

# 用于天文观测的 InGaAs 近红外探测器性能测试方法

孙佰成<sup>1</sup>, 郭杰<sup>1\*</sup>, 许方宇<sup>2\*</sup>, 范明国<sup>3</sup>, 龚晓霞<sup>3</sup>, 项永生<sup>1</sup>, 凌云<sup>3</sup>, 张雨辰<sup>2</sup>

(1. 云南师范大学 云南省光电信息技术重点实验室 云南昆明 650500;  
2. 中国科学院云南天文台 云南昆明 650216;  
3. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

**摘要:** 基于天文红外探测器评价体系, 利用改进的“光子转移曲线”测试方法, 分别测试了液氮制冷和热电制冷的两款 InGaAs 近红外探测器的性能。NIRvana-LN 光电子与输出数字量的转换因子为  $0.16\text{ADU}/e^-$ , 读出噪声实测值是  $83\text{e}^-$ , 远高于标称值  $15\text{e}^-$ ; NIRvana 的高、低转换因子分别为  $1.25\text{ADU}/e^-$  和  $0.097\text{ADU}/e^-$ , 读出噪声分别为  $105\text{e}^-$  和  $380\text{e}^-$ ; NIRvana 在高转换因子档下暗电流实测值是  $415\text{e}^-/\text{s}$ , 大约是标称值的 2 倍。理论估算云南天文台两米环形望远镜在  $1.565\text{ }\mu\text{m}$  太阳磁场测量时的信号电子数约  $8800\text{e}^-$ , 在实测暗电流  $4.06\text{e}^-/\text{s}$ , 像元曝光时间  $20\text{ms}$ , 读出噪声  $83.59\text{e}^-$  条件下, NIRvana-LN 探测器信噪比为 70。

**关键词:** 红外天文; InGaAs 红外探测器; 转换因子; 读出噪声; 暗电流

中图分类号: O434.3 文献标识码: A

## Performance test method of InGaAs near infrared detector for astronomical observation

SUN Bai-Cheng<sup>1</sup>, GUO Jie<sup>1\*</sup>, XU Fang-Yu<sup>2\*</sup>, FAN Ming-Guo<sup>3</sup>, GONG Xiao-Xia<sup>3</sup>,  
XIANG Yong-Sheng<sup>1</sup>, LING Yun<sup>3</sup>, ZHANG Yu-Chen<sup>2</sup>

(1. Yunnan Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;  
2. Yunnan Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;  
3. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Based on the evaluation system of astronomical infrared detectors, the performance of two InGaAs NIR detectors, liquid nitrogen-cooled and thermoelectric-cooled, was tested using a modified "photon transfer curve" tests method. The measured value is  $83\text{e}^-$ , which is much higher than the nominal value of  $15\text{e}^-$ ; the high and low conversion factors of NIRvana are  $1.25\text{ADU}/e^-$  and  $0.097\text{ADU}/e^-$ , respectively, and the readout noise is  $105\text{e}^-$  and  $380\text{e}^-$ ; the measured value of dark current of NIRvana at the high conversion factor step is  $415\text{e}^-/\text{s}$ , which is about twice of the nominal value. The theoretical estimate of the signal electron number of the Yunnan Observatory two-meter ring telescope at  $1.565\text{ }\mu\text{m}$  solar magnetic field measurement is about  $8800\text{e}^-$ , and the NIRvana-LN detector signal-to-noise ratio is 70 under the measured dark current of  $4.06\text{e}^-/\text{s}$ , image exposure time of  $20\text{ms}$ , and readout noise of  $83.59\text{e}^-$ .

**Key words:** infrared astronomy, InGaAs infrared detector, conversion factor, readout noise, dark current

## 引言

红外观测在银河系结构、恒星的形成、星际介质、星系及类星体、太阳结构等天文学研究领域里

具有重要意义<sup>[1]</sup>。国外在红外天文观测方面起步很早, 包括大型地面望远镜和多个空间望远镜, 包括最近刚刚发射的詹姆斯韦伯空间望远镜。国内的

收稿日期: 2022-05-26, 修回日期: 2022-08-29

Received date: 2022-05-26, Revised date: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金委员会与天文联合基金培育项目(U1931124)

Foundation items: Fund Projects: National Natural Fund Committee, Joint Astronomy Fund Incubation Program(U1931124)

作者简介(Biography): 孙佰成(1997-), 男, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要从事天文红外探测器测量方面的研究。E-mail: 2366194599@qq.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: ynnugj@sohu.com; xu\_fangyu@ynao.ac.cn

红外天文观测始于上世纪末,受制于探测器性能,观测结果与国外天文台存在明显差距。比如在太阳物理方面,近红外波段(1.083  $\mu\text{m}$ 、1.565  $\mu\text{m}$ )兼具高空间分辨率和高磁场测量灵敏度。美国大熊湖1.6 m太阳望远镜(GST)在小尺度磁重联、太阳色球层和太阳耀斑等方面取得了令人瞩目的成果<sup>[2]</sup>;国内用于红外天文观测的探测器(或相机)多是进口,目前国内最大口径的太阳望远镜NVST配备了美国PI公司1.083  $\mu\text{m}$ 近红外相机,于2010年正式投入观测,在太阳黑子精细结构及震荡、光球米粒动力学演化、太阳暗条形成和爆发等方面取得了一系列研究成果<sup>[3]</sup>,但缺乏高性能的1.565  $\mu\text{m}$ 近红外探测器,磁场测量灵敏度明显弱于美国大熊湖太阳望远镜。在探测器性能表征方面,由于红外探测器多应用于夜视领域,其性能评价采用探测率( $D^*$ )、噪声等效温差(NETD)等参数;天文学家更习惯沿用可见光CCD的表征参数如暗电流、读出噪声、增益和满阱电子数。蔡云芳等人总结了红外探测器在天文观测中的重要性能指标及其测试方法,但未对探测器进行测量<sup>[4]</sup>;李彬华等人在“光子转移曲线”测试方法基础上提出了一种测试与归算方法<sup>[5]</sup>;王书宏等人全面分析了天文CCD相机中的噪声特性并提出了低照度下的信噪比模型<sup>[6]</sup>。作为我国目前在建的最大口径太阳望远镜——两米环形望远镜(2mRST),主要用于近红外甚至中红外太阳观测领域,其中低暗电流和极低噪声的天文专用红外探测器是该望远镜的核心。近红外(1.565  $\mu\text{m}$ )天文观测的焦平面探测器以HgCdTe(MCT)和InGaAs为主,其中InGaAs探测器在缩小红外系统体积、降低功耗和成本、提高可靠性方面具有优势,广泛应用于空间遥感、生物光谱等领域<sup>[7-9]</sup>。但是商品化InGaAs探测器是室温或热电制冷(最低194 K)下工作,噪声大,不能满足天文观测极低信号,因此液氮(80 K)制冷下InGaAs探测器的实现和研究在红外天文领域具有重要意义。目前国际上在液氮制冷InGaAs探测器的研究和产品极少,本文采用“光子转移曲线”法<sup>[10]</sup>的改进法对美国PI公司的液氮制冷探测器(NIRvana-LN)和半导体制冷探测器(NIRvana)两款探测器进行了转换因子( $K$ )、读出噪声以及暗电流的测量;理论估算了两米环形望远镜(2mRST)在1.565  $\mu\text{m}$ 进行太阳磁场测量时的入射信号光子数和极限信噪比,并对两款近红外探测器的适用性做出评估。

## 1 天文红外探测器测量原理

天文观测技术对探测器(或相机)的增益、读出噪声测量常采用“光子转移曲线法”,通过改变光源(如积分球)功率来改变入射辐射拟合出光电流,但是功率与光源辐射度之间的非线性会造成光电流测量的误差。本文通过改变积分时间来进行拟合,即通过两条关系曲线:探测器读数与积分时间关系,探测器读数方差与积分时间关系,最终获得探测器转换因子( $K$ )、读出噪声和暗电流的数值。探测器经过光电转化后,电信号可以采用电子数或A/D转换后的数字量(ADU)表示。在天文观测CCD中,通常采用“增益”来表征数字量与光电子关系,单位是 $e^-/\text{ADU}$ ,它是天文光电器件的重要指标之一。增益过小,探测器读出电路的量化噪声增加;增益过大,探测器输出的信号会超过A/D量程,降低动态范围。“增益”与读出电路中积分电容、A/D位数、放大器及积分过程中实际电压摆幅有关,在无法知道探测器读出电路实际工作参数下,采用实测“光子转移曲线法”是获得“增益”的有效手段之一。光电探测器习惯采用转换因子 $K$ 表示每一个光电子对应输出的ADU,单位 $\text{ADU}/e^-$ ,与“增益”互为倒数,本文主要讨论探测器的转换因子 $K$ 。暗电流可以用电子数或暗计数表示为 $e^-/\text{s}$ 或 $\text{ADU}/\text{s}$ 。红外探测器的总噪声 $N_{\text{total}}^2$ 主要分为与信号大小有关的散粒噪声 $N_{\text{shot}}^2$ (包括入射光电子、暗流电子)和与读出信号强度无关的读出噪声 $N_{\text{read}}^2$ (包括读出电路和量化噪声等)<sup>[11]</sup>。如式(1)

$$N_{\text{total}}^2 = N_{\text{read}}^2 + N_{\text{shot}}^2 \quad , \quad (1)$$

入射光电子和暗电流电子都服从泊松分布,两者引起的散粒噪声 $N_{\text{shot}}$ 是累计的电子数 $n_e$ 的平方根,即

$$N_{\text{shot}}^2 = n_e = \frac{1}{K} \times I_{\text{adu}} \times t \quad , \quad (2)$$

其中, $I_{\text{adu}}$ 是采用读数表示的电流( $\text{ADU}/\text{s}$ )包含入射信号和暗电流, $t$ 为积分时间。在入射辐射功率不变(如黑体温度和距离)下, $I_{\text{adu}}$ 不变。此时,探测器输出信号(ADU读数)与积分时间 $t$ 成正比,利用式(3)经过线性拟合后即得到 $I_{\text{adu}}$

$$\text{ADU} = I_{\text{adu}} * t + N \quad . \quad (3)$$

根据转换因子定义,总噪声和读出噪声采用电子数和ADU表示的关系为:

$$K \times N_{\text{total}} = \text{ADU}_{\text{total}} \quad K \times N_{\text{read}} = \text{ADU}_{\text{read}} \quad , \quad (4)$$

因此,可得:

$$\left(\frac{1}{K} \times \text{ADU}_{\text{total}}\right)^2 = \left(\frac{1}{K} \times \text{ADU}_{\text{read}}\right)^2 + \frac{1}{K} \times I_{\text{adu}} \times t, \quad (5)$$

变形后得到:

$$\text{ADU}_{\text{total}}^2 = \text{ADU}_{\text{read}}^2 + K \times I_{\text{adu}} \times t, \quad (6)$$

式(6)中,总噪声(读数)方差  $\text{ADU}_{\text{total}}^2$  与积分时间  $t$  线性拟合可得到转换因子  $K$  和读出噪声(读数)方差  $\text{ADU}_{\text{read}}^2$ , 以及再利用式(4)得到读出噪声(电子数)  $N_{\text{read}}$ 。然后,将入射辐射关闭,测量暗场下探测器输出读数与积分时间的关系,利用式(3)拟合得到暗电流读数(ADU/s),利用式(4)得到  $I_{\text{暗ADU}}$  ( $e^-/s$ )。

## 2 天文红外探测器性能测试

天文观测领域一般直接购买进口红外相机安装在望远镜的焦点之上,并且习惯把相机称为探测器。本实验中的两款近红外探测器均采用 InGaAs 半导体材料,阵列规模  $640 \times 512$ 。其中 NIRvana-LN 应用于丽江高美古 2.4 m 夜天文望远镜,采用液氮制冷,实际工作温度为 83 K ( $-190^\circ\text{C}$ );另一台 NIRvana 在云南天文台 NVST 望远镜上使用,采用半导体制冷器,实际工作温度为 193 K ( $-80^\circ\text{C}$ )。探测器信号经过 16 位 A/D 转换后通过 Cameralink 采集卡进入计算机,自带 PICAM 软件进行数据处理。实验中积分时间的选取考虑探测器的线性区,使输出在  $1/3$ – $2/3$  满阱区间。每个积分时间点采集 100 帧,多帧图像平均得到输出信号读数  $S_{\text{ADU}}$ 。进一步计算每个像元读数的方差,再对整个图像平均得到总噪声(读数)方差  $\text{ADU}_{\text{total}}^2$ 。

### 2.1 NIRvana-LN 红外探测器的测试结果与讨论

将整套系统放置于温度可调的环境实验箱中,采用空间均匀辐射的面源黑体作为辐射源。探测器在望远镜焦平面上放置时不使用镜头,因此我们在实验室测试时未安装镜头,黑体与封窗间距离 10 cm,使得黑体辐射充分覆盖全部像元。天文观测中进入探测器的辐射非常弱,比如夜天文的零等星,或者太阳磁场测量时带宽 0.01 nm 的  $1.565 \mu\text{m}$  窄带滤光片。因此,实验中黑体温度设置为  $48^\circ\text{C}$  模拟这种弱辐射。此外为了黑体温度的稳定,将试验箱环境温度设置为  $45^\circ\text{C}$ 。探测器加装液氮制冷到 83 K 并稳定后打开相机开始曝光,并记录信号读数  $S_{\text{ADU}}$ —积分时间  $t_{\text{int}}$  曲线和总噪声方差  $\text{ADU}_{\text{total}}^2$ —积分时间  $t_{\text{int}}$  曲线,如图 1 所示。根据式(3)和(6)拟合得到转换因子  $K$  和读出噪声方差  $\text{ADU}_{\text{read}}^2$ 。

暗电流是指无外场辐射下探测器随时间累计

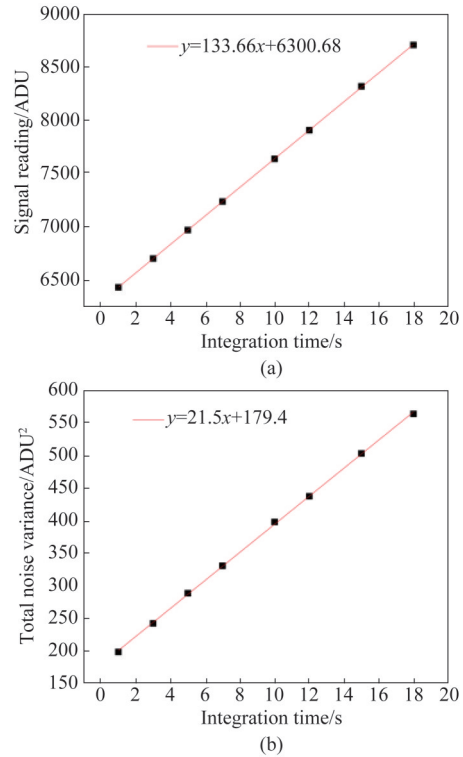


图 1 NIRvana-LN 探测器 (a) 信号读数与积分时间, (b) 总噪声方差与积分时间的关系

Fig. 1 NIRvana-LN detector (a) ADU signal versus integration time, and (b) variance of total noise versus integration time

的输出电子数。为了避免外界辐射的干扰,采用  $-25^\circ\text{C}$  的面源黑体覆盖探测器光敏面,因为  $-25^\circ\text{C}$  黑体在近红外波段的辐射很小。为防止结露和减小黑体制冷机工作时的影响,将试验箱环境温度为  $-30^\circ\text{C}$ , 此时背景的辐射也可以忽略。做暗信号读数  $S_{\text{ADU}}$ —积分时间  $t_{\text{int}}$  曲线并根据式(3)拟合得到  $I_{\text{暗adu}}$ 。

重复上述实验 6 次, NIRvana-LN 探测器的转换

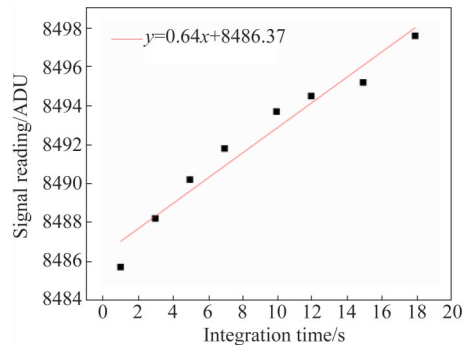


图 2 无外场辐射下 NIRvana-LN 探测器信号读数与积分时间关系

Fig. 2 Relation between signal ADU and integration time of NIRvana-LN detector without illumination

因子、读出噪声和暗电流结果如表1所示。转换因子稳定在0.16,说明输出摆幅在线性区内。读出噪声稳定,且只有 $83 e^-$ 。每个像元的暗电流非常低,只有 $3\sim 7 e^-/s$ ,这是由于极低的工作温度(83 K)以及背景辐射几乎为零的情况下,暗信号读数随积分时间的增加变化很小。

表1 NIRvana-LN探测器的转换因子、读出噪声和暗电流

Table 1 Conversion factor, read noise and dark current of NIRvana-LN detector

测量次数	转换因子/(ADU/ $e^-$ )	读出噪声/ $e^-$	暗电流/( $e^-/s$ )
1	0.16	83	3.94
2	0.16	85	4.34
3	0.16	83	6.20
4	0.16	84	7.09
5	0.16	83.6	3.72
6	0.16	83.2	3.10
平均值	0.16	83.63	4.73

## 2.2 NIRvana红外探测器的测试结果与讨论

由于该探测器放置在NVST系统内,我们在现场测试。采用灯泡作为辐射源,使用毛玻璃或硫酸纸实现空间均匀化。该探测器通过改变积分电容 $C_{int}$ 可以实现高、低转换因子(说明书称“增益”)两种状态,小 $C_{int}$ 对应高转换因子(ADU/ $e^-$ )。图3(a)给出高、低转换因子下信号读数 $S_{ADU}$ —积分时间 $t_{int}$ 关系曲线,从拟合斜率中可提取 $I_{adu}$ 。图3b给出高、低转换因子下总噪声(读数)方差 $ADU_{total}^2$ —积分时间 $t_{int}$ 关系曲线,拟合可以得到转换因子和读出噪声。

测量暗电流时,为避免黑体在零下温度结露,黑体设置为 $5^\circ C$ 。调整积分时间并采集图像,高、低转换因子下暗信号读数 $S_{ADU}$ —积分时间 $t_{int}$ 变化关系如图4所示。与图2相比,斜率即暗电流比NIRvana-LN增大了2-3个数量级。暗电流的急剧增大来源于两个方面: $5^\circ C$ 的黑体辐射相比 $-25^\circ C$ ,辐射能量密度增大近一个数量级;NIRvana探测器制冷温度为193 K,热产生载流子和扩散电流造成暗电流急剧增加,这也是探测器暗电流的主要成分。

多次测试结果如表2所示,高转换因子模式下, $K$ 为 $1.25 ADU/e^-$ ,读出噪声为 $105 e^-$ ,暗电流大小为 $415 e^-/s$ ;低转换因子模式时, $K$ 为 $0.097 ADU/e^-$ ,读出噪声为 $380 e^-$ ,暗电流大小为 $597 e^-/s$ ,此时,读出噪声的主要成分是探测器读出电路中的复位噪声,即每次复位后的起始电压的微小差别,复位噪声由

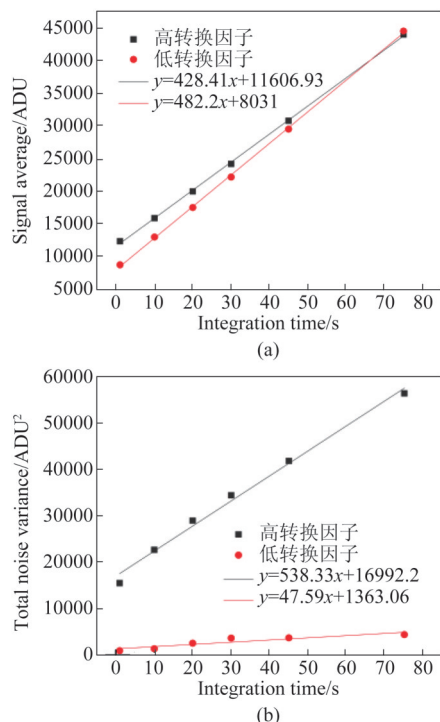


图3 (a)信号读数与积分时间关系,(b)总噪声方差与积分时间关系

Fig. 3 (a) Signal reading vs. integration time, and (b) total noise variance vs. integration time

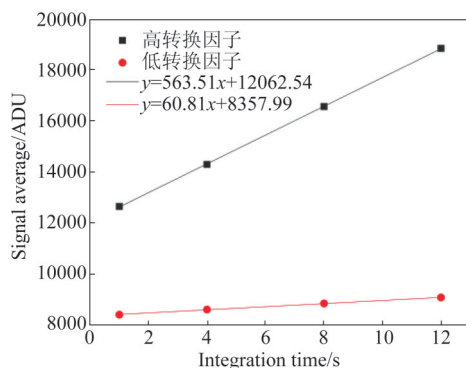


图4 无光照下暗信号读数与积分时间关系拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of dark signal reading versus integration time under no light

复位开关的热噪声引起。

根据光子曲线转移法得到的NIRvana-LN和NIRvana探测器测量值与标识值对照表如表3所示,我们发现由厂家提供的性能指标往往与探测器的实际性能有较大差别。首先,厂家产品说明书中表征“光电子-AD数字量”转换的物理过程以“增益( $e^-/ADU$ )”来表示,而实际测量中习惯“转换因子(ADU/ $e^-$ )”表示一个光电子对应的AD数字量,两者互成倒数关系;其次,实测值考虑实际应用比如太

表2 NIRvana探测器的转换因子、读出噪声和暗电流

Table 2 Conversion factor, read noise and dark current of NIRvana detector

测量次数	高转换因子			低转换因子		
	$K/(ADU/e^-)$	读出噪声/ $e^-$	暗电流/ $(e^-/s)$	$K/(ADU/e^-)$	读出噪声/ $e^-$	暗电流/ $(e^-/s)$
1	1.25	104.4	422.66	0.098	374.3	597.91
2	1.25	105.1	414.49	0.094	400.9	596.15
3	1.25	105.3	413.93	0.103	346.6	597.87
4	1.25	105.8	413.92	0.095	386.8	596.56
5	1.25	106.3	414.31	0.097	395.0	597.80
平均值	1.25	105.4	415.86	0.097	380.72	597.26

阳光谱测量时实际辐射量,与标称值在环境温度、器件实际工作温度和测量方法上有差异,造成读出噪声和暗电流明显不同;

在实际测量中我们发现,液氮制冷 NIRvana-LN 探测器的实测性能明显低于探测器所标称性能,厂家没有给出其读出噪声的测量方法,我们采用天文相机常用的“光子曲线转移”法获得拟合的读出噪声,所得结果有很大差距:读出噪声实测值  $83.9 e^-$ ,比标称值  $15 e^-$  高了 6 倍。根据文献[8]和[12],InGaAs 探测器的噪声来源有:探测器芯片噪声、读出电路噪声、InGaAs 芯片与读出电路之间 In 柱互连引入的热噪声以及  $1/f$  噪声。通过对焦平面的  $\log N_{total} - \log T_{int}$  曲线进行线性拟合可以定性的判断噪声来源。NIRvana-LN  $\log N_{total} - \log T_{int}$  曲线的拟合结果如图 5 所示,积分时间较短时,探测器拟合斜率接近于 0,此时焦平面噪声由耦合噪声和电路噪声主导,随着积分时间变长,斜率逐渐接近 0.5,此时焦平面噪声由探测器芯片噪声主导。该实验结果说明,为了获得探测器的真实性能,读出噪声的实际测量是很有必要的<sup>[12]</sup>。

本底对相机的性能如动态范围有重要影响,本文主要讨论暗电流,采用了天文上常使用的“光子曲线转移法”拟合,根据公式  $ADU = I_{adu} * t + N$ ,通过对相机测不同曝光时间的 ADU,得到输出信号与积分时间关系的 ADU-t 曲线,ADU-t 曲线的斜率即为

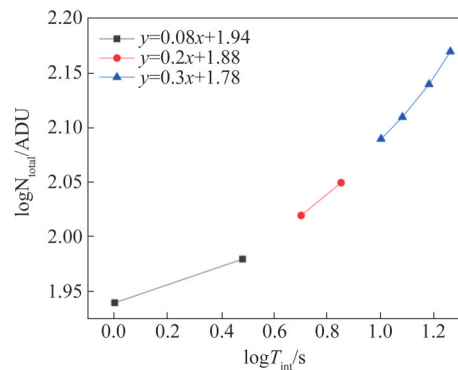


图5 总噪声与积分时间的关系

Fig. 5 Relation between focal plane noise and integration time

暗电流,截距  $N$  为本底的值,NIRvana-LN 本底电子数为  $53039 e^-$ ;NIRvana 高低转换因子下本底电子数为  $9650 e^-$  和  $88010 e^-$ 。”

NIRvana-LN 暗电流测试中,厂家测试条件为  $-174 \text{ }^\circ\text{C}$  的低温冷源,采用  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$  的面源黑体,从辐射量来看,我们的实测暗电流应该高于标称值,但是,标称值为  $10 e^-/s$ ,实际测量值只有  $4 e^-/s$ 。这个差异来源于测试条件的不同,在暗电流实测中,发现探测器开始工作后,暗电流会一直下降,几个小时后会稳定在很低的水平,我们的测试结果是经过几个小时后稳定值。我们推测厂家标称值有可能是在未稳定的初始状态测得。

表3 探测器的测量值与标识值对照表

Table 3 Comparison of measured and identification value for the detectors

探测器名称	测量值			标称值		
	转换因子/ $(ADU/e^-)$	读出噪声/ $e^-$	暗电流/ $(e^-/s)$	转换因子/ $(ADU/e^-)$	读出噪声/ $e^-$	暗电流/ $(e^-/s)$
NIRvana-LN	0.16	83.59	4.06	0.14	15	10
NIRvana(High K)	1.25	105	415	1	75	150
NIRvana(Low K)	0.097	380	597	0.07	140	150

根据黑体辐射公式,  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-174\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的黑体辐射在 $1\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ 处的光子数都非常小,可以忽略。此时探测器暗电流主要来源于器件芯片自身如产生-复合暗电流、隧穿暗电流等。对于半导体制冷下NIRvana暗电流测试中,为避免结露采用 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑体作为辐射源, $1\sim 1.65\text{ }\mu\text{m}$ 辐射每秒入射像元的光子数可估算约335个(具体计算结果如下),导致暗电流明显增加,而 $-174\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温冷源的辐射光子数可忽略,因此暗电流标称值( $150\text{ e}^-/\text{p/s}$ )低于实测值( $400\sim 600\text{ e}^-/\text{p/s}$ )。

已知像元阵列为 $640\times 512$ 个像元,每个像元大小为 $0.02\text{ mm}\times 0.02\text{ mm}$ ,则总像元面积大小为 $12.800\text{ mm}\times 10.240\text{ mm}$ 。

首先采用勾股定理来进行计算总像面的直径 $D$ :

$$D = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{12.8^2 + 10.24^2} = 16.4\text{ mm} . \quad (7)$$

根据冷屏结构,直径 $D$ 对应黑体的有效光源尺寸 $D_1$

$$D_1 = D + 2 \cdot l \cdot \tan\theta = 88.4\text{ mm} \quad , \quad (8)$$

式中 $l$ 为测量距离 $100\text{ mm}$ , $\theta$ 为 $20^{\circ}$

光源面积记作 $S$ :

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.14 \times 88.4 \times 88.4}{4} = 6\ 134\text{ mm}^2 . \quad (9)$$

像元面积记作 $S_1$ :

$$S_1 = 0.02\text{ mm} \times 0.02\text{ mm} = 4 \times 10^{-4}\text{ mm}^2 . \quad (10)$$

像元的空间张角 $\theta$ :

$$\theta = \frac{S_1}{L^2} = \frac{4 \times 10^{-4}}{100 \times 100} = 4 \times 10^{-8}\text{ sr} . \quad (11)$$

当黑体为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ( $278\text{ K}$ )时,通过黑体辐射定律可计算 $1.0\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ 辐射度:

$$W(\lambda) = \int_{1.0\mu\text{m}}^{1.6\mu\text{m}} \left( \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \right) d\lambda = 5.5 \times 10^{-13}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2} \quad , \quad (12)$$

式中, $W(\lambda)$ 为光谱辐射通量密度,单位 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $T$ 为黑体温度,单位 $\text{K}$ ;第一辐射常量 $C_1 = 3.7415 \times 10^4\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{m}^4$ ;第二辐射常量, $C_2 = 1.4387 \times 10^4\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}$ 。

将黑体当作朗伯漫辐射体,则辐射度是辐亮度的 $\pi$ 倍,因此辐亮度 $N$ 为:

$$N = \frac{W(\lambda)}{\pi} = 1.75 \times 10^{-13}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} , \quad (13)$$

则像元每秒入射总能量 $E$ 为:

$$E = N \cdot \theta \cdot S = 1.75 \times 10^{-13} \times 4 \times 10^{-8} \times 6\ 134 = 4.29 \times 10^{-17}\text{ J} \quad , \quad (14)$$

一个 $1.6\mu\text{m}$ 光子的能量为:

$$E_1 = hc/\lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-6}} = 1.28 \times 10^{-19}\text{ J} \quad , \quad (15)$$

像元每秒入射的光子数 $n$ 为:

$$n = \frac{E}{E_1} = 335 \quad , \quad (16)$$

同理可得: $-194\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,入射的光子数为 $4.5 \times 10^{-24}$ ,可以忽略不计

暗电流计算:按照量子效率80%计算,黑体辐射引入的暗电流(像元每秒电子数)为

$$335 \times 80\% = 268\text{ e}^-/\text{p/s} \quad , \quad (17)$$

NIRvana高转换因子模式下,扣除黑体辐射引入的暗电流 $415 - 268 = 147\text{ e}^-/\text{p/s}$

### 3 两米环型望远镜信噪比分析

天文望远镜选址和建设前,天文学家会对观测目标的信号光子数和电子数进行估算。按照云南天文台两米环形太阳望远镜对太阳黑子进行磁场观测条件( $1.565\text{ }\mu\text{m}$ 的衍射极限成像,滤光片带宽 $0.01\text{ nm}$ ,积分时间 $20\text{ ms}/\text{像元}$ ),考虑大气透过率,望远镜光学系统透过率,偏振片透过率,谱线凹陷,探测器量子效率之后<sup>[13]</sup>,照射到一个像元( $20\text{ }\mu\text{m}\times 20\text{ }\mu\text{m}$ )上的平均光信号产生的电子数 $n_{\text{sig}}$ 约为 $8\ 800\text{ e}^-$ 。

信噪比(SNR),即信号与噪声的比值 $n_{\text{sig}}/N_{\text{total}}$ ,常常是红外天文观测的终极追求。在信号一定的情况下,噪声是决定观测极限的最重要因素。根据式(1),系统噪声(不包括 $1/f$ 噪声)由式(18)表示

$$N_{\text{total}} = \sqrt{N_{\text{phot}}^2 + N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{read}}^2} \quad , \quad (18)$$

式中 $N_{\text{phot}}$ 为光子噪声电子数, $N_{\text{dark}}$ 为暗电流噪声电子数, $N_{\text{read}}$ 为读出噪声电子数,光电子噪声服从泊松统计分布规律<sup>[14]</sup>,噪声值 $N_{\text{phot}} = \sqrt{n_{\text{sig}}} = 93.8\text{ e}^-$ ,暗电流噪声是指在曝光时间内所产生热电子的均方根,也服从泊松分布, $n_{\text{dark}} = \sqrt{I_{\text{d}} t_{\text{int}}}$ , $I_{\text{d}}$ 为暗电流, $t_{\text{int}}$ 为曝光时间。对于NIRvana-LN探测器,暗电流 $4.06\text{ e}^-/\text{s}$ ,像元曝光时间 $20\text{ ms}$ ,读出噪声 $83.59\text{ e}^-$ ,探测器的信噪比 $n_{\text{sig}}/N_{\text{total}}$ 为70。同理可得,NIRvana的信噪比大小在高低转换因子下分别为63.2和22.5。暗电流噪声相比信号噪声和读出噪声几乎可以忽略,根据天文观测对信噪比的要求,探测器噪声(包括暗电流和读出噪声)必须明显低于信号噪声,一般设定为信号噪声( $93.8\text{ e}^-$ )的 $1/5$ 约 $18\text{ e}^-$ ,

其信噪比为92。为达到这一目标,读出噪声应该降到 $20 e^-$ 以下。美国大熊湖太阳望远镜在短波红外的信噪比可以达到120,已经达到背景限水平,我们现有的探测器以及红外光学系统还有差距。

#### 4 结论

红外天文观测对红外探测器的需求与传统夜视需求不同,评价方法和体系也不同,并且多依赖于进口,实际应用中读出噪声和暗电流指标与产品标称值有较大差异,影响天文观测的使用效果。因此,本文采用改进的“光子曲线转移法”对PI公司的两款红外探测器进行测量,实测结果中,转换因子的测量值与标称值有较大偏离,其次读出噪声明显高于标称值;通过延长测试时间,液氮制冷探测器的暗电流低于标称值,达到 $4 e^-/s$ 。我们研究天文领域和传统夜视领域的测试方法,分析了结果差异的原因。理论估算了2mRST望远镜 $1.565 \mu\text{m}$ 波段观测太阳黑子时的信噪比指标,目前实测的读出噪声和暗电流无法满足观测需求。在高性能红外探测器依赖进口和关键技术卡脖子的背景下,本文对国内自主研发天文专用红外探测器具有一定的借鉴意义。

#### References

- [1] WANG Shu-Jun, YE Bin-Xun, HE Xiang-Tao. Advances in infrared astronomical observation technology[J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*(王术军, 叶彬浔, 何香涛. 红外天文观测技术进展. *北京师范大学学报:自然科学版*), 2005, **41**(3):280-285.
- [2] Cao W, Ahn K, Goode P R, et al. The New solar telescope in big bear: Polarimetry II [C]. ASP Conference Series, 2011, **437**(5):345-349.
- [3] Yan X L, Liu Z, Zhang J, et al. Research progress based on observations of the New Vacuum Solar Telescope[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, **63**(9):1656-1674.
- [4] CAI Yun-Fang, Li Yin-Zhu, XU Fang-Yu, et al. Analysis of infrared device performance and test evaluation methods for astronomical applications [J]. *Infrared Technology* (蔡云芳, 李银柱, 许方宇, 等. 天文应用之红外器件性能与测试评估方法分析. *红外技术*), 2014, **36**(11):868-872.
- [5] LI Bin-Hua, YE Bin-Xun. An improved method for testing and attribution of CCD camera readout noise and charge transfer efficiency [J]. *Astronomy Research and Technology* (李彬华, 叶彬浔. CCD相机读出噪声、电荷转移效率的测试和归算的改进方法. *天文研究与技术*), 2005, **2**(3):177-185.
- [6] WANG Shu-Hong, HU Mou-Fa, CHEN Zeng-Ping. Noise analysis of astronomical CCD cameras and the study of signal-to-noise ratio model [J]. *Semiconductor optoelectronics* (王书宏, 胡谋法, 陈曾平. 天文 CCD 相机的噪声分析与信噪比模型的研究. *半导体光电*), 2007, **28**(5):731-734.
- [7] LI Xue, GONG Hai-Mei, SHAO Xiu-Mei, et al. Advances in short-wave infrared InGaAs focal plane research [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (李雪, 龚海梅, 邵秀梅, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(1):129-138.
- [8] YU Chun-Lei, LI Xue, SHAO Xiu-Mei, et al. Focal plane noise characteristics of short-wave infrared InGaAs [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (于春蕾, 李雪, 邵秀梅, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面噪声特性. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(4):528-534.
- [9] LI Xue, SHAO Xiu-Mei, Li Tao, et al. Research progress of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李雪, 邵秀梅, 李涛, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展. *红外与激光工程*), 2020, **49**(1):64-71.
- [10] Janesick J, Klaasen K, Elliott T. CCD charge collection efficiency and the photon transfer technique [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1985, **570**:7-19.
- [11] Huang Song-Lei, Zhang Wei, Huang Zhang-Cheng, et al. Large perimeter area ratio extended wavelength InGaAs infrared focal plane noise [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (黄松垒, 张伟, 黄张成, 等. 大周长面积比延伸波长 InGaAs 红外焦平面噪声. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(3):235-238.
- [12] Li X, Huang S L, Chen Y, et al. Noise characteristics of short wavelength infrared InGaAs linear focal plane arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(6):013202-1.
- [13] PENG Jian-Wei, CHEN Wei-Ning, ZHANG Gao-Peng, et al. Design of low-illumination wide-format aerial camera system [J]. *Infrared and Laser Engineering* (彭建伟, 陈卫宁, 张高鹏, 等. 低照度宽幅航空相机系统设计. *红外与激光工程*), 2021, **50**(12):321-329.
- [14] XU Li-Na, Dong Jie, DAI Li-Qun, et al. Research and analysis of infrared detector detectivity [J]. *Laser and Infrared* (徐丽娜, 董杰, 戴立群, 等. 红外探测器探测率的研究与分析. *激光与红外*), 2018, **48**(4):497-502.