



半导体中子探测器研究现状与发展趋势

修青磊

高能所东莞研究部-中子科学部-探测器与电子学组

2023年05月12日, 合肥

一

中子探测的应用与需求

二

半导体中子探测器研究现状

三

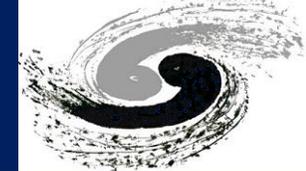
半导体中子探测器未来展望

四

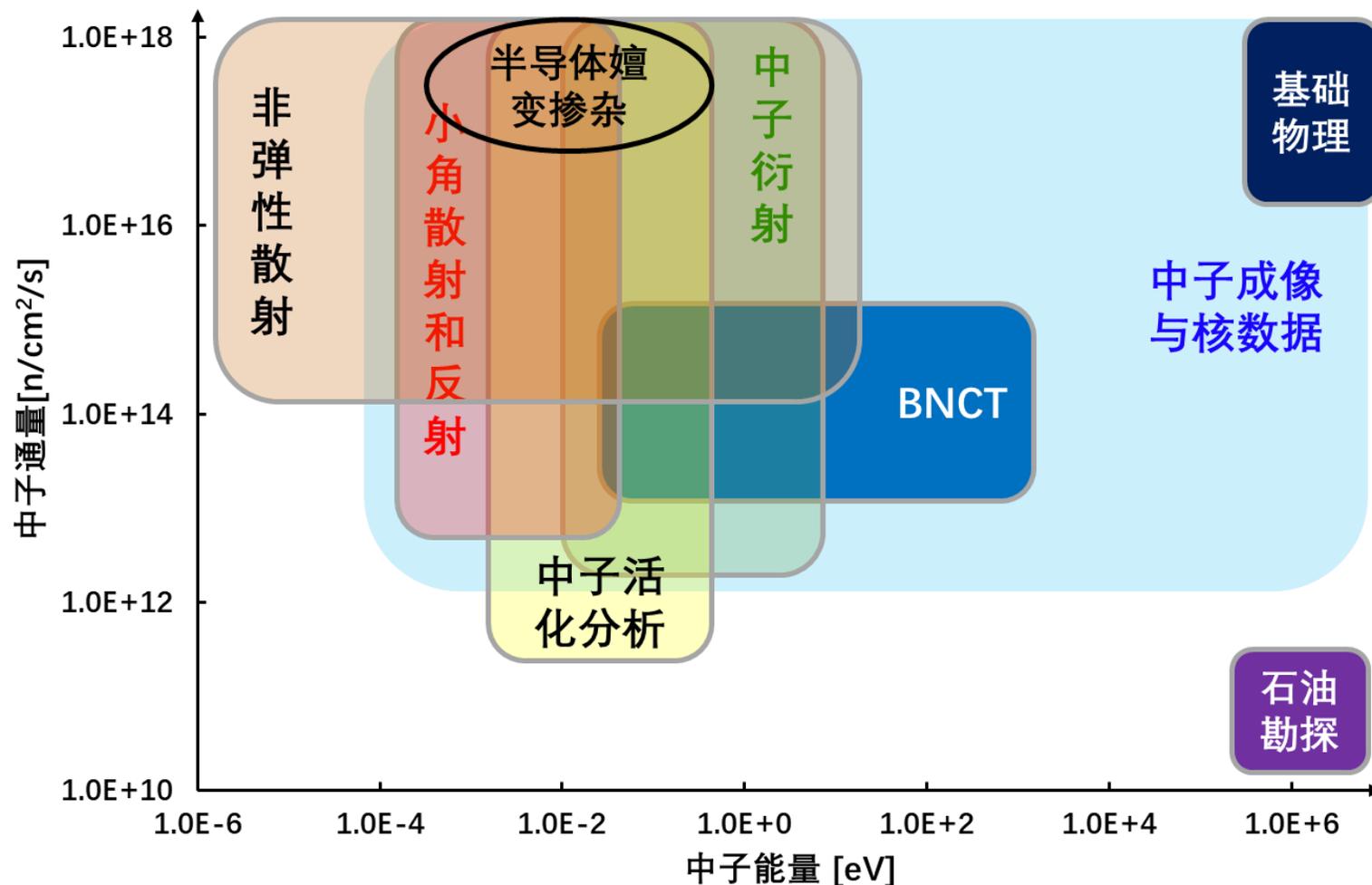
CSNS探测器微加工平台简介

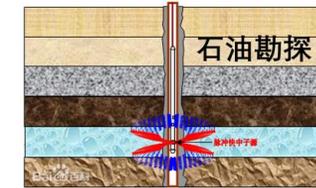
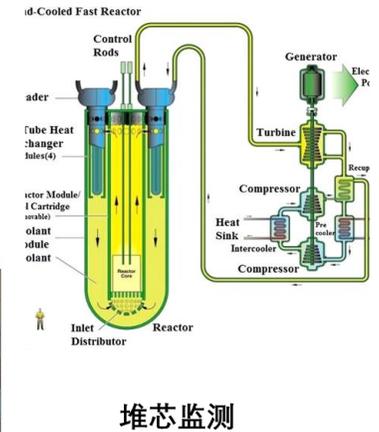
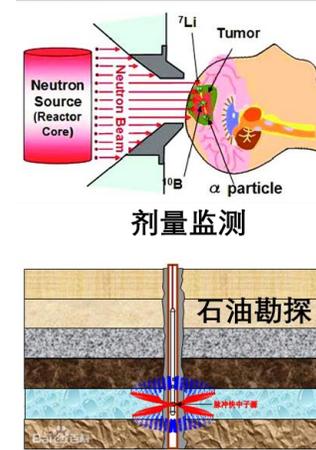
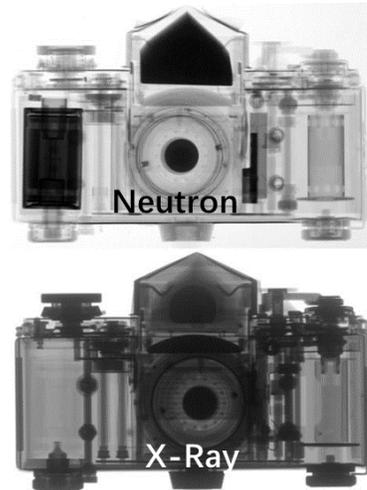
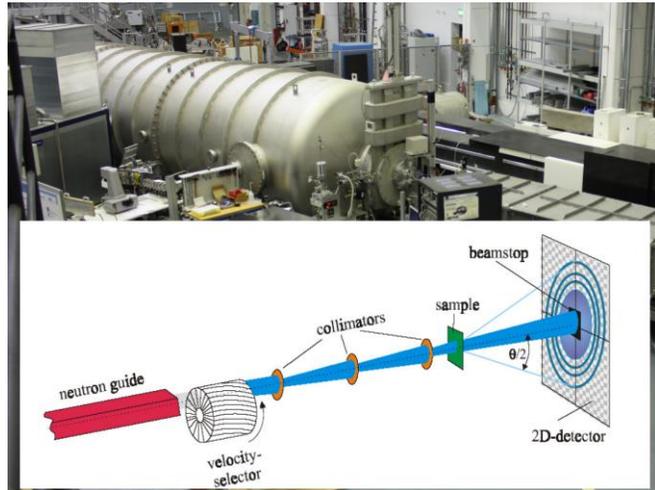
五

总结



- 中子检测是一种广泛应用的无损检测技术
- 中子散射实验
 - 中子衍射
 - 小角散射
 - 非弹性散射
 - 反射率
- 中子成像
- 石油勘探
- 癌症治疗 (BNCT)
- 半导体掺杂
- 中子辐照效应
- 反应堆监测
- 国防安全





应用类型	中子散射	中子成像	中子计数
应用领域	分子和原子层级材料结构检测	高分辨成像、能量选择成像、动态成像	剂量监测、石油勘探、中子辐照……
实验环境	散裂中子源、反应堆中子源	固定式：散裂、反应堆 移动式：小型中子源	原位测量
性能要求	<ul style="list-style-type: none"> 角分辨：< 5mrad (空间分辨 < 10mm@2m) 计数率：> 200kHz 中子探测效率：> 40% 探测器面积：> 1m² 时间分辨：~ 1μs 	<ul style="list-style-type: none"> 空间分辨：< 100μm 视野范围：> 100mm 时间分辨：~ 1μs 帧频：~ kHz 	<ul style="list-style-type: none"> 高计数率 耐辐照、耐高温 体积紧凑、不影响中子场分布

一

中子探测的应用与需求

二

半导体中子探测器研究现状

三

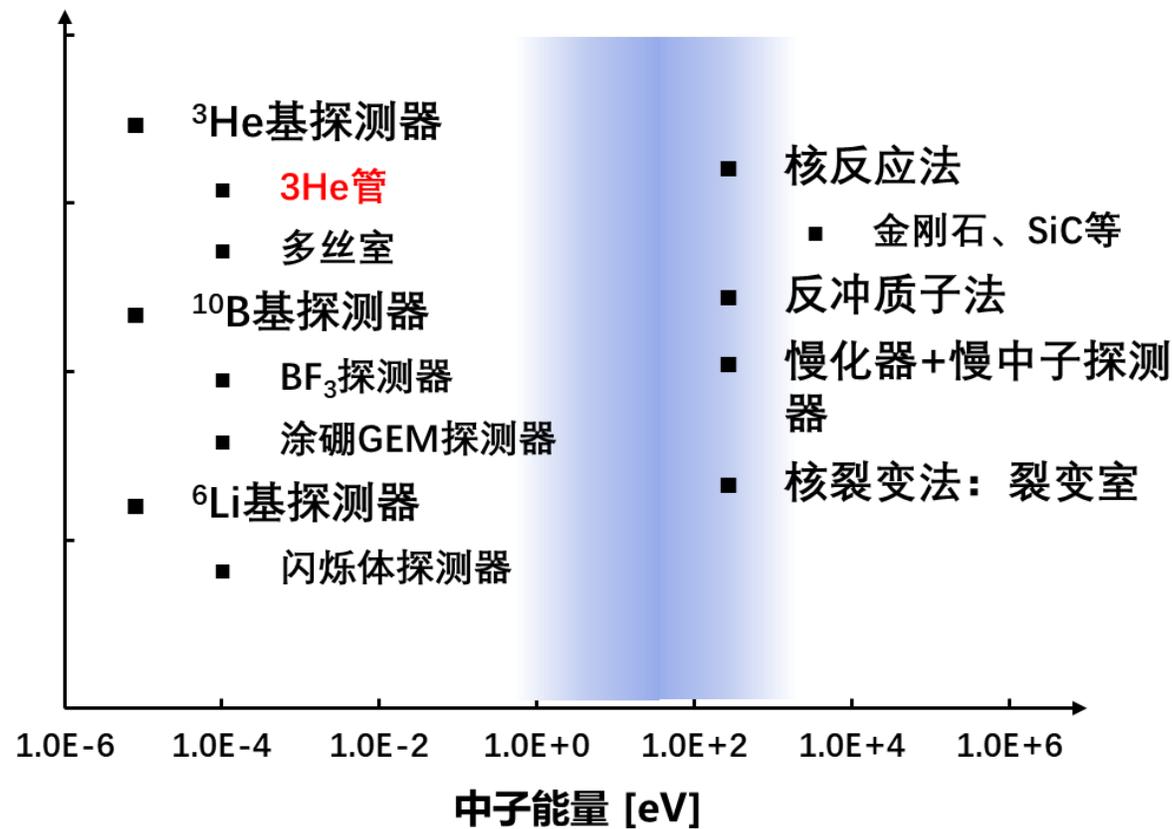
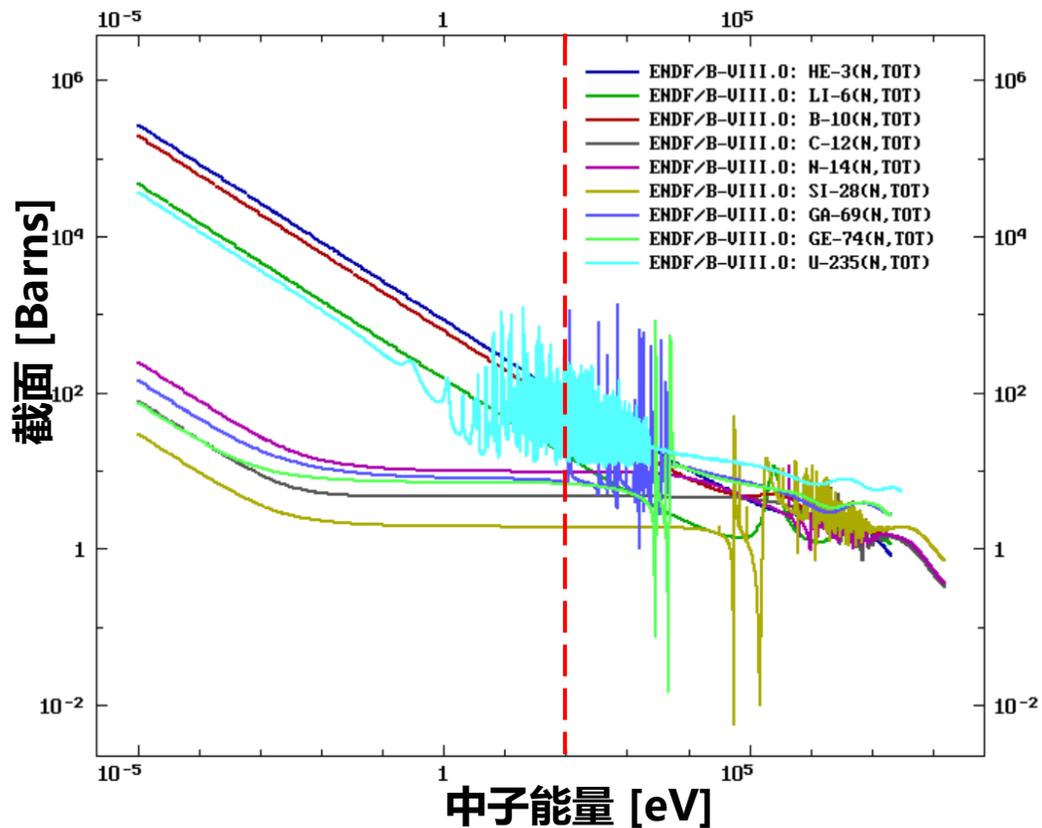
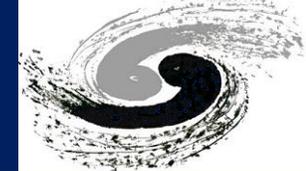
半导体中子探测器未来展望

四

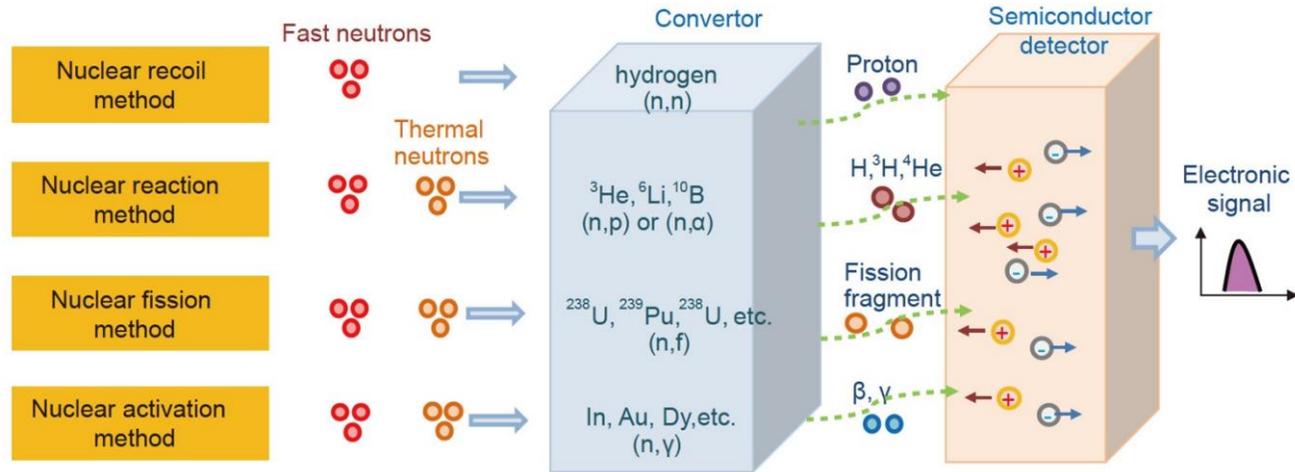
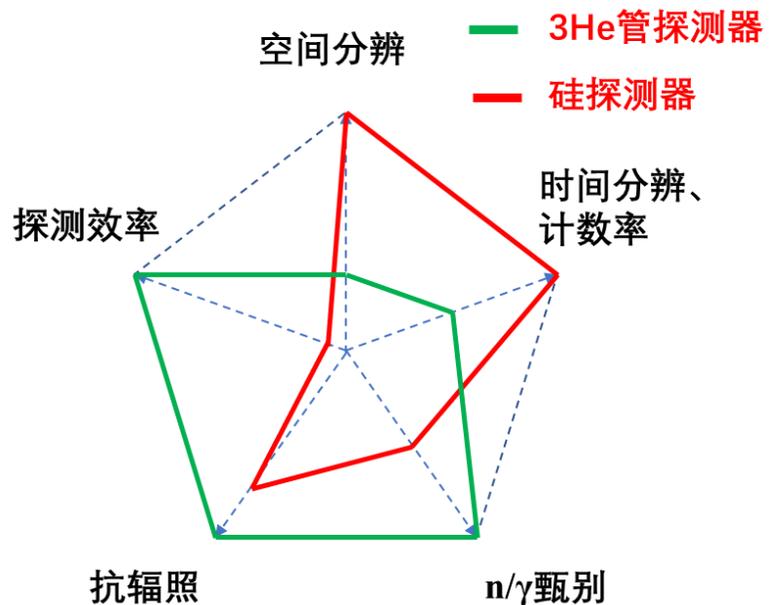
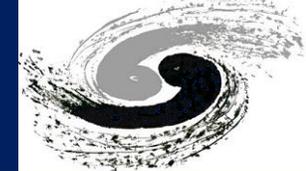
CSNS探测器微加工平台简介

五

总结

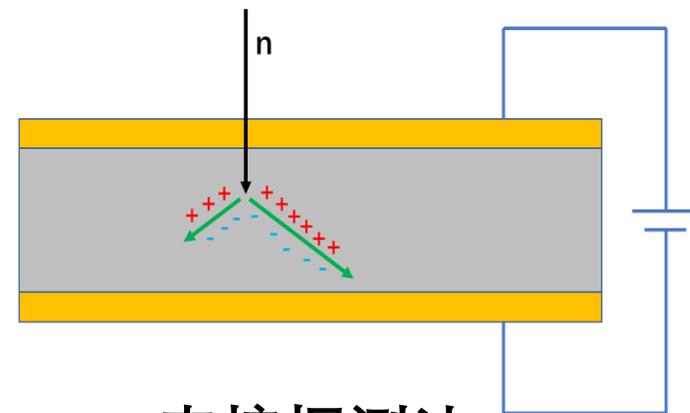


- 材料对于中子探测至关重要
- 低能中子：高探测效率为主，³He、¹⁰B、⁶Li、Gd、U等材料，**³He气体探测器占据统治地位**
- 快中子和高能中子：不同元素反应截面相差不大、抗辐照、时间响应等更加重要，金刚石、SiC、闪烁体、慢化材料等

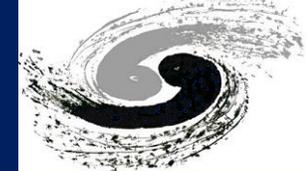


间接探测法

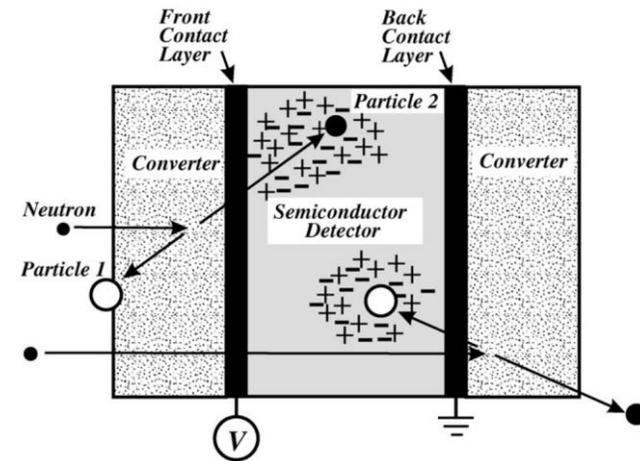
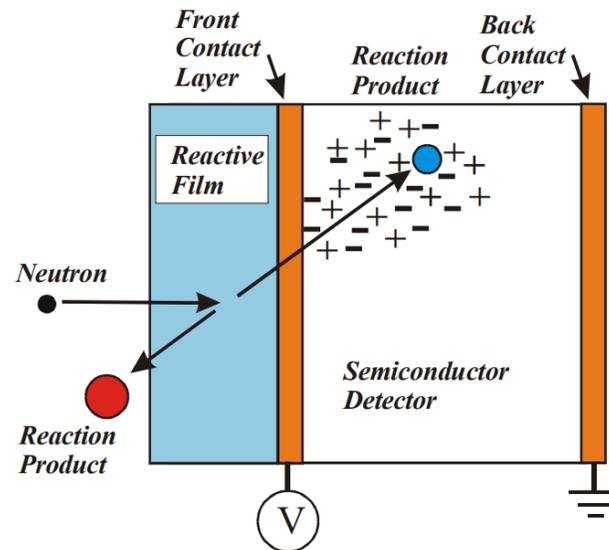
- 与传统中子探测器相比，具有更高的空间分辨和时间分辨，体积更加紧凑
- 探测效率、抗辐照能力和n/γ甄别能力需要提升
- **间接探测法**：在普通半导体探测器表面涂敷中子转化材料，提高中子探测效率
 - 基于成熟半导体探测器技术，技术路线简单，进展相对较快
- **直接探测法**：中子直接与半导体材料发生核反应，产生次级带电粒子
 - 研制专用半导体器件，技术路线复杂，进展相对较慢



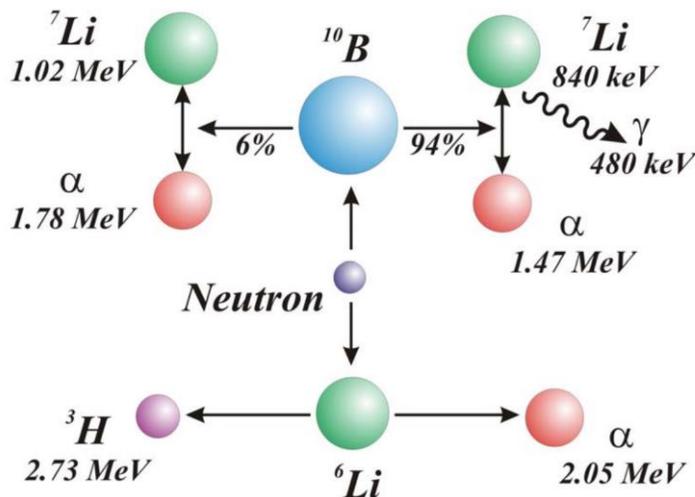
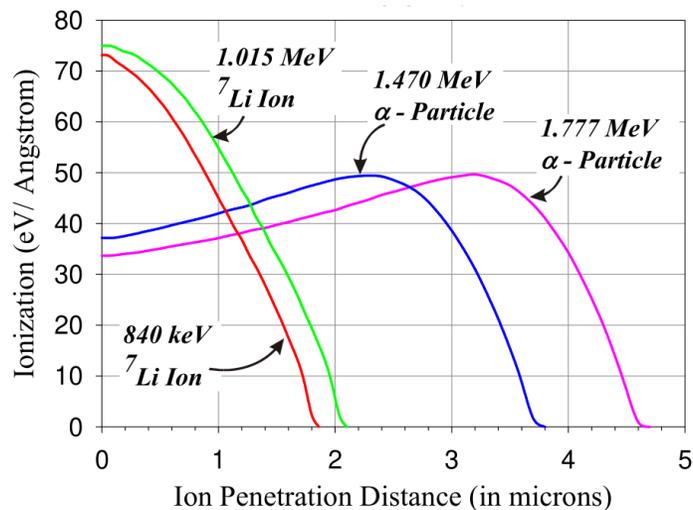
直接探测法



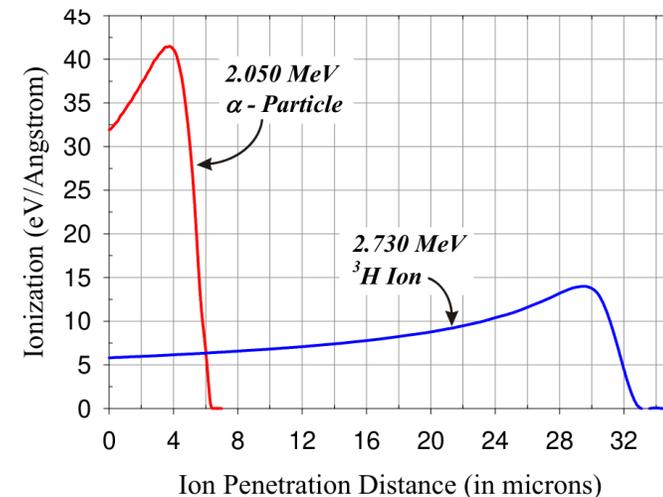
- 半导体探测器表面镀 ^{10}B 或 ^6LiF ，工艺相对简单，不受半导体探测器材料限制
- 单层膜探测效率:4%~5%
 - 薄膜厚度与粒子射程
- 主要用于中子成像、中子剂量监测等

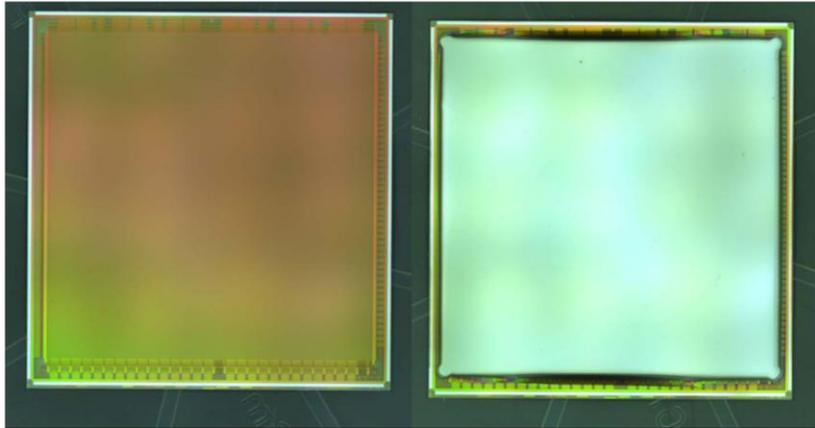


Bragg Ionization Curves in Boron



Bragg Ionization Curves in LiF

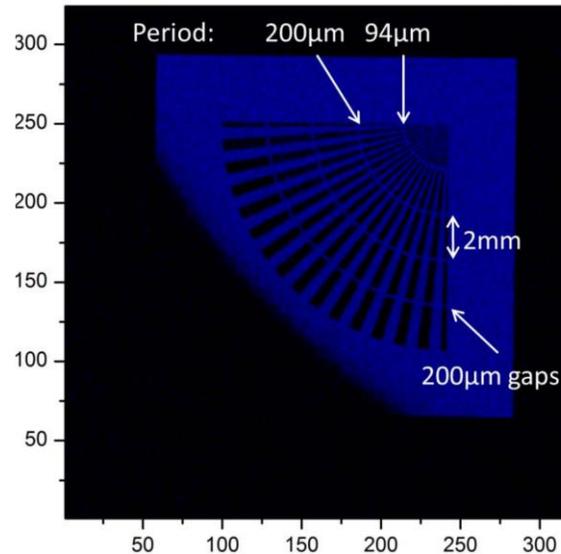
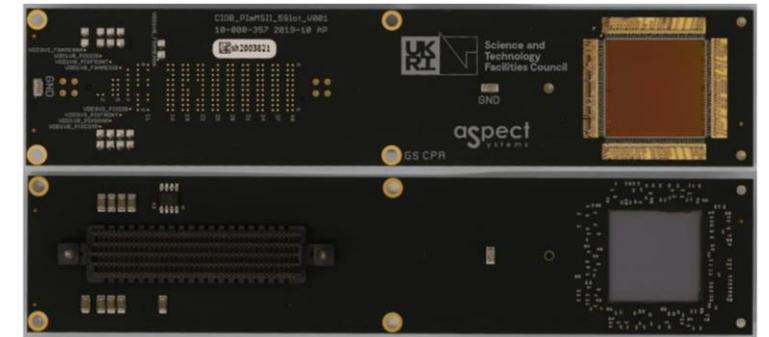
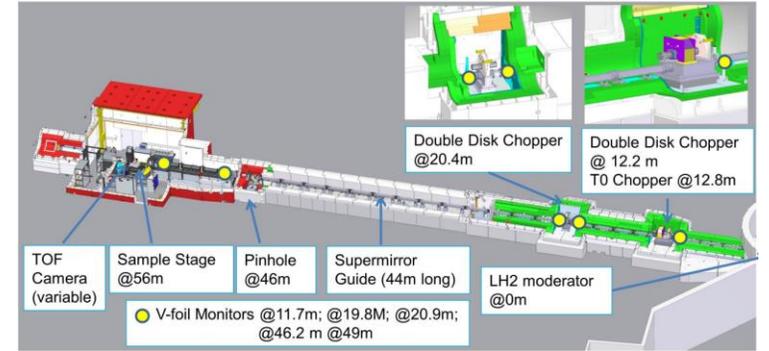


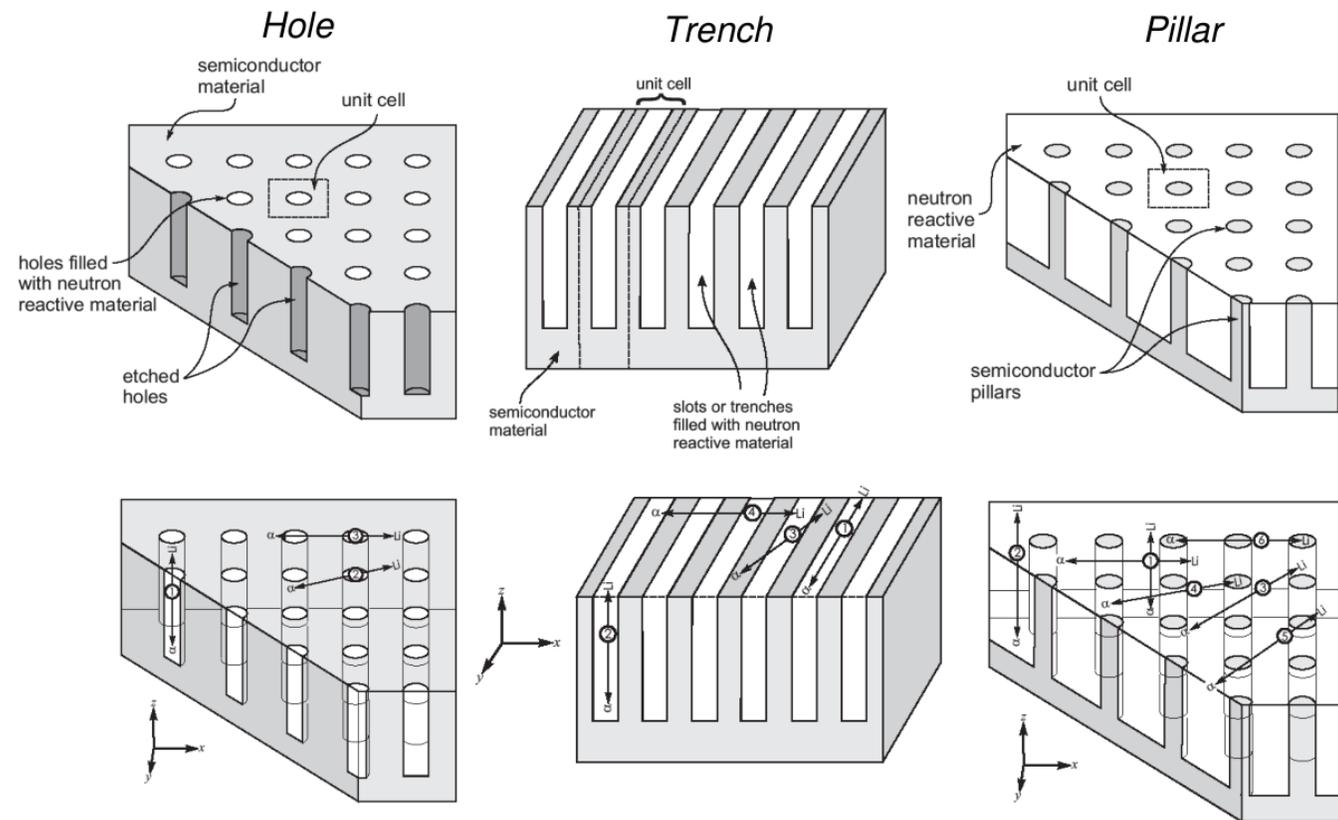
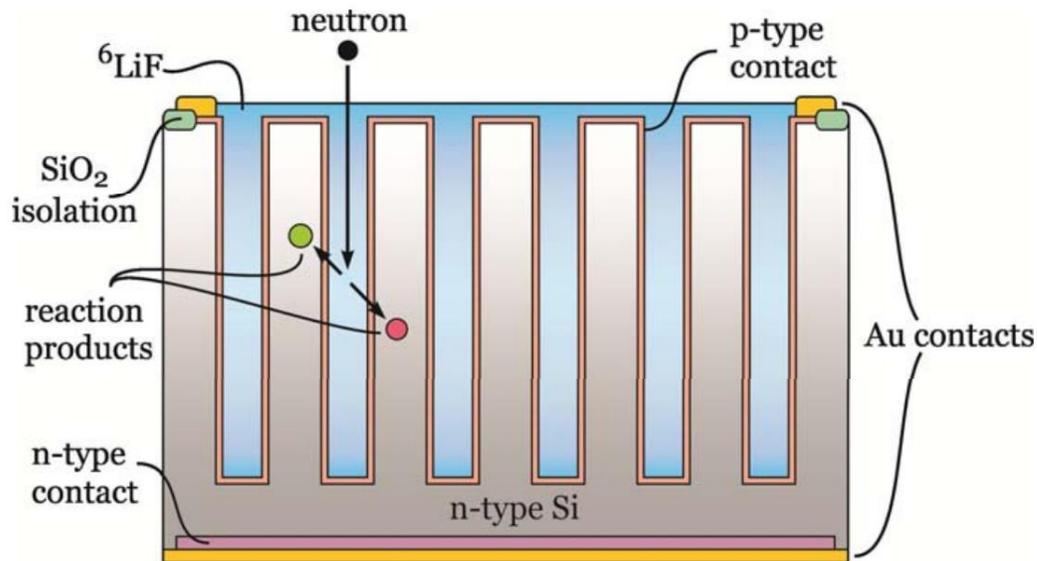
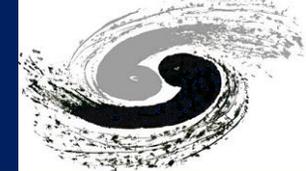


SPECIFICATION OF THE PImMS2 CMOS SENSOR

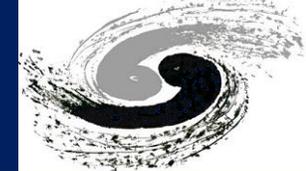
Parameter	Value
Pixel size	$70 \times 70 \mu\text{m}$
Pixel number	$324 \times 324 = 104976$
Active area	$22.7 \text{ mm} \times 22.7 \text{ mm}$
Bit depth (time bins available)	12 bit (maximum 4095)
Smallest temporal bin width	12.5 ns
Registers per pixel	4

- 基于PImMS2芯片研制
- 在英国ISIS散裂中子源IMAT成像谱仪上得到应用



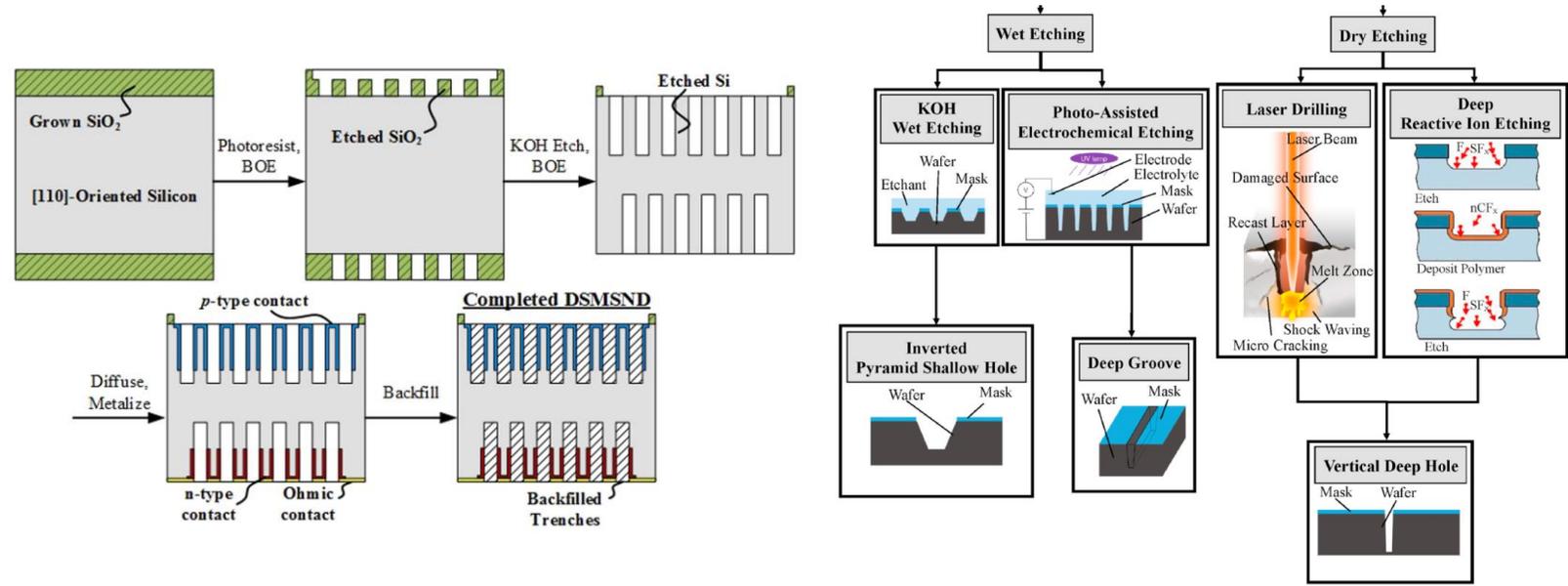


- 通过在半导体探测器中制备微纳结构，进一步提高中子探测效率
- 微结构类型：小孔、沟槽（直沟槽、曲线沟槽）、柱体等



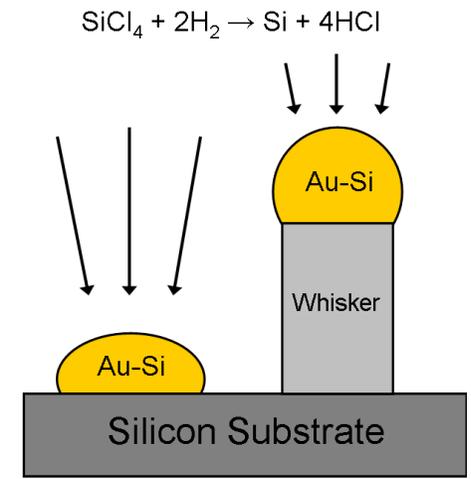
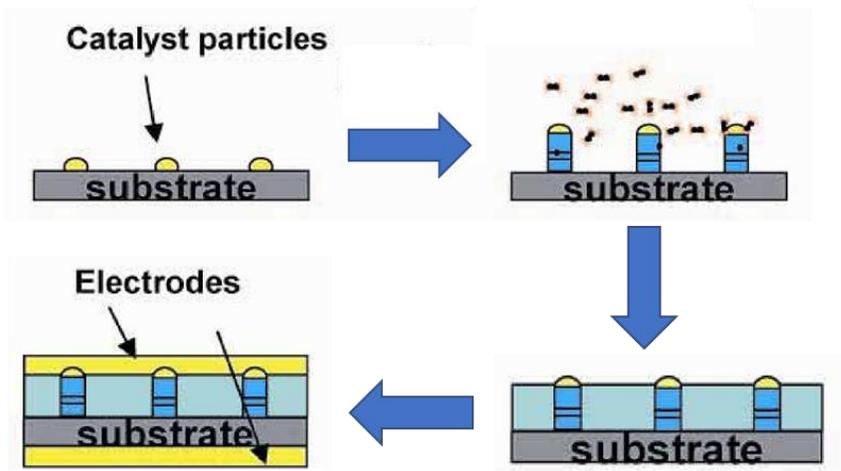
刻蚀工艺:

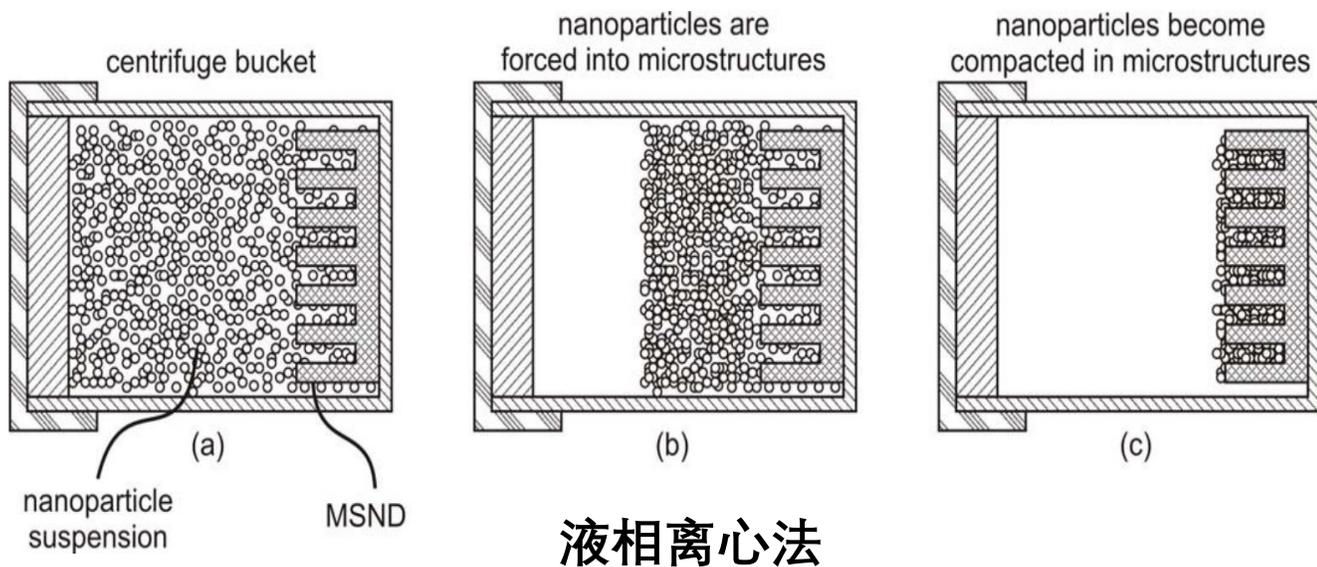
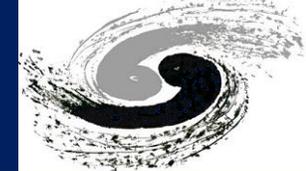
- 基底材料: 硅、SiC、GaAs等
- 其中深硅刻蚀工艺比较成熟, 应用相对广泛
 - 深反应等离子刻
 - KOH湿法腐蚀
 - 电化学腐蚀
 - 激光刻蚀



外延工艺:

- 一维硅纳米线: 气液固生长机制 (VLS)
- 应用相对较少



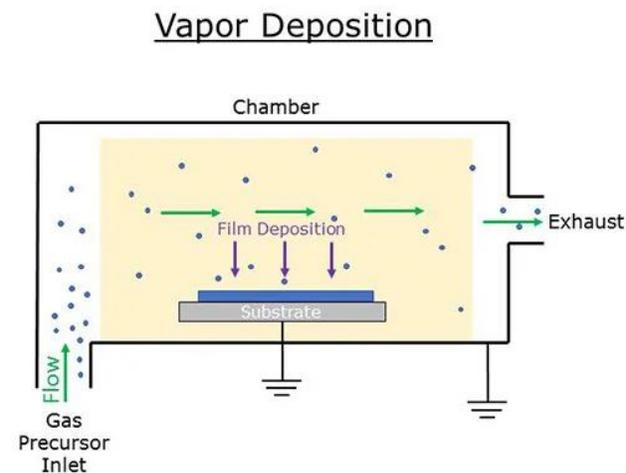


• 液相离心法：

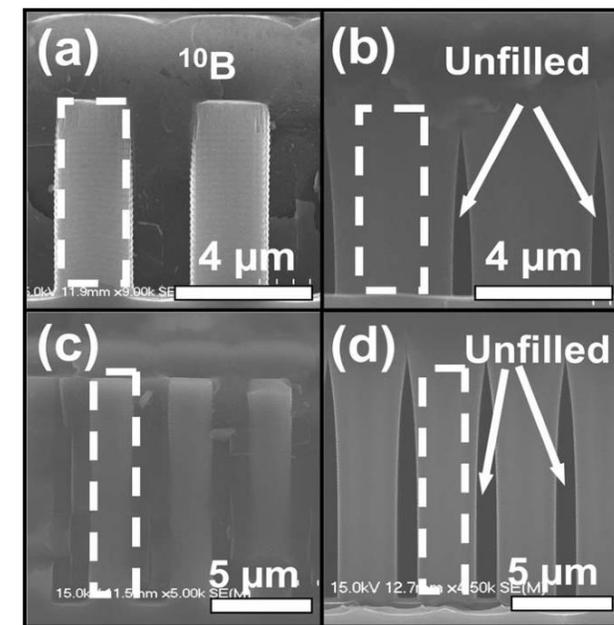
- 采用离心机将悬浊液中的转化材料沉积到微结构中
- 常用于LiF材料

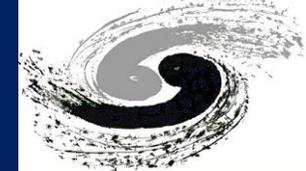
• 气相沉积：

- 电子束蒸发、磁控溅射、化学气相沉积等方法
- 常用于B薄膜制备
- 需要优化镀膜工艺，确保微结构被有效填充

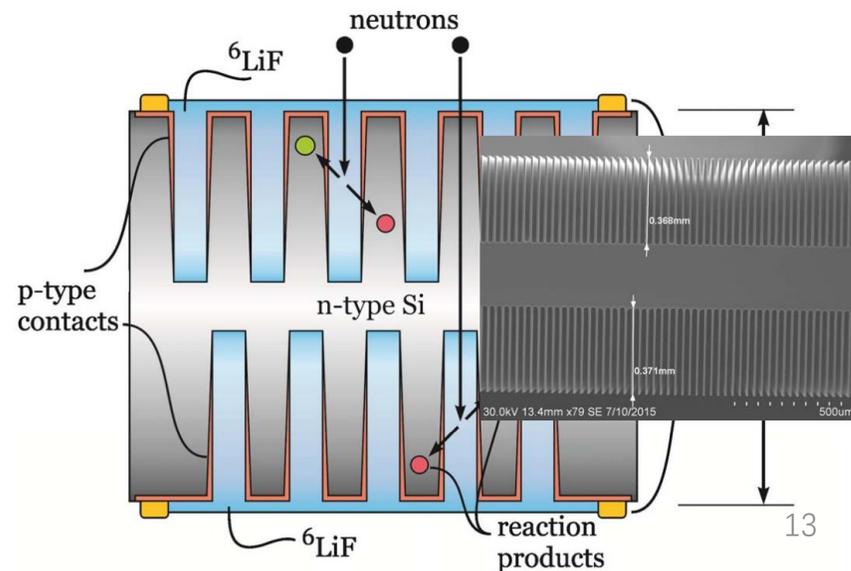
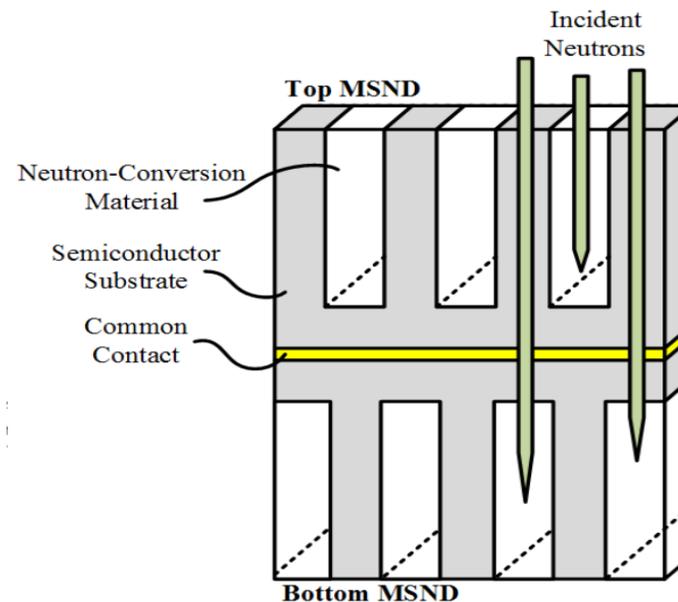


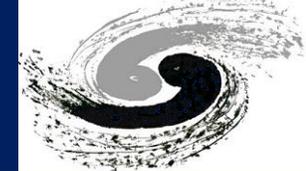
气相沉积



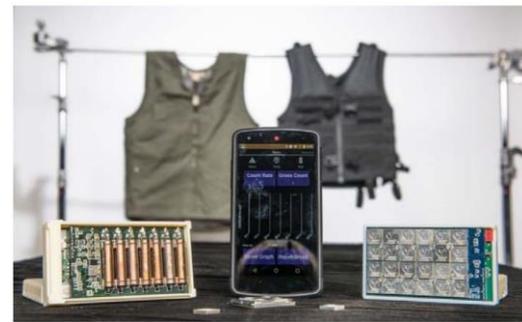
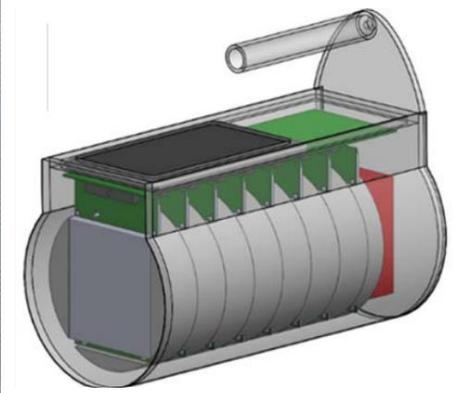
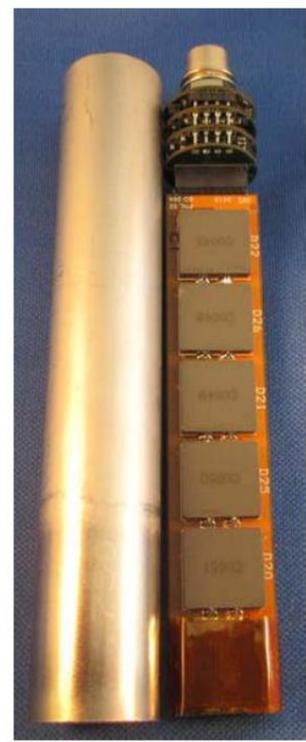
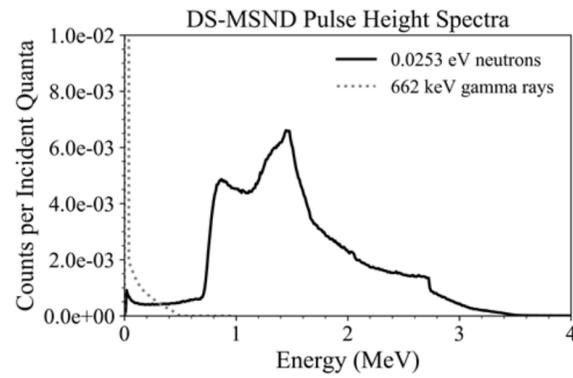
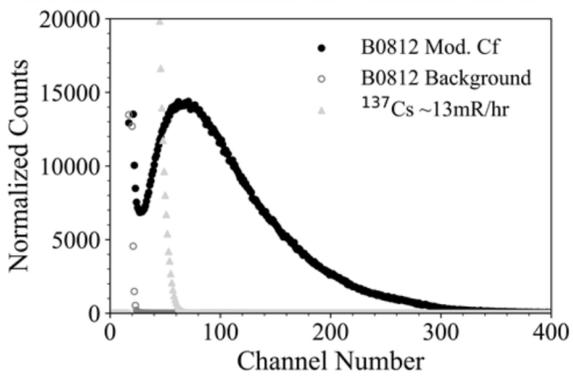
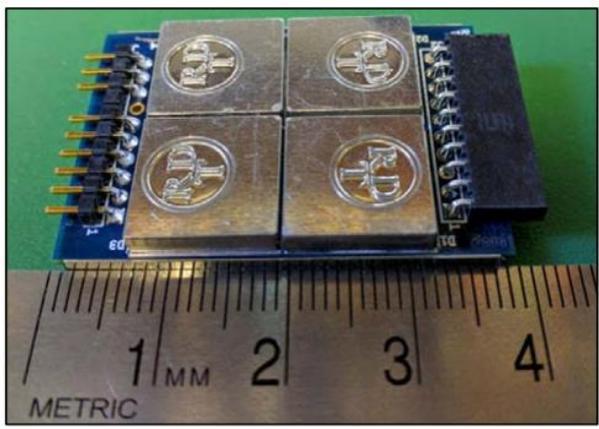
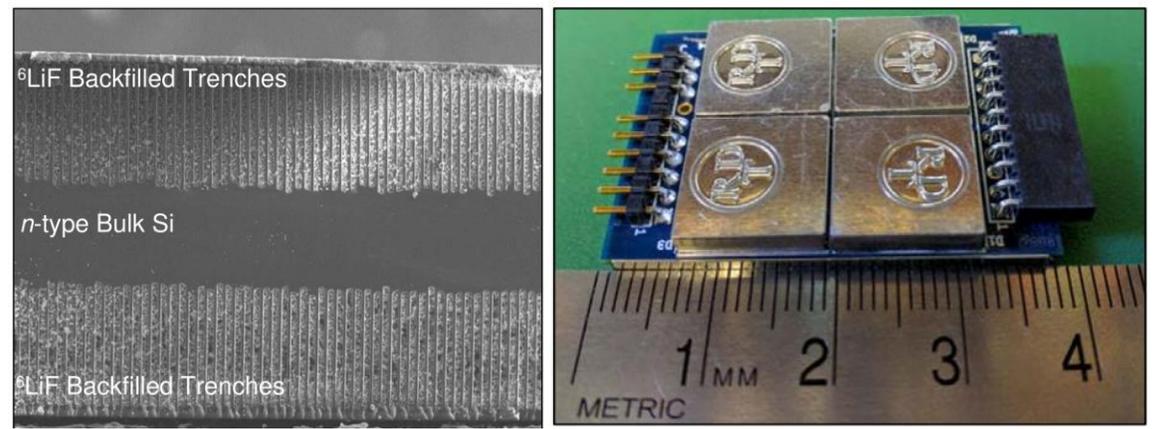


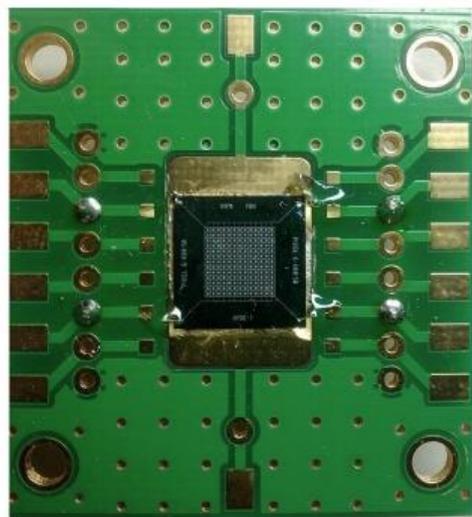
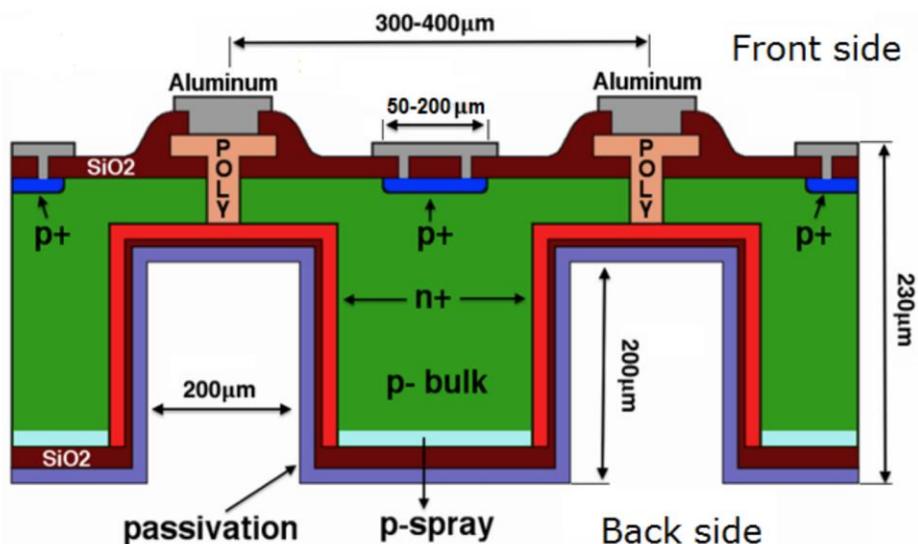
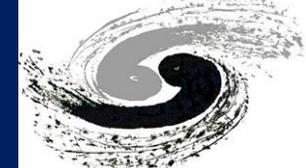
- 多层探测器可以进一步提高探测效率
- 堆叠技术：
 - 直接将两个探测器通过背对背方式堆叠在一起
 - 两个探测器相互错位半个微结构周期，消除探测死区
 - 集成工艺复杂， γ 排斥比不高
- 双面加工技术：
 - 利用双面加工工艺，直接在基板正反两面加工微结构
 - 热中子探测效率可以达到50%以上
 - 电极结构和配置方案需要优化，以提高信噪比



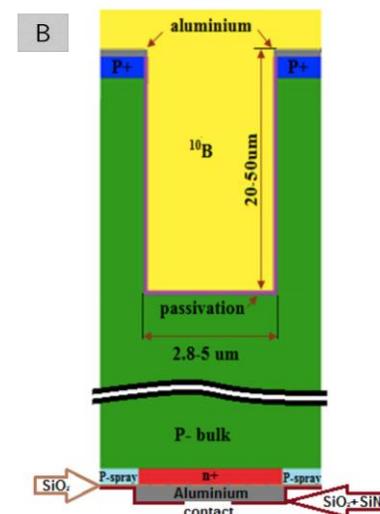
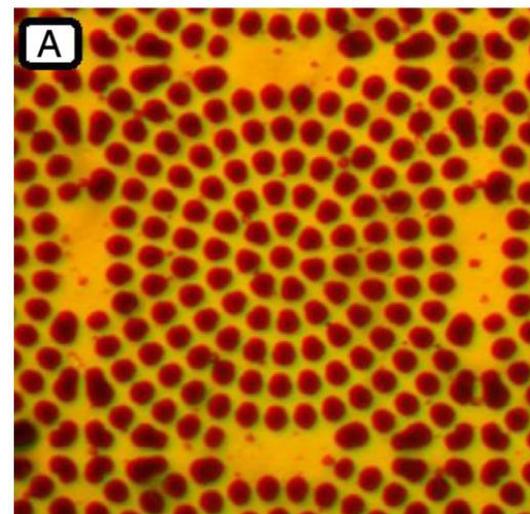


- DS-MSND探测器 (Kansas State University)
- 基于双面工艺微结构探测器，单片探测器热中子探测效率可达50%以上
- 无空间和时间分辨能力，仅用于中子计数测量
- 技术已经相对比较成熟，在向产品化发展
- 多种封装方式，满足不同应用需求



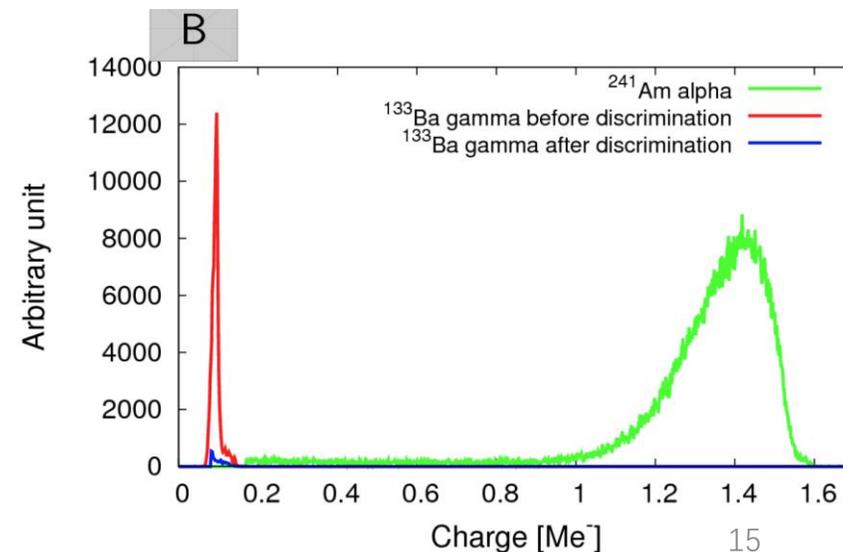


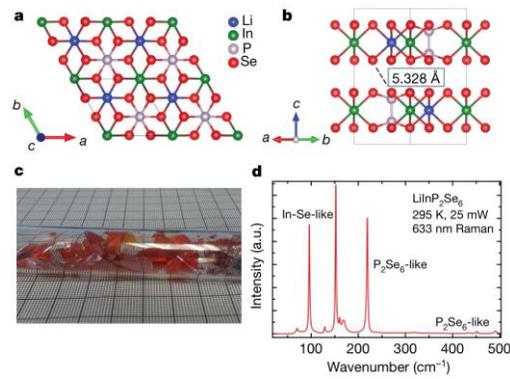
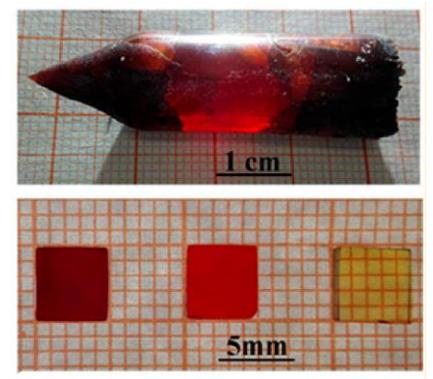
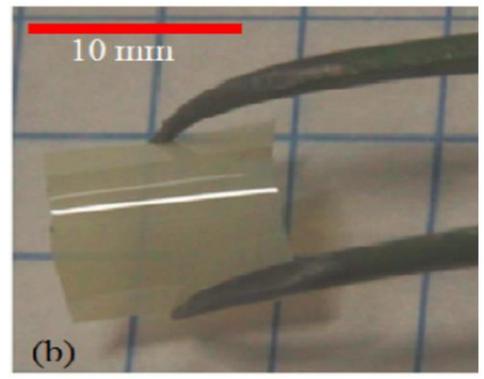
HYDE1芯片



HYDE2芯片

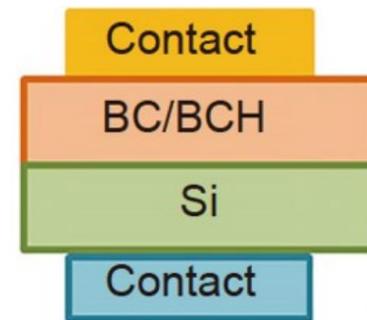
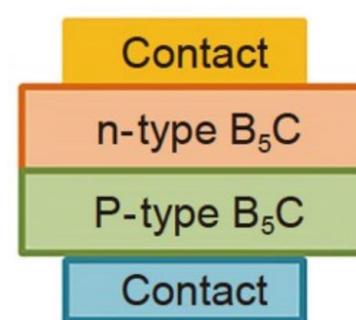
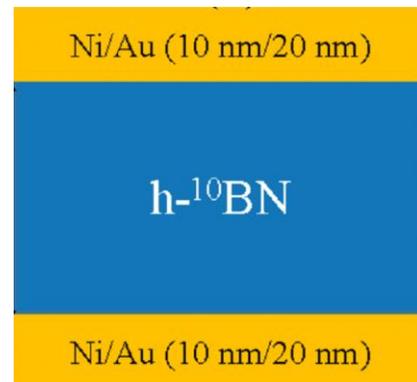
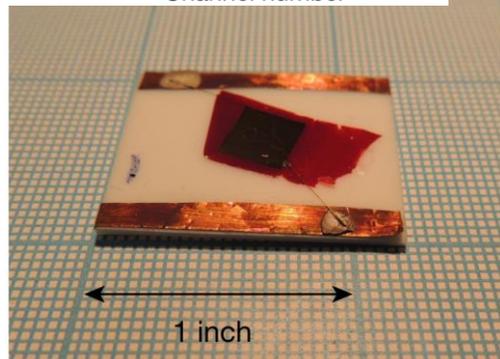
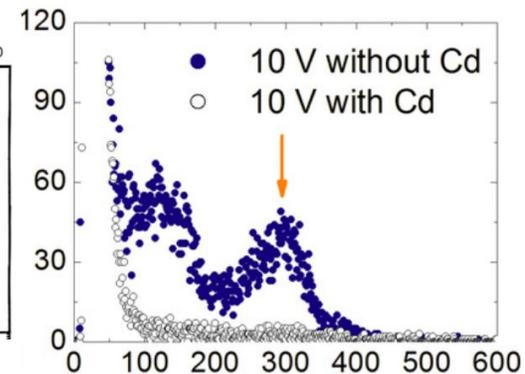
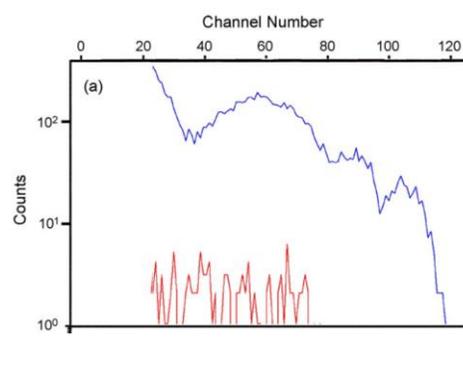
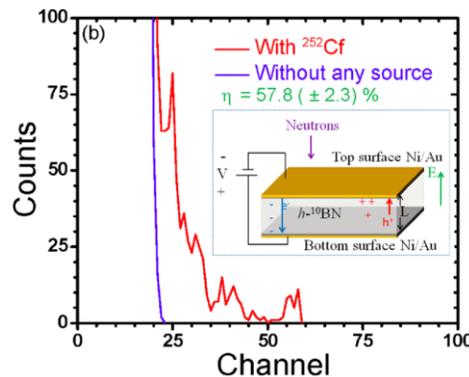
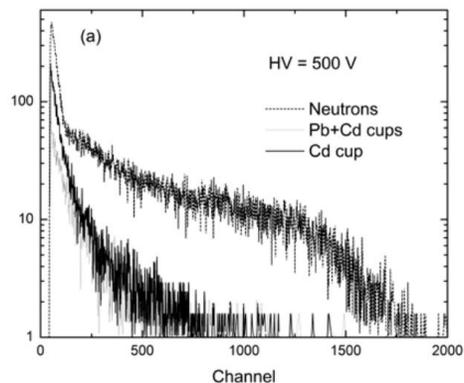
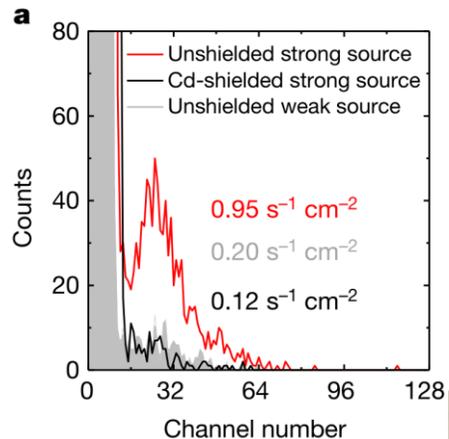
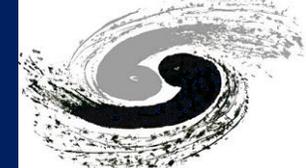
- HYDE系列探测器 (University of Trento, Italy)
- **HYDE1**: 原理样机, 验证技术可行性
- **HYDE2**:
 - 像素尺寸与Medipix/TimePix芯片兼容 ($55\mu\text{m}$), 可用于中子成像等领域
 - 简化制备流程, 方便批量生产
 - 网状微结构, 减少涂硼过程中应力积累, 提高机械强度
 - ^{10}B 中子转化材料, 热中子探测效率接近30%



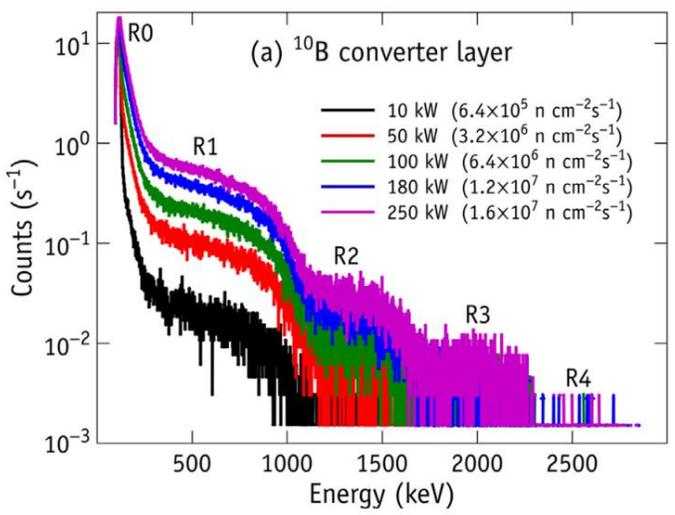
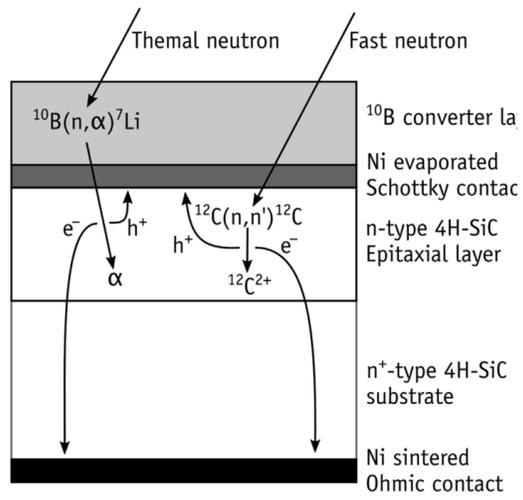
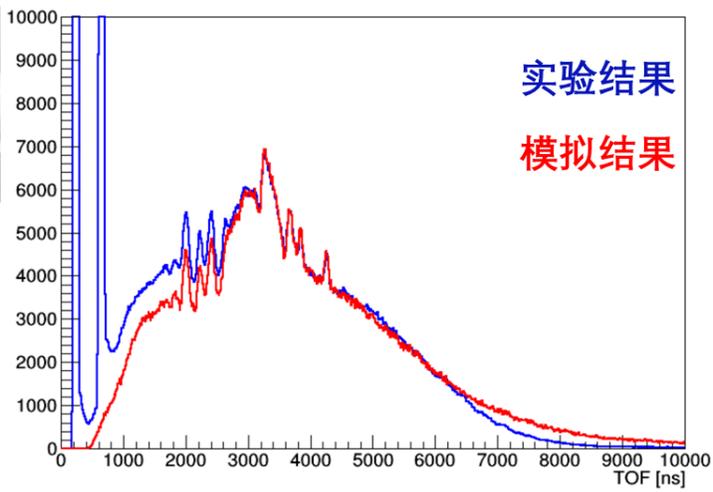
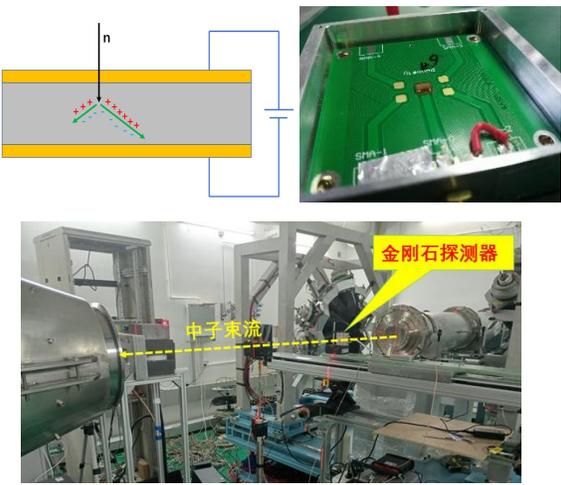
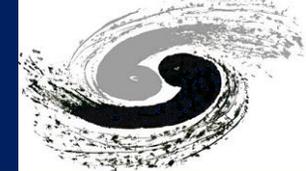


	Si	h-BN	BC	LiInSe6	LiInP2Se6	SiC	金刚石
禁带宽度 [eV]	1.12	6.4	2.09	2.86	2.06	2.36~3.26	5.2
电阻率 [Ω cm]	10^4	$\sim 10^{14}$	$\sim 10^{10}$	10^{12}	10^{13}	10^{12}	$\sim 10^{14}$
制备方法	CZ/FZ	MOCVD	PECVD	VB(垂直布里奇曼法)	CVT(化学气相传输)	CVD	PECVD
探测粒子类型	带点粒子	热中子	热中子	热中子	热中子	快中子	快中子

- 直接探测方法对探测器材料有较高要求
 - B基、Li基半导体材料
- 近几年比较活跃的中子探测半导体材料
 - 低能中子探测：h-BN、BC、LiInSe6、LiInP2Se6
 - 快中子、高能中子探测：SiC、金刚石



- MSM结构探测器：h-BN、LiInSe6、LiInP2Se6
- 结型探测器：碳化硼材料的Pn结和异质结
- 中子敏感性得到原理样机验证
- 探测器级半导体材料的批量制备是目前面临的主要难题



金刚石探测器中子响应
(CSNS-白光中子束线测量结果)

涂硼肖特基型SiC探测器中子响应

- 耐辐照、时间分辨高、计数率高、可工作于高温等严酷环境下
 - ^{12}C 、 ^{28}Si 与快中子发生核反应，实现直接中子探测
 - 通过增加中子转化材料，也可以进行热中子探测
- 单晶金刚石可以实现更好的探测器性能，但目前难以制备大面积单晶金刚石（PECVD工艺，单晶尺寸10mm以内），大规模使用成本相对较高
- SiC晶体制备工艺相对比较成熟，是目前研究比较深入的第三代半导体探测器，在中子探测领域也越来越得到重视

一

中子探测的应用与需求

二

半导体中子探测器研究现状

三

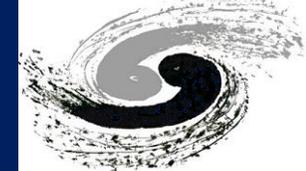
半导体中子探测器未来展望

四

CSNS探测器微加工平台简介

五

总结



- 硅基微结构中子技术已经相对比较成熟，在中子探测领域必定会有一席之地

- 小型化、高探测效率、高计数率

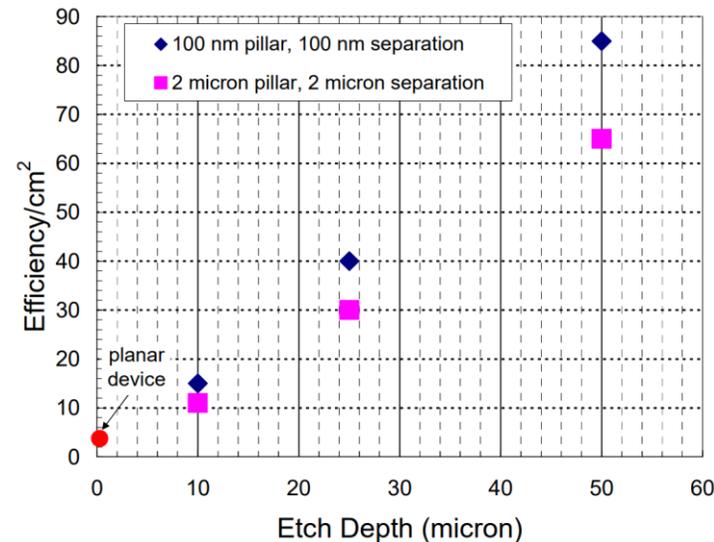
- 未来发展方向：

- 更高的探测效率

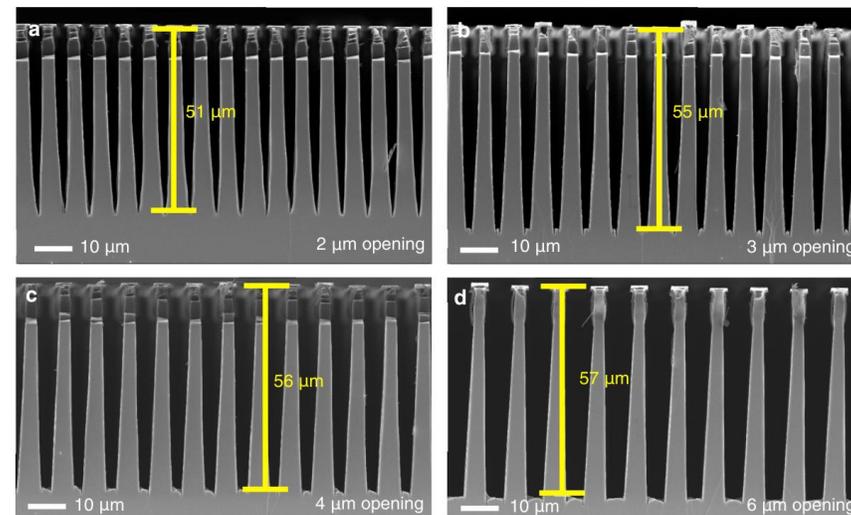
- 提高微结构密度和刻蚀深度

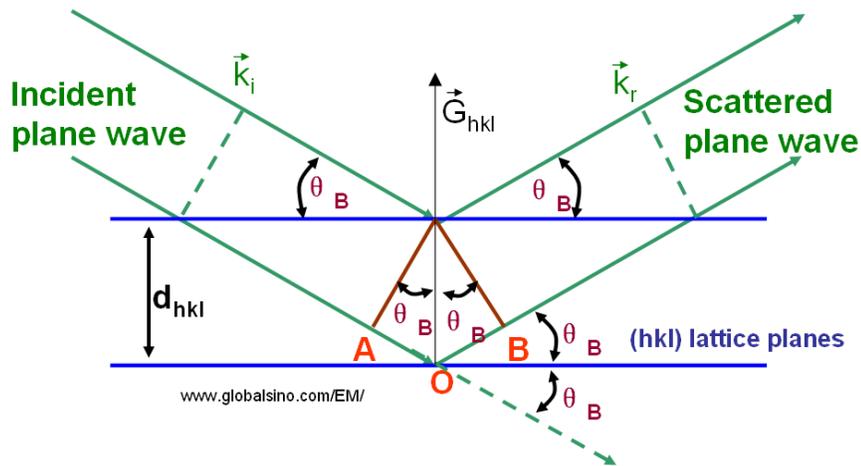
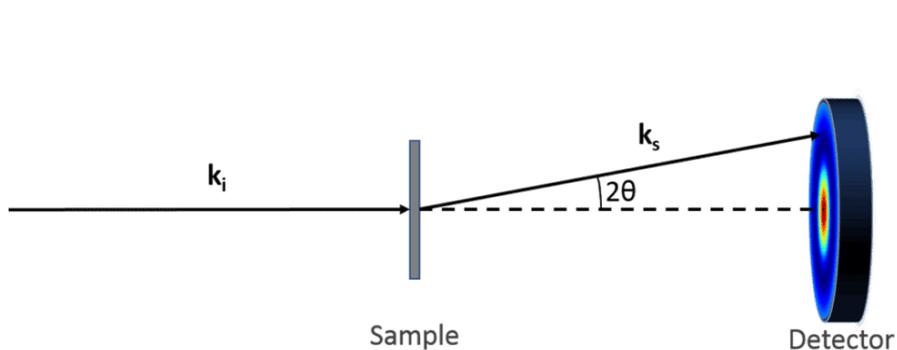
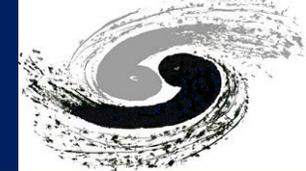
- 提高抗辐照性能，在更严酷的环境下工作

- 基于SiC、GaN等第三代半导体的微结构探测器
- 微结构刻蚀的深宽比与Si工艺相比还需进一步提高



中子探测效率与微结构密度和深度的关系





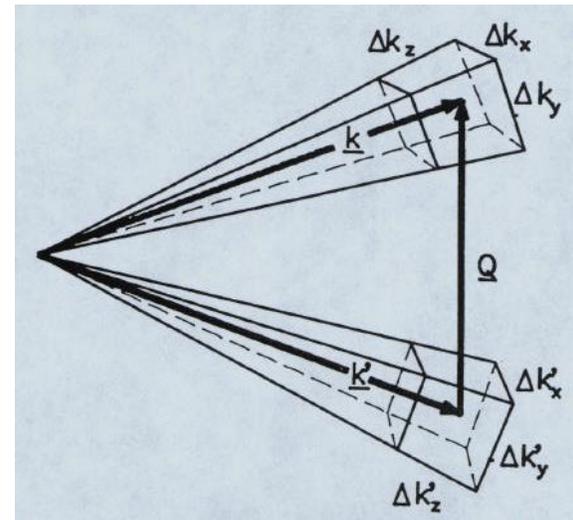
$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

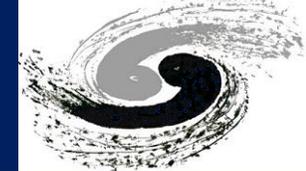
$$\frac{\Delta d}{d} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \theta}{\tan \theta}\right)^2}$$

$$\Delta 2\theta = \sqrt{\Delta \theta_i^2 + \Delta \theta_f^2}$$

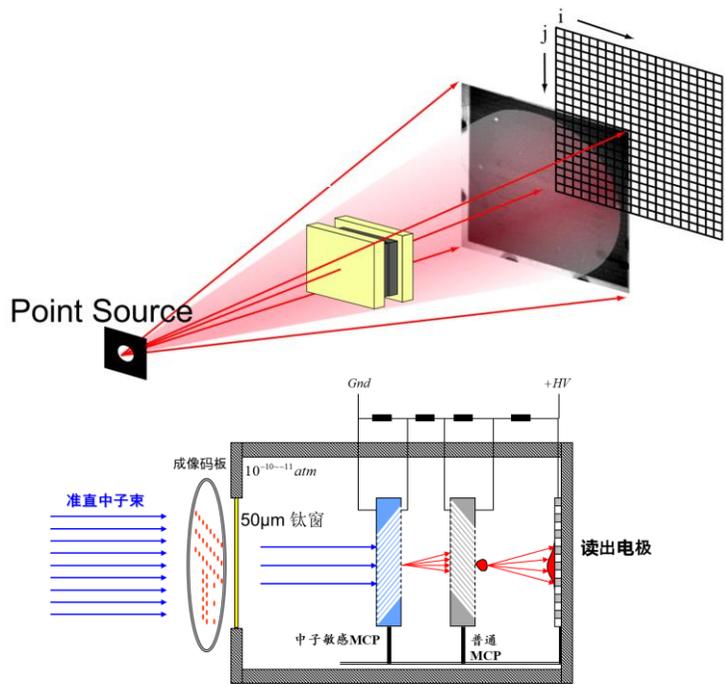
$\Delta \theta_i$: Incident divergence
 $\Delta \theta_f$: scattered divergence

- 系统分辨率是谱仪性能的一个重要指标
 - 波长分辨
 - 发散角度分辨
- 中子束流难以像X射线束流一样聚焦，束线光学和探测器对分辨率的贡献在相同量级，单纯提高探测器空间分辨意义不大
- 中子散射实验目前对半导体探测器还没有非常迫切的需求

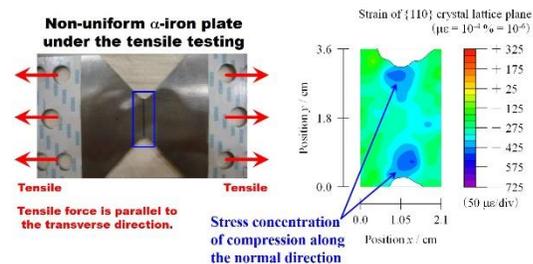




- 对高性能ASIC读出芯片和大面积像素型半导体中子探测器有明确需求



- 布拉格边成像、能量选择成像等
- 中子转化材料+MCP+TimePix
- 时间分辨: $\sim 1\mu\text{s}$
- 空间分辨: $\leq 100\mu\text{m}$
- 视野范围: $\sim 100*100\text{mm}^2$

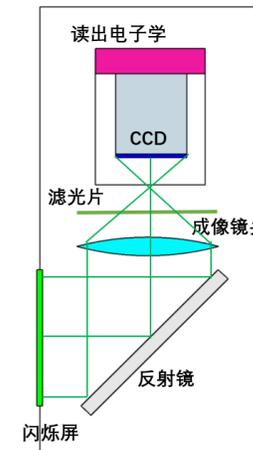


空间
分辨

时间
分辨

视野
范围

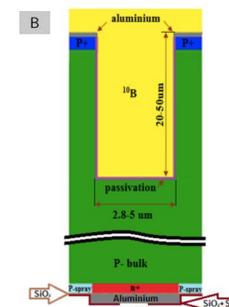
- 微结构检测
- 闪烁体+光学成像
- 空间分辨: $\leq 10\mu\text{m}$
- 视野范围: $\leq 20*20\text{mm}^2$



- 大型金属零件无损检测等
- 视野范围: $\geq 400*400\text{mm}^2$
- 空间分辨: $\leq 200\mu\text{m}$
- 无成熟技术方案
- 像素型微结构探测器具有重大优势



X射线平板探测器



一

中子探测的应用与需求

二

半导体中子探测器研究现状

三

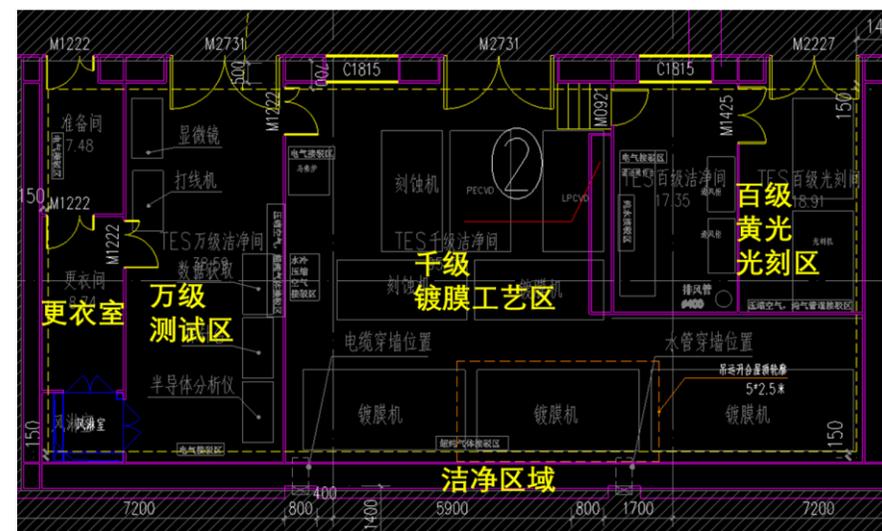
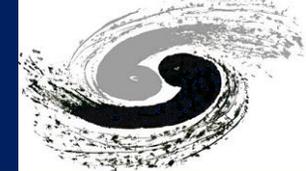
半导体中子探测器未来展望

四

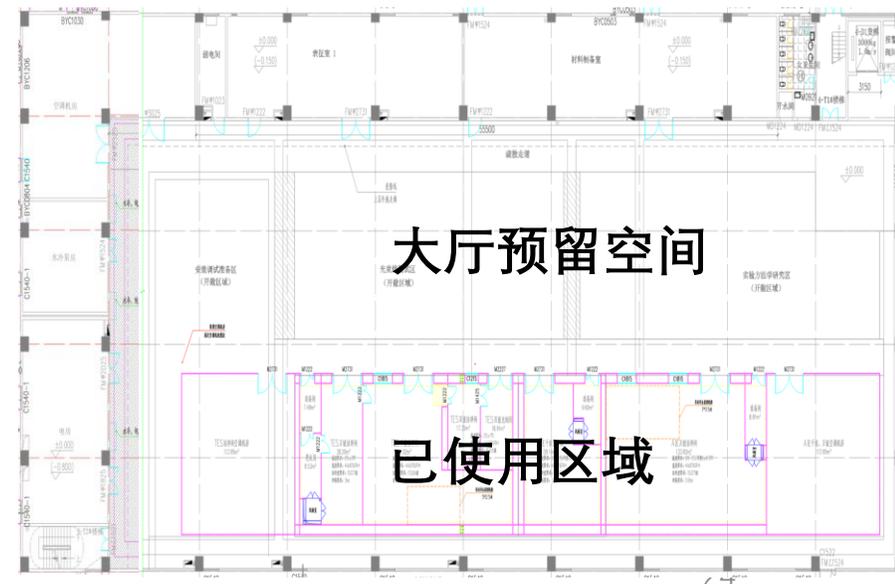
CSNS探测器微加工平台简介

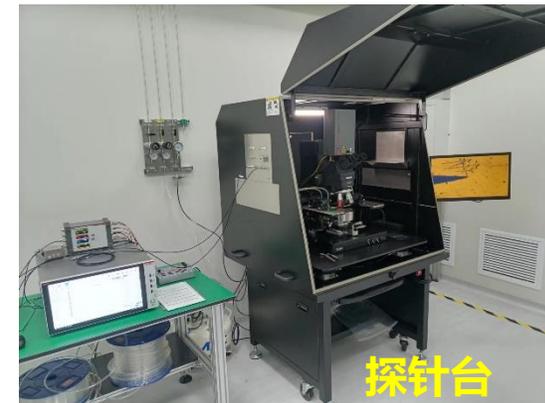
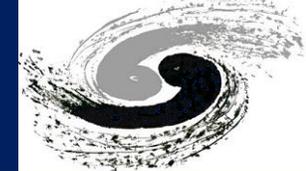
五

总结

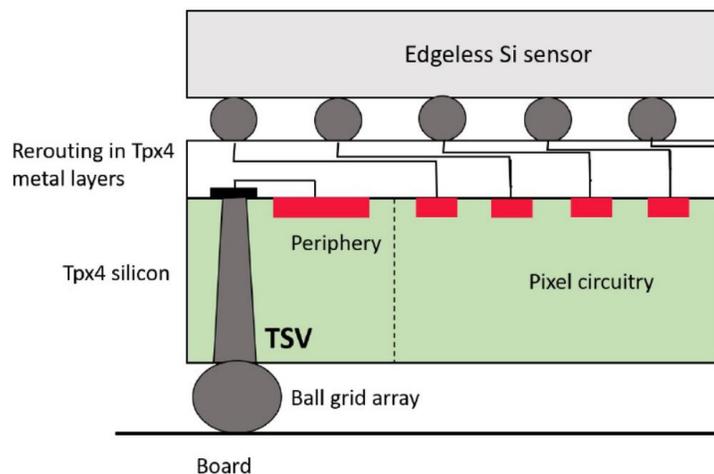
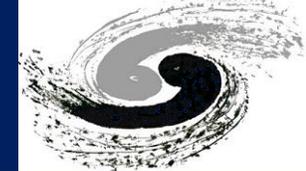


- 依托南方先进光源预研平台建设，由广东省和东莞市投资，主要用于开展微结构探测器研究
- 由百级、千级、万级三个等级的洁净区域组成，大厅预留了充足的扩展升级空间
 - 百级：光刻与湿法腐蚀工艺
 - 千级：镀膜和刻蚀工艺
 - 万级：器件封装与测试

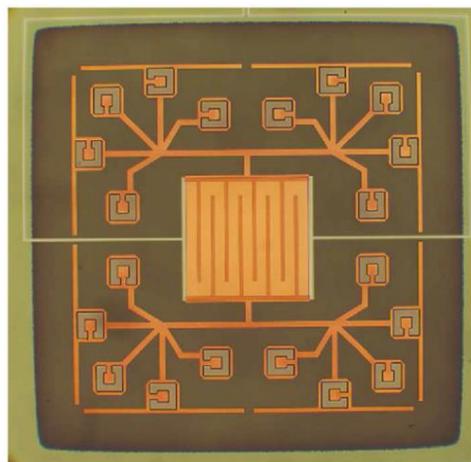




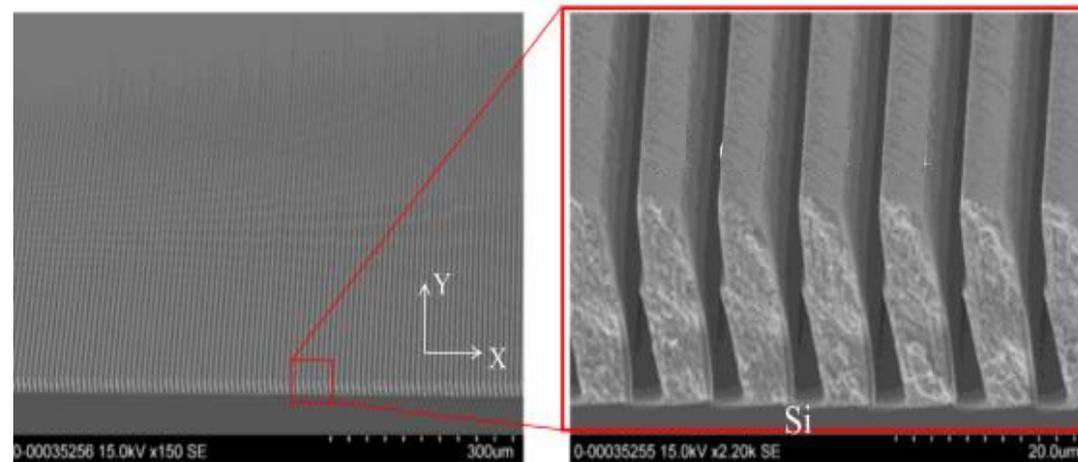
- 具备光刻、镀膜、刻蚀、封装集成等较完整的半导体微纳加工工艺
- 可以进行核心器件研制、系统封装集成和器件检测刻度
- 根据项目需求，设备列表将不断扩展



像素探测器集成技术



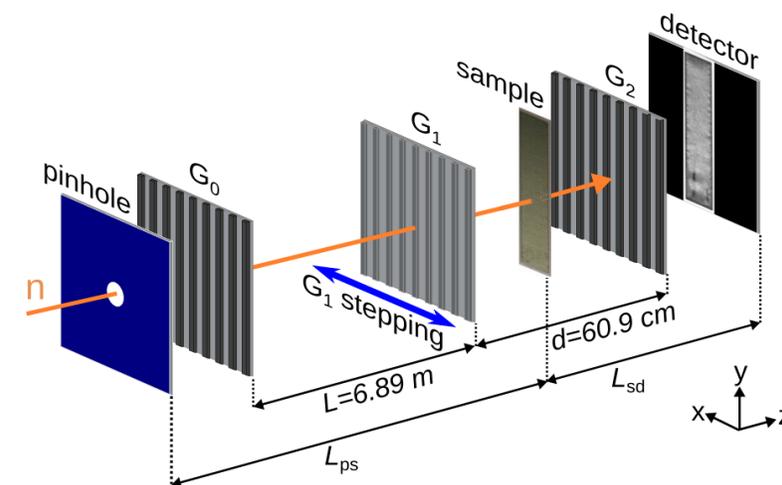
低温超导探测器



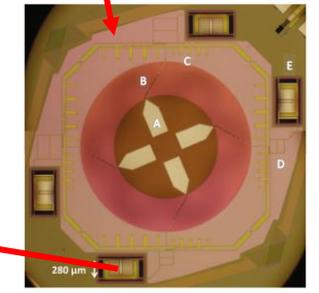
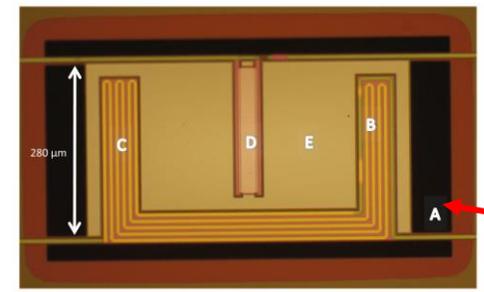
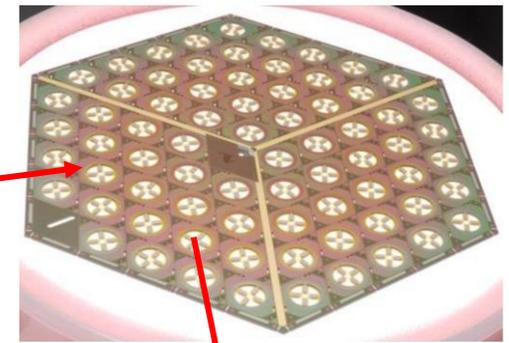
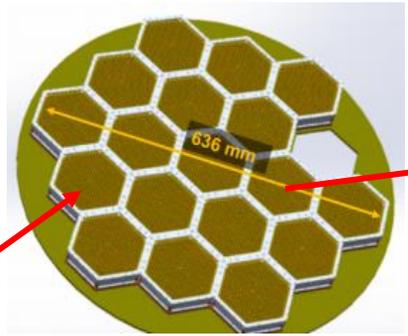
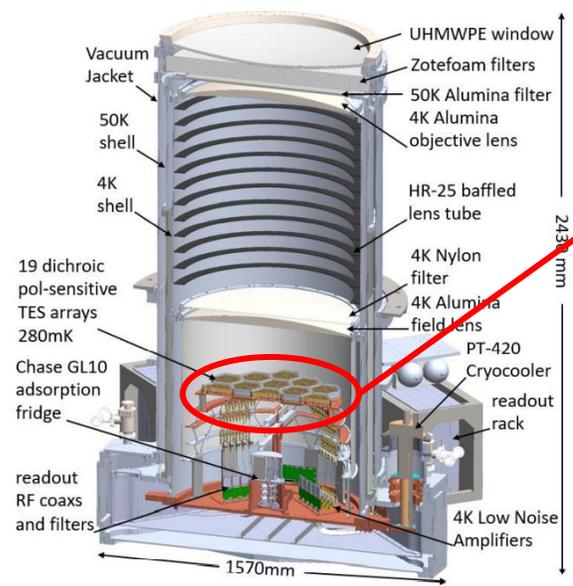
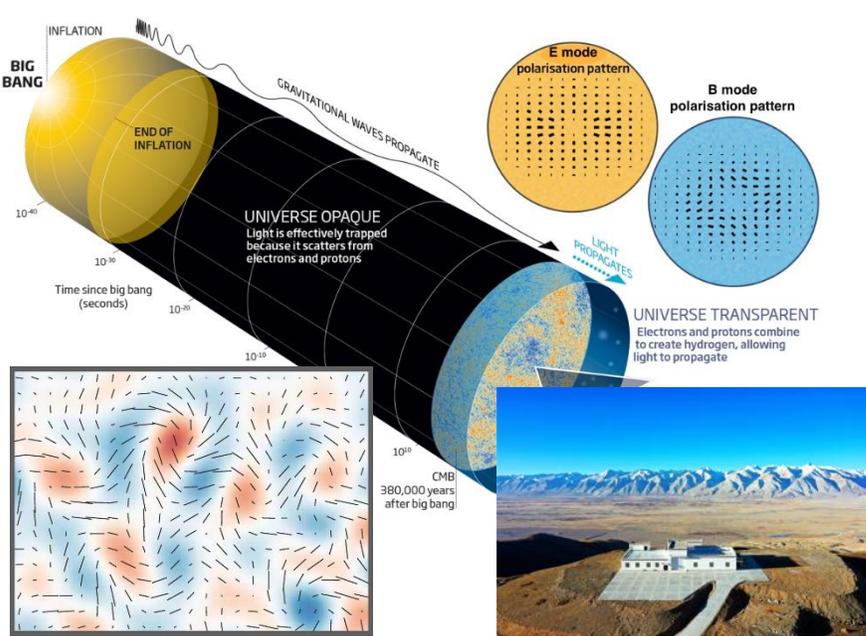
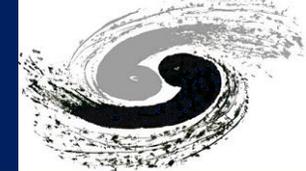
微结构中子探测器

• 面向同步辐射光源、散裂中子源及其他研究项目对微结构探测器及光学器件的需求

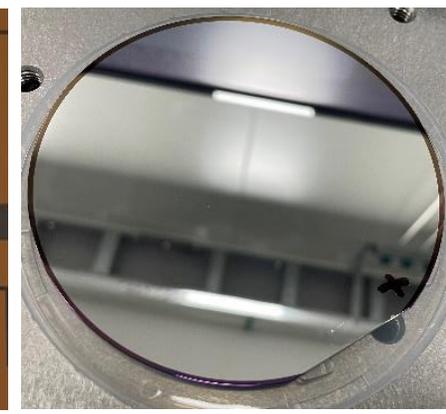
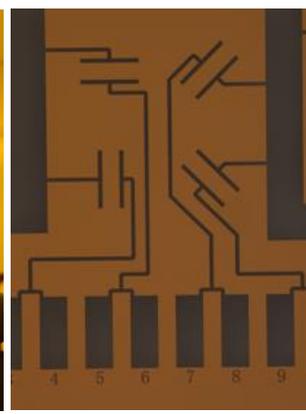
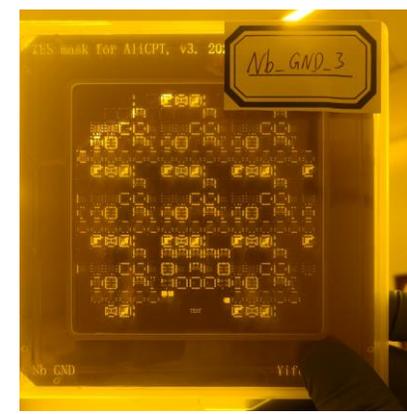
- 半导体能谱探测器
- 低温超导探测器
- 微结构中子探测器
- 中子光栅等



中子光栅



- 参与阿里原初引力波望远镜建设
 - 测量宇宙微波背景的偏振模式，检验是否存在原初引力波
- 承担焦平面探测器阵列的制备研究
 - 喇叭天线+TES探测器+SQUID读出电子学
 - 目前正在各种工艺设备的前期标定



光刻机、镀膜机等设备标定初步结果²⁷

一

中子探测的应用与需求

二

半导体中子探测器研究现状

三

半导体中子探测器未来展望

四

CSNS探测器微加工平台简介

五

总结



- 半导体中子探测器主要分为间接探测和直接探测两种类型
- 微结构半导体中子探测器的研究相对比较深入，并已经有比较成熟的产品出现，未来在中子探测领域必将占据一席之地
- 基于SiC等第三代半导体的微结构中子探测器是下一代微结构探测器的重要研究方向，但制备工艺还需要进一步研究
- 直接探测半导体中子探测器的研究也在不断深入，近几年不断有新型中子敏感半导体材料被研制出来，并且验证了中子探测的可行性
- 新材料的制备是目前制约直接探测半导体探测器的主要瓶颈
- 高性能ASIC读出芯片和像素型半导体中子探测器在中子成像领域具有明确需求