

HXMT 中能 X 射线望远镜

曹学蕾 姜维春 张万昌 孟斌 雒涛 杨生 张春雷 顾煜栋 孙亮

刘晓静 李鲜 杨家卫 谭颖 刘少真 杜园园

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1. 引言

我们通常把波长很短, 介于 $0.01 \sim 100$ 埃 (能量 $0.1\text{keV} \sim 1\text{MeV}$) 之间的电磁辐射, 称为 X 射线。在整个 X 射线波段里, 根据探测方法的不同, 我们又模糊的分成了低能 X 射线 (能量 $0.1 \sim 10\text{keV}$), 中能 X 射线 (能量 $5 \sim 70\text{keV}$), 高能 X 射线 (能量 $20\text{keV} \sim 1\text{MeV}$)。三个能段没有明显的界限, 彼此相互搭接在一起。

探测 X 射线波段的探测器, 即为 X 射线探测器。根据三个能段的特点, 其相应的 X 射线探测器多采用不同的技术实现。其中, 中能 X 射线探测器, 主要有基体厚度在 $500\mu\text{m}$ 以上的全耗尽 Si-PIN 探测器, 硅微条探测器 SSD, 硅漂移室探测器 SDD, 以及厚度在 $0.5 \sim 2\text{mm}$ 之间的碲锌镉 CZT 探测器等。早期的空间 X 射线探测, 气体探测器也被用于中能段的 X 射线探测, 比如 RXTE 卫星采用了 8000cm^2 的气体探测器 (能区 $2 \sim 60\text{keV}$)。

在硬 X 射线望远镜 HXMT 中能 X 射线望远镜 (简称 ME) 仪器上, 我们便采用了厚度为 1mm 的全耗尽 Si-PIN 探测器。ME 是 HXMT 的三个主要仪器之一, 它的主要功能即为中能段 $5\sim 30\text{keV}$ 能区的巡天观测, 以及针对部分感兴趣且可能会有物理学产出的特定源的定点观测。

2. ME 的主要科学目标

中能 X 射线望远镜 ME 的主要科学目标为: 1) 对巡天观测中 HXMT 探测到天体源 (黑洞、中子星等) 的中能 X 射线波段的性质 (天体源的位置定位, 能段范围, 能段范围内的亮度) 给出限定; 2) 在对特定

天体源的定点观测中, 给出中能 X 射线波段的能谱 (单位时间内每个能量点的 X 射线计数) 以及时变 (该能段计数率随时间的变化情况) 信息。

由于天体源 X 射线产生机制的不同, 在不同能段的计数率是不同的。基于 HXMT 三个科学仪器, 低能 X 射线望远镜 LE ($1 \sim 15\text{keV}$, 384cm^2)、中能 X 射线望远镜 ME ($5 \sim 30\text{keV}$, 952cm^2)、高能 X 射线望远镜 HE ($20 \sim 250\text{keV}$, 5000cm^2), 对不同天体源的观测, 在相同的时间段内, 低能段很容易发现到的源在中、高能段也许会由于计数率低, 而无法准确地看到。同样的对某些天体源在某个时间段内 ME 可以看到的, LE 和 HE 也可能无法达到足够的光子数而不能给出准确的信息。而通过三种仪器联合观测, 不管是哪个仪器发现的天体源, 另外两个仪器都可以对新发现的天体源同时进行长时间的观测, 对天体源的全能段性质进行研究。

3. 设计与研制

根据空间环境的可靠性要求和可维修性的约束, 以及安装约束条件等, ME 分成了三个全同的探测器机箱。每个探测器机箱按照功能又可以分为, 准直器, 探测器, 电子学三个组成部分。

探测器机箱主要的功能是实现 X 射线的探测, 并将探测到的 X 射线信息传输到中能电控箱。这其中的信息就包括了入射 X 射线的方向, 光子的能量, 流强, 以及光子到达时间等。经过电子学系统的处理, 将这些入射光子的信息按照一定的格式组合, 形成科学事例数据。这些信息也就是我们所说的科学数据。探测器机箱所产生的科学数据, 会按照一种约定的接口协议 (ME 采用的是 LVDS 接口协议) 传送到中能电控箱。

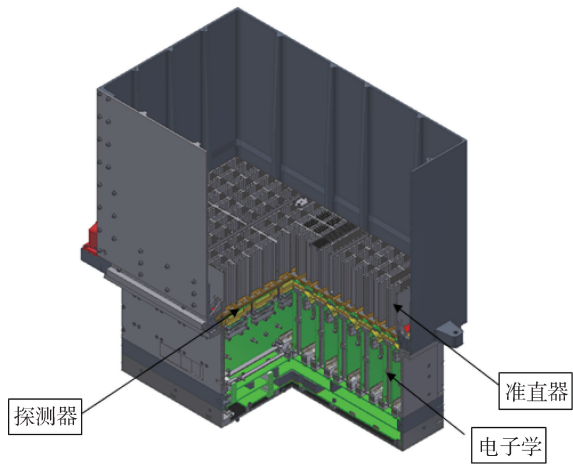


图1 中能探测器机箱结构图

除科学数据外，探测器机箱还产生一部分工程数据，这包括了探测器的工作温度，电子学系统的监测电压、电流等信息。工程数据也会通过 LVDS 接口传输到中能电控箱。

中能电控箱主要功能就是接收探测器机箱的科学数据与工程数，并将数据按照一定的格式组合成数据包。然后，根据中能望远镜与卫星之间约定的通讯接口协议（科学数据通过 LVDS 接口协议，工程数据通过 1553B 接口协议），将数据传输到卫星系统，最终通过卫星系统传输回地面接收站。同时，中能电控箱还要接收来自卫星系统的遥控指令，并根据遥控指令

的功能与性质，或者在电控箱执行（比如切换主份与备份电源），或者通过 LVDS 接口发送给探测器机箱完成相应的功能（比如调整探测阈值，打开 / 关闭通道等）。

3.1 视场与准直器

HXMT 卫星采用准直扫描的方式，来实现天体源的定位与成像。这其中起关键作用的功能模块即是准直器，它的功能是限制探测器的视场。对于视场内的辐射（X 射线，带电粒子）会通过准直器后直接作用于探测器上。非视场内的辐射，会被准直器屏蔽吸收，同时会有部分次级粒子产生（X 射线，电子等）。这部分打在准直器侧壁上产生的次级粒子也是 ME 的本底来源的一部分。

中能望远镜采用了组合视场的设计，通过准直器孔径的构造不同，实现三种视场组合的设计方案，三种视场分别为： $1^{\circ} \times 4^{\circ}$ ， $4^{\circ} \times 4^{\circ}$ ，以及全遮挡视场。采用组合视场的设计方案，主要目的是用于在轨观测时的本底估计。在 $5 \sim 30 \text{ keV}$ 的中能段，要观测的天体源其 X 射线的流强非常弱。即使按照高能天文领域所熟知 X 射线天体源 Crab（中子星），中能望远镜接收到的光子数也只有 ~ 1000 个 / 秒，平均到每个通道只有 0.5 个 / 秒。而中能望远镜所观测的多

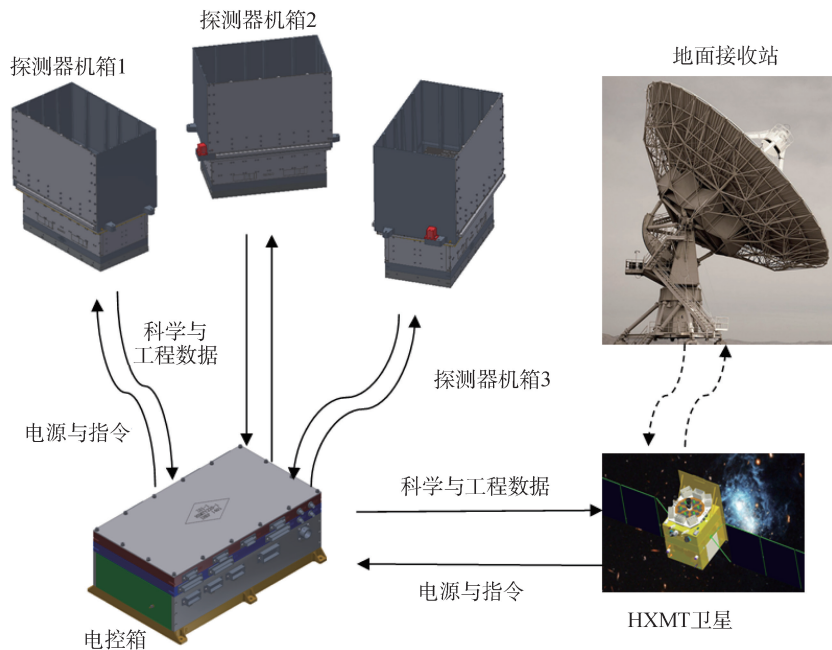


图2 中能 X 射线望远镜功能连接示意图

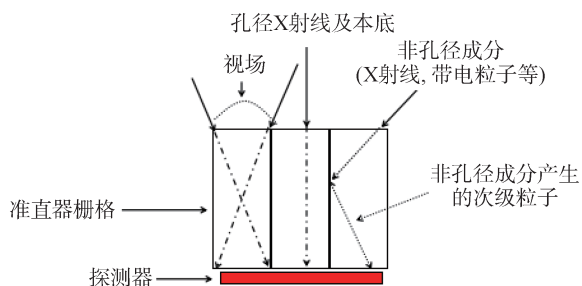


图3 准直器视场示意图

数目标其 X 射线的流强要比 Crab 源弱 1 ~ 2 个数量级。根据已经在轨运行的 X 射线天文卫星的观测数据，HXMT 卫星所处的轨道，既有宇宙弥漫光子本底（各向同性），又有粒子本底。中能望远镜的粒子本底是高能带电粒子（电子、质子等）穿过探测器时，与探测器物质发生相互作用，损失其部分或全部能量，且其损失的能量恰好在中能区 5 ~ 30 keV，便会形成粒子本底。又或者高能带电粒子与中能望远镜本身的物质材料（比如，准直器材料，入射窗材料）发生相互作用，产生次级 X 射线或带电粒子。这些次级粒子的能量恰好在中能区，且被探测器接收，也会形成次级粒子本底。如果本底不能有效的扣除，则仪器的灵敏度会有明显的下降。

三种不同视场组合的设计方案，可以有效的估计在轨观测的本底。其中全遮挡视场准直器采用钽片遮挡视场，会屏蔽掉天体源与宇宙弥漫光子，因此可以

估计出仪器的粒子本底。利用大小视场的组合，根据不同视场对应的探测模块采集到的流强的不同可以估计出视场内天体源的强度信息。根据估计出的粒子本底、和天体源强度信息，便可以计算出宇宙弥漫光子的流强。

根据 ME 视场组合的要求，也考虑准直器加工工艺的约束条件，ME 准直器的研制最终采用铝合金外框内部对插钽片的技术方案。采用该设计，准直孔完全由钽片构成，最大限度上满足了物理学的要求，即尽量获得大的占空比。在该产品的研制过程中，解决了包括高精度钽片插槽加工，超薄钽片（75 μm ）对插，激光点焊等相关技术难题。

3.2 Si-PIN 探测器与探测原理

中能望远镜的探测器采用的是面阵型 Si-PIN 探测器。该探测器的器件结构可以等效为一个 PN 结，其典型的 Si-PIN 探测器结构如图 5 所示，其基本的工艺为使用高纯硅片作为基体，通过离子注入的方式，在探测器内部分别形成 P 型和 N 型掺杂区，在其高阻本征区形成一个 PN 结，即探测器的基本功能结构单元。其中离子注入工艺是将离子源（轰击靶材，电离原子）产生的目标掺入杂质（B、P 等），通过静电场的加速获得足够的能量（几万到几十万 eV）注入到半导体材料表面一定深度。同时为了减少表面漏电对探测器的

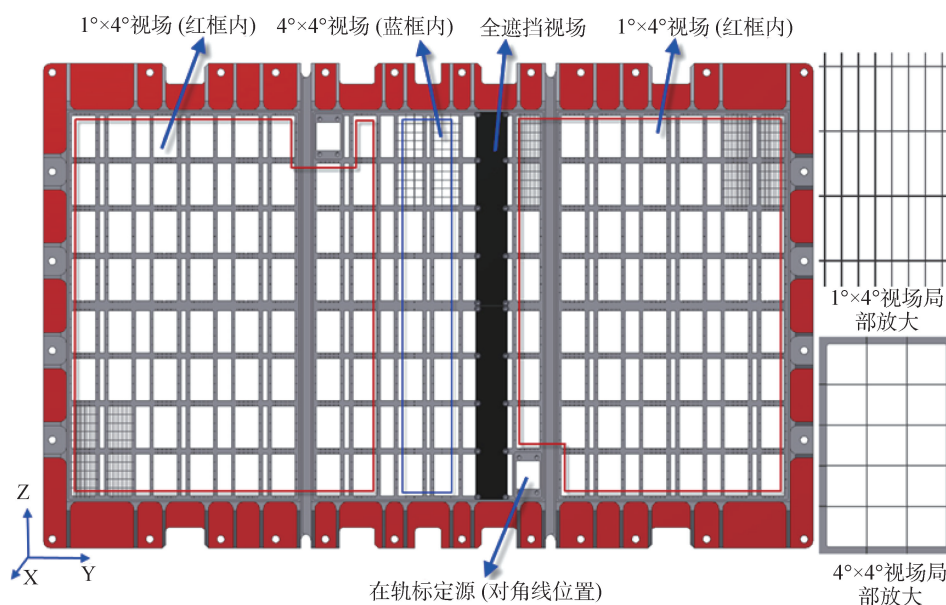


图4 ME 准直器视场组合设计图

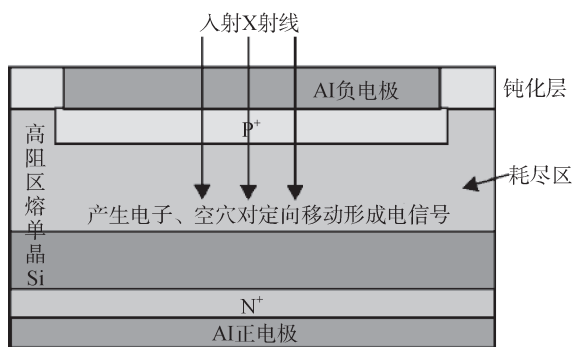


图5 Si-PIN 探测器结构示意图

性能影响，在探测器的边缘部分设计有保护环的结构。

在 ME Si-PIN 探测器的设计中将两像元的 Si-PIN 探测器设计在一片硅片上，同时将两片两像元的 Si-PIN 探测器封装在一个陶瓷外壳中，构成 ME 最终使用的 Si-PIN 探测器产品。单个探测器像元的灵敏区尺寸为 $12.5\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ ，即面积为 56.25mm^2 ，探测器的厚度为 1mm 。

对于进入 ME 视场内的 X 射线，在穿透入射窗之后，会进入探测器内。探测器的入射窗采用的是 50 微米厚的薄铍片，它的主要作用是遮挡可见光，并且隔离灰尘避免探测器表面受到污染。

1) 探测原理

X 射线光子进入到 Si-PIN 探测器灵敏区，与灵敏区硅介质发生相互作用，对于 $5 \sim 30 \text{ keV}$ 能区的 X 射线光子来说，与硅材料的相互作用，主要为光电效应与康普顿效应。入射 X 射线光子将自身能量的全部（光电效应）或者部分（康普顿效应）转移给硅物质材料中的内层电子，内层电子在吸收光子能量后，摆脱硅原子核的束缚，成为自由电子，在这个过程中产

生的电子也称为光电子。光电子带有入射光子的部分能量，在探测器内运动。而带电粒子在物质中运动时会发生电离效应。即：带电粒子在物质中运动时，经过原子附近时，原子的外层电子受到光电子的库伦力作用，从而发生电离而脱离原子核的束缚，成为自由电子。失去外层电子的原子核则带一个正电荷，被称为空穴。Si-PIN 探测器的两极之间会外接偏置电压，在其内部形成电场，而光电子在探测器中电离所产生的电子与空穴会在电场的作用下向两极移动，最终到达两极而被收集。X 射线光子入射到探测器后，经过 X 射线光子与探测器介质的相互作用，最终产生的电子-空穴对数目的平均值 N 正比于入射 X 射线光子能量 E 。通过电子学系统，将探测器两极收集到的电荷数便可以得到入射 X 射线光子的能量信息。

在这个物理过程中，由于探测器中的硅原子内层电子被激发后脱离原子核的束缚，原子核失去内层电子后，便会处于一种不稳定状态。外层电子会跃迁到内层上，在这个跃迁过程中所释放的能量会转移给外层电子使其电离成为俄歇电子，或者会产生一个 X 射

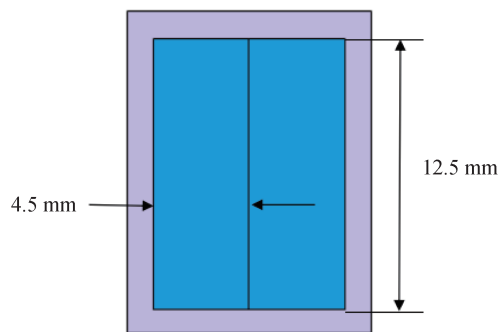


图6 两像元 Si-PIN 探测器平面图

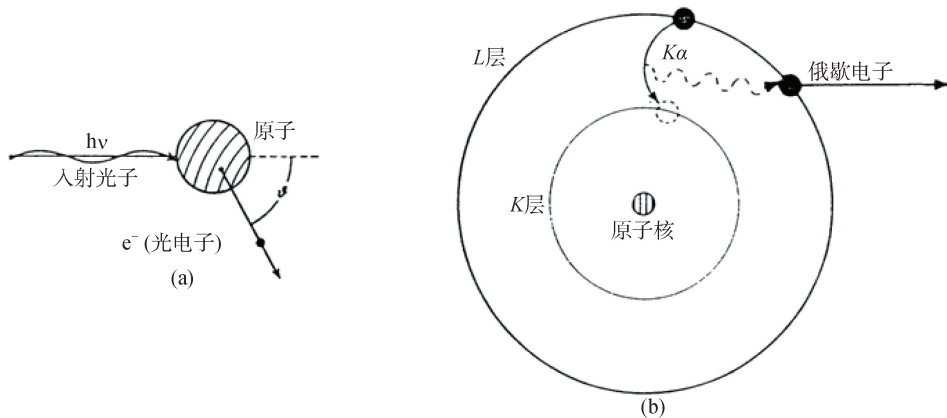


图7 光电效应及俄歇电子发射示意图

线荧光光子。而 X 射线荧光光子如果从探测器基体逃逸出去，那么这个物理过程就会损失掉一部分能量。荧光光子产生的概率非常低，当有大量 X 射线光子入射到探测器时，相应地从探测器读出电子学系统中会得到一部分能量低于正常值（低 1.74keV，即硅的 K 系荧光能量）的 X 射线光子事例，从而在观测结果的能谱中会出现一个结构，被称为逃逸峰。

2) Si-PIN 探测器的优缺点

ME 所使用的 Si-PIN 探测器，厚度在 1mm，外加偏置高压在 170V，在 X 射线光子与探测器材料发生相互作用后所产生的空间电荷（电子与空穴）收集时间小于 1 μ s，所以该探测器具有非常快的响应时间。相比于 CZT 探测器和闪烁体探测器，Si-PIN 探测器具有硅探测器所共有的更好的本征能量分辨率。而相对于 X-CCD，由于其采用点对点的读出方式，即：每个探测器像元都对应着独立的读出电子学通道，因此系统的死时间（电子学系统处理一个光子信号的时间）会小一个数量级以上。同时，相比于硅锂探测器和高纯锗探测器液氮工作温度（77K）来说，Si-PIN 探测器只需要工作在 253K 左右的温度即可，在空间使用热设计上会更容易实现。

ME 所使用的 Si-PIN 探测器为完全国内自主研发的探测器。从 Si-PIN 半导体工艺，到封装，筛选试验，鉴定试验，全部在国内完成。而由于 ME 所使用的 Si-PIN 探测器的工艺特点，其表面易受水汽（主要影响物为水汽中的杂质）、以及其他污染气体的影响，极易发生表面污染。而污染一旦发生，由于探测器外加 170V 偏压，会在探测器表面产生正常值（< 30nA@25 $^{\circ}$ C）十倍以上表面漏电流增加，从而会大大影响探测器的性能指标。因此，对全过程的防污染控制有非常高的要求。

3.3 读出电子学

读出电子学的主要功能是处理探测器收集到的入射 X 射线光子产生的电荷信息，这其中包括了光子到达时间信息，光子的能量、强度信息等。X 射线在与 Si-PIN 探测器介质发生相互作用时，每产生一个电子空穴需要的平均能量值为 3.6 eV。因此，对于 5 ~ 30 keV 能区的 X 射线，在 Si-PIN 探测器中发生相互作用

之后，所产生的平均电荷数在 1388 ~ 8333 之间，对应的电荷量为 $2.2 \times 10^{-16} \sim 1.3 \times 10^{-15}$ 库仑之间。而 Si-PIN 探测器自身没有电荷放大作用，因此对于读出电子学系统来说，Si-PIN 探测器输出的信号非常小，因此电子学系统的噪声控制就是其关键的因素。

对于 ME 的 Si-PIN 探测器来说，入射 X 射线光子的能量正比于其在探测器介质材料中发生相互作用所产生的平均电荷数（电子空穴对）N。因此只要准确的读出探测器收集到的电荷量，就可以给出入射 X 射线光子的能量信息。这其中又要充分考虑噪声影响因素，而第一级放大的作用尤其重要。因此 ME 电子学第一级放大设计使用了低噪声且具有很好线形输出的电荷灵敏前置放大器 (CSA)。电荷被收集到 Si-PIN 探测器的两极后，即会被电荷灵敏前置放大器收集放大。电荷灵敏前置放大器的主要功能是探测器信号的收集与放大。通过高倍数的放大电路（放大倍数 $A > 10^4$ ）加反馈电容 C_f （电容值 50×10^{-15} F）的电路设计，实现由探测器收集到的电荷信号转换为电荷灵敏前置放大器输出的电压信号。

而前置放大器输出的信号幅度还是非常小，大约只有 1 mV 左右，并且其脉冲信号的上升沿小于 1 μ s。因此前置放大器的信号如果不做处理，其代表入射 X 射线能量信息的峰值幅度就很难被后级采样电路准确的采到。所以在前置放大器的后端，设计了成形放大器 (Shaping Amplifier)，在将前放信号幅度放大的同时，通过微分 - 积分 (CR-RC) 电路对前放信号进行高斯成形，将上升沿变缓至 >1 μ s。成形放大电路为线形放大，其输出幅度正比于输入信号的幅度，因此经过成形放大后，其输出信号仍然正比于入射到探测器内部的 X 射线能量。成形后的信号，会通过采样电路，读取其峰值幅度信息。再经模数转换电路 (ADC) 将信号幅度信息转化为数字信号，即完成一次 X 射线事例幅度信息的获取。

时间信息的记录则是通过快成形电路模块，触发模块完成的。电荷灵敏前置放大器的输出信号通过快成形电路放大，然后经触发模块后，形成触发信号。数据处理控制模块收到触发信号后，会记录系统时间，即事例的到达时间。

中能 X 射线望远镜，其探测器的面积为 952cm²，

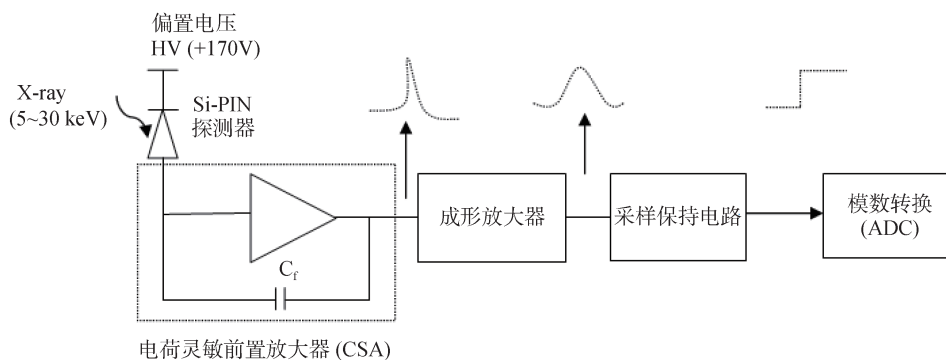


图8 ME探测器读出电子学功能示意图

1728个Si-PIN探测器像元，因此需要1728通道的电子学读出通道。而空间探测卫星项目，对资源尤其是重量、功耗等资源都有严格的限制。因此中能望远镜上述电子学功能模块包括电荷灵敏前置放大器、成形放大器、快成形以及采样保持电路均在专用集成电路系统ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 内部实现。一片ASIC可以实现32通道的Si-PIN探测器的信号读出。

4. 中能望远镜的主要特点

4.1 国产化的Si-PIN探测器

中能X射线望远镜所使用的Si-PIN探测器，由高能所自主设计，基本上在国内工艺线完成全部的半导体探测器工艺，并在国内厂家完成探测器的划片与封装。其探测器耗尽电压下的漏电流在低温 -20°C 时达到 7 pA 左右，达到国际先进水平。漏电流是Si-PIN探测器的主要性能指标，是其高分辨能力的保证。若漏电流偏大，则由于漏电流的涨落所引起的波动会在探测器的输出端产生偏大的噪声干扰信号，从而会降低探测器系统的能量分辨率。

而Si-PIN探测器常温 nA 量级，低温下 pA 量级的工作电流，使其极易受到环境因素的影响。探测器输入端非常微弱的电磁干扰，就可能会在探测器前端引起影响探测器性能的噪声信号。因此ME探测器机箱在研制过程对仪器的电磁屏蔽作了多方面的设计与考虑，包括机箱采用单点接地，避免仪器安装后从安装界面带来的地干扰。整体金属化屏蔽设计不留缝隙，避免电磁干扰等。

同时，ME探测器为非密封封装，外界空气可以直接接触到探测器表面，因此很容易发生探测器的表面污染，而其表面污染所带来的表面漏电，很多时候会远大于探测器的工作电流达到 μA 量级，从而会引起探测器的性能变的很差而无法继续使用。在ME研制过程中采取了严格的防污染控制措施，包括所有的工艺全部在洁净工作间完成，同时尽量缩短仪器在整体试验过程中时处在非洁净环境中的时间等。

4.2 ASIC技术的应用

中能X射线望远镜，总共包括1728通道的读出电子学。若采用分立器件搭建的方式构造，按照每通

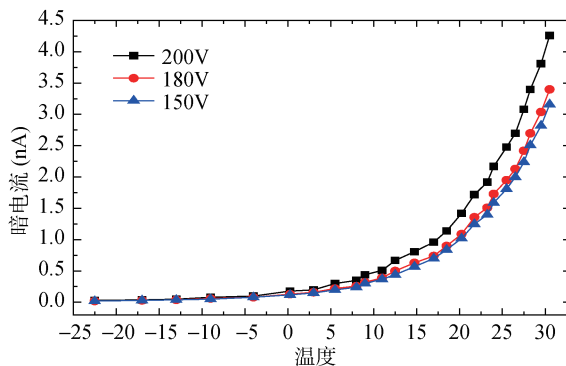
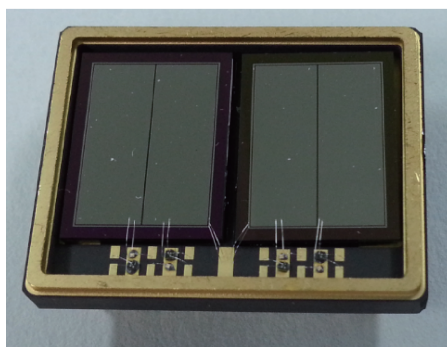


图9 ME Si-PIN探测器实物照片(左)及漏电流随温度变化测试结果(右)

道 1 W 的功耗估计，总共就需要 1728W。按照每通道读出 500 g 估计，其总的重量将超过 800 kg，这对于卫星项目来说，是不可接受的。因此，ME 电子学在设计时采用了高集成、低噪声、低功耗的 ASIC 技术。采用微电子 0.35 μm 工艺的每片 ASIC 芯片（5mm 尺度）便可以实现 32 通道的前放、慢成形、快成形、采样保持等电路功能。而其每通道的功耗只有不到 2mW。

而 ME 所选用的 ASIC 芯片，由于其采用了低噪声设计工艺，故部分引脚并没有进行静电防护设计，因此其静电敏感度非常高，部分敏感引脚其静电敏感度甚至只有几十伏。在冬天我们在脱毛衣时，所产生的静电通常都会达到上千伏。因此不到 100V 的静电敏感度，给该芯片的封装以及后续的印刷电路板(PCB)电装等带来了很大的风险。ME 在研制过程中制定了严格的静电防护措施，并且与相关的封装以及电装厂家联合制定了详细的静电防护操作规范，保证了全过程可控，完成了与 ASIC 相关的所有工作。

4.3 模块化设计

中能 X 射线望远镜，是个非常复杂的系统。一个探测器机箱，就包括了 111 块 PCB 板，数据采集与 ASIC 控制程序超过 12000 行，装机元器件超过 5000 个。从 1 个通道到 1000 个通道，并不是简单的复制，而是包括很多的系统性风险，其复杂程度也是指数提高的。因此为了更好的控制风险，并提高仪器的可维

修性和可维护性，中能 X 射线望远镜采用了模块化设计的原则。

基于 ASIC 将每 32 个通道包括探测器加读出电子学构成一个探测器模块，模块之间的供电都是独立的走线，并进行了有效的隔离。每 6 个这样的模块组成一个探测单元，每个探测单元除探测模块外，还包括共用的数据采集电路，包括控制用的现场可编程门阵列 (FPGA) 等。每 3 个这样的探测单元构成一个探测器机箱。整个中能 X 射线望远镜，被分成了 3 个探测器机箱，9 个探测单元，54 个探测模块。模块与模块之间，探测单元与探测单元之间，彼此独立。其中某部分发生故障不影响其他部分的正常工作。且各模块可单独拆卸，因此保证了整个系统的可靠性与可维修性。

4.4 国际同类仪器对比

国际上采用 Si-PIN 探测器技术的空间探测项目，其中部分是采用小面积单通道的 Si-PIN 探测器。比如美国火星车上搭载的 α /X 射线谱仪 (APXS)，由于采用的是单通道面积小于 10mm² 的 Si-PIN 探测器，因此可以采用自复位式前放的设计，有很高的能量分辨率，其只用于低能区的 X 射线荧光探测。国际上与 ME 有类似科学目标，也采用阵列式 Si-PIN 探测器的项目为日本的 Suzaku 卫星。其携带的中高能段的 X 射线探测器 (HXD)，也采用大面积 Si-PIN 阵列探测技术，其探测能区在 10 ~ 70 keV，发射上天后调

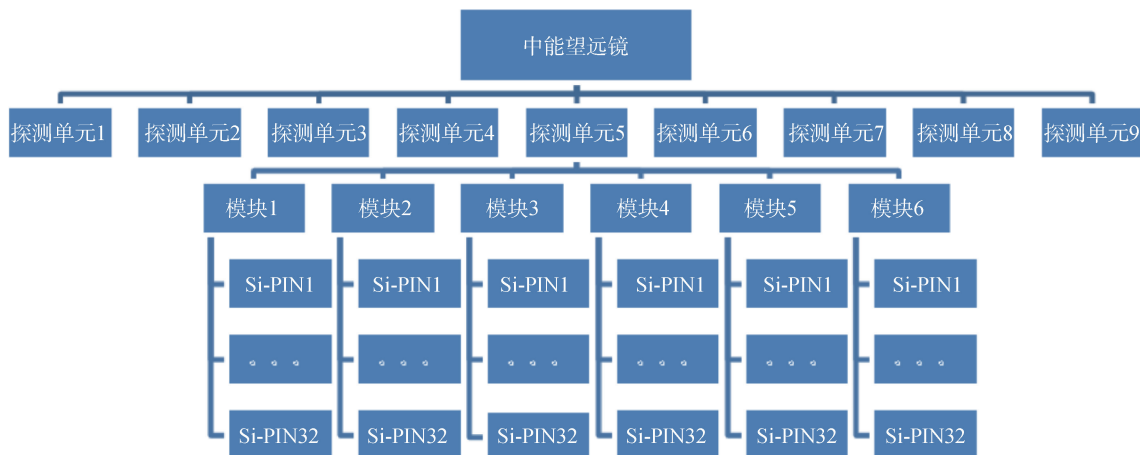


图 10 中能望远镜模块化设计结构图

整为 12 ~ 70 keV，其灵敏面积为 160cm²，能量分辨率约在 FWHM 4 keV @59.5 keV。其发射上天后在活动星系核（AGN）的反射成分，天体源的时变与能谱观测等方面获得了大量的科学产出。中能 X 射线望远镜的主要技术指标要高于 Suzaku HXD，预期 ME 可以得到相应的科学成果。

表 1 HXMT ME 与 Suzaku HXD 主要技术指标对比

	Suzaku HXD	HXMT ME
能量分辨率	FWHM 4 keV@59.5 keV (-20℃)	FWHM 3 keV@59.5 keV (-5℃)
面积	~ 160 cm ² @20 keV	~ 600 cm ² @20 keV
探测能区	12 ~ 70 keV	5 ~ 30 keV



科苑快讯

一次性激光器问世

自其发明至今的 50 多年里，激光器已经衍生出诸多领域的技术：从 CD 播放器到外科手术器械。

目前，法国和匈牙利的研究人员发明了一种既廉价、便捷，又高效的打印激光器的新方法，他们认为该激光器的核心部件是一次性的。该团队将他们的研究成果发表在 AIP 出版的《应用物理杂志》（*Journal of Applied Physics*）上。

“我们研究工作最具价值之处就是激光器的低成本和易于制造，”法国普罗旺斯的圣艾蒂安国立高等矿业学校微电子中心的副教授萨瑙尔（S. Sanaur）认为。萨瑙尔与其同事研制采用碳基材料来产生光放大的有机激光器。我们熟悉的激光笔、DVD 播放器、光电鼠标等采用的都是无机激光器，有机激光器虽然使用还不那么普遍，但它具有光子转换效率高、易于安装、价格低廉以及波长范围宽等优势。制约有机激光器发展的一个障碍是其退化失效相对较快，但如果激光器的成本特别低廉则该问题将不复存在，因为一旦失效就可以立即丢弃。

萨瑙尔研究团队制造极低成本有机激光器采用的是我们非常熟悉的一项技术：喷墨打印。喷墨打印是一项相对便宜的制造工艺，采用向基底喷射细小液束流的工作方式。办公室用的喷墨打印机仅是该技术的一种应用，科学家采用该技术打印电子电路，配

5. 小结与展望

中能 X 射线望远镜，经过多年的努力，已完成产品的研制，并通过了全部环境模拟试验的考核，以及大部分标定试验工作。目前已交付装配卫星，并随整星完成了整星力学、热真空、电磁兼容（EMC）试验。其主要性能指标均达到设计预期。

该仪器采用了完全国内自主研发的 Si-PIN 探测器，并开发使用了低噪声 ASIC 技术。相关技术在后续空间 X 射线观测，以及空间带电粒子探测等方面都具有很好的应用前景。该仪器的研制在满足该项目科学目标研究的需要基础之上，对于带动国内相关技术的发展同样具有重要的实际应用意义。

置药品，甚至组装生物细胞。“采用压电喷墨打印技术，你可以随时随地打印”，萨瑙尔说。该技术不要求佩戴面罩，可以在室温下工作，还可以在柔性材料上打印。

研究人员测试了各种可能的喷墨，最后确定采用一种名为 EMD6415 的商业喷墨，并将之与颜料混合，然后在石英薄片上打印出一个个小的正方形。染料喷墨作为激光器的核心，称为增益介质。增益介质的作用就是光放大和产生典型狭窄、单色的激光束。激光器还需要来回反射光，以保持光放大效应的持续进行。而这是通过增益介质和被称作泵浦的能量源实现的。新激光器的一次性部分是可打印的增益介质，研究人员称之为“激光器胶囊”。他们估计其成本仅有几美分。正如剃须刀片一样，当激光器胶囊退化失效后很容易被替换。

研究团队采用两种不同类型的染料，产生的激光范围从黄到深红。他们预言，其他染料将覆盖光谱从蓝到绿的部分。随着进一步的研究，并不昂贵的喷墨激光器将有希望通过短的塑料纤维传送数据，以及作为分析化学和生物样品的工具。

（美国物理联合会 张铮铮供稿；绛乔编译；论文原文见 <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/119/17/10.1063/1.4946826>）