



锦屏低温晶体量热器深冷半导体温度 传感器NTD-Ge及读出电子学研制

薛明萱（代表CUPID-CJPL）

核探测与核电子学国家重点实验室
中国科学技术大学

第二届无中微子双贝塔衰变及相关物理研讨会 珠海 2023.5.19-23

报告提纲

✿ 物理背景

- ✿ 无中微子双贝塔衰变
- ✿ 低温粒子探测器技术
- ✿ 半导体温度传感器NTD-Ge

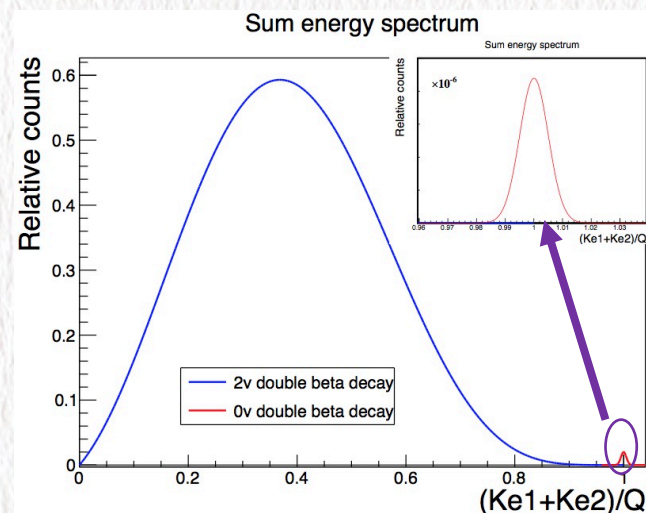
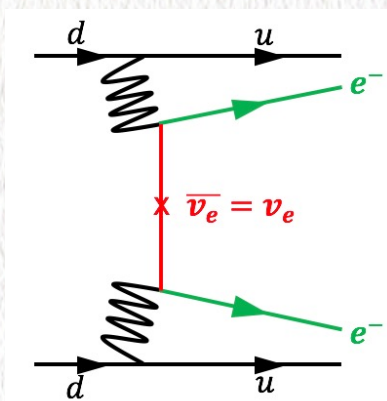
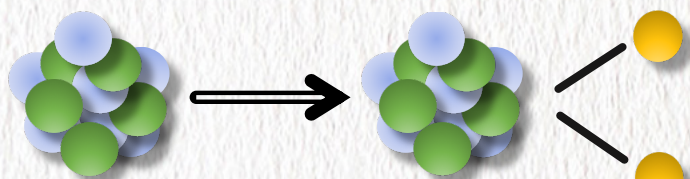
✿ 反应堆中子辐照核嬗变NTD-Ge研制

- ✿ 辐照前预处理工艺
- ✿ 反应堆中子辐照
- ✿ 辐照后微纳加工工艺
- ✿ 深冷mK低温测试（低温低噪声小信号电子学）

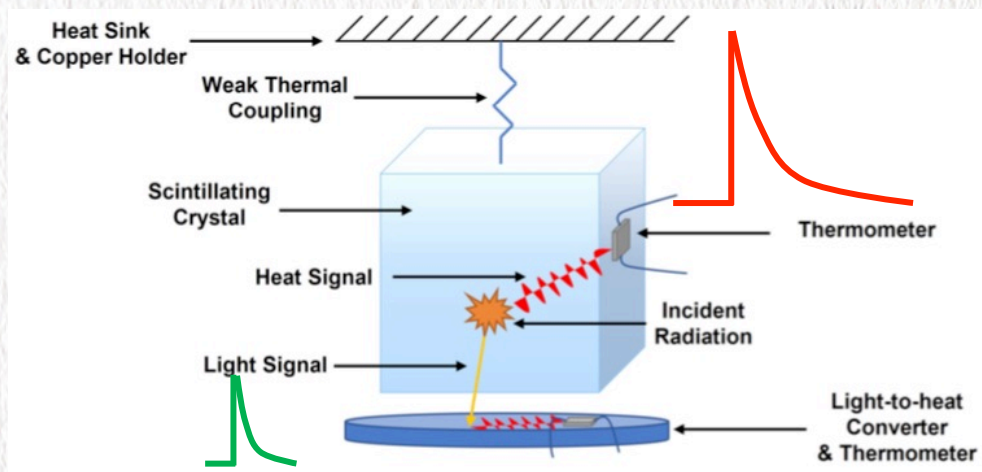
✿ 总结与展望

无中微子双贝塔衰变与低温量热器技术

❁ 无中微子双贝塔衰变（能谱法）



❁ 荧光-热量双读出低温量热器技术(^{100}Mo)



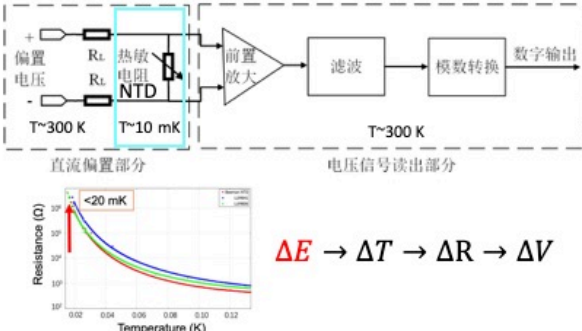

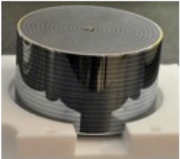
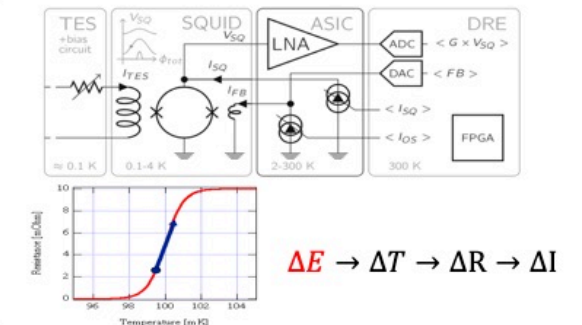


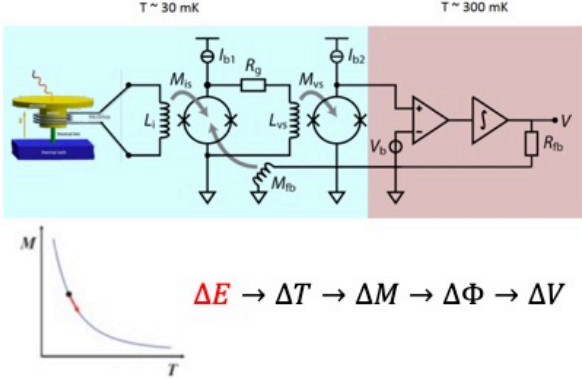
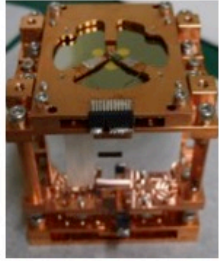
❁ 独特优势:

- ❁ 核心吸收体选择广泛
- ❁ 探测效率高“源=吸收体”
- ❁ 极低探测阈值 (~ 15 eV)
- ❁ 极好能量分辨 (2%)
- ❁ 粒子鉴别能力 α vs. β/γ

❁ 重要组成:

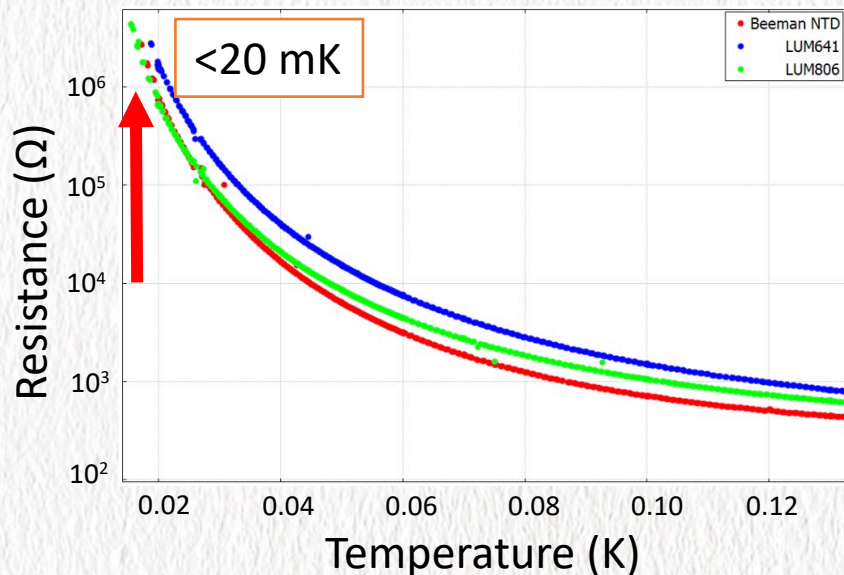
- ❁ 吸收体 (含靶核)
- ❁ **高灵敏温度传感器**
- ❁ 弱热连接
- ❁ 低温恒温器 (热沉)
- ❁ 光探测器

低温粒子探测器常用高灵敏温度传感器

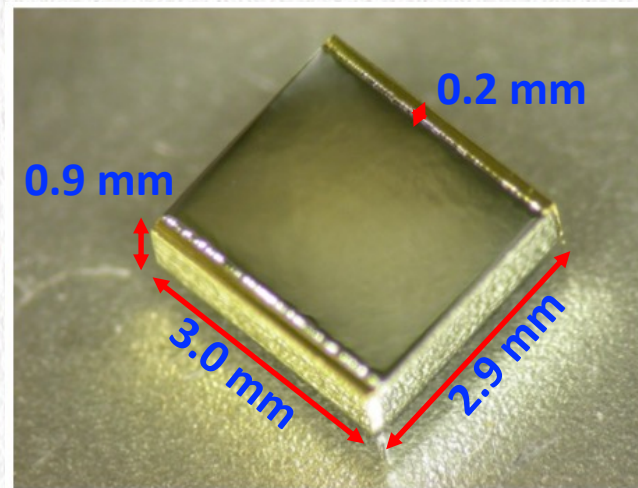
低温温度传感器	探测示意	状态描述	实验
<p>中子辐照核嬗变掺杂Ge 半导体传感器NTD-Ge Neutron Transmutation Doped Germanium</p>	 <p>直流偏置部分 电压信号读出部分</p> <p>$T \sim 300\text{ K}$ $T \sim 10\text{ mK}$ $T \sim 300\text{ K}$</p> <p>$\Delta E \rightarrow \Delta T \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta V$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 高灵敏度 $A \sim 1-10$ • 响应慢 ms • 动态范围大 eV-keV-MeV • 读出电子学相对简单，室温端 	<p>CUORE ($0\nu\beta\beta$)</p>  <p>EDELWEISS (Dark Matter)</p> 
<p>超导转变边沿传感器TES Transition Edge Sensor</p>	 <p>$T \sim 0.1\text{ K}$ $0.1-4\text{ K}$ $2-300\text{ K}$ 300 K</p> <p>$\Delta E \rightarrow \Delta T \rightarrow \Delta R \rightarrow \Delta I$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 极高灵敏度 $A \sim 100-1000$ • 响应快 μs • 动态范围小 eV- keV • 读出复杂，SQUID读出，mK低温端，磁屏蔽 	<p>SuperCDMS (Dark Matter)</p>  <p>CRESST (Dark Matter)</p> 
<p>金属磁性量热仪MMC Metal Magnetic Calorimeter</p>	 <p>$T \sim 30\text{ mK}$ $T \sim 300\text{ mK}$</p> <p>$\Delta E \rightarrow \Delta T \rightarrow \Delta M \rightarrow \Delta \Phi \rightarrow \Delta V$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 高灵敏度 A • 响应快 $< 1\mu\text{s}$ (intrinsic) • 动态范围大 • 读出复杂，SQUID读出，mK低温端，磁屏蔽 	<p>AMoRE ($0\nu\beta\beta$)</p> 

mK低温传感器NTD-Ge

❁ 低温晶体量热器的核心部件之一，可以实现 μK 量级温度变化的精密测量



NTD-Ge传感器电阻-温度变化关系



尺寸 $3 \times 2.9 \times 0.9 \text{ mm}^3$

典型NTD-Ge传感器

❁ NTD-Ge电阻-温度R-T曲线关系描述

$$R = R_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^\alpha$$

其中， $\alpha = 0.5$

Ge本征属性 $\rightarrow R_0$

掺杂浓度 $\rightarrow T_0$

❁ NTD-Ge由伯克利国家实验室研制，典型取值 $R_0 \sim 1.13 \Omega$ ， $T_0 \sim 3.84 \text{ K}$ ， $\sim 370 \text{ M}\Omega @ 10 \text{ mK}$

NTD-Ge物理原理

✿ 中子核嬗变掺杂锗传感器 (Neutron Transmutation Doped Ge thermistors)

Five stable isotopes	Natural abundance %	Doped process	Type
$^{70}_{32}\text{Ge}$ (3.25 b)	20.7	$^{70}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow ^{71}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{EC} ^{71}_{31}\text{Ga} + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 11.43$ d)	Acceptors p-type
$^{72}_{32}\text{Ge}$	27.5	$^{72}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow ^{73}_{32}\text{Ge}(\text{stable})$	-
$^{73}_{32}\text{Ge}$	7.7	$^{73}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow ^{74}_{32}\text{Ge}(\text{stable})$	-
$^{74}_{32}\text{Ge}$ (0.52 b)	36.6	$^{74}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow ^{75}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{\beta^-} ^{75}_{33}\text{As} + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 82.8$ m)	Donors n-type
$^{76}_{32}\text{Ge}$ (0.16 b)	7.5	$^{76}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow ^{77}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{\beta^-} ^{77}_{33}\text{As} + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 11.3$ h) $\xrightarrow{\beta^-} ^{77}_{34}\text{Se} + \bar{\nu}_e$ ($T_{1/2} = 38.8$ h)	Donors n-type

✿ 净载流子浓度: $N_A - N_D = N_{^{71}_{31}\text{Ga}} - (N_{^{75}_{33}\text{As}} + 2 \times N_{^{77}_{34}\text{Se}})$

✿ 蛙跳传导机制(Hopping Conduction) 在足够低温温度下(<1 K), 电子作为载流子将从一个能级跃迁到另一个能级, 实现半导体热敏电阻属性

报告提纲

✿ 物理背景

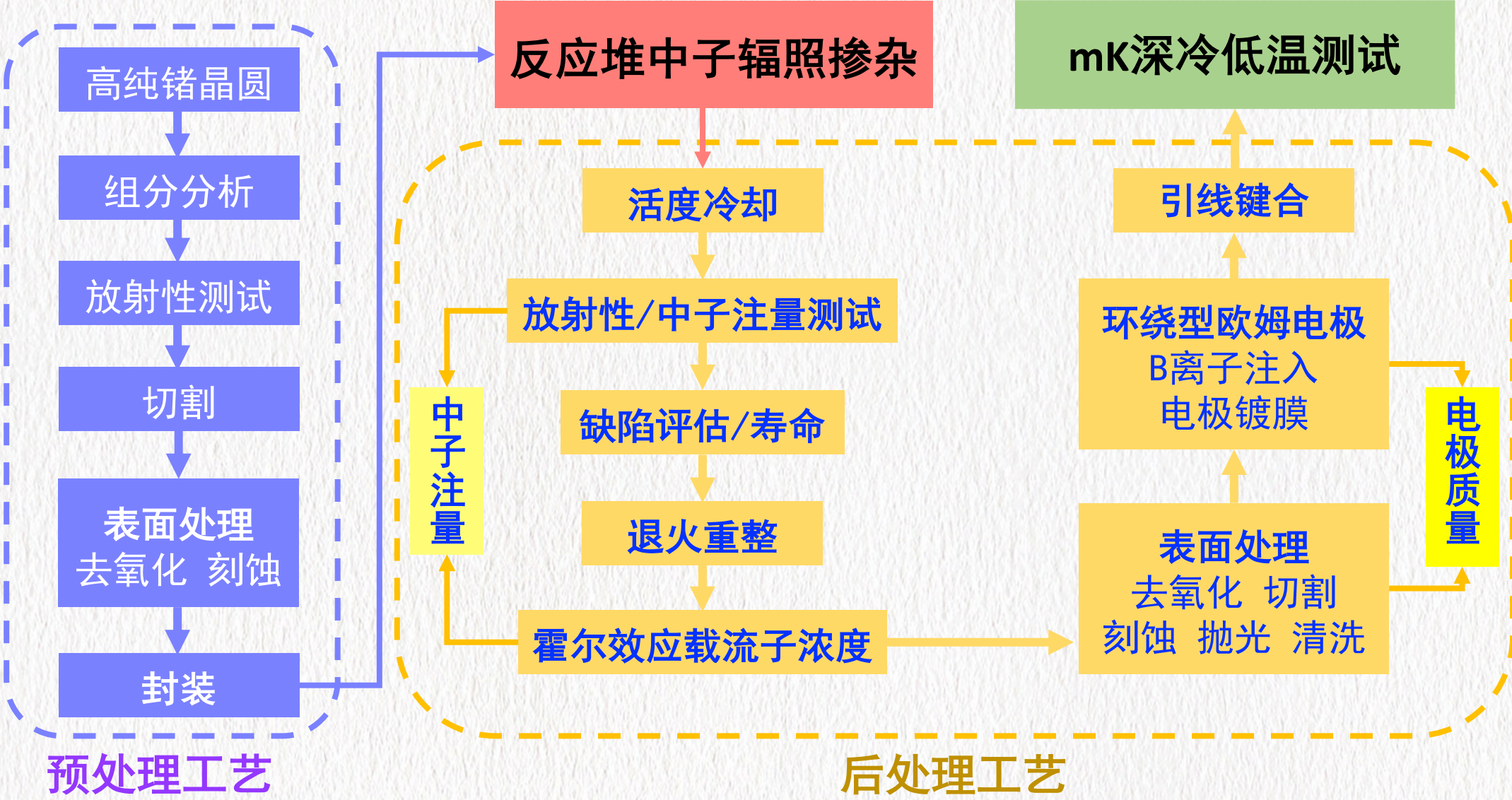
- ✿ 无中微子双贝塔衰变
- ✿ 低温粒子探测器技术
- ✿ 半导体温度传感器NTD-Ge

✿ 反应堆中子辐照核嬗变NTD-Ge研制

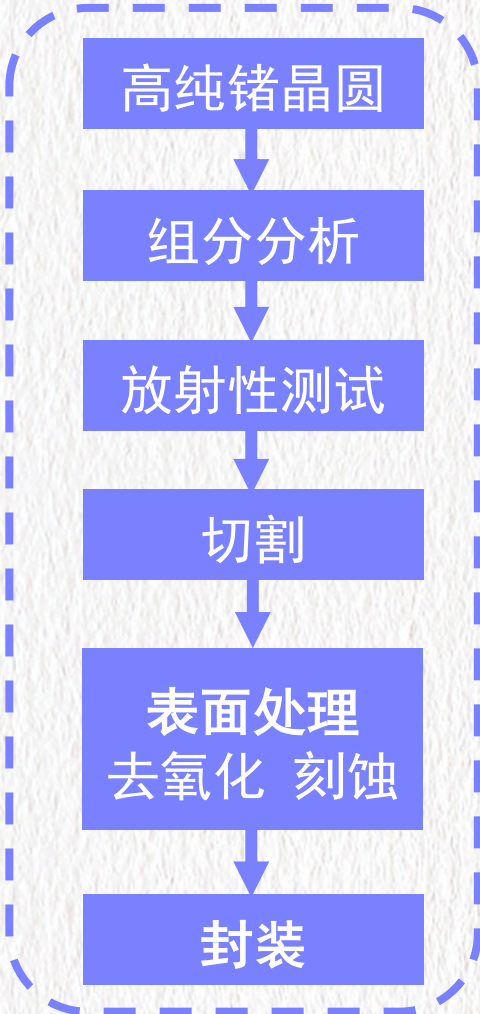
- ✿ 辐照前预处理工艺
- ✿ 反应堆中子辐照
- ✿ 辐照后微纳加工工艺
- ✿ 深冷mK低温测试（低温低噪声小信号电子学）

✿ 总结与展望

NTD-Ge研制技术路线

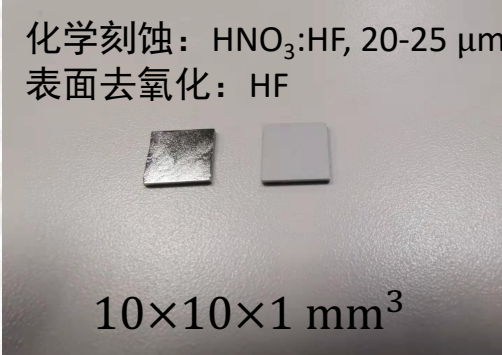
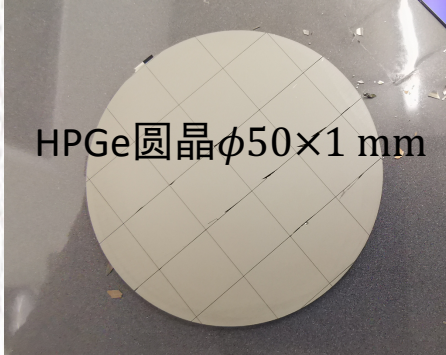


NTD-Ge预处理研制工艺



预处理工艺

- ✿ 10N HPGe, 比利时Umicore公司, 金刚石划片机切割@科大微纳加工中心
- ✿ 上海应用物理所ICPMS测试丰度; 锦屏低本底HPGe谱仪测试放射性杂质



核素	丰度
Ge-70	0.199
Ge-72	0.276
Ge-73	0.077
Ge-74	0.373
Ge-76	0.076

Isotope	Activity (mBq/pcs)
Co60	< 0.32
Cs137	< 0.29
K40	< 6.00 (0.28 + -3.49)
Th232_Ac228	< 2.13 (0.98 + -0.71)
Th232_Th228	< 0.33 (0.02 + -0.19)
U235	< 1.73
U238_Ra226	< 11.92 (5.42 + -3.96)
U238_Rn222	< 1.09 (0.55 + -0.33)

- ✿ HPGe片封装: 高纯石英盒 (磨砂口) + 聚酰亚胺胶带 + 铝箔 + 高纯铝盒

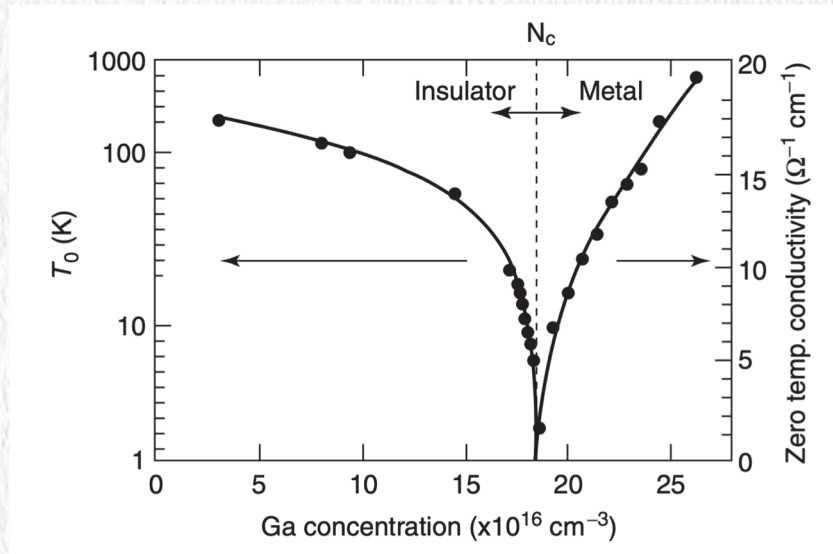


高纯石英盒封装

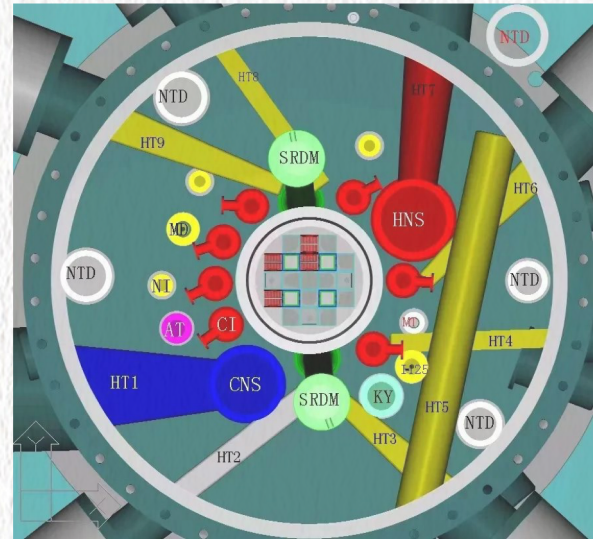
高纯铝盒封装

反应堆中子辐照掺杂

- ❁ 中国先进研究堆（China Advanced Research Reactor, CARR）@北京原子能所
 - ❁ 核功率60 MW，最大热中子注量率大于 $1 \times 10^{15} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
 - ❁ 轻水冷却、重水慢化，多个试验孔道
- ❁ 2020年底同北京原子能所合作完成NTD-Ge辐照实验
- ❁ 设置6个不同中子注量点 $E18 \text{ n}/\text{cm}^2$ ，共7个样品罐



金属绝缘体转变(metal-to-insulator transition, MIT)



CARR堆芯孔道图

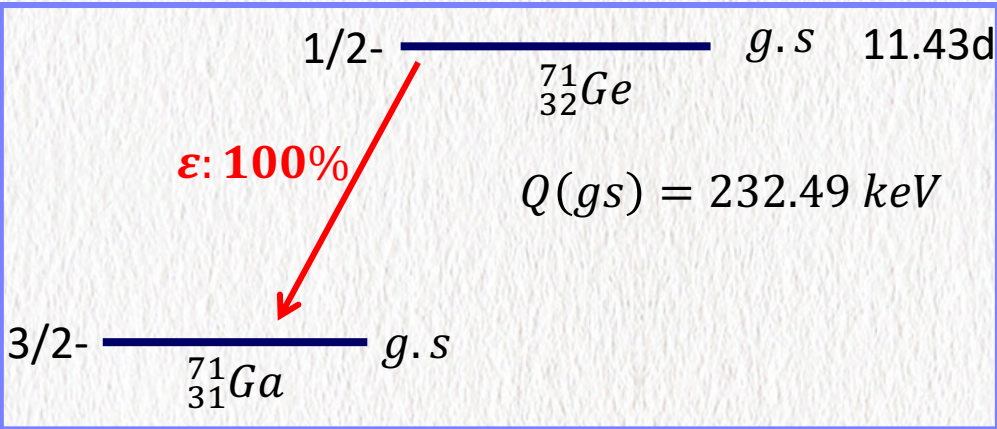
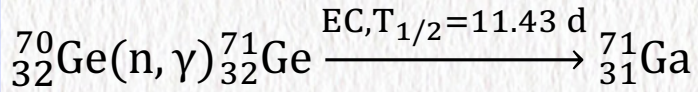


NTD-Ge后处理研制工艺



NTD-Ge反应堆中子辐照注量

- ✿ NTD-Ge传感器关键参数 T_0 取决于掺杂浓度，中子注量的精确测量是关键
- ✿ 提出通过被辐照样品Ge自身放射性标定热中子注量 (专利202111202078.8; arXiv:2302.12982)
- ✿ 半衰期相对较长 (11.43 d)，信号能区干净



Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR 1	1.1	1.52 % 5	1.68E-5 5
XR $k\alpha 2$	9.225	13.3 % 5	0.00123 5
XR $k\alpha 1$	9.252	26.1 % 10	0.00242 9
XR $k\beta 3$	10.26	1.66 % 6	1.71E-4 6
XR $k\beta 1$	10.264	3.24 % 11	3.33E-4 12
XR $k\beta 2$	10.366	0.0275 % 10	2.85E-6 10

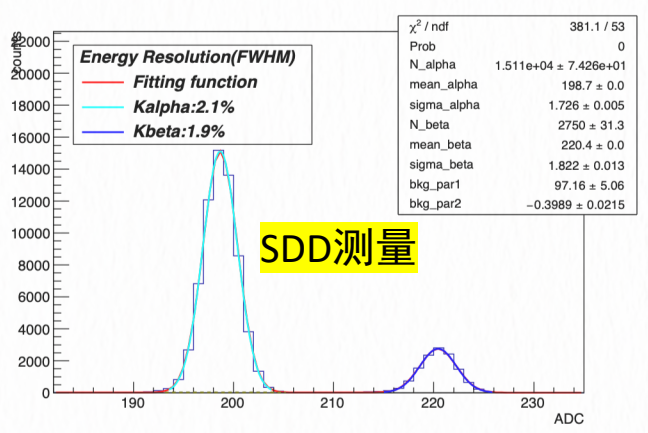
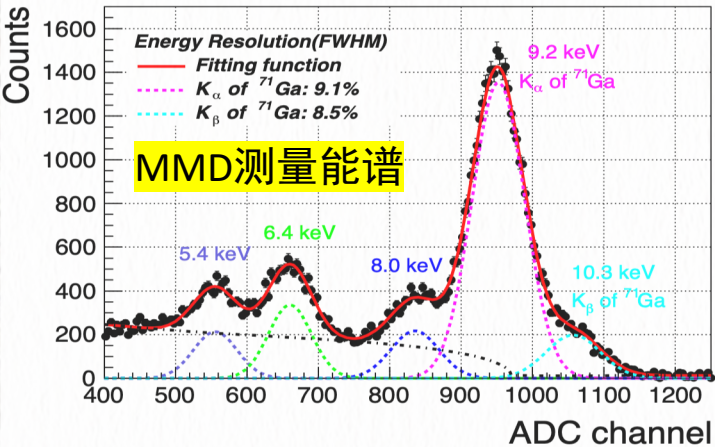
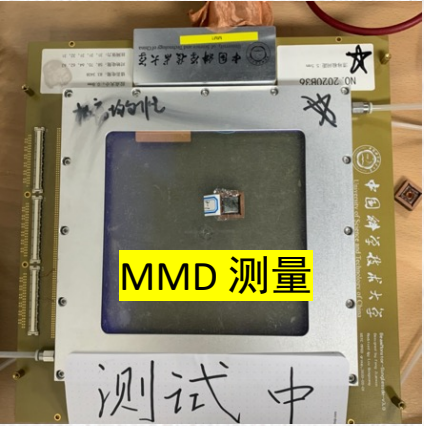
$$A(t) = \frac{\lambda \sigma \phi N_0}{\lambda - \sigma \phi} (e^{-\sigma \phi t_r} - e^{-\lambda t_r}) e^{-\lambda t}$$

$$\simeq \sigma \phi N_0 (1 - e^{-\lambda t_r}) e^{-\lambda t}, \text{ when } \sigma \phi \ll \lambda$$

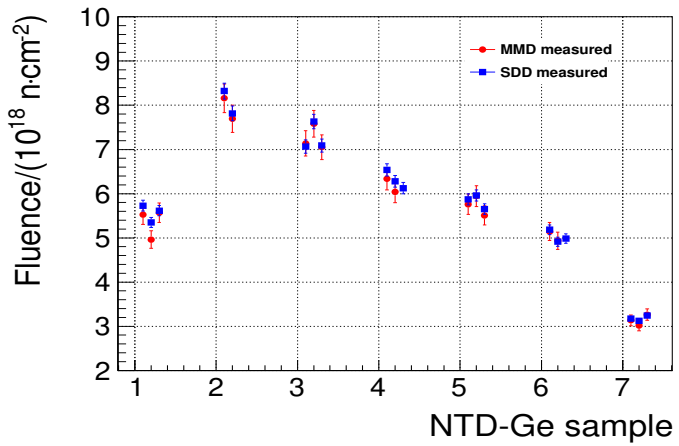
- ϕ : 为热中子通量
- σ : ${}^{70}\text{Ge}$ 中子俘获截面
- λ : ${}^{71}\text{Ge}$ 衰变常数

NTD-Ge中子辐照注量自监测

✿ Geant4模拟与实验相结合，微结构气体探测器和硅漂移探测器测试特征X射线



✿ 中子注量测量，MMD与SDD获得结果一致



Uncertainty-related item	Value in %	
	MMD	SDD
Peaks fitting	1.3	0.4
Efficiency	3.8	2.1
Input parameters	5.9	5.9
Total	7.1	6.3

NTD-Ge缺陷评估与退火重整

❁ 中子辐照缺陷：引入缺陷能级，影响载流子浓度

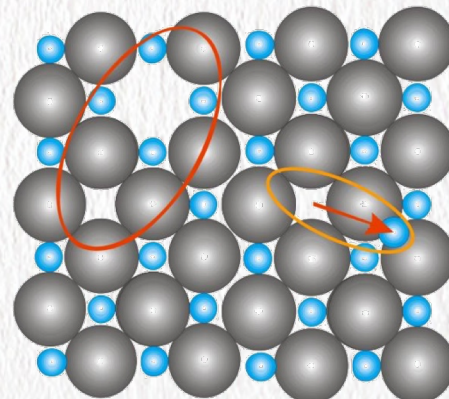
❁ 基于PALS正电子湮没寿命谱仪评估缺陷

❁ 空位型缺陷呈电负性，易捕获正电子

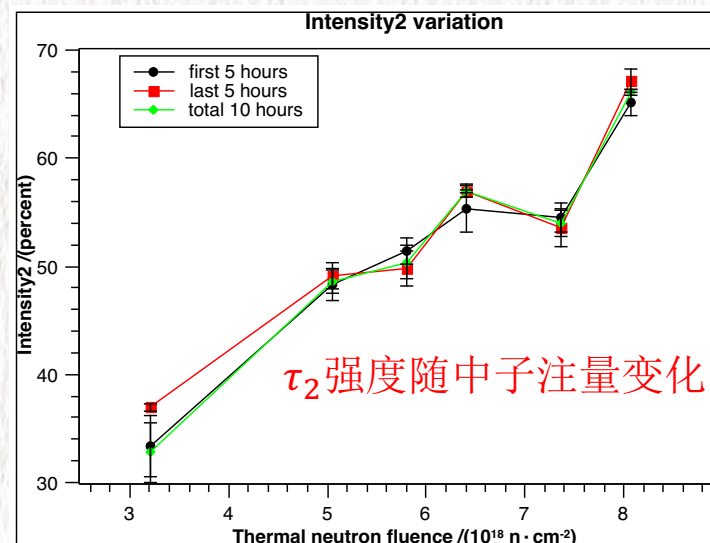
❁ 电子空间密度越高，正电子湮没寿命越短

❁ 缺陷浓度随中子注量增大而增加

❁ 高温退火后中子辐照引入缺陷基本完全恢复

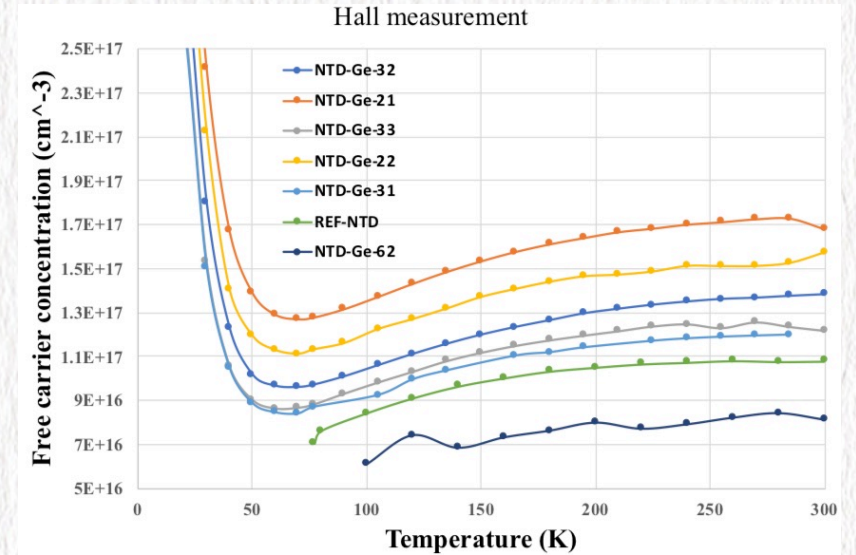
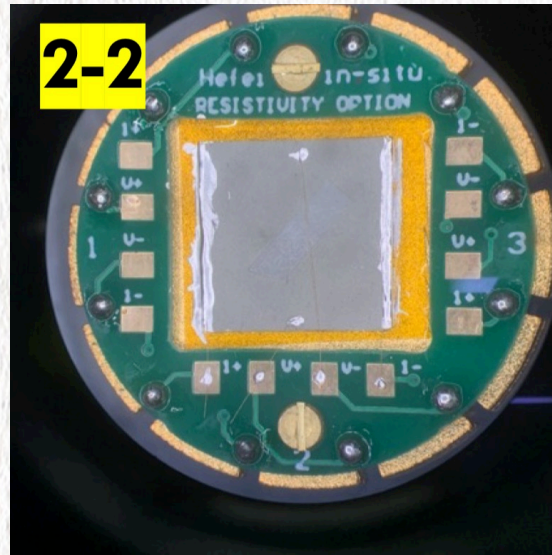
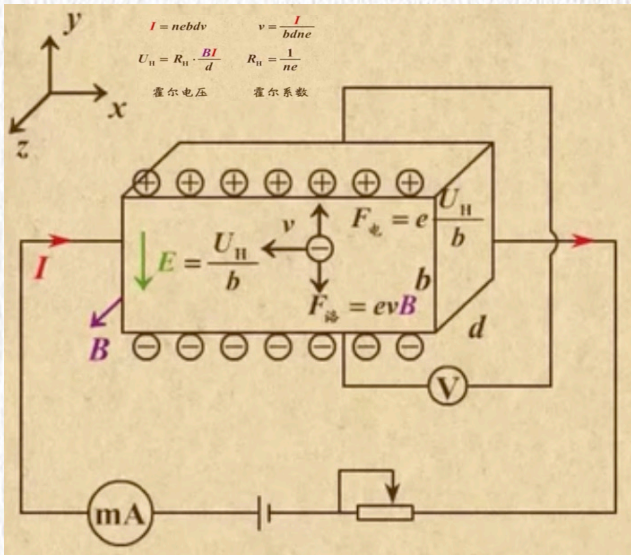


Sample	τ_1 (ps)	τ_2 (ps)	I_1 (%)	I_2 (%)
NTD-Ge2122	268.6	310.2	33.4	65.9
Anneal-NTD-Ge2122	228.5	409	96.3	3.5



NTD-Ge变温霍尔效应——载流子浓度

- ❁ 综合物性测量仪PPMS：测试温区10-300 K，磁感应强度(-3 T, +3 T)
- ❁ 银胶、金丝 ($\phi 25 \mu\text{m}$) 制作霍尔电极



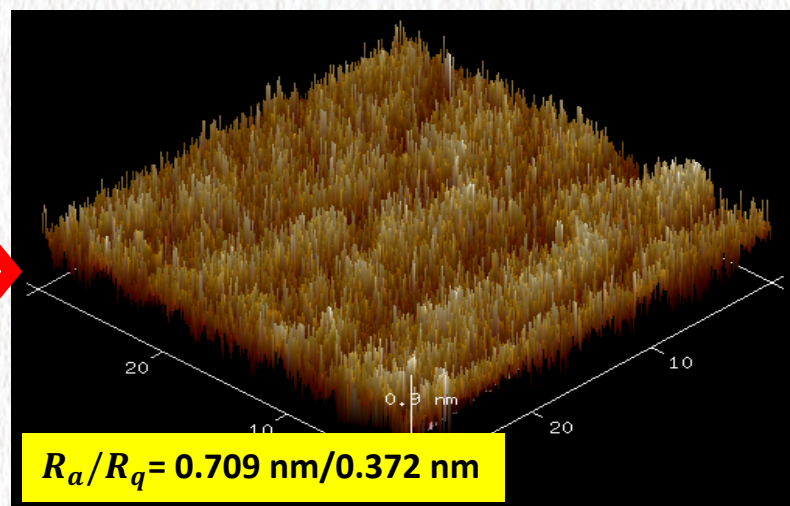
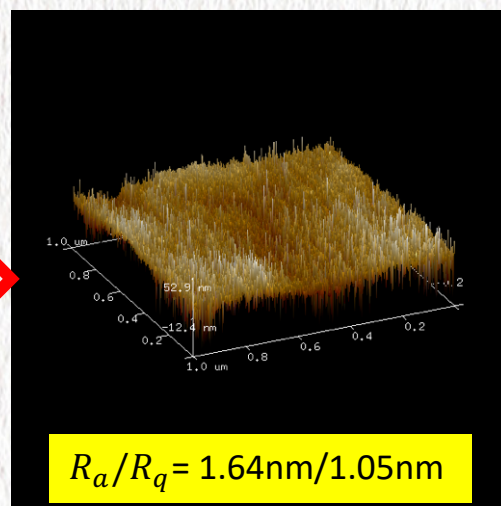
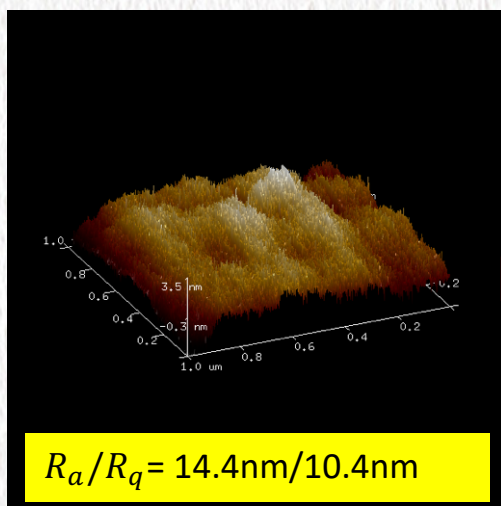
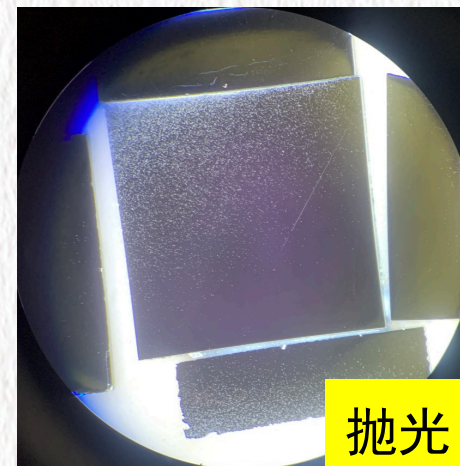
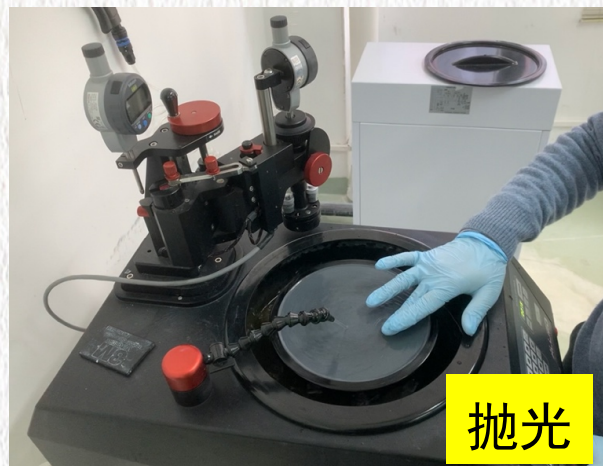
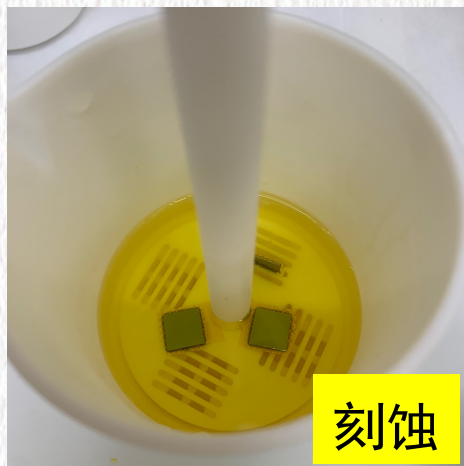
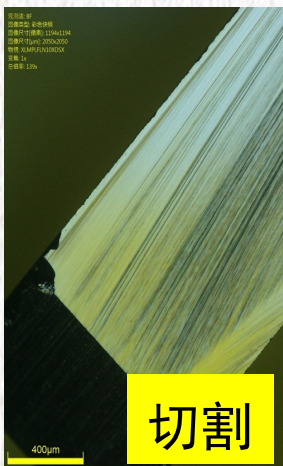
- ❁ 测试结果与杂质半导体载流子温度T分区模型一致
- ❁ 载流子浓度辅助确定中子注量，与自监测片获得结果可比，偏差来自霍尔因子

NTD-Ge后处理研制工艺



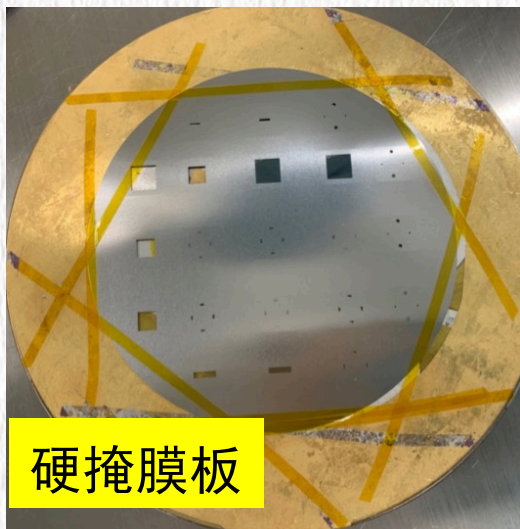
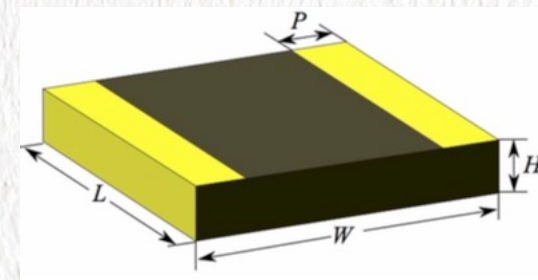
NTD-Ge后处理微纳加工工艺

❁ 表面处理：化学刻蚀，化学机械研磨+绒布、水抛

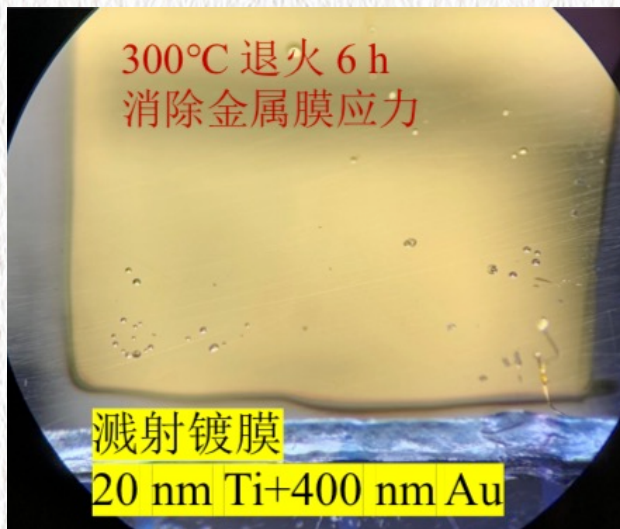


NTD-Ge欧姆电极

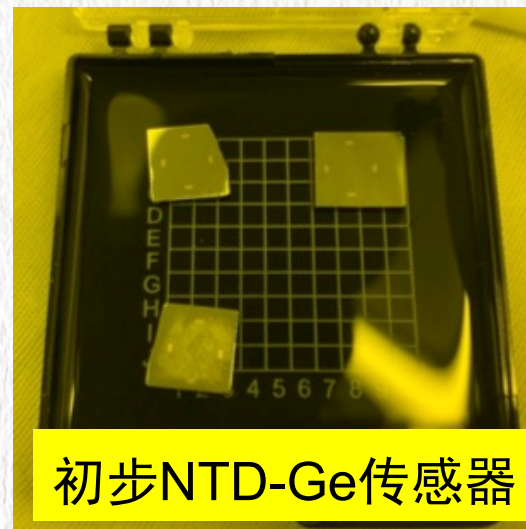
- ❁ 目标：环绕型欧姆电极，保证电极质量
- ❁ 实际以小pad电极为起始，硬掩膜板，先开展工艺研究
- ❁ B离子注入，形成重掺杂+电极蒸镀（磁控溅射、电子束蒸发镀膜）@ustc_nanofab



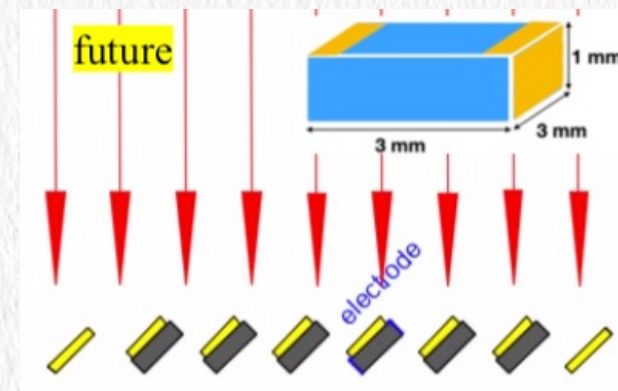
硬掩膜板



溅射镀膜
20 nm Ti+400 nm Au

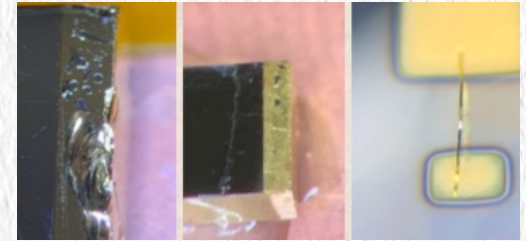


初步NTD-Ge传感器



mK深冷低温测试

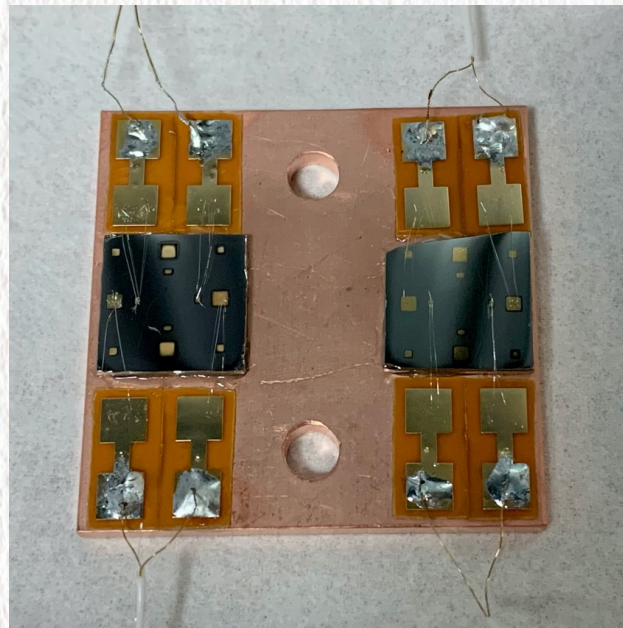
- ❁ 引线键合方式，连接至电学电路
- ❁ RUN6-RUN11，6个有效RUN优化更新热传导、热接触等
- ❁ 测试温区40-200 mK



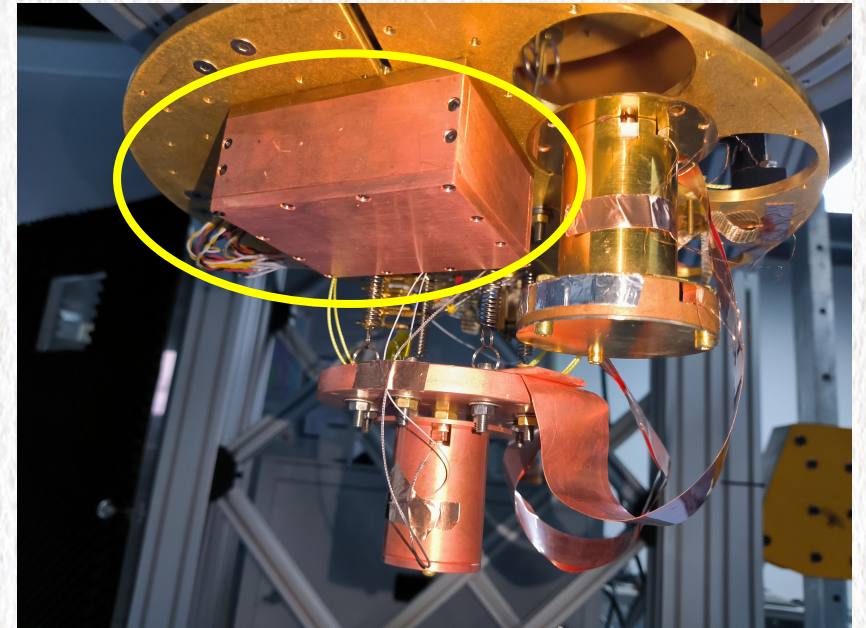
引线键合



稀释制冷机低温平台



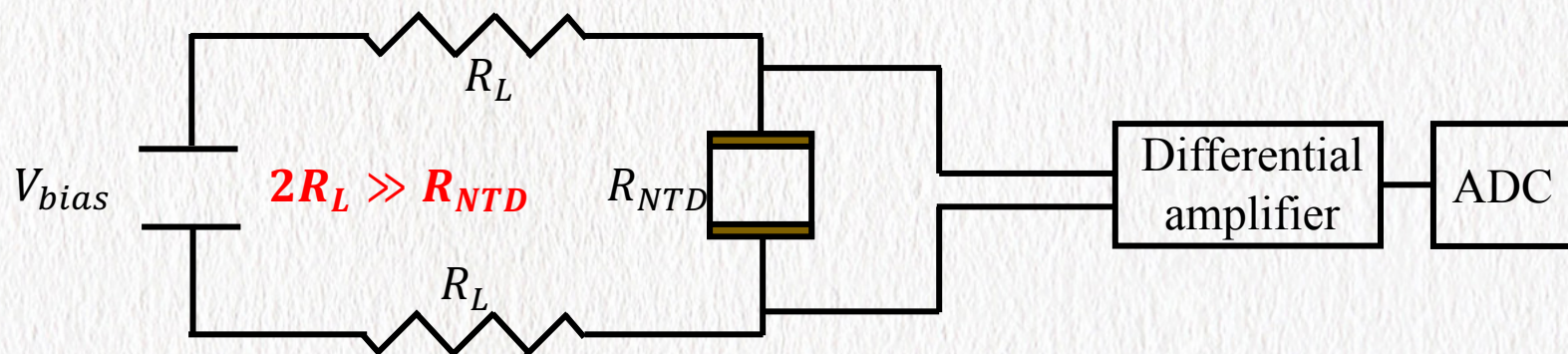
NTD-Ge_v1安装在铜板



NTD-Ge_v1固定在辐射罩

NTD-Ge读出电子学

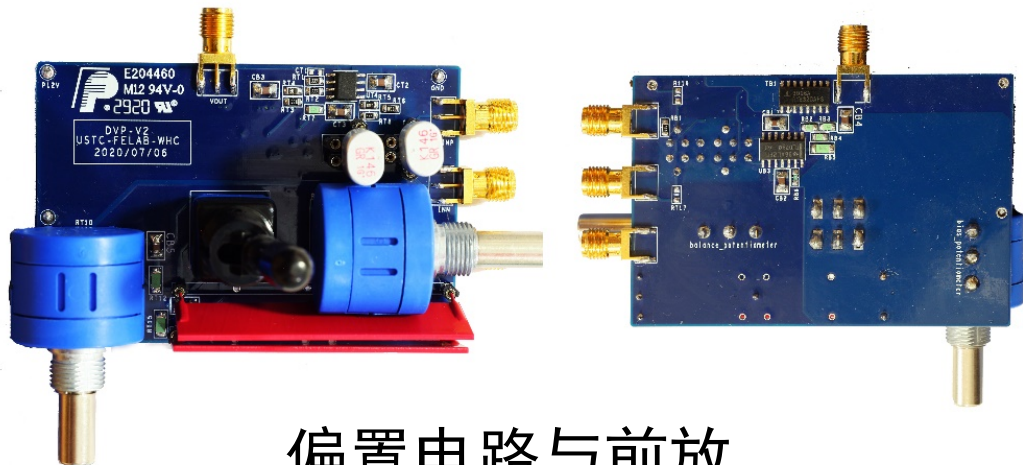
✿ NTD-Ge传感器信号读出偏置电路图



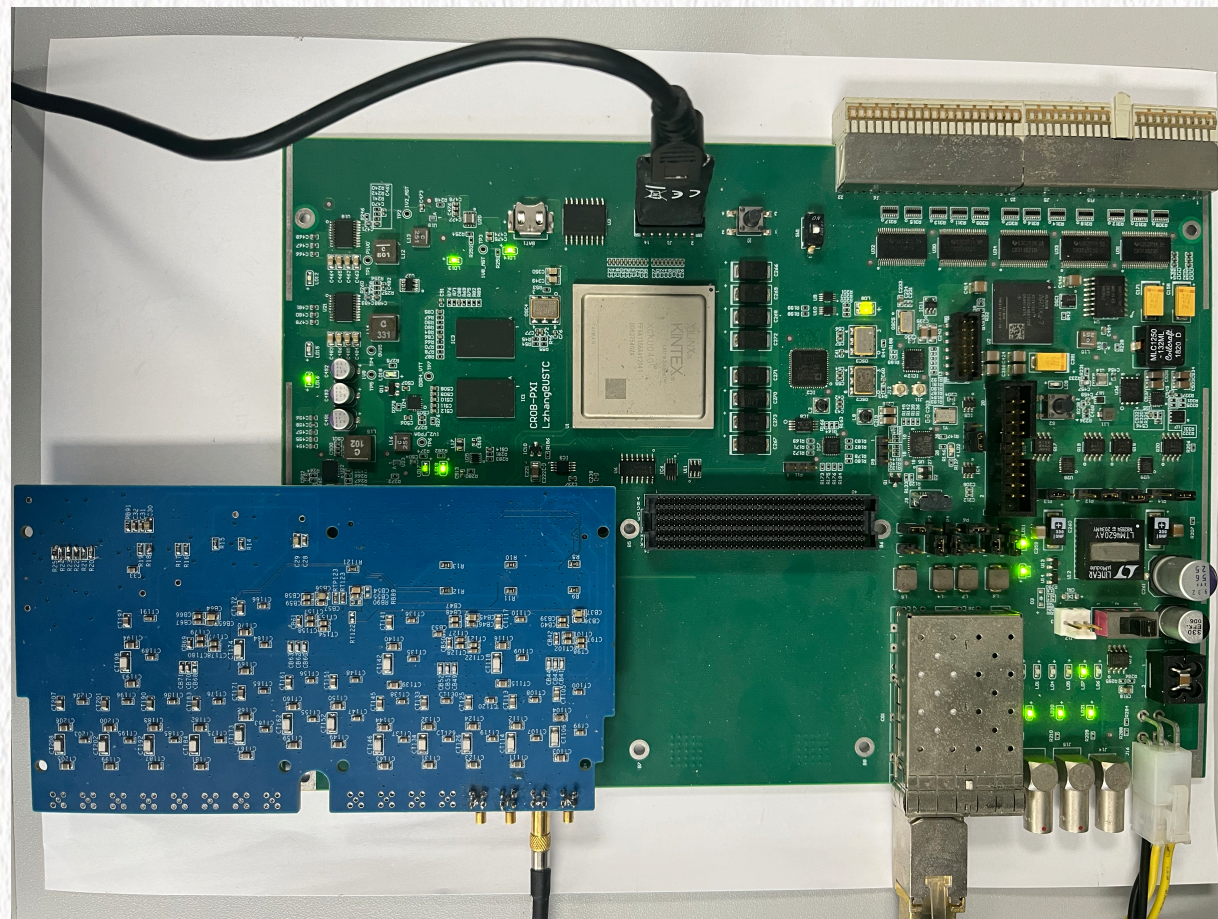
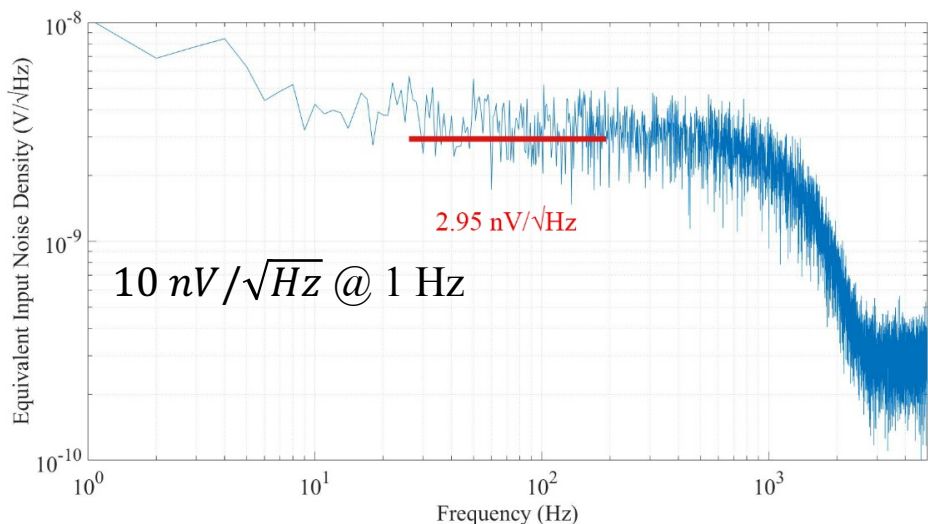
回路电流:
$$I = \frac{V_{bias} - \left(\frac{|V^+ - V^-|}{2 \cdot Gain} \right)}{2R_L}$$
 (I 通常在pA, nA量级)

NTD-Ge两端电阻:
$$R_{bolo} = \frac{|V^+ - V^-|}{2 \cdot Gain} / I$$
 (NTD通常在百Mohm@10 mK)

NTD-Ge电子学设计

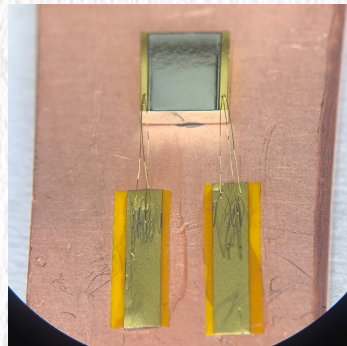
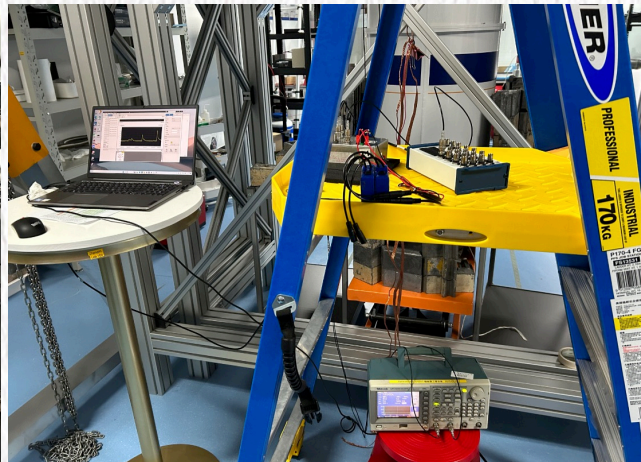
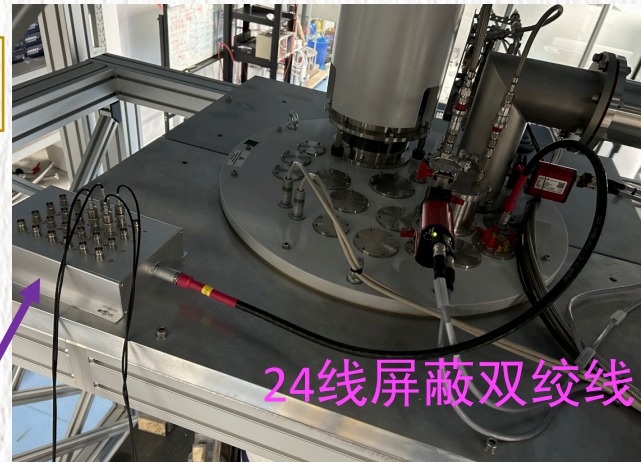
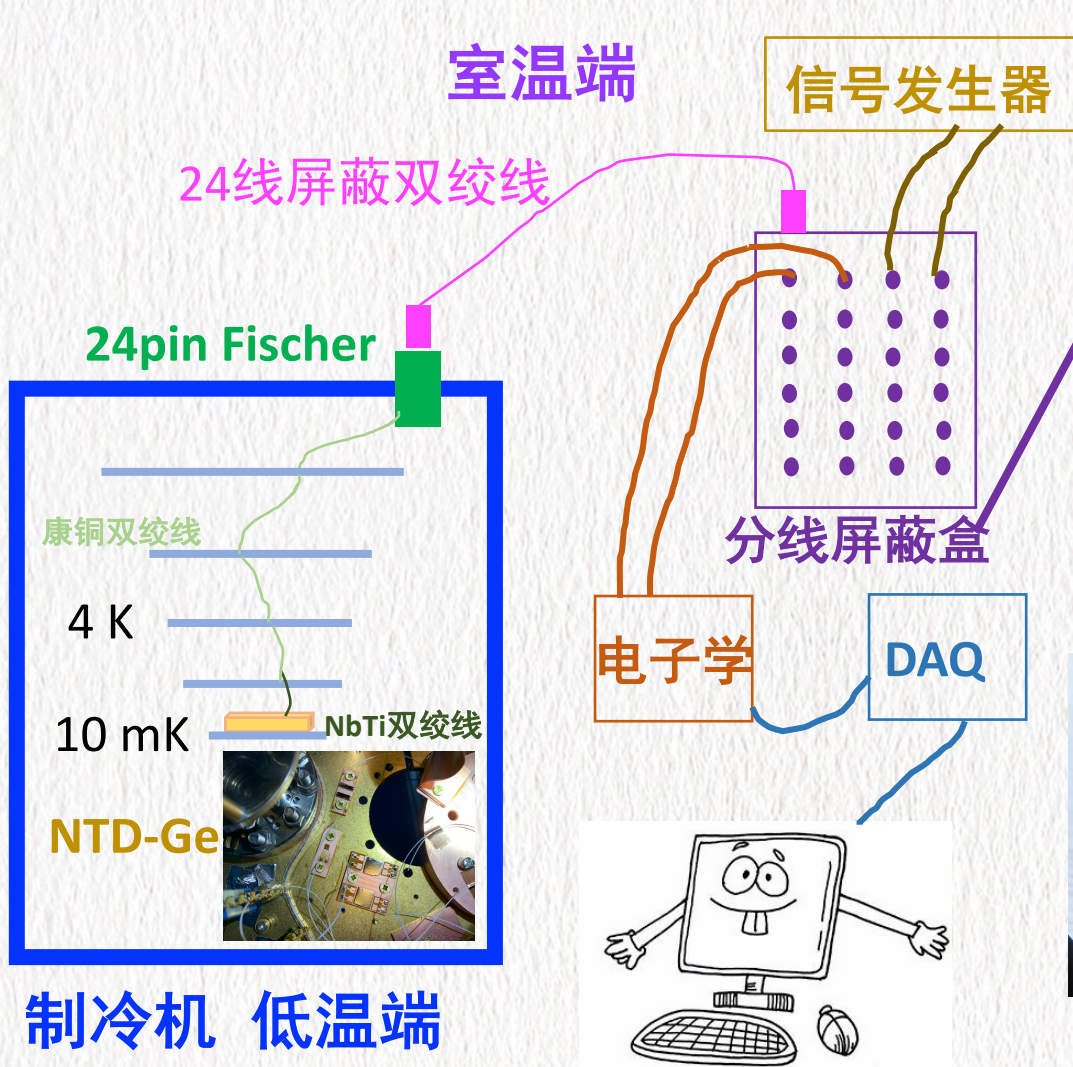


偏置电路与前放

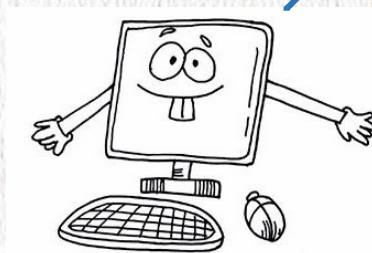
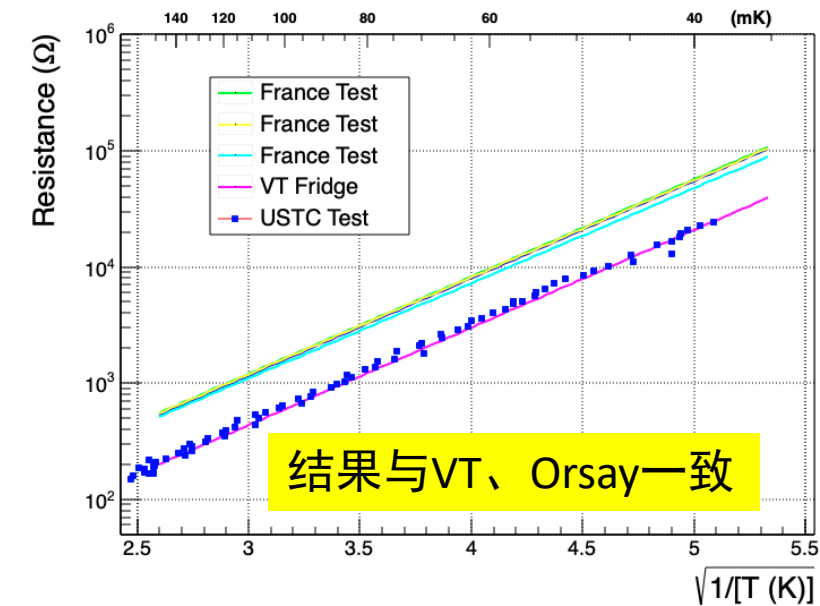


数字板+FPGA读取ADC数据 联调

低温平台+电子学系统对NTD-Ge_Ref测试



NTD-Ge_Ref

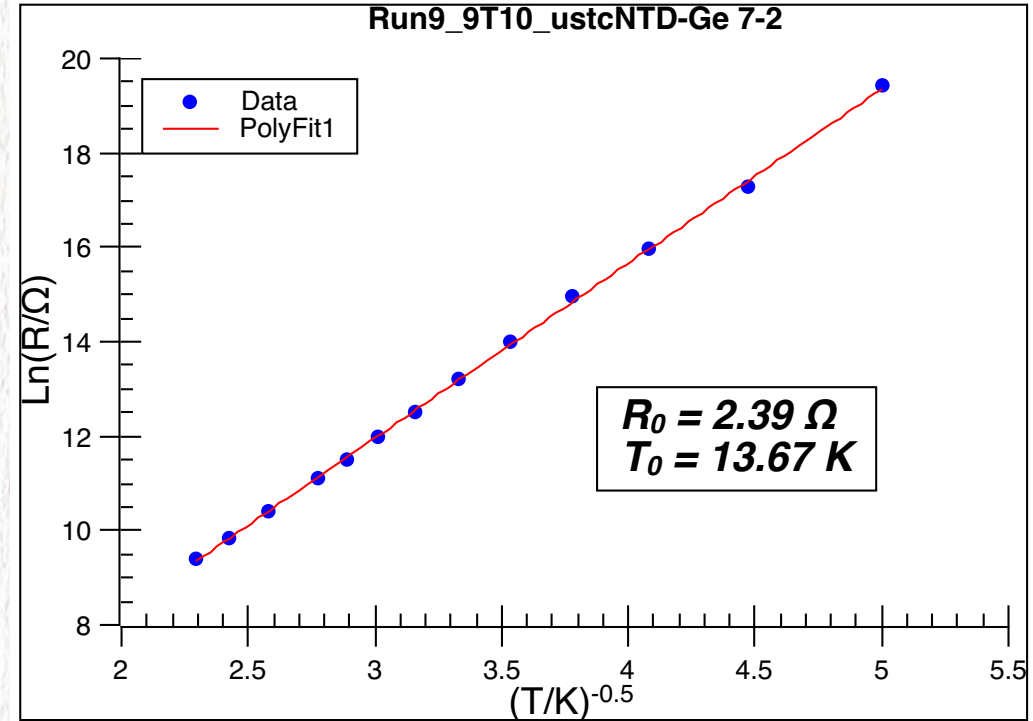
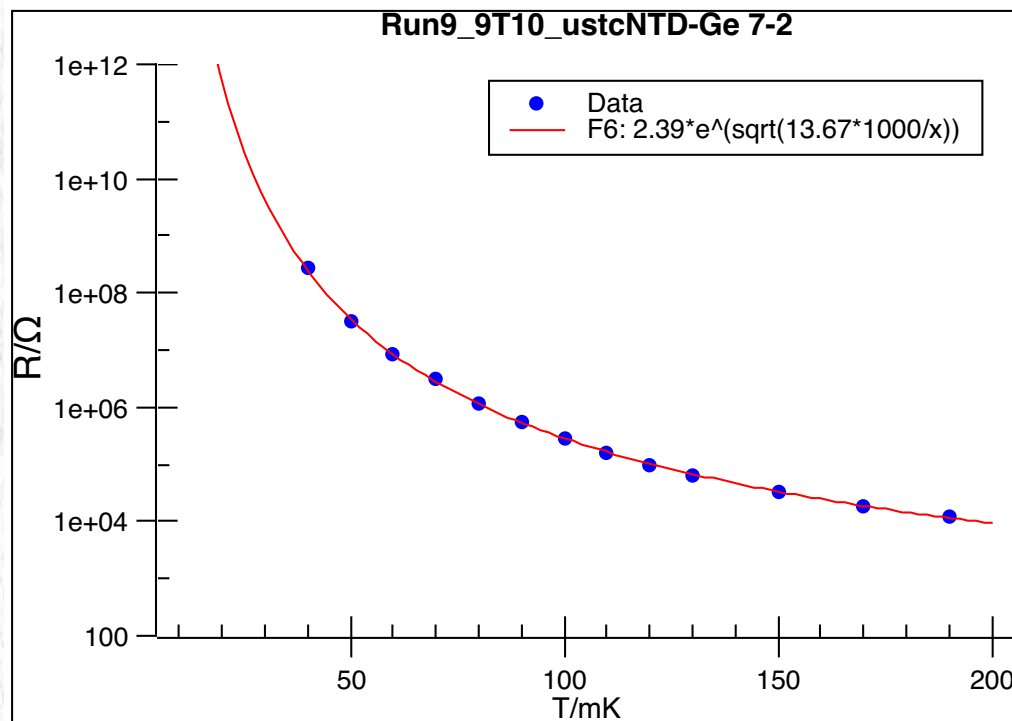


PC

制冷机 低温端

NTD-Ge低温性能测试研究

- ✿ 电阻测试表现为欧姆接触，实测R-T曲线符合NTD-Ge特征规律
- ✿ 在低温40-200 mK温区，获得 R_0 ， T_0 等关键参数
- ✿ NTD-Ge_v1_ustc表现在<40 mK，电阻大于百Mohm；存在加热效应，影响更低温区间电阻测试



总结与展望

✿ 总结

- ✿ NTD-Ge是低温晶体量热器的关键部件之一， **μK 量级**温度变化的精密测量
- ✿ NTD-Ge**制作周期长，工艺流程复杂**
- ✿ 初步建立一套关键技术路线，目前初步获得几片NTD-Ge传感器
- ✿ 搭建一套深冷低温测试系统（低温平台+低温低噪声小信号电子学）
- ✿ 测试NTD-Ge低温性能，获得**R-T关系曲线**

✿ 展望

- ✿ **环绕型欧姆接触**关键技术点
- ✿ 标准化工艺流程，优化工艺参数，获得性能优越可靠的NTD-Ge传感器
- ✿ 耦合闪烁晶体，进行物理信号读出

总结与展望

✿ 总结

- ✿ NTD-Ge是低温晶体量热器的关键部件之一， **μK 量级**温度变化的精密测量
- ✿ NTD-Ge**制作周期长，工艺流程复杂**
- ✿ 初步建立一套关键技术路线，目前初步获得几片NTD-Ge传感器
- ✿ 搭建一套深冷低温测试系统（低温平台+低温低噪声小信号电子学）
- ✿ 测试NTD-Ge低温性能，获得**R-T关系曲线**

✿ 展望

- ✿ **环绕型欧姆接触**关键技术点
- ✿ 标准化工艺流程，优化工艺参数，获得性能优越可靠的NTD-Ge传感器
- ✿ 耦合闪烁晶体，进行物理信号读出

谢谢

Additional slides

载流子浓度

引文：《中国学科发展战略——无中微子双贝塔衰变实验（ ^{76}Ge 无中微子双贝塔衰变实验） P132》

高纯锗晶体生长完成后，需要测量杂质浓度和位错密度等晶体重要参数指标。利用霍尔效应可以测量高纯锗晶体中的杂质浓度。高纯锗探测器的工作温度是77K，因此应该在77K温度下测量高纯锗晶体的杂质浓度。测量时通常从高纯锗晶体的顶部、中部和底部各取一个体积较小的样本，测量其霍尔电压得到杂质浓度。霍尔电压的公式为

$$V_H = -\frac{IB}{ned}$$

其中 V_H 为霍尔电压， n 为载流子浓度。