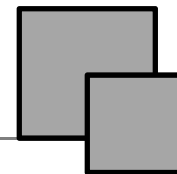




中国科学院高能物理研究所  
INSTITUTE OF HIGH ENERGY PHYSICS



# Si-PIN、CdZnTe和SiC半导体探测器 的研究进展

杜园园，曹学蕾，王科，张春雷，张万昌

中国科学院高能物理研究所天体中心

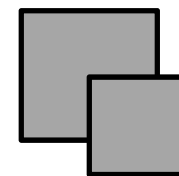
2017年12月6日

第一届同步辐射光源会议，北京



# Outline of the Presentation

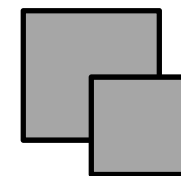
---



- ➡ 半导体探测器的研究背景和意义
- ➡ 半导体探测器的研究进展
- ✚ HXMT卫星中Si-PIN探测器的应用
- ✚ CdZnTe探测器在航天中的应用
- ✚ SiC探测器的研究进展
- ➡ 总结

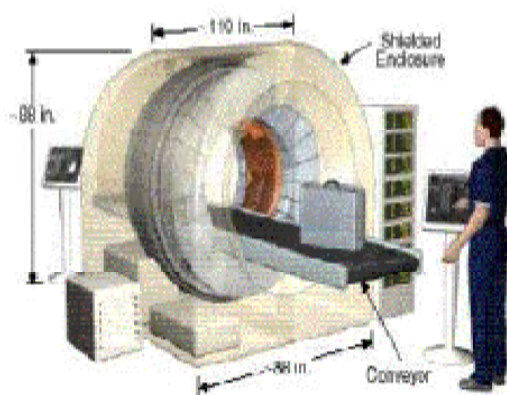


# 研究背景及意义

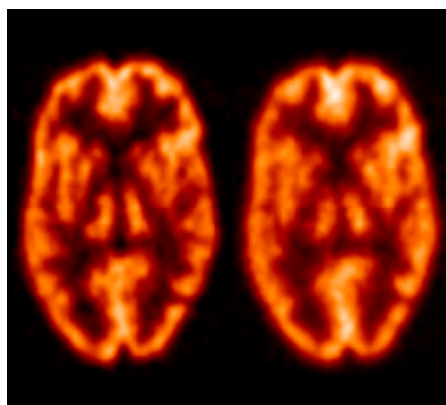


## X射线和 $\gamma$ 射线核辐射技术的应用

Industrial CT



Medical imaging



Security inspection



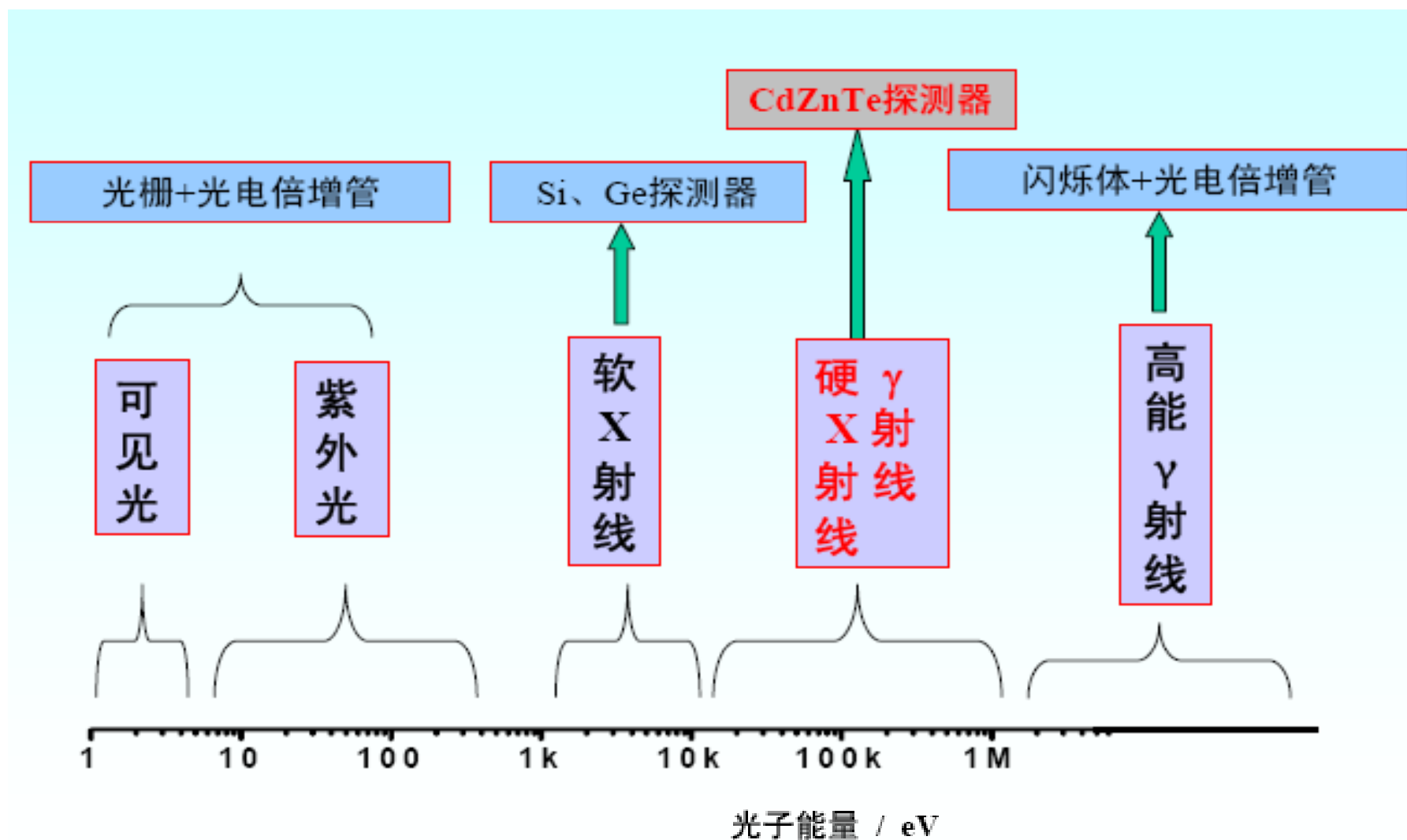
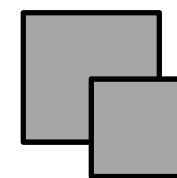
Nuclear safeguards



Astronomy investigation

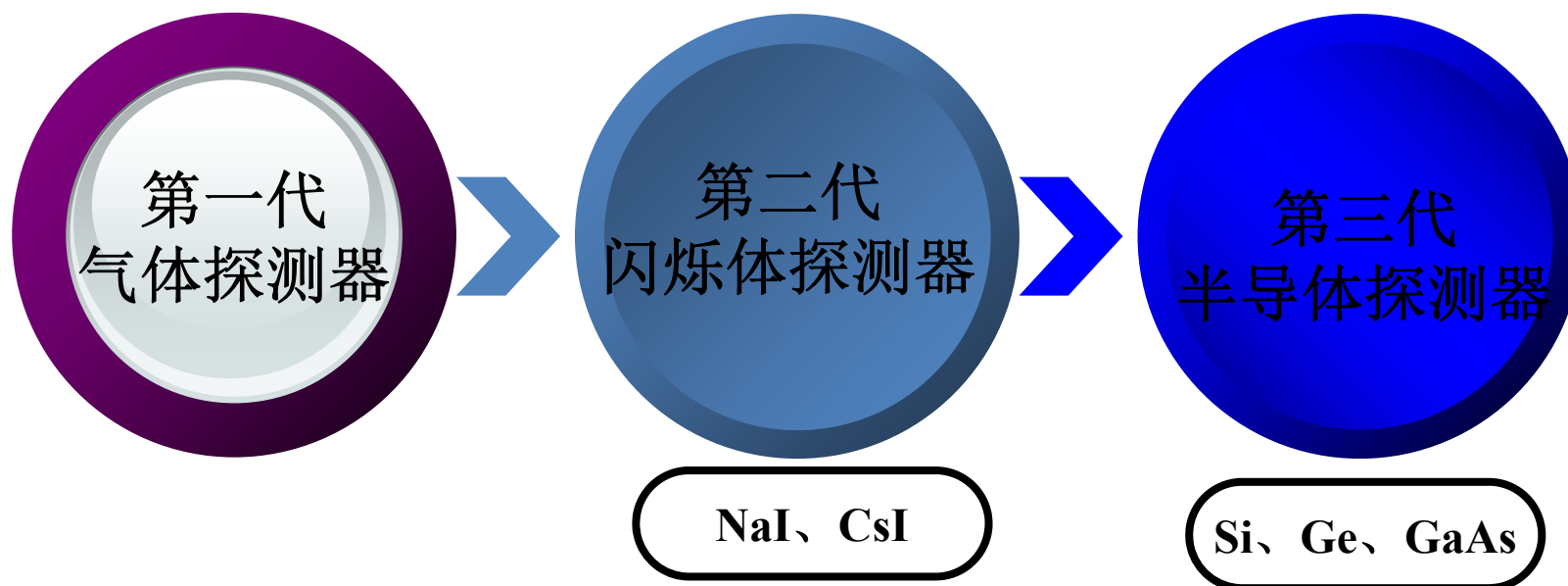
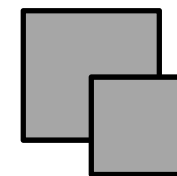


# 射线分类及探测技术





# X射线和 $\gamma$ 射线核辐射探测器的发展



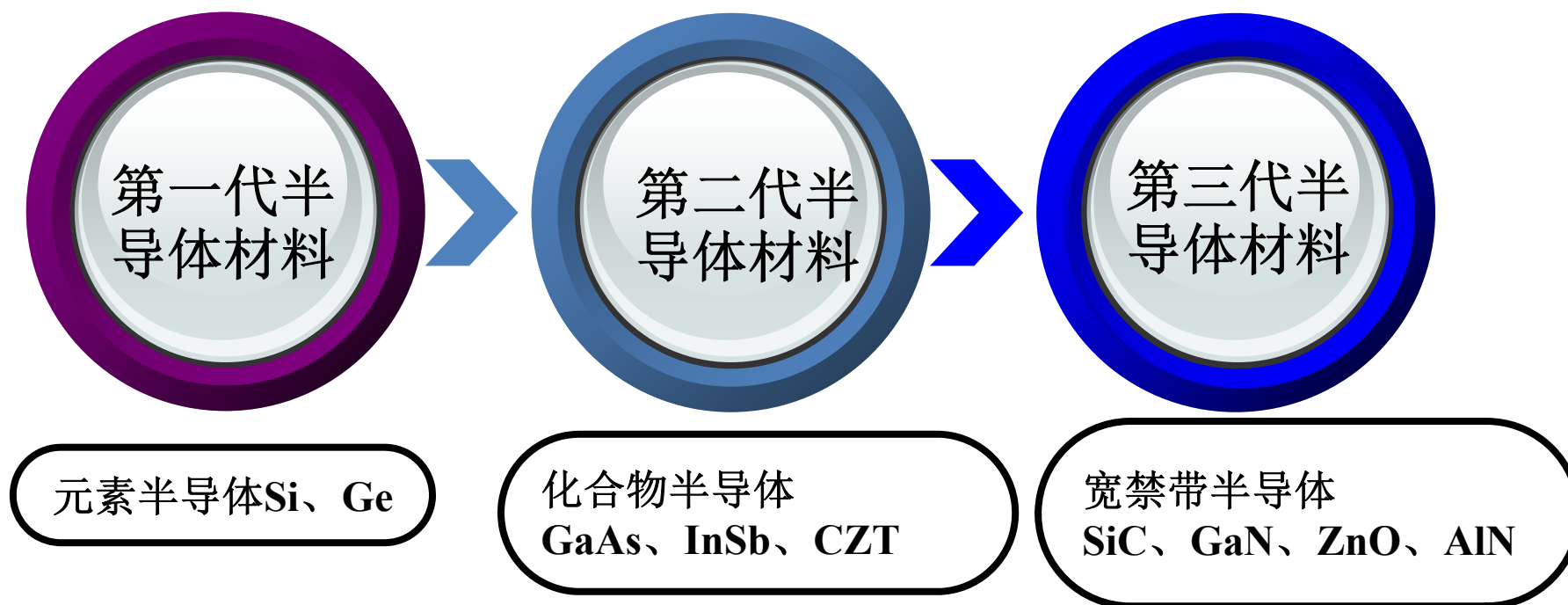
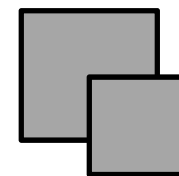
**优点：**简单  
**缺点：**灵敏度较差，能量分辨率及探测效率低

**优点：**晶体尺寸大，具有较高探测效率。  
**缺点：**需结合光电倍增管，器件庞大；能量分辨率差；易潮解

**优点：**能量分辨率和空间分辨率高；器件尺寸小，便携。  
**缺点：**晶体制备工艺尚不成熟，价格昂贵、部分限制进口



# 半导体探测器的发展



## 半导体探测器对所用材料的要求：

平均原子序数高、较大的禁带宽度大、较高的电阻率、优异的载流子传输特性（电子迁移率寿命大）、工作时的漏电流和噪声较低。

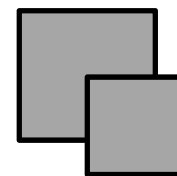
## 各种半导体探测器材料比较

|                    | Z            | E <sub>g</sub> (eV) | W (eV/ehp) | ρ at RT (Ωcm)          |
|--------------------|--------------|---------------------|------------|------------------------|
| Si                 | 14           | 1.12                | 3.6        |                        |
| Ge                 | 32           | 0.66                | 2.9        |                        |
| InP                | 49/15        | 1.4                 | 4.2        | 10 <sup>7</sup>        |
| GaAs               | 31/33        | 1.4                 | 4.3        | 10 <sup>8</sup>        |
| CdTe               | 48/52        | 1.4                 | 4.4        | 10 <sup>9</sup>        |
| <b>CdZnTe(CZT)</b> | <b>48/52</b> | <b>1.6</b>          | <b>4.7</b> | <b>10<sup>11</sup></b> |
| Hgl <sub>2</sub>   | 80/53        | 2.1                 | 4.2        | 10 <sup>13</sup>       |
| TlBr               | 81/35        | 2.7                 | 5.9        | 10 <sup>11</sup>       |
| Diamond            | 6            | 5                   | 13         | >10 <sup>13</sup>      |

Also: SiC, Pbl<sub>2</sub>, CdMnTe, ZnSe, GaSe, GaN



## 各种探测器性能比较



常用材料：**Si**、**Ge**元素半导体，**GaAs**化合物半导体。

**Si探测器**具有较高的探测效率和能量分辨率。

**Si探测器**由于自身的禁带宽度 $E_g$ 仅为1.06 eV，且原子序数小，对高能射线的阻止本领和探测效率较低。

**高纯锗（HPG）**半导体探测器具有较高的探测效率和能量分辨率。

但**Ge**探测器必须在液氮温度下工作才具有优良的能量分辨率。

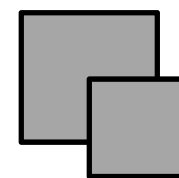
**GaAs**原子序数大、禁带宽度大，对 $\gamma$ 射线探测效率高。

制备成的探测器可在室温下工作，但是由于电阻率低，电荷载流子漂移程短，限制了**GaAs**探测器的发展。





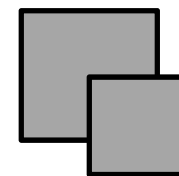
## CZT探测器优势



|                   |                                                              |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|
| 优越的性能             | (分辨率 [时间, 空间, 能量], 阻止能力)                                     |
| 室温下工作             | (不需冷却)                                                       |
| 高稳定性              | (无极化)                                                        |
| 与温度和偏压的高线性响应      | (数据分析简化)                                                     |
| 直接的光信号转换          | (高的转化效率)                                                     |
| X-ray & Gamma Ray | (从10 keV到3 MeV)                                              |
| 器件设计的灵活           | (通过光刻即可实现)                                                   |
| 模块化               | (cm <sup>2</sup> 到m <sup>2</sup> 焦平面)                        |
| 应用广泛              | (医疗, 工业检测, 核安全, 天体与高能物理: 中微子探测“COBRA”计划, 硬X射线天文望远镜“EXIST”计划) |



## SiC探测器优势



在外太空、高能物理实验等高温高压以及强辐射环境下，探测器的**耐高温**和**耐辐照**性能备受关注。

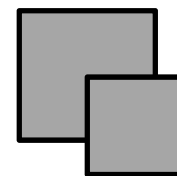
**SiC**：大禁带宽度、高临界击穿场强、强热稳定性、高电子迁移率、高热导率，高硬度。

| 材料                                       | 4H-SiC   | 6H-SiC | 3C-SiC | Si   | Ge   |
|------------------------------------------|----------|--------|--------|------|------|
| 禁带宽度/eV                                  | 3.3      | 3.0    | 2.3    | 1.1  | 0.66 |
| 电子迁移率/cm <sup>2</sup> ·V·s <sup>-1</sup> | 800-1000 | 370    | 750    | 1450 | 3900 |
| 空穴迁移率/cm <sup>2</sup> ·V·s <sup>-1</sup> | 50-115   | 50     | 40     | 450  | 1900 |
| 离位能/eV                                   | 21.8     | 21.8   | 21.8   | 12.8 | 14.4 |
| 击穿电压/MV·cm <sup>-1</sup>                 | 3.0      | 2.4    | >1.5   | 0.5  | 0.1  |

**SiC**探测器禁带宽度大，在高温下性能将优于**Si**和**Ge**探测器，离位能大，具有比**Si**更好的抗辐照性能，有望取代**Si**作为耐高温抗辐照半导体探测器的材料。



# Si平面探测器的应用



## ► Si平面工艺探测器主要优点：

- 漏电流小：比面垒探测器一般要小2个数量级。
- 噪声低，能量分辨率高，计数率高。
- 一致性好，易于制备结构复杂探测器及大面积阵列探测器。
- 可以集成化，如前级FET集成在探测器上，可大大提高其能量分辨率。

## ► Si平面工艺探测器基本工艺：

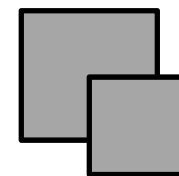
Si片 ---氧化 ----光刻 ---腐蚀 ----离子注入 ---退火 ----制做电极 ---热处理 --- 做电极引线。

## ► Si-PIN探测器结构及特点：

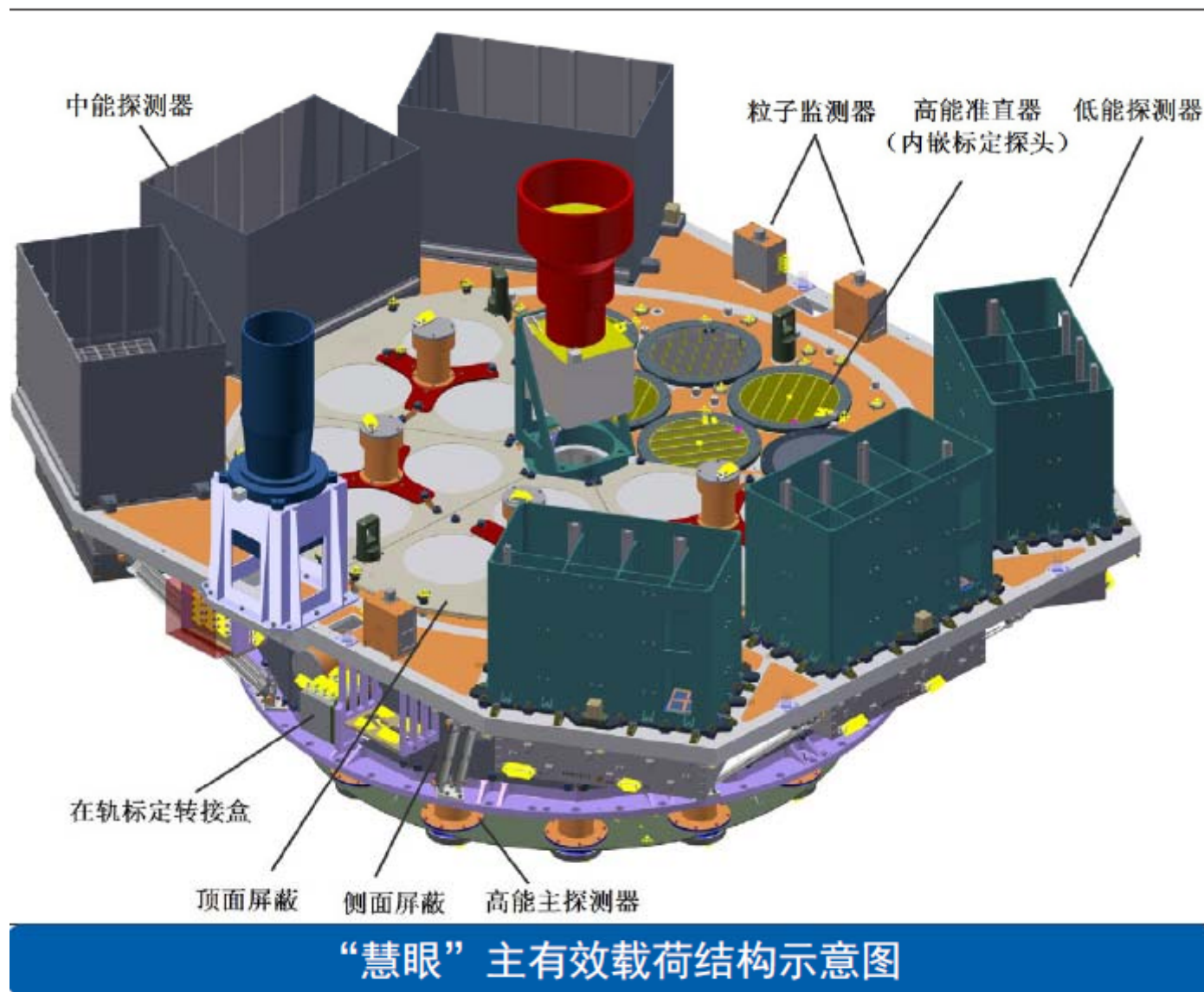
- Si-PIN探测器结构简单；
- 10mm<sup>2</sup> 探测器、-40℃时能量分辨率可以达到140~150eV@5.9KeV。



# HXMT卫星中Si-PIN探测器的应用



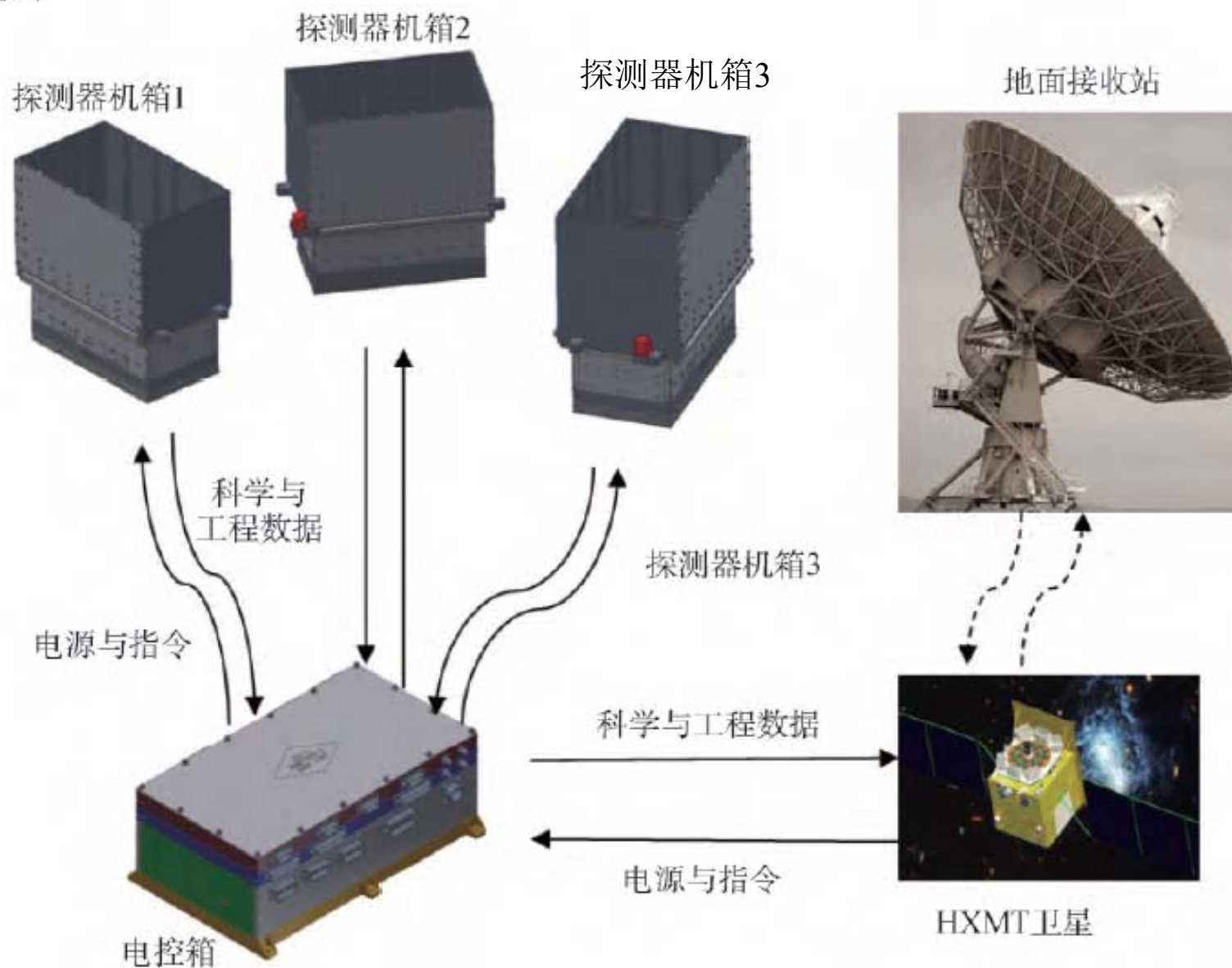
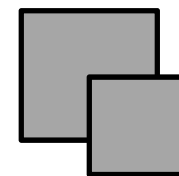
2017年6月15日发射的HXMT卫星—慧眼



“慧眼”采用分舱室式设计，有效载荷（科学探测仪器）位于卫星上部，服务舱以资源—2卫星平台为基础位于卫星下部。卫星总质量约2500kg，将运行在高度550km、倾角43°的近地圆轨道，在轨设计寿命4年。

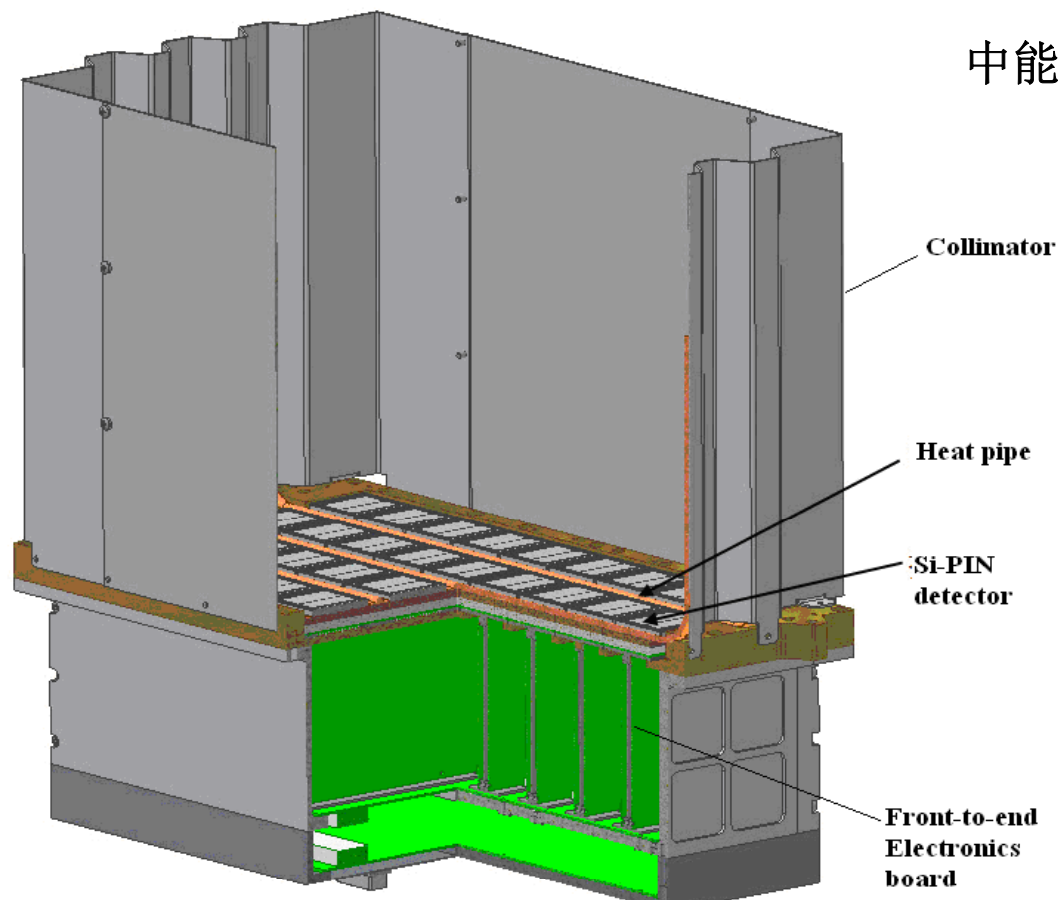
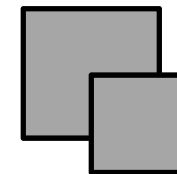


## 中能X射线望远镜功能连接示意图





## 中能探测器机箱结构图



|        |                                      |
|--------|--------------------------------------|
| 探测器    | Si-PIN                               |
| 有效探测面积 | 952 cm <sup>2</sup> ( <b>1728路</b> ) |
| 观测能区   | 5-30 keV                             |
| 能量分辨率  | 3keV @20 keV                         |
| 像素漏电流  | ≤3.3nA                               |
| 保护环漏电流 | <100nA                               |

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<br>(-20℃) | FWHM 3 keV@59.5 keV<br>(-5℃)  |
| 面积    | ~ 160 cm <sup>2</sup> @20 keV | ~ 600 cm <sup>2</sup> @20 keV |
| 探测能区  | 12 ~ 70 keV                   | 5 ~ 30 keV                    |



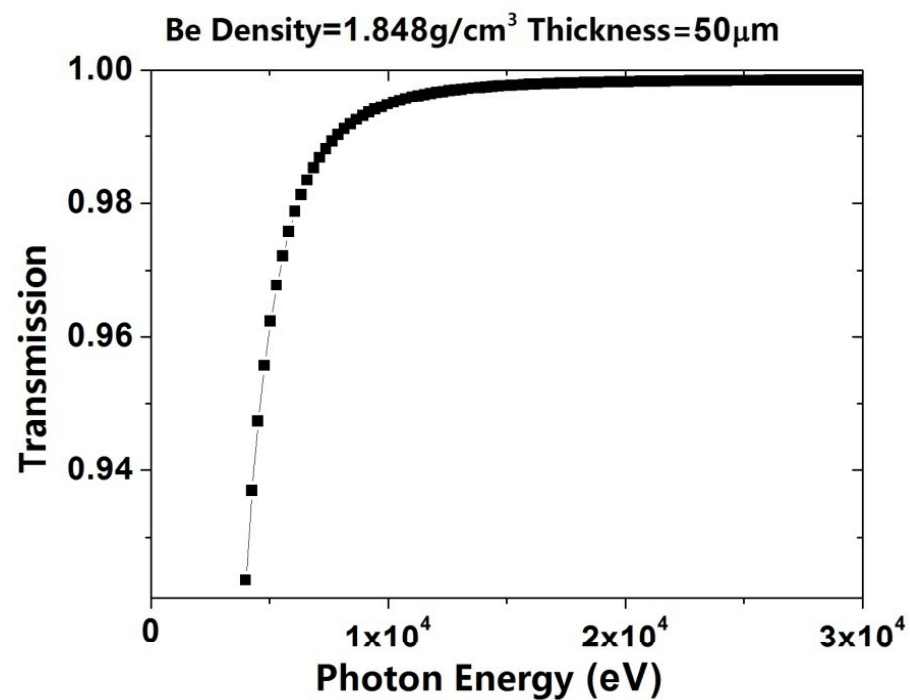
## Si-PIN探测器的组成



探测器插件组件实物照片



Si-PIN探测器实物照片

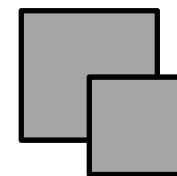


50μm Be窗透过率曲线

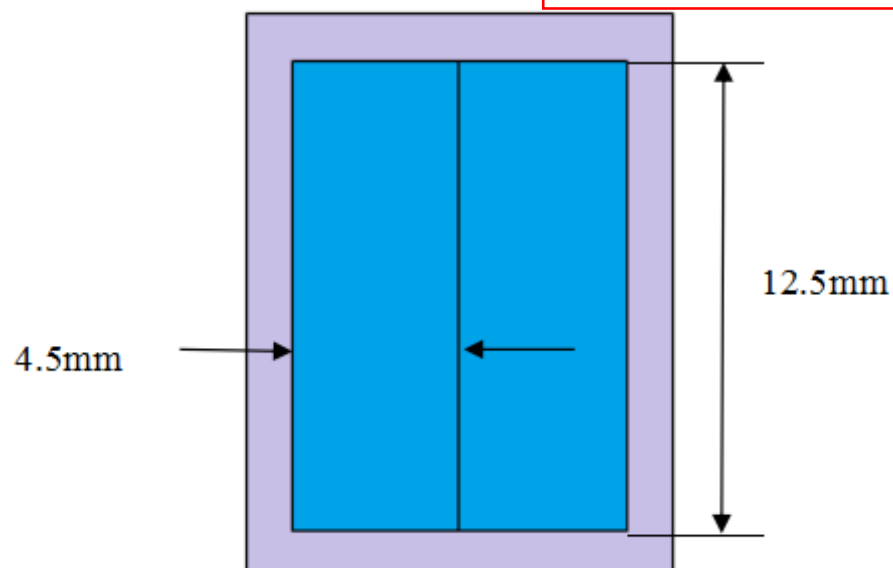
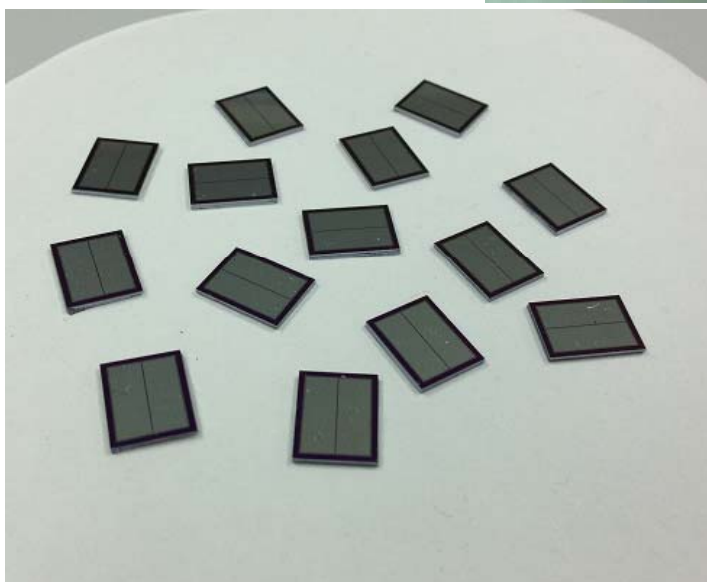




## 厚度1mm、56mm<sup>2</sup>两像素的Si-PIN探测器

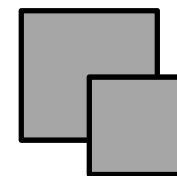


探测器单元模块图

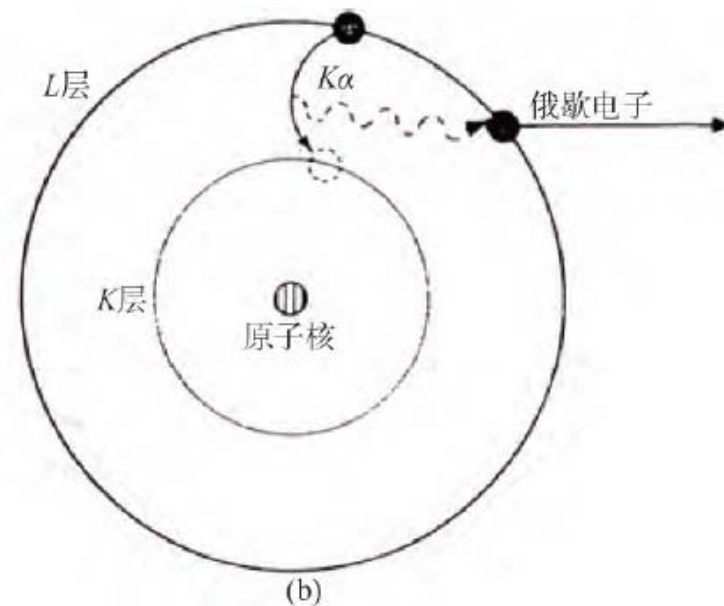
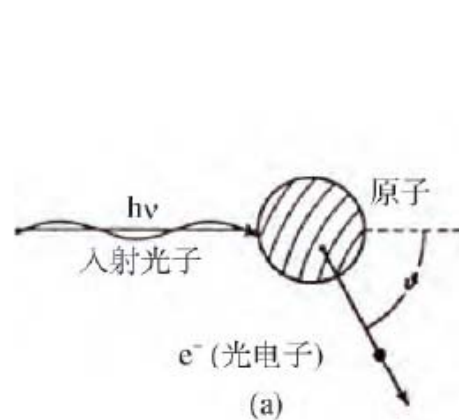
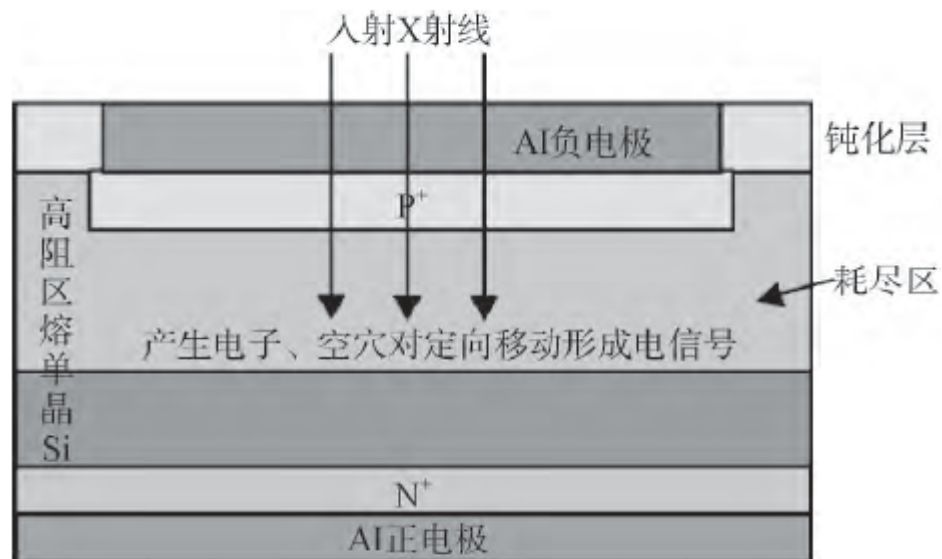




## Si-PIN探测器的的工作原理



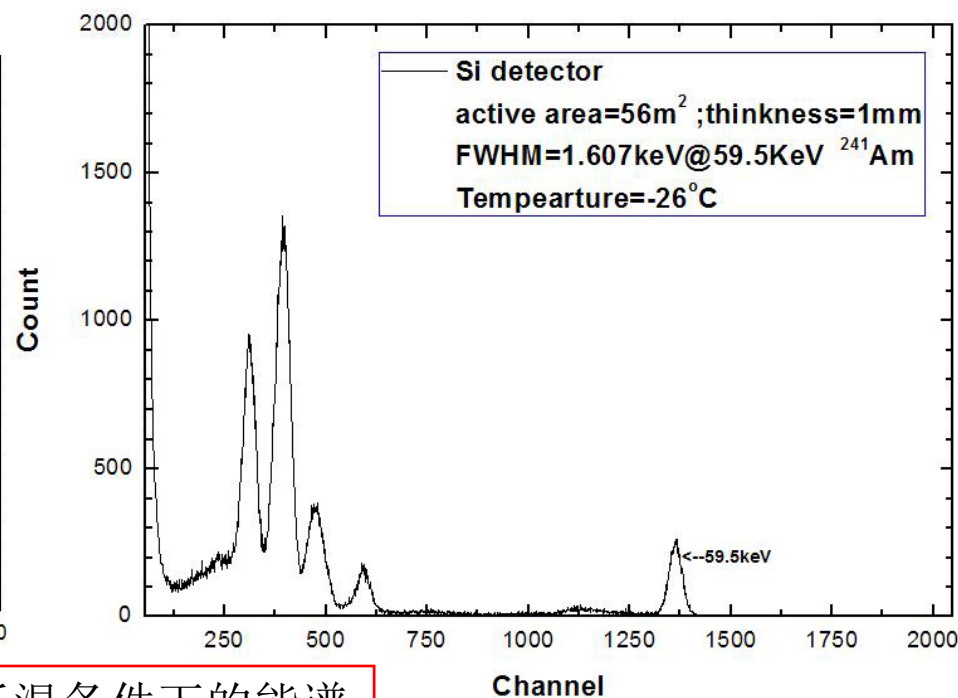
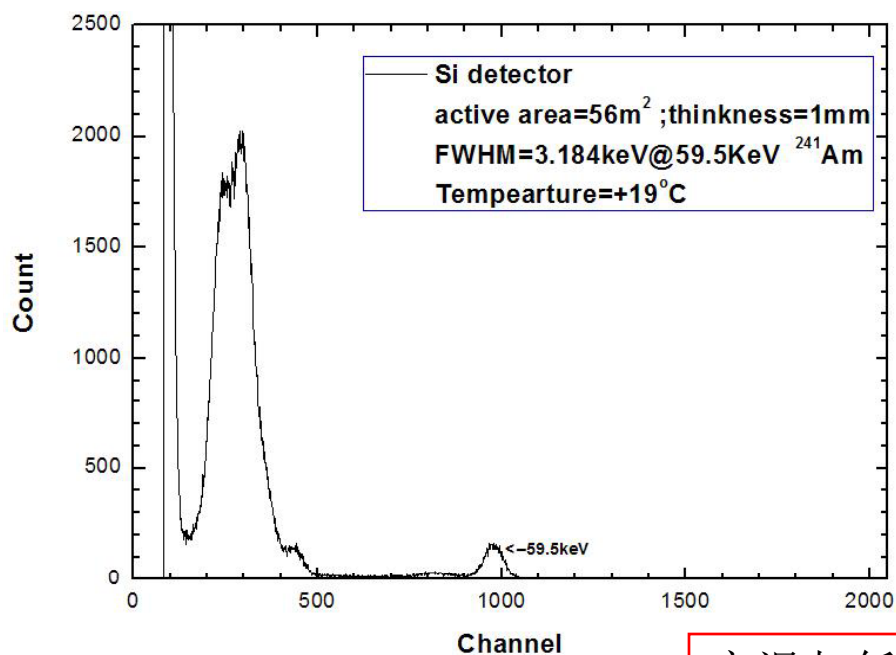
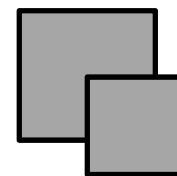
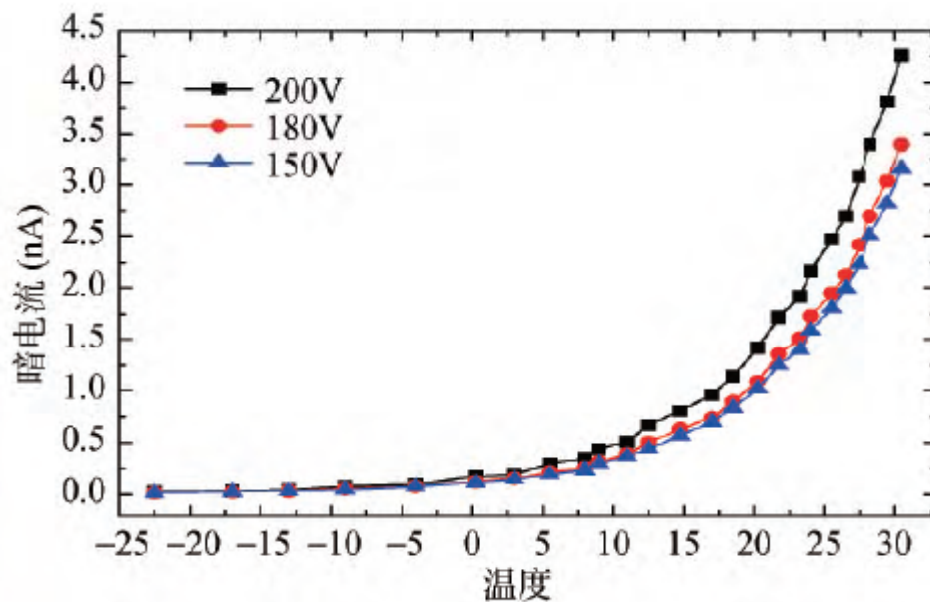
Si-PIN 探测器结构示意图



光电效应及俄歇电子发射示意图



## Si-PIN探测器低温 漏电流测试结果

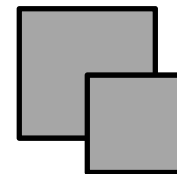


室温与低温条件下的能谱



## CdZnTe探测器的研究进展

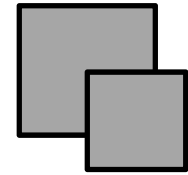
---



- ✚ **XTP背景型号CdZnTe样机的研制**
- ✚ **GECAM项目CdZnTe样机的研制**



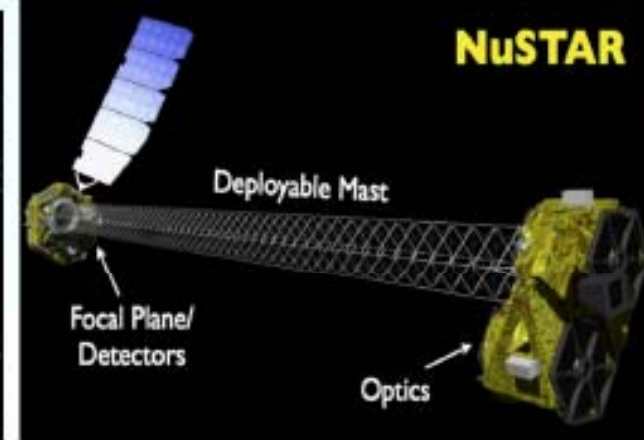
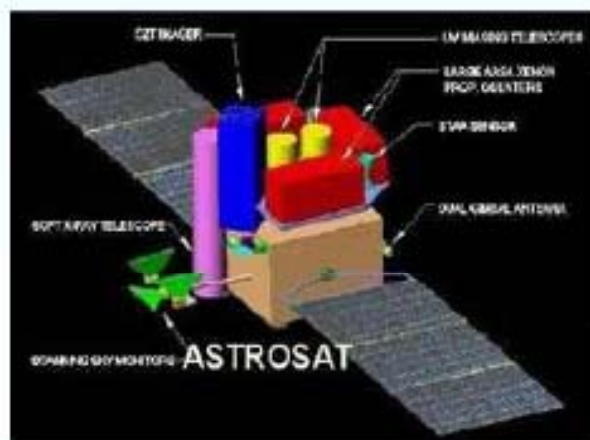
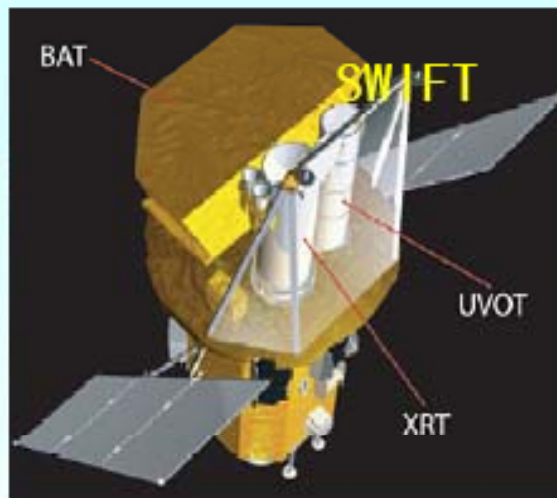
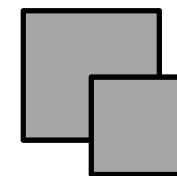
## CZT探测器被广泛应用于空间天文观测中



| Missions  | Nation | Carrier   | Goal              | Energy (keV) | Electrode | Element size /mm <sup>3</sup> | Detector area /cm <sup>2</sup> | Pitch /mm |
|-----------|--------|-----------|-------------------|--------------|-----------|-------------------------------|--------------------------------|-----------|
| HEXIS-2   |        | Satellite | Survey, GRB       | 3~100        | Strip     | 32×32×2                       | 5535                           | 0.5       |
| HEXIS-1   |        | Balloon   | Hard X-ray survey | 20~200       | Strip     | 32×32×2                       | 640                            | 0.5       |
| BAT       |        | Satellite | GRB               | 15~150       | Pixel     | 4×4×2                         | 5240                           | 4         |
| AXGAM     |        | Satellite | Survey, GRB       | 2~200        | Pixel     | 26×26×2                       | 5600                           | 0.3       |
| InFOCμS   |        | Balloon   | Hard X-ray survey | 20~80        | Pixel     | 27×27×2                       | 150                            | 0.38      |
| HEFT      |        | Balloon   | Hard X-ray Survey | 20~100       | Pixel     | 23.6×12.9×2                   | 1000                           | 0.5       |
| HEX       |        | Satellite | Lunar mission     | 20~250       | Pixel     | 2.5×2.5×3                     | 100                            | 2.5       |
| BASIS     |        | Satellite | GRB               | 10~200       | Strip     | 15×15×2<br>/10×10×2           | 750                            | 0.1/10    |
| EXIST     |        | Satellite | Survey, GRB       | 10~600       | Pixel     | 20×20×5                       |                                | 0.6       |
| MARGIE    |        | Balloon   | Survey            | 20~600       | Strip     | 24×24×<br>1.5                 | >1000                          | 0.38      |
| Simbol-X  | EURO   | Satellite | Hard X-ray survey | 4~100        | Pixel     | 10×10×2                       | 256                            | 0.9       |
| ASTROSAT  |        | Satellite | Hard X-ray survey | 15~100       | Pixel     | —                             | 1000                           | —         |
| FAR-XITE  |        | Balloon   | Survey            | 20~90        | Strip     | 32×32×2                       | 100                            | 0.5       |
| Con-X HXT |        | Satellite | Hard X-ray survey | 6~40         | Pixel     | Diameter>23                   | >1500                          | <0.73     |
| INTEGRAL  | EURO   | Satellite | GRB               | 15~1000      | —         | 4×4×2                         | 2621                           | —         |



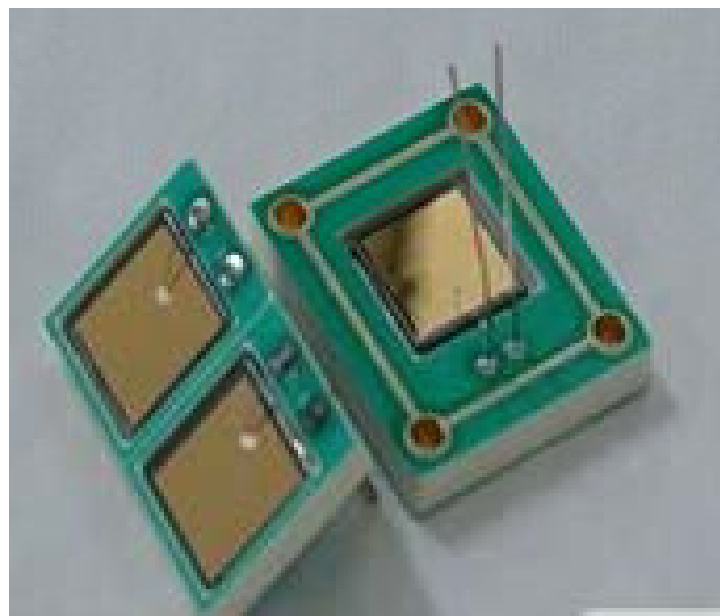
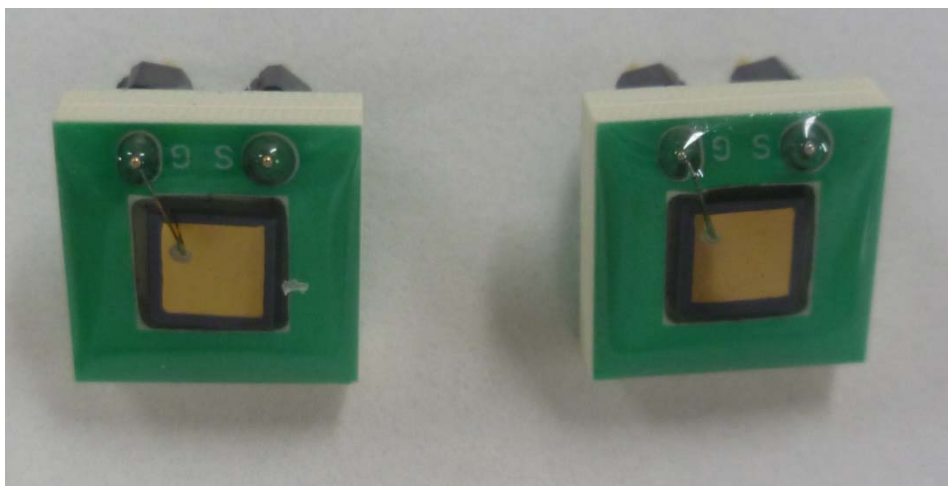
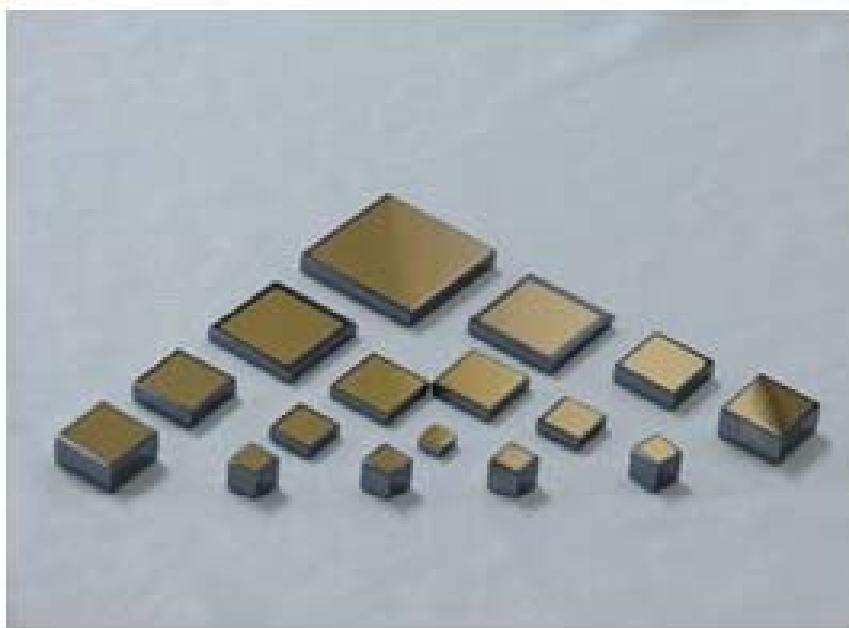
## CZT探测器在空间天文观测中的应用







## 不同尺寸的CZT单平面探测器

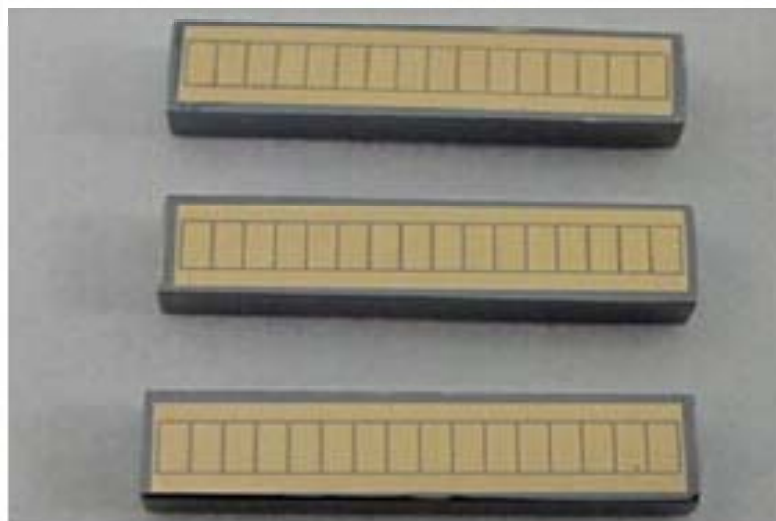




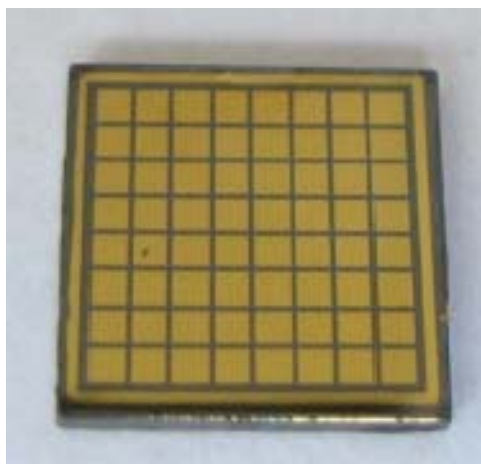


## 不同规格的CZT像素探测器

线阵列像素探测器



64面阵列像素  
探测器

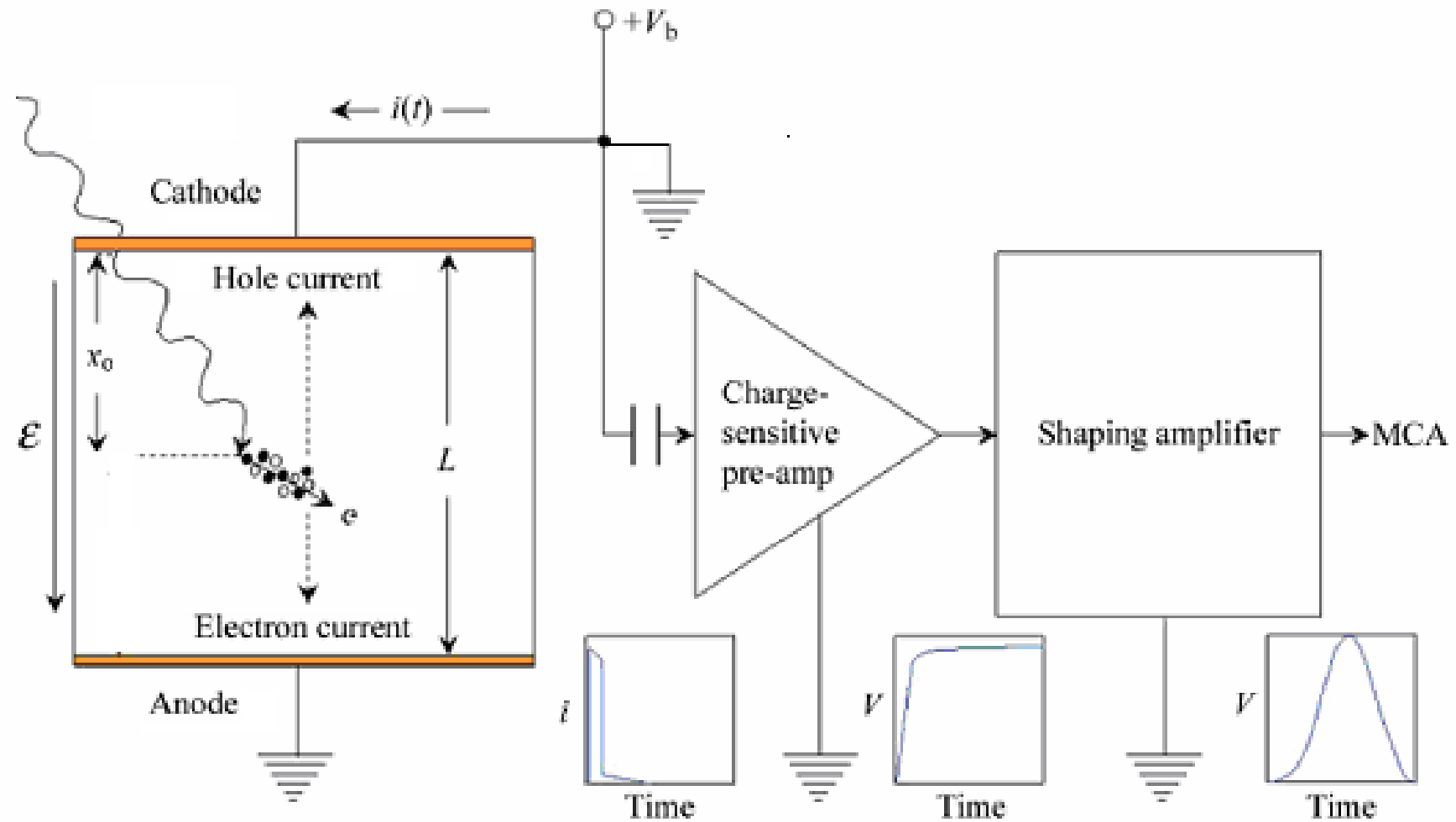


256面阵列像素  
探测器



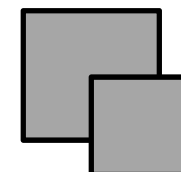


## CZT探测器的工作原理





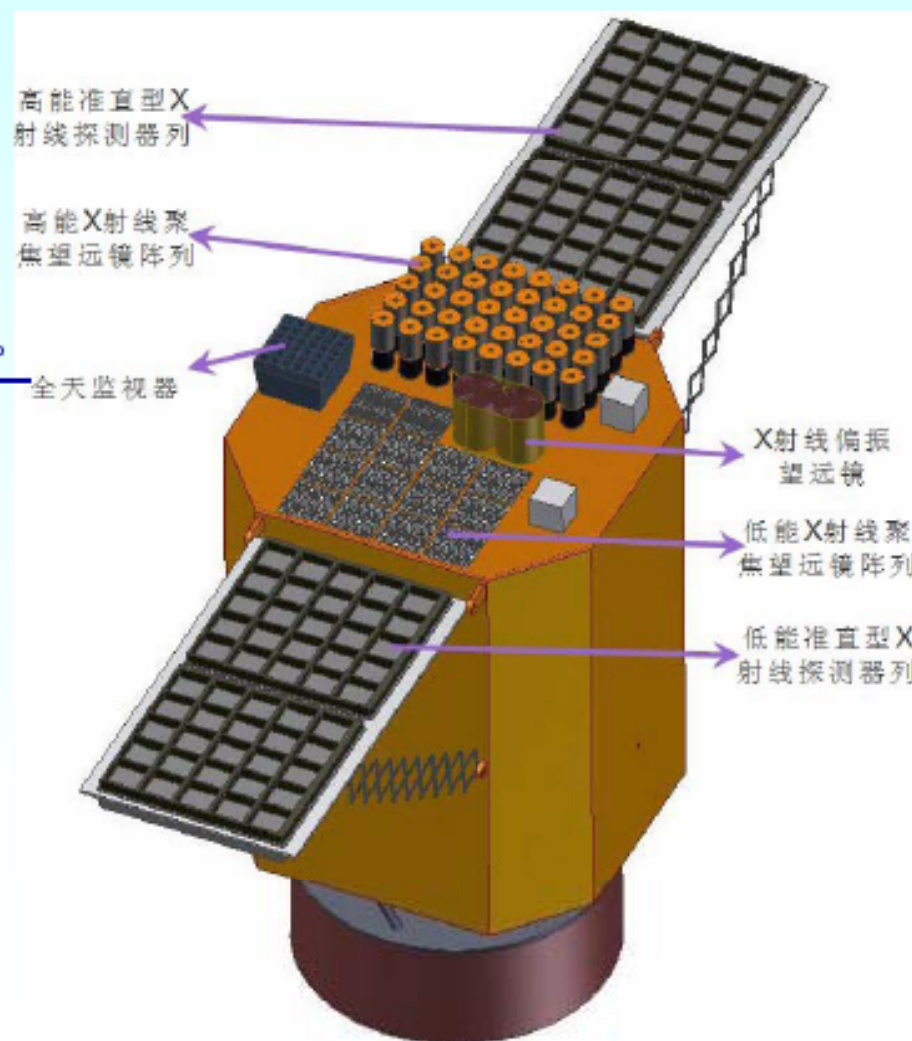
## X射线时变与偏振探测卫星 (XTP)



大探测面积 (30000–40000 cm<sup>2</sup>)、宽波段 (1–100 keV) 的X射线天文望远镜主要科学目标是研究黑洞X射线双星的快速光变以及伴随的能谱变化。

1–100keV, 2° × 2°  
15000 cm<sup>2</sup>(6–30keV)

1–30keV, 0.5° × 0.5°  
5000 cm<sup>2</sup>(1–6keV)  
2800cm<sup>2</sup>@ 30keV

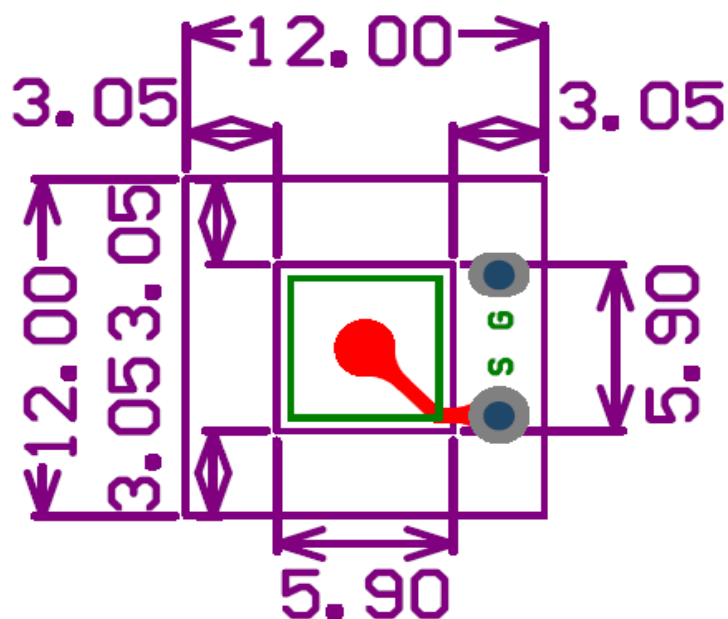


0.5–15keV, 1° × 1°  
7400 cm<sup>2</sup>@1keV

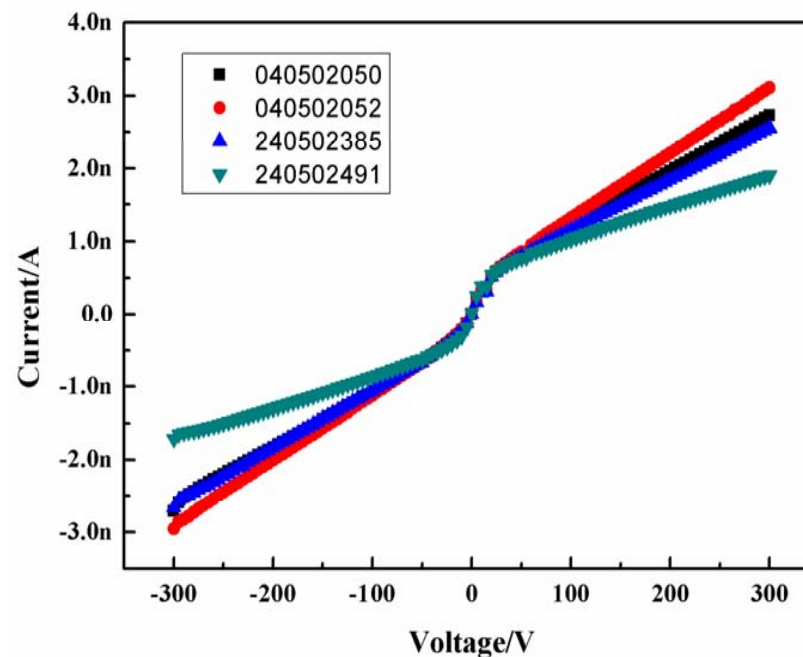
0.5–15keV, 2° × 2°  
15000 cm<sup>2</sup>(1–6keV)



## XTP卫星准直型望远镜所用CZT探测器漏电流和PCB板设计图



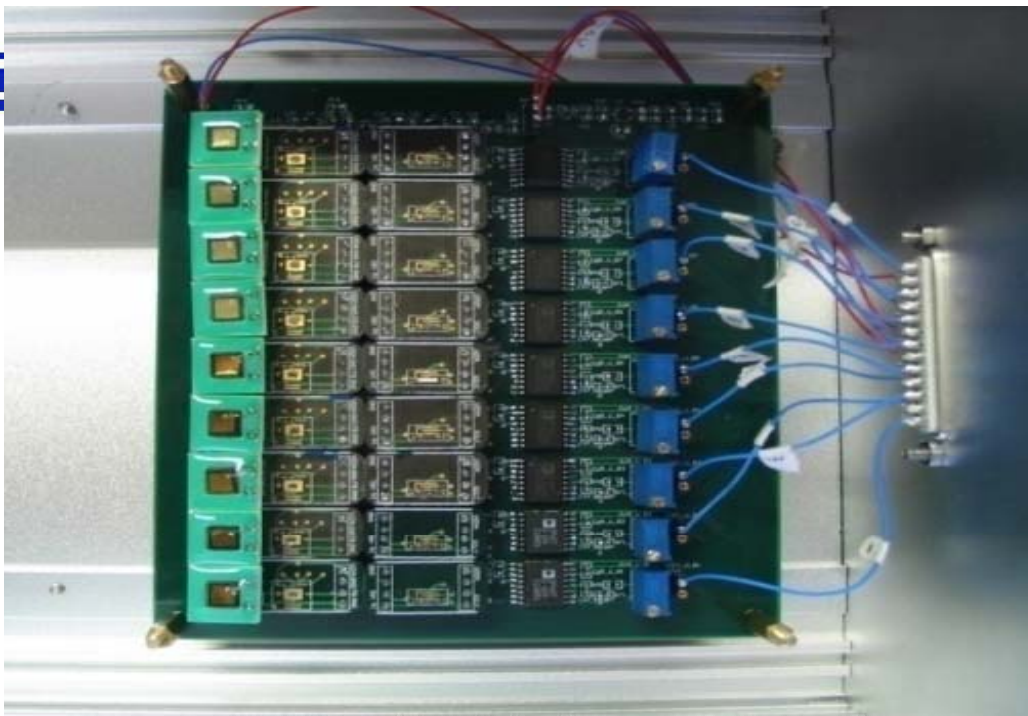
单平面CdZnTe探测器PCB板设计图



部分单平面CdZnTe探测器漏电流图谱

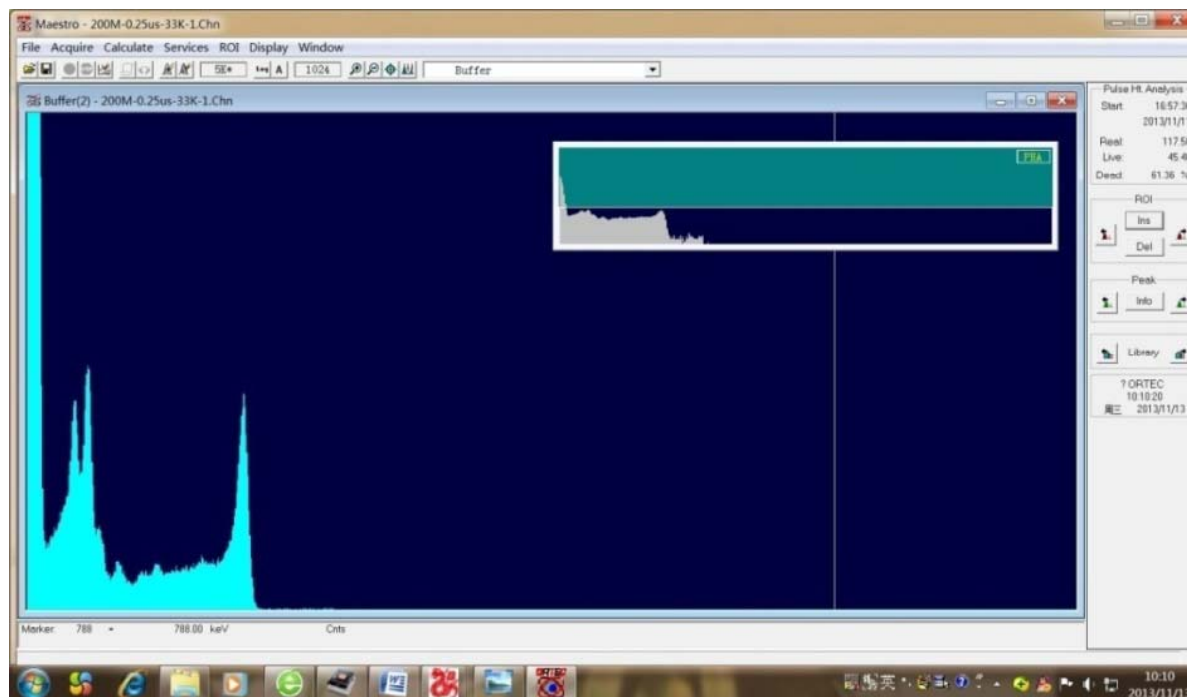


9路CdZnTe样机实物图



单通道前端电子学模块  
匹配CZT探测器能谱

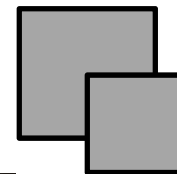
对 $\text{Am}^{241}$ 源能量分辨率  
为 $2.9\text{KeV}@ 59.5\text{KeV}$ 。







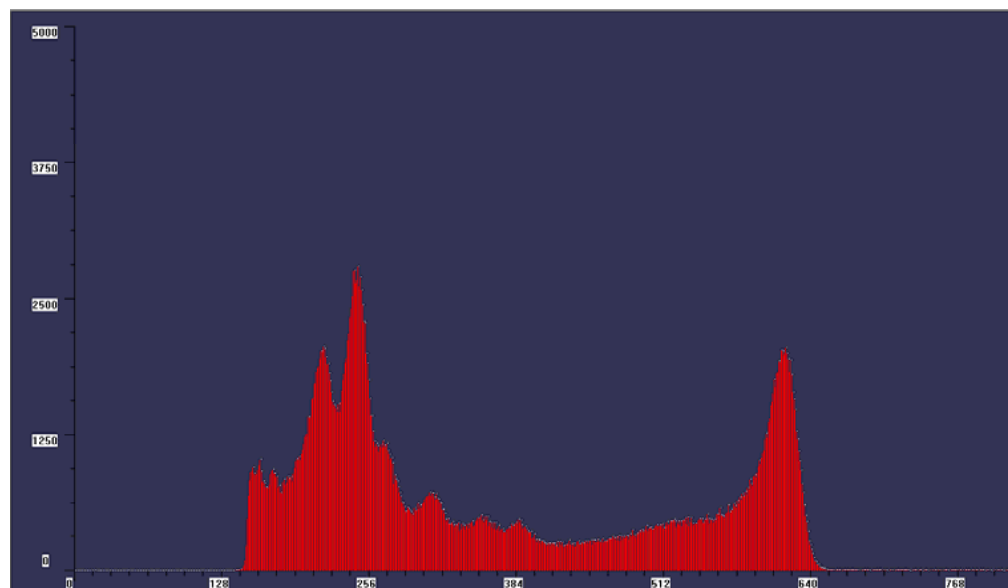
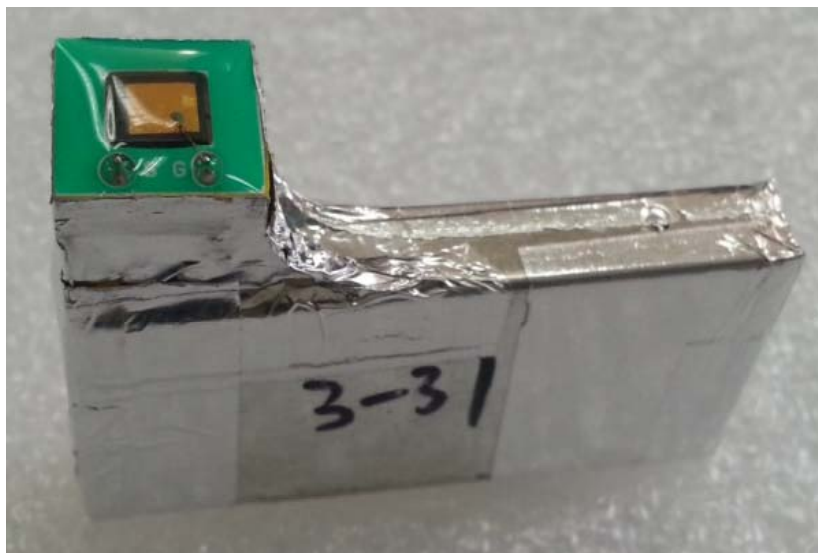
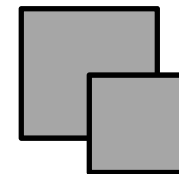
## 32路CdZnTe样机实物图







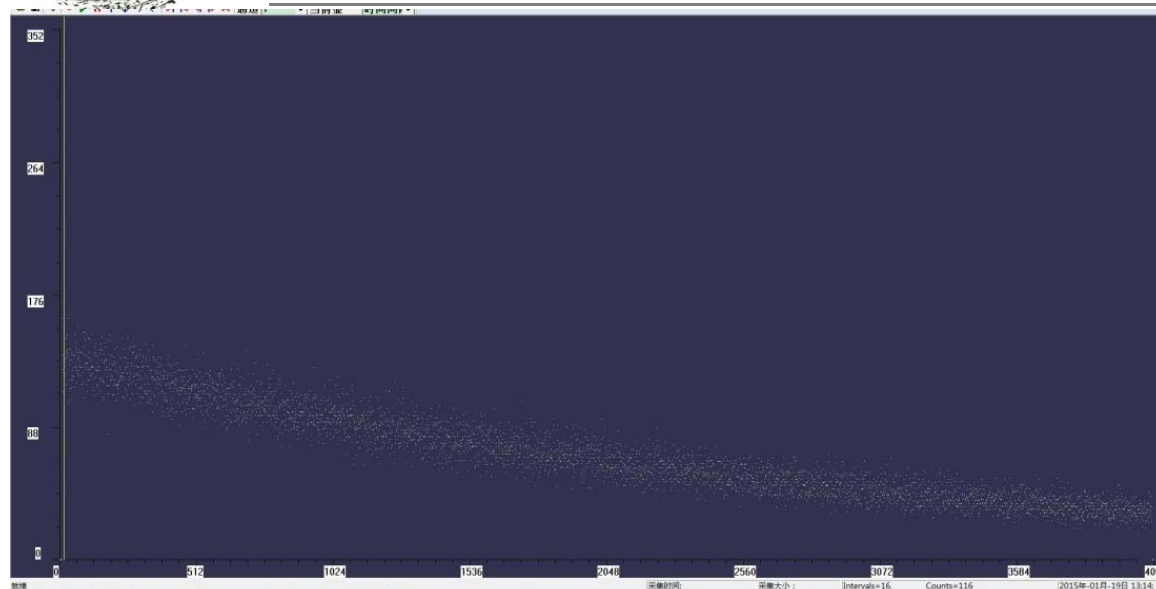
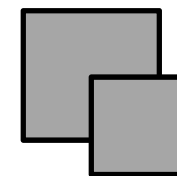
## 单路CdZnTe样机实物图和能谱



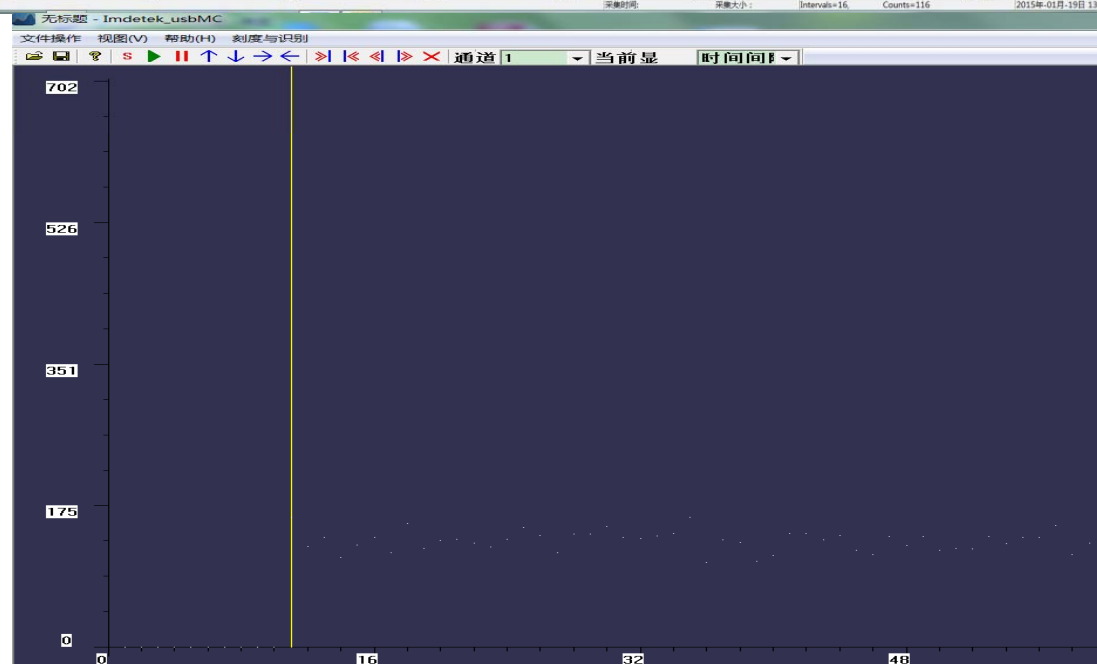
32路均能正常工作，能谱分辨率均在 $3.5\text{KeV}@59.5\text{KeV}$ ，符合指标要求  
( [\$4\text{KeV}@59.5\text{KeV}\$](#) )



## 单路CdZnTe样机时间谱



单路测试时间间隔谱

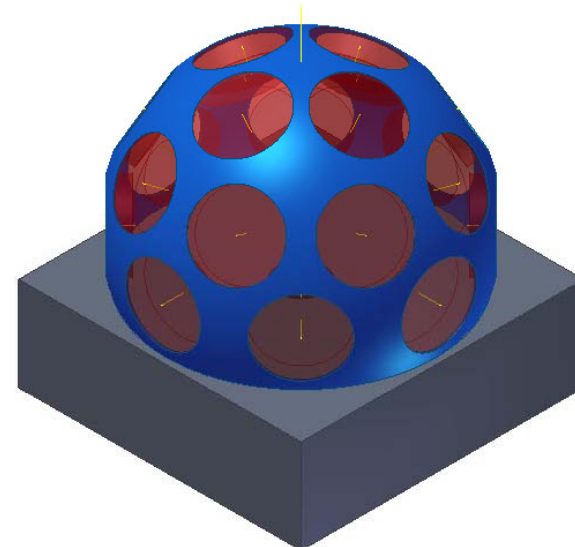


单路测试时间间隔谱放大图

时间分辨率约为10us

# GECAM项目

- GECAM (引力波暴高能电磁对应体全天监测器)
  - 全天视场，同时监测100%全天，领先现有设备3-10倍
  - 高灵敏度：比Fermi/GBM好3倍
  - 定位能力：~1 deg，匹配未来需求
  - 宽能量区：6 keV – 2 MeV，鉴别证认源
  - 对引力波暴电磁对应体的综合探测能力比现有设备提高5-10倍！
  - 计划2022年发射运行
- 紧紧围绕科学需求，优化设计
  - 两颗微小卫星，< 50 kg/颗
  - 分布于地球两侧，形成全天覆盖
  - 伽玛射线探测器 20个/颗
  - 荷电粒子探测器 5个/颗

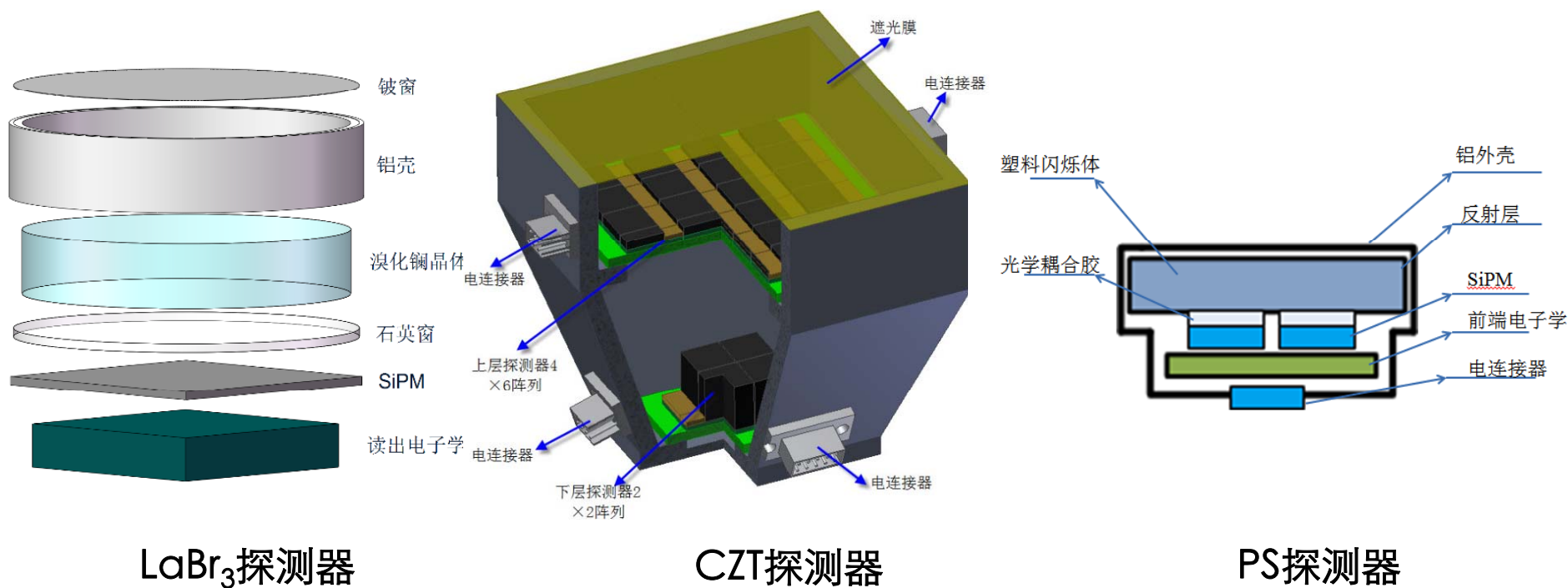


GECAM概念设计图。上部的球状结构为有效载荷，包括伽马射线探测器和荷电粒子探测器；下部为卫星平台。

# GECAM有效载荷的原理样机研制（3种探测器）

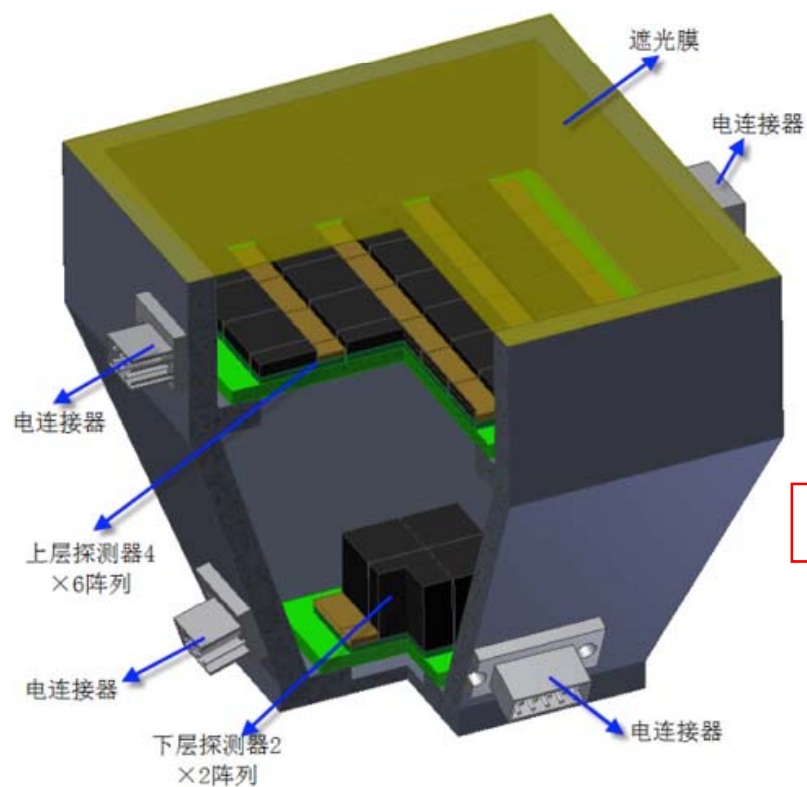
伽玛射线探测器（GPD）：  $\text{LaBr}_3$ ， CZT 方案（备份、提升）

荷电粒子探测器（CPD）： PS方案

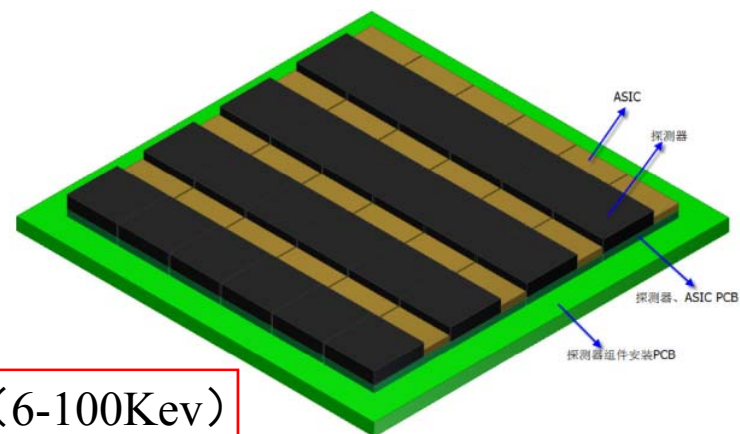




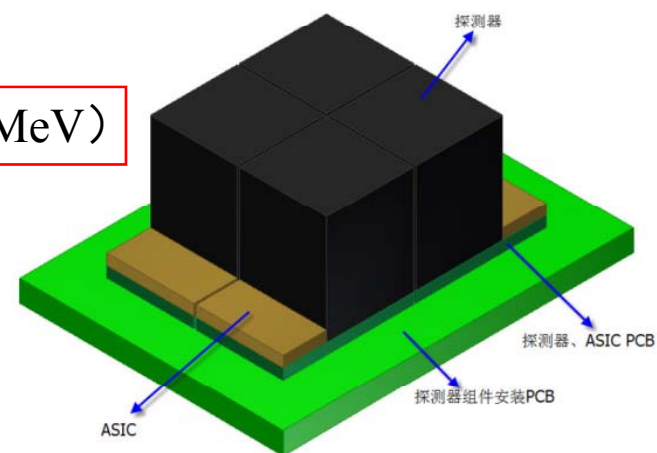
GECAM中CdZnTe样机的目标：探测能区为6keV-2MeV，能量分辨率 $<6\%$ @662keV，计数率2000-20000Hz，占空比 $>70\%$ 。



CZT样机整体结构示意图



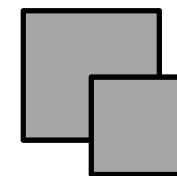
上层 (6-100Kev)



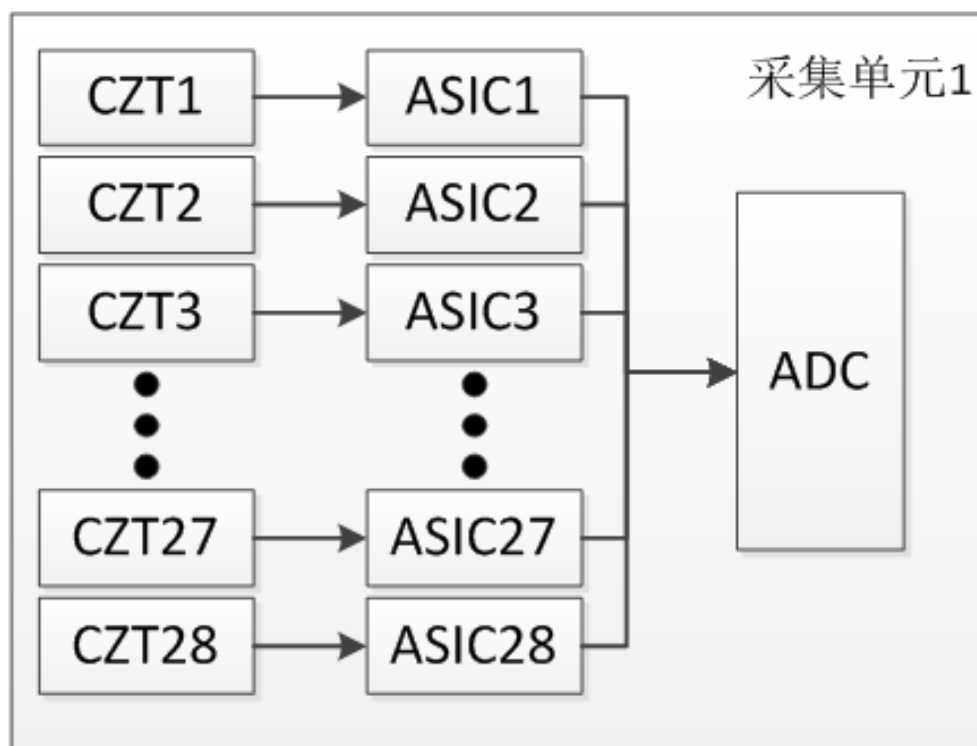
下层 (100Kev-2MeV)



# 事例采集模块实现方案



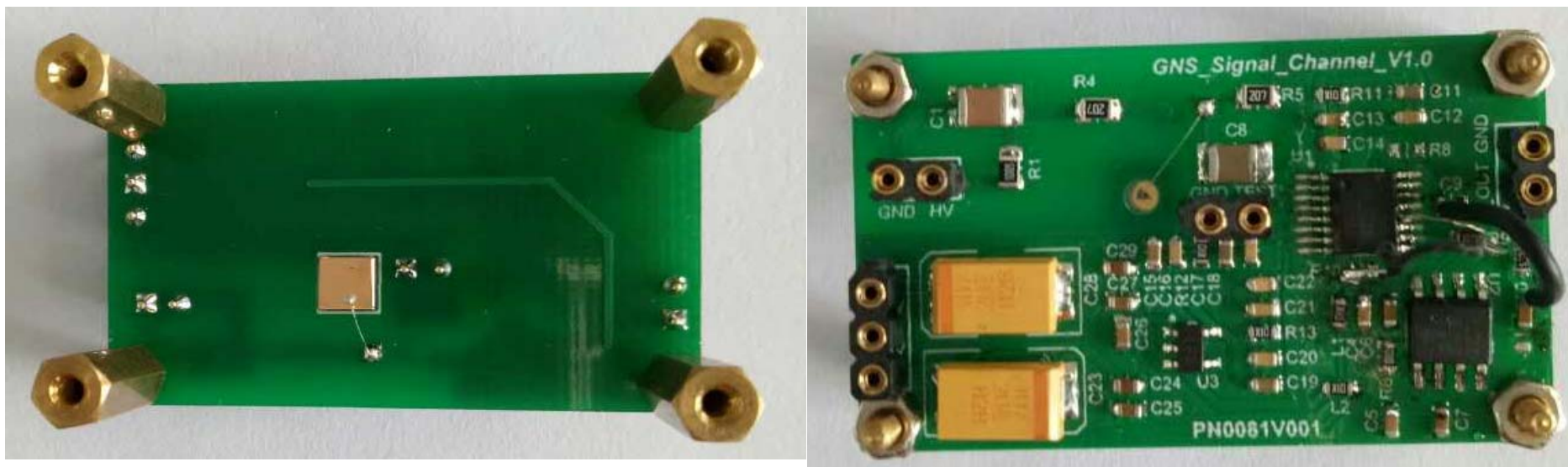
专用读出芯片ASIC功能框图



事例采集模块设计框图

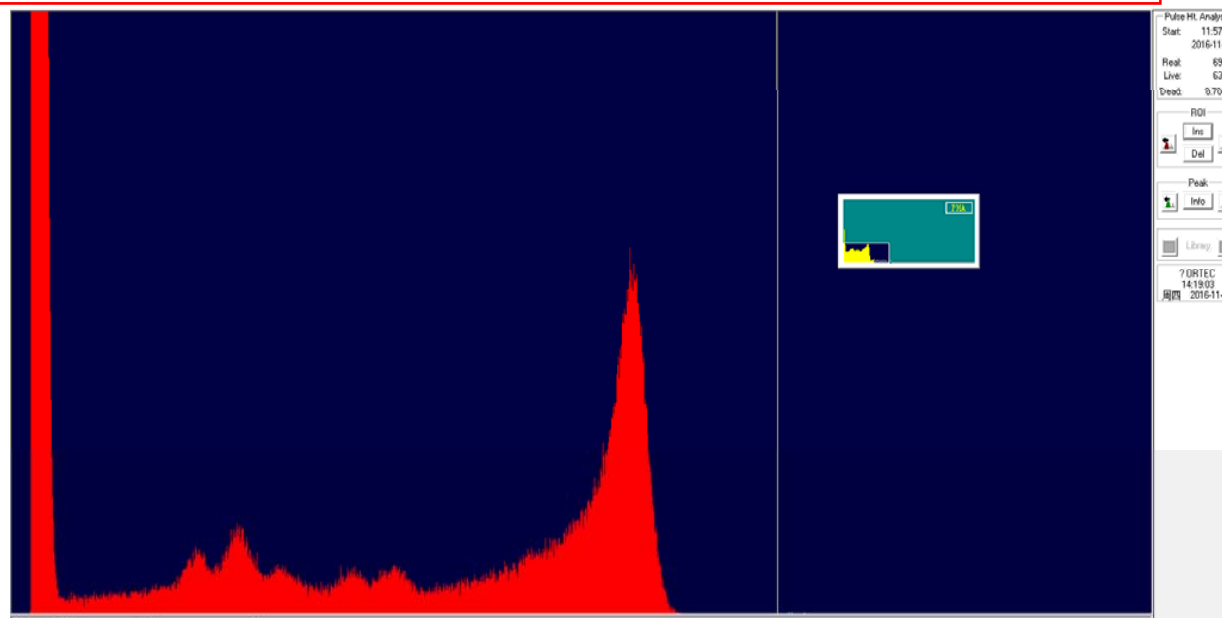


- ❑ 分立器件模块：模块下限6keV，能量分辨率优于5%，主要解决能量下限问题。
- ❑ ASIC集成模块：模块下限6keV，能量分辨率优于5%，可拼接，有效面积达70%。



分立器件的正反面，模块尺寸为：43\*26mm<sup>2</sup>，CdZnTe探测器尺寸为4\*4mm<sup>2</sup>

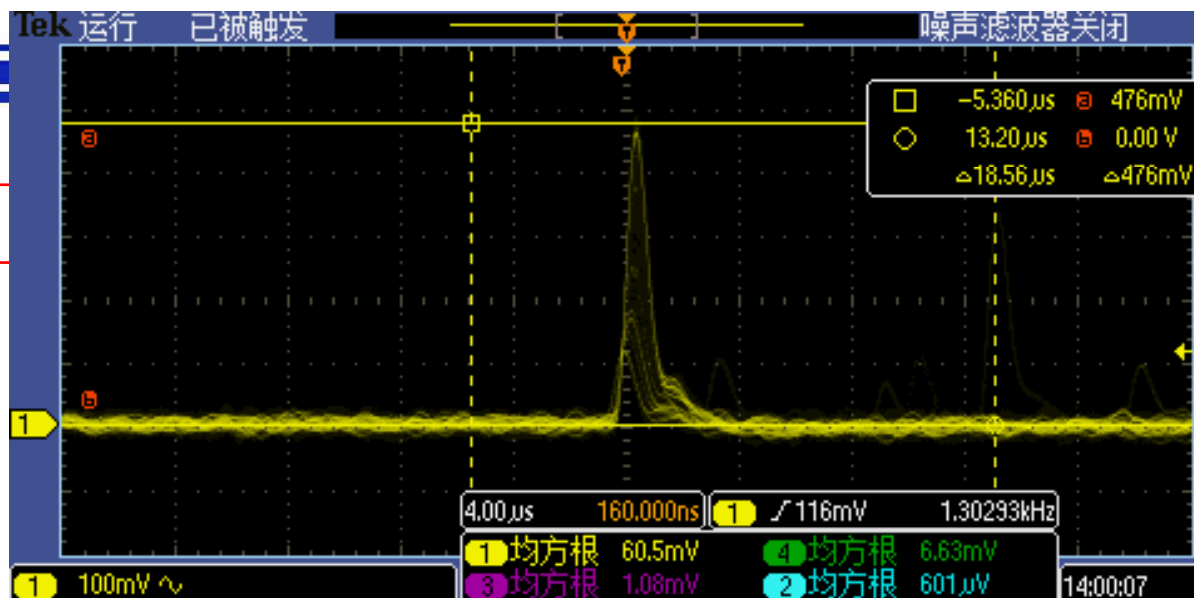
分立模块的能谱响应



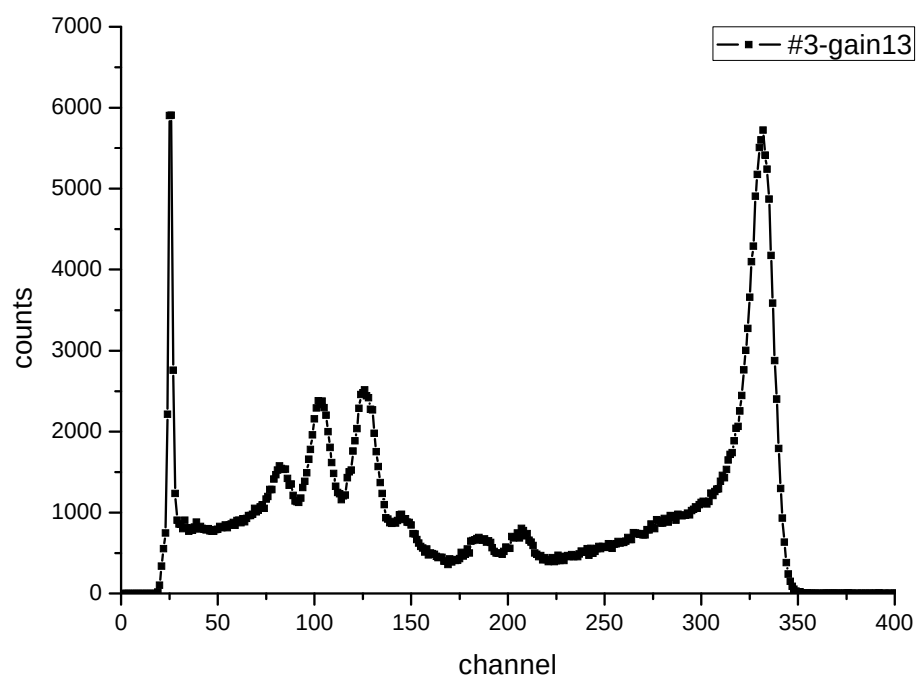


## ASIC 集成芯片CPRE\_6的测试

反馈电阻 $1.2\text{G}\Omega$ ，反馈电容 $15\text{fF}$ ，成形增益5倍，达峰时间 $0.71\mu\text{s}$ 。关闭比较器，将成形输出S\_OUT接入多道。



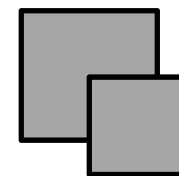
从成形输出的信号



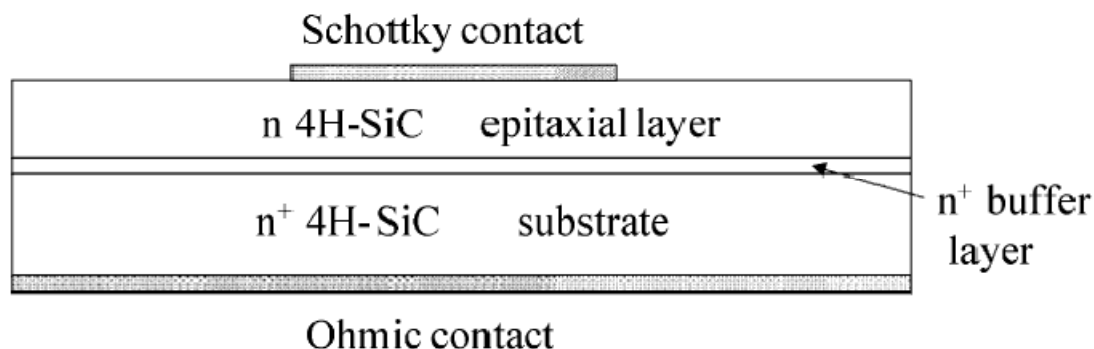
能谱分辨率为4.63%，对多道进行能量标定后发现最大噪声对应能量为3keV，即探测下限为3keV，满足项目要求。



# SiC探测器的研究进展



SiC探测器肖特基势垒二极管探测器示意图



## 高性能SiC探测器对SiC材料的要求：

1. SiC衬底和外延层缺陷少，均匀性好；
2. 较小的反向漏电流和较高的反向偏压；
3. 较大的探测器灵敏区的厚度；
4. SiC表面态密度低。

## SiC探测器对金属电极的要求：

- 欧姆接触：低的比接触电阻率和高的稳定性；
- 肖特基接触：有较大的肖特基势垒高度，势垒分布均匀。



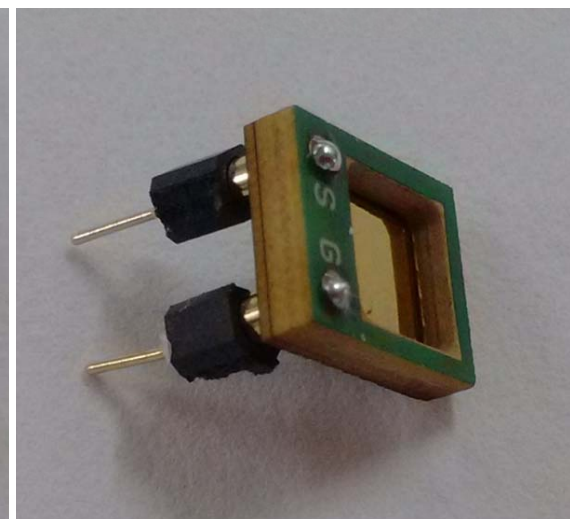
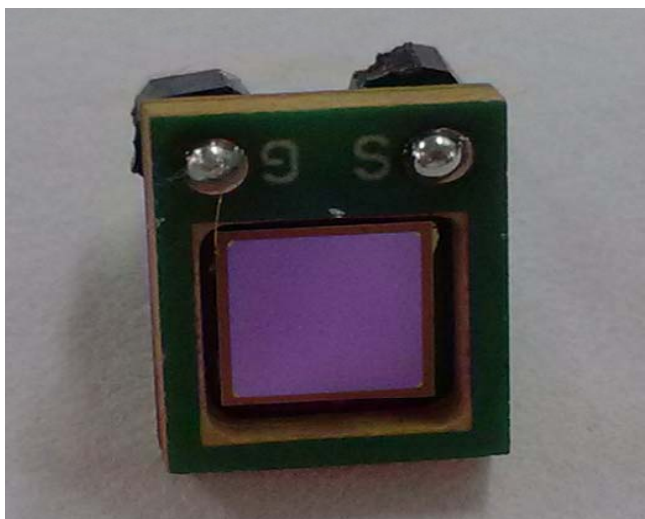
# 肖特基二极管的制备和表征

## 1. 肖特基二极管的封装

肖特基二极管  
结构示意图

|                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|
| Schottky contact, 0.1 $\mu\text{m}$ , Ni                               |
| 4H-SiC epi, 100 $\mu\text{m}$ , $N_D=2.9\text{E}14\text{cm}^{-3}$      |
| 4H-SiC buffer layer, 1 $\mu\text{m}$ , $N_D=1\text{E}18\text{cm}^{-3}$ |
| 4H-SiC bulk, 360 $\mu\text{m}$ , $N_D=1\text{E}18\text{cm}^{-3}$       |
| Ohmic contact, 0.1 $\mu\text{m}$ Ni/6 $\mu\text{m}$ Au                 |

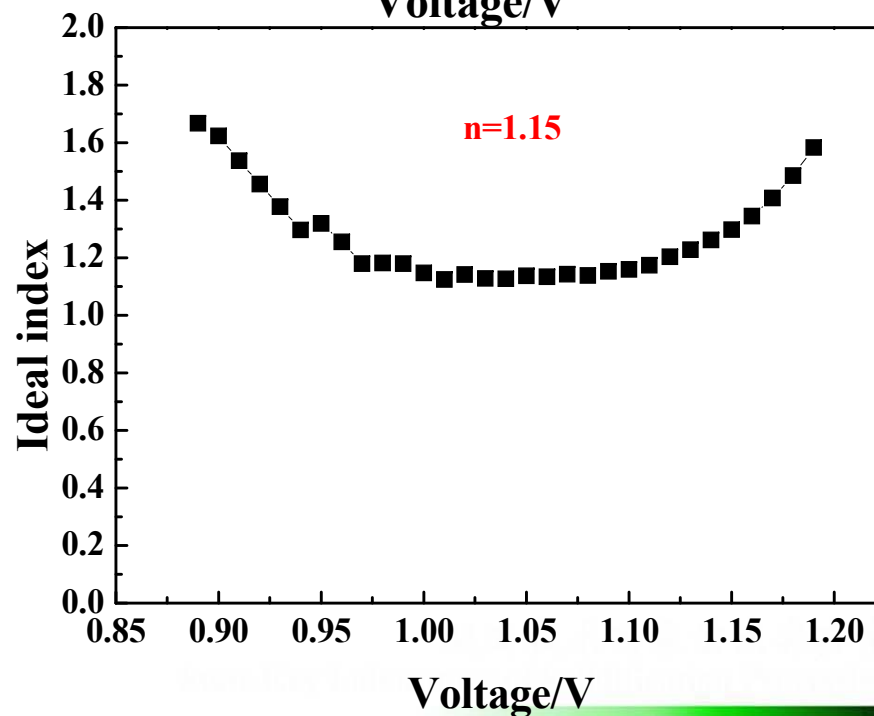
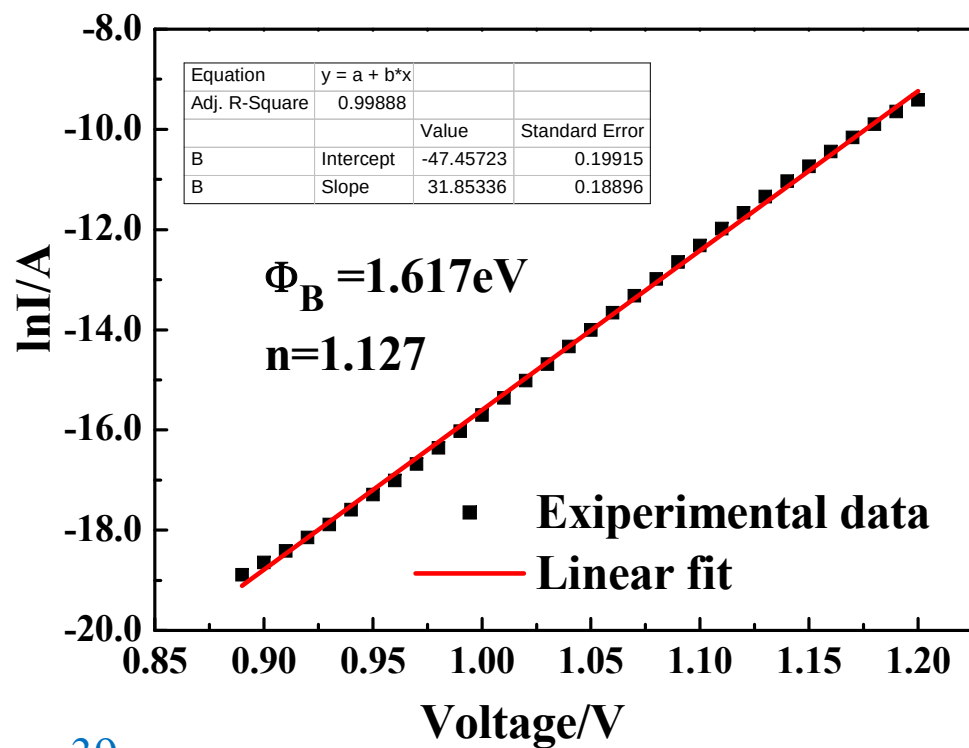
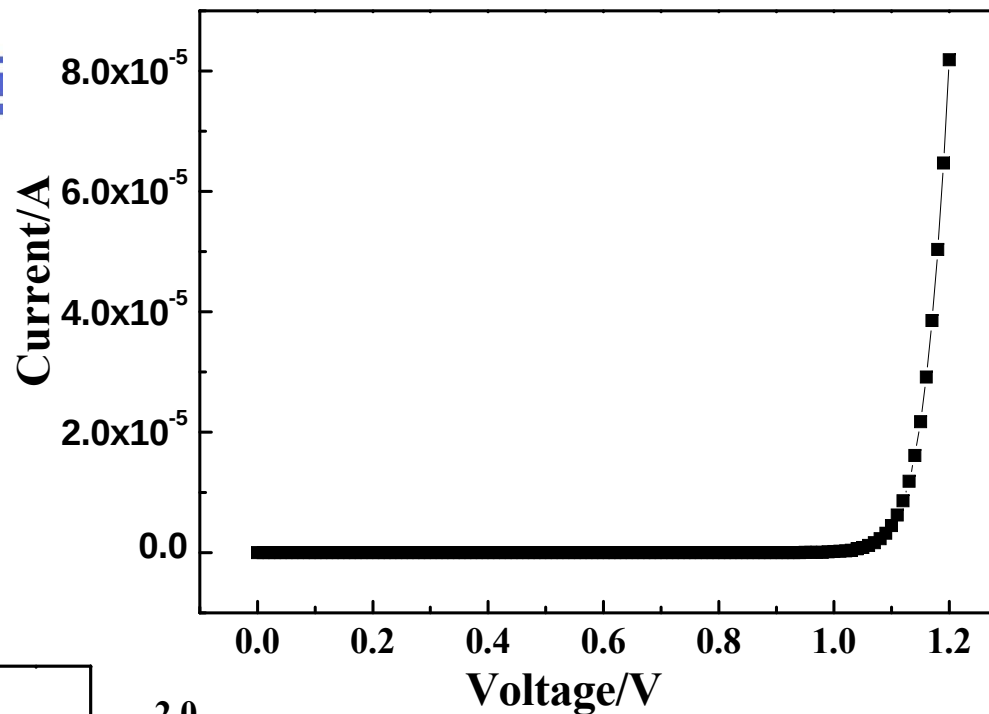
肖特基二极管探测  
器实物图





## 2. SiC肖特基二极管的测试

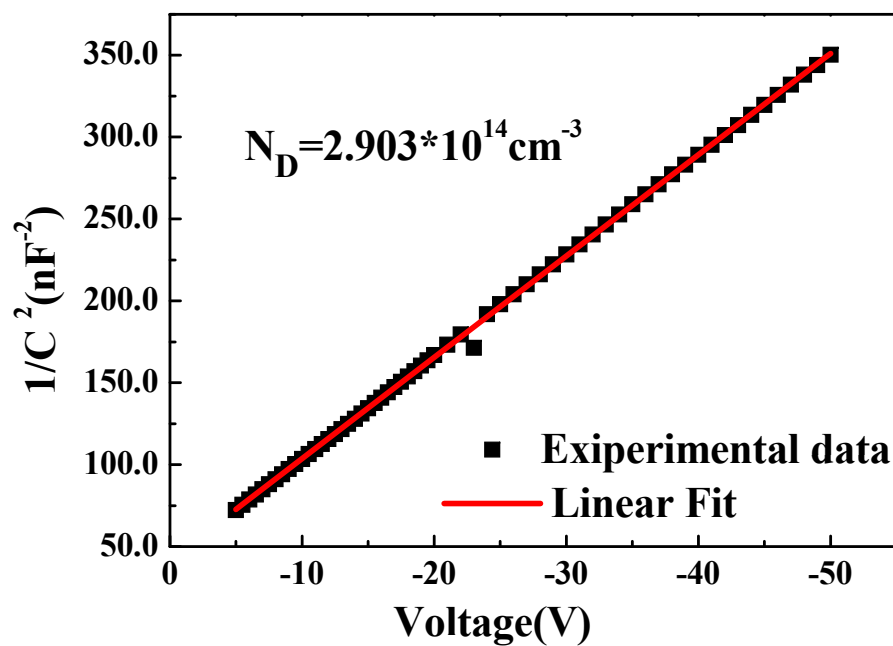
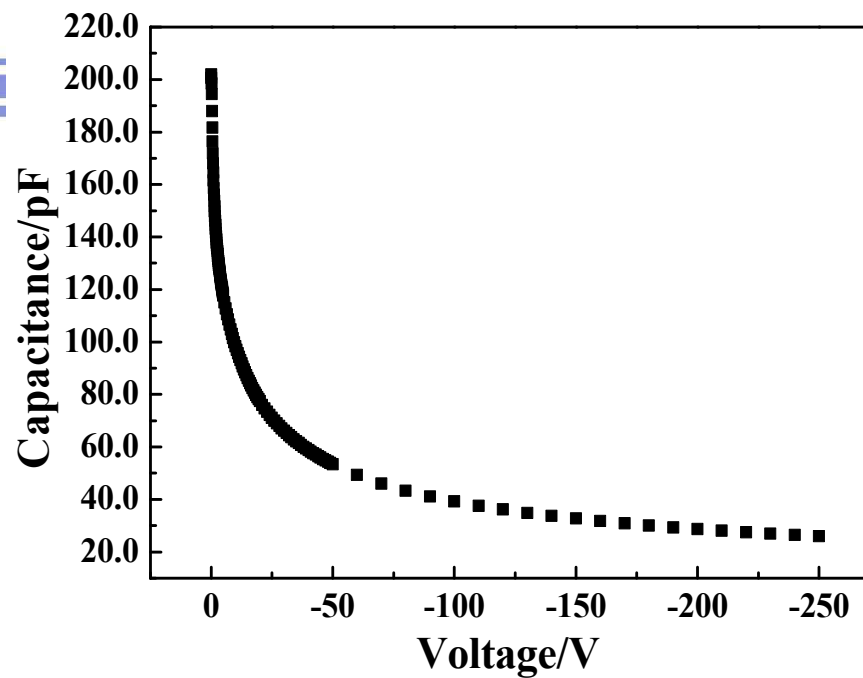
### I-V特性



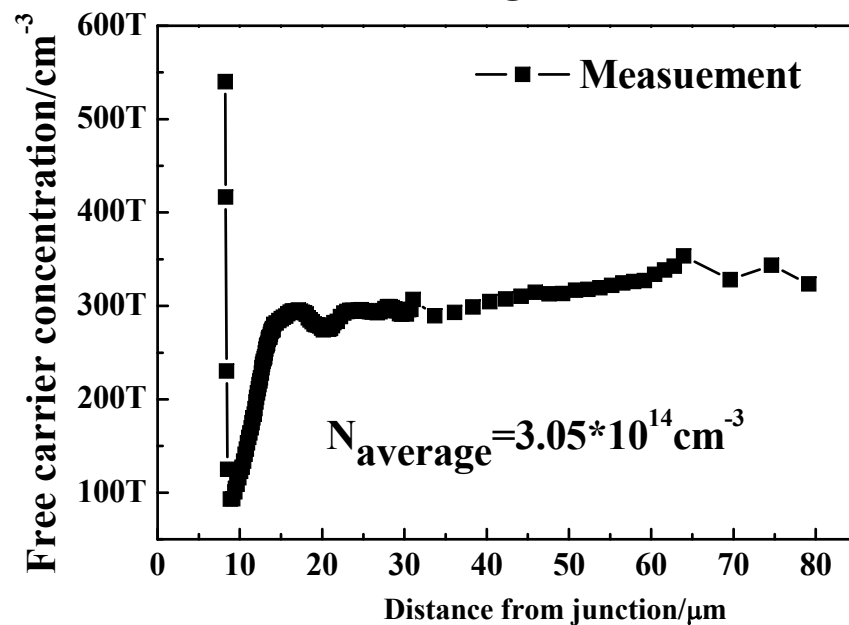


## C-V特性

### 肖特基接触的C-V特性



$1/C^2$ 与所加偏压的关系图谱及线性拟合

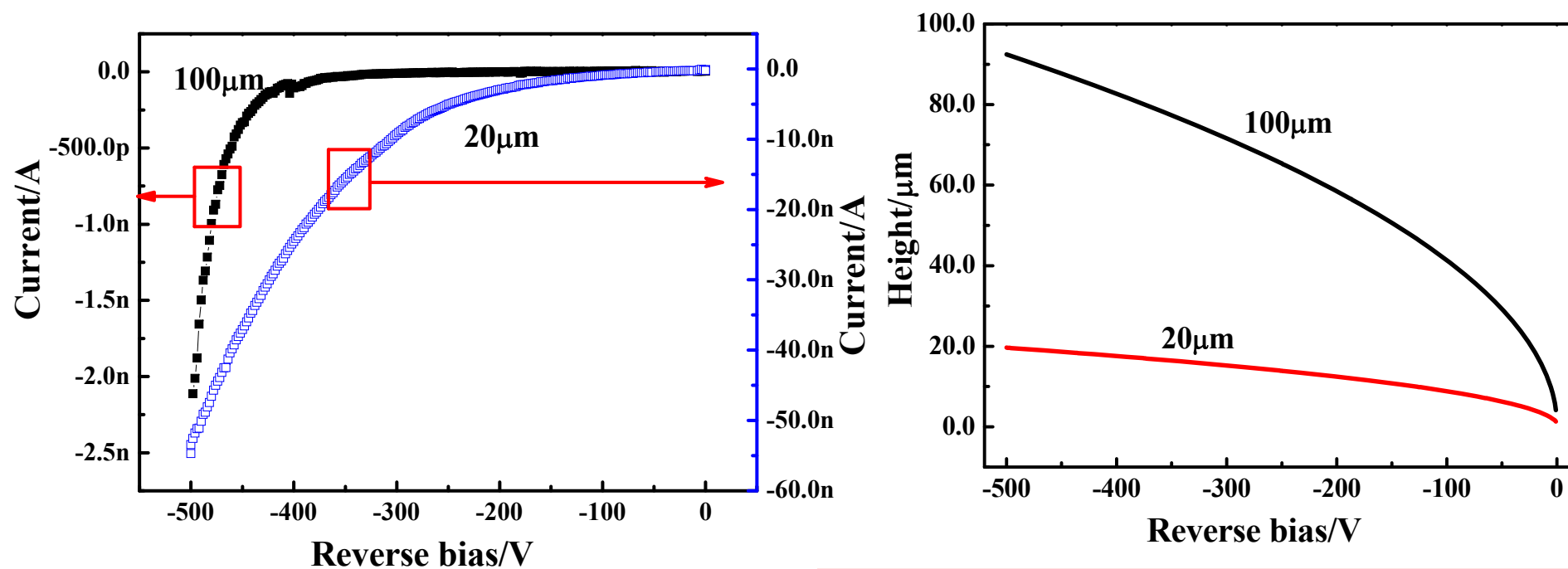


自由载流子浓度纵向分布图





## 反向I-V特性和耗尽层宽度随电压的变化关系

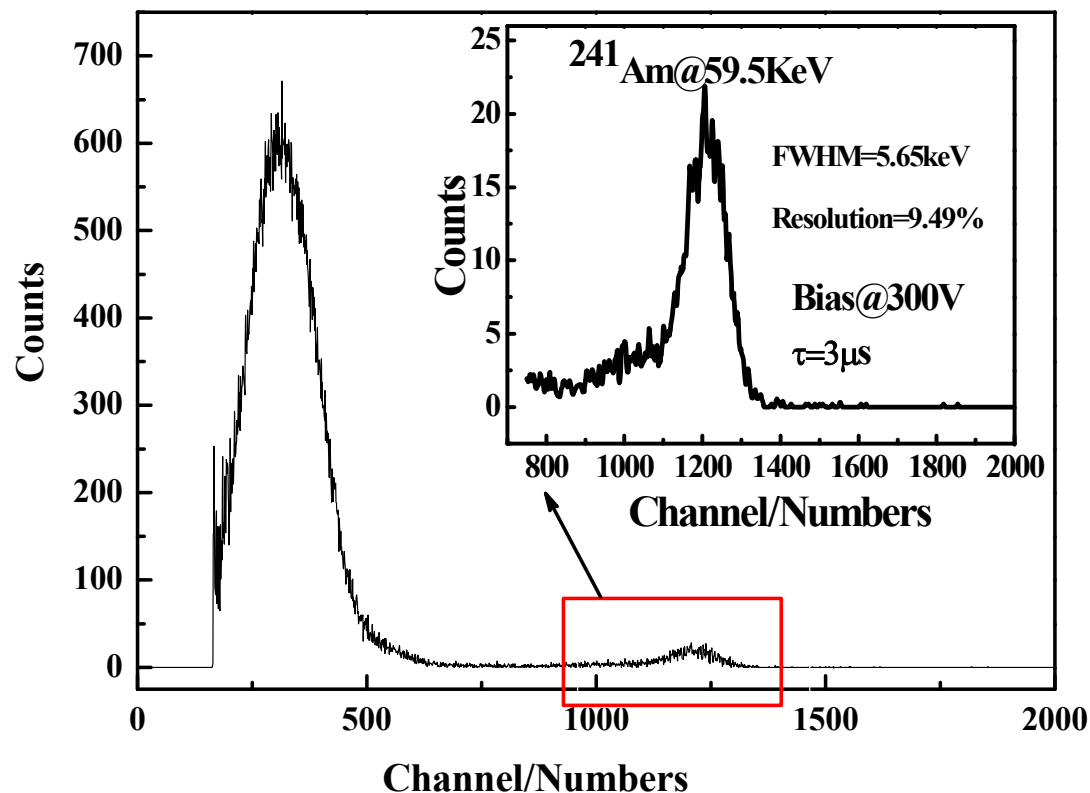
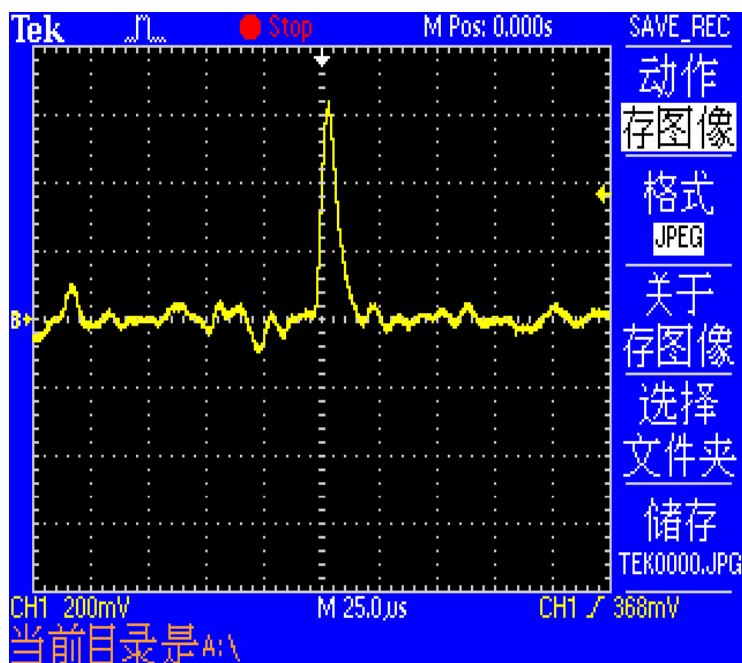
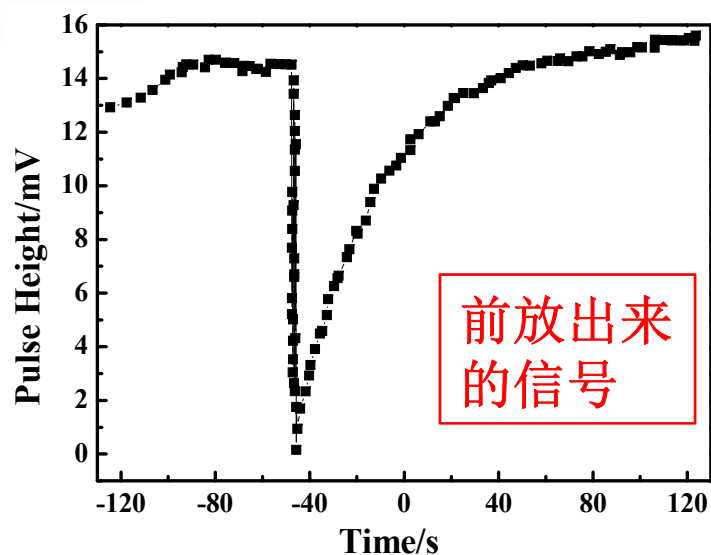


不同外延层厚度探测器的反向I-V特性

不同外延层厚度的探测器耗尽层宽度与所加偏压的关系图谱



## 100 $\mu$ m SiC肖特基二极管探测器的能谱测试



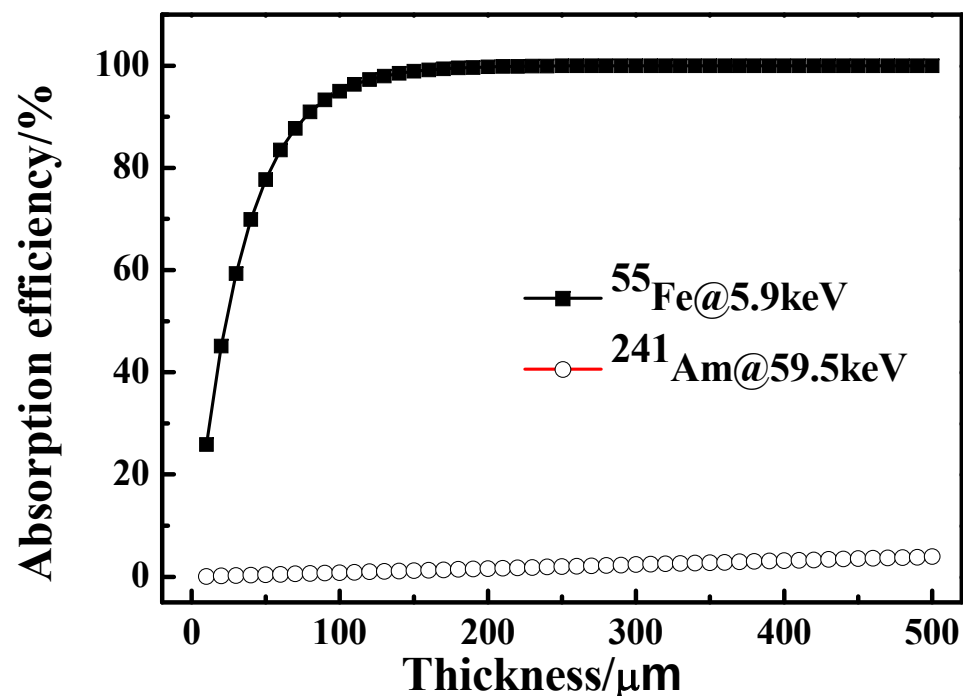
SiC探测器的能谱响应

目前国外的最好结果为1.2keV（2.1%）。

主放出来的信号



信号计数率为566.11，信号计数率较低，而采用的源为为100 $\mu$ Ci的强 $^{241}\text{Am}$ 源。



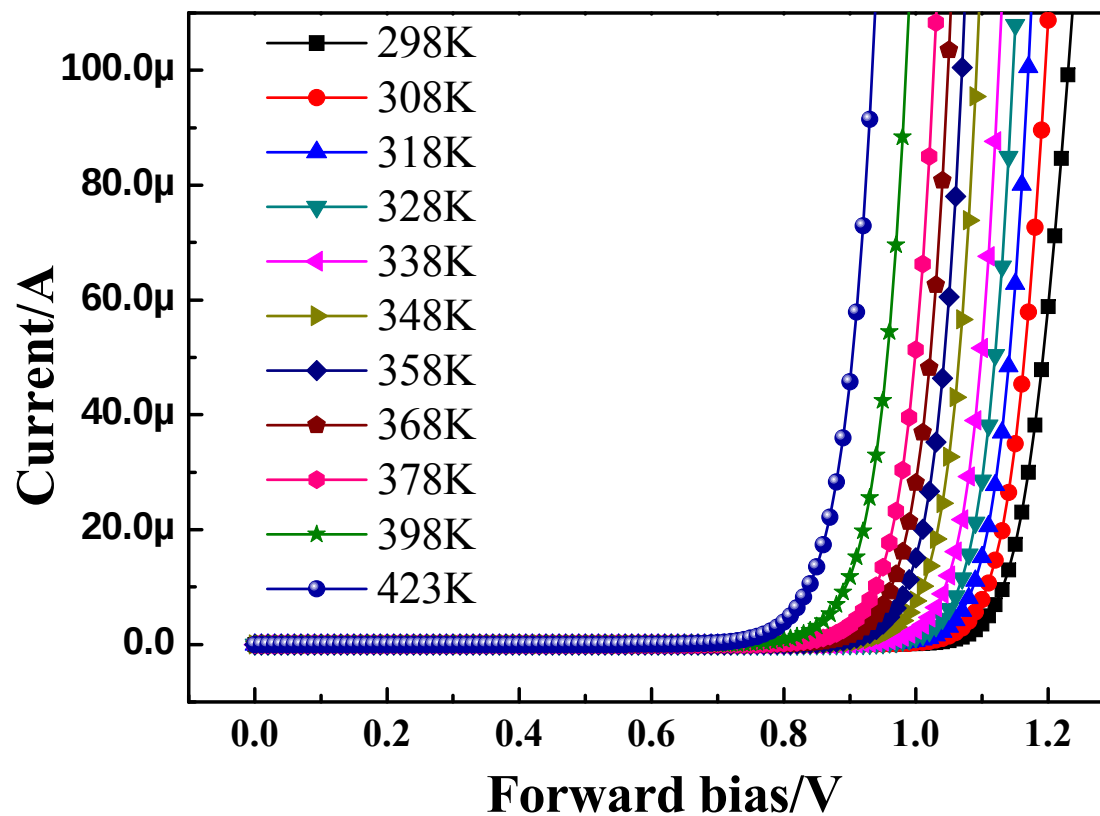
不同能量的 $\gamma$ 射线在不同有效区域厚度的SiC探测器的吸收效率

当SiC探测器全耗尽时，吸收率也只有0.8%，因此在灵敏区内产生载流子的光子较少，造成探测器的计数率低，需要较长的累积时间才能得到幅度较高的全能峰。

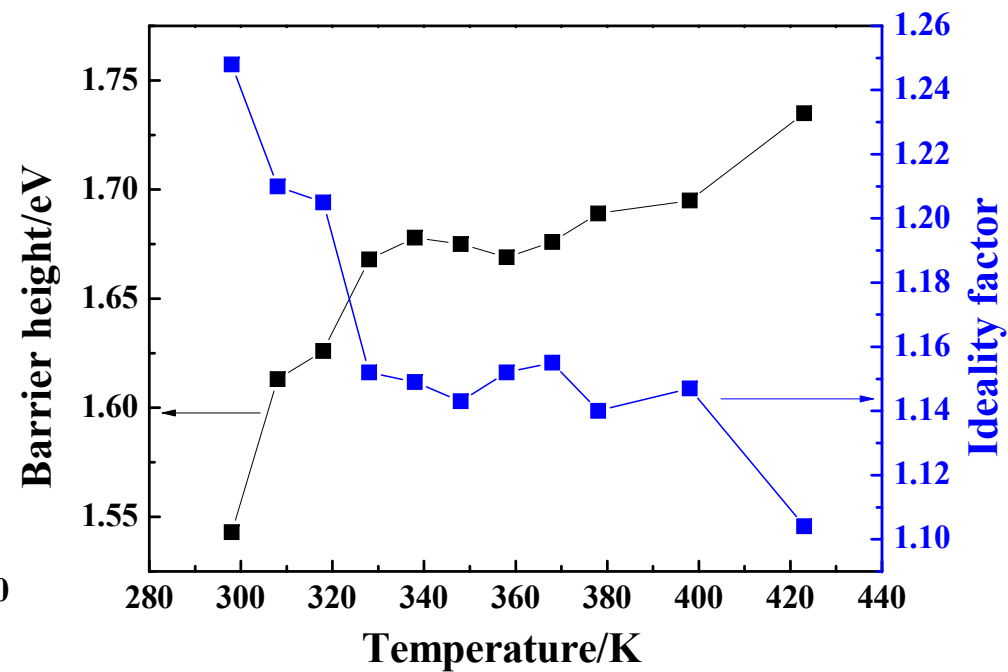
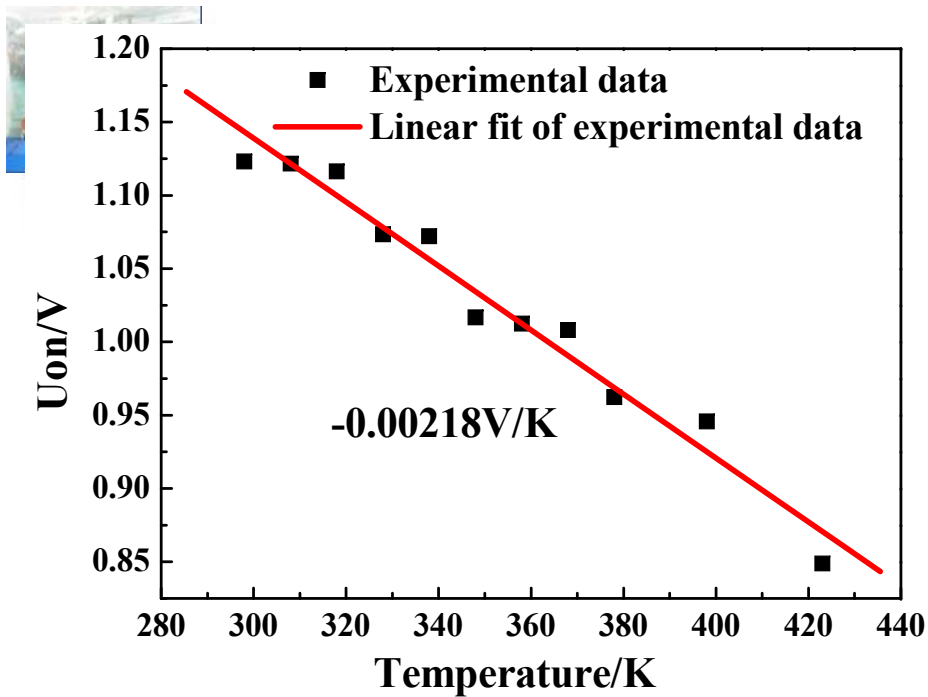


## SiC肖特基二极管探测器耐高温性能测试

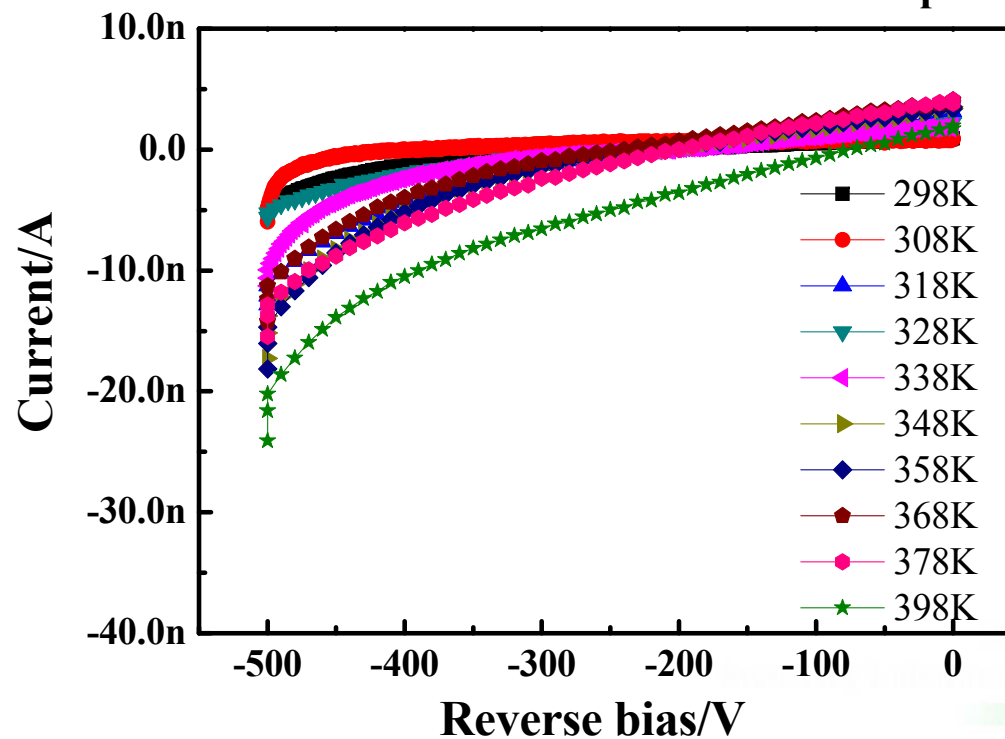
4H-SiC的禁带宽度是3.3eV，是Si的3倍，由其构成的探测器在高温下的性能将明显优于Si和Ge探测器。



外延层厚度为100umSiC探测器在不同温度下的正向I-V 特性



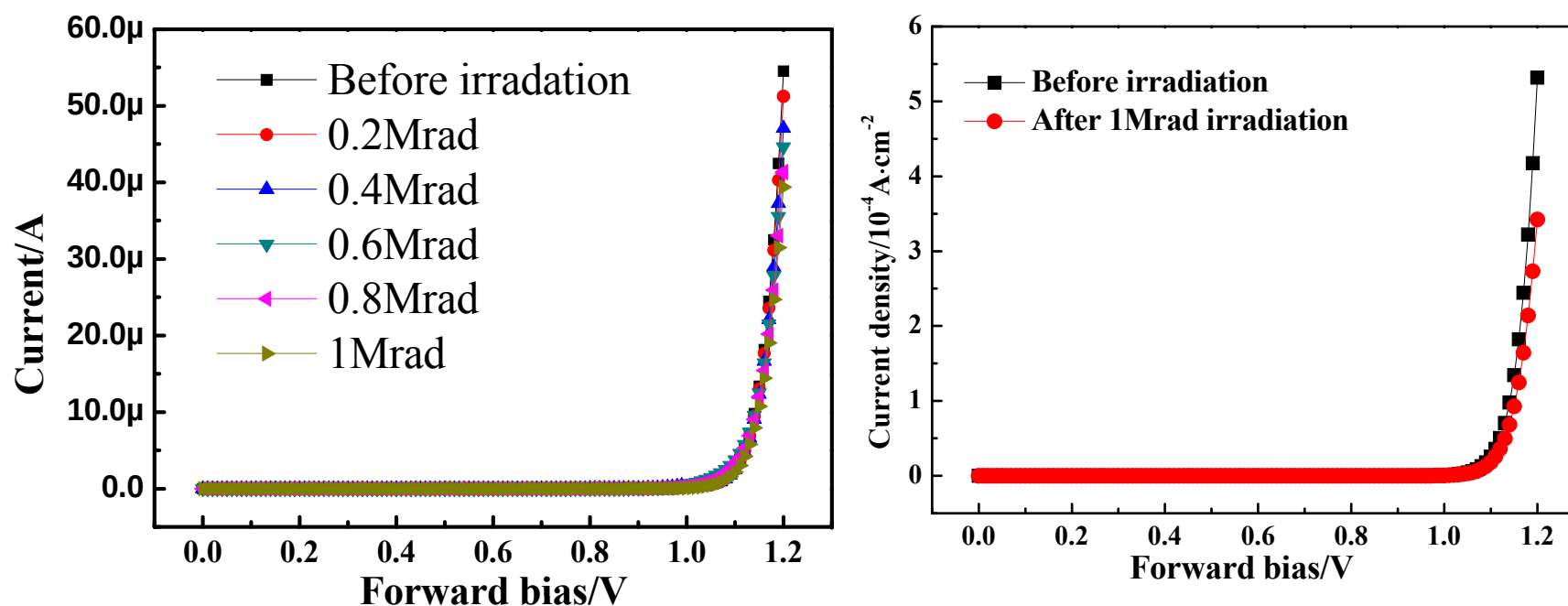
反向I-V特性





## SiC肖特基二极管探测器耐辐照性能测试

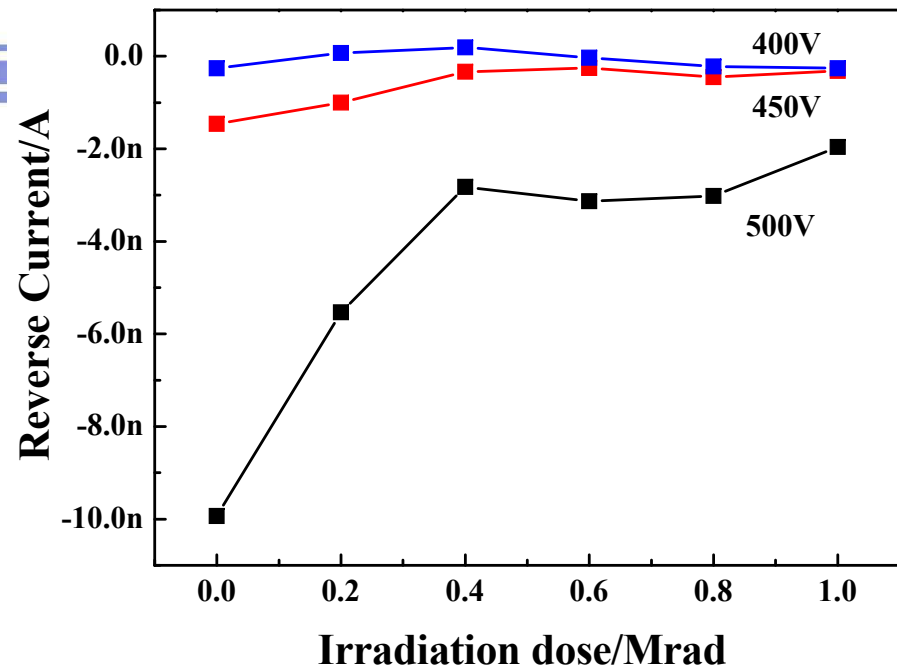
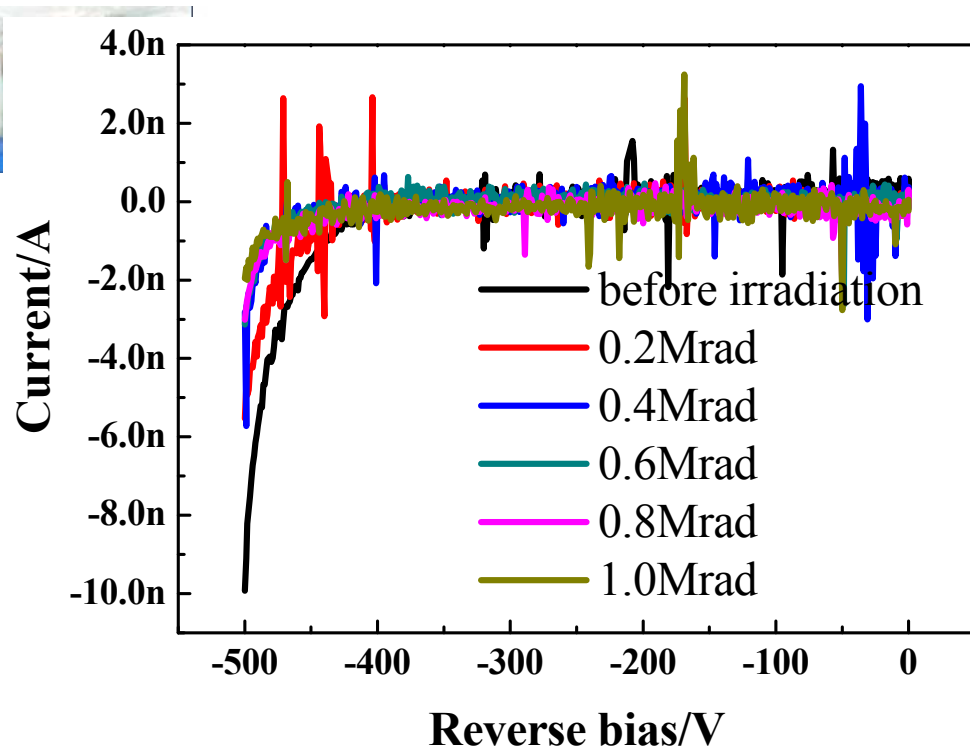
辐照试验是在北大化学系进行，辐射源为 $^{60}\text{Co}$ ，能量为1.25MeV，剂量率为50rad/s ( $1.8 \times 10^5$  /h)。



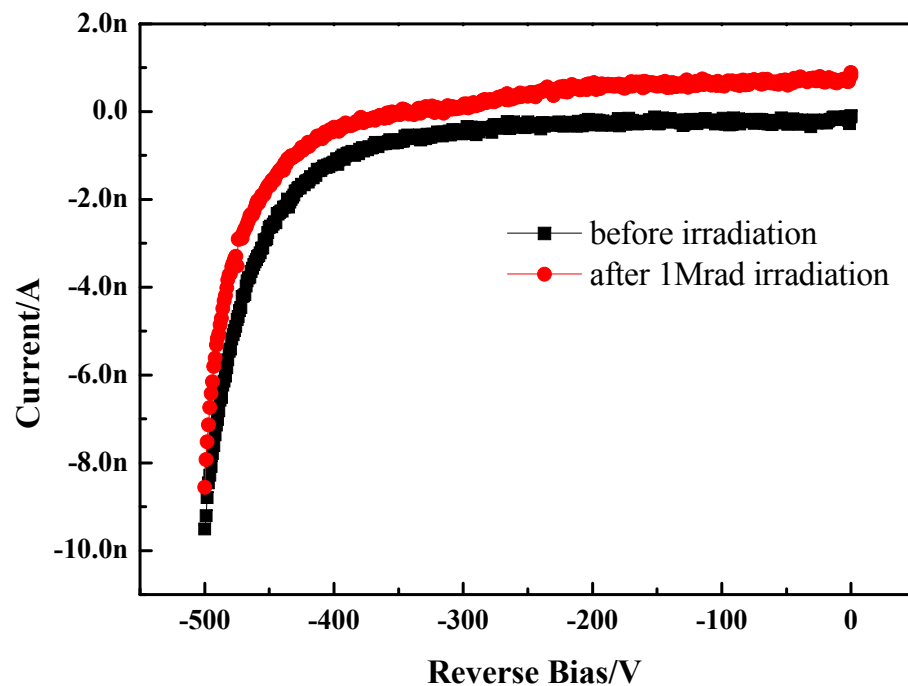
不同累积总剂量下SiC二极管探测器的正反向I-V 特性

计算出辐照前后探测器的势垒高度分别为1.678eV和1.691eV，理想因子分别为1.116和1.111。经过1Mrad的辐照剂量后，探测器的势垒高度和理想因子均变化不大。





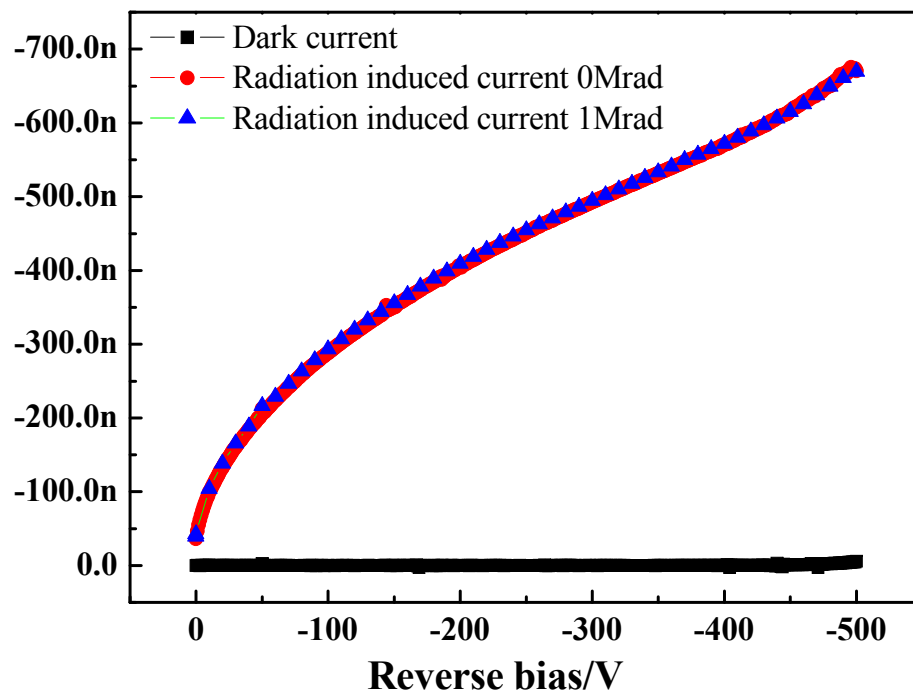
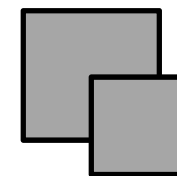
不同累积辐照剂量下的漏电流



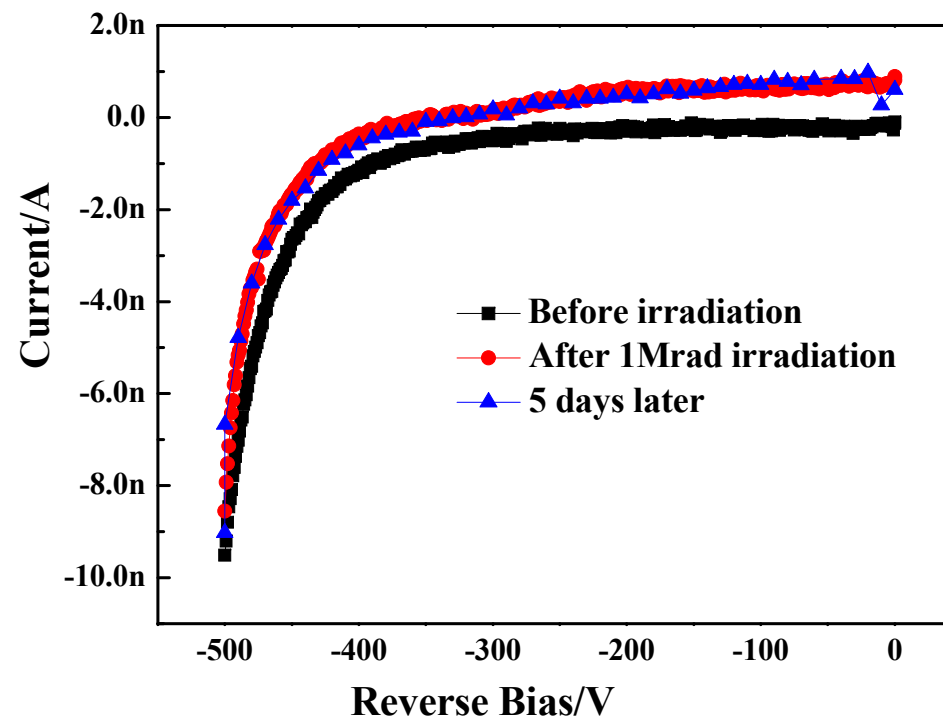
标准测试线得到的SiC  $\gamma$   
射线探测器辐照前后的  
反向I-V特性



## SiC肖特基二极管探测器耐辐照性能测试



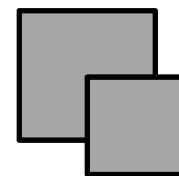
辐照过程中SiC  $\gamma$ 射线探测器的反向I-V特性



辐照后Ni/4H-SiC SBD探测器的退火效应

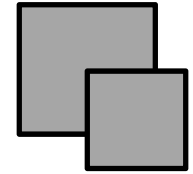


# 总结



针对目前空前X、 $\gamma$ 射线探测和CEPC同步辐射光源对辐射探测器的需求，简单介绍本课题组在Si-PIN、CdZnTe和SiC探测器和样机方面的研究进展。

- ➡ 2017年6月发射的慧眼HXMT卫星 中，ME共装有432个MEDET探测器，每个MEDET包含两个2像素Si-PIN探测器，探测能区为5-30keV，能量分辨率为3keV@59.5keV(-5 °C)。
- ➡ CdZnTe探测器样机应用于XTP背景型号准直型X射线望远镜中，能量分辨率为4keV@ 59.5KeV，时间分辨率为10 $\mu$ s；以及GECAM的载荷伽玛射线探测器，能谱分辨率为4.63%@59.5keV，探测下限为3keV 。
- ➡ 采用4H-SiC外延片制备SBD  $\alpha$ 和 $\gamma$ 射线探测器，得到SiC探测器的能量分辨率为5.65keV@ 59.5KeV (9.49%)，可以在25-125 °C条件下正常工作，经过1Mrad  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线辐照后，探测器性能基本没有变化。



欢迎大家批评指正!