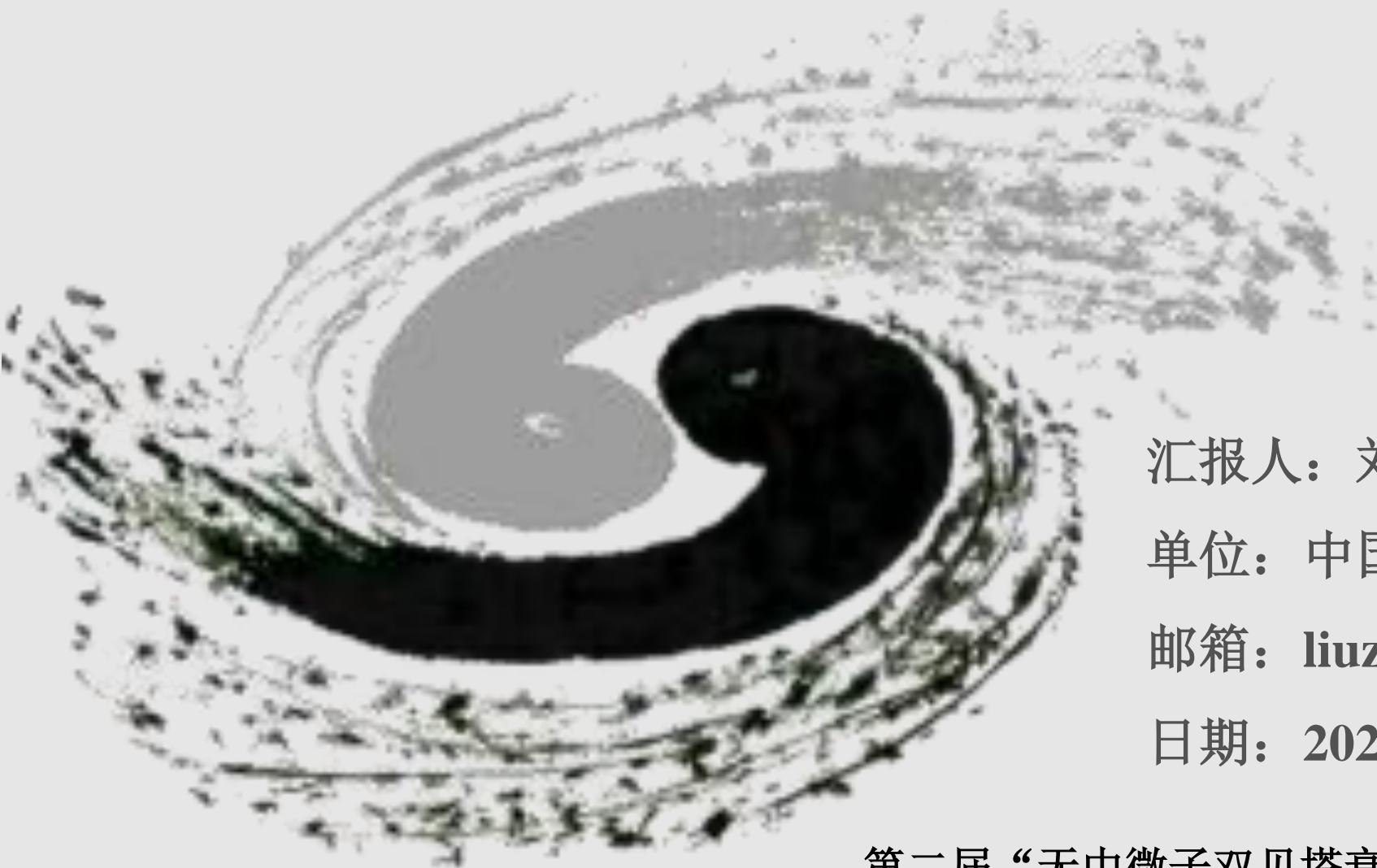


用于 $0\nu\beta\beta$ 衰变实验极低温TES超导薄膜的制备及表征

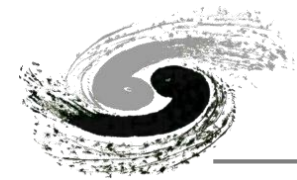


汇报人：刘舟慧

单位：中国科学院高能物理研究所

邮箱：liuzh@ihep.ac.cn

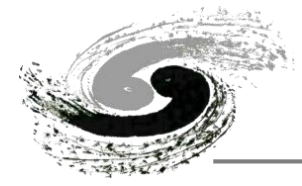
日期：2023年5月22日



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 | 总结与展望

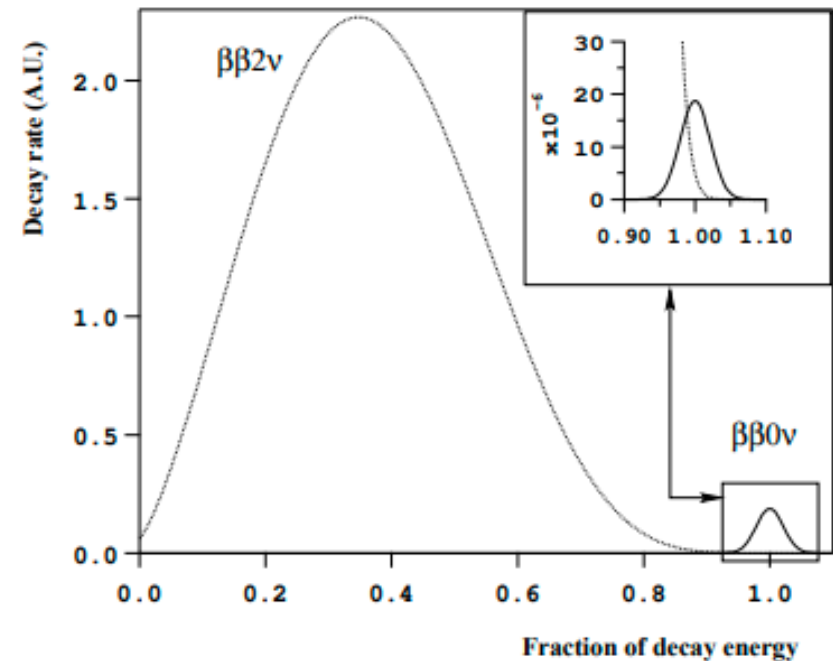
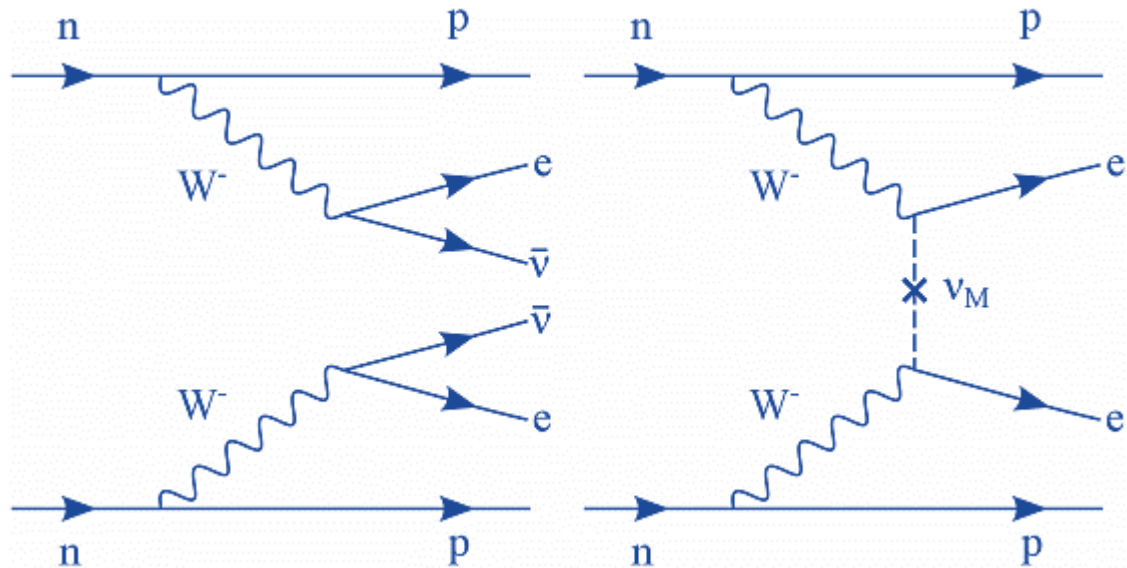


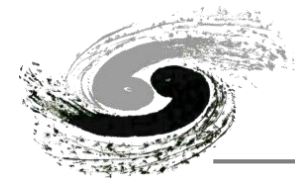
无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\beta\beta$) 的研究可以揭示:

- (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)



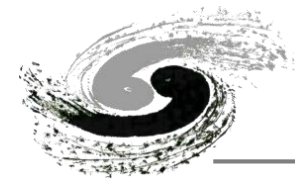


研究背景—几种探测器对比（找对应示意图）中国科学院高能物理研究所

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	大型夜闪探测器	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	9 × 10 ²⁵	1.07 × 10 ²⁶	9 × 10 ²⁵
能量分辨率 (keV)	7.5	3	243	75

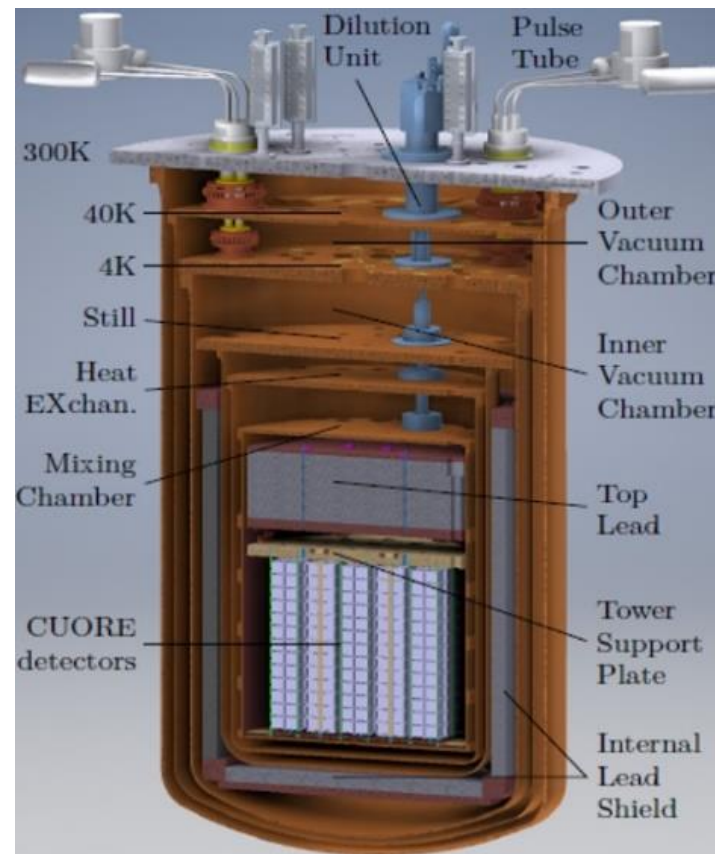
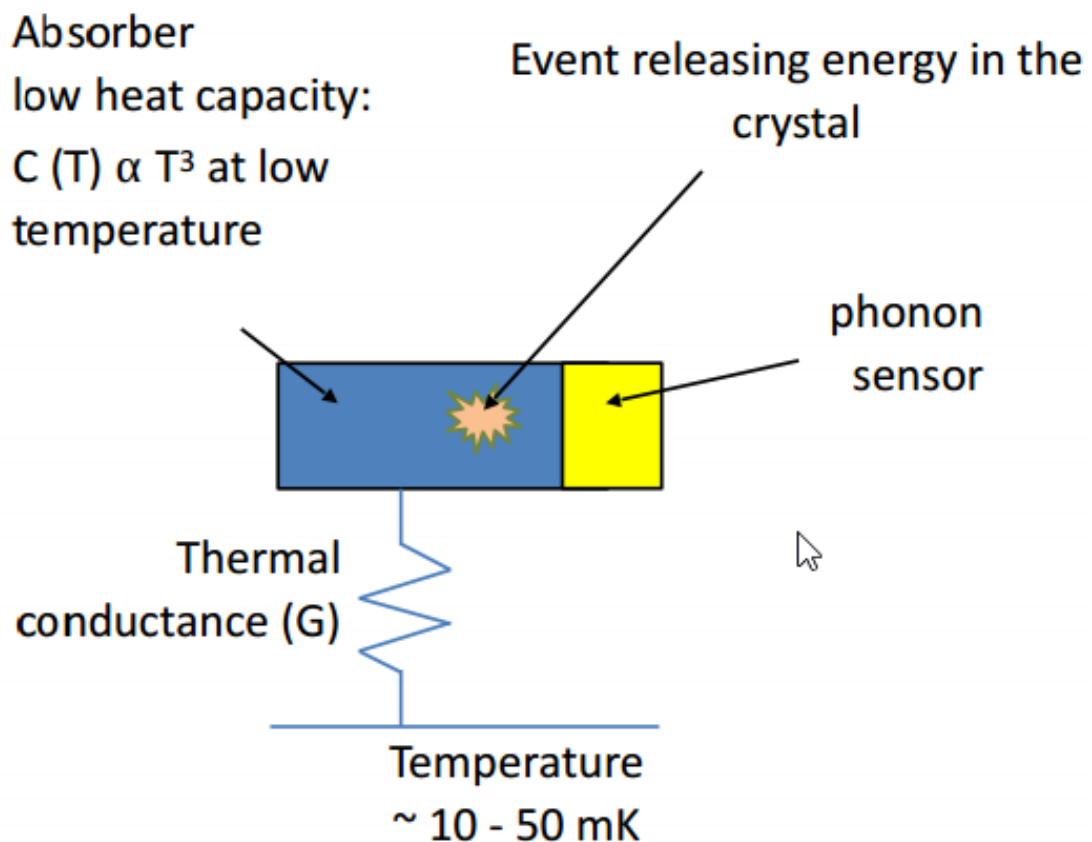
增加待测晶体质量、抑制本底、提高能量分辨率



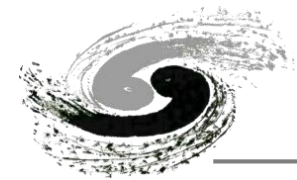
研究背景—低温晶体量热器

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



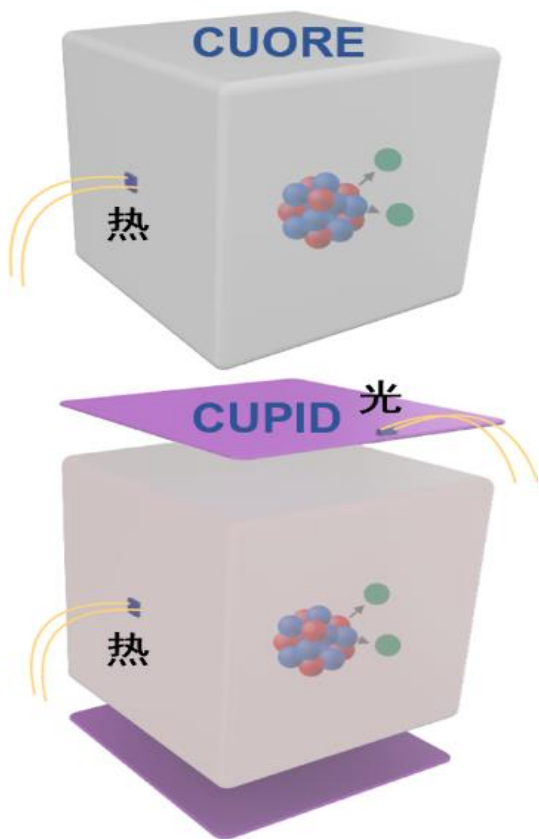
Cryogenics, 2019



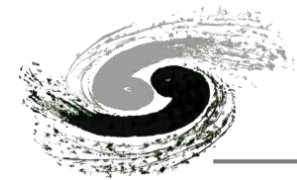
研究背景—低温晶体量热器

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



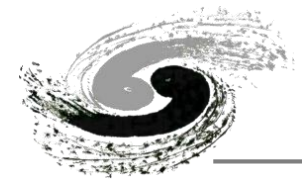
TES探测器

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

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：

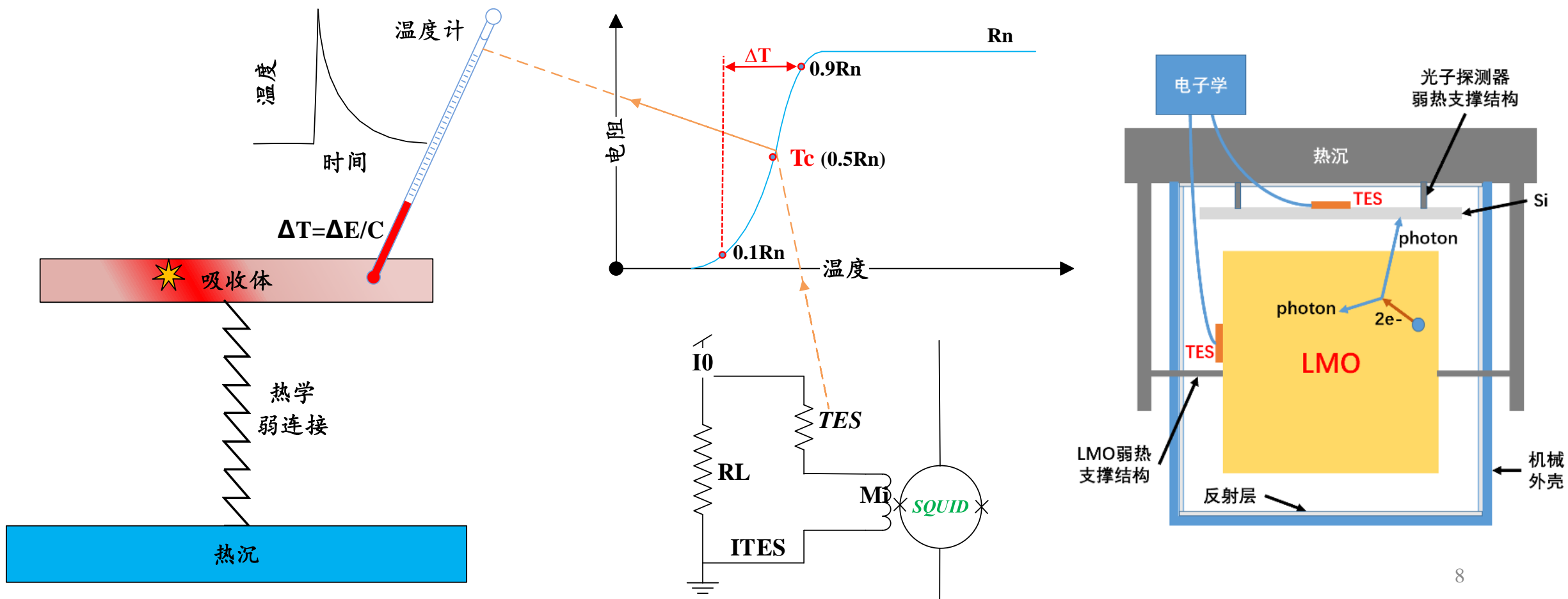
《用于 $0\nu\beta\beta$ 实验的极低超导转变温度TES光热探测系统关键问题研究》

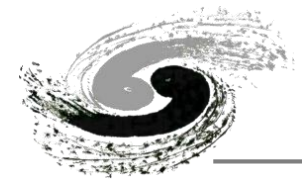


超导转变边沿传感器(TES)

中国科学院高能物理研究所

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





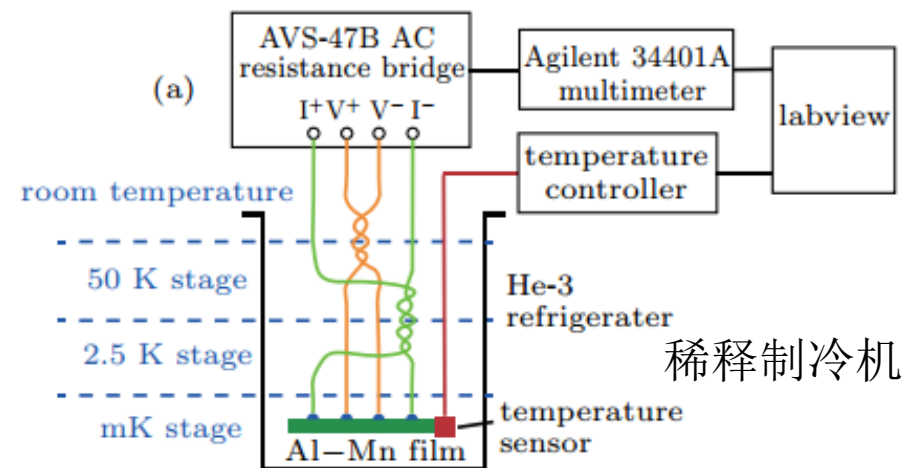
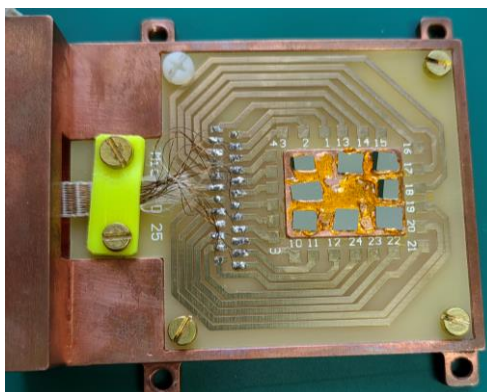
AlMn超导薄膜的制备及表征

中国科学院高能物理研究所

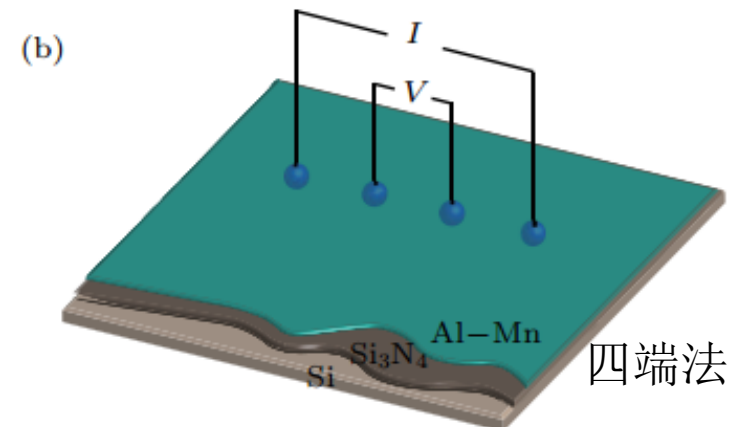
- TES探测器的核心是超导薄膜的制备，AlMn合金薄膜是TES常用的超导薄膜
- 采用磁控溅射制备AlMn薄膜，在稀释制冷机中使用四端法测试薄膜R-T

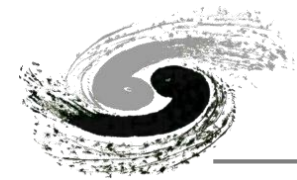


CMS-18



Chin. Phys. B, 2021, Vol. 30(7): 077402

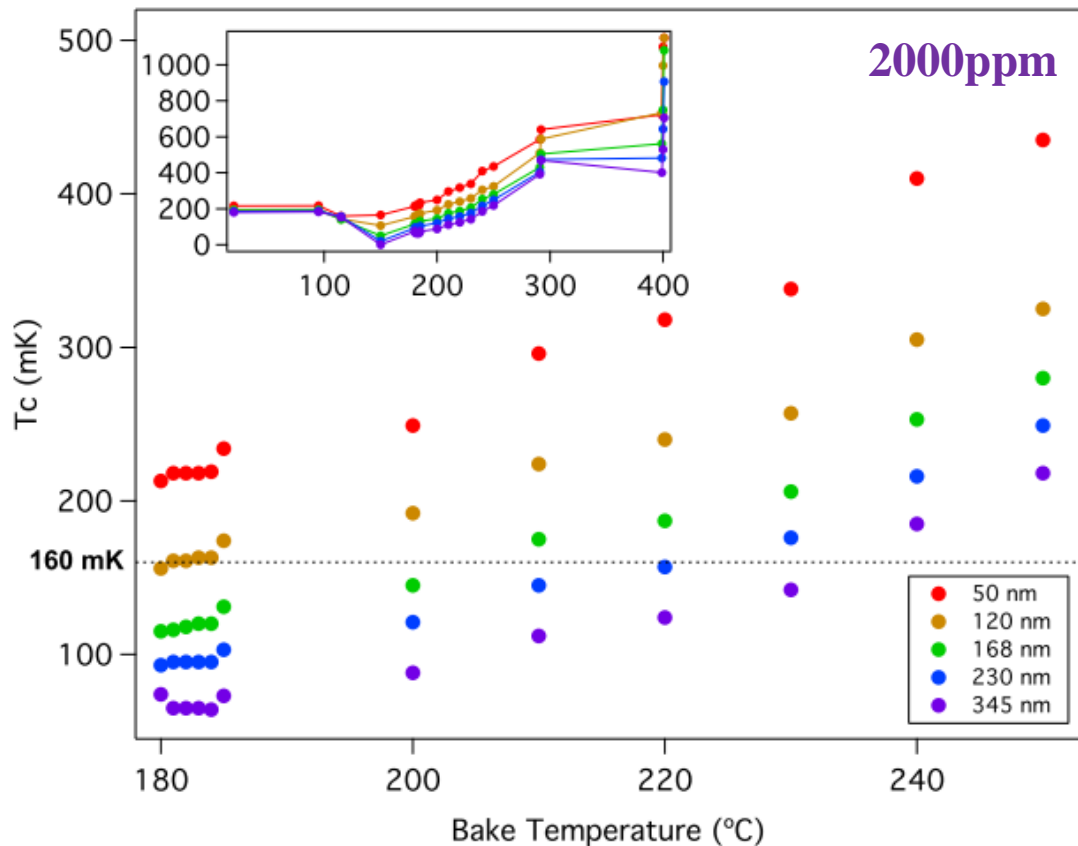




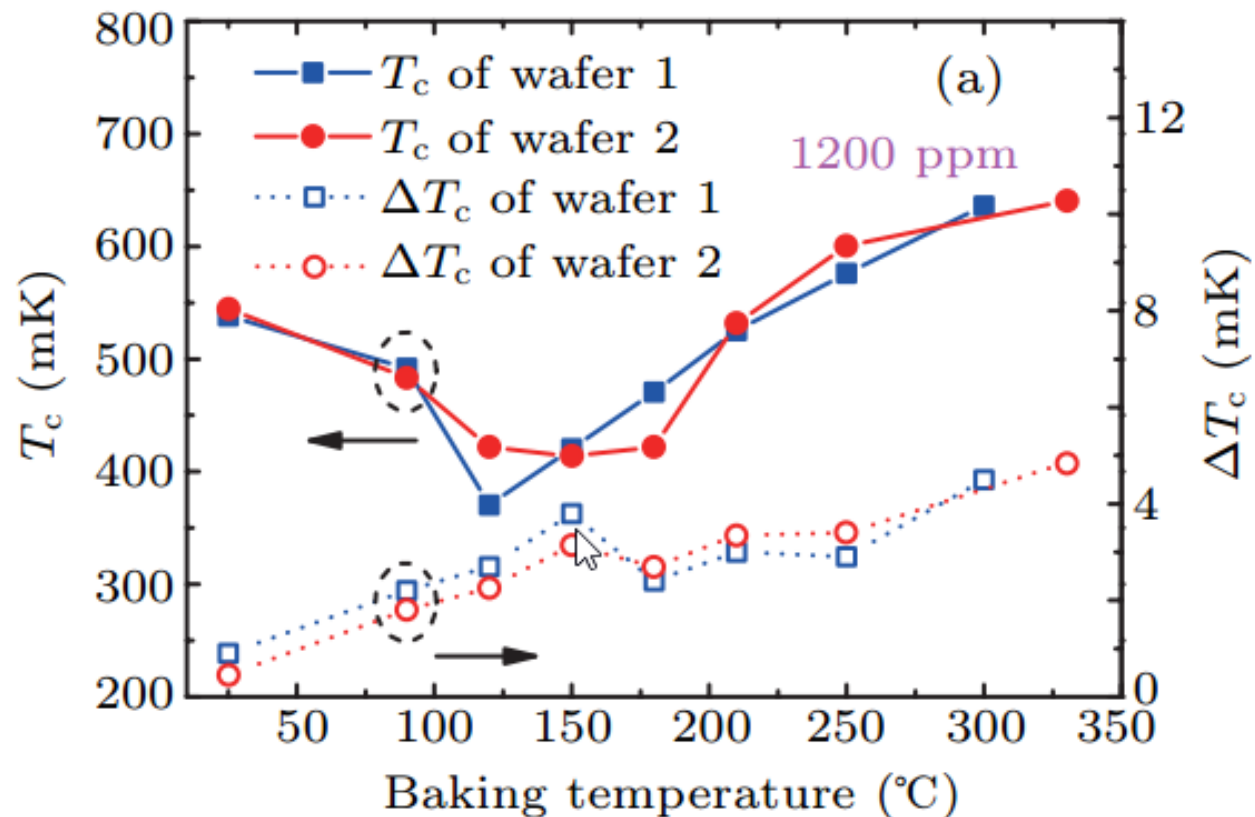
AlMn超导薄膜的制备及表征

中国科学院高能物理研究所

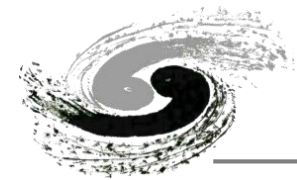
研究AlMn薄膜Mn含量、溅射功率、氦气压强、薄膜厚度、以及烘烤温度等参数对薄膜 T_c 的影响



J. Low. Temp. Phys. 2016, 184:66–73



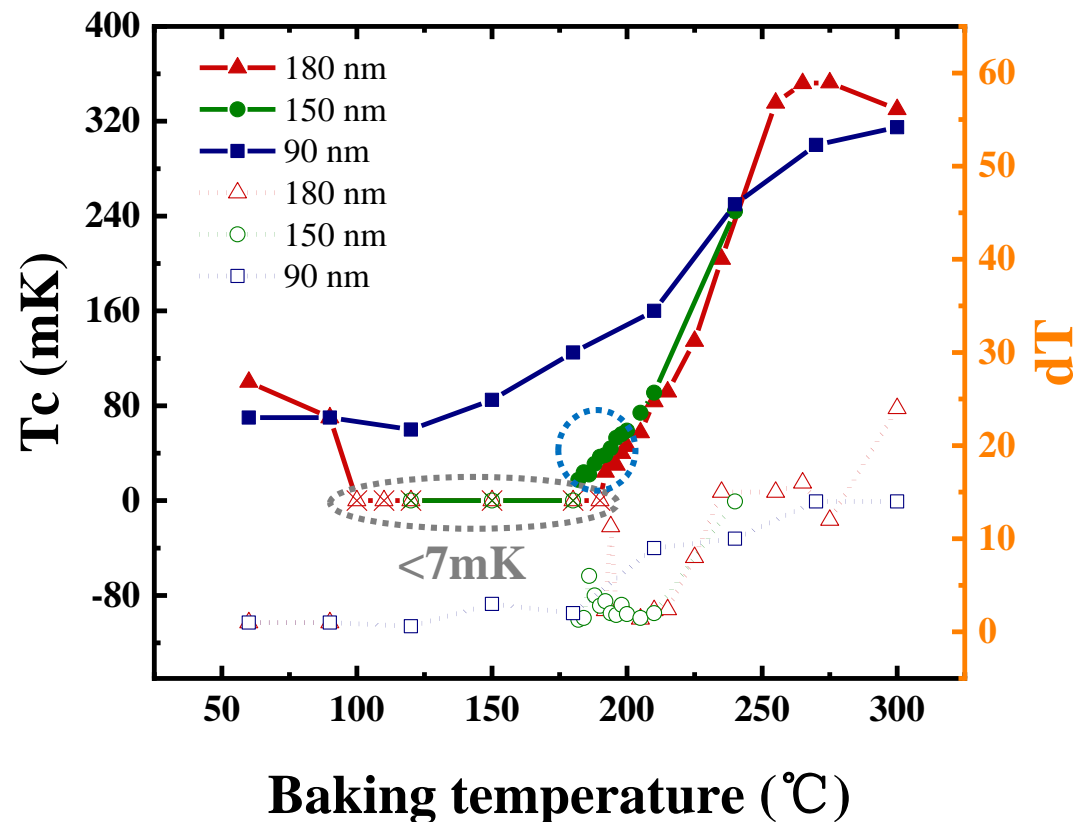
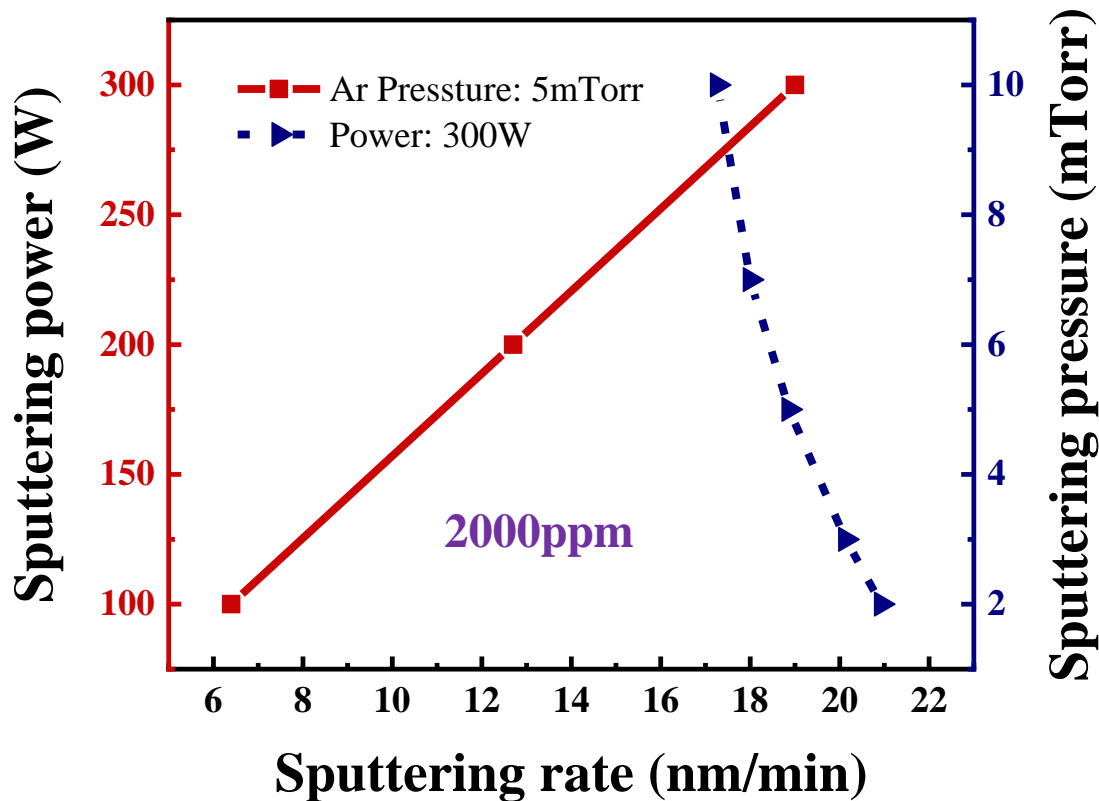
Chin. Phys. B 2021, 30(7): 077402.



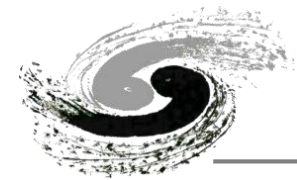
AlMn超导薄膜的制备及表征

中国科学院高能物理研究所

- AlMn薄膜 **溅射功率**、**氩气压强** 对薄膜溅射速率的影响（左）
 - 溅射速率与溅射功率成线性关系、几乎不受Ar压影响
- AlMn薄膜 **厚度**、**烘烤温度** 等参数对薄膜 T_c 和 ΔT 的影响（右）

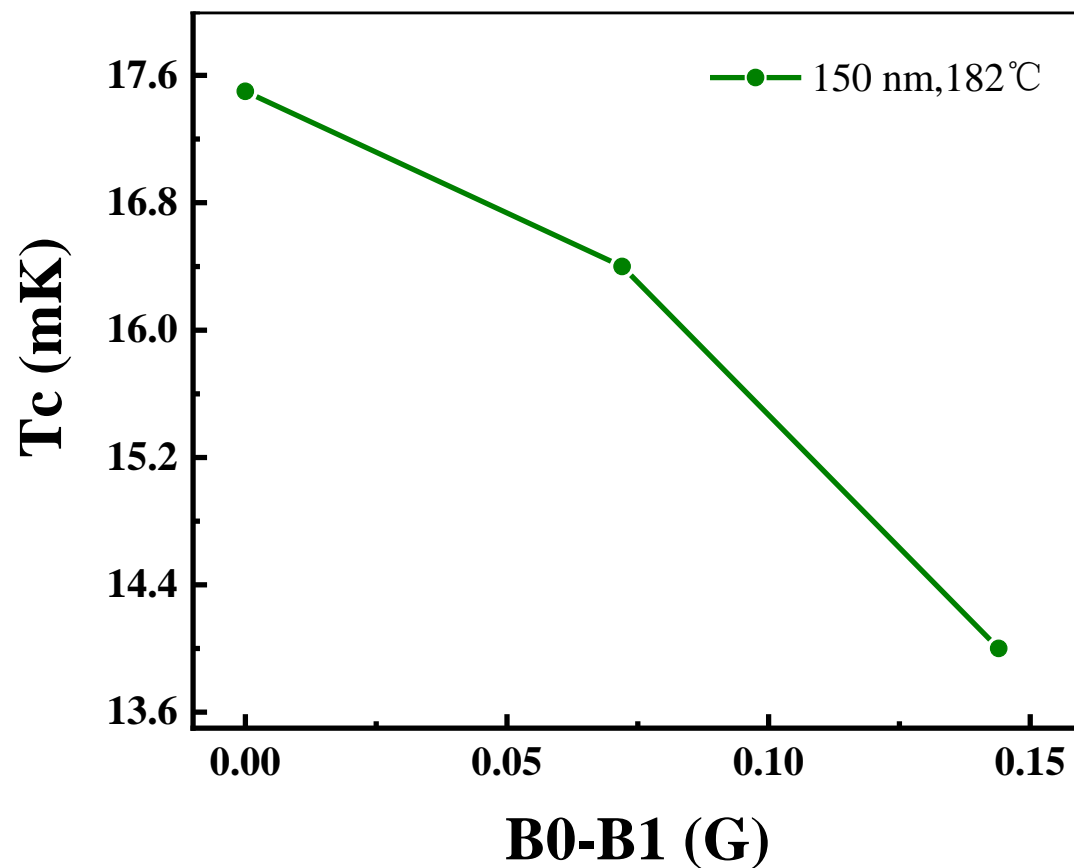
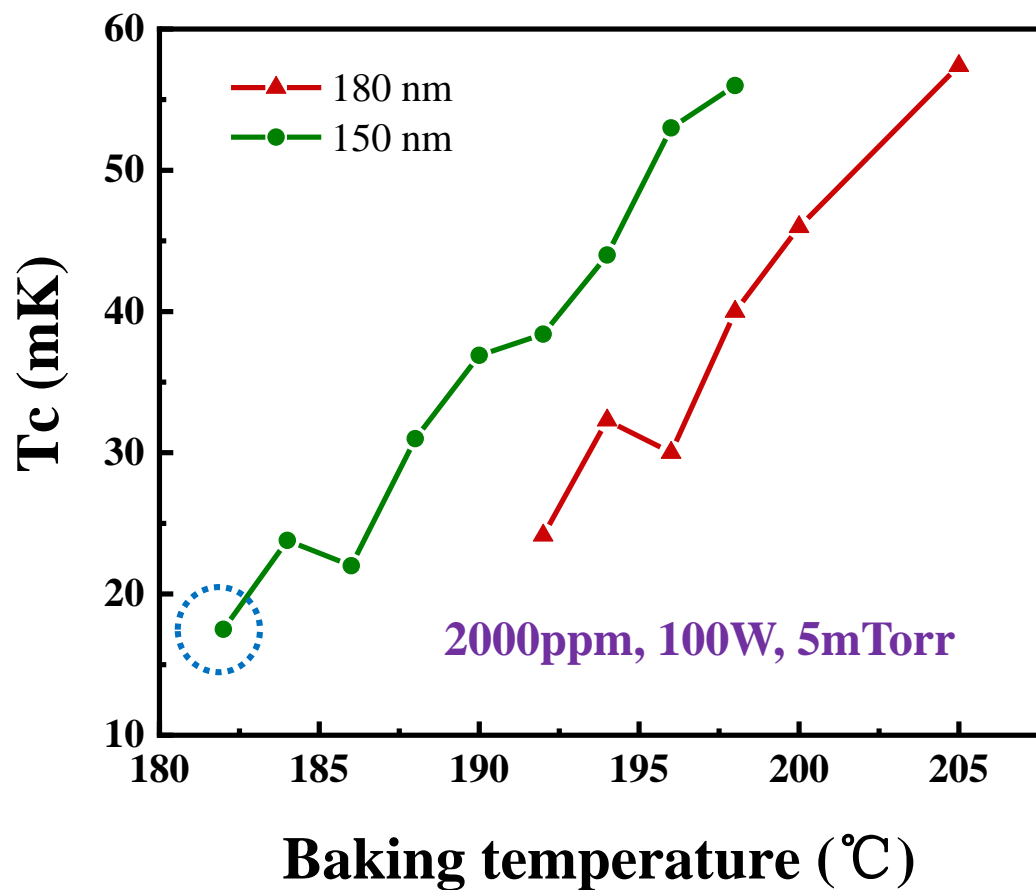


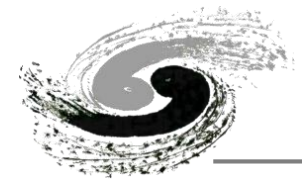
Yifei Zhang, Zhouhui Liu, et al. 2023, (In preparation)



➤ AlMn薄膜厚度、烘烤温度、磁场对薄膜 T_c 和 ΔT 的影响

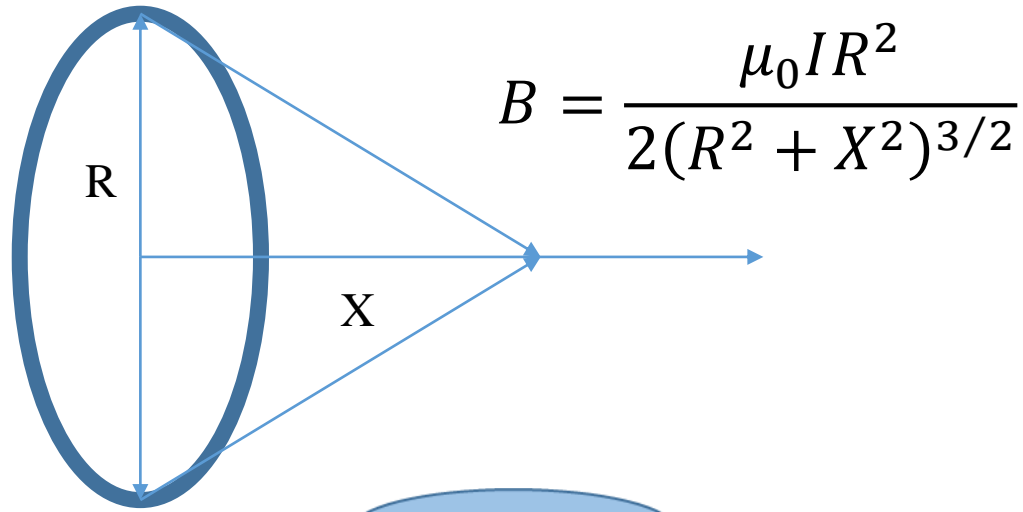
T_c 小于30mK薄膜在升降温测试时会受到磁场和电流影响



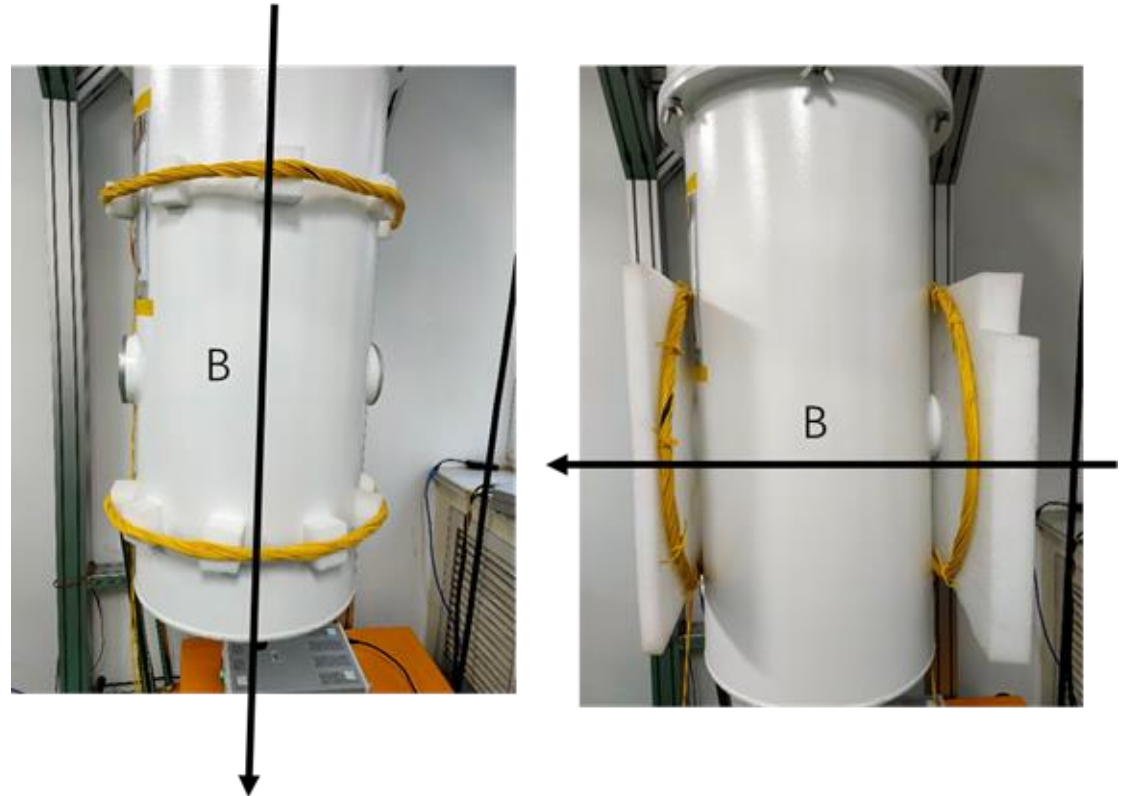
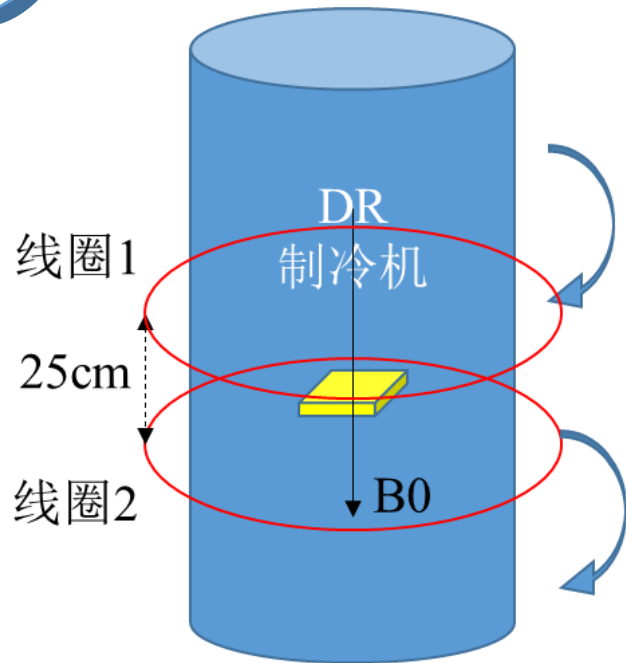


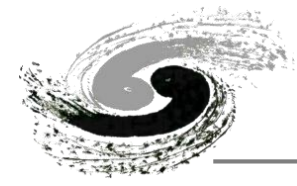
AlMn超导薄膜的制备及表征

中国科学院高能物理研究所



- 垂直方向磁场对AlMn薄膜Tc有明显影响，变化率约为-6.4mK/G
- 水平方向无显著影响（当前磁场强度下）

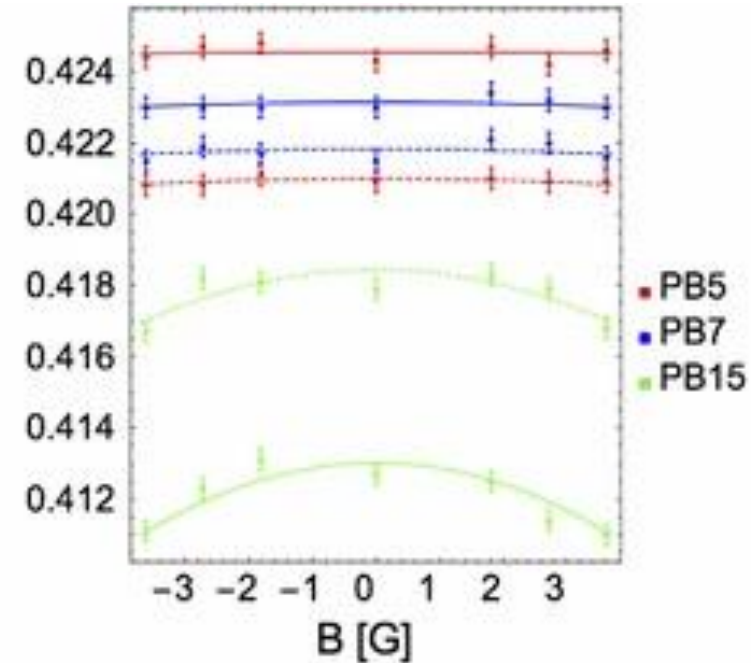
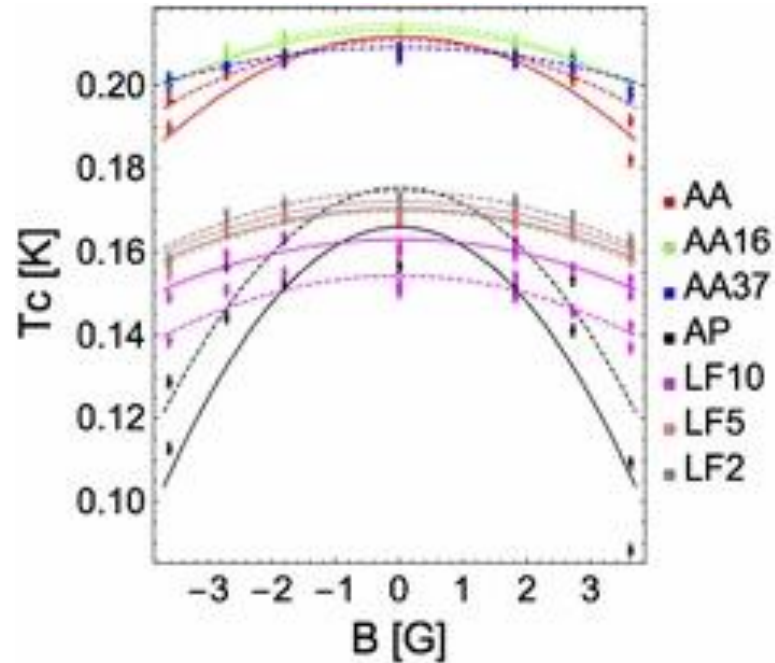
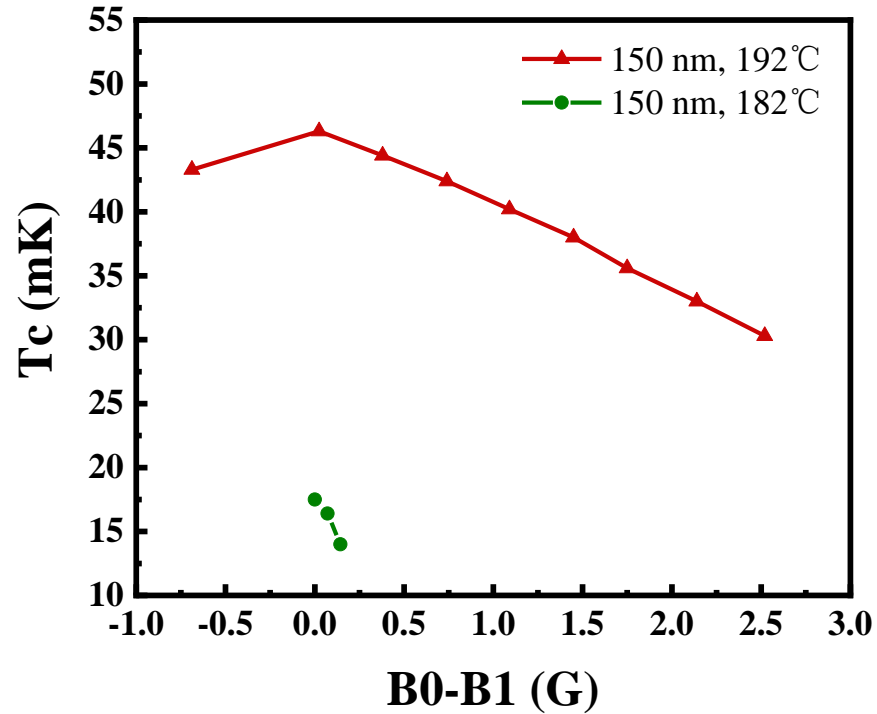




AlMn超导薄膜的制备及表征

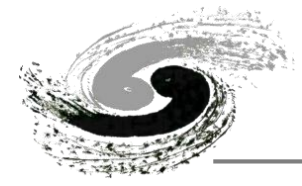
中国科学院高能物理研究所

极低温下垂直方向磁场对AlMn薄膜 T_c 的影响不可忽视，器件设计需加些磁屏蔽



Yifei Zhang, Zhouhui Liu, et al. 2023, (In preparation)

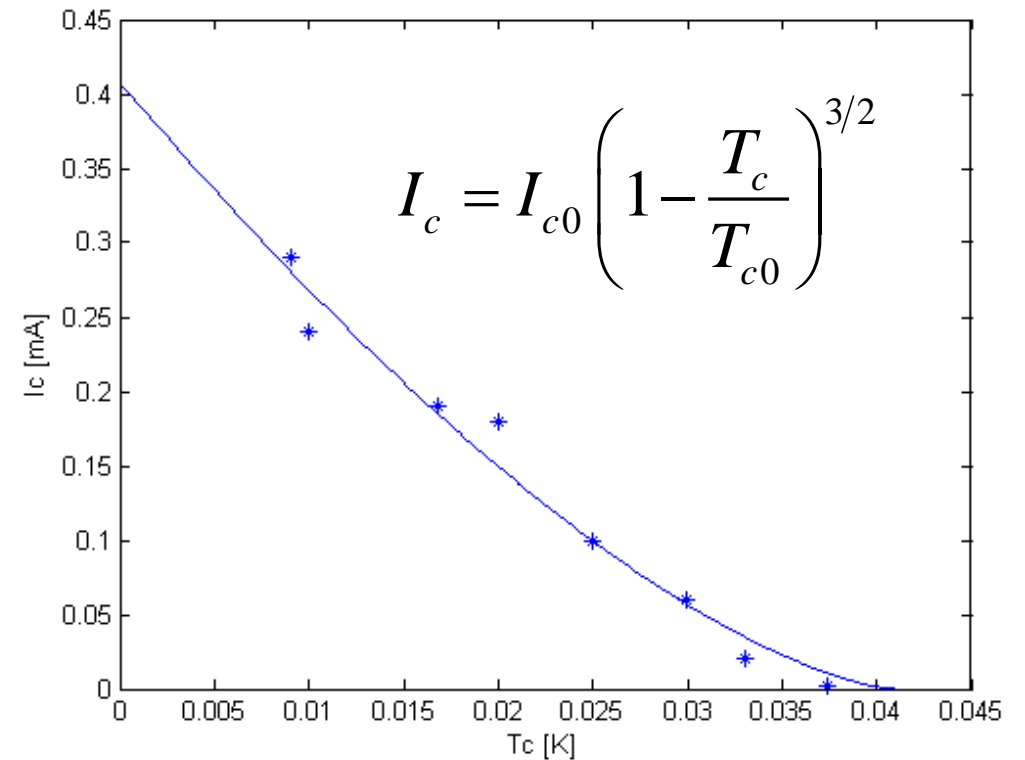
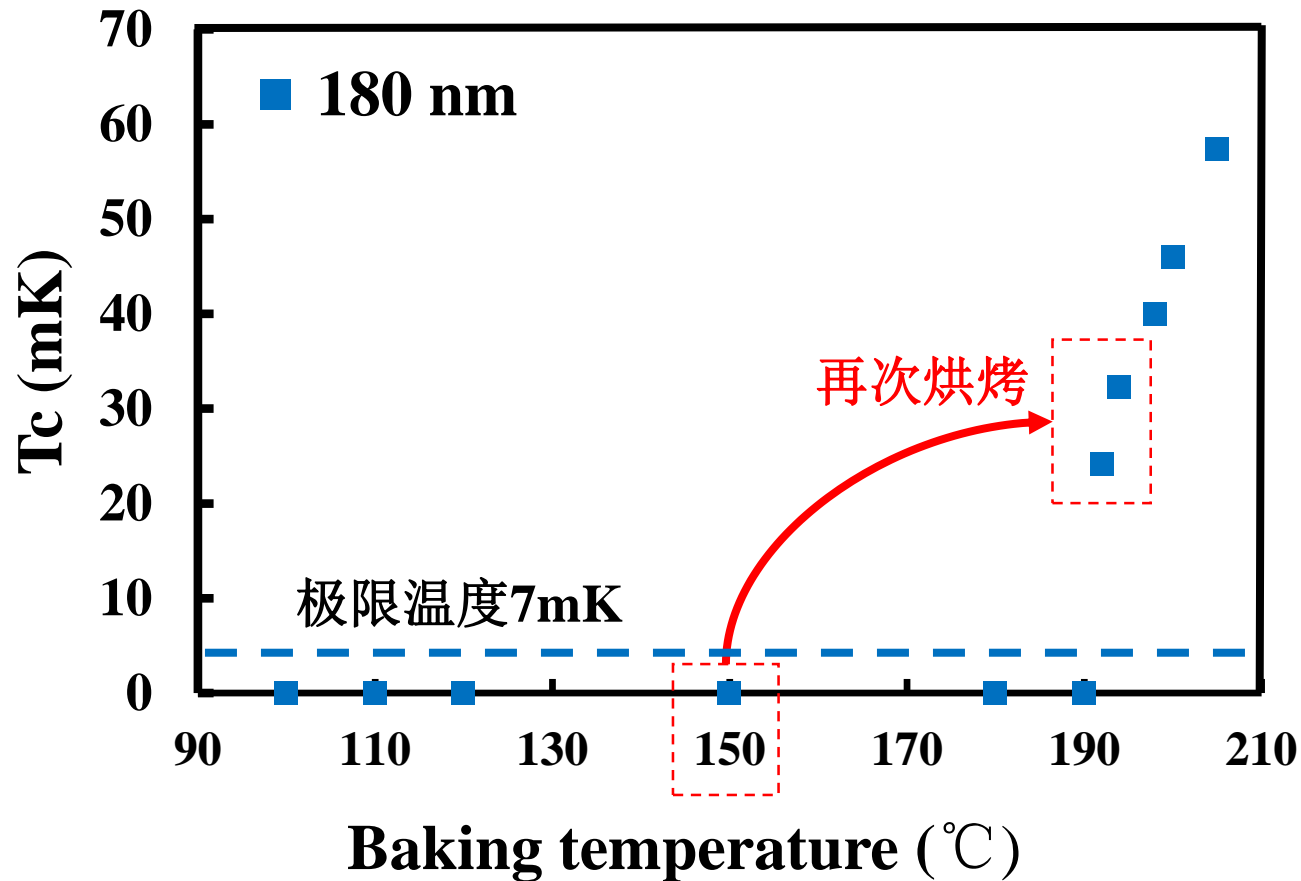
J. Low Temp. Phys. 2018, 193, 288–297.

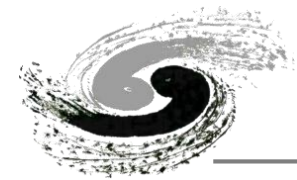


AlMn超导薄膜的制备及表征

中国科学院高能物理研究所

- 此外：T_c温度由最高烘烤温度决定
- 超导临界温度T_c与临界电流I_c符合GL理论





- 研究AlMn薄膜Mn含量、溅射功率、氩气压强、薄膜厚度等参数对薄膜性能的影响
 - 溅射速率与溅射功率成线性关系、几乎不受Ar压影响
 - Mn掺杂越高， T_c 越低；薄膜越厚 T_c 越低
- 通过调节烘烤温度、磁场实现用于 $0\nu\beta\beta$ 实验的10-20mK的AlMn超导薄膜的制备
 - 将开展探测器单元级别的研究
- 探究AlMn薄膜 T_c 与烘烤温度的关系
 - T_c 由最高烘烤温度决定，需进一步探究物理调节机制
- 探究磁场、电流对AlMn薄膜 T_c 的影响
 - 临界电流 I_c 基本满足GL模型，但 T_c 与磁场关系偏离GL模型。需测试更多样品，探究准确关系



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

邮箱：liuzh@ihep.ac.cn

日期：2023年5月22日