



用于 $0\nu\beta\beta$ 实验的极低超导转变边缘TES光热探测

系统研发进展

吕沙沙 江建勇 张建杰 张翼飞 刘舟慧 郑昊哲 张少君 刘圆圆

北京师范大学

中国科学院高能物理研究所

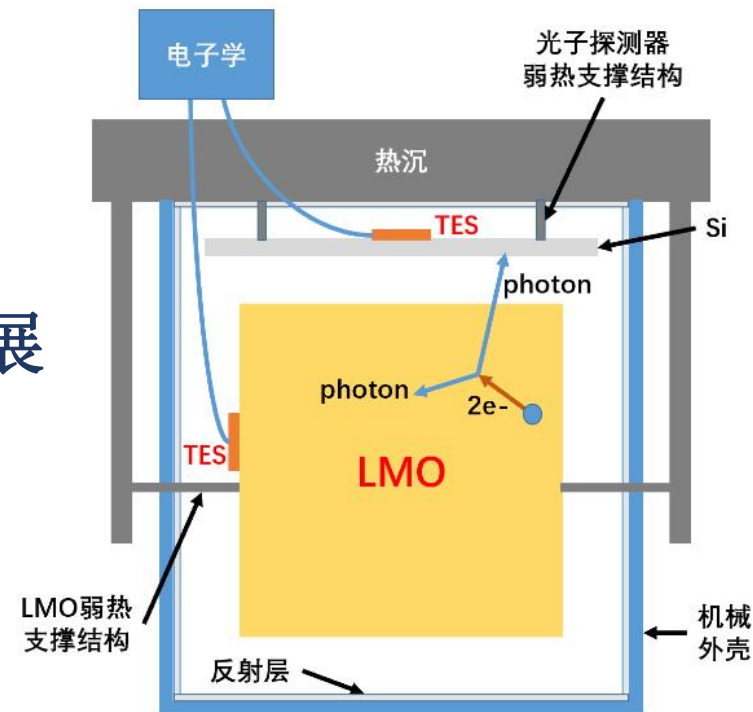
2023年5月7日-12日

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

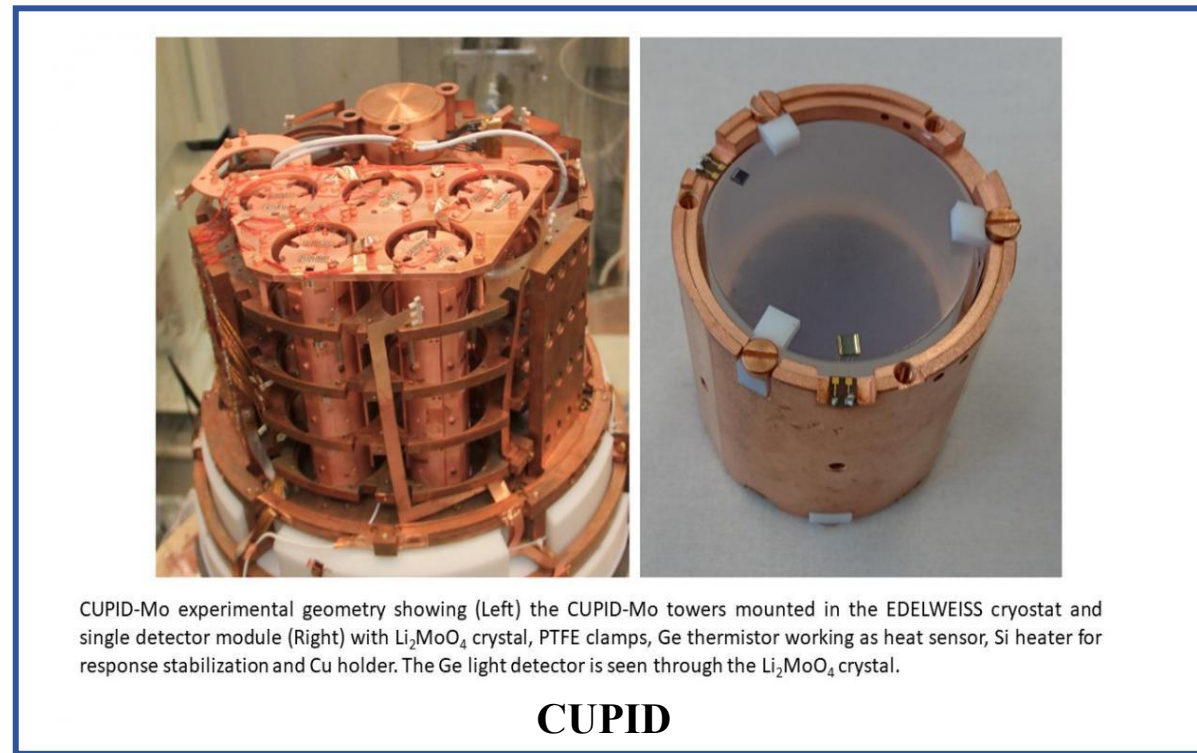
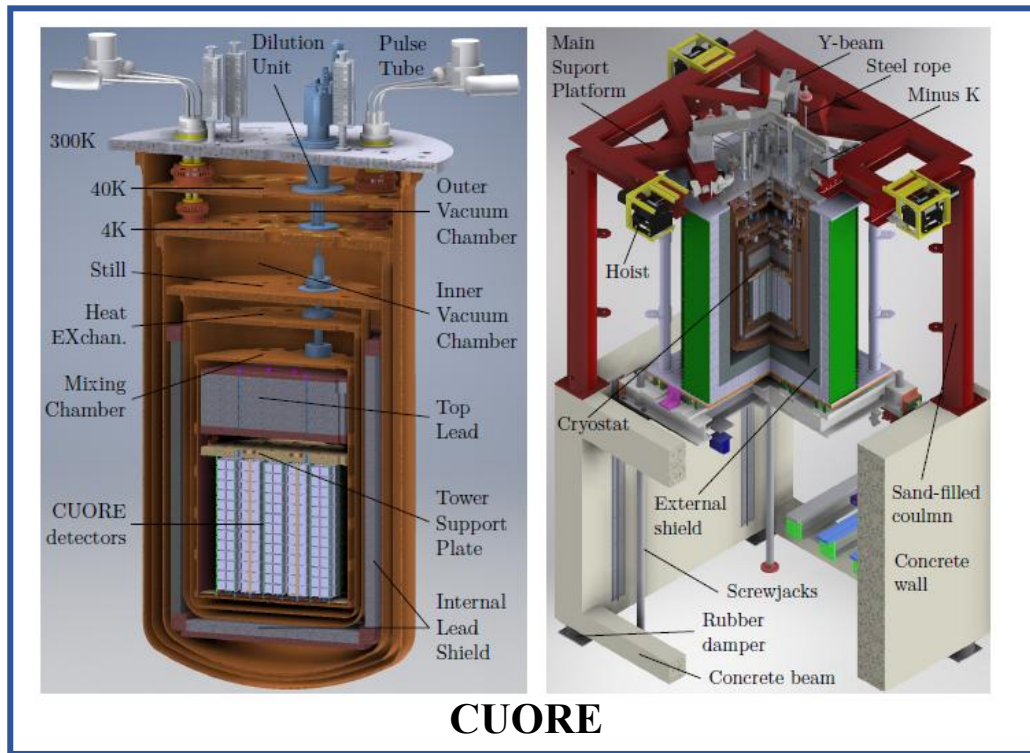


目录

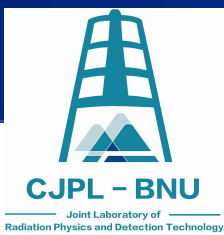
- TES研究背景
- 极低超导转变边缘传感器TES制备进展
- 基于LMO-TES系统本底甄别与荧光输运过程模拟进展
- 总结和计划



□ 低温晶体量热器在 $0\nu\beta\beta$ 探测中的应用

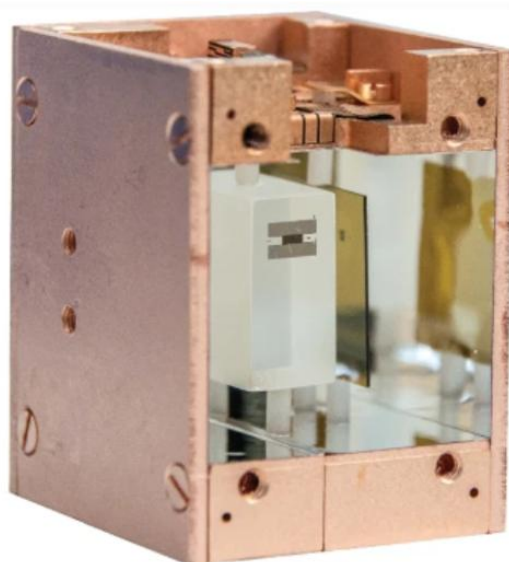
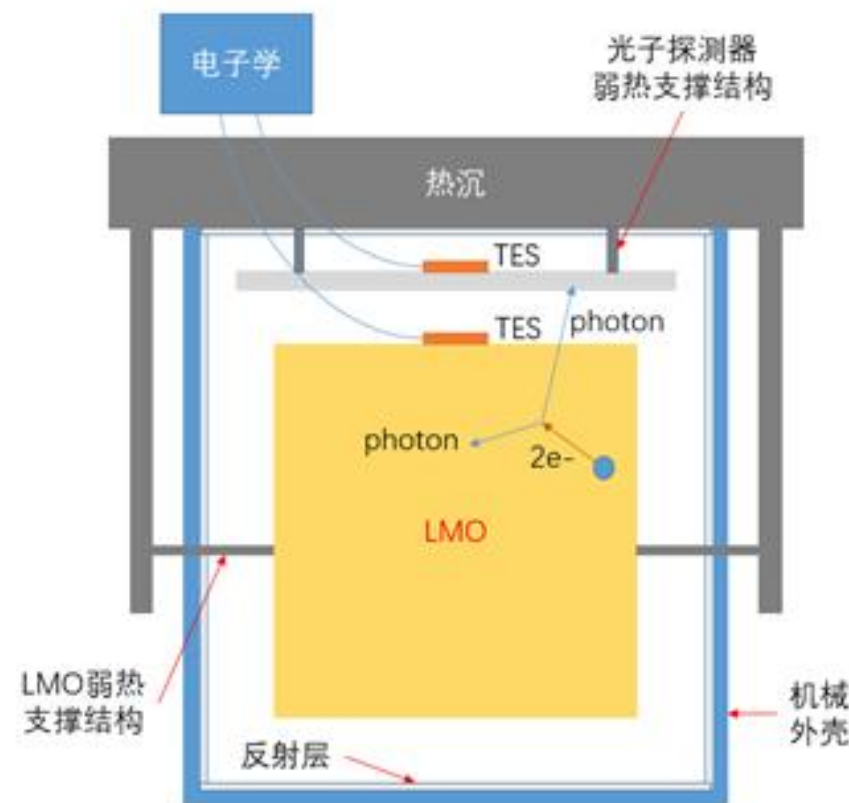


- ◆ 高能量分辨率、高探测效率、核素选择灵活等优势
- ◆ 实现高时间分辨率、高能量分辨率且易于大规模读出的光热双探测读出技术，已成为下一代 $0\nu\beta\beta$ 探测实验的关键核心问题之一

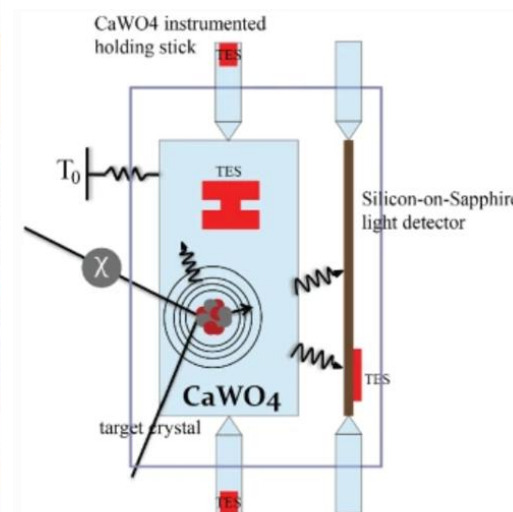


□ 超导转变边缘传感器TES光热双读出

- ◆ 基于时间响应、能量分辨率、大规模读出需求，探索超导转变边缘探测器的新技术。
- ◆ 超导转变边缘探测器主体为偏置在超导致正常态转变区内的超导薄膜，利用其陡峭的R-T关系测量热量沉积，是一种单光子探测器。
- ◆ 目前尚未用至 $0\nu\beta\beta$ 实验。

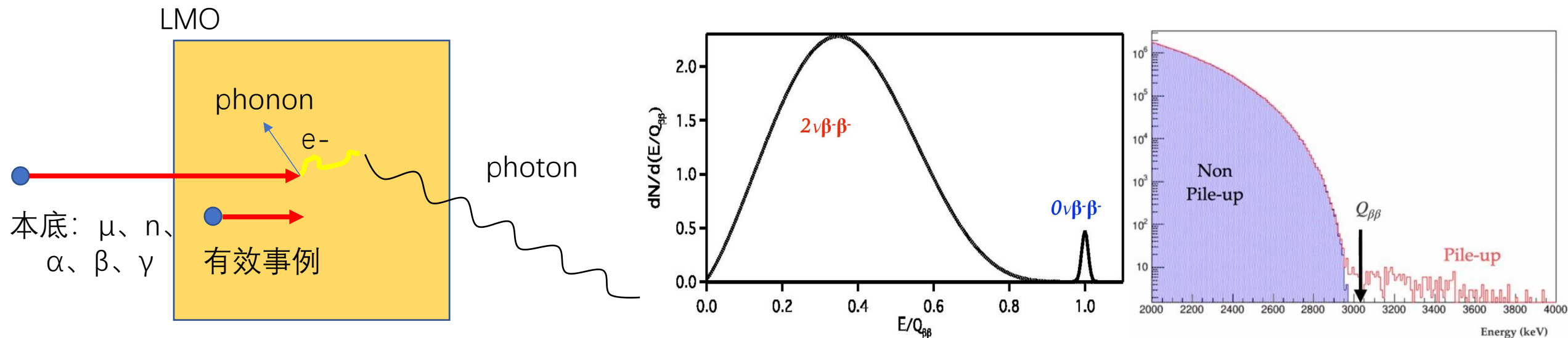


CRESST



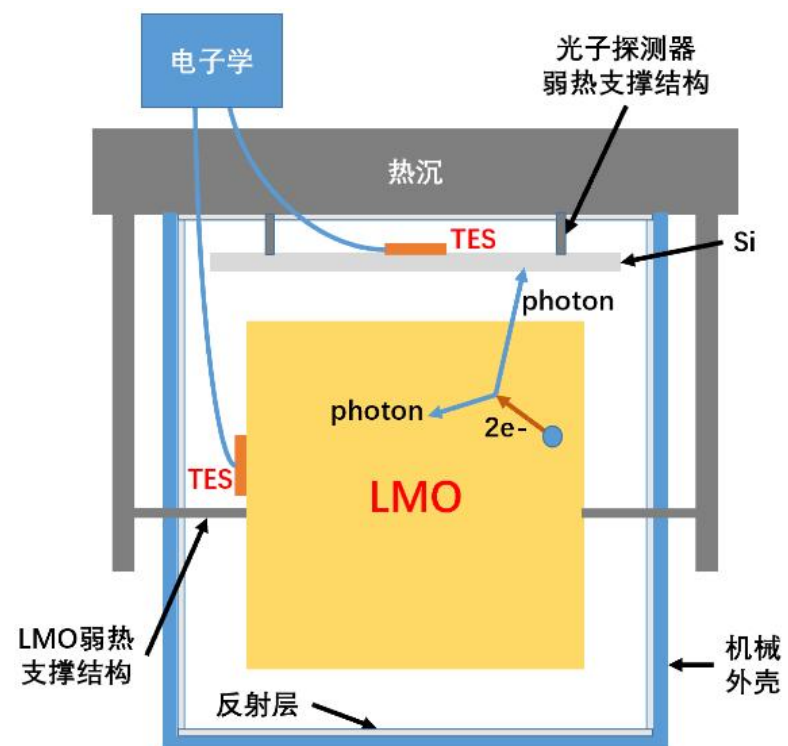
□ CUPID-Mo TES光热双读出

- ◆ 压低 $2\nu\beta\beta$ 衰变堆叠本底: ^{100}Mo 的 $2\nu\beta\beta$ 半衰期较短, 其衰变堆叠产生的叠加信号成为 $0\nu\beta\beta$ 信号的主要本底来源。利用 TES (时间分辨率 μs 量级) 可区分堆叠事件进而压低 $2\nu\beta\beta$ 本底, 根据所要达到的本底水平计算出得到 TES 热探测器的时间分辨和能量分辨要求。
- ◆ 扣除 α 粒子本底: 利用光热信号比值和信号衰减时间构建有效区分 α 粒子本底与 β/γ 信号的物理模型, 进而扣除 α 本底, 并给定 TES 光子探测器的能量下阈和分辨率要求。



感兴趣能区内的 $2\nu\beta\beta$ 衰变本底干扰及堆叠事件[CUPID group, Singh's report, 2021]

极低超导转变边缘传感器TES制备进展





TES制备进展：TES超导薄膜的调控制备及表征

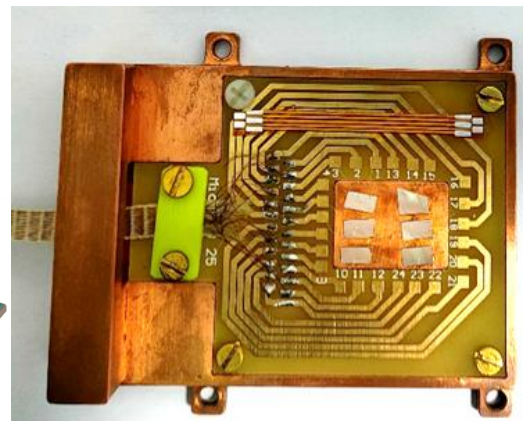
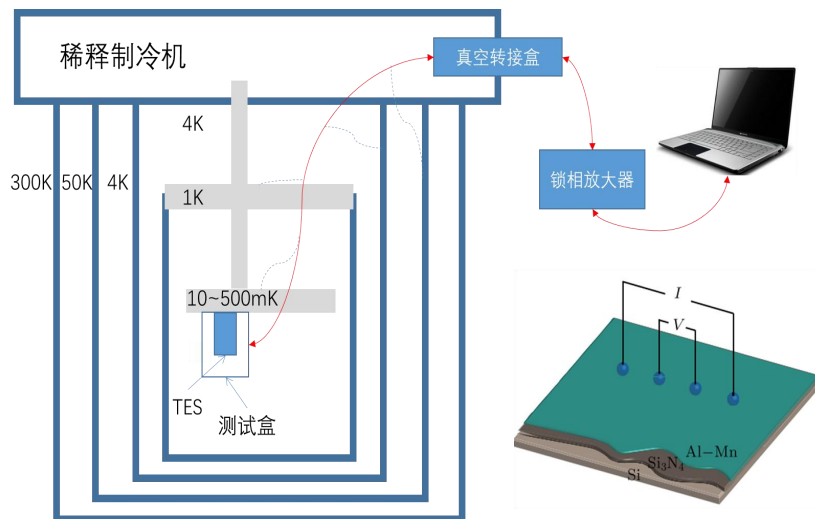
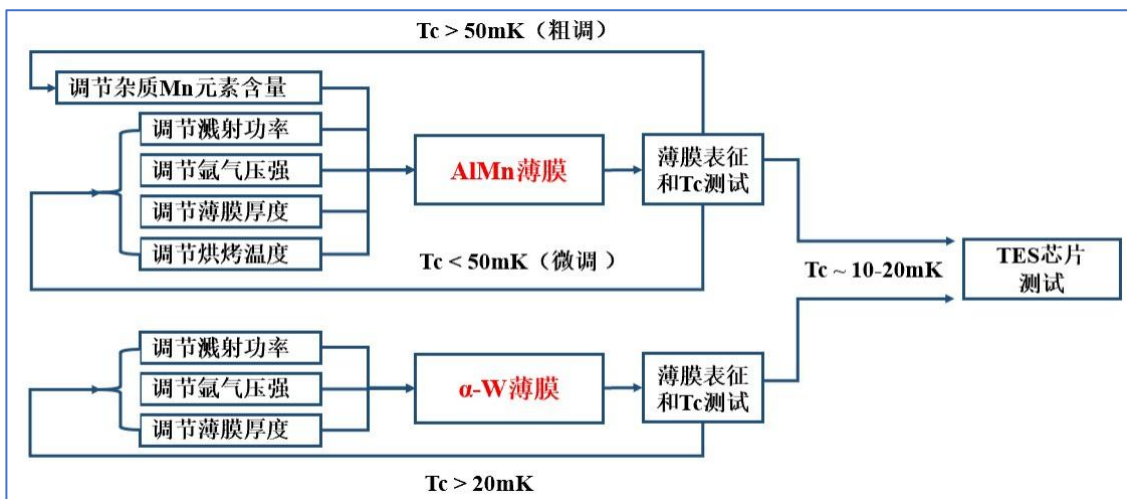
TES薄膜制备及测试

AlMn合金薄膜

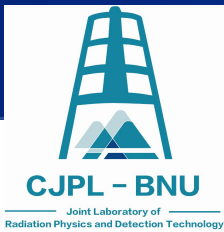
- 定制了多种Al/Mn不同比例的靶材，研究靶材、薄膜厚度、烘烤温度对 T_c 的显著影响
- 确定 $T_c < 50\text{mK}$ 所需靶材
- 通过摸索溅射参数，实现 $T_c \sim 10\text{-}20\text{mK}$ 目标

W薄膜

- 摸索功率、厚度、气压等溅射参数影响，利用退火实验，实现 $\alpha\text{-W}$ 相薄膜的制备
- 优化参数，实现 $T_c \sim 10\text{-}20\text{mK}$ 目标



薄膜测试



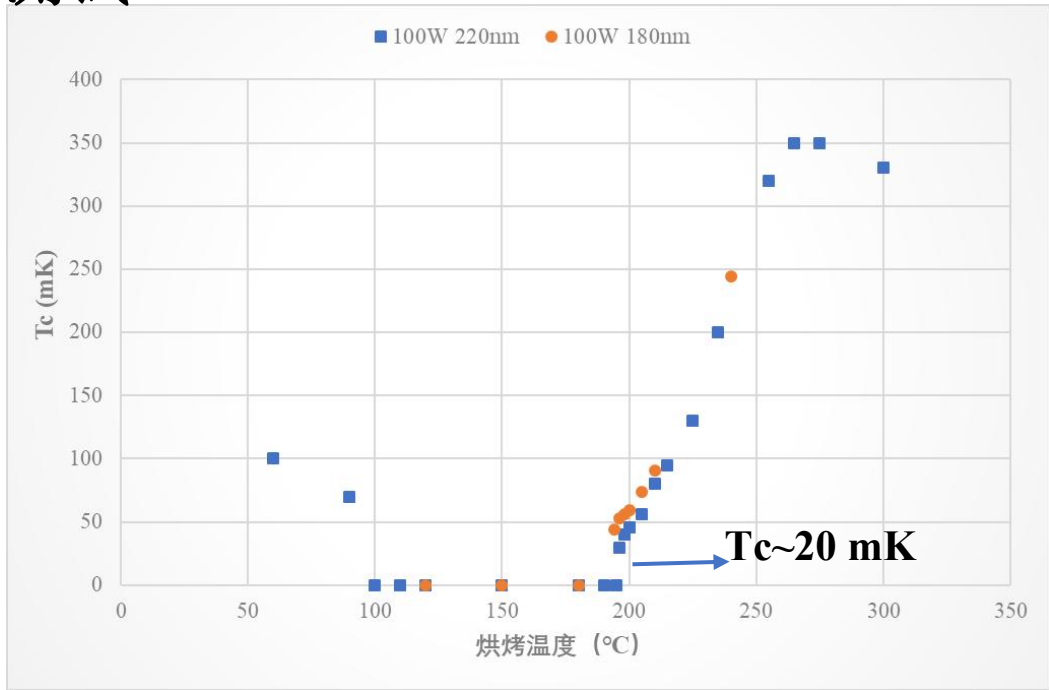
TES制备进展：TES超导薄膜的调控制备及表征

□ AlMn TES薄膜制备及测试

◆ 薄膜厚度(180nm, 220nm)

◆ 薄膜烘烤温度影响

溅射功率 (W)	厚度 (nm)	烘烤温度 (°C)	Tc (mK)	ΔT (mK)
100	~220	205	57.2↓ 57.6↑	0.4
		210	83.3↓ 83.7↑	2.3
		215	91.6↓ 92.0↑	2.4
		225	134↓ 135↑	8
		235	203.5↓ 204↑	15
		255	334↓ 337↑	15
		265	352↓↑	16
		275	351.4↓ 353.5↑	12



180nm薄膜烘烤温度186~192°C

溅射功率 (W)	厚度 (nm)	烘烤温度 (°C)	Tc (0.5Rn) (mK)	Rn (mΩ)
100	~180	186	21.6↓ 23.7↑	92
		188	30.9↓ 31.0↑	88
		190	36.8↓ 37.0↑	82
		192	38.2↓ 38.5↑	68

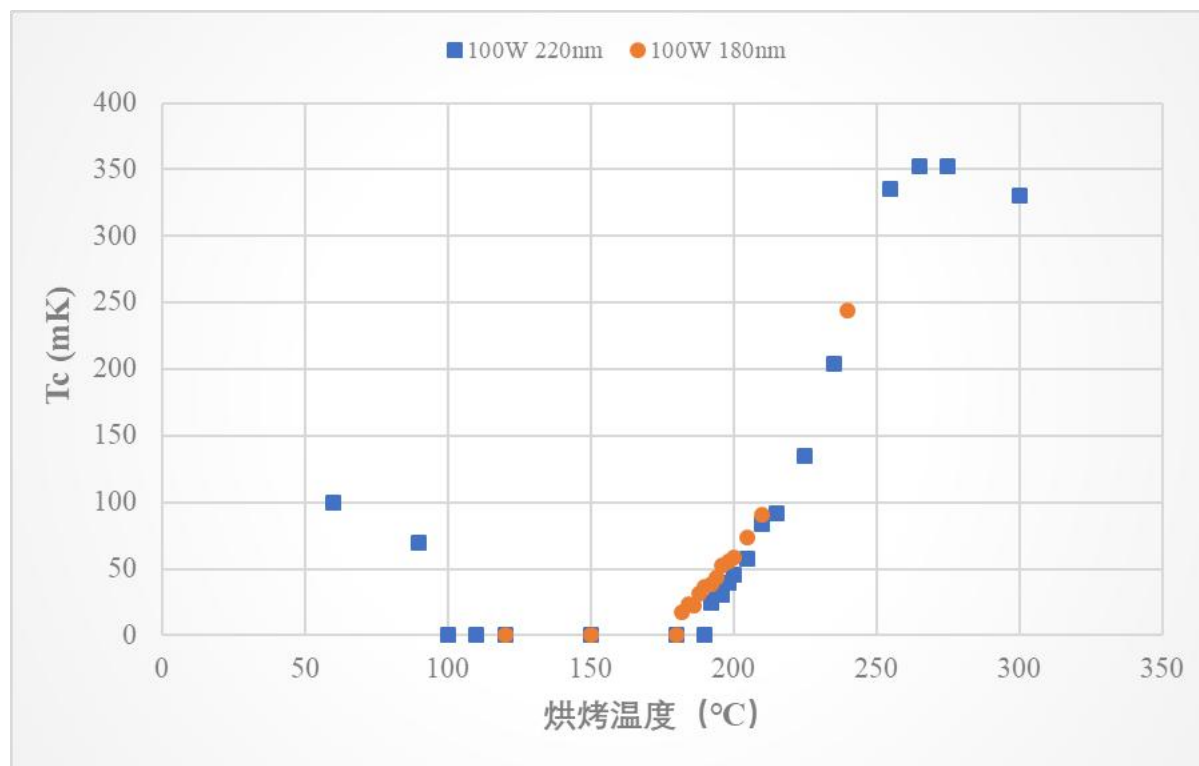


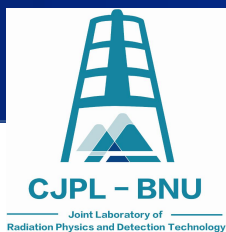
TES制备进展：TES超导薄膜的调控制备及表征

□ AlMn TES薄膜制备及测试

◆ 降温过程中 T_c 基本固定

◆ 升温过程加热器工作电流会影响AlMn薄膜 T_c 的测试，测得温度不准， T_c 与起点温度（从低温升到高温测转变的起点）相关，采取低速率控温





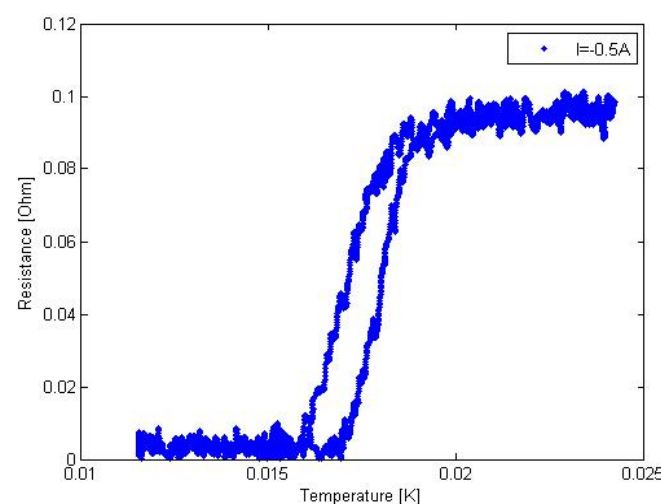
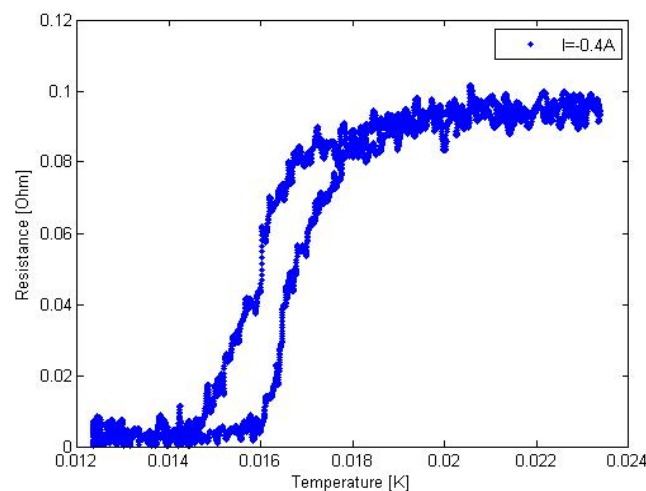
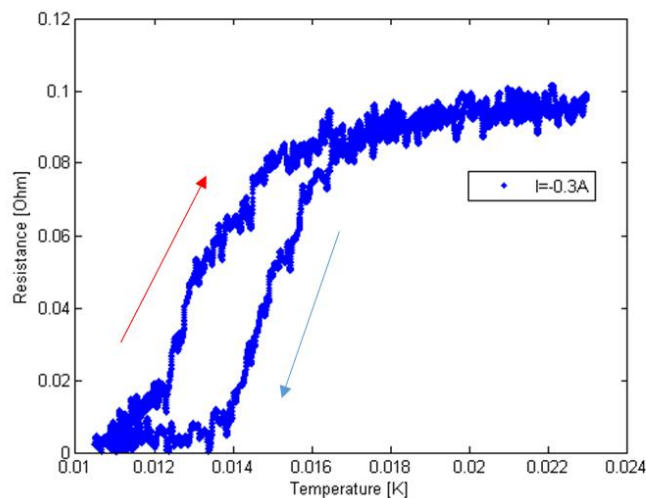
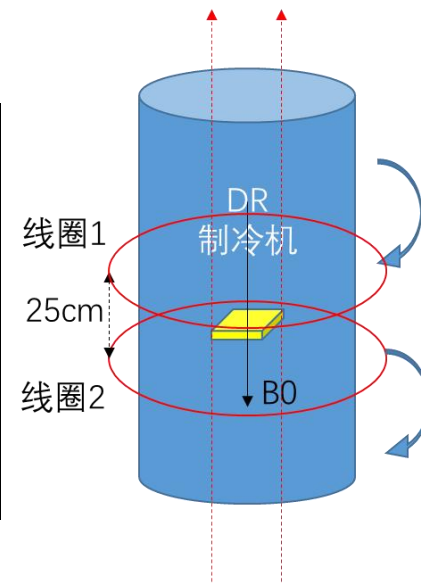
TES制备进展：TES超导薄膜的调控制备及表征

20mK以下AlMn TES薄膜测试

磁场影响低Tc AlMn薄膜，有地磁，进行消磁处理

- ◆ Cu盒，180nm，182°C/10分钟
- ◆ 外加磁场——线圈N=20，I=-0.2A，亥姆霍兹线圈，直径50cm，距离25cm
- ◆ 测试电流正弦信号，0.5mV，串联电阻1000Ω
- ◆ 垂直薄膜方向磁场B₀为0.36G，电流产生磁场B₁发生变化

AlMn衬底	Ar压强 (mTorr)	磁场电流 (A)	磁场强度 B ₀ -B ₁ (G)	T _c (0.5R _n) (mK)
1μm SiN	100W 5mTorr 182°C/10min	-0.3	0.144	15.0↓ 13.0↑
		-0.4	0.072	16.8↓ 16.0↑
		-0.5	0	18.0↓ 17.1↑



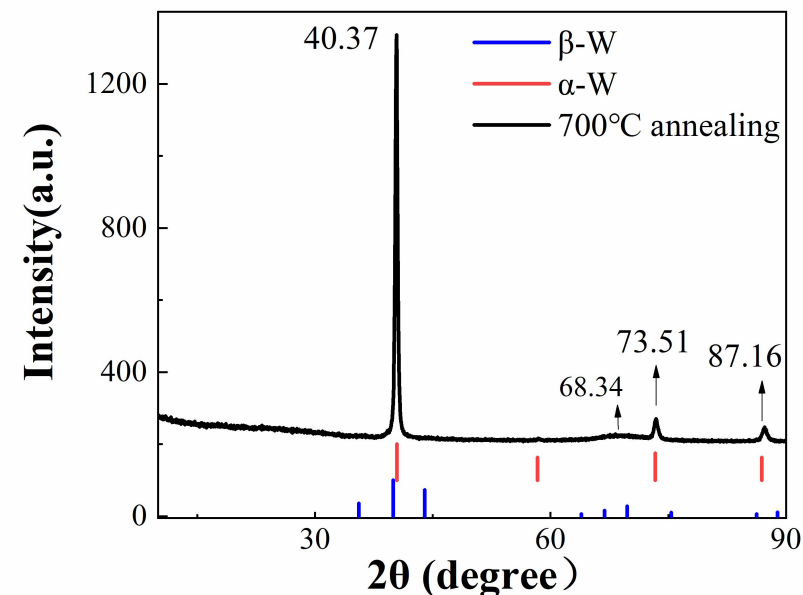
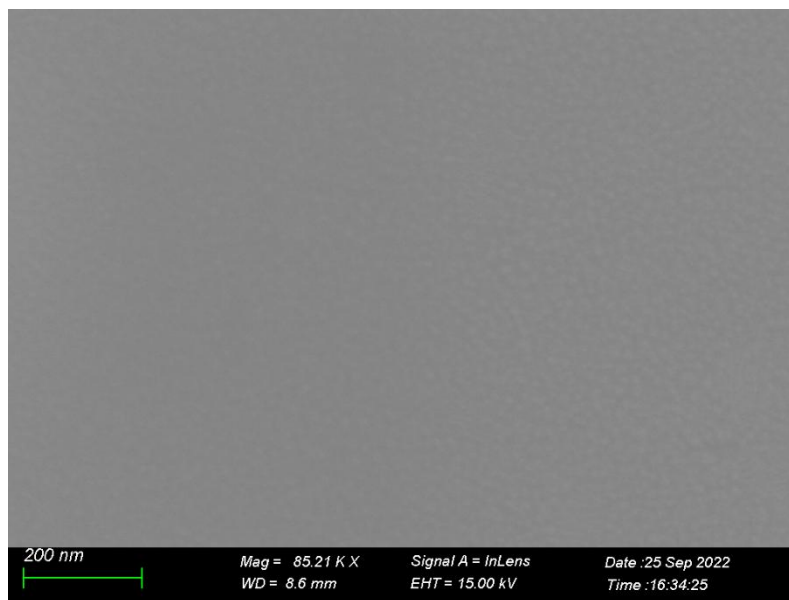
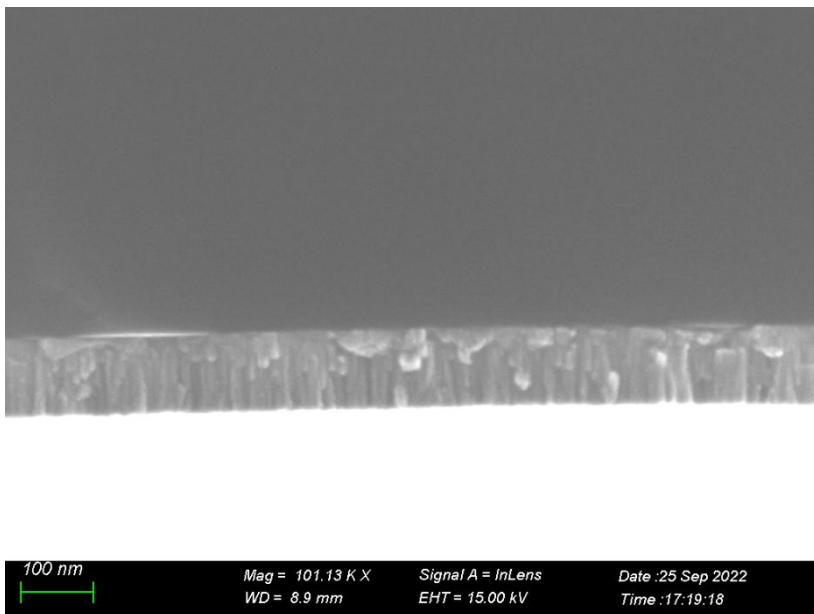
AlMn薄膜T_c对加热器控制电流、测试电流、外部磁场均敏感，T_c进入20mK



TES制备进展：TES超导薄膜的调控制备及表征

□ α -W薄膜制备

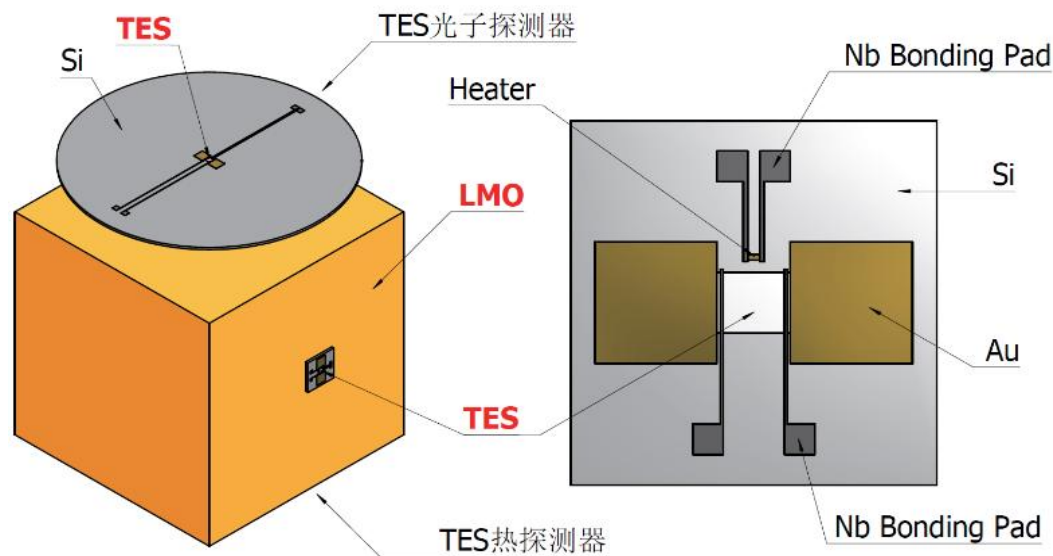
- ◆ 磁控溅射制备厚度~150nm的多晶W薄膜，XRD晶相测试主要为 β -W
- ◆ 快速退火参数调控，得到主要为 α -W薄膜，进一步需调控薄膜电阻



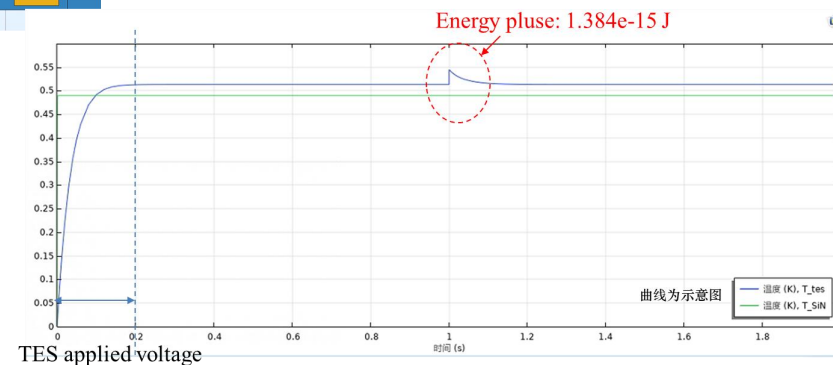
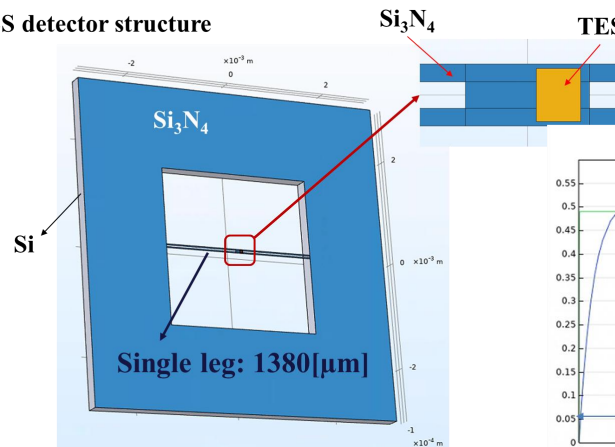
TES探测器热电响应的建模

利用COMSOL根据已知文献模型对仿真过程进行梳理和检验

- ◆ 构建光子探测器模型，根据已有文献基础对电场、温度分布各参数进行确认
- ◆ 施加能量脉冲温度响应
- ◆ 弱热链接支撑结构热导G的仿真



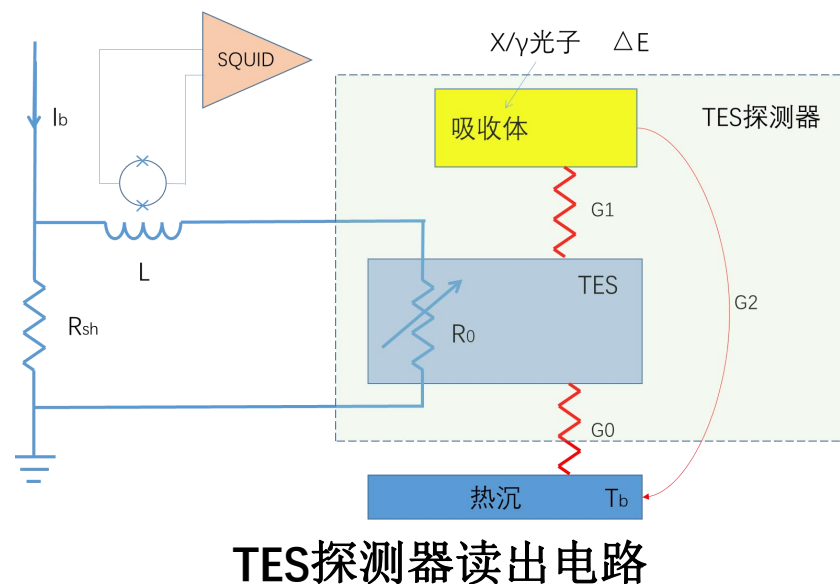
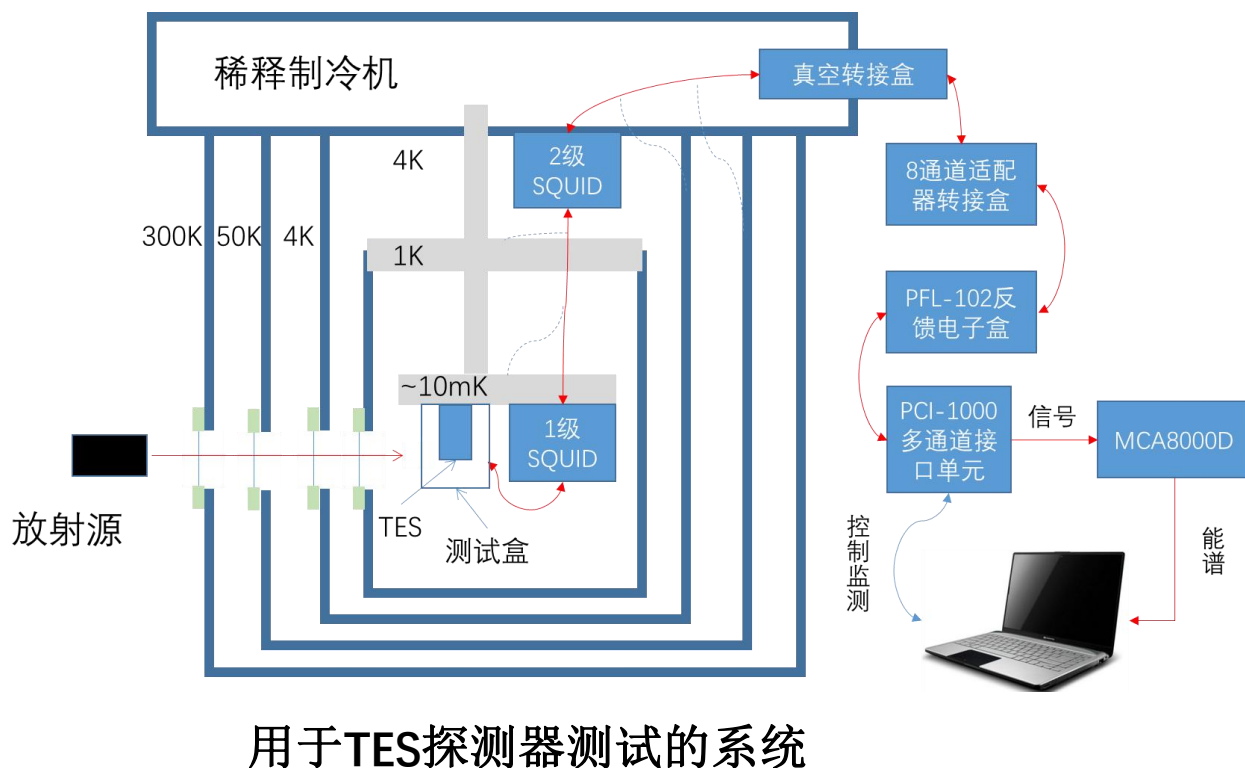
TES detector structure



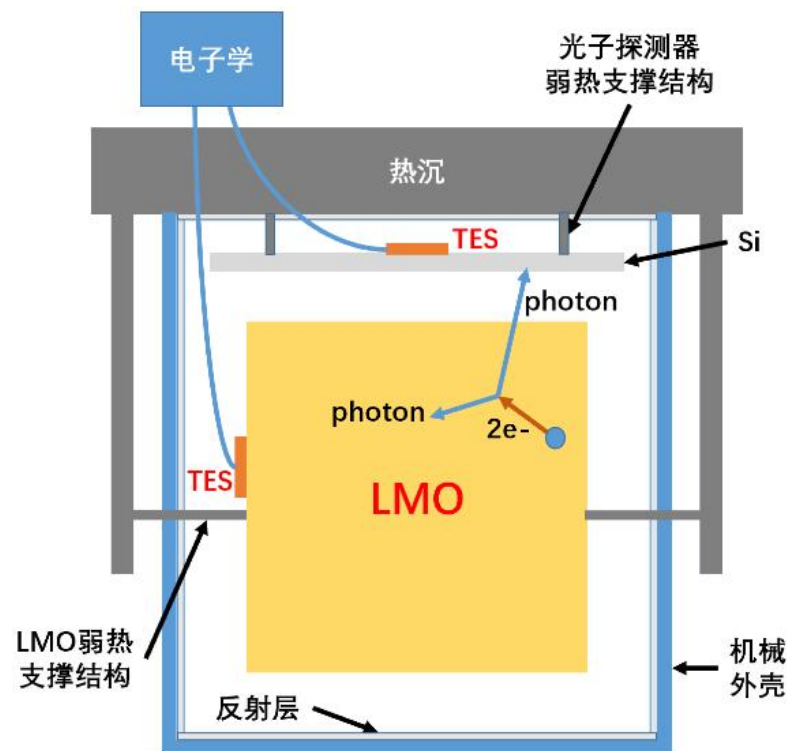
Thermal conductance	Simulation	Thermal conductance	Simulation
$G (= nKT^{n-1})$	136.5 pW/K	$G \left(= 4 \frac{CvLSA}{3L} \right)$	144.2 pW/K
$G' \left(= \frac{C}{\tau} \right)$	123.6 pW/K	$G' (= P/(T-T_b))$	133.7 pW/K

测试系统

SQUID进行读出，在复旦大学稀释制冷机上调试安装，最终进驻CJPL



基于LMO-TES系统本底甄别与荧光输运过程模拟进展





基于LMO-TES系统本底甄别与荧光输运过程模拟进展

堆积事件甄别目标：抑制 ^{100}Mo 的 $2\nu\beta\beta$ 堆积事件本底

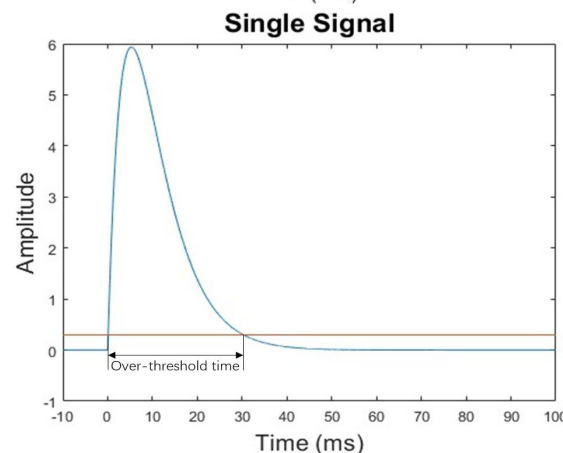
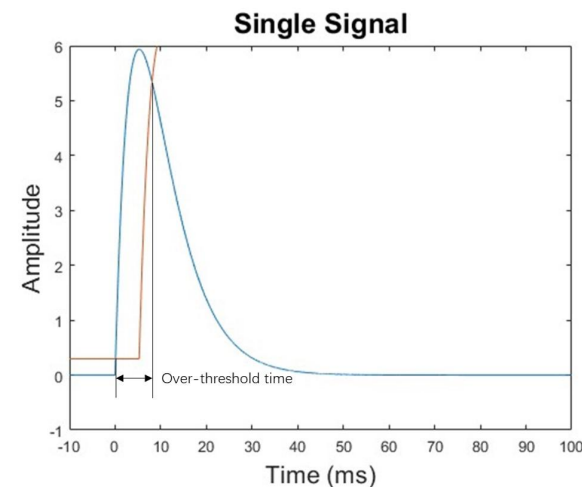
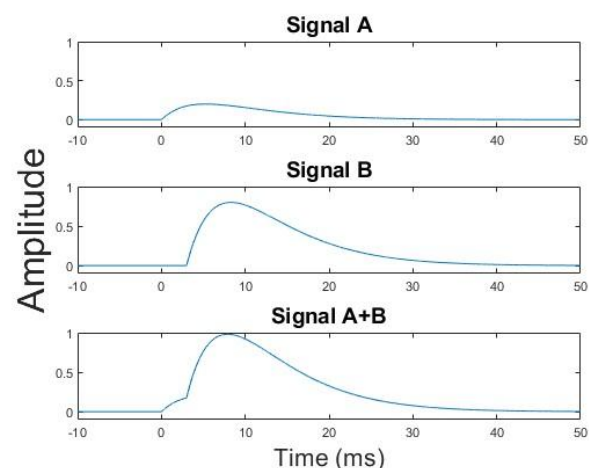
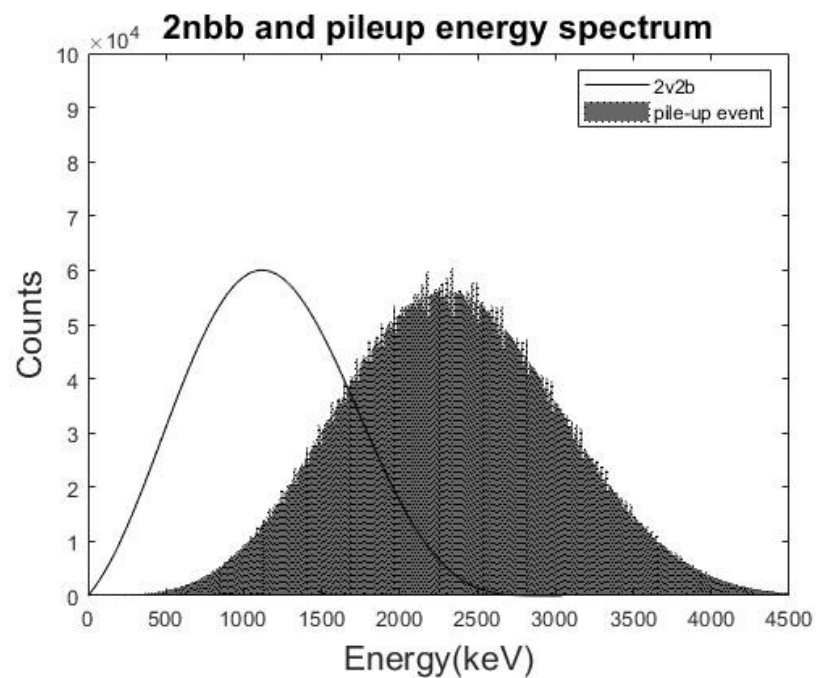
◆ LMO的 $0\nu\beta\beta$ 衰变 Q 值为 3034 keV，本底来源主要为 $2\nu\beta\beta$ 衰变堆叠和 α 粒子本底

◆ 利用脉冲形状和相关特征量进行甄别

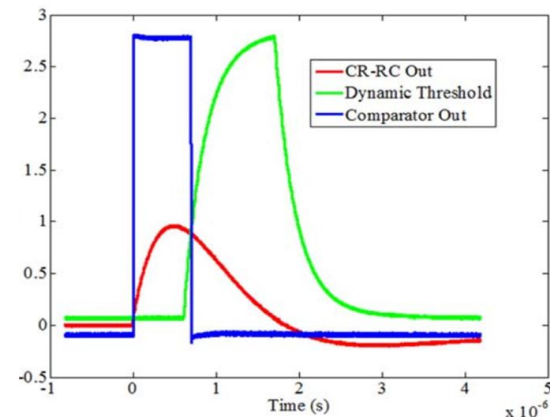
◆ 过阈时间算法

◆ 定阈值法：计算过阈时间电路不随时间变化

◆ 动态阈值法：计算过阈时间电路根据脉冲形状随时间变化



定阈值法过阈时间计算



动态阈值法过阈时间计算



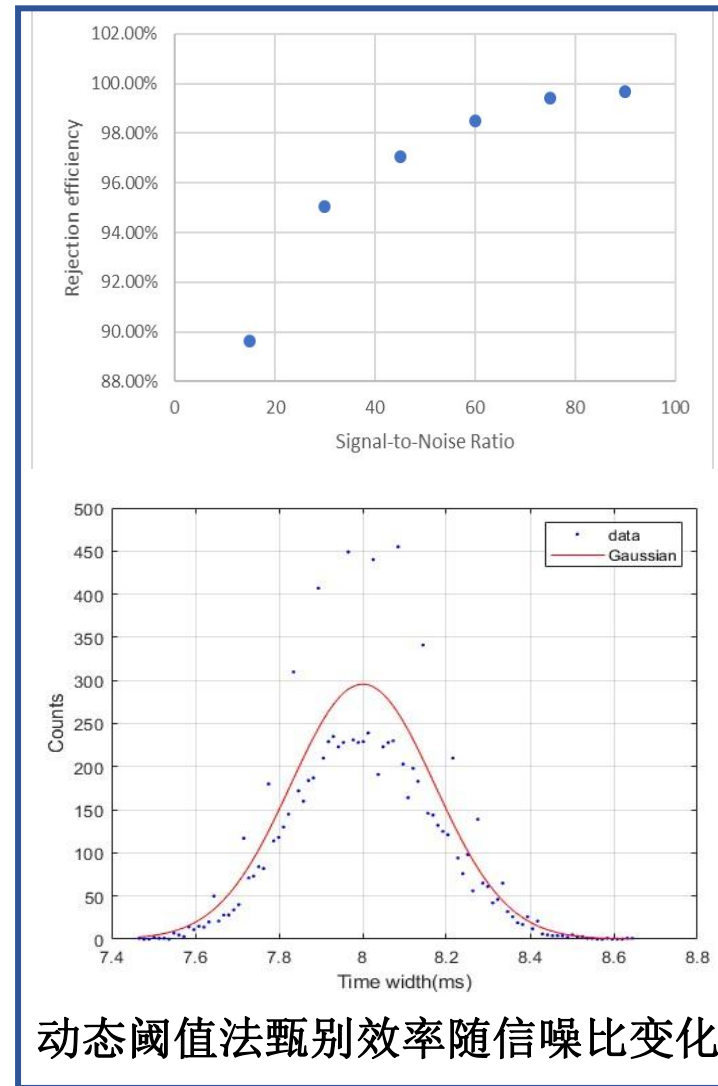
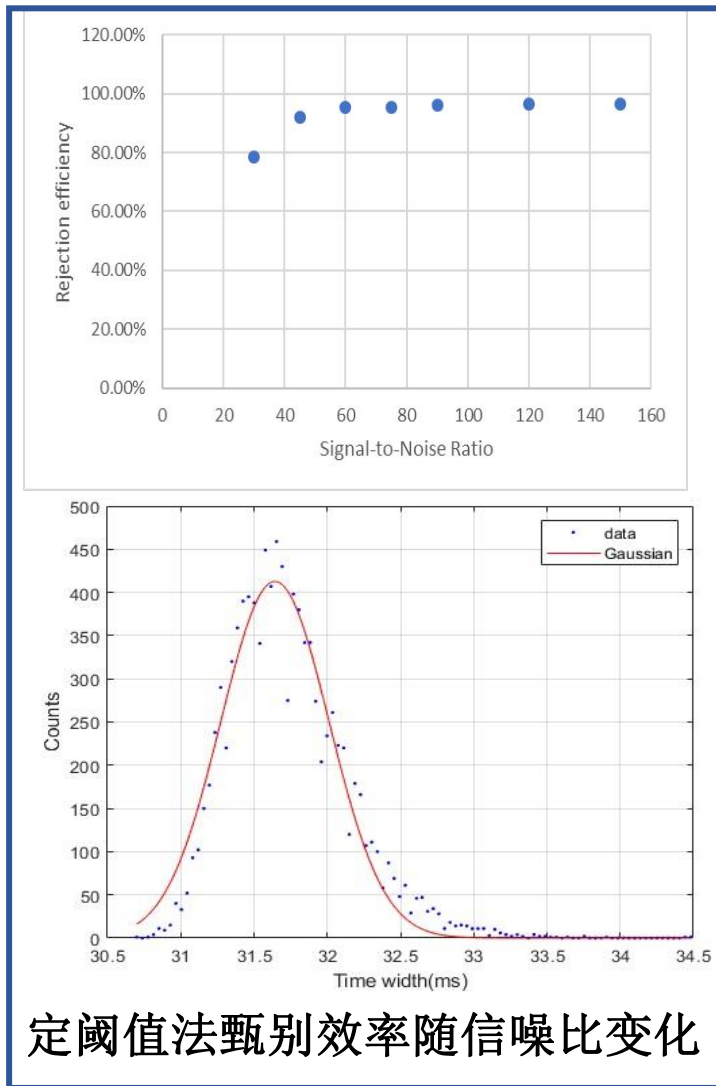
基于LMO-TES系统本底甄别与荧光输运过程模拟进展

❑ 甄别过程

- ◆ 分别产生单信号和堆积信号样本，计算每个信号在定阈值下的过阈时间
- ◆ 根据单信号过阈时间分布计算甄别堆积信号的过阈时间范围，探究不同信噪比下的甄别效率变化

定阈值法在信噪比为30的情况下可以达到78.5%

动态阈值法在同样信噪比下甄别效率达到95.0%





基于LMO-TES系统本底甄别与荧光输运过程模拟进展

□ 荧光输运过程模拟

◆ 根据探测器结构建立光学模型

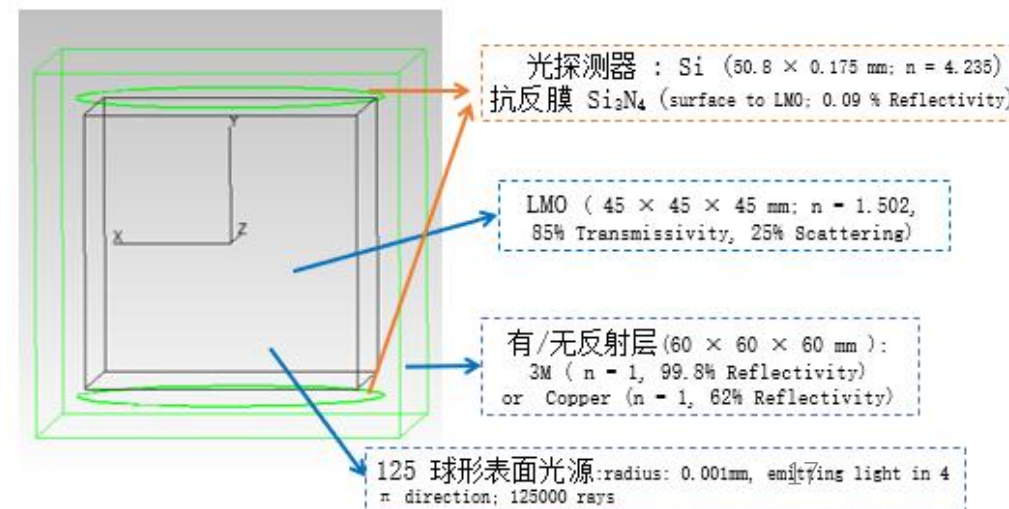
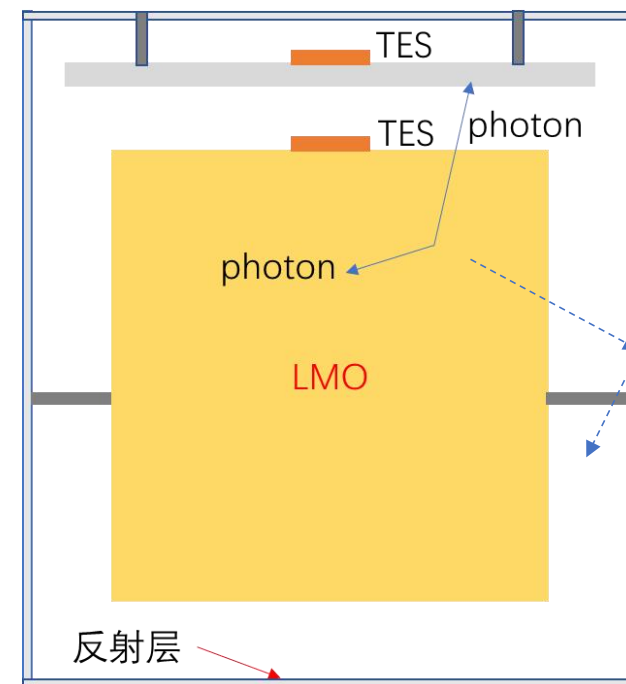
- 反射层：表面反射率
- LMO晶体：折射率、表面反射率、吸收长度
- 硅片：表面反射率和吸收率
- TES：表面反射率和吸收率

◆ 仿真荧光在光子探测器硅片表面的沉积分布及总量

- 表面光源/格点光源输入（以Geant4模拟得到的LMO晶体内部荧光分布及强度）
- 以光子探测器硅表面吸收到的荧光为输出

◆ 研究不同反射参数及布局对光子探测器接收到光子总量的影响

- 以总量最大为最优布局



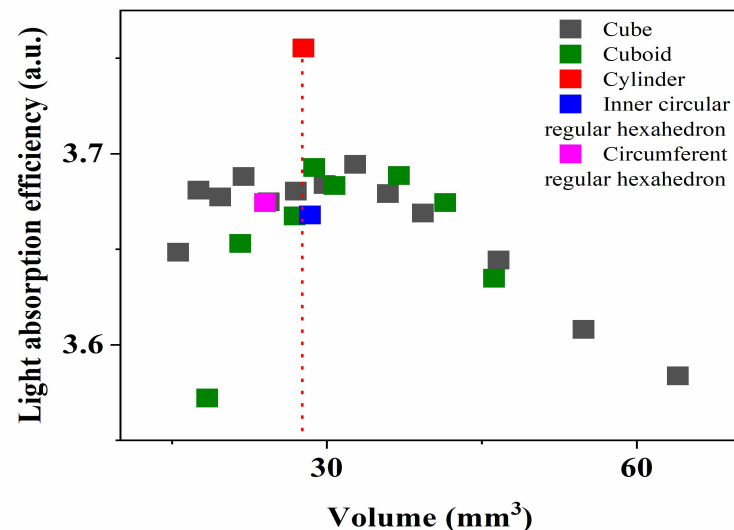


基于LMO-TES系统本底甄别与荧光输运过程模拟进展

□ 荧光输运过程模拟

◆ 反射层形状模拟

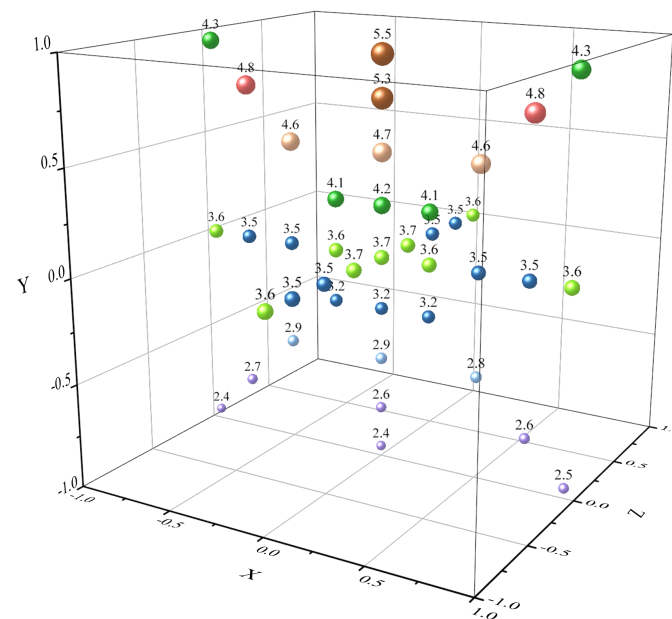
在正方体、长方体、圆柱、六棱柱中
圆柱形反射层光吸收效率最高



◆ 光探测器抗反射层计算

	$n_1(\text{antiref.})$	$n_2(\text{LD})$	Reflectivity
1		Si(4.235)	37%
3	SiO ₂ (1.4599)	Si(4.235)	7.2%
4	SiO(1.9785)	Si(4.235)	0.039%
7	Si ₃ N ₄ (2.0319)	Si(4.235)	0.09%

◆ 光源在晶体内部不同位置引起的光学吸收效率模拟



最重要因素:与晶体的直线距离, 距离越近, 光效率越高
Y轴光效率差距较大, 距离越近, 效率提高越快
X轴光效率接近 (-5%), 中心点 (0,0)光效率最高
Z轴光效率接近 (+1%), 远离中心点, 靠近面外侧 (有反射层的情况下), 光效率最高



总结和计划

□ TES薄膜表征

AlMn薄膜 T_c 进入20mK，在20mK以内测试发现对测试电流、外部磁场等均敏感
优化W超导薄膜制备，测量不同制备参数下 T_c ，使其在 10-20 mK 温区稳定工作。

□ 模拟仿真

构建物理模型，开展LMO-TES能量沉积、荧光产生和传输过程仿真。

□ TES探测器优化设计

接入GEANT4能量沉积数据，结合基础热电仿真得到温度、电流等响应情况，确立符合要求的探测器模型参数。获得TES探测器优化设计方案，开展版图设计，进行TES探测器表征和能量刻度测试。



谢谢各位专家

北京师范大学

吕沙沙