

新一代亚毫米波偏振仪 Roger

吕伟涛, 黄俊锟, 孙笳淋, 李华白

(香港中文大学 物理系, 香港特别行政区 999077)

摘要: 传统的偏振测量技术依赖半波片和线栅偏振器,但在消除天空噪声方面存在局限性。Roger 偏振仪创新性地引入了一种基于双屋面镜结构的调制偏振干涉仪 (MPI) 的设计及其在消除天空噪声中的应用。通过双屋面镜和线栅偏振器的组合, MPI 结构实现了单探测器对正交偏振信号的实时测量, 显著提高了噪声抑制能力。穆勒矩阵分析表明, MPI 能够精确描述偏振信号与噪声的特性。在初步实验验证中, 原型样机在 345 GHz 频段下实现了干涉调制, 通过引入线性振动装置, 调制频率可达千赫兹量级, 从而优于传统旋转半波片的方案。此外, 作为 Roger 偏振相机的核心模块, MPI 与 MKID 探测器阵列结合, 在格陵兰射电望远镜中展现了优异的光学性能和探测效率。研究结果表明, MPI 结构和 MKIDs 探测器架构为高灵敏度偏振测量提供了一种高效的技术方案, 在亚毫米波天文领域具有重要应用价值。

关键词: 偏振仪; 亚毫米波; 磁场; MPI; 天空噪声; MKID

中图分类号: P111.48 文献标识码: A

1 引言

偏振测量作为对光度、光谱和成像的重要补充, 在亚毫米波天文观测中具有独特价值。亚毫米波偏振仪目前广泛应用于多个重要研究领域: 恒星形成区的磁场环境研究^[1]、星际介质中尘埃分布结构的表征^[2], 以及宇宙微波背景辐射偏振模式的探测^[3]。香港中文大学物理系恒星形成研究团队致力于研究恒星形成过程中引力、磁场和湍流三种主导物理机制的相互作用。其中, 由于受观测技术的限制, 磁场在恒星形成中的具体作用仍存在重要争议^[4]。目前, 分子云中磁场的探测手段有且仅有两种: 基于塞曼效应的视向磁场强度测量和基于线偏振提供的投影方向上磁场分布测量。根据尘埃对齐理论, 尘埃热辐射的偏振方向与局部磁场方向呈正交关系^[5]。基于这一理论, 我们计划研制新一代亚毫米波偏振仪, 用于研究分子云中投影方向上磁场的排列分布。

大气水汽辐射是地基亚毫米波观测面临的主要挑战之一, 其辐射强度通常较天文目标信号高出数个量级。水汽含量的快速变化导致的天空噪声在频谱特性上表现为典型的 $1/f$

收稿日期: 2024-11-13; 修回日期: 2025-12-16

资助项目: 香港研究资助局项目 (CRF C4012-20EF, GRF 14306323, GRF 14307222, GRF 14307225)

通讯作者: 吕伟涛, weitaolyu@cuhk.edu.hk; 李华白, hbli@cuhk.edu.hk

噪声^[6]。因此，有效抑制天空噪声同时保持对微弱偏振信号的探测能力，是亚毫米波偏振仪设计的关键。正交偏振差分测量是目前亚毫米波偏振观测中最为广泛采用的噪声抑制技术。现有技术路线主要分为两类：基于双探测器的同时测量方案（如 SHARP^[7]）和基于单探测器的时序采样方案（如 SCUBA Pol2^[8]）。然而，这两种方案均存在固有限制：前者受限于探测器性能差异的精确标定需求，后者则依赖于采样时间间隔内大气条件的稳定性。针对上述技术限制，我们提出了基于 MPI 结构的新型测量方案。该方案使单个探测器能够实现对正交偏振分量的同步测量，从而在原理上提供了更为有效的天空噪声抑制能力。

本文的结构安排如下：第 2 章将介绍 MPI 偏振仪的构造与工作原理，并展示一些初步实验验证结果；第 3 章将介绍 Roger 的光学设计及其优化；第 4 章将阐述 MKIDs 的设计、制备及其组装；最后，第 5 章将进行总结与展望。

2 MPI

传统的偏振仪的配置主要包括一个半波片和一个线栅偏振器。半波片用于调制入射信号偏振方向，而线栅则定义探测器的偏振方向。如前所述，偏振仪的关键在于探测正交偏振以有效消除天空噪声。现有的天空噪声消除策略主要可分为两类：第一类采用快速且稳定旋转的半波片，结构可参考 Pol2。半波片的快速稳定旋转确保了偏振调制频率足够高，超过天空噪声的变化频率，从而可视作大气噪声在正交偏振测量期间保持稳定；因此，通过对正交偏振信号进行相减，可以有效消除天空噪声。然而，由于天空噪声的不确定性，在某些调制周期中，仍可能出现天空噪声的波动。第二类则利用两个探测器同时探测正交偏振，从而实时获取正交偏振之间的差异，例如在 SHARP 中采用的方案。在这种情况下，半波片的调制频率要求显著低于第一种策略。然而，两个探测器在校准后所表现出的增益差异仍然限制了该策略可检测的最低偏振度。

为解决上述技术挑战，我们在前代偏振仪 APoL^[9]的基础上进行了光学系统的创新设计，引入了基于双屋面镜的 MPI 结构。这一改进实现了单探测器对天空噪声的实时抑制。图 1 为该 MPI 偏振测量模块的光路示意图。

2.1 MPI 偏振模块穆勒矩阵

穆勒矩阵作为作用于 Stokes 参数的矩阵，可以用来描述偏振信号和非偏振的天空噪声。考虑波片垂直于信号传播方向，沿着波片的快轴穆勒矩阵可表示为：

$$\mathbf{M}_{\text{WP}}(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中， ϕ 是波片快轴和慢轴间的相位时延，对于半波片 $\phi = \pi$ 。当偏振与半波片夹角为 θ 时，半波片的穆勒矩阵可表示为：

$$\mathbf{M}_{\text{HWP}} = \mathbf{R}(-\theta) \cdot \mathbf{M}_{\text{WP}}(\phi = \pi) \cdot \mathbf{R}(\theta), \quad (2)$$

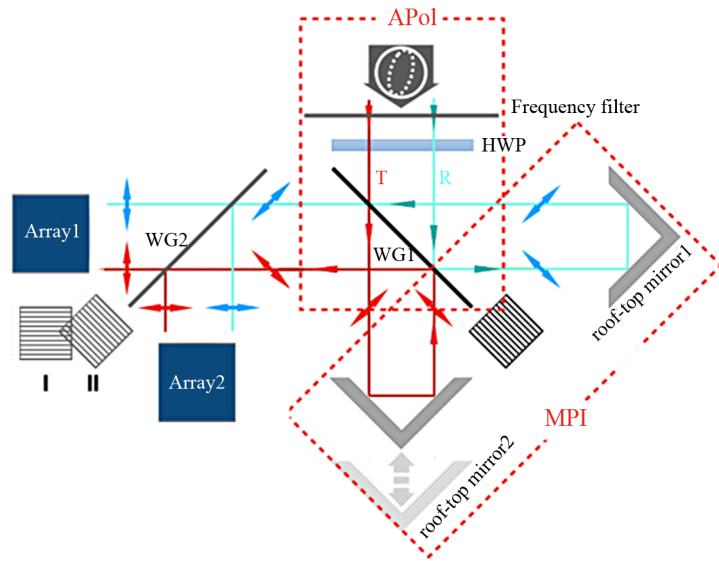


图1 MPI 偏振探测模块的设计示意图

其中, $\mathbf{R}(\theta)$ 为旋转矩阵, 可表示为:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \quad (3)$$

因此, 偏振与半波片任意夹角 θ 下的穆勒矩阵为:

$$\mathbf{M}_{\text{HWP}}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\theta & \sin 4\theta & 0 \\ 0 & \sin 4\theta & -\cos 4\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \quad (4)$$

同上, 偏振与线栅偏振器夹角为 α 下的穆勒矩阵可表示为:

$$\mathbf{M}_{\text{WG}}(\alpha) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} . \quad (5)$$

MPI 主要包括一个 45° 放置的线栅偏振器和两个屋面镜, 其穆勒矩阵可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{MPI}} = & \mathbf{M}_{\text{WG}}(\alpha = -\pi/4) \cdot \Delta(\delta) \mathbf{I}_0 \cdot (\mathbf{I}_0 - \mathbf{M}_{\text{WG}}(\alpha = \pi/4)) + \\ & (\mathbf{I}_0 - \mathbf{M}_{\text{WG}}(\alpha = -\pi/4)) \cdot \mathbf{I}_0 \cdot \mathbf{M}_{\text{WG}}(\alpha = \pi/4) , \end{aligned} \quad (6)$$

其中, I_0 为单位矩阵, $\Delta(\delta)$ 为 MPI 两个光路间的时延矩阵, 可以表示为:

$$\Delta(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix} . \quad (7)$$

MPI 结构的穆勒矩阵为:

$$M_{\text{MPI}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & 0 & \sin \delta \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \sin \delta & 0 & -\cos \delta \end{pmatrix} . \quad (8)$$

因此, 假定半波片以角频率 ω 转动时, 第二个线栅偏振器后的两个通道的 Stokes 参数为:

$$S_{C1/C2} = M_{\text{WG}}(\alpha = 0) M_{\text{MPI}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 4\omega t & \sin 4\omega t & 0 \\ 0 & \sin 4\omega t & -\cos 4\omega t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} , \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_{C1} &= \frac{1}{2} [I + (Q \cos 4\omega t + U \sin 4\omega t) \cos \delta - V \sin \delta] \\ S_{C2} &= \frac{1}{2} [I - (Q \cos 4\omega t + U \sin 4\omega t) \cos \delta + V \sin \delta] \end{aligned} , \quad (10)$$

其中, ω 为半波片的角频率, δ 为 MPI 两个波束的光程差引起的相位差。

2.2 MPI 偏振仪天空噪声消除原理

考虑到我们的信号是线偏振信号和非偏振的天空噪声, 我们两个探测器的读出为:

$$\begin{aligned} Det_1 &= \frac{1}{2} [I + (Q \cos 4\omega t + U \sin 4\omega t) \cos \delta] \\ Det_2 &= \frac{1}{2} [I - (Q \cos 4\omega t + U \sin 4\omega t) \cos \delta] \end{aligned} . \quad (11)$$

我们计划在其中一个屋面镜上引入一个线性振动装置, 快速调制 MPI 光程差 δ , 因此,

$$Det_{1\text{or}2}(\delta = 0) - Det_{1\text{or}2}(\delta = \pi) = (Q \cos 4\omega t + U \sin 4\omega t) . \quad (12)$$

以 345 GHz 信号为例, 所需的相位调制对应的机械位移幅度仅为 0.43 mm ($\lambda/2$)。考虑到现代声学器件可实现的千赫兹量级的调制频率, 该方案为实现实时天空噪声消除提供了可行途径。相较于传统的半波片调制方案, 其调制频率通常限制在数赫兹量级; 而与双探测器测量相比, 该方案通过在同一探测器上完成正交偏振测量, 有效规避了探测器间增益不匹配导致的系统误差。该系统采用的双探测器配置主要用于提升信噪比并实现互补测量, 从而优化系统性能。

2.3 初步测试结果

为验证系统的可行性, 我们在实验室构建了一个缩小版的 MPI 模块原型。实验装置由线栅偏振器、两个屋面镜和室温探测器阵列构成, 如图 2a) 所示。为进行概念验证实验, 系统采用 Terasensor 公司生产的 1024 像素室温探测器阵列作为接收端。线栅偏振器工作频率为 345 GHz, 其相对于入射光束和探测器的夹角设置为 45°。系统采用 Virginia Diodes 公司的太赫兹信号源作为辐射源, 该源在工作频率为 345 GHz 时的输出功率可达 5 dBm。入射光自右侧进入 MPI 模块, 经线栅偏振器分束后形成两条干涉光路。通过精确控制其中一个屋面镜的位置可实现光程差的可控调节。如图 2b) 所示, 实验中通过连续调节一号屋面镜的位置并记录探测器阵列的输出响应, 采用高斯拟合方法提取波束中心信号强度。图中蓝色散点代表多次重复测量的结果, 误差棒表示测量的不确定度。正弦函数的拟合结果(图中红色实线)显示, 波束中心信号强度随光程差的变化展现出明显的周期性相长相消特征, 同时从图中的数据分析可以看到两个峰值的长度间距为 $435.5 \pm 2.5 \mu\text{m}$, 它对应了 345 GHz 信号源的半个波长, 这充分证实了该 MPI 模块实现噪声相消的可行性。下一步的研究重点将围绕系统优化展开, 旨在提升测量精度, 实现更加准确的实验结果。

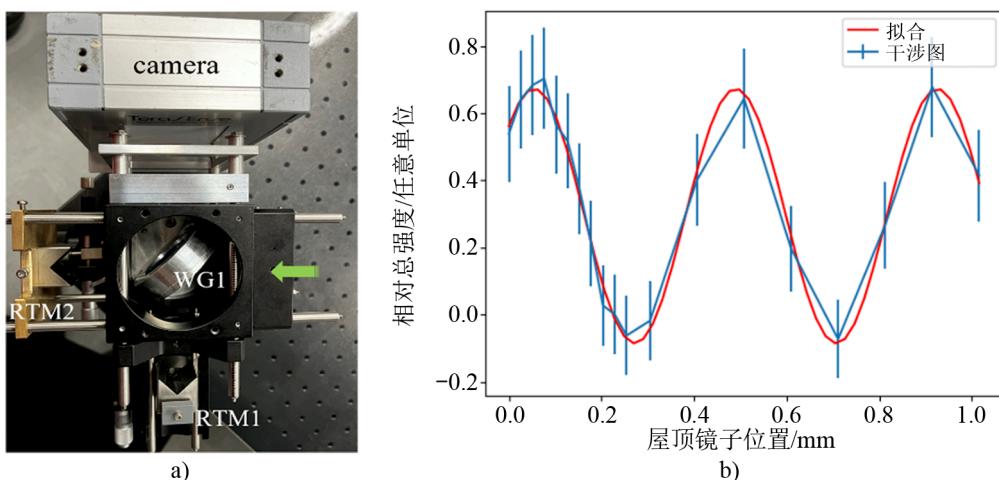


图 2 实验室中 MPI 模块原型机与初步测试结果

3 Roger 光学设计

格陵兰射电望远镜是一架位于北极圈内的 12 m 的 Nasmyth 式望远镜, 作为事件视界望远镜阵列的重要组成部分, 主要参与甚长基线干涉计划, 用于观测超大质量黑洞^[10]。Roger 是首个专为格陵兰望远镜定制的偏振相机。Roger 偏振仪的光学系统设计如图 3 所示, 采用了反射镜 M4 光路延展, 以实现 MPI 结构和 MKID 探测器的集成。该相机焦比为 $F/3.1$, 视场角为 0.033° 。通过光学性能优化后的点列图分析显示, 成像面上不同位置的光斑分布均被限制在艾里斑 (Airy disk) 范围内, 其半径为 2.3 mm, 结果如图 4 所示。

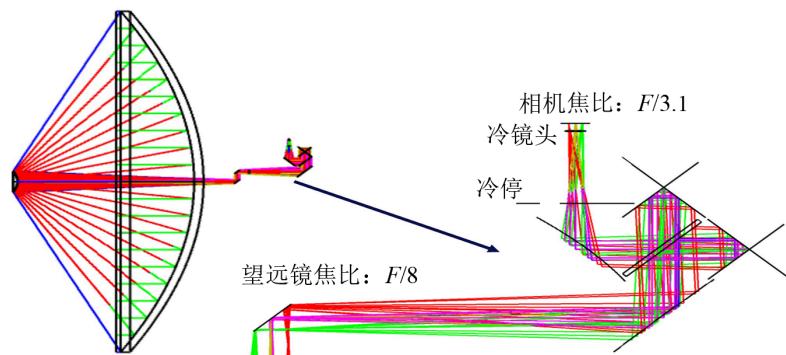


图3 Roger 偏振仪光学设计

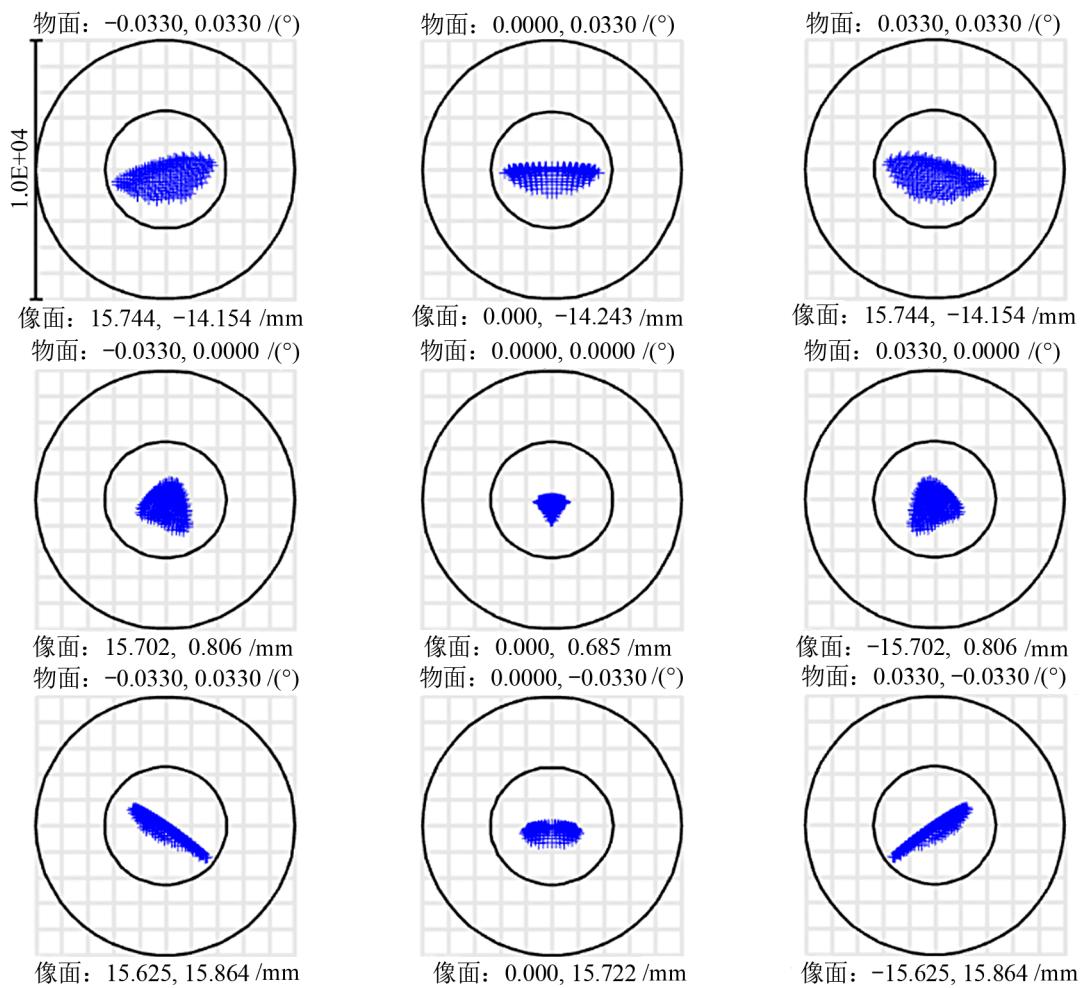


图4 优化后的 Roger 光学点列图

为了有效抑制制冷机内部的杂散辐射, 我们设计了一个位于探测器焦平面 385 mm 处的冷挡。图 5 展示了 Roger 的冷光学系统和结构布局。鉴于冷挡的具体位置, 我们定制了一个扩展的制冷机窗口结构。滤波器组计划采用 HDPE 材料作为真空窗, 在 50 K 冷级安装 600 GHz 的低通滤波器, 以及在 4 K 冷级安装 400 GHz 低通滤波器和 345 GHz 的带通滤波器。在 mK 冷级中, 我们将安装一个倾斜 39° 的 HDPE 透镜, 用于汇聚信号并保持光束对称, 另外配备了一个线栅偏振器用于分离正交偏振, 进而导向不同的探测器阵列。考虑到 GLT 的空间限制, 我们选用了 Formfactor 公司生产的紧凑型低温恒温器 (Denali 102)。该系统可将探测器工作温度制冷至 0.03 K, 满足 MKID 阵列的低温工作要求。

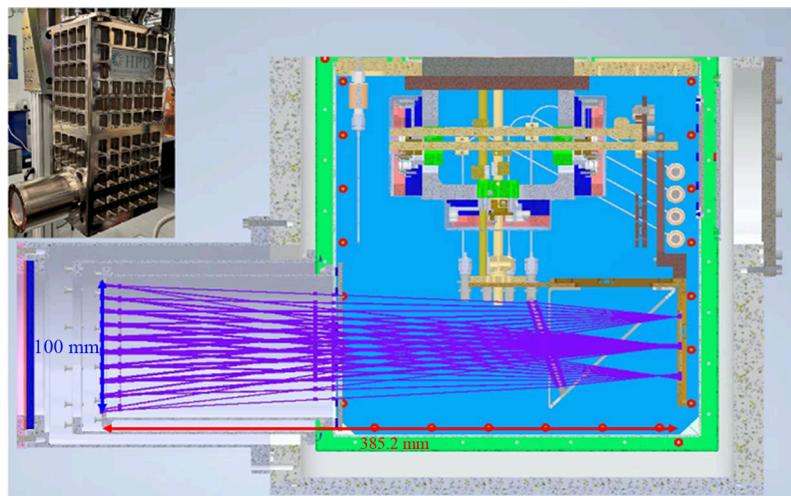


图 5 Roger 冷光学设计

基于 76.2 mm 硅衬底的探测器设计约束, 我们通过光学仿真优化了探测器阵列的几何参数。表 1 列举了不同像元间距配置下焦平面阵列规模与中心像元耦合效率的相关性。综合考虑阵列规模和耦合效率的权衡, 最终确定采用 4 mm 像元间距的优化设计方案。

表 1 焦平面像元数和中心像元效率的对照表

以衍射极限 $F\lambda$ 为参考	像元大小/mm	像素	边缘锥度/dB	中心像元口面效率/(\%)
$0.5F\lambda$	1.3	32×32	-0.77	16
$1.0F\lambda$	2.6	16×16	-3.1	50
$1.5F\lambda$	4.0	11×11	-7.5	77
$2.0F\lambda$	5.3	8×8	-13.4	80

4 MKID 阵列设计与制备

基于优化后的 4 mm 像元间距参数, 我们在 76.2 mm 硅衬底上实现了 157 像素的 MKID 探测器阵列设计。如图 6 所示, 采用电容耦合机制, 通过单条 CPW 完成了全阵列的频分复

用读出。图6右上区域展示了单像元的微观结构细节，其核心组件包括读出CPW传输线、四分之一波长平面谐振器以及平面双槽天线。该双槽天线工作于345 GHz中心频率，具有50 GHz带宽，其偏振响应方向垂直于槽线方向。天线的具体几何参数如图6右下区域所示。两个MKID探测器阵列采用完全相同的几何布局和参数设计，唯一的差异在于双槽天线的取向存在90°的相对旋转，这种正交配置实现了对入射辐射正交偏振分量的独立探测。

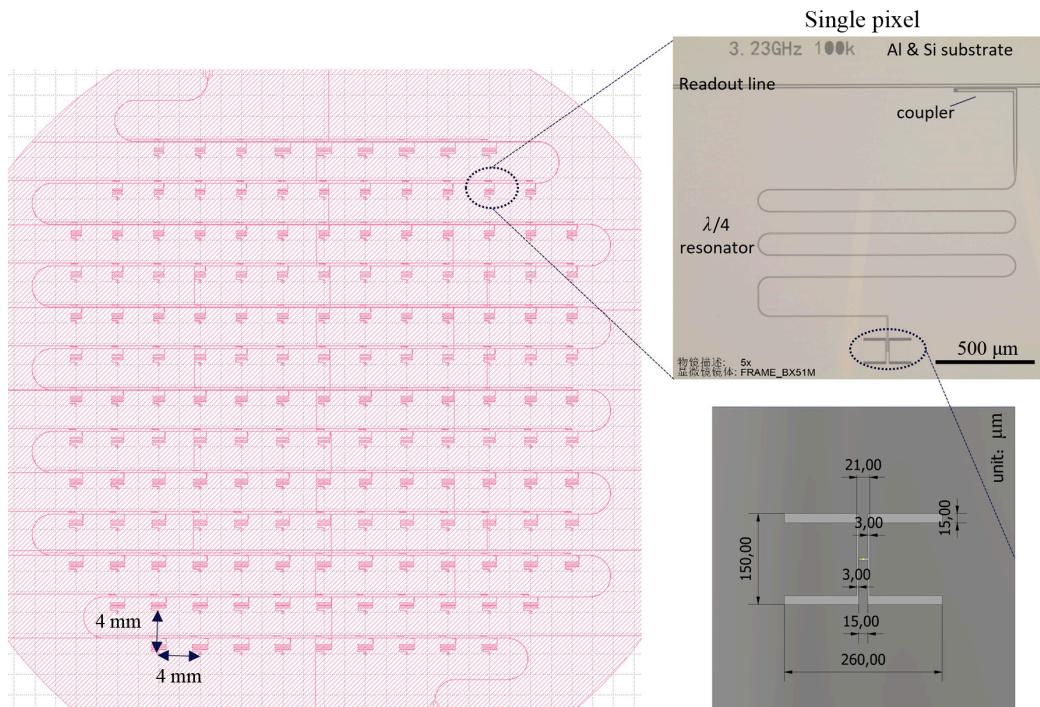


图6 MKIDs探测器阵列设计图

MKID阵列的超导薄膜采用电子束蒸镀沉积的铝膜，图形化工艺采用标准剥离工艺实现。具体工艺流程如下：以300 μm厚的高阻硅晶圆(76.2 mm)为衬底，首先进行光刻胶旋涂及预烘处理，随后通过掩模版进行曝光及显影，在光刻胶上形成所需图形。采用电子束蒸镀技术沉积80 nm厚的铝薄膜，最后通过剥离工艺完成器件图形的定义。器件的制备工作在中国科学院紫金山天文台毫米波与亚毫米波实验室超净室完成。

探测器芯片通过阻抗匹配的平面传输线过渡结构连接至同轴连接器，实现单根同轴电缆对所有像元的频分复用读出。为确保在低温真空环境下整个芯片的温度均匀性，采用铍铜弹片实现芯片与测试金属腔体间的可靠热接触。同时，通过超声波键合工艺在芯片周边布设铝线键合，不仅提供良好的射频接地路径，还进一步优化了芯片的热耦合特性。

5 总结与展望

本文详细阐述了新一代偏振仪 Roger 的研制工作。该仪器的核心创新在于引入 MPI 结构, 实现了基于单探测器的实时天空噪声抑制。本文系统地介绍了其理论基础并通过实验室测试进行了初步验证, 同时对光学系统优化设计和 MKID 阵列的研制与集成进行了深入讨论。后续工作将围绕系统集成与性能表征展开, 包括实验室环境下的系统测试、读出电路的搭建与调试, 以及最终在望远镜端的安装与在线测试等环节。

参考文献:

- [1] Li H B, Yuen K H, Otto F, et al. *Nature*, 2015, 520(7548): 518
- [2] Lazarian A, Hoang T. *MNRAS*, 2007, 378(3): 910
- [3] Ade P A, Aikin R W, Barkats D, et al. *Physical Review Letters*, 2014, 112(24): 241101
- [4] Li H B. *Galaxies*, 2021, 9(2): 41
- [5] Andersson B, Lazarian A, Viallancourt J E. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2015, 53(1): 501
- [6] Archibald E, Jenness T, Holland W, et al. *MNRAS*, 2002, 336(1): 1
- [7] Li H, Dowell C, Kirby L, et al. *Applied Optics*, 2008, 47(3): 422
- [8] Friberg P, Bastien P, Berry D, et al. *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VIII*. 2016, 9914: 991403
- [9] Zhang Y, Li H B, Lühr D, et al. *Applied Optics*, 2020, 59(8): 2593
- [10] Inoue M, Algaba-marcos J, Asada K, et al. *Radio Science*, 2014, 49(7): 564

New Generation Submillimeter Wave Polarimeter—Roger

LYU Weitao, HUANG Junkun, SUN Jialin, LI Huabai

(*Department of Physics, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China*)

Abstract: Traditional polarization measurement techniques rely on half-wave plates and wire-grid polarizers but face limitations in suppressing sky noise. The Roger polarimeter innovatively introduces a modulated polarizing interferometer (MPI) design based on a dual-roof-mirror structure and its application in mitigating sky noise. The MPI structure combines dual roof mirrors and wire-grid polarizers to enable real-time measurement of orthogonal polarization signals with a single detector, significantly enhancing noise suppression capabilities. Mueller matrix analysis demonstrates that the MPI can accurately characterize both polarization signals and noise properties. In preliminary experimental tests, a prototype achieved interference modulation at the 345 GHz band, and the introduction of a linear vibration mechanism was discussed, which could achieve modulation frequencies on the order of kilohertz, outperforming traditional rotating half-wave plate solutions. Additionally, as the core module of the Roger polarimetric camera, the MPI, when combined with an MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) ar-

ray, exhibits outstanding optical performance and detection efficiency in the Greenland Telescope. The research results indicate that the MPI structure and MKID detector architecture provide an efficient technical solution for high-sensitivity polarization measurements, offering significant application value in the field of submillimeter-wave astronomy.

Key words: polarimeter; submillimeter wave; magnetic field; MPI; sky noise; MKIDs

简讯

《天文学进展》编辑部基于学术影响力、传播力及社会关注度等多个维度,对2024年度发表的每篇论文进行了综合评价,具体指标包括引用量、二次文献转载情况及网络下载量。经评选,共有6篇论文获评优秀论文,恭喜以下获奖作者!

篇名	作者
基于 Spark 分布式框架的海量星表数据时序重构方法研究	赵青; 权文利; 陈亚瑞
JWST 时代系外行星大气研究的机遇与挑战	陈紫欣; 季江徽
合成孔径雷达在深空探测任务中的应用与发展趋势	薛喜平; 苏彦; 李海英
青藏高原光学台址勘选——冷湖:一个可以承载我国光学天文未来发展的台址	杨晨; 邓李才; 杨帆
银河系双星团及星团群研究进展	单星美; 刘桂梅; 钟靖; 林清
基于 BP 神经网络的 FAST 馈源舱融合测量预测研究	卢朝茂; 李明辉; 宋本宁

《天文学进展》编辑部

2025年12月