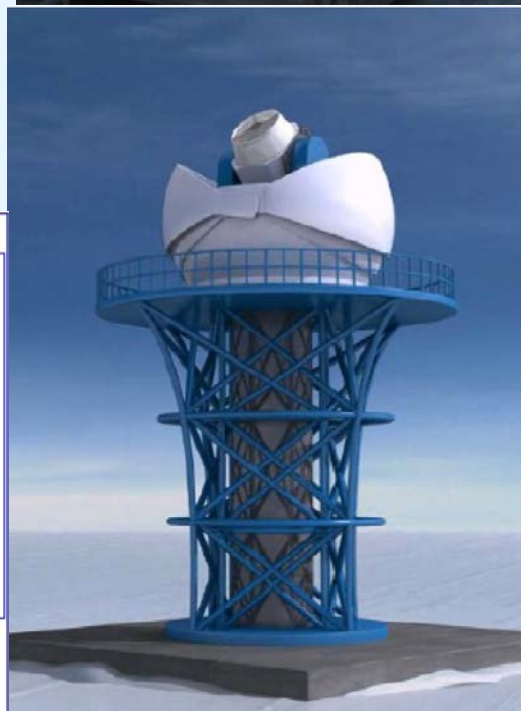
- VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)
- United Kingdom Infra-Red Telescope
- NASA Infrared Telescope Facility (NASA IRTF)
- Thirty Meter Telescope (TMT)



名称	口径	覆盖波长	站址
VISTA(Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)	4.1 m	0.85-2.3 $\mu\text{m}$	Paranal Obs., Chile
UKIRT (United Kingdom Infra-Red Telescope)	3.8 m	1-30 $\mu\text{m}$	Mauna Kea, Hawii, USA
NASA IRTF (NASA Infrared Telescope Facility)	3 m	0.8-5.5 $\mu\text{m}$	Mauna Kea, Hawii, USA
TMT (Thirty Meter Telescope)	30 m	0.8-28 $\mu\text{m}$	Mauna Kea, Hawii, USA

# 国内在提的光学红外望远镜

- AST3-NIR
  - 50cm口径，波段 0.9-2.5 $\mu\text{m}$
- 南极昆仑站的2.5米KDUST
  - Kunlun Dark Universe Survey Telescope
  - 波长覆盖范围：0.4 $\mu\text{m}$ - 2.5 $\mu\text{m}$
- 2米红外望远镜
- 6.5米光学望远镜
- 12米光学红外望远镜：350nm-2400nm



# 站址红外天光背景测量

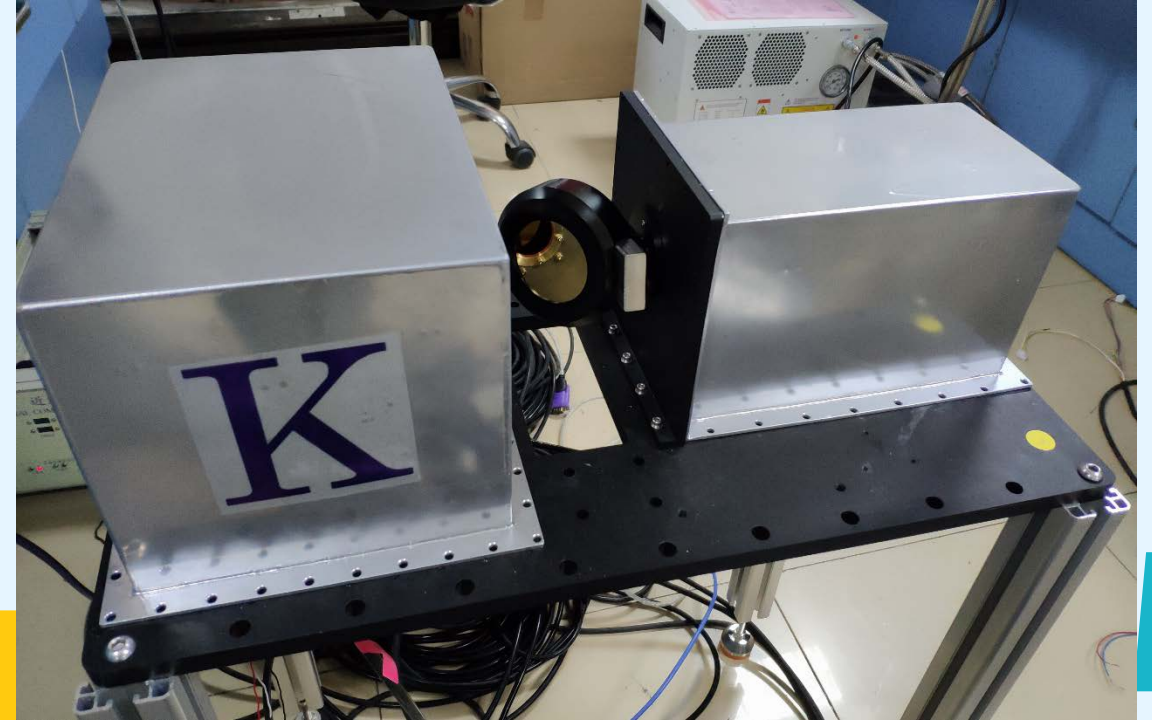
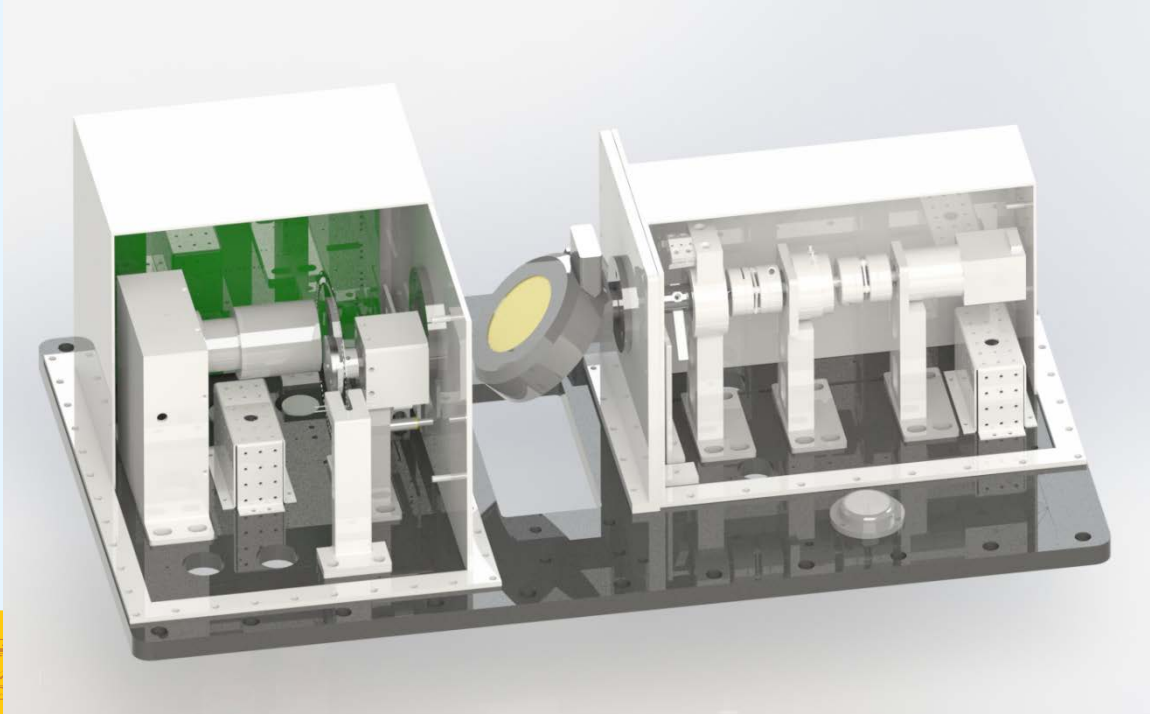
- 红外波段背景发射是干扰观测结果的主要噪声来源
- 对红外相机设计以及红外巡天科学课题设计均有至关重要的价值
- 为未来红外望远镜和观测设备的设计提供参考依据

## 南极台址的优越性

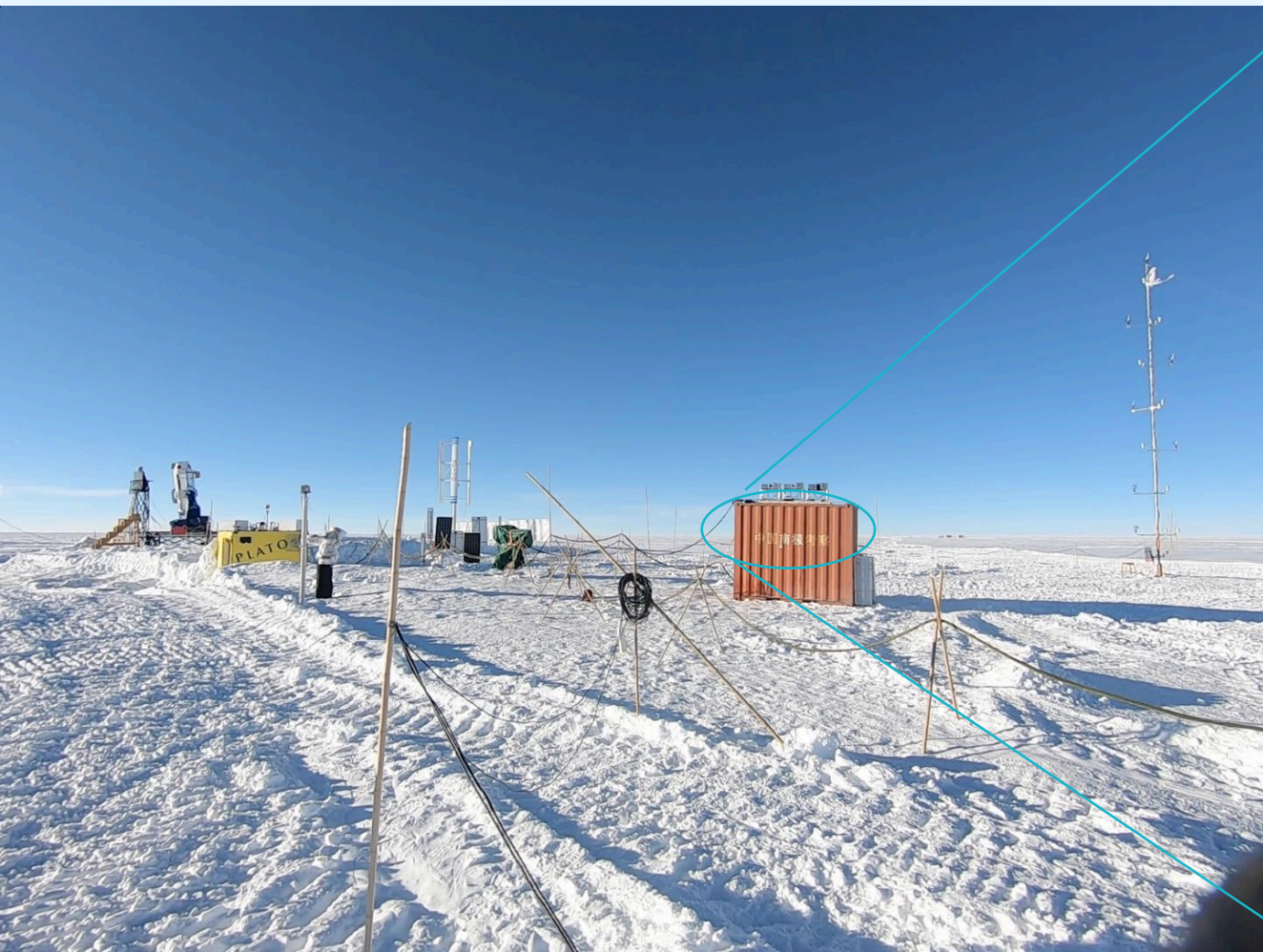
- 被认为有潜力成为地球上进行红外到亚毫米观测的最佳地点；
- 结合高海拔、低水汽含量、低温等特点；
- 创造了地面其他地方无法比拟的观测条件

# NIR Sky Brightness Monitor in Antarctica

- Low temperature : as low as  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Limited power
- Unattended
- The design was refined for adapting the working condition in Antarctica.



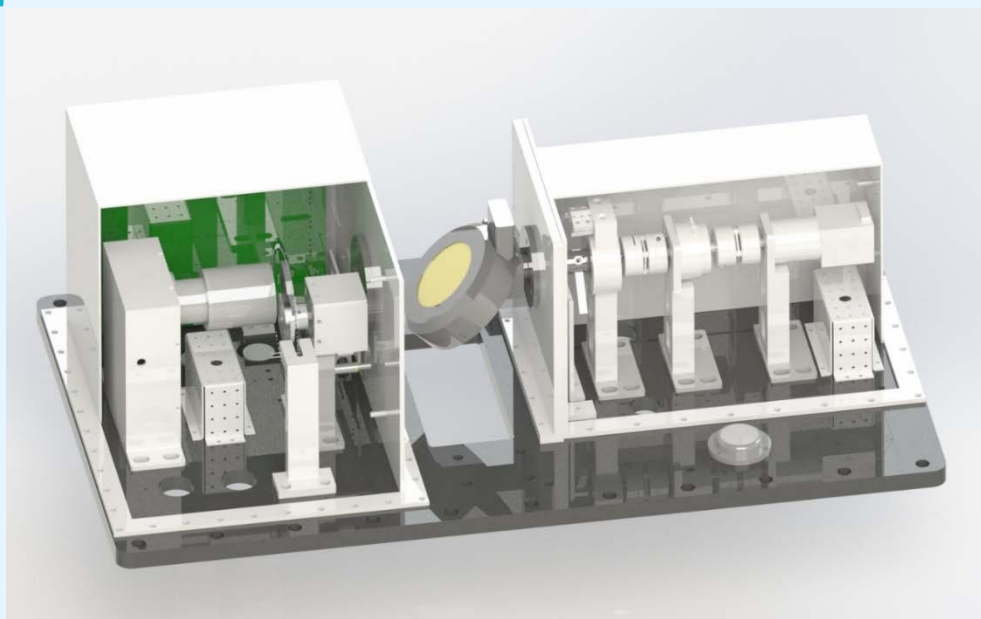
# 近红外天光背景测量仪南极DOME A 安装现场



# comparison of sky brightness at zenith at different sites

Sky Brightness ( $\mu\text{Jy arc sec}^{-2}$ )	Latitude	Altitude (m)	J(1.25 $\mu\text{m}$ )	H(1.635 $\mu\text{m}$ )	Ks(2.15 $\mu\text{m}$ )
<b>Dome A</b>	80.4°	4087	600 to 1100	1100 to 2600	200 to 900
<b>Ali</b>	32.3°	5100	700 to 1100	1600 to 2600	800 to 1300
<b>Siding Spring</b>	31.3°	1165	1000 to 1500	1500 to 3000	3000 to 7000
<b>Mauna Kea</b>	19.8°	4207	~900	2500	3000
<b>South Pole</b>	90°	2800	300 to 600	800 to 2000	~400

Dome A的红外天空亮度与南极点相近，随着时间的推移太阳高度进一步降低，Dome A温度继续降低，天空红外亮度也会继续降低。



红外天光背景测量仪

InSb、InGaAs

点元红外传感器

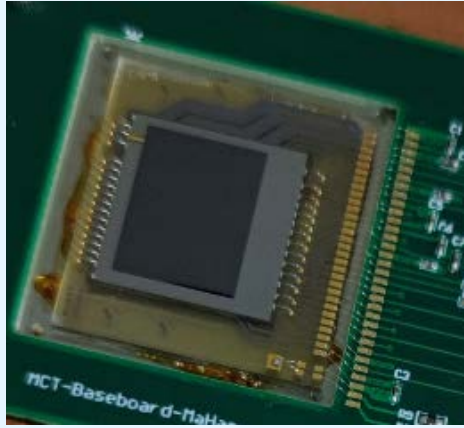


红外相机

InGaAs、MCT

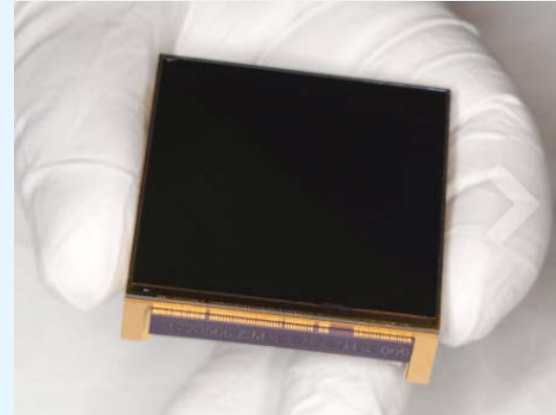
面阵红外传感器

## 国内探测器



探测器厂家

TELEDYNE IMAGING SENSORS 探测器型号Hawaii-2RG



Parameter	Value
Photosensitive area	9.6mm x 7.68mm
Pixel size	15μm x 15μm
Number of active pixels	640 x 512
Power consumption	< 100mW
Full well capacity	30ke <sup>-</sup> @ HG, 70ke <sup>-</sup> @ LG
Typical readout noise (e <sup>-</sup> )	50e <sup>-</sup>
Dark current (sensor at -80°C)	20e <sup>-</sup> / (s*pix)

	Short wavelength channels	Long wavelength channels
Wavelength range	0.6-2.3 μm	2.4-5.0 μm
Fields of view	2 × 2.2' × 2.2' (with 4"-5" gaps)	2 × 2.2' × 2.2'
Pixels <sup>†</sup>	8 × 2040 × 2040 pixels	2 × 2040 × 2040 pixels
Nominal pixel scale	0.031"/pixel	0.063"/pixel
PSF FWHM <sup>‡</sup>	0.064" @ 2μm (Nyquist)	0.13" @ 4 μm (Nyquist)
Grism slitless spectroscopy	N/A	R ~ 1600 at 4 μm
Coronagraphic occulting masks	round: 2.1 μm bar: 1.8-2.2 μm	round: 3.35, 4.3 μm bar: 2.5-5.0 μm

# 相机系统



波段：H, K

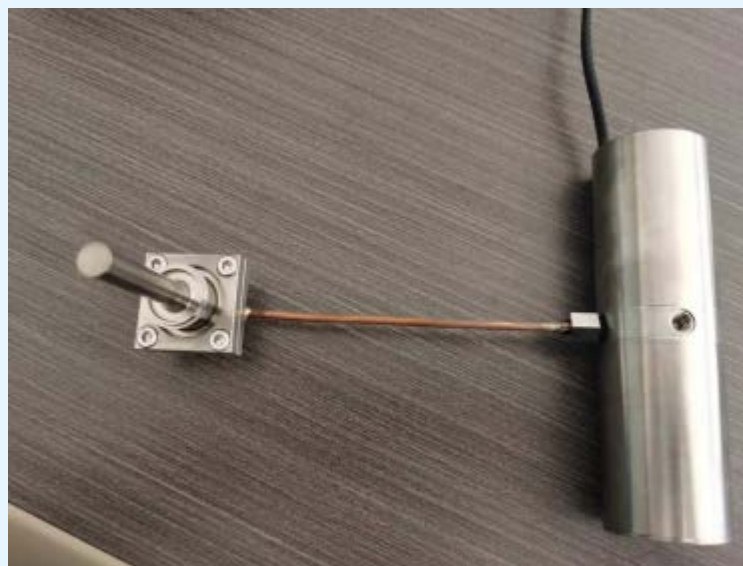
截至波长2.0um, 2.5um

InGaAs在H波段只能覆盖一部分

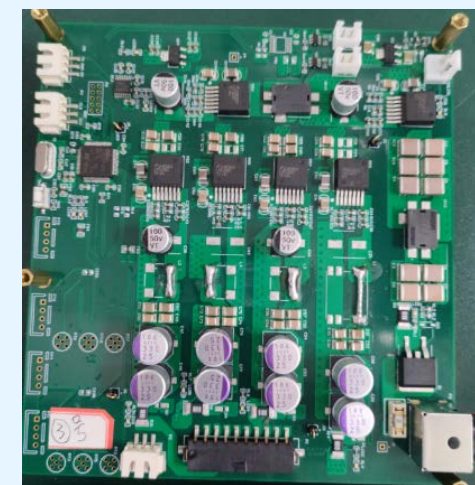
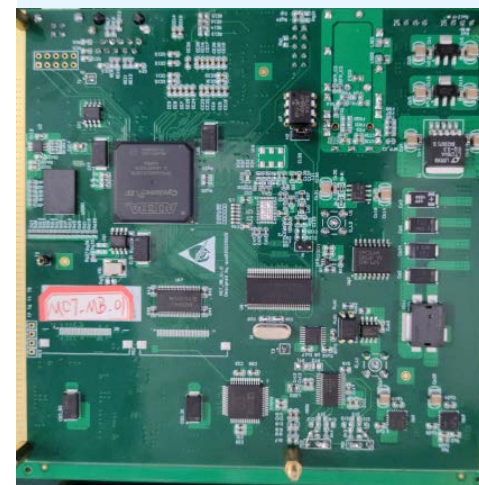
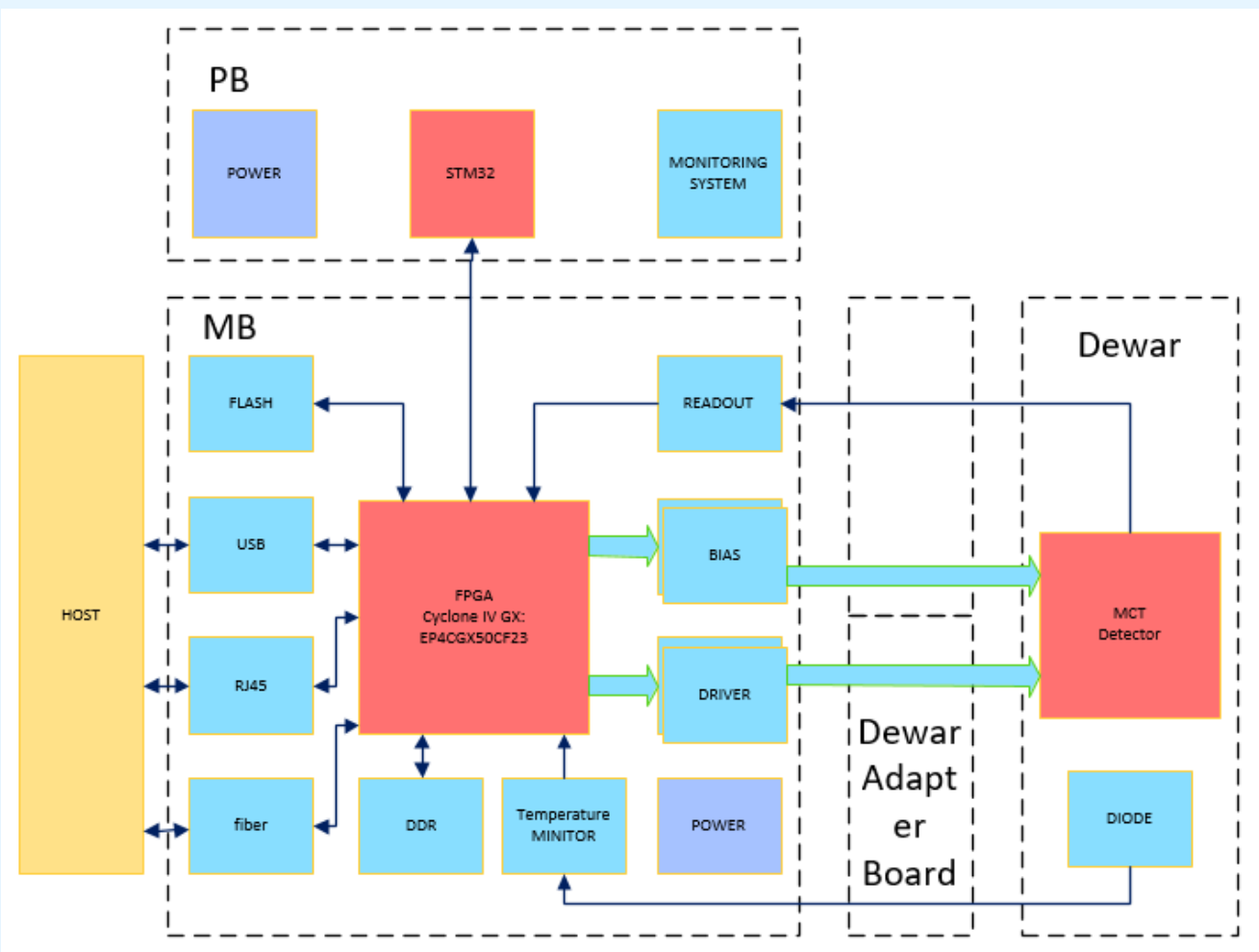
MCT 2.0um可以覆盖全部

制冷机主要性能参数：

1. 制冷量：  $\geq 1.0\text{W}/80\text{K}@23^\circ\text{C}$ ，  $\geq 0.6\text{W}/80\text{K}@70^\circ\text{C}$
2. 稳定功耗：  $\leq 10\text{W}@220\text{mW}/80\text{K}$
3. 最大功耗：  $\leq 45\text{W}$
4. 工作温度：  $-40^\circ\text{C}$  到  $70^\circ\text{C}$



# 电子学框图

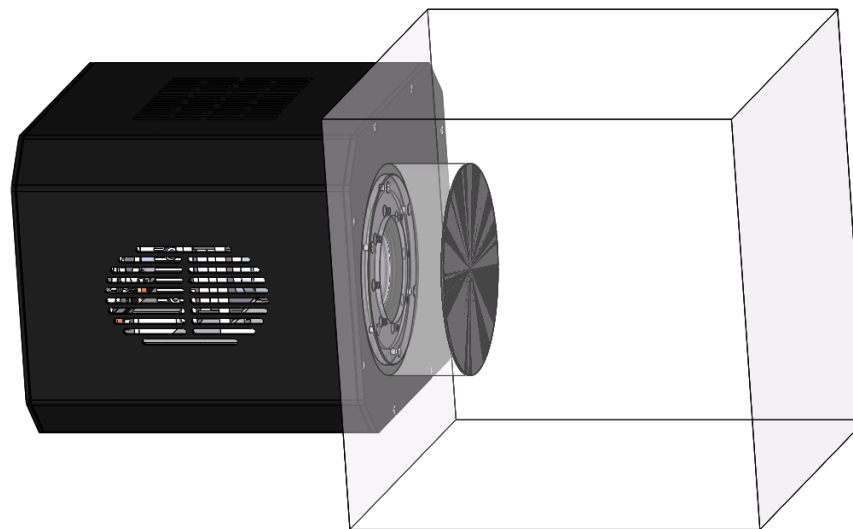


# 性能测试系统

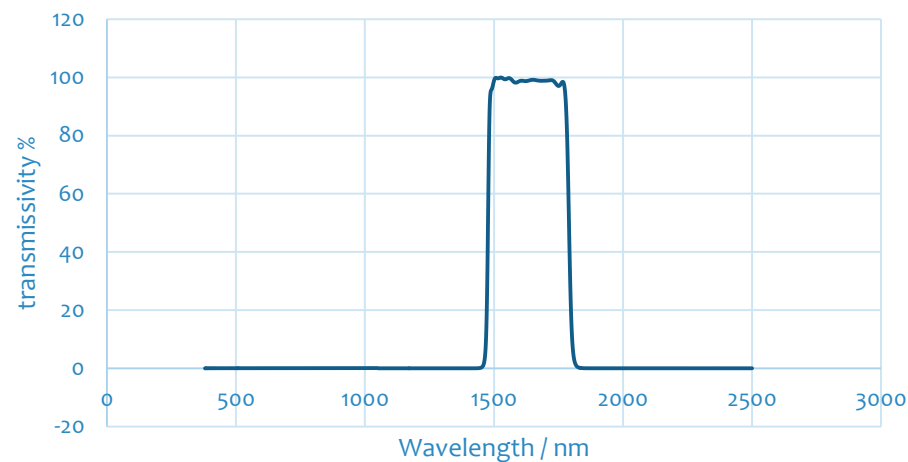


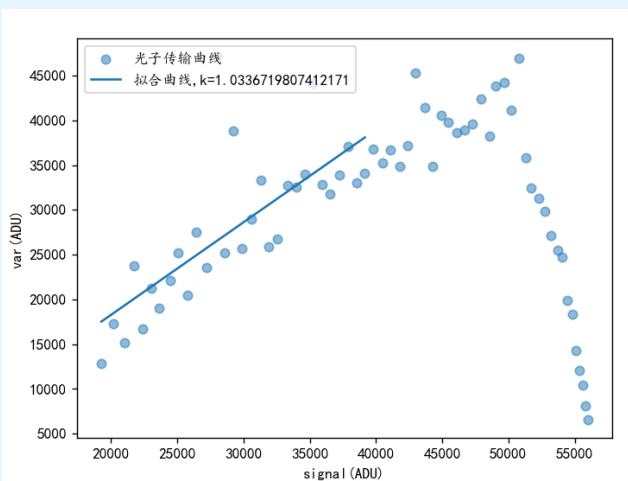
黑体主要性能参数:

1. 温度设定范围: 室温~150.0℃
2. 辐射面直径:  $\Phi 100\text{mm}$
3. 控温精度: 优于 $\pm 0.02^\circ\text{C}$
4. 温度分辨率:  $0.01^\circ\text{C}$
5. 控温稳定度: 优于 $\pm 0.1^\circ\text{C}/10$  分钟
6. 有效发射率:  $\varepsilon = 0.97 \pm 0.03$



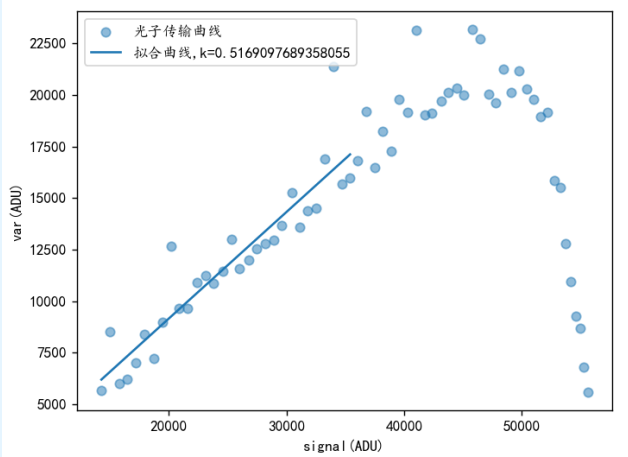
H filter spectrogram





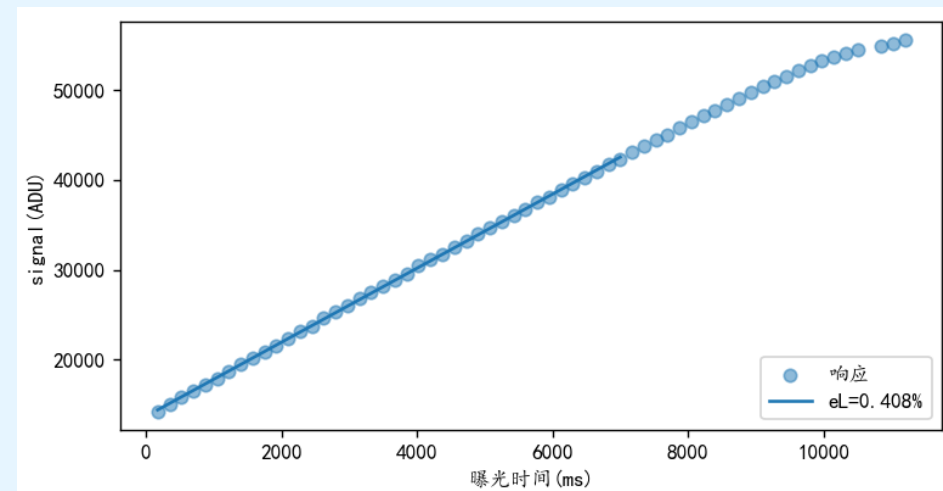
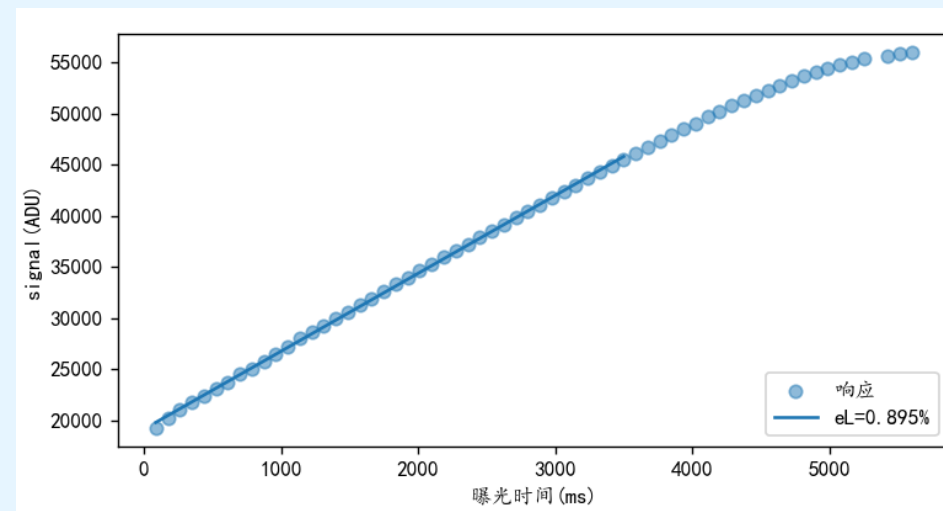
LG档位，光子传输曲线图，  
算出 $G= 0.967e^-/ADU$

HG电容档位，光子传输曲线图，  
算出 $G= 1.934e^-/ADU$

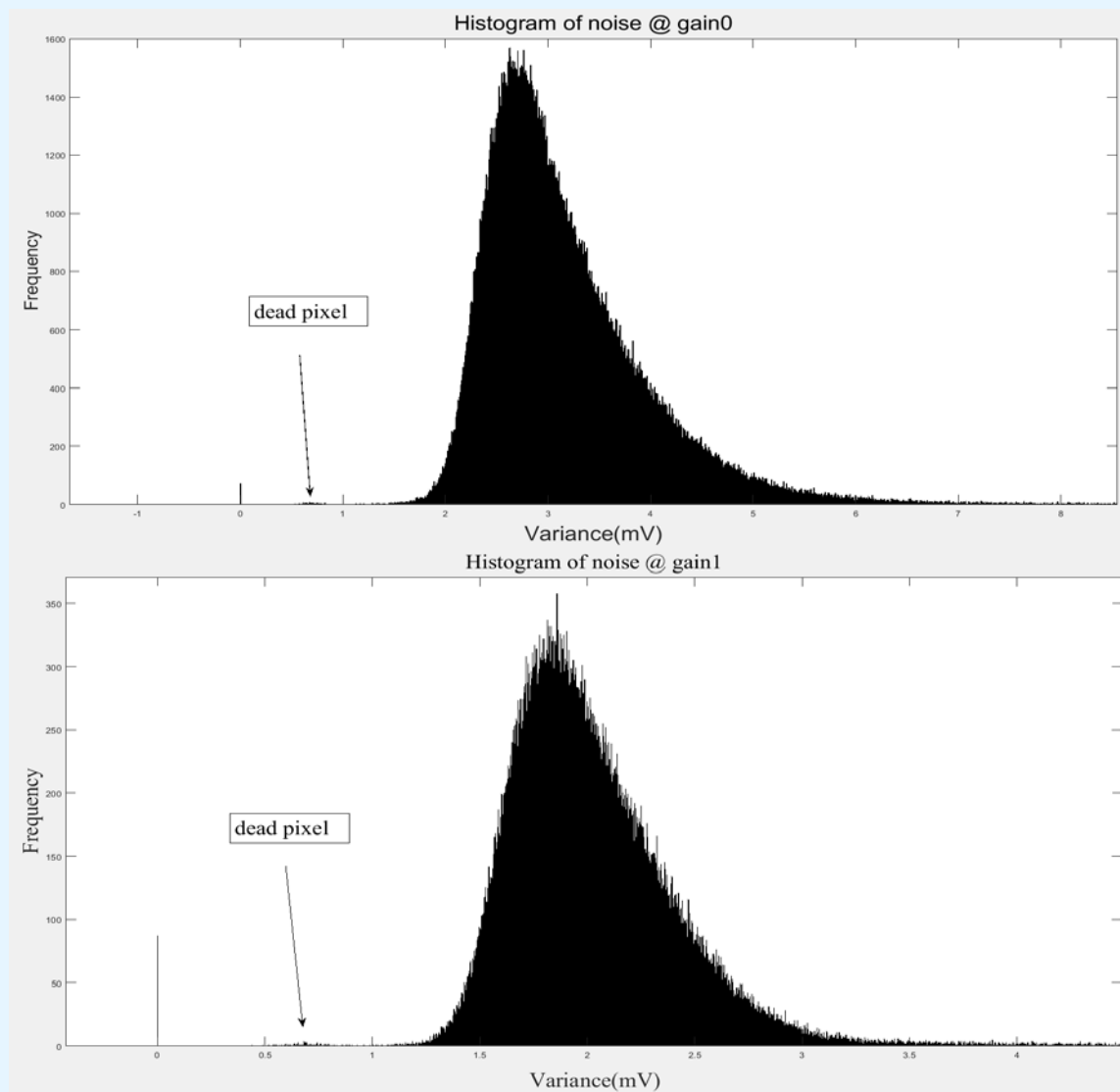


LG档位，非线性度为0.895%，  
满阱容量:35Ke-

HG档位，非线性度为0.408%，  
满阱容量:83Ke-



# 读出噪声测试



探测器读出信号的噪声

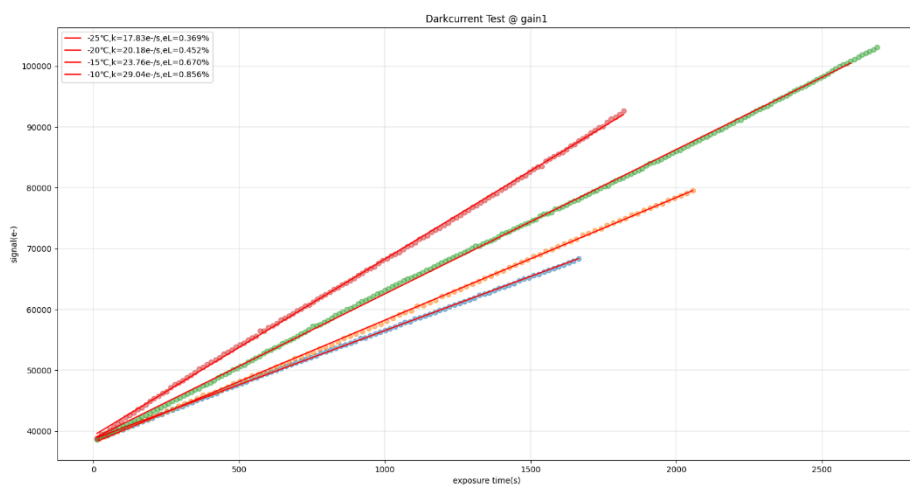
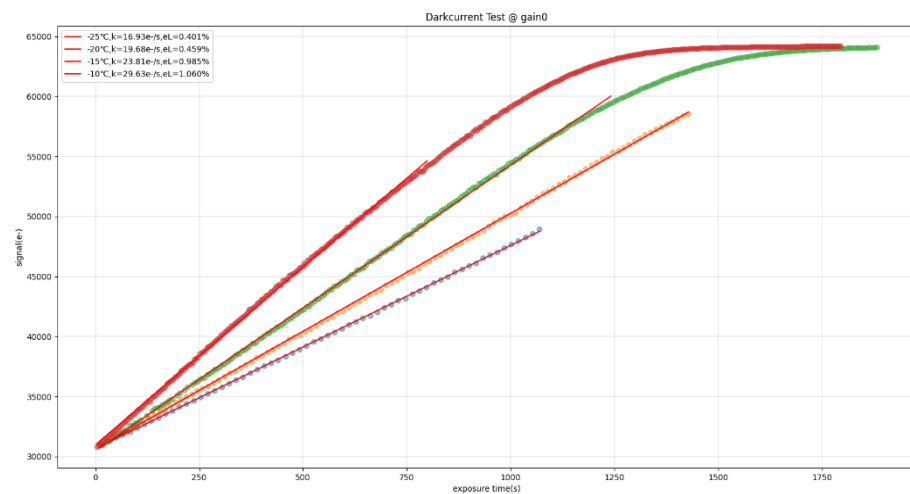
1. 散粒噪声、热噪声
2.  $1/f$ 噪声, 复位噪声, 量化噪声
3. 空间噪声

在遮光条件下, 连续拍照**100**张, 计算每个像素的标准差, 得到一张**640\*512**的噪声图, 对该数据进行**Histogram**, 根据死像元不会包含光子转移噪声, 其仅受电路读出噪声的影响, 进行分析。

在LG档位, 读出噪声为30个电子

在HG档位, 读出噪声为56个电子

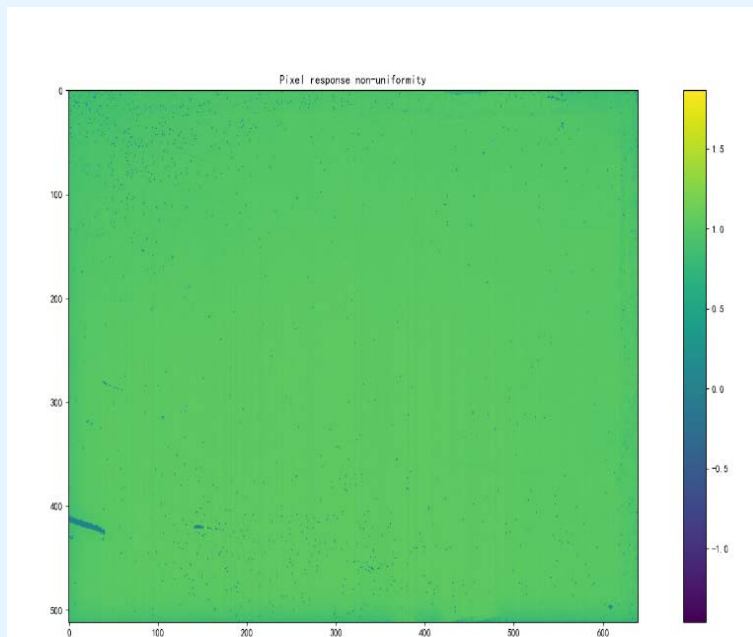
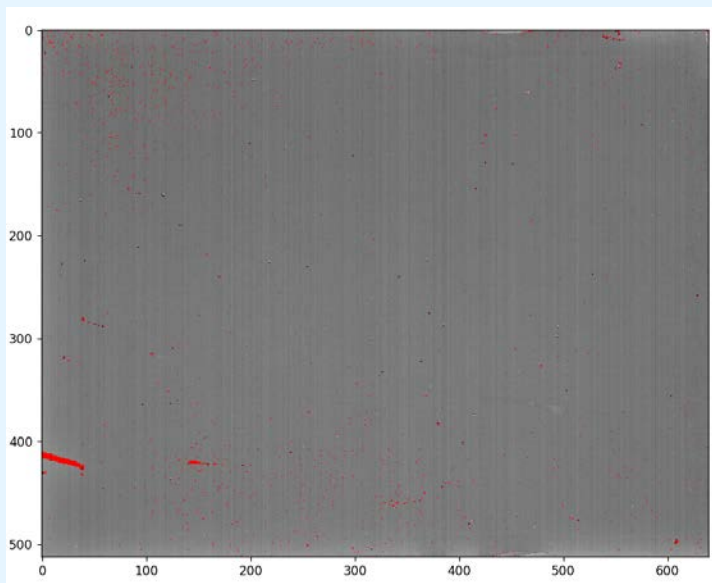
# 暗电流测试



暗电流 e-/pix/s	LG	HG
-10°C	29.63	29.04
-15°C	23.81	23.76
-20°C	19.68	20.18
-25°C	16.93	17.83

根据这种情况下测试，仅能认为，探测器的暗电流小于16.93个电子@5fF，17.83个电子@10fF

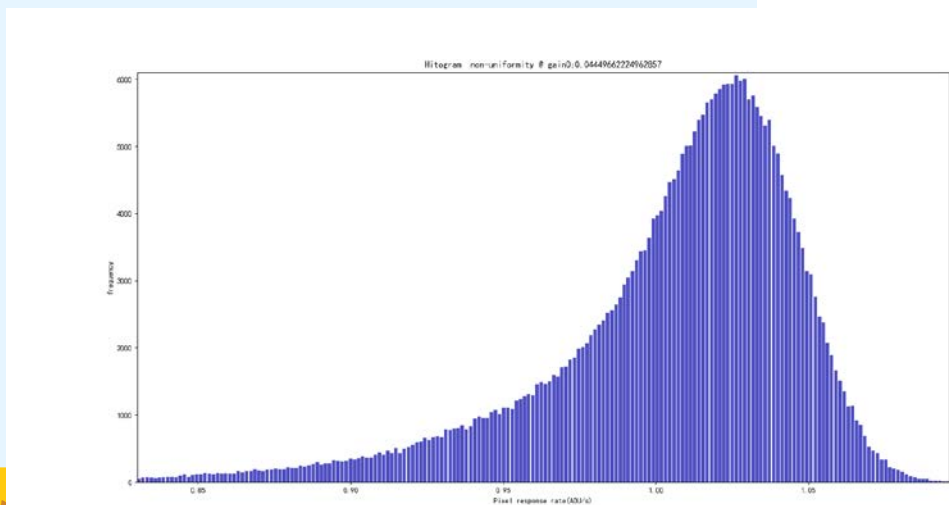
# 坏点与响应非均匀性测试



利用MCT探测器测试平台提供的均匀平场光源(黑体), 拍摄不同曝光时间平场图像, 曝光时间从0到刚好满井之间拍摄60组

信号电压V, 与R的关系为

$$R = \frac{V - V_{bias}}{Q} = \frac{V - V_{bias}}{T_{int} * \Phi}$$

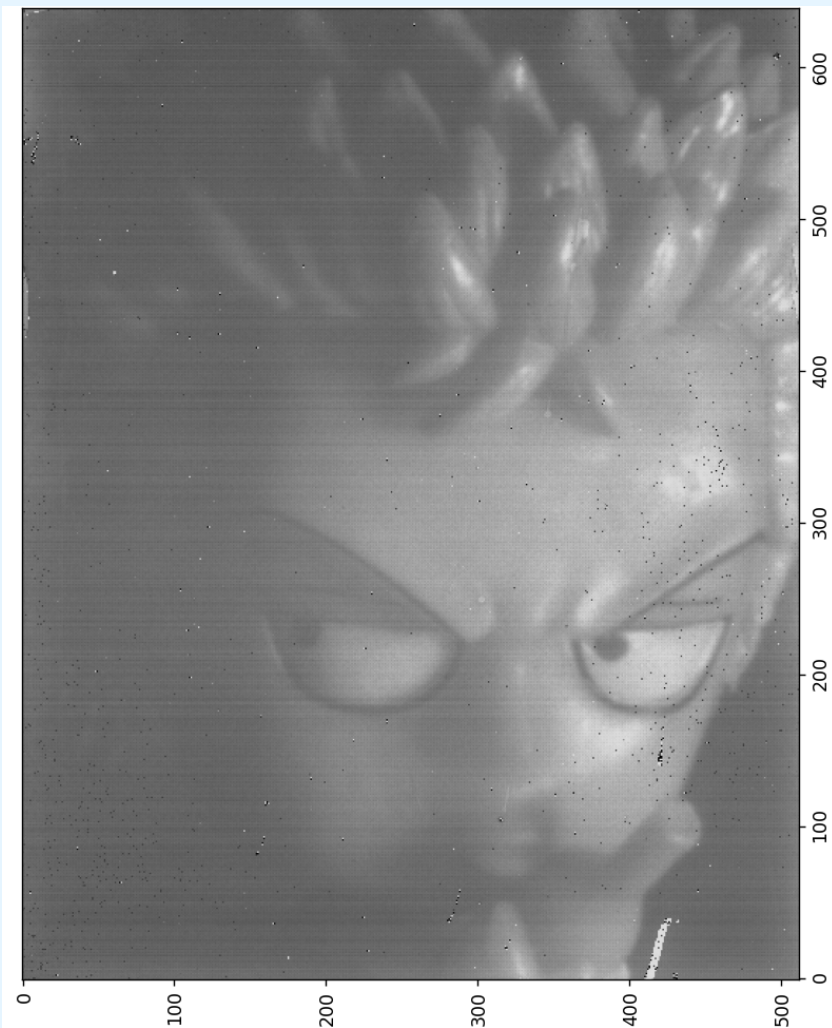


$$UR = \frac{1}{V - V_{bias}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [V(i, j) - \bar{V}]^2}$$

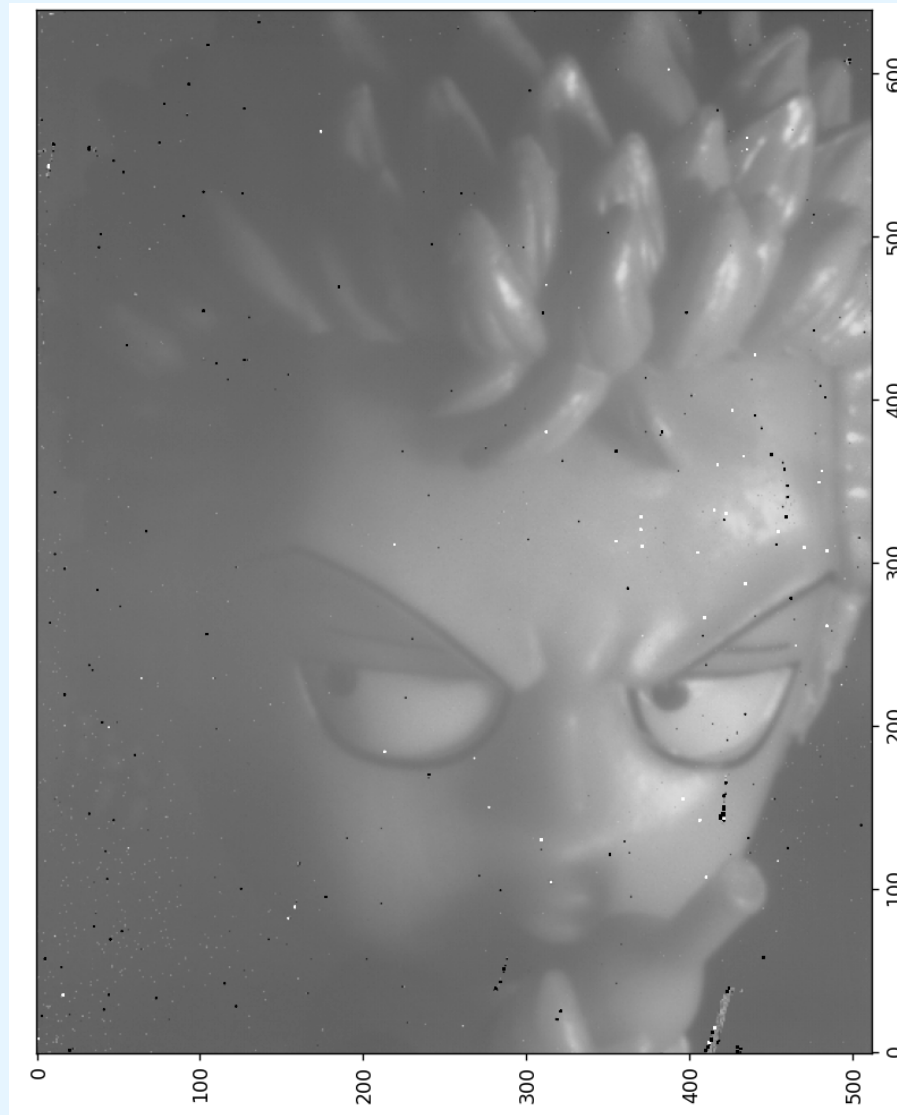
M和N为行列数, d和h为死像元和过热像元, R为像元响应率(每单位辐照功率的输出信号电压)

由此得到像素的非均匀性为8.37% @HG、7.68%@LG。

# 非均匀性矫正



原图



非均匀性矫正

# 结论



传感器类型	HgCdTe
图像传感器尺寸	640 (W) x 512 (V)
像素尺寸	15um x 15um
波长范围	1um~2.5um
数据位数	16bit
满阱容量	35Ke-@HG、83Ke-@LG
工作温度	≤80K
暗电流	<16.93e-
读出速度及读出噪声	500KHz , 30e-@HG、56e-@LG
量子效率	≥70% (探测器指标测试报告)
可用像素比例	99.56%
探测器响应不均匀性	8.37%@HG、7.68%@LG
数据交互接口	USB2.0、网口
最长积分时间	30分钟
整机重量及功耗	3Kg , <45W ,

# MCT相机应用

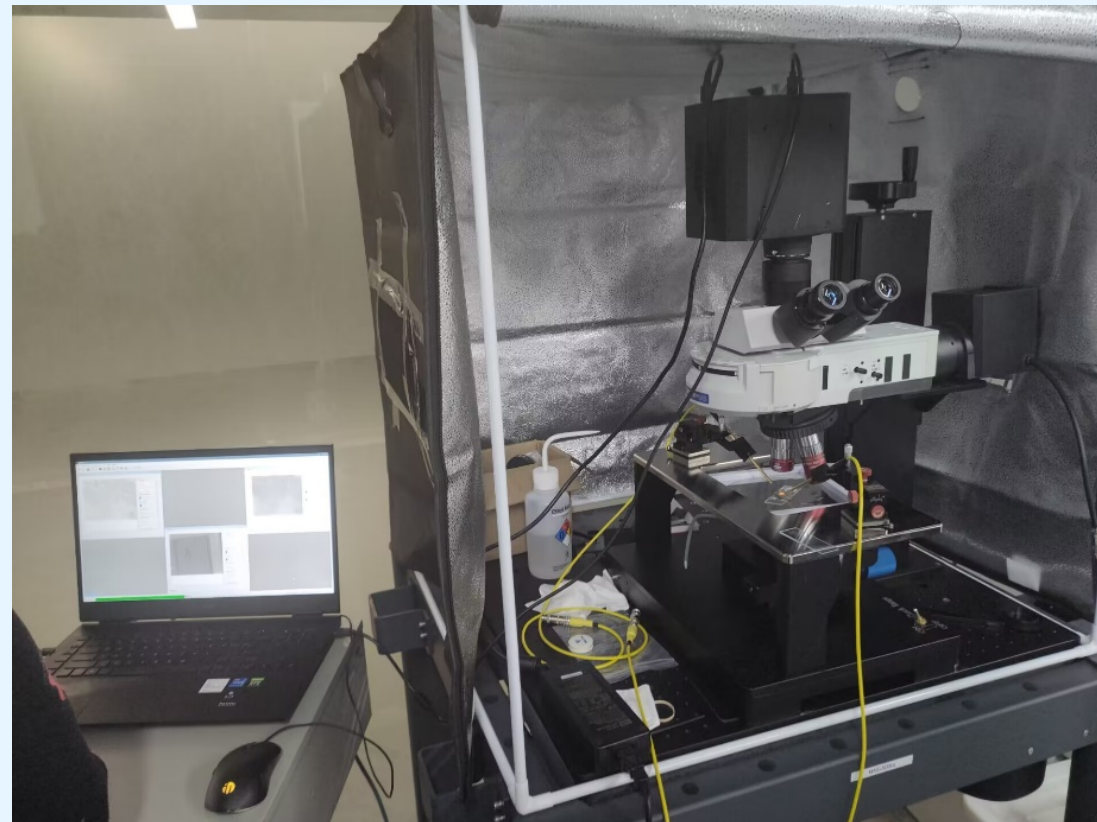
MCT相机天文观测现场图



MCT相机天文实拍图



MCT相机进行半导体缺陷检测



# 总结和展望

- 1. 国内面阵红外传感器发展速度很快，在指标上随不及顶尖探测器；在具体的科学目标情况下，可以考虑使用；
- 2. 红外探测器也是逐渐在往大像素面阵发展以期望更大视场，但在性能指标要求下，为了实现更优的性能，会采用用优质的小面阵进行拼接使用；

# 谢谢大家！

联系方式: [qwq1996@mail.ustc.edu.cn](mailto:qwq1996@mail.ustc.edu.cn)