



# STJ探测器研究进展及应用

徐郁

中科院高能所/中国散裂中子源

2026年3月28日

一 STJ探测器简介

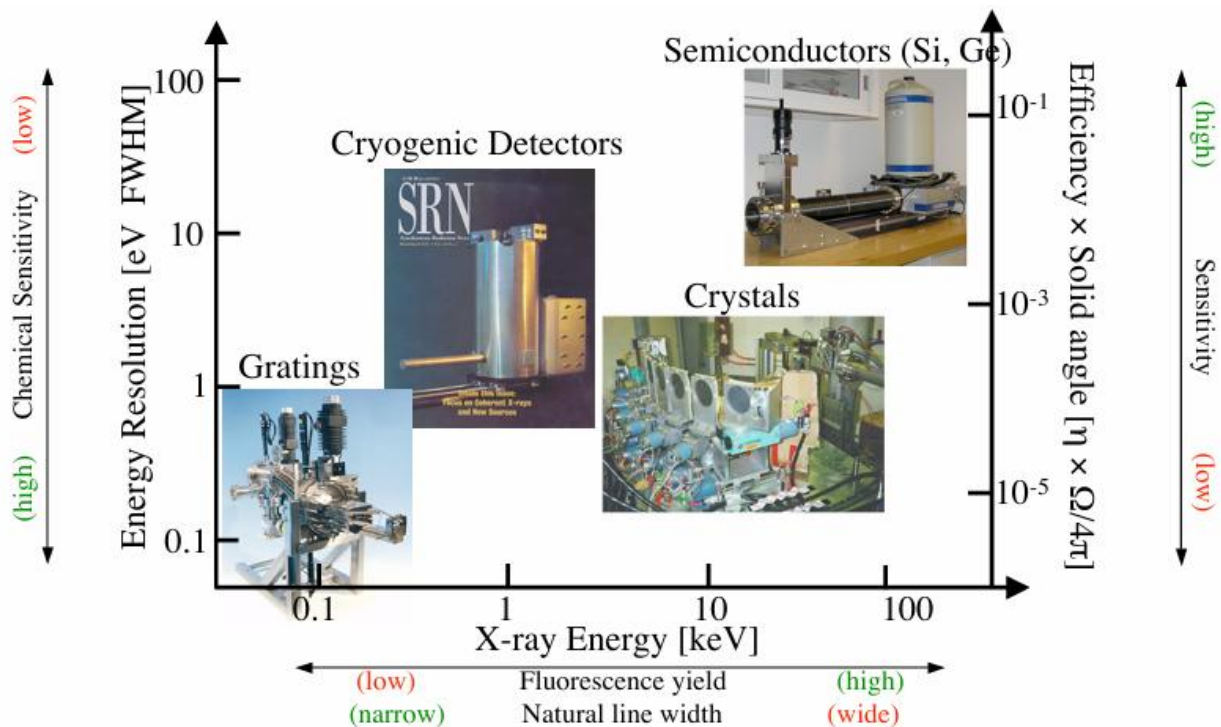
二 STJ探测器应用

三 探测器研制进展

四 总结和未来规划

# 低温超导探测器简介

低温超导探测器：工作在极低温 (< 1K)  
利用了超导体的某些特性



比半导体探测器更高的能量分辨率  
比光栅/晶体光谱仪更高的探测效率

低温超导探测器类型	transition-edge sensor (TES)	Microwave kinetic inductance detectors (MKID)	metallic magnetic calorimeter (MMC)	superconducting tunnel junction (STJ)
工作原理	光子热效应引发电阻变化而引起电流变化	准粒子密度变化影响超导LC谐振电路的谐振频率	顺磁材料中磁通量的变化	光子激发准粒子隧穿产生电流
测量类型	热/准平衡	量子/非平衡	热/准平衡	量子/非平衡
能量分辨率	1.6eV@5.9keV 0.8eV@1.3keV	70eV@5.9keV	1.6eV@5.9keV 9.8eV@59keV	10eV@5.9keV 1eV@100eV
计数率	1k	2k	1k	100k
工作温度	<0.1K	0.2K	<0.1K	0.3K
优势	能量分辨率高	方便大阵列复用	能量分辨率高; 能量覆盖范围大	计数率高
劣势	能量范围窄	能量分辨率低	大阵列复用读出困难	能量上限低

$$\Delta E_{FWHM} = 2.355 \sqrt{4 k_B T_c^2 C \sqrt{\frac{n}{2}} / \alpha}$$

$$\Delta E_{FWHM} \approx 2.355 \sqrt{E \varepsilon_0 (F + G)}$$

$n = 5$  electron - phonon coupling

$$\varepsilon_0 \approx 1.7 \Delta \approx 1.7(1.76 k T_c) = 3 k T_c$$

$$T_e \approx T_c$$

$F \approx 0.2$  is the Fano factor

$$E_{sat} \approx T_c C / \alpha$$

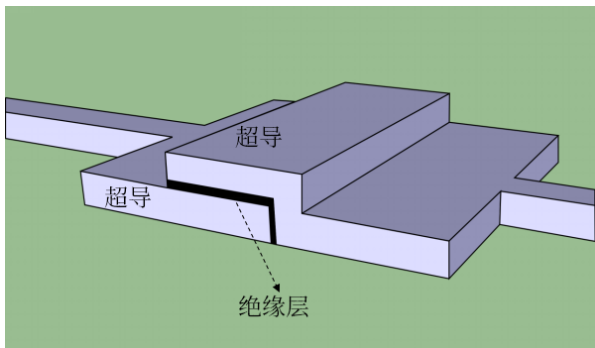
$G \approx 1 - 2$  (tunneling noise)

$$\Delta E_{FWHM} \approx 15 \text{ meV} \left( \frac{E_{sat}}{1 \text{ eV}} \right)^{1/2} \left( \frac{T_c}{70 \text{ mK}} \right)^{1/2}$$

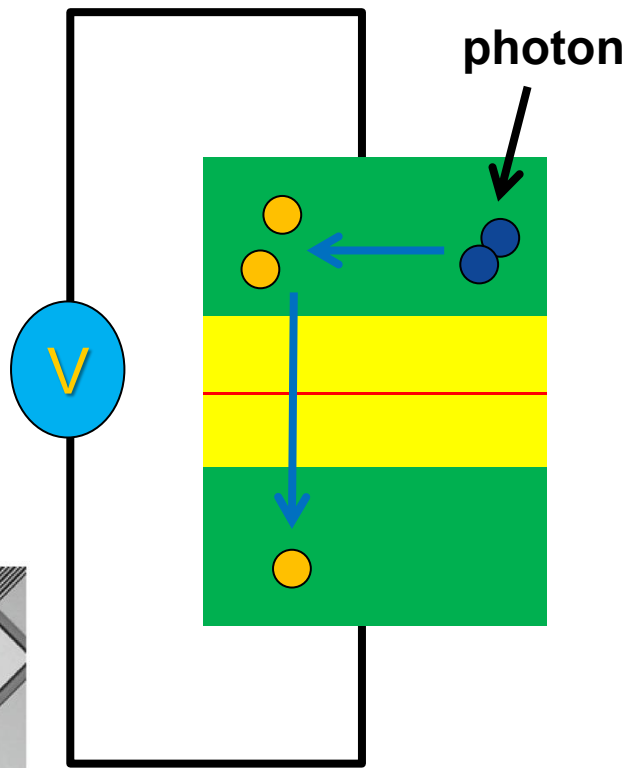
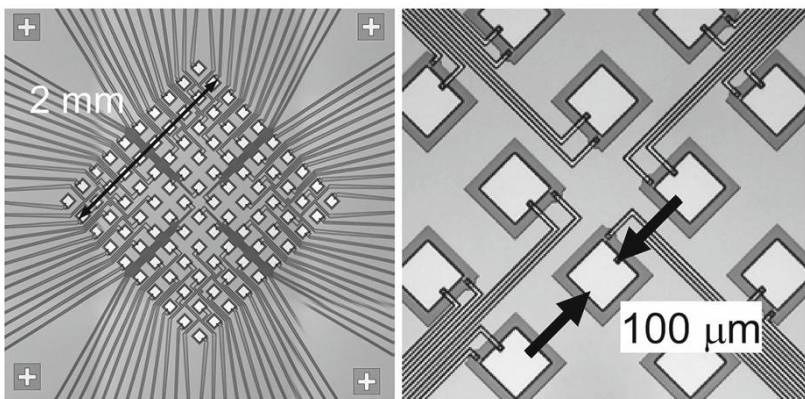
$$\Delta E_{FWHM} \approx 45 \text{ meV} \left( \frac{E}{1 \text{ eV}} \right)^{1/2} \left( \frac{T_c}{1 \text{ K}} \right)^{1/2}$$

# STJ探测器简介

## Superconducting Tunnel Junction



超导/绝缘/超导结构  
约瑟夫森结

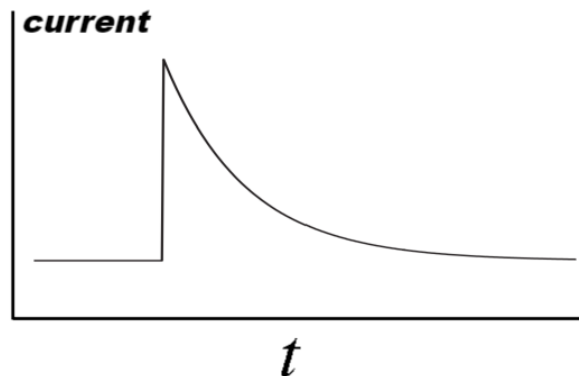


● cooper对  
● 准粒子

超导吸收体吸收入射能量

打破cooper对产生准粒子

准粒子隧穿产生脉冲电流



脉冲信号上升时间  
取决于准粒子寿命  
(ns-μs)

脉冲信号幅度

隧穿电流大小

隧穿准粒子数量

产生准粒子数量

入射光子能量

一 STJ探测器简介

二 STJ探测器应用

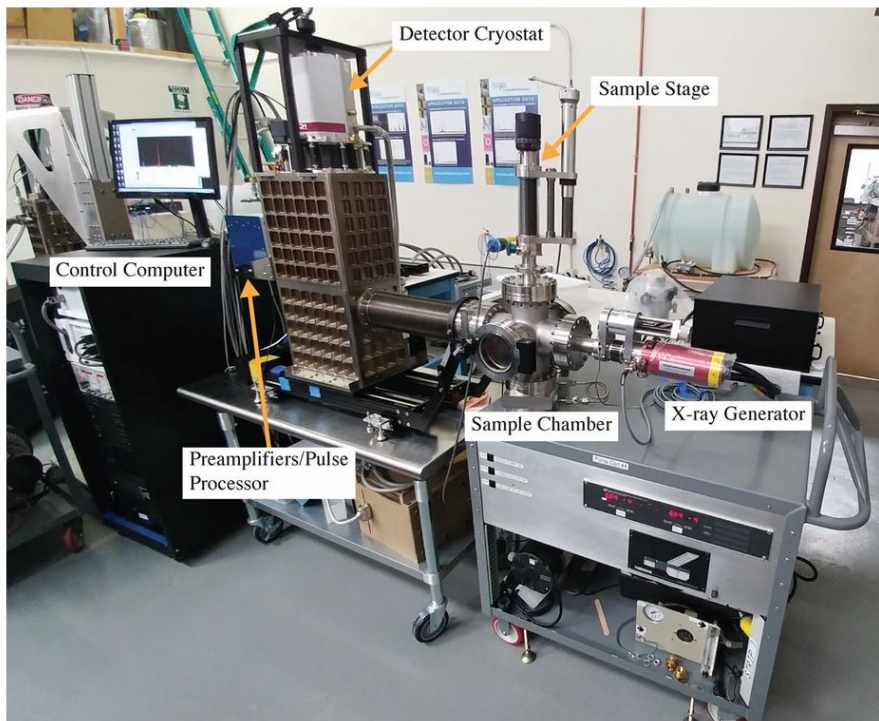
三 探测器研制进展

四 总结和未来规划

# STJ探测器应用

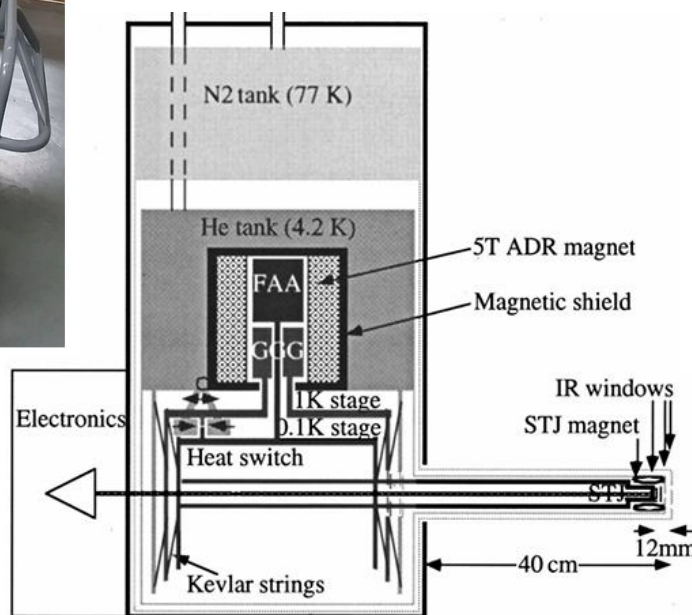
## 同步辐射光源上X射线吸收谱仪

比半导体探测器**更高的能量分辨率** (10eV vs. 100eV)  
比波长色散探测器**更高的探测效率** (不分光 vs. 分光)  
比热效应探测器**更高的计数率** (100K vs. 1K)

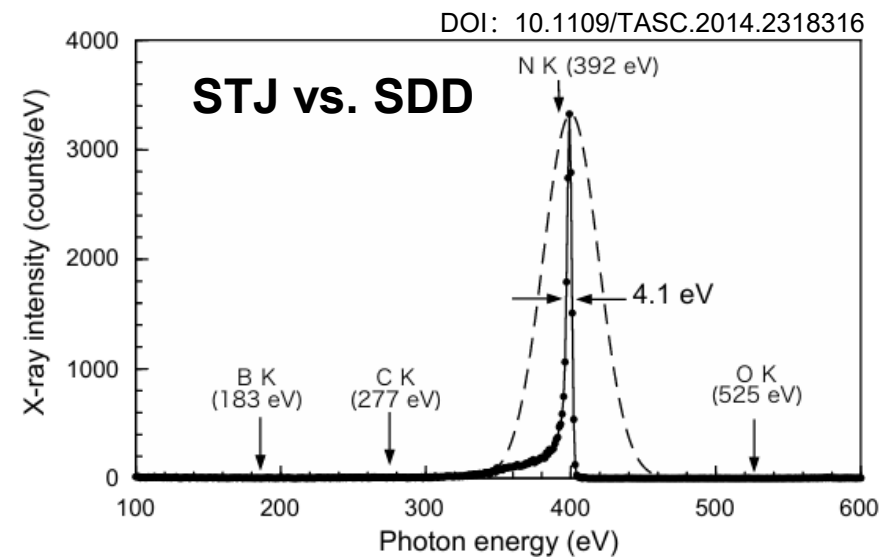


DOI: 10.1007/s10909-018-2071-4

需求能量分辨率优于30eV  
计数率优于30k



DOI: 10.1063/1.1445826



# STJ探测器应用

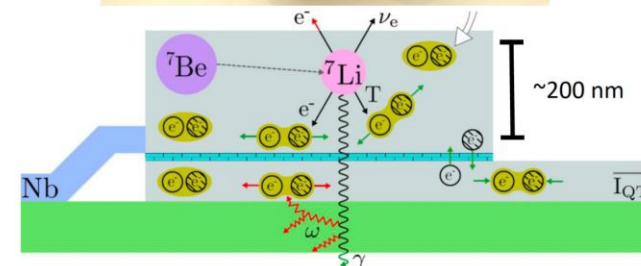
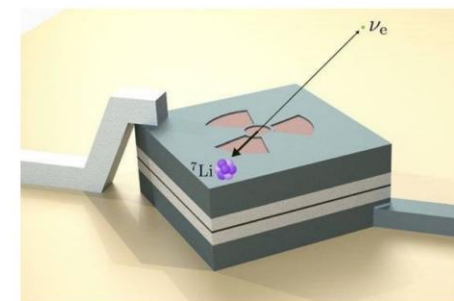
## The Beryllium Electron capture in Superconducting Tunnel junctions Experiment (BeEST)

<https://beest.mines.edu/>

目的: 寻找惰性中微子 (Sterile Neutrinos)

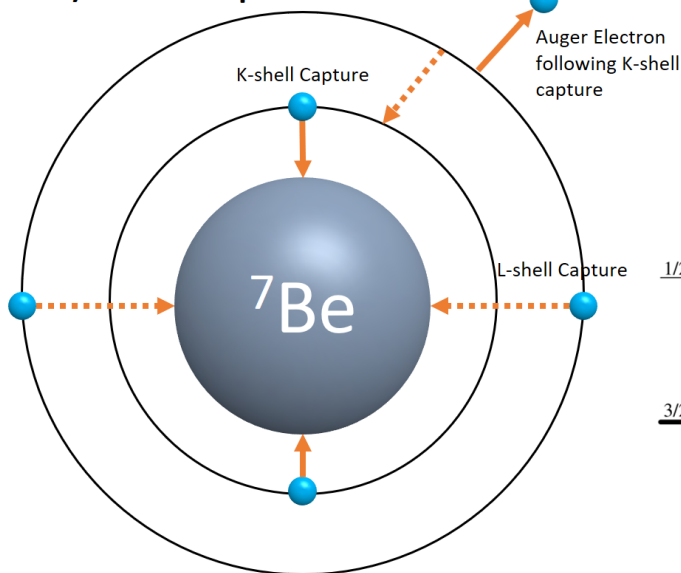
意义: 解释中微子质量的产生机制, 温暗物质候选粒子 (keV能标)

手段: 利用STJ探测器测量Be的电子俘获衰变的核反冲能 (几十到100eV)

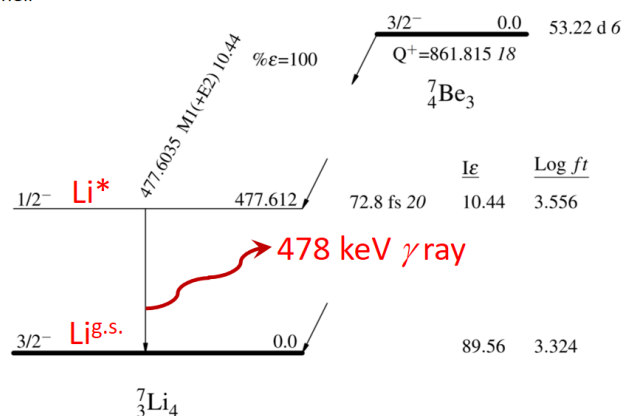


需求eV级能量分辨率和高计数率

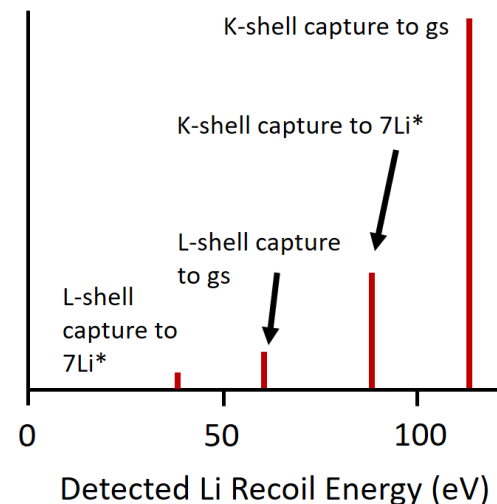
a) Atomic Capture Processes



b) Nuclear Decay Process



c)  ${}^7\text{Li}$  Recoil Energy Spectrum



# STJ探测器应用

## COsmic BAckground Neutrino Decay search (COBAND)

<https://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/coband/eng/index.html>

目的：测量宇宙背景中微子

意义：测量中微子质量，测量中微子寿命，验证宇宙学参数，验证中微子模型

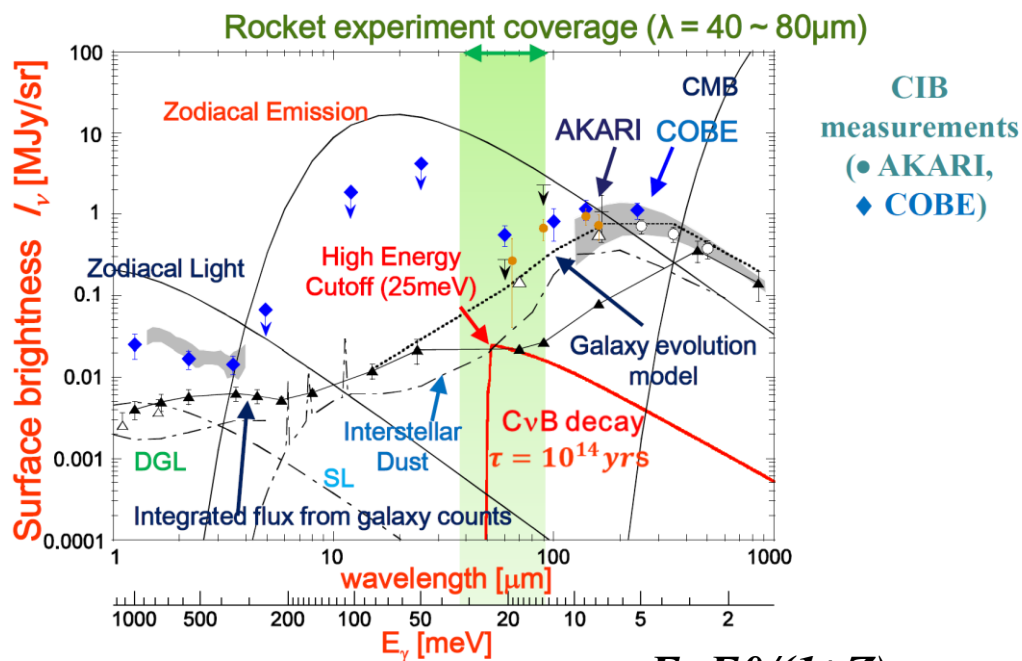
手段：利用STJ探测中微子衰变产生的光子

$$\nu_3 \rightarrow \nu_2/\nu_1 + \gamma$$

$$E_\gamma = (m_3^2 - m_2^2)/2m_3$$

假设 $m_3$ 在50~75meV  
(质量上限230meV)

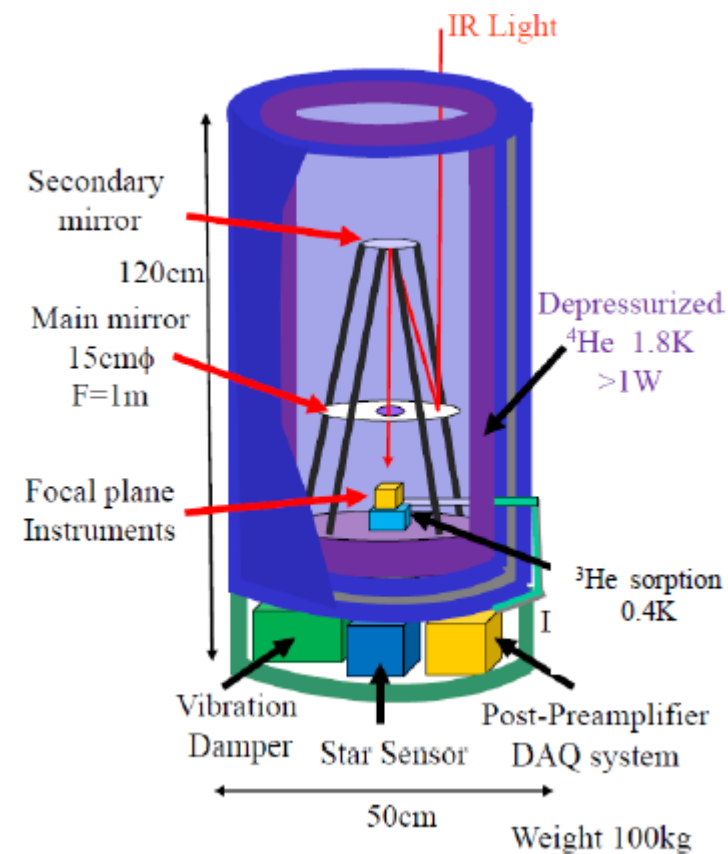
则 $E_\gamma$ 在15~30meV  
(远红外频段)



Source: S. Matsuura Astrophys. J. 737 (2011) 2

$$E = E_0/(1+Z)$$

2%能量分辨率



## 技术路线

### 国民经济

### 基础研究

#### 同步辐射※

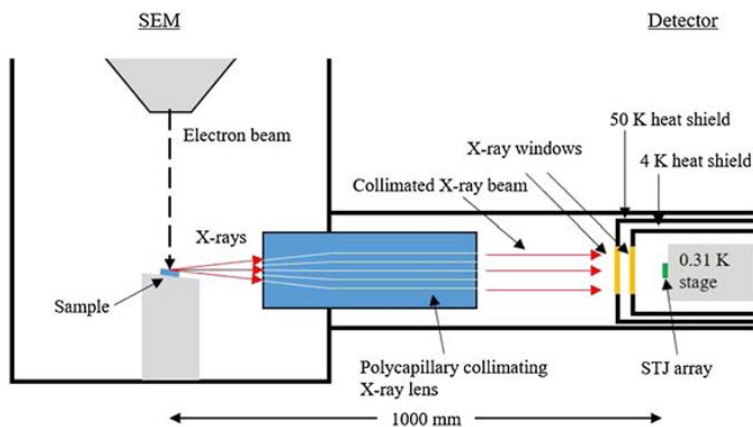
#### 扫描电镜

#### 质谱仪

#### 中微子探测

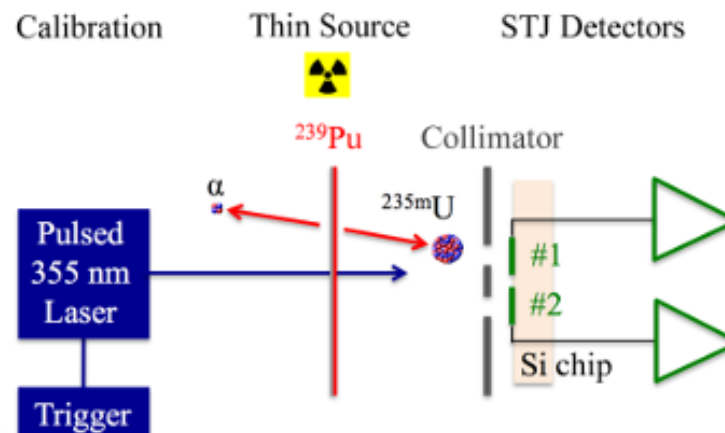
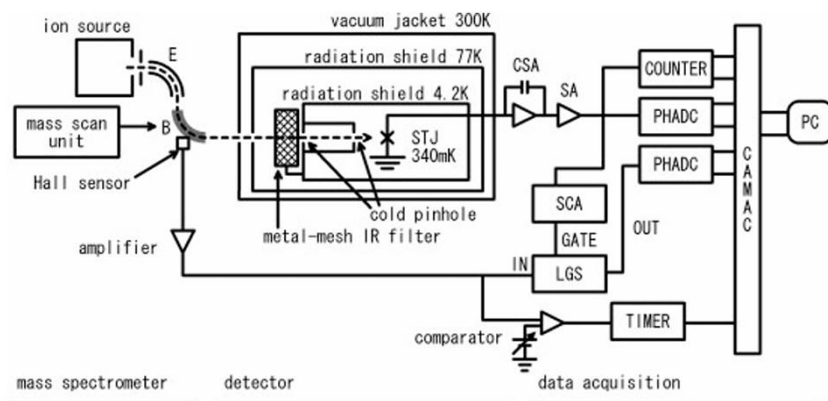
#### 测量衰变态

#### 天文学

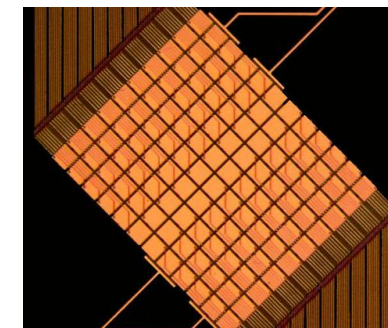
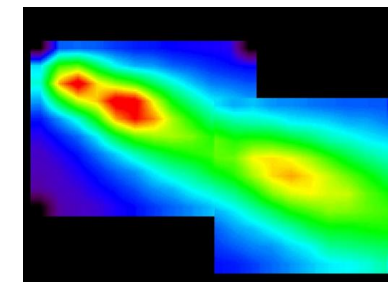


DOI: 10.1002/xrs.2796

DOI: 10.1002/jms.1459



DOI: 10.1103/PhysRevC.97.054310



DOI:10.1117/12.671213

一 STJ探测器简介

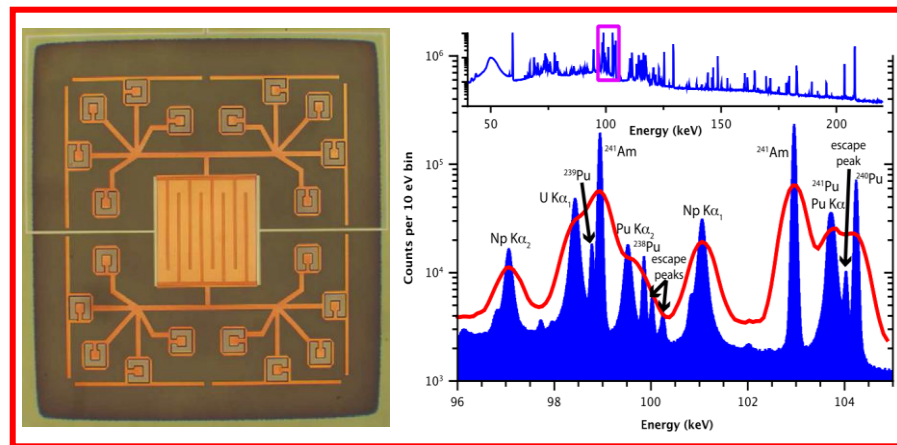
二 STJ探测器应用

三 探测器研制进展

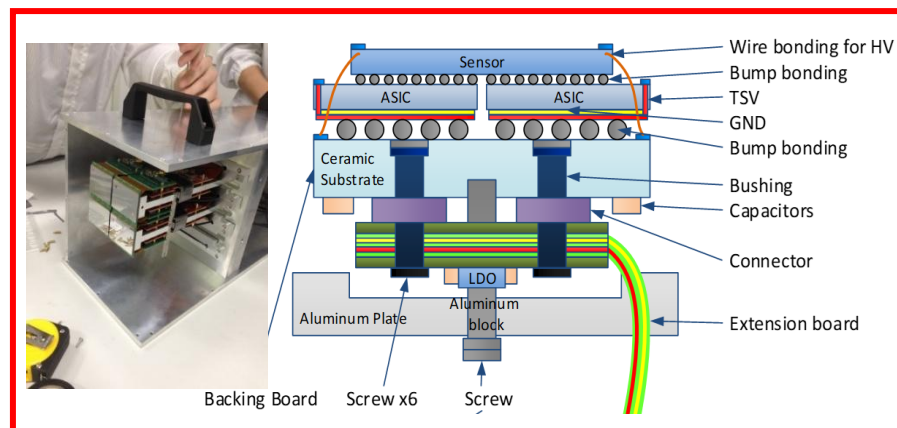
四 总结和未来规划

## 基于共享以及工艺相通性，高能所粒子天体物理中心与东莞研究部共建了微纳加工平台

- 阿里原初引力波实验AliCPT-1，需要高性能超导探测器TES，目前只能依靠国际合作，为应对近年中美关系的不确定性风险，必须开展探测器技术自主研发
- 散裂中子源和先进光源预研制定了半导体像素阵列探测器和低温超导探测器等高性能探测器的研究规划，也需要成熟可靠的研发平台
- 目前该平台以满足阿里项目专用为主，未来计划可对外开放



低温超导探测器研制



半导体像素阵列探测器研制

低温超导探测  
技术

设备互补

人员共享  
设备共享  
工艺专用

先进光源预研  
平台

## ▶ 探测器专用6寸工艺平台，具备光刻、镀膜以及刻蚀（含深硅刻蚀）能力

- 具有制备TES、SQUID、STJ、KID等多种低温超导探测器的能力
- 正在扩展半导体探测器的相关加工能力（部分工艺外协）



镀膜机



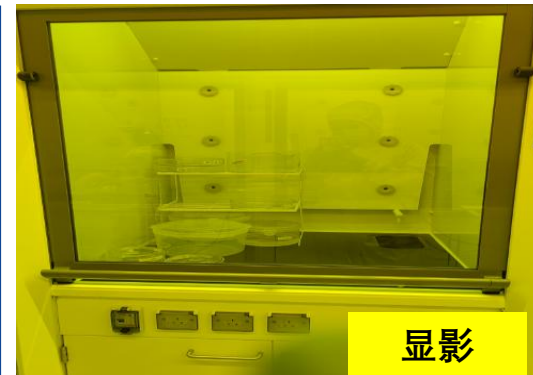
匀胶机



光刻机



刻蚀机



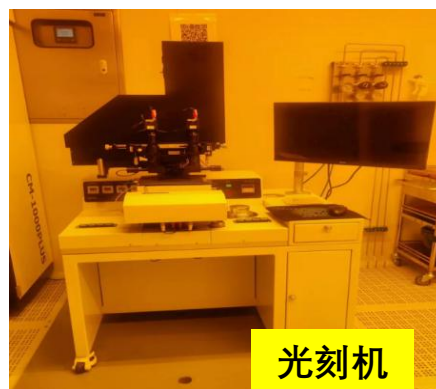
显影



CVD镀膜



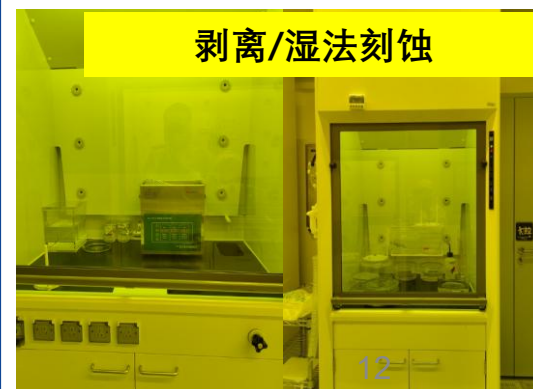
清洗



光刻机



划片机



剥离/湿法刻蚀

# 实验平台：高精度的表征设备

建立了专用测试平台，表征设备齐全，满足微纳加工工艺各种测试需求



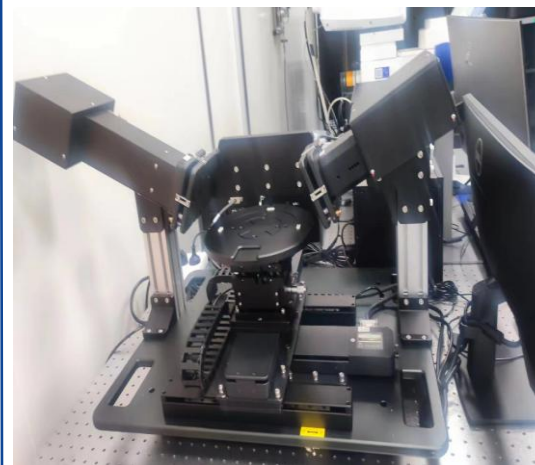
台阶仪：匀胶厚度测量



应力仪：镀膜均匀性



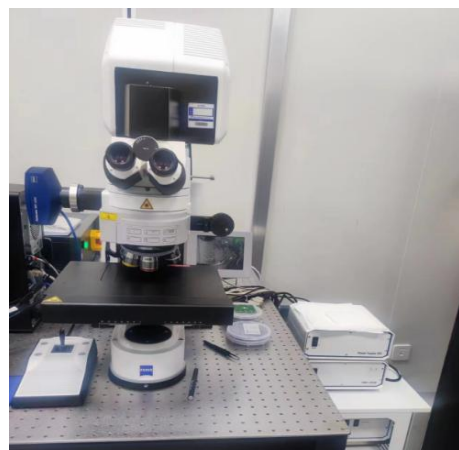
原子力显微镜：  
镀膜质量



椭偏仪：镀膜均匀性



XRD：多层膜质量



共聚焦显微镜：刻蚀质量



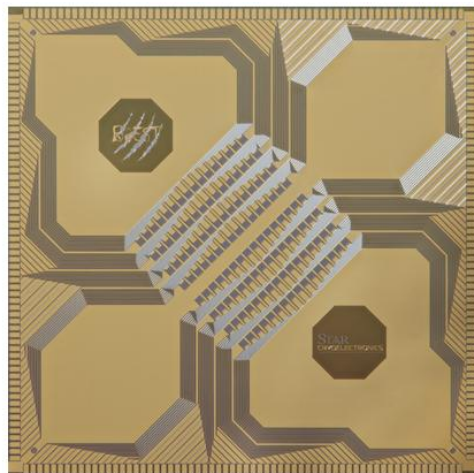
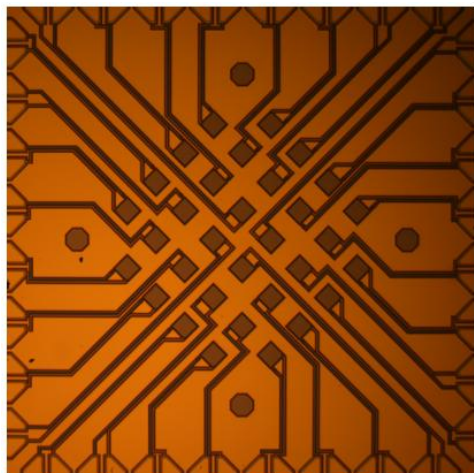
扫描电镜：刻蚀质量



高精度显微镜：光刻质量



探针台：基本电学特性



探测器设计

材料选择

$$\Delta E = 2.355(F\epsilon E)^{1/2}$$

面积

厚度

吸收效率

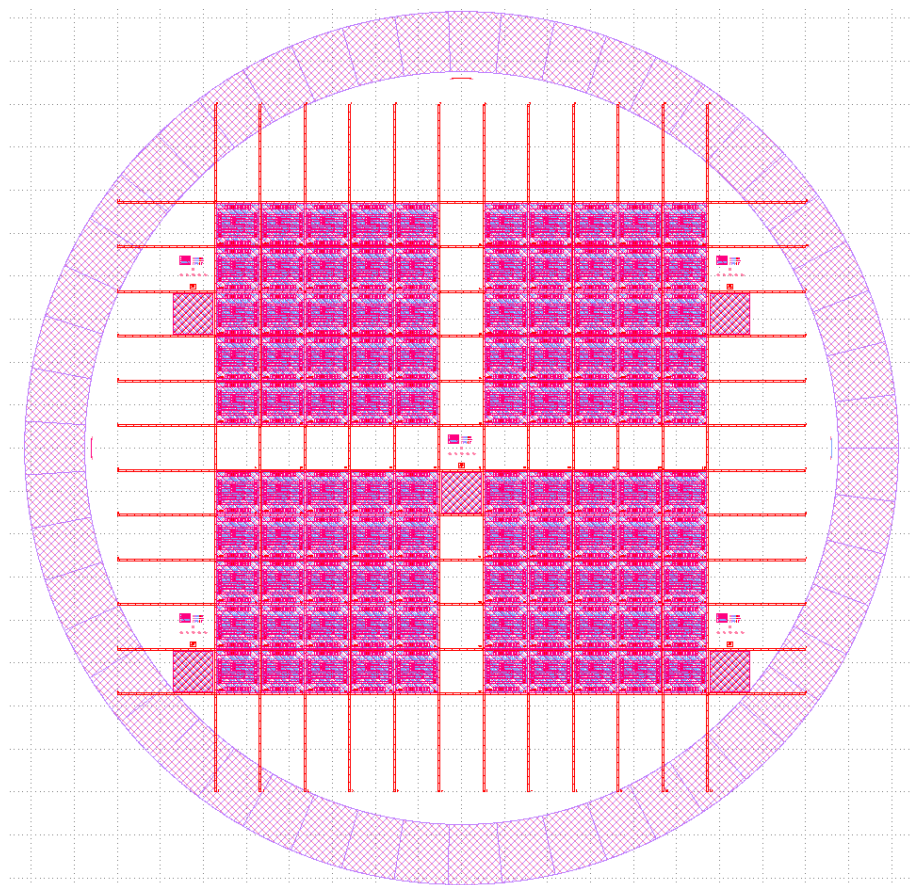
综合实验需求、技术成熟度、实验室情况考虑

DOI: 10.1109/TASC.2026.3664278

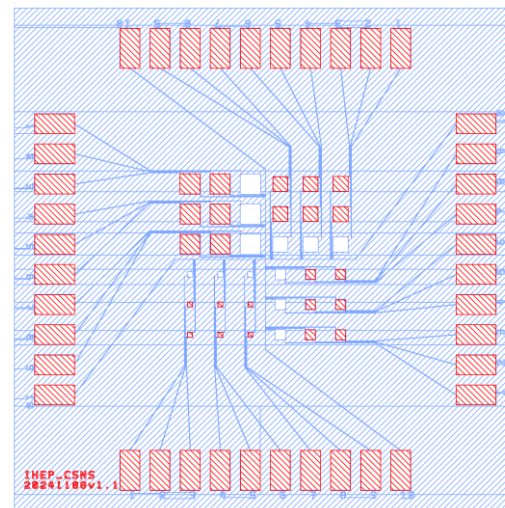
Material	Energy gap $\Delta_g$	Critical temperature $T_C$	$\Delta E$ at 2.48 eV	$\Delta E$ at 1 keV	$\Delta E$ at 6 keV
	( $\mu\text{eV}$ )	(K)	(eV)	(eV)	(eV)
Niobium (Nb)	1550	9.3	0.208	4.2	10.2
Vanadium (V)	820	5.4	0.15	3.0	7.5
Tantalum (Ta)	700	4.5	0.14	2.8	7
Aluminium (Al)	180	1.2	0.07	1.4	3.5
Molybdenum (Mo)	139	0.915	0.06	1.25	3.1
Hafnium (Hf)	19.4	0.128	0.023	0.47	1.15

DOI: 10.1117/12.551086

## 第一版Nb/Al基STJ探测器设计



4寸晶圆包含100个die (5mm\*5mm)



1个die包含6×6个探测器像素

4种像素尺寸

10um\*10um

50um\*50um

100um\*100um

200um\*200um



Si SiO2 Nb Al AlOx 光刻胶

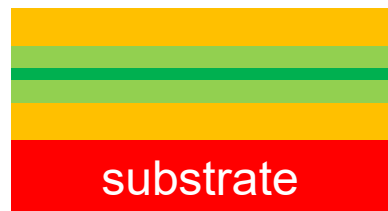
Nb/Al/AlOx/Al/Nb

150nm/10nm/1nm/10nm/150nm

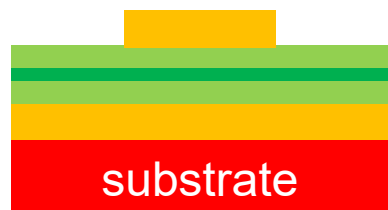
## 探测器制备



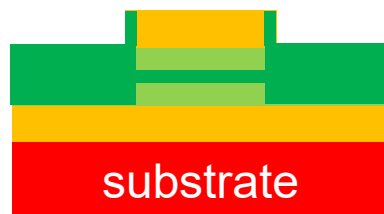
1. 备片



2. 长5层膜



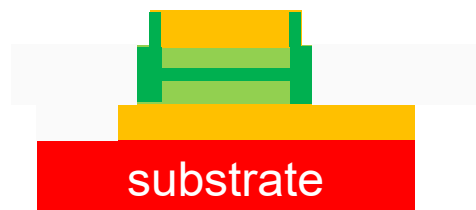
3. 顶层铌刻蚀



4. 阳极氧化



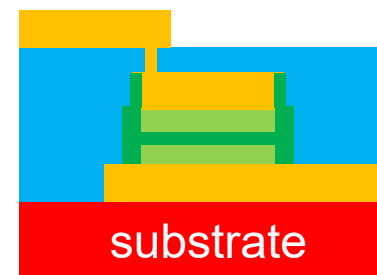
5. 氧化层刻蚀



6. 底层铌刻蚀



7. SiO<sub>2</sub>剥离

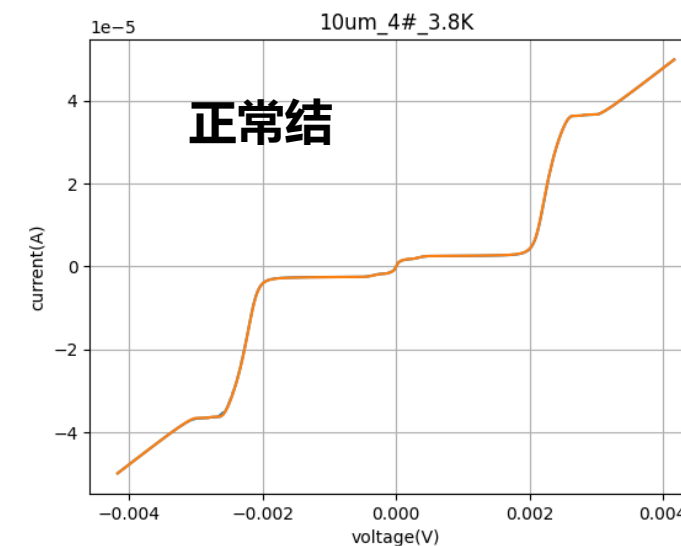
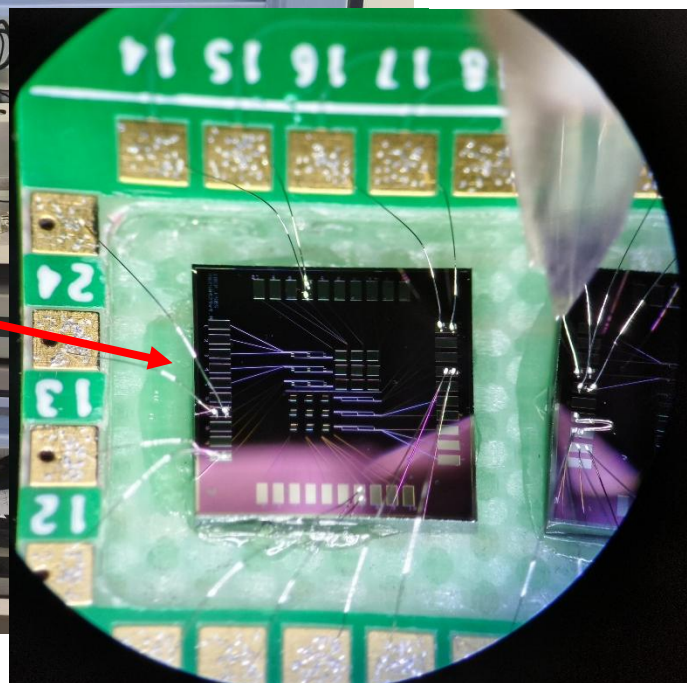
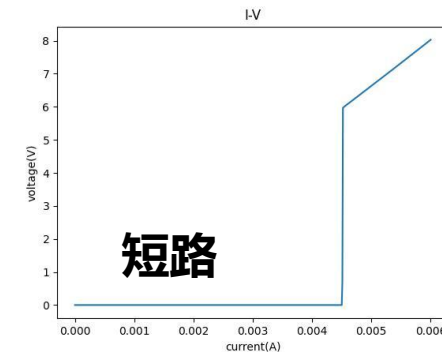
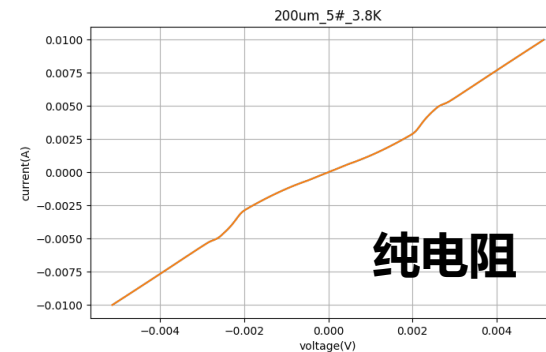
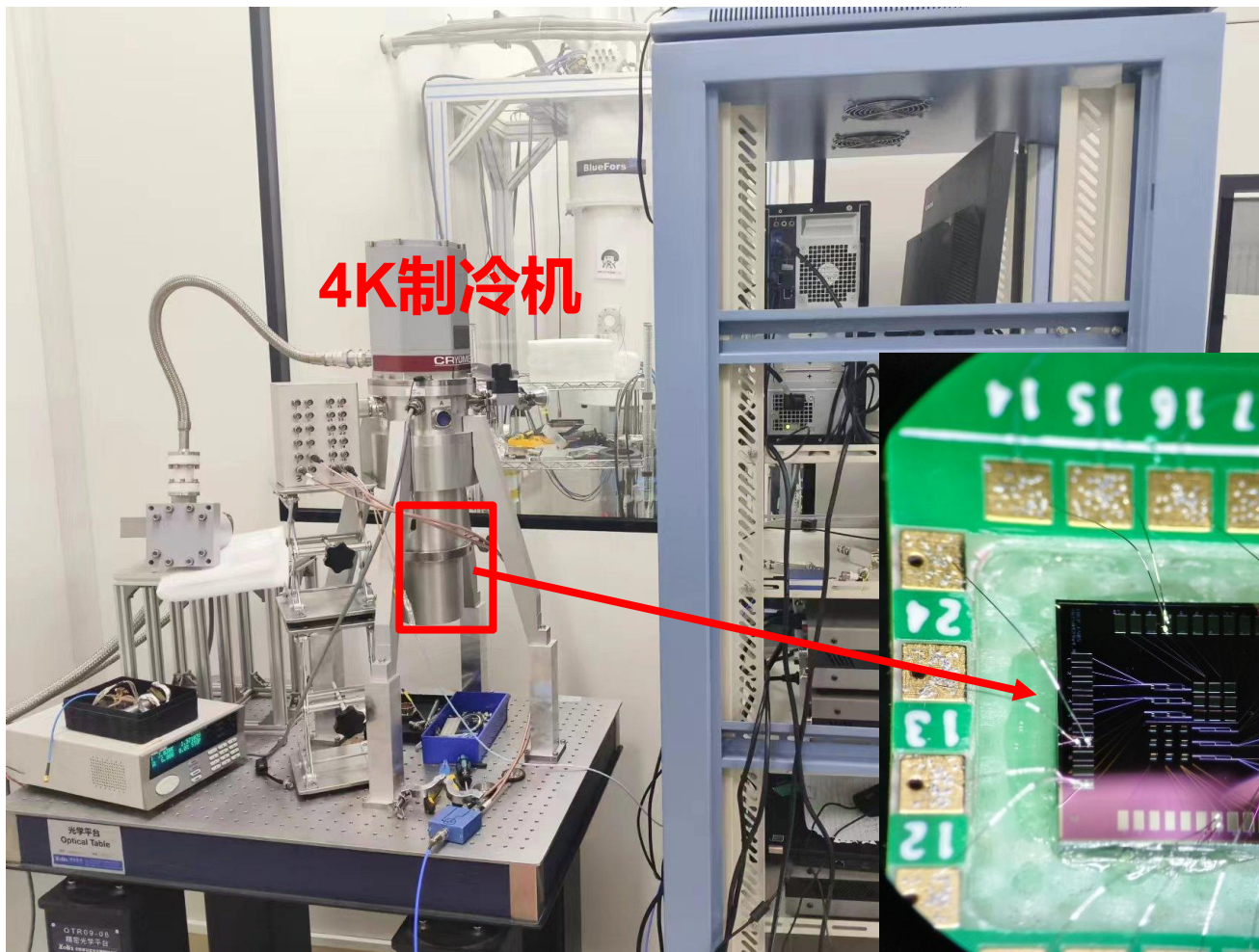


8. 导线铌刻蚀

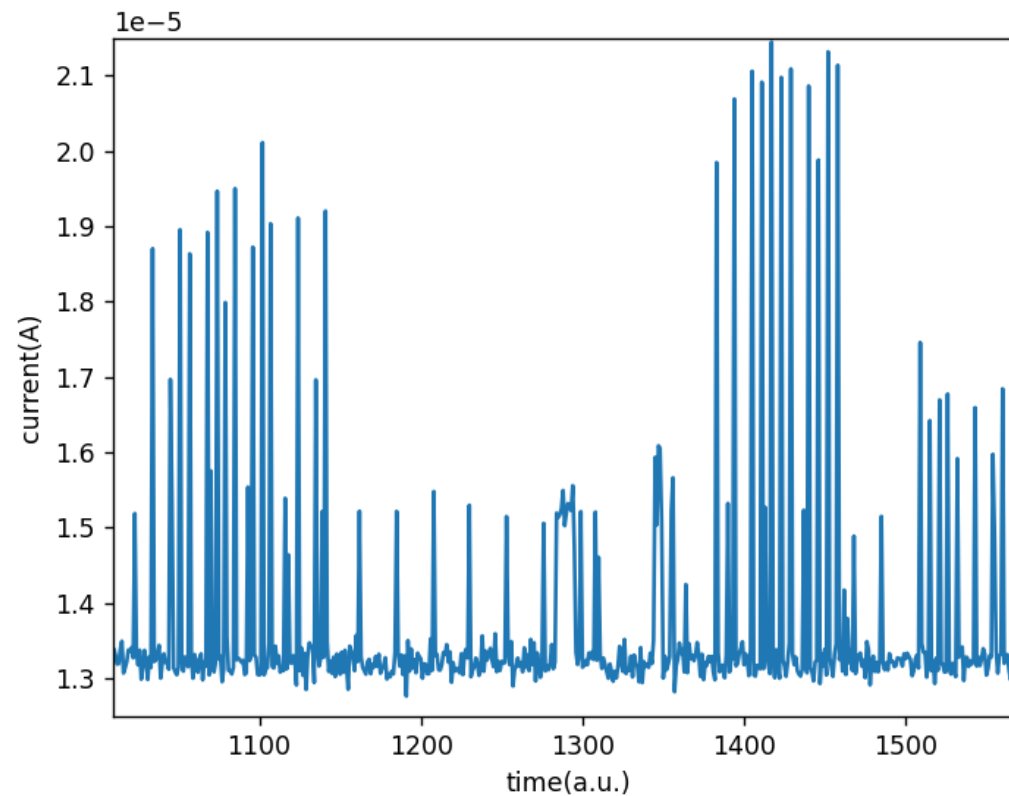
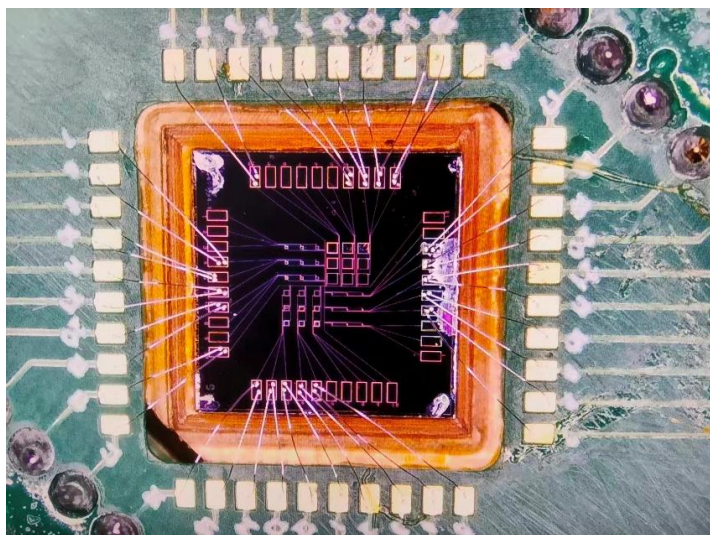
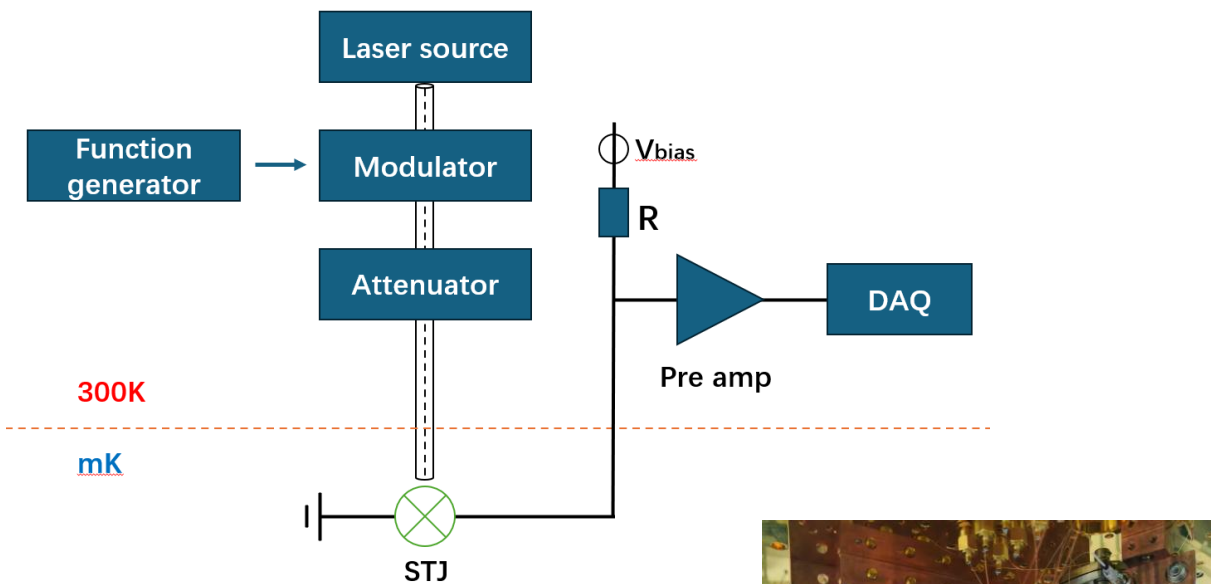
- Nb
- Al
- AlO<sub>x</sub>
- SiO<sub>2</sub>

包括：  
5次光刻  
2次磁控溅射  
1次ICPCVD  
1次阳极氧化  
1次离子束刻蚀  
2次ICPRIE  
1次RIE  
1次剥离

## IV测试

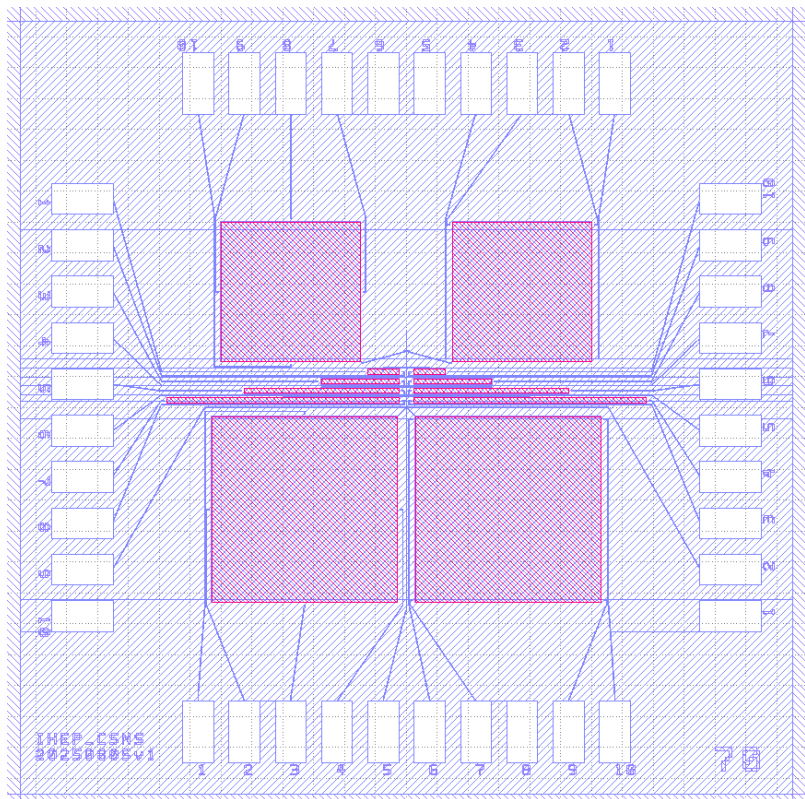


## 光学测试



探测器对**不同周期**和**不同强度**的入射信号响应

## 第一版Ta/Al基STJ探测器设计



- 1. Ta (73) 原子序数大于Nb (41)
- 2. Ta (0.7meV) 能隙小于Nb (1.55meV)
- 3. 长条形和正方形有位置分辨能力



1. 备片



2. 长三层膜



3. 三层膜刻蚀



4. SiO2刻蚀



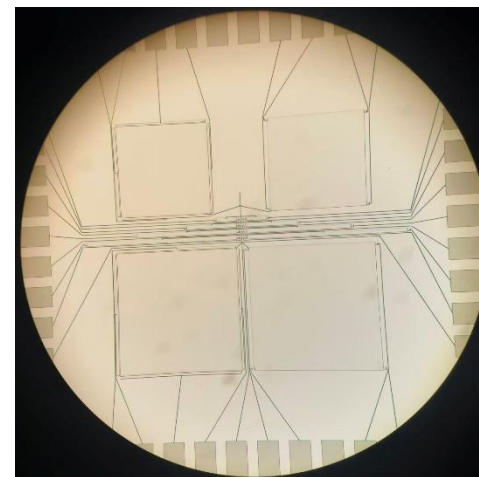
5. Nb导线刻蚀



6. Ta吸收体剥离

- Al
- AlOx
- SiO2
- Nb
- Ta

已加工完成



一 STJ探测器简介

二 STJ探测器应用

三 探测器研制进展

四 总结和未来规划

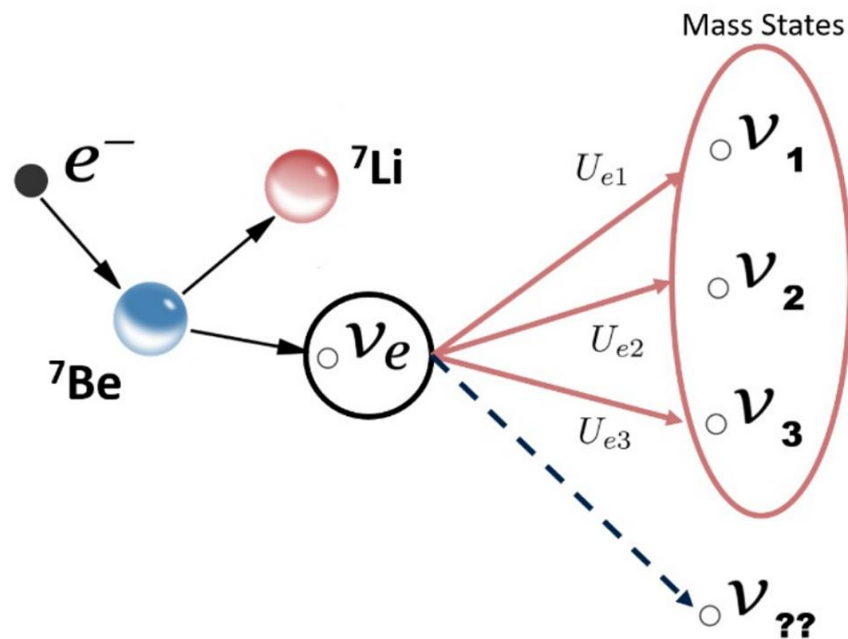
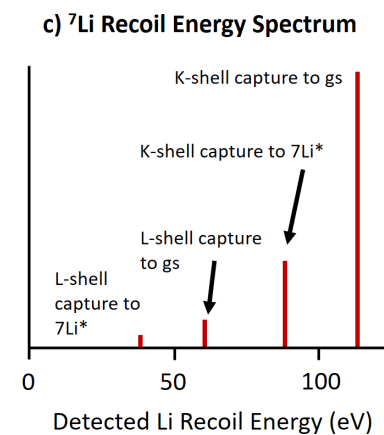
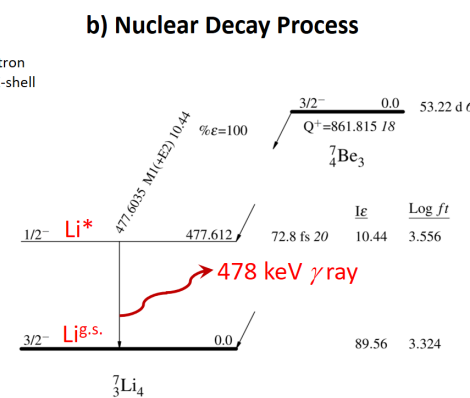
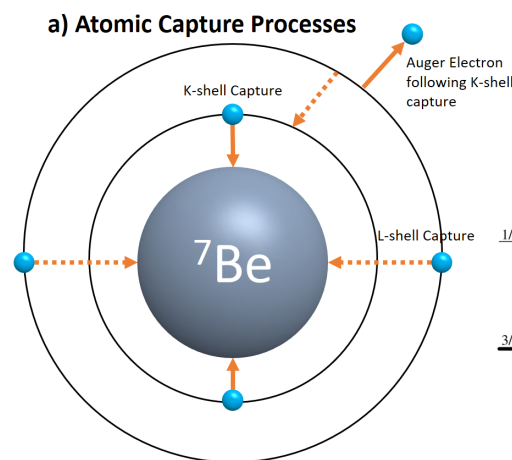
- 1.STJ探测器在国民经济和基础物理研究等方向均有广泛应用**
- 2.根据高能所和散裂中子源的发展规划，制定了以同步辐射线站X射线吸收谱仪研究为主的研制计划**
- 3.目前已经完成了样机制备，并进行了初步测试**
- 4.期待与各位同行的合作**

**谢谢各位专家，敬请批评指正！**

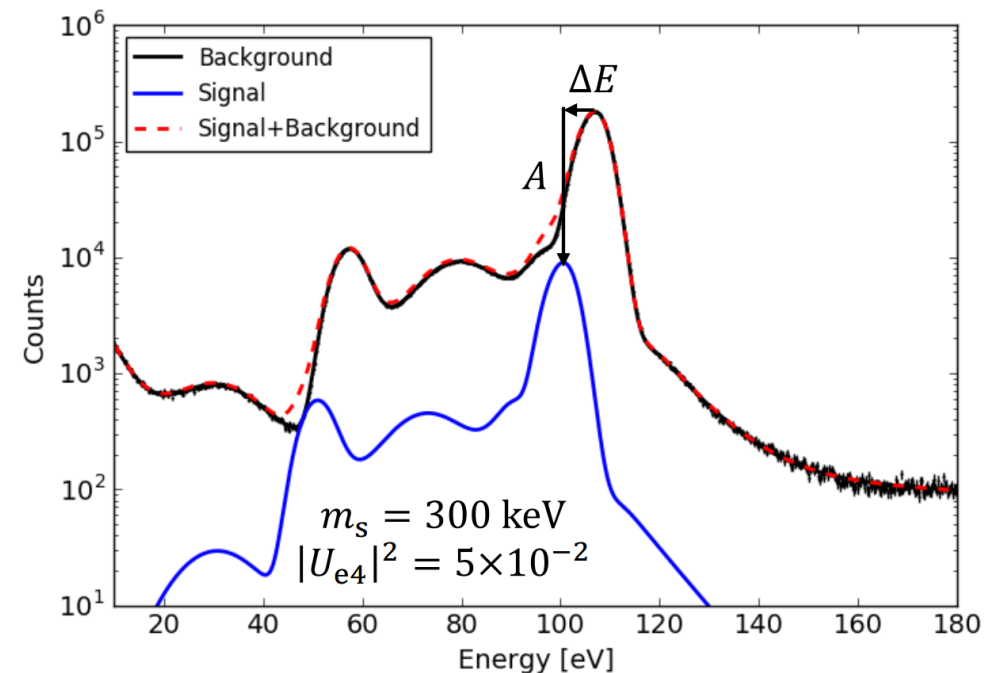


# Sterile Neutrino

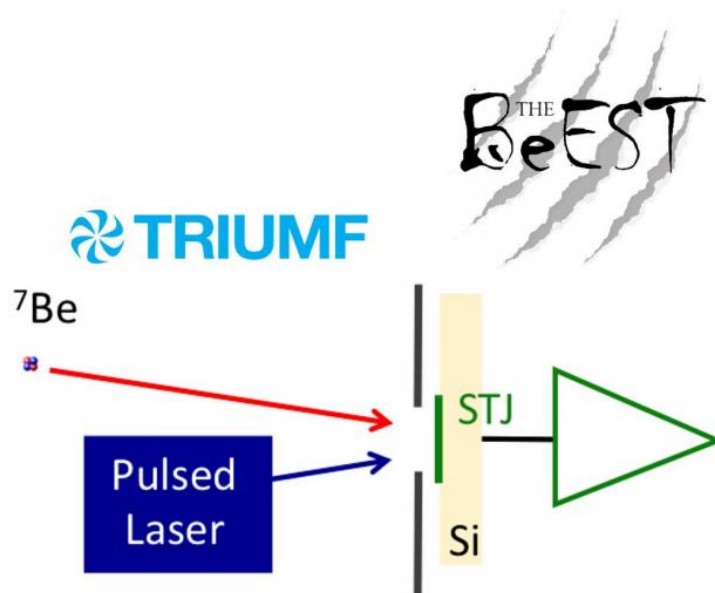
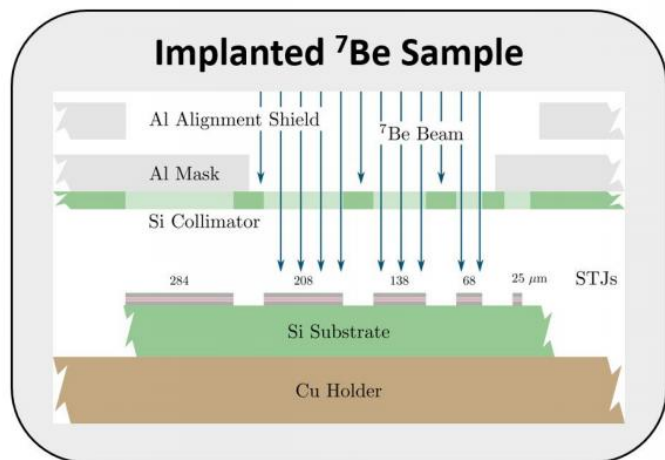
ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO	STERILE NEUTRINO
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$\nu_s$
MASS	< 1 electronvolt		> 1 electronvolt
FORCES THEY RESPOND TO	Weak force Gravity		Gravity
DIRECTION OF SPIN	All three "left handed"		"Right handed"



需要高能量分辨的低能粒子探测器



## The BeEST – Beryllium Electron-capture with Superconducting Tunnel junctions



### Ta-Based STJ Detectors

“Test” chips with 10 pixels of 5 sizes

#### Phase-I

#### Phase-II

Cooled to 100 mK in an adiabatic demagnetization refrigerator (ADR)

### Simultaneous Laser Calibration

Provides energy calibration to  $<0.01$  eV

