

AlMn合金超导薄膜低T_c调控研究及TES探测器研制进展

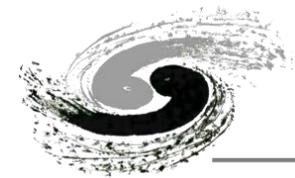


汇报人：刘舟慧

单位：中国科学院高能物理研究所

合作组：TES R&D CUPID-China合作组

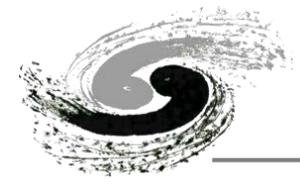
日期：2023年12月17日



目录

content

- 1 | 研究背景
- 2 | 用于 $0\nu\beta\beta$ 衰变实验的TES探测器
- 3 | AlMn超导薄膜的制备及表征
- 4 | TES探测器的研制进展
- 5 | 总结与展望

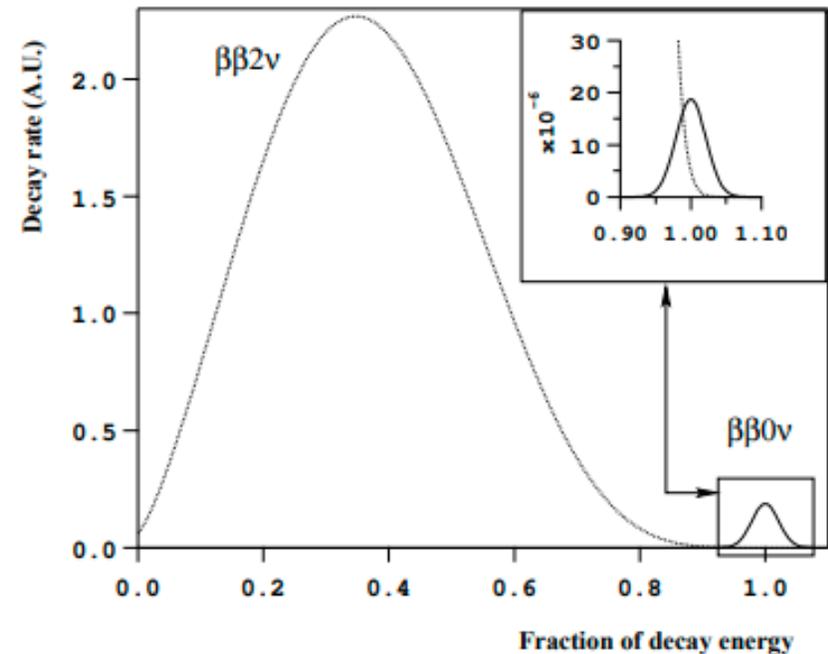
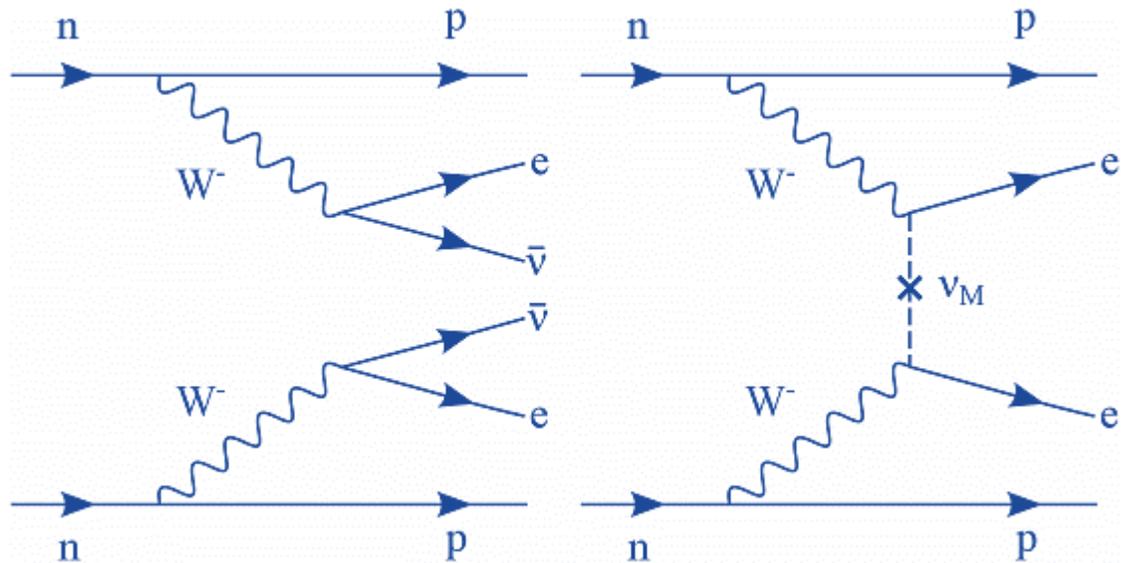


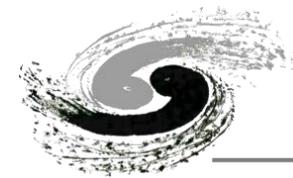
无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$) 的研究可以揭示:

- (1) 轻子数是否守恒;
- (2) 中微子是否为马约拉纳粒子;
- (3) 中微子的绝对质量标度;
- (4) 其他超出粒子物理标准模型的新物理。

$0\nu\beta\beta$ 实验要在连续的本底下寻找罕见峰, 需要:

- 高能量分辨率
- 低本底 (辐射环境、材料本身等)



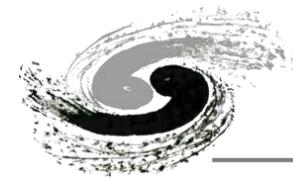


研究背景—几种探测器对比

各个实验组的设计方案目标均是为了提高装置的探测灵敏度

典型实验	CUORE	GERDA	KamLAND-Zen	PandaX-III
探测器类型	低温晶体量热器	高纯锗探测器	大型液闪探测器	微结构气体探测器 Micromegas
质量及元素	~200 kg ¹³⁰ Te	35.6 kg ⁷⁶ Ge	400 kg ¹³⁶ Xe	150 kg ¹³⁶ Xe
背景指数 counts/(keV kg yr)	10 ⁻²	10 ⁻⁴	--	10 ⁻⁴
半衰期下限(90% C.L.)	1.5 × 10 ²⁵	1.8 × 10 ²⁶	1.07 × 10 ²⁶	2.3 × 10 ²⁶
能量分辨率 (keV)	7.5	3	243	75

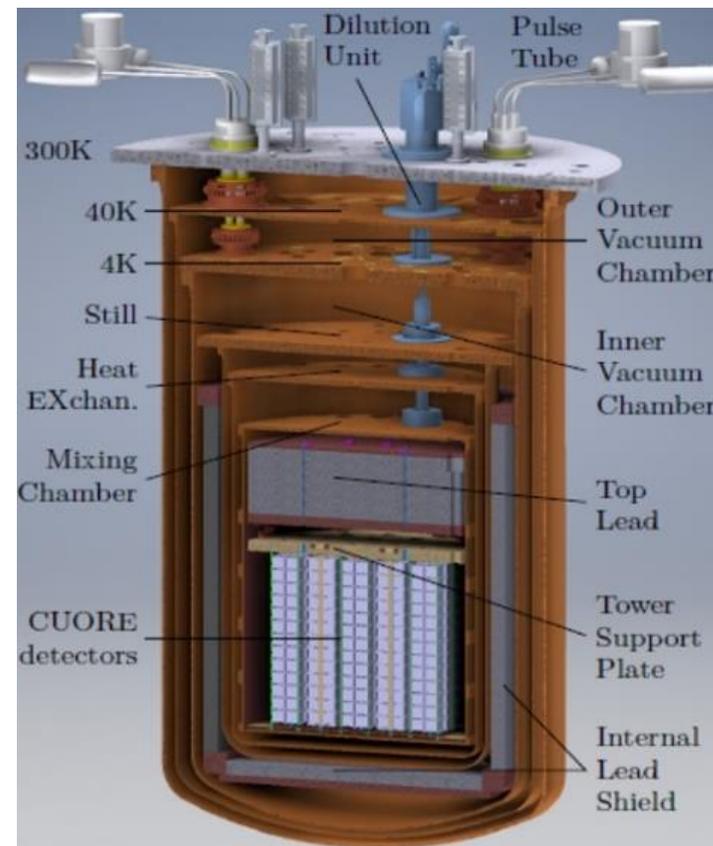
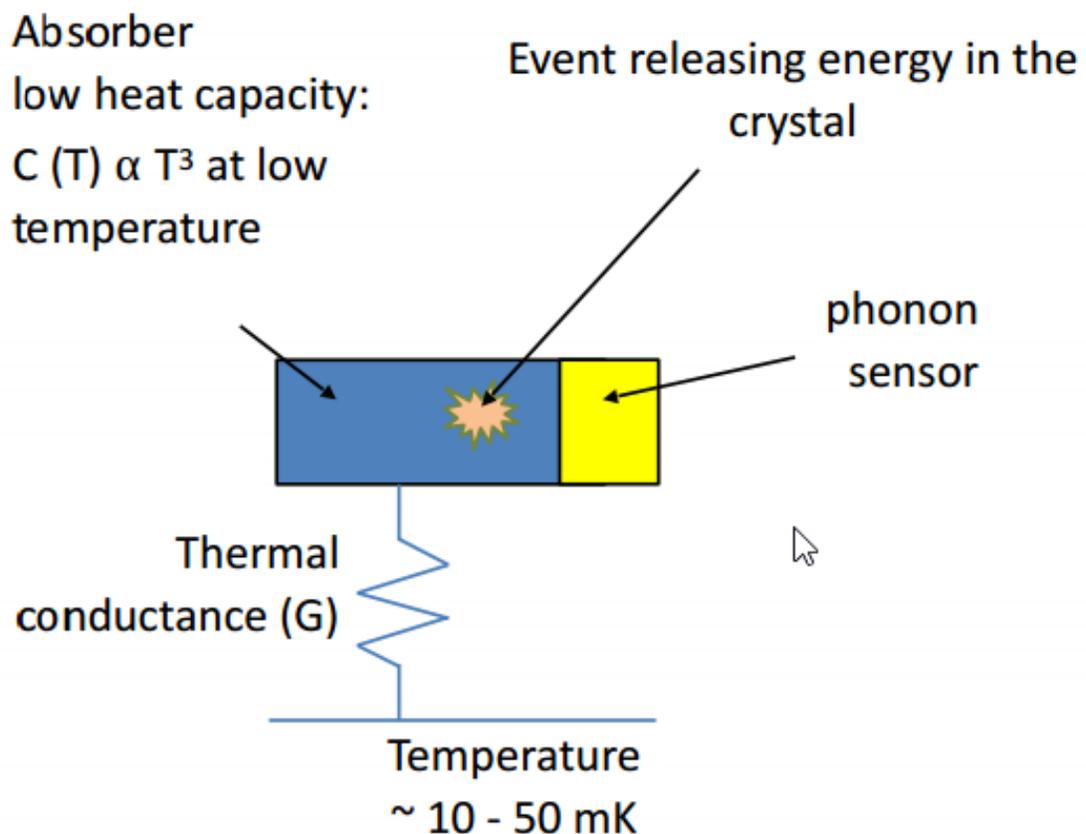
增加待测晶体质量、抑制本底、提高能量分辨率



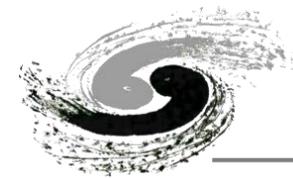
研究背景—低温晶体量热器

中国科学院高能物理研究所

低温下，晶体材料比热容 $C(T) \propto T^3$ ，降低工作温度可以有效减小比热容C，C越小信号幅度越大，从而提高温度测量灵敏度，通常晶体量热器工作温度在**10 mK**附近



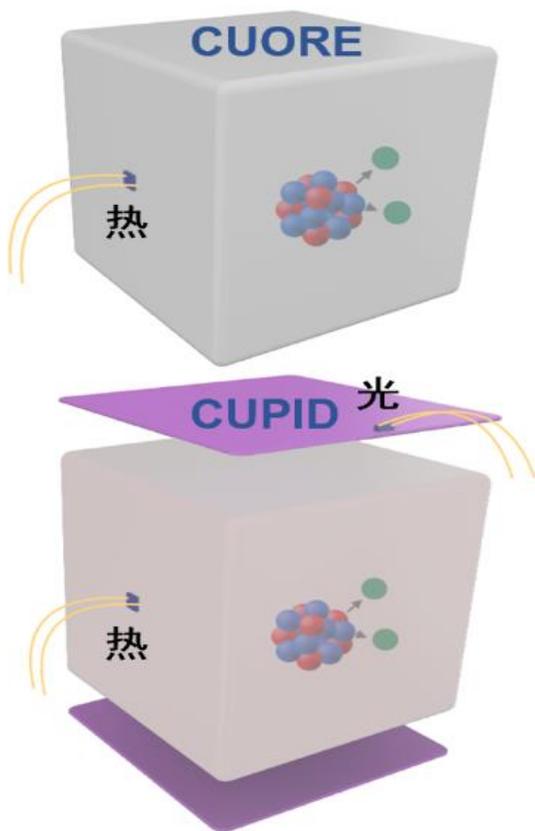
Cryogenics, 2019



研究背景—低温晶体量热器

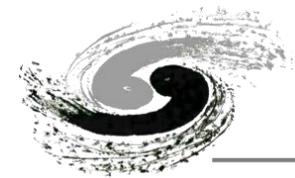
中国科学院高能物理研究所

CUPID 是在CUORE 基础上发展的新型晶体量热器实验技术，采用光热双通道读出技术实现本底甄别，有效压低 α 背景本底，提高实验灵敏度。主要采用NTD探测器。



Parameter	CUPID baseline	CUPID-reach	CUPID-1T
Crystal	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$
Detector mass (kg)	450	450	1871
^{100}Mo mass (kg)	240	240	1000
Energy resolution FWHM (keV)	5	5	5
Background index (counts/(keV·kg·yr))	10^{-4}	2×10^{-5}	5×10^{-6}
Containment efficiency	78%	78%	78%
Selection efficiency	90%	90%	90%
Lifetime (years)	10	10	10
Half-life exclusion sensitivity (90% C.L.)	1.4×10^{27} y	2.2×10^{27} y	9.1×10^{27} y
Half-life discovery sensitivity (3σ)	1×10^{27} y	2×10^{27} y	8×10^{27} y
$m_{\beta\beta}$ exclusion sensitivity (90% C.L.)	10–17 meV	8.4–14 meV	4.1–6.8 meV
$m_{\beta\beta}$ discovery sensitivity (3σ)	12–20 meV	9–15 meV	4.4–7.3 meV





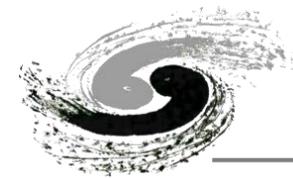
TES探测器

中国科学院高能物理研究所

参数	TES探测器	NTD探测器
探测原理	超导金属膜处在超导转变温区，利用其电阻的相变特性	电阻随温度升高而减小
探测介质	超导金属膜	Ge-NTD
温度灵敏系数	几十~几千	≤ 10
能量分辨率	1.6eV@5.9keV (FWHM)	~3eV@5.9keV (FWHM)
响应时间	~ μs 量级	~ms量级
读出电子学	SQUID、复杂	JFET、简单
复用方式	可多路复用，64:1以上	无
在 $0\nu\beta\beta$ 实验中运用	计划在CUPID-1T中使用	CUORE

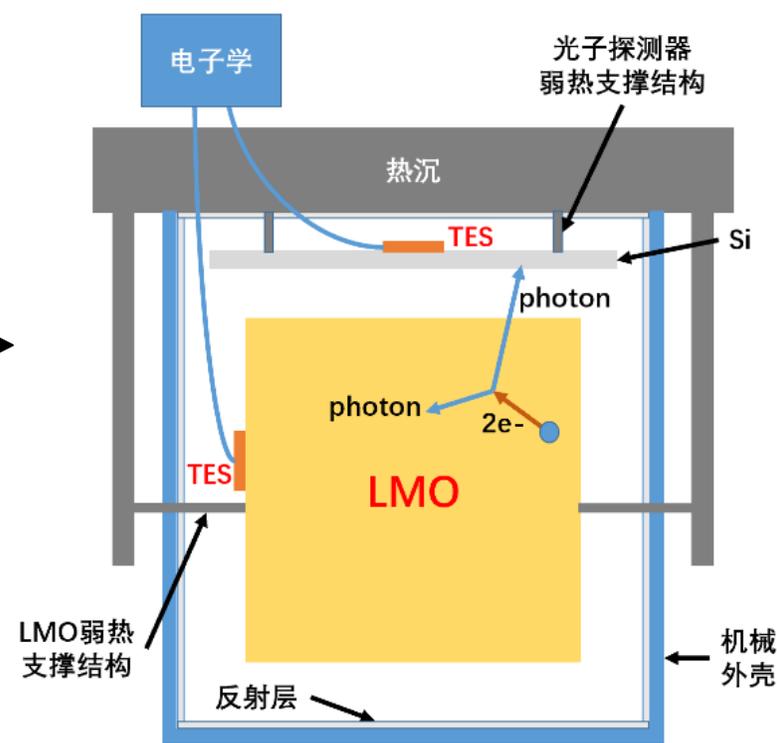
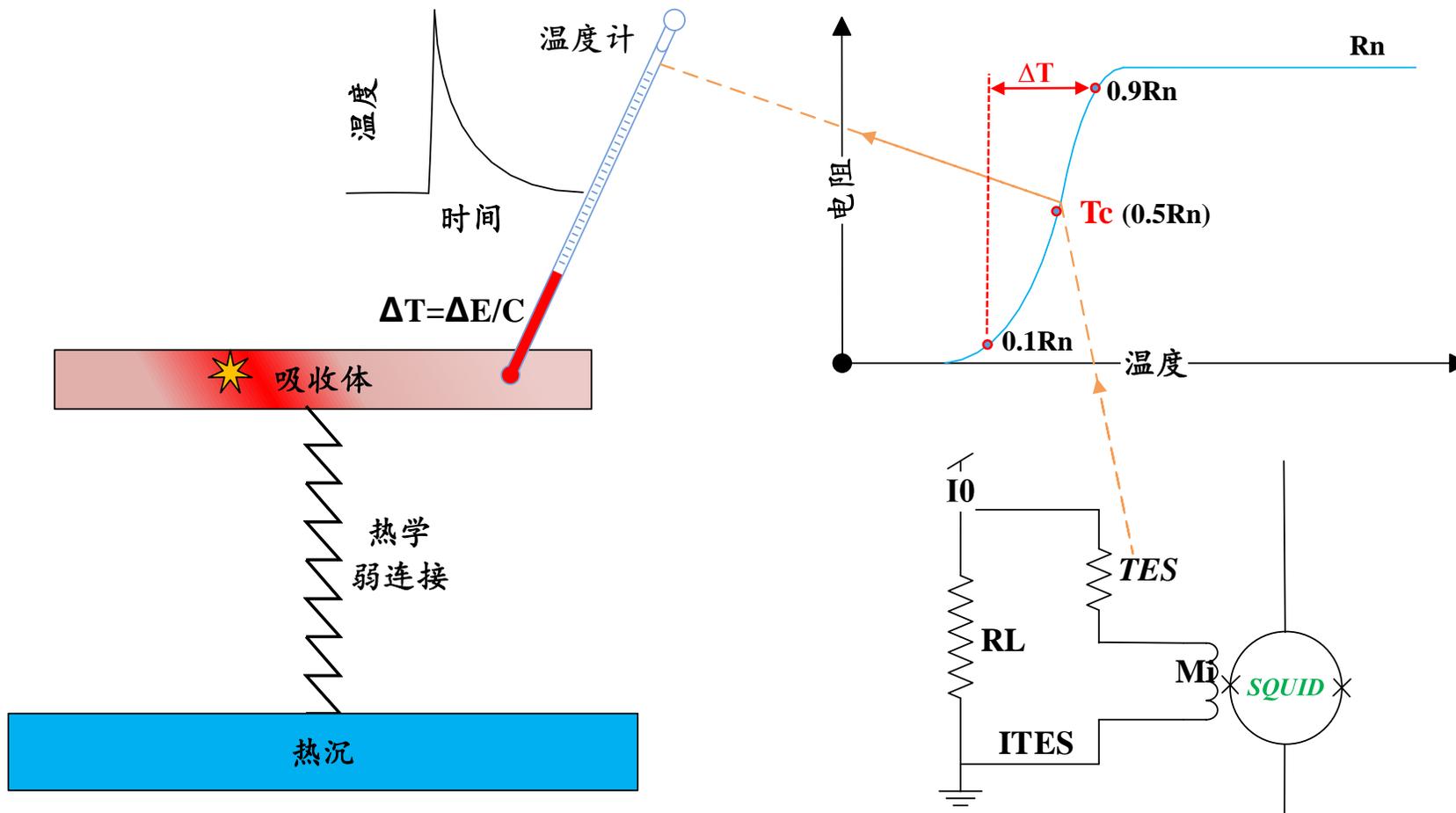
与北师大合作项目--2021年自然科学基金科学部综合研究专项项目：

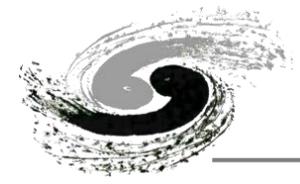
《用于 $0\nu\beta\beta$ 实验的极低超导转变温度TES光热探测系统关键问题研究》



超导转变边沿传感器(TES)

TES是一种低温超导探测器，主体为偏置在超导至正常态转变区内的一层超导薄膜，利用其陡峭R-T关系测量热量

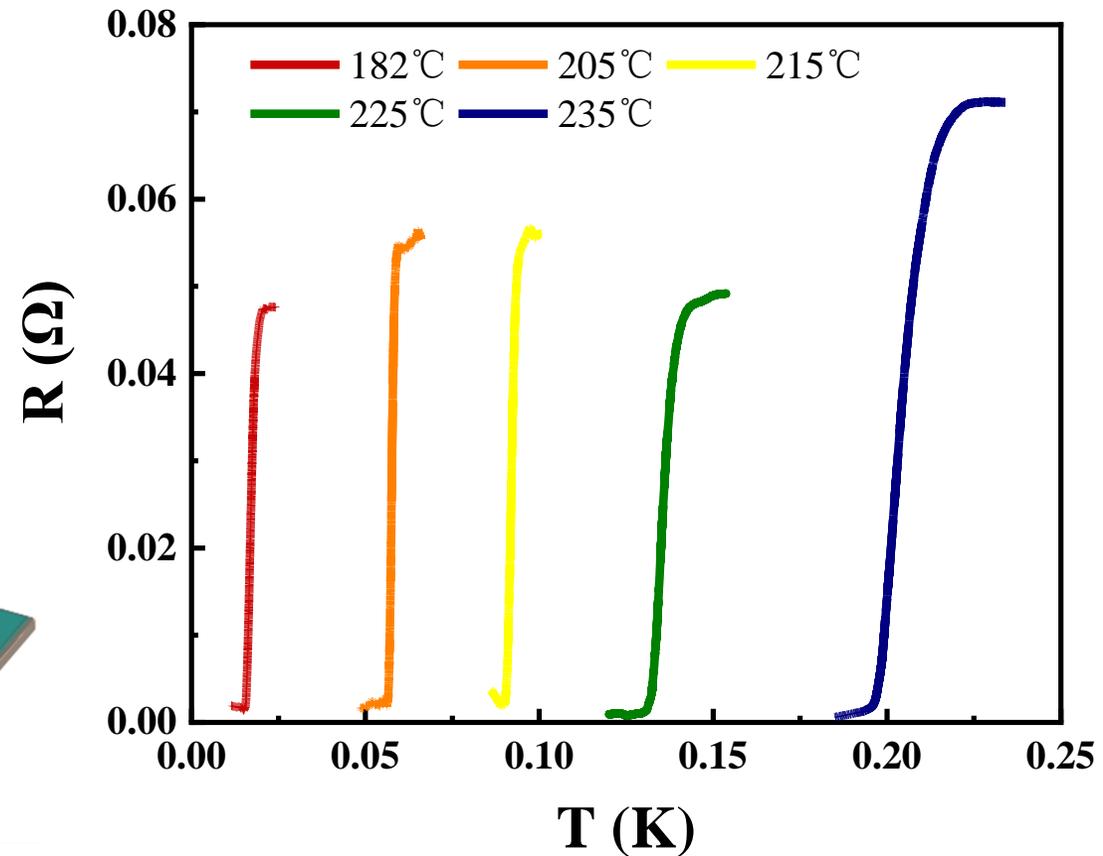
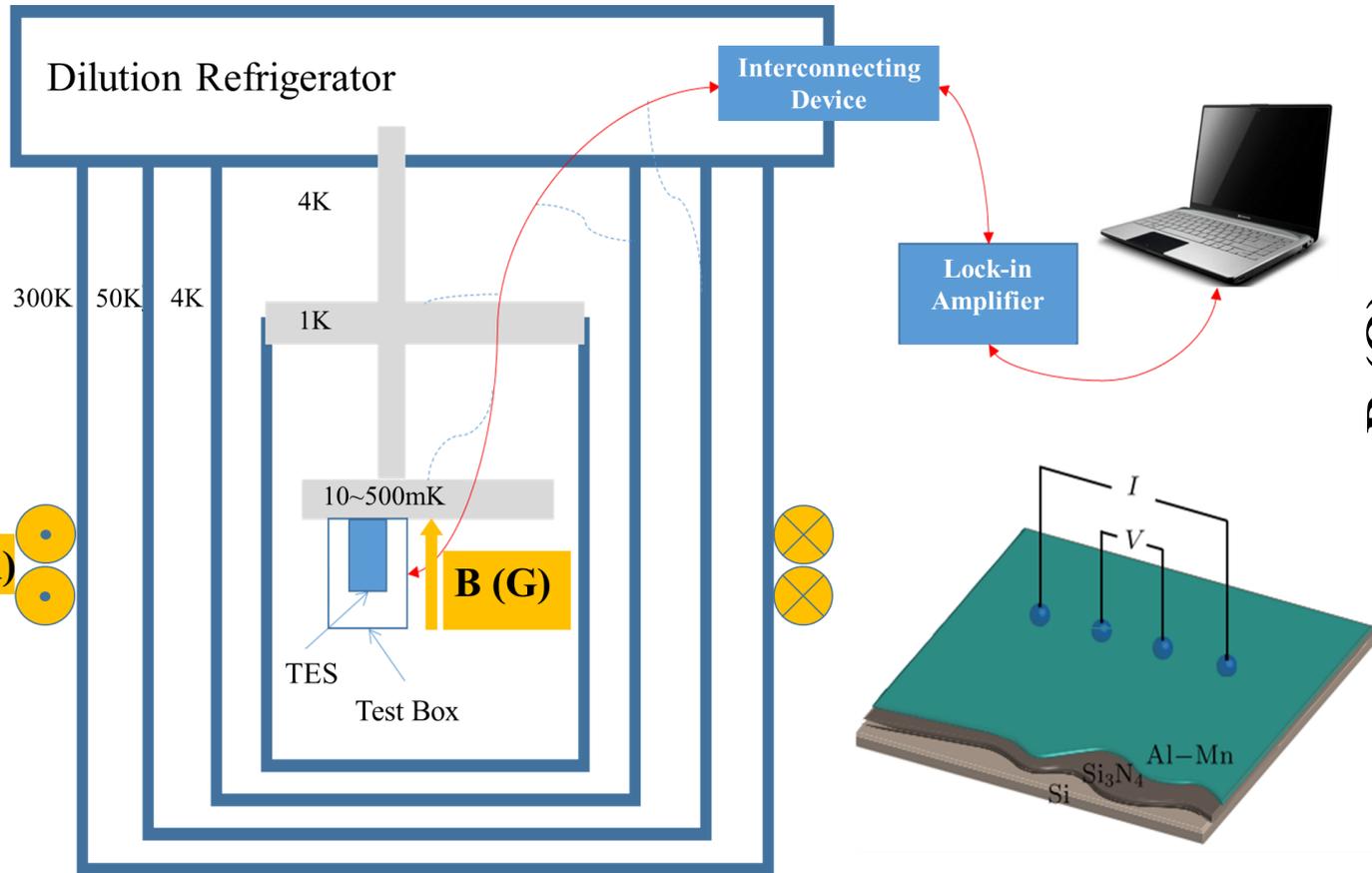


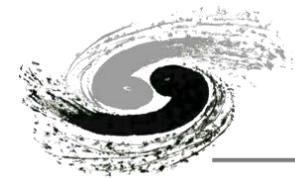


AlMn超导薄膜的制备及表征

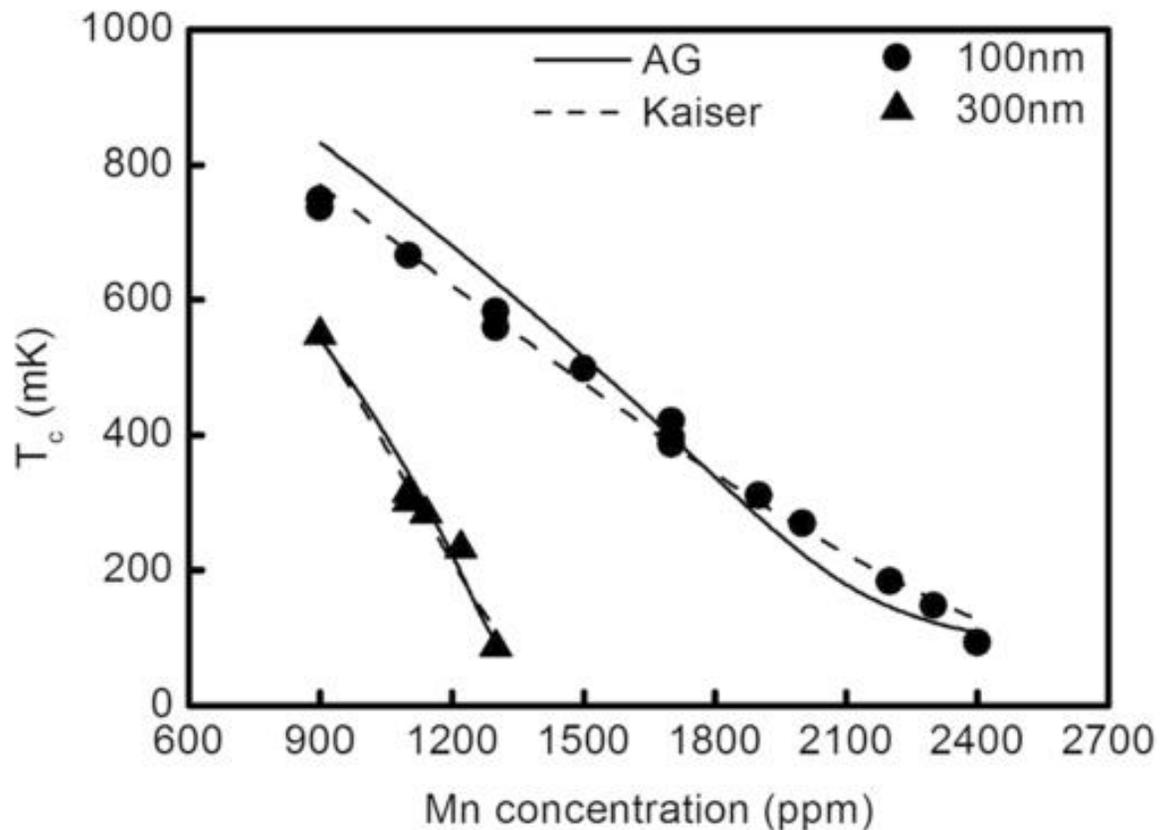
中国科学院高能物理研究所

- TES探测器的核心是超导薄膜的制备，AlMn合金薄膜是TES常用的超导薄膜
- 采用磁控溅射制备AlMn薄膜，在稀释制冷机中使用四端法测试薄膜R-T

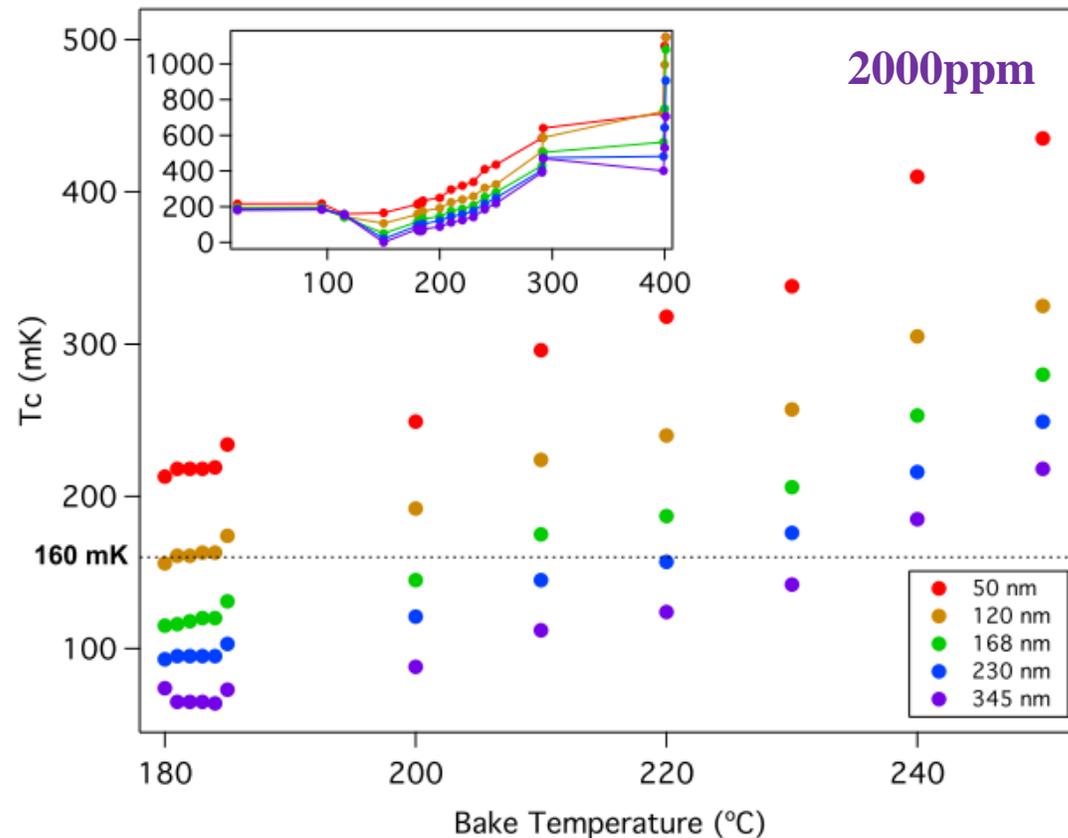




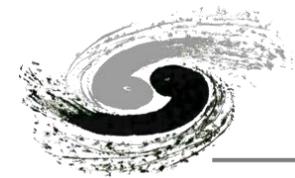
➤ AlMn薄膜靶材Mn含量对薄膜性能的影响



J. Low. Temp. Phys. 2021, 202:71–82



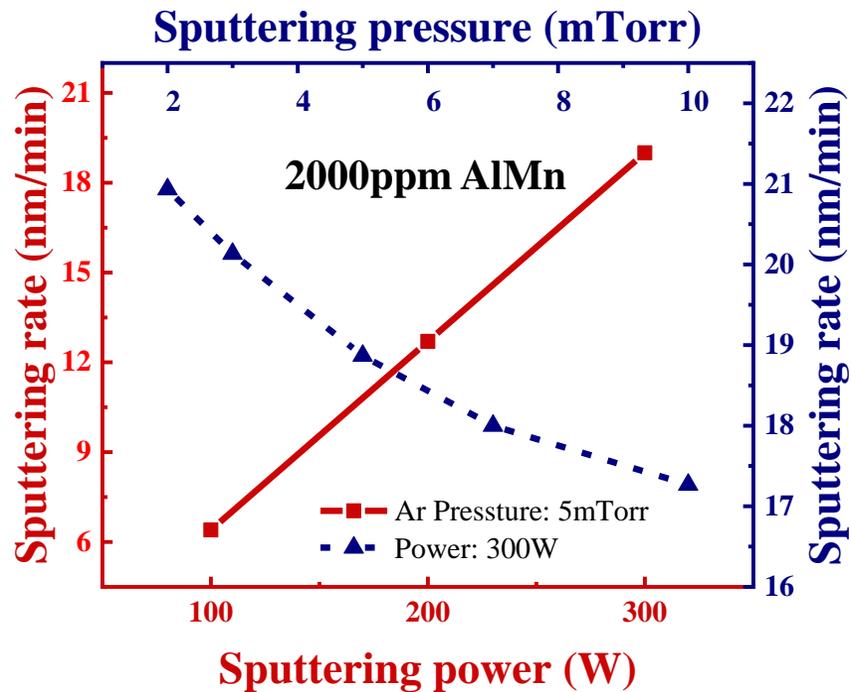
J. Low. Temp. Phys. 2016, 184:66–73



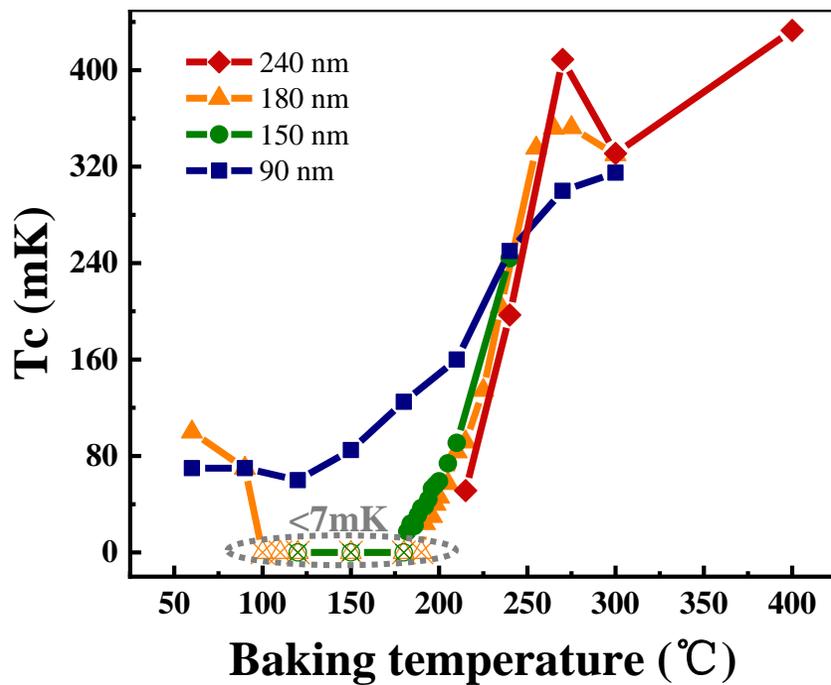
AlMn超导薄膜的制备及表征

中国科学院高能物理研究所

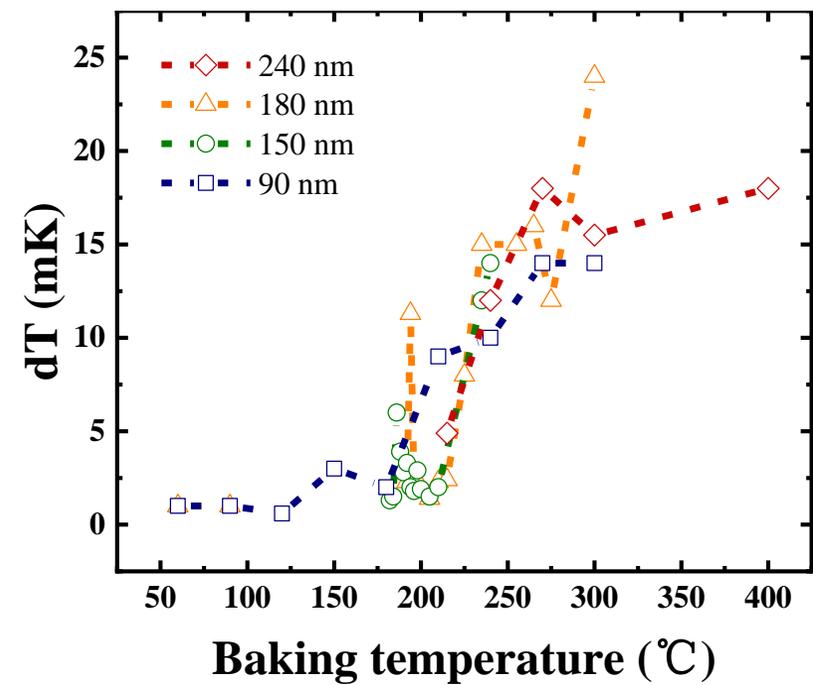
➤ 研究AlMn薄膜溅射功率、氩气压强、薄膜厚度、烘烤温度对薄膜性能的影响



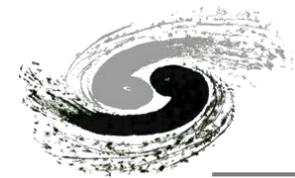
溅射速率与溅射功率成线性关系
溅射速率几乎不受Ar压影响



Tc随烘烤温度先降低后增加
增加部分与烘烤温度存在近似成线性关系
随薄膜厚度在烘烤温度240°C上下成相反趋势



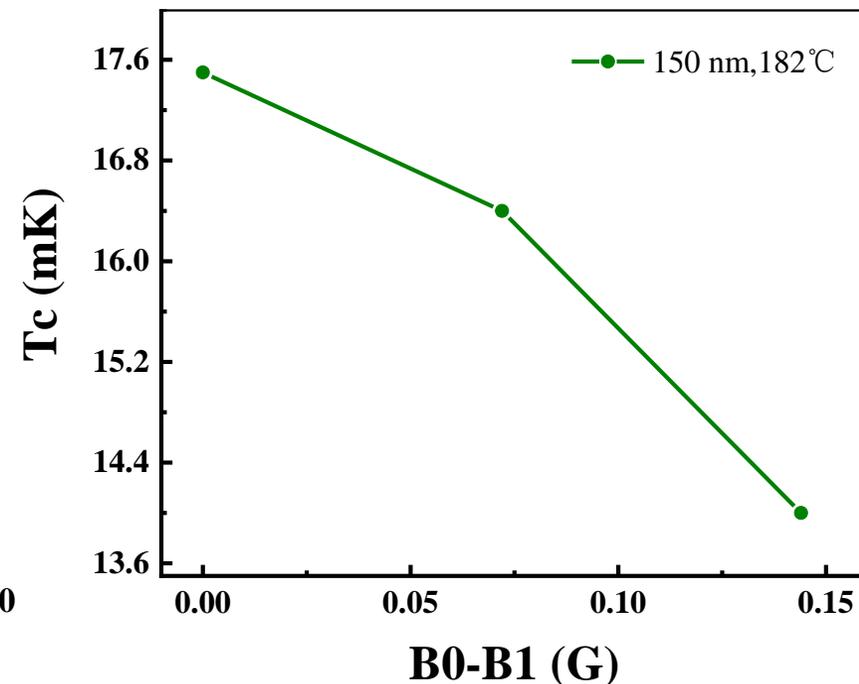
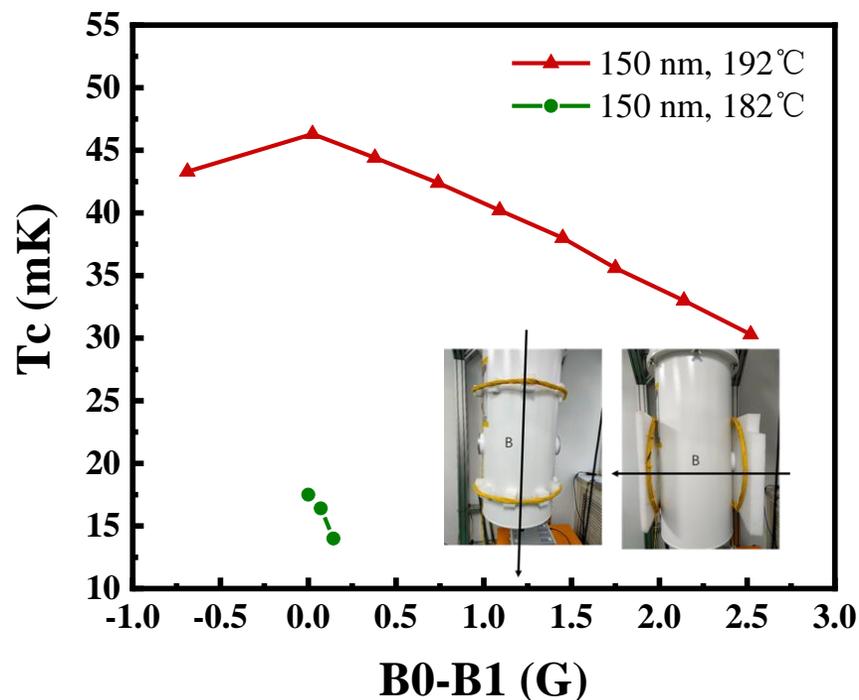
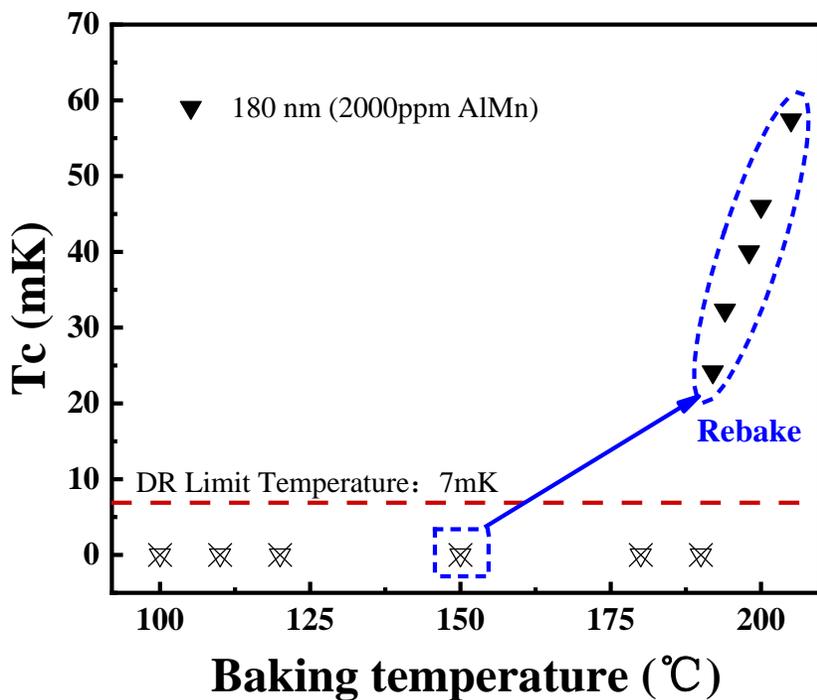
ΔT 随烘烤温度基本呈增加趋势



AlMn超导薄膜的制备及表征

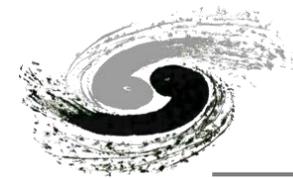
➤ 研究**烘烤**、**磁场**对薄膜性能的影响：

通过控制外加磁场可实现 T_c 从14 ~ 430 mK的调控（应用在 $0\nu\beta\beta$ TES）



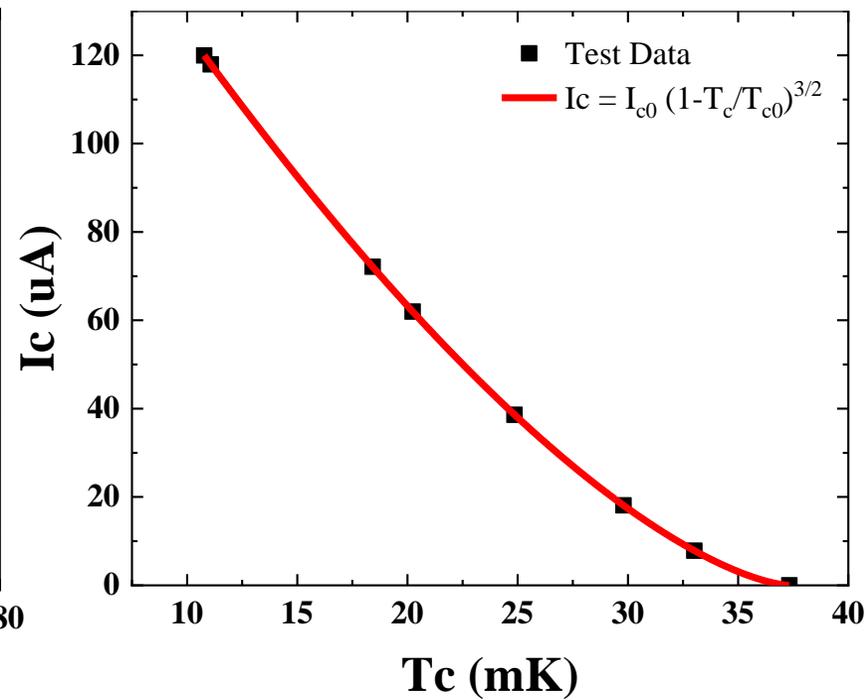
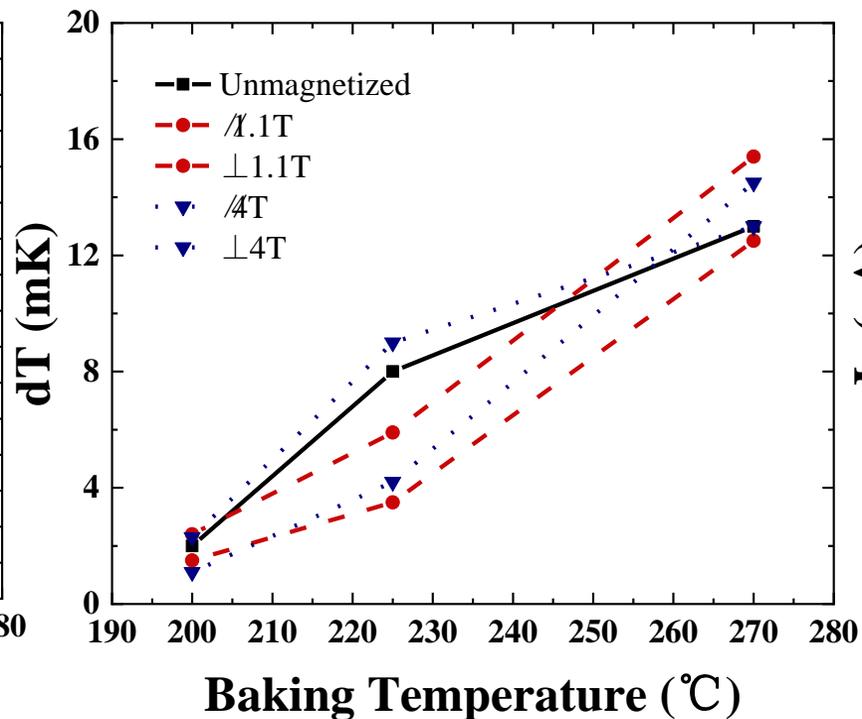
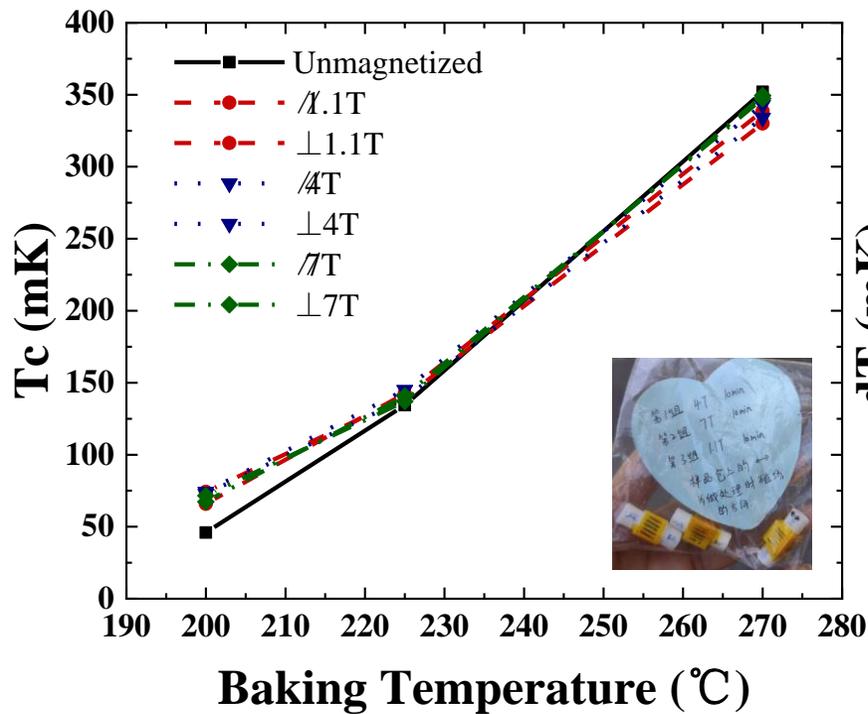
AlMn薄膜 T_c 由最高烘烤温度决定

$T_c < 30\text{mK}$ 的薄膜升降温测试会受到垂直方向磁场影响



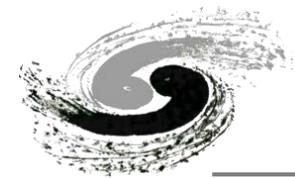
AlMn超导薄膜的制备及表征

➤ 研究磁化对薄膜性能的影响、超导临界电流 I_c 与 T_c 的关系



磁化对AlMn薄膜 T_c 和 ΔT 的无显著影响

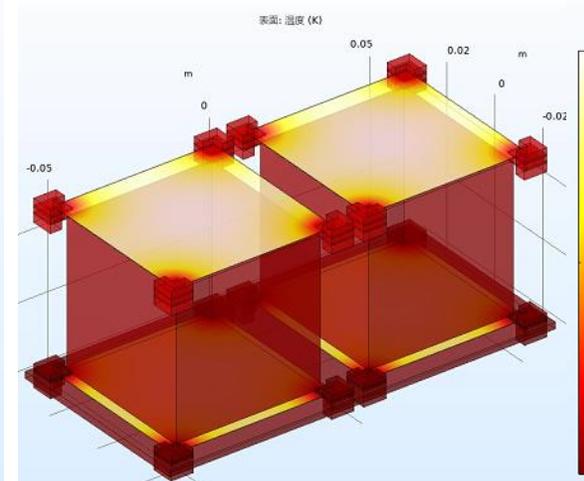
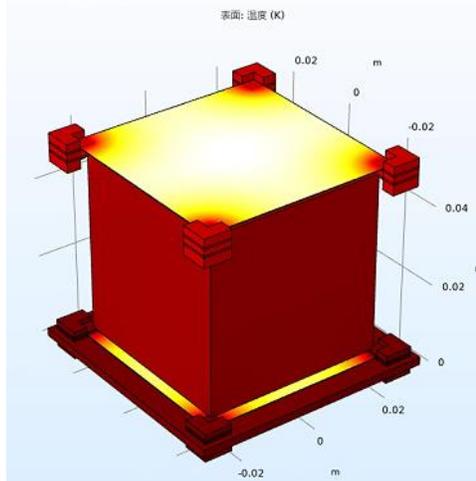
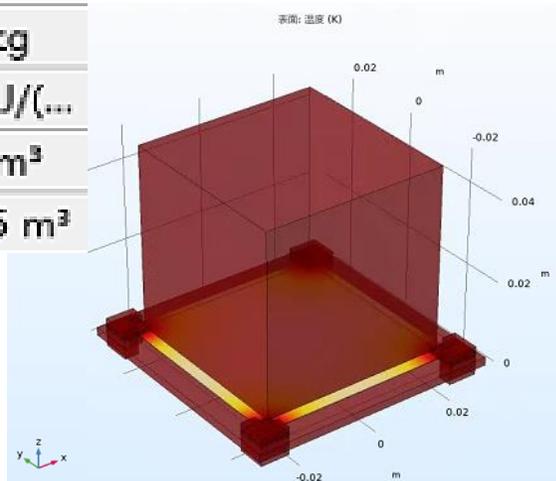
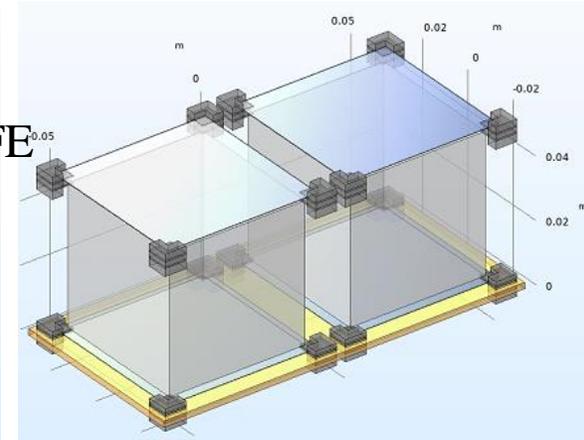
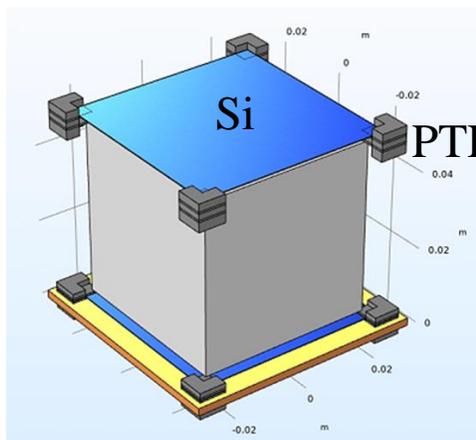
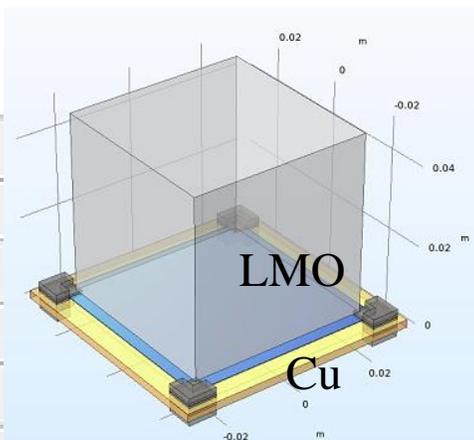
超导临界温度 T_c 与临界电流 I_c 符合GL理论

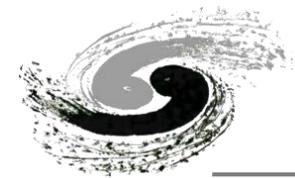


TES探测器的研制进展

- 基于COMSOL多物理仿真软件对TES光热探测器进行建模和初步仿真
 - 模拟光热功率引起稳态温度分布：模型可进一步简化

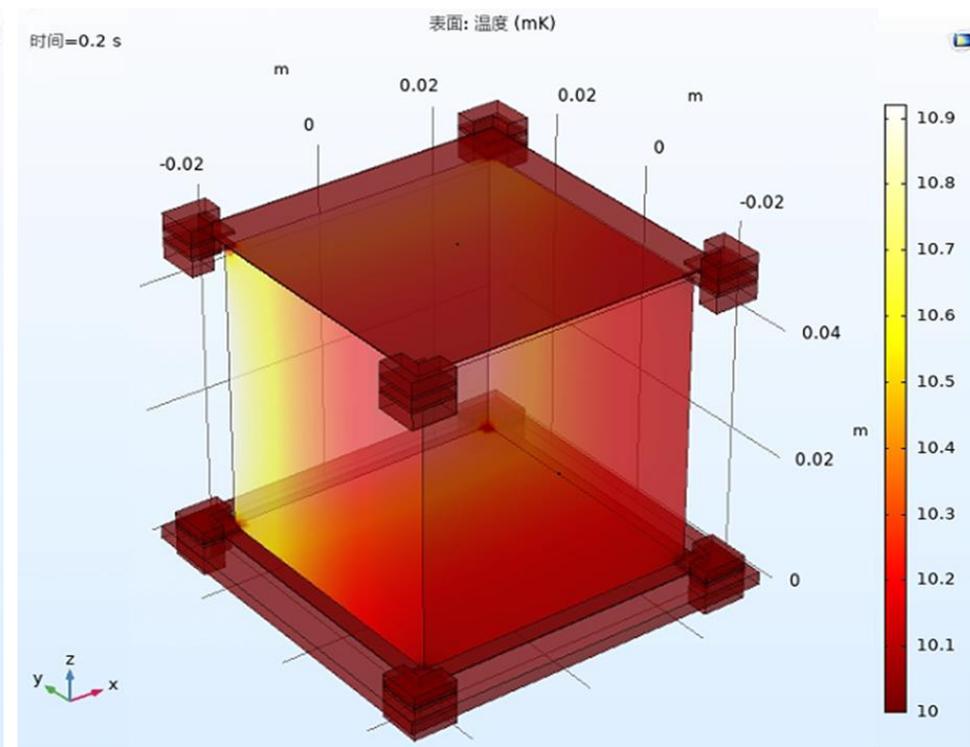
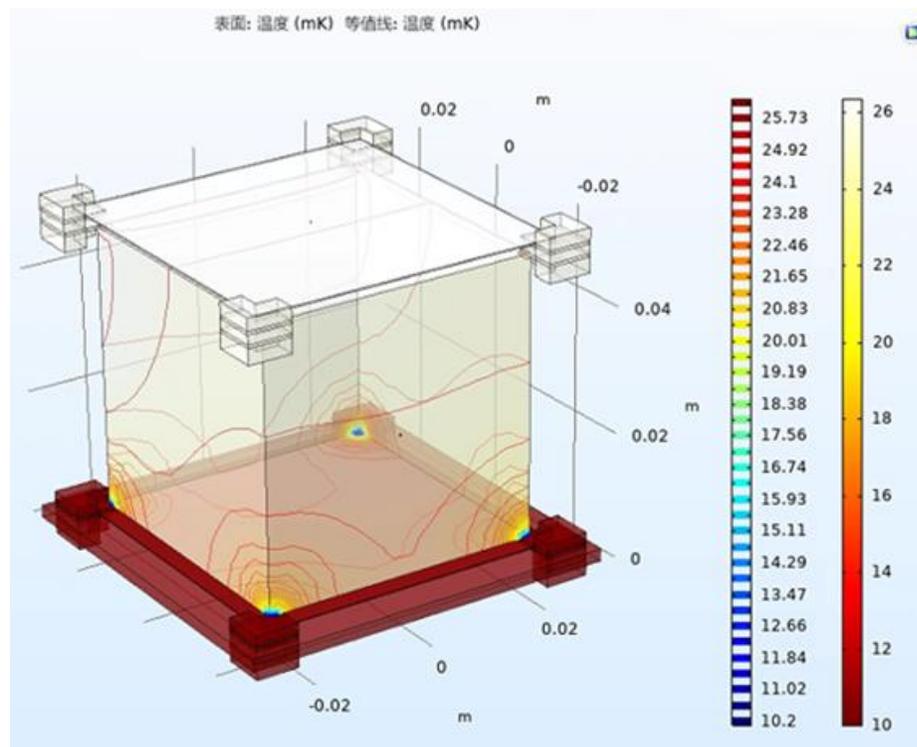
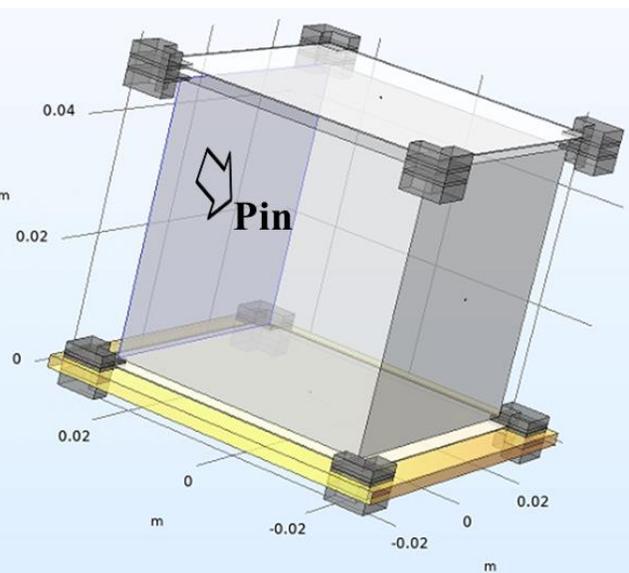
w_AlMn	200[um]	2E-4 m
h_AlMn	200[um]	2E-4 m
t_AlMn	400[nm]	4E-7 m
W_alpha	3.034E6*1.6E-19[J]	4.8544E-13 J
dT	W_alpha/C_LMO	6.6499E-4 K
Tb	10[mK]	0.01 K
m_LMO	V_abLMO*rho_LMO	0.37726 kg
Cp_LMO	7.3E-10[J/K]/m_LMO	1.935E-9 J/(...
rho_LMO	4140[kg/m^3]	4140 kg/m^3
V_abLMO	w_ab2^3	9.1125E-5 m^3

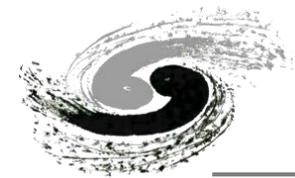




TES探测器的研制进展

- 基于COMSOL多物理仿真软件对TES光热探测器进行建模和初步仿真
 - 模拟光热功率引起稳态和瞬态温度分布，下一步进行热电仿真

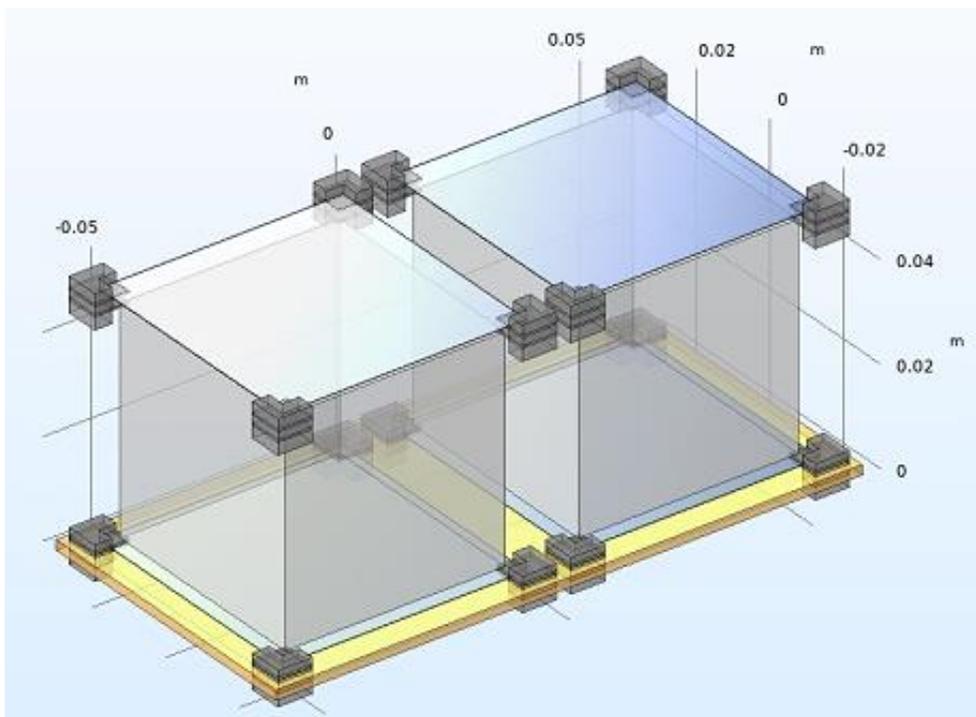




TES探测器的研制进展

- 基于AlMn薄膜的研究，进一步完成了TES探测器的设计和版图制作

Phonon detector

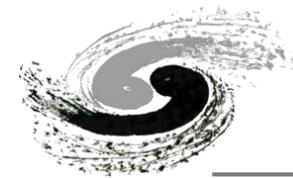


Light detector



Parameter	Value
Absorber	Li ₂ MoO ₄ crystal, density=3.06 g/cm ³
Size	45 mm × 45 mm × 45 mm, weight=278.8 g
TES	AlMn TES, R _n ~0.1Ω
T _c	15-20 mK
Qββ	≤5 keV @ 3.034 MeV
Pulse	Rise time ~10ms, decay time 0.1s-1s

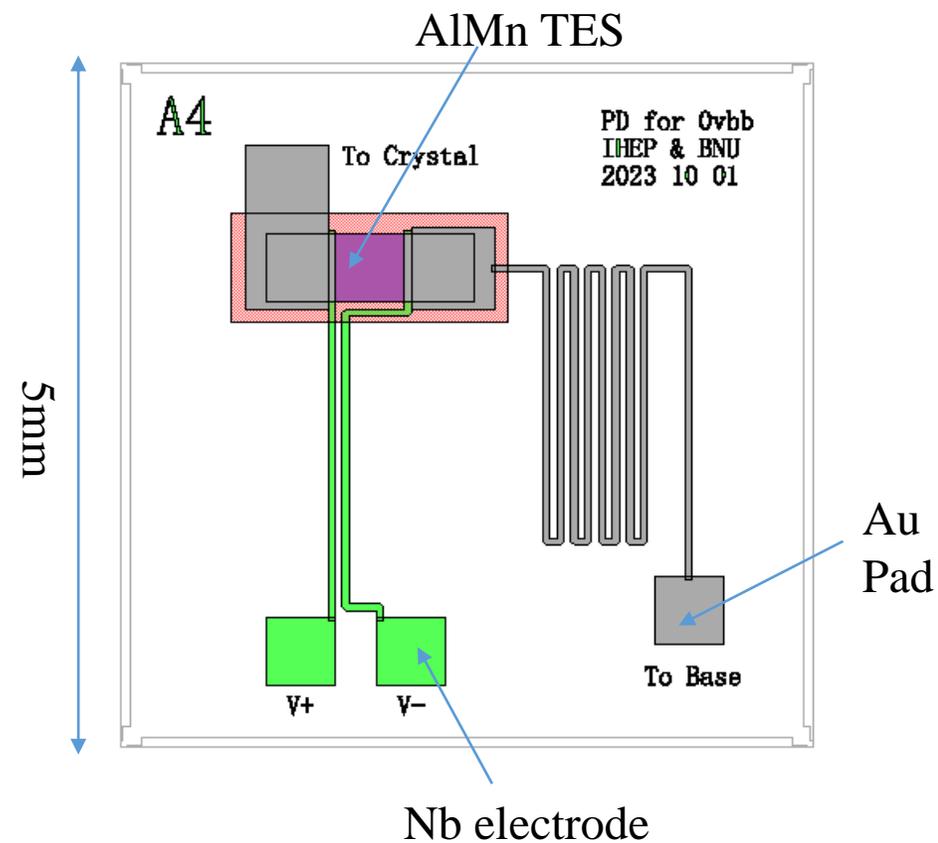
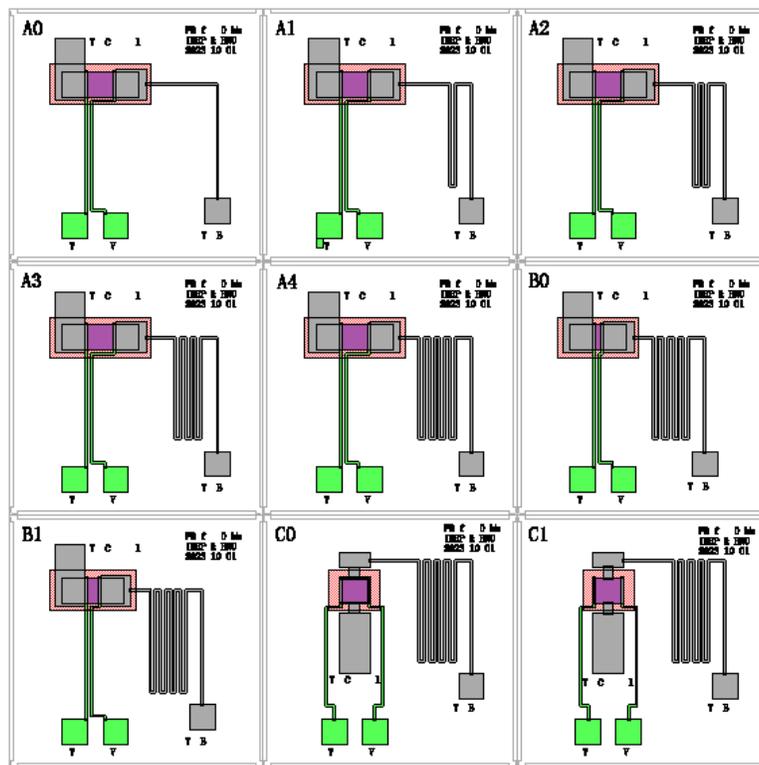
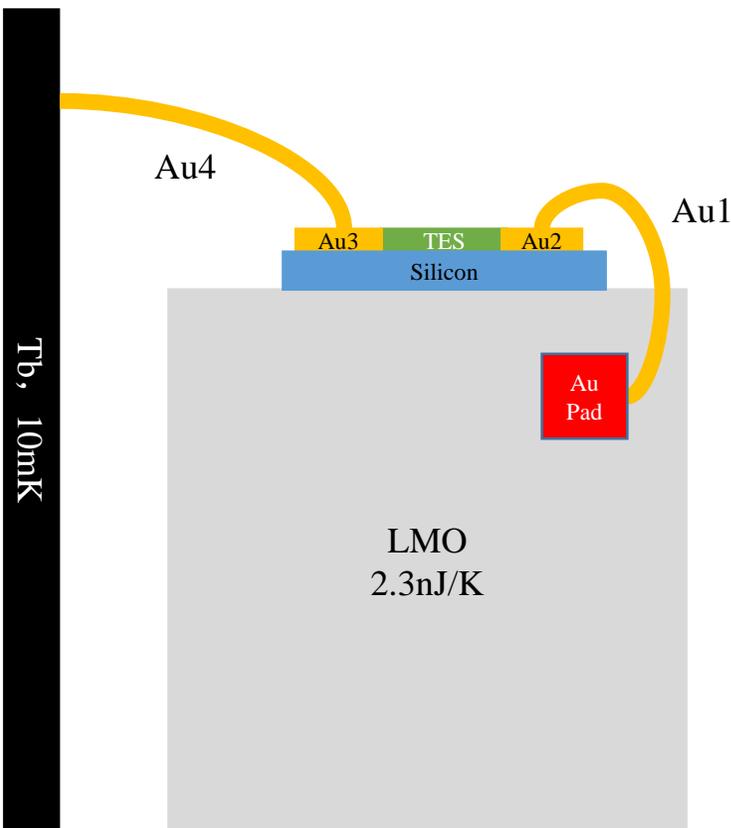
Parameter	Value
Absorber	Silicon
Size	45 mm × 45 mm × 500 um
TES	AlMn TES, R _n ~0.1Ω
T _c	15-20 mK
Low threshold	≤100 eV
Pulse	Rise time ~1ms, decay time ~10ms

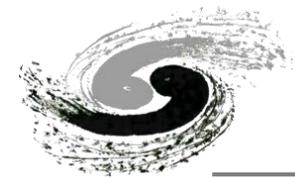


TES探测器的研制进展--声子探测器

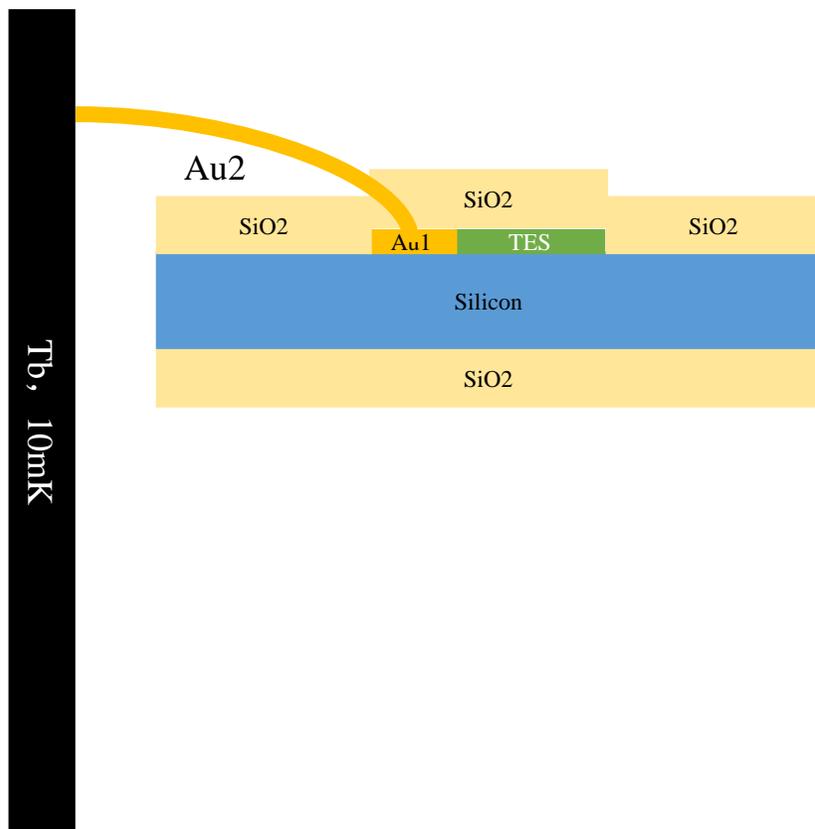
9种探测器: 热导率的调控、电阻率、声子收集效率等

Silicon: 5mm × 5mm × 0.3mm

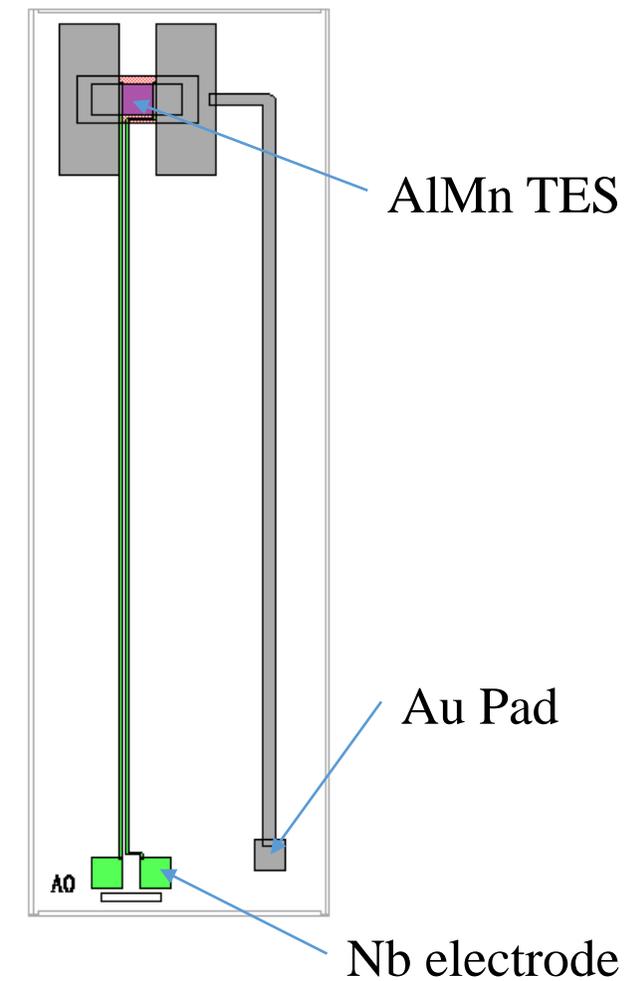
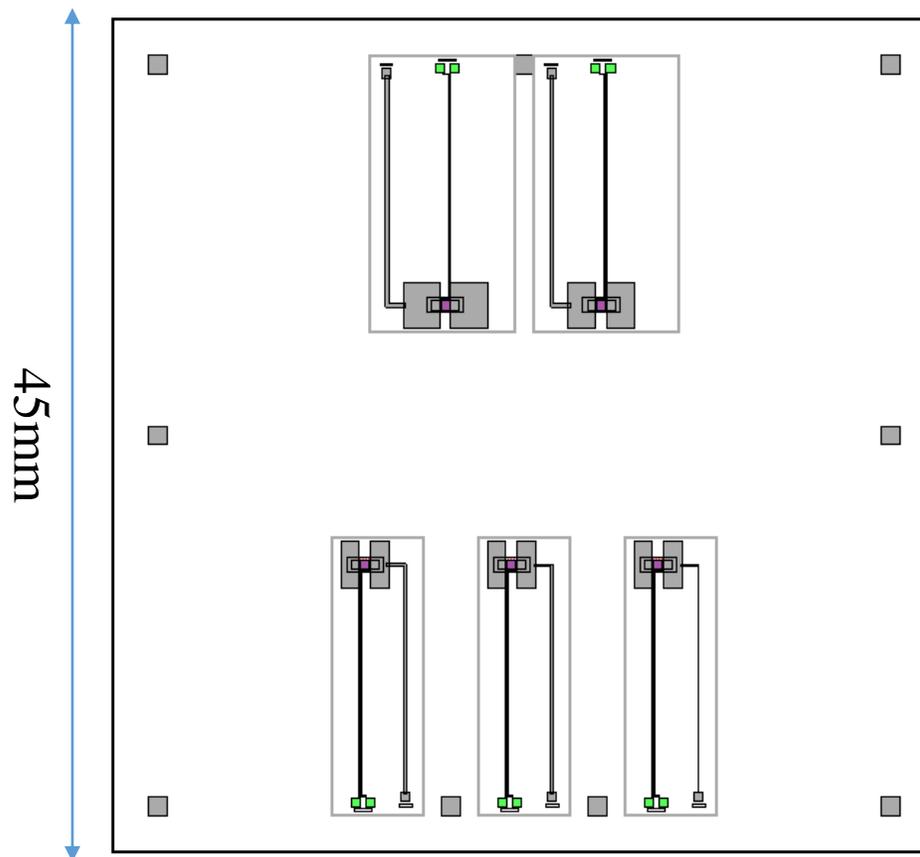


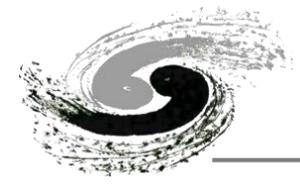


TES探测器的研制进展—光子探测器

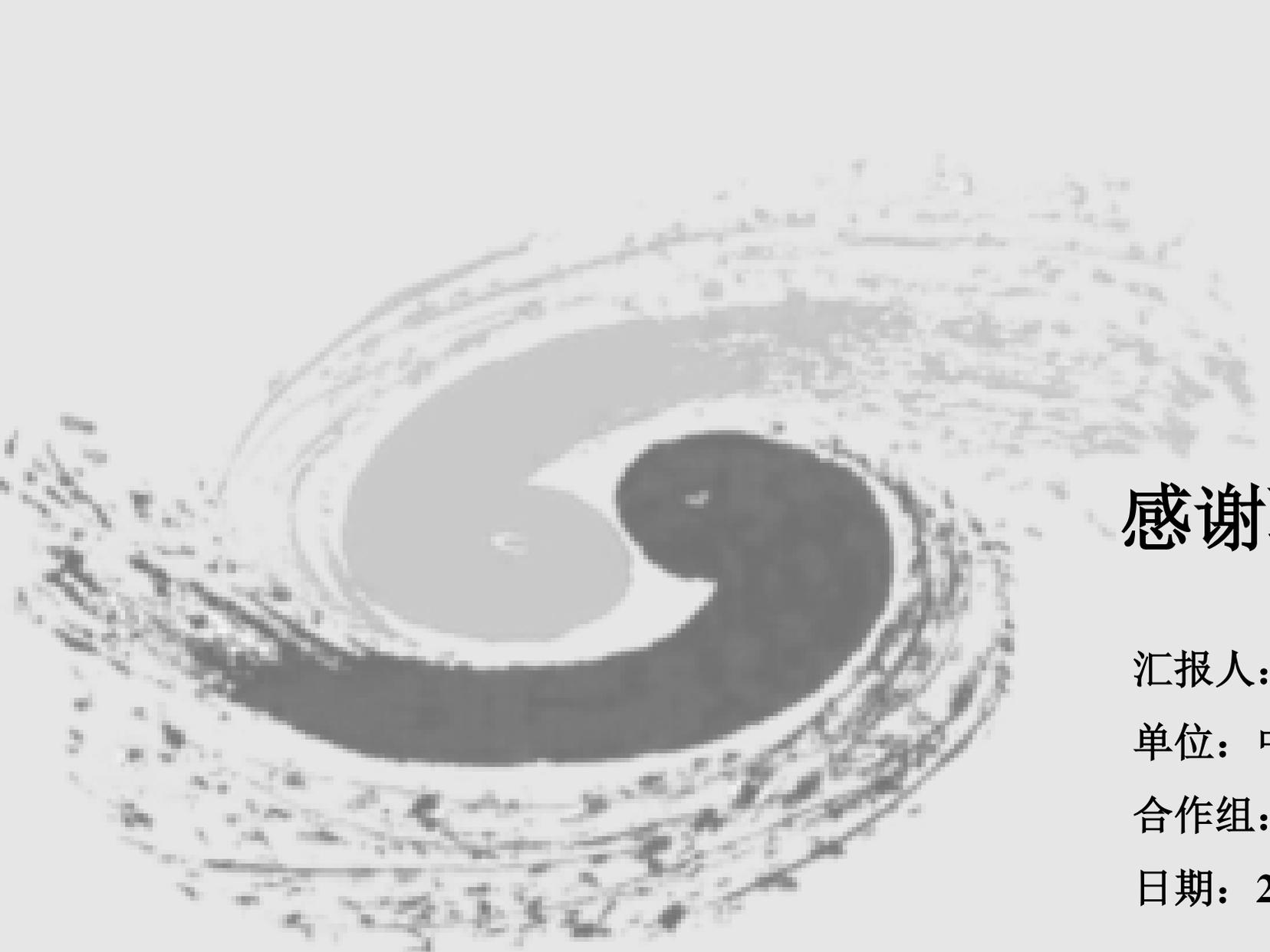


Silicon: 45mm × 45mm × 0.3mm





- 研究了AlMn薄膜溅射功率、氩气压强、薄膜厚度、烘烤温度等对薄膜性能的影响
 - 溅射速率与溅射功率成线性关系、几乎不受Ar压影响
 - 240°C以下烘烤的薄膜厚度越厚 T_c 越低；随烘烤温度的升高 T_c 呈现先降低后升高的趋势
- 通过调节烘烤温度、磁场等实现了用于 $0\nu\beta\beta$ 实验的10-20mK的AlMn超导薄膜的制备
 - AlMn薄膜 T_c 由最高烘烤温度决定
 - 进行0磁场下的 T_c 位于10-20mK重复及稳定性测试
- 完成了基于AlMn合金薄膜的TES探测器的设计及光刻版加工
- 后续将开展TES探测器器件的制备、光热探测器单元模块的组建、及性能测试¹⁹



感谢聆听，请批评指正！

汇报人：刘舟慧

单位：中国科学院高能物理研究所

合作组：TES R&D CUPID-China合作组

日期：2023年12月17日