

参赛学生姓名： 袁凯睿

中学： 浙江省杭州第二中学

省份： 浙江省

国家/地区： 中国

指导老师姓名： 谢燕武 教授

指导老师单位： 浙江大学 物理学院

论文题目： $(\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})(\text{Al}_{0.65}\text{Ta}_{0.35})\text{O}_3/\text{KTaO}_3$ 界面
超导的发现

论文题目：(La_{0.3}Sr_{0.7})(Al_{0.65}Ta_{0.35})O₃/KTaO₃ 界面超导的发现

作者：袁凯睿（浙江省杭州第二中学）

指导老师：谢燕武 教授（浙江大学物理学院）

论文摘要

最近，人们在两个绝缘氧化物的界面发现了超导电性，这是一类非常奇特的新物理现象，立即吸引了学术界的广泛关注。然而，由于界面超导材料体系非常罕见，界面超导的产生机理尚不清楚，亟待新材料体系的发现。

本论文成功制备了氧化物异质结 (La_{0.3}Sr_{0.7})(Al_{0.65}Ta_{0.35})O₃/KTaO₃ (111)，并且首次在其界面观察到了超导现象，超导转变温度 $T_c=1.04\text{K}$ ，为研究界面超导提供了一种新材料。此外，我们还测量了该超导材料的临界电流、上临界磁场以及霍尔效应等物理参量。实验发现，界面超导区域的载流子浓度非常低，比常规金属低 3 个数量级。上临界磁场 $B_{c2}(T_c)$ 具有很强的方向依赖性，磁场平行和垂直薄膜表面时的 $B_{c2}(0)$ 分别为 7.4T 和 0.5T，前者远高于常规超导体的泡利顺磁极限。通过与其他界面超导材料进行对比，我们还发现超导转变温度可能与超导层厚等因素有关。这些重要的实验结果不仅为研究界面超导提供了新的材料平台，也为理解界面超导的产生机理，实现对超导转变温度的调控等提供了重要的物理信息。

关键词：超导，氧化物，异质结

目录

一、引言	1
二、实验方法	3
2.1 薄膜制备	3
2.2 电极制作	4
2.3 物性测量	4
三、实验结果	6
3.1 LSAT/KTaO ₃ 薄膜样品的制备以及界面超导的发现	6
3.2 临界电流	8
3.3 上临界磁场	9
3.4 霍尔电阻	11
四、总结与展望	13
参考文献	14
致谢	15

2024 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2024丘成桐中学科学奖论文公示

一、引言

1911年，荷兰莱顿大学的昂内斯教授发现，汞单质的电阻在温度降至4.2K时突然消失，这是实验上首次观察到超导现象，昂内斯教授也因此而获得了1913年的诺贝尔物理学奖。除了零电阻之外，超导的另一个基本特性就是完全抗磁性。基于这两个特性，超导材料在能源、交通、电子信息、量子计算等领域具有广泛的应用前景：例如超导电缆可以实现电力的长距离无损耗输送，大量节约能源；由超导线材绕制的超导磁体可以获得更高更稳定的磁场，广泛应用于物理、化学、医学、工程等多个领域，是低温强磁场物性测量仪、核磁共振成像等大型仪器设备的关键部件。此外，超导还可以做成最灵敏的磁信号探测器、超导滤波器等，也是实现量子计算机的核心构件。然而，由于现有超导体的超导转变温度较低，其应用仍受到诸多限制。另一方面，奇特的超导新现象仍在不断出现，本文将要研究的界面超导就是其中的一个例子。

对于异质结界面，最为人熟知的就是半导体异质结：N型和P型半导体的界面可以形成薄薄的一层内电场区域，一定程度上具有单向导电性，即所谓的PN结，这是制造二极管、三极管和场效应管在内的晶体管的基础，而晶体管的发明具有划时代的意义，奠定了现代电子技术的基础。因此，新型界面现象的发现往往能推动科技的革命。

那么，两种不同氧化物绝缘体的界面是否也会出现奇异的新现象或者新物态？围绕这个问题，科学家们已经进行了长期的探索，最近终于取得了一些重大突破。2004年，斯坦福大学的H. Hwang首次在 LaAlO_3 和 SrTiO_3 的界面发现了高迁移率的二维电子气【1】。随后，J. Mannhart和J. Triscone等又在该界面体系中发现了超导，其 T_c 约为0.2K【2】。这是一种崭新的物理效应，立刻吸引了很多科学家的兴趣。2021年，浙江大学物理学院的谢燕武教授和美国阿贡实验室的A. Bhattacharya分别报道了 $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3(110)$ 和 $\text{EuO}/\text{KTaO}_3(111)$ 的界面超导现象【3, 4】，其 T_c 分别为0.9K和2K。但到目前为止，界面超导仅在极少数材料中被发现，非常稀罕。为了进一步研究二维界面超导的普适特征，澄清界面超导的起源及其形成机理，亟待新的界面超导材料的发现。

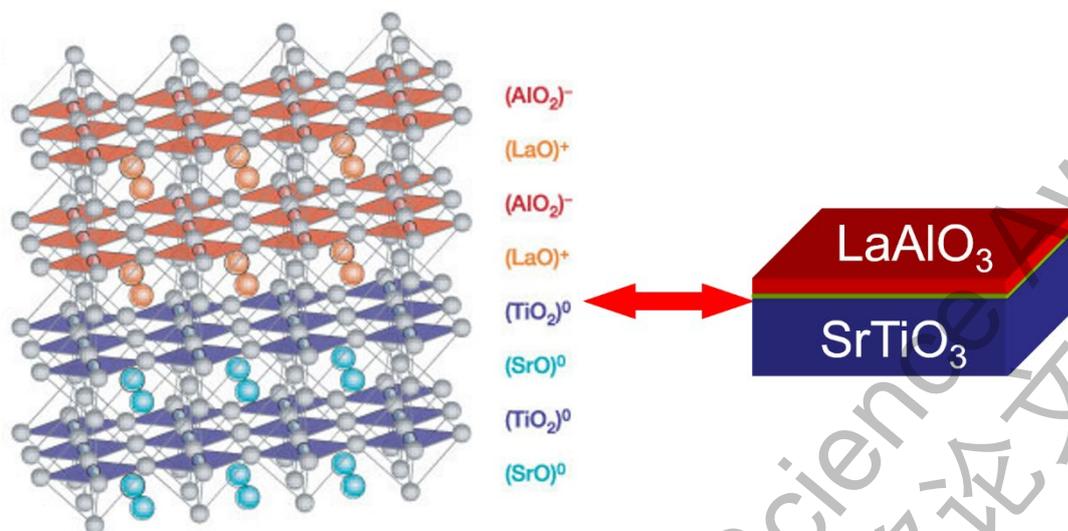


图 1: $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 界面超导示意图

本项目选择了基材 $(\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})(\text{Al}_{0.65}\text{Ta}_{0.35})\text{O}_3$ (简称 LSAT) 作为研究对象, 成功地在 KTaO_3 (111) 基底上生长了 LSAT 薄膜, 并且首次在其异质结界面发现了超导零电阻现象, 超导转变温度 1.04K, 为研究界面超导提供了一种新的材料体系。由于 LSAT 在成分和晶格常数上都与 LaAlO_3 不同, 这一发现有助于研究界面超导的起源, 实现对界面超导的调控。

二、实验方法

2.1 薄膜制备

本项目所用的原材料 LSAT 和 KTaO_3 基片均选用商用成熟产品，并对平整度进行了筛选，要求基片表面的平整度达到原子级别。

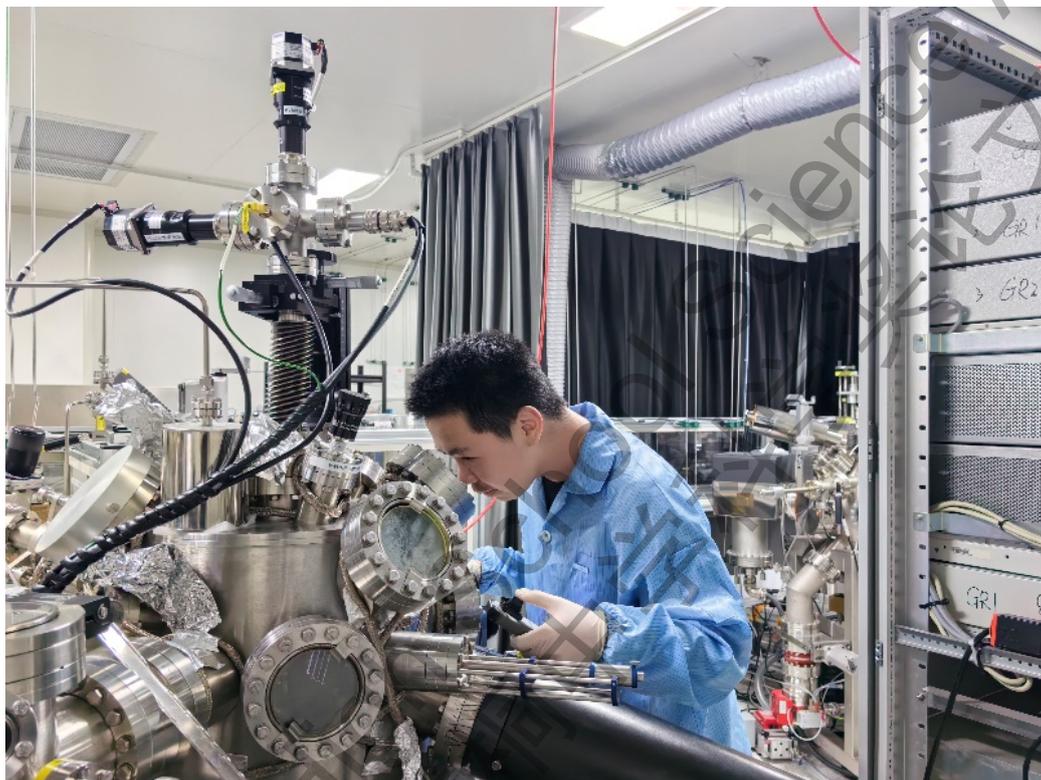


图 2：利用脉冲激光沉积系统制备薄膜样品

在本项目中，我们使用荷兰 TSST 公司生产的脉冲激光沉积系统(简称 PLD)来生长所需要的薄膜材料(如图 2)。该仪器利用一束聚焦的紫外脉冲激光来轰击靶材(本项目中的靶材为 LSAT 基片)，短时间内可以使靶材局部温度达到上万摄氏度，经过灼烧的靶材迅速气化，气化的粒子运动至基片(本项目使用 KTaO_3 基片)沉积而形成薄膜。采用 PLD 生长薄膜材料时，通常需要经历如下 5 个实验步骤：基片准备、传样、预溅射、调节反射式高能电子束衍射(RHEED)光斑和高温生长。

在本项目中，我们尝试制备了多个异质结薄膜样品，本论文将展示两个具有代表性的异质结样品的实验结果，其具体的生长条件将在下一节中介绍。

2.2 电极制作

薄膜材料生长完毕后，我们需要准备电输运性质测量，以便确定是否存在界面超导现象。而要测量电阻等电学性质，我们首先要在薄膜样品上制作电极引线，以便将样品电信号连接至测量仪表。由于薄膜样品的表面是绝缘的，必须将引线直接连接到界面处才能探测是否存在界面超导。因此，界面电阻测量不能采用通常的导电银胶来连接电极引线 with 样品。在本项目中，我们采用超声波铝丝压焊机来制作电极（图 3）。超声波铝丝压焊机可以产生高频机械振动，并通过换能器传递到针尖，当针尖带着引线接触样品表面时，在振动和压力的作用下，待焊样品的表面局部熔化，使得铝丝可以深入薄膜内部而直接与界面形成良好的电接触。图 3(右)给出了电极制作完成后的样品实物图，并标明了各电极引线所对应的测量信号。

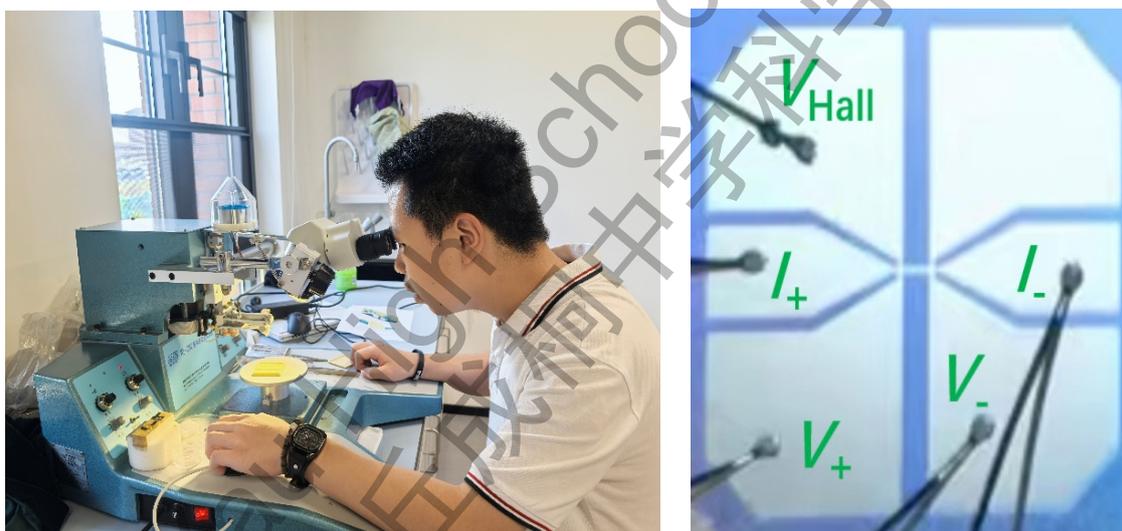


图 3：使用超声波铝丝压焊机制作电极（左）和样品电极实物图（右）

2.3 物性测量

从先前的研究可知， $\text{LaAlO}_3/\text{KTaO}_3(110)$ 的界面超导出现在很低的温度，其 T_c 仅为 0.9K【4】。因此，研究这类材料的界面超导往往需要极低温的测量条件。在本项目中，我们使用了量子设计公司的 PPMS 和牛津仪器公司的氦 3 恒温器等低温系统（图 4），最低温度可达 0.3K。此外，这些低温系统还配备了 9T 的超导磁体，可以用于上临界磁场等性质的测量。锁相放大器提供输运测量所需的恒定电流并用于微弱电信号的检测。

在本项目中，我们采用标准的四线法来测电阻(如图 3(右)所示)，即在样品的 I_+ 和 I_- 两电极之间施加一个恒定电流，测量样品上沿电流方向上的两个电极 V_+ 和 V_- 之间的电压差，然后通过欧姆定律即可计算得到样品的电阻值。该方法可以有效地消除导线和接触电阻等外部因素对测量电阻的影响，是一种常规的电阻测量方法。此外，通过测量电极 V_{Hall} 和 V_+ 之间的电压降，我们还可以测量外加磁场下产生的霍尔电压，从而获取载流子的相关信息。关于霍尔电阻的测量，我们将在 3.4 中进行详细介绍。

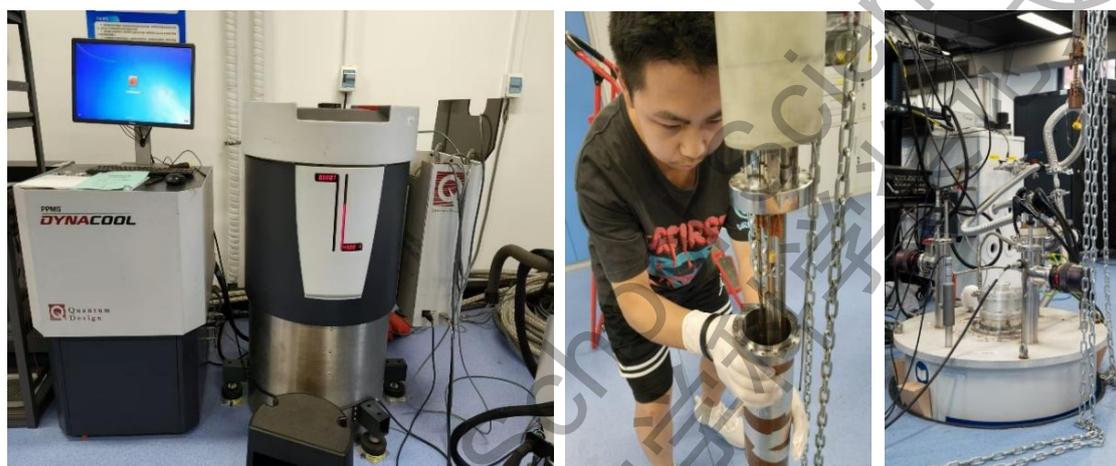


图 4：低温物性测量系统以及实验测量

三、实验结果

3.1 LSAT/KTaO₃薄膜样品的制备以及界面超导的发现

通过上节描述的 PLD 薄膜生长系统，并采用表 1 的实验生长条件，我们制备了第一批次的 LSAT/KTaO₃ (111) 薄膜样品 (图 5 左)，并测量了其电阻随温度的变化 (图 5 右)。

表 1: 第一批次 LSAT/KTaO₃ 薄膜样品生长条件

实验参量	数值
衬底温度	800°C
激光频率	2 赫兹
激光能量密度	1.5 J/cm ²
脉冲个数	250
氧压	10 ⁻⁶ 毫巴
水蒸气压	10 ⁻⁷ 毫巴
生长厚度	4 纳米
降温速率	50°C/分钟

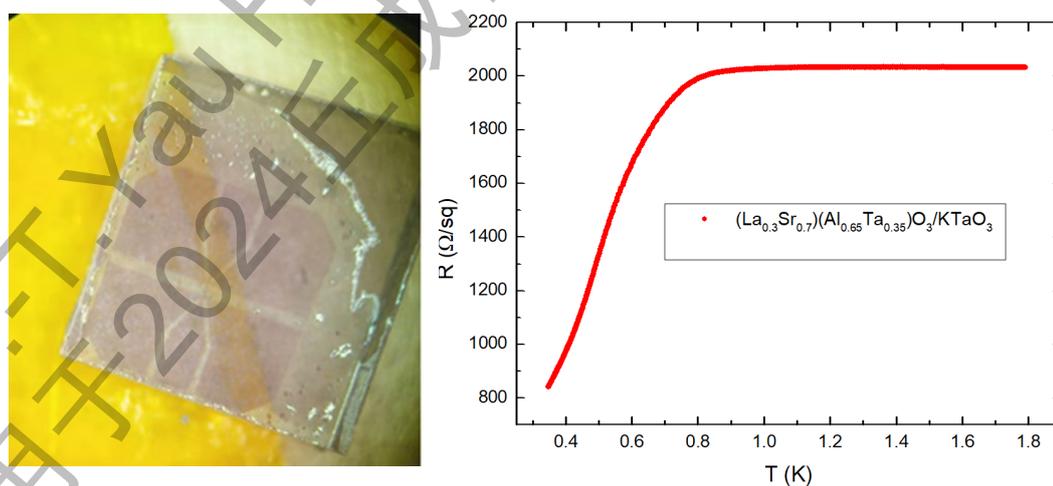


图 5: 第一批次 LSAT/KTaO₃ 薄膜样品实物图 (左) 及其低温电阻曲线 (右)

图 5(右) 展示了第一批次 LSAT/KTaO₃ (111) 样品的电阻随温度的变化。可以看出，当温度降低至 0.8K 附近时，材料的电阻突然开始减少。随着温度的进一

步减少，电阻继续下降，但直至系统最低温 0.3K，其面电阻仍然高达 800Ω ，没有出现超导零电阻。通过升降温反复测试，该样品的电阻行为可以重复，确认了该性质是该样品本征的。这些实验表明，虽然第一批次的 LSAT/KTaO₃ 样品出现了超导迹象，但并没有观察到超导应该出现的零电阻。

通过分析，我们认为该材料零电阻现象的缺失可能源自薄膜样品的质量、膜厚和电极等因素。因此，我们又改变样品生长条件，重新尝试生长了第二批样品，将膜的生长厚度从 4nm 提高到了 10nm，具体的生长条件如表 2 所示。

表 2 第二批次 LSAT/KTaO₃ 薄膜样品生长条件

实验参量	数值
衬底温度	300℃
激光频率	2 赫兹
激光能量密度	0.9 J/cm ²
脉冲个数	800
氧压	10 ⁻⁵ 毫巴
水蒸气压	10 ⁻⁷ 毫巴
生长厚度	10 纳米
降温速率	50℃/分钟

图 6 展示了第二批次 LSAT/KTaO₃ (111) 样品的电阻随温度的变化曲线。不难看出，在高温区间该样品的电阻随温度下降而(接近)线性减少，并在 20K 以下趋于平缓，电阻也从室温的 5k Ω 左右下降到约 0.5k Ω 。当温度降至 1.2K 以下时，电阻开始快速降低，然后在 0.9K 左右消失。由于 KTaO₃ 和 LSAT 都是宽禁带绝缘体，因此该零电阻现象应该源自两个绝缘氧化物的界面。这一实验发现表明，LSAT/KTaO₃ (111) 是一个新型异质界面超导材料。根据通常的做法，本文取电阻下降 50% 的中点为超导转变温度 T_c ，其值为 $T_c=1.04K$ 。

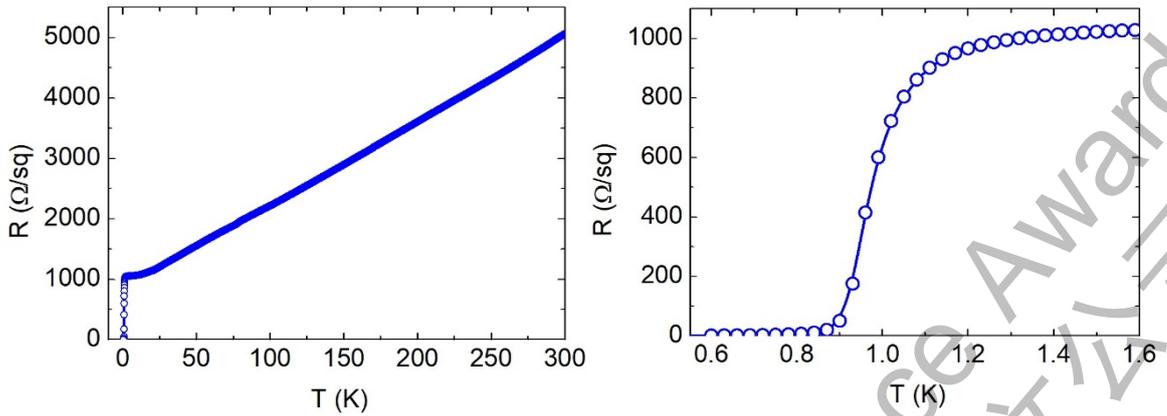


图 6: 第二批次 LSAT/KTaO₃ 薄膜样品的电阻随温的变化曲线。

左图: 全温区电阻; 右图: 低温电阻。

为了进一步理解界面超导的性质, 我们还对第二批次 LSAT/KTaO₃ (111) 薄膜样品做了进一步的物性测量, 下面将分别进行阐述。

3.2 临界电流

通常情况下, 超导转变温度会随着电流的增大而逐渐被抑制掉, 即超导转变存在一个临界电流。另外, 当电流流经样品时, 由于样品的阻值较大, 其产生的热效应也会使得样品局部温度升高, 即温度计读取的数值可能低于样品的实际温度, 导致实测超导转变温度偏低。这两个效应对超导转变温度的影响是同向的。因此, 我们测量超导转变时需要尽可能选用小的电流档位, 减少热效应的影响。

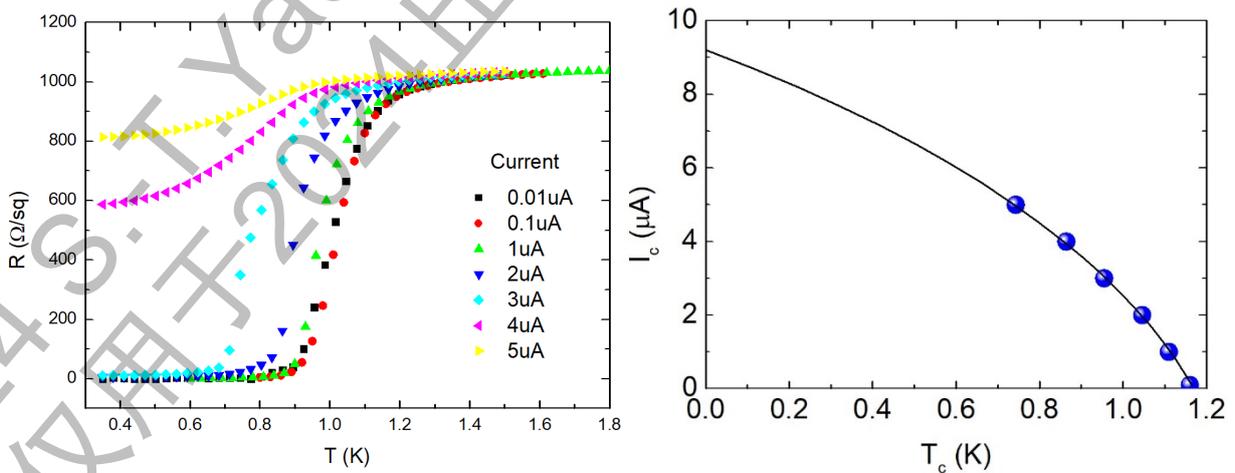


图 7: 左图: 不同激励电流下的低温电阻 $R(T)$; 右图: 临界电流与 T_c 的变化关系, 此处 T_c 取值为电阻下降 10% 时的温度值。

至于热效应的影响，我们可以做个粗略估算：以 1 微安培 (10^{-6}A) 的电流为例，样品在超导转变前阻值是 5000 欧左右，根据 $P = I^2R$ ，则样品端的加热功率约为 5 纳瓦，而通常制冷机的制冷功率在微瓦量级，远远大于电流流经样品产生的热量。因此，如果电流不是很大，其产生的热效应通常可以忽略不计。

为了研究界面超导的临界电流，我们测量了第二批次 LSAT/KTaO₃ (111) 样品在不同激励电流下的低温电阻 $R(T)$ (图 7 左)。结果表明，当电流小于 $0.1\mu\text{A}$ 时， T_c 几乎没有变化。随着电流的进一步增加，超导转变向低温移动并且逐渐被抑制。当电流增加到 $4\mu\text{A}$ 时，超导零电阻已消失，但电阻仍有明显下降。为了更好地获取临界电流值，图 7 右图给出了不同激励电流下的超导转变温度 T_c ，并做了一个简单的延伸。需要指出的是，考虑到激励电流高于 $4\mu\text{A}$ 时，超导转变只部分出现，这里 T_c 取正常态电阻值下降 10% 的温度值。从图中可以看到，界面超导在 $10\mu\text{A}$ 以下被完全抑制掉，其临界电流值应该少于 $10\mu\text{A}$ ，远低于许多常规超导体的临界电流值。该结果还表明，为了精准测定超导转变温度，我们应该选择 $1\mu\text{A}$ 以下的电流档位来进行电阻测量。

3.3 上临界磁场

除了电流能够抑制超导，外加磁场同样能够抑制超导。上临界磁场 $B_{c2}(0)$ 是的一个重要超导参量，其值的大小对理解超导配对机理非常重要。

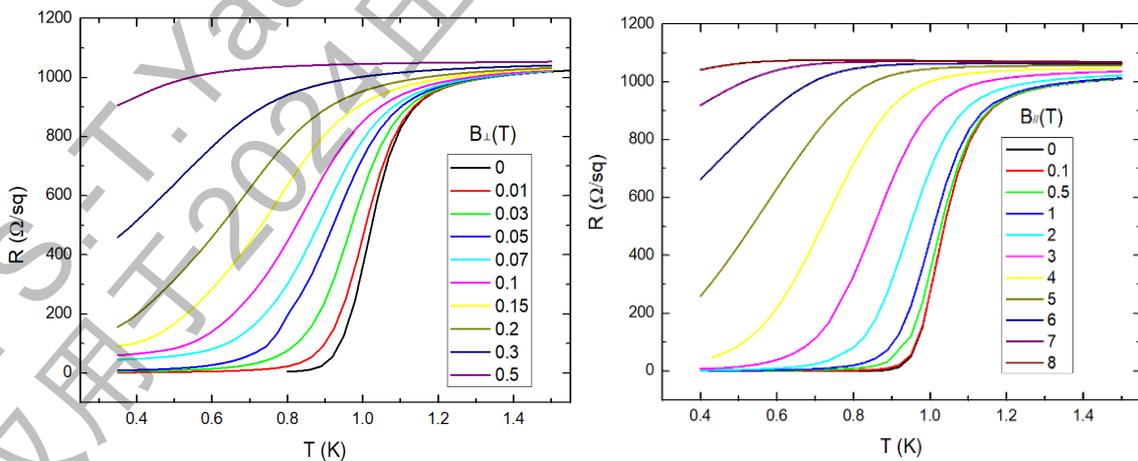


图 8：不同磁场下的低温电阻 $R(T)$ 。左图：磁场垂直薄膜；右图：磁场平行薄膜。

图 8 给出了第二批次 LSAT/KTaO₃ (111) 薄膜样品在不同磁场下的低温电阻 R(T)，其中左图对应于磁场垂直薄膜，而右图对应于磁场平行薄膜。实验结果表明，随着磁场的增加，超导转变逐渐向低温移动，其转变宽度逐渐变宽，这是二维超导的一个典型特征。另一方面，当改变磁场方向时，超导被抑制的上临界磁场存在显著差异。在我们的测量温度范围内 ($T > 0.3\text{K}$)，当磁场垂直薄膜时，超导在 0.5T 时已经基本消失；而当磁场平行于薄膜样品表面时，超导转变在 6T 还没有被完全抑制掉。

为了更清晰地对比和探讨两个磁场方向对超导的抑制行为，图 9 给出了 LSAT/KTaO₃ (111) 界面超导不同磁场取向的上临界磁场随 T_c 的变化，其中 T_c 对应于电阻下降 50% 的温度。从图中可以看出，该样品的上临界磁场 $B_{c2}(T_c)$ 表现出显著的各向异性。当磁场平行于薄膜表面时，其上临界磁场是垂直于样品表面的 10 倍以上，高达 7.4T (见后面的分析)，远大于弱耦合 BCS 超导体的泡利顺磁极限 $B_{c2}^P = 1.85T_c = 1.92\text{T}$ (如图 9 中虚线所示)。上临界磁场的这种独特性质进一步表明了该超导的二维属性，但其形成机制还有待进一步研究。

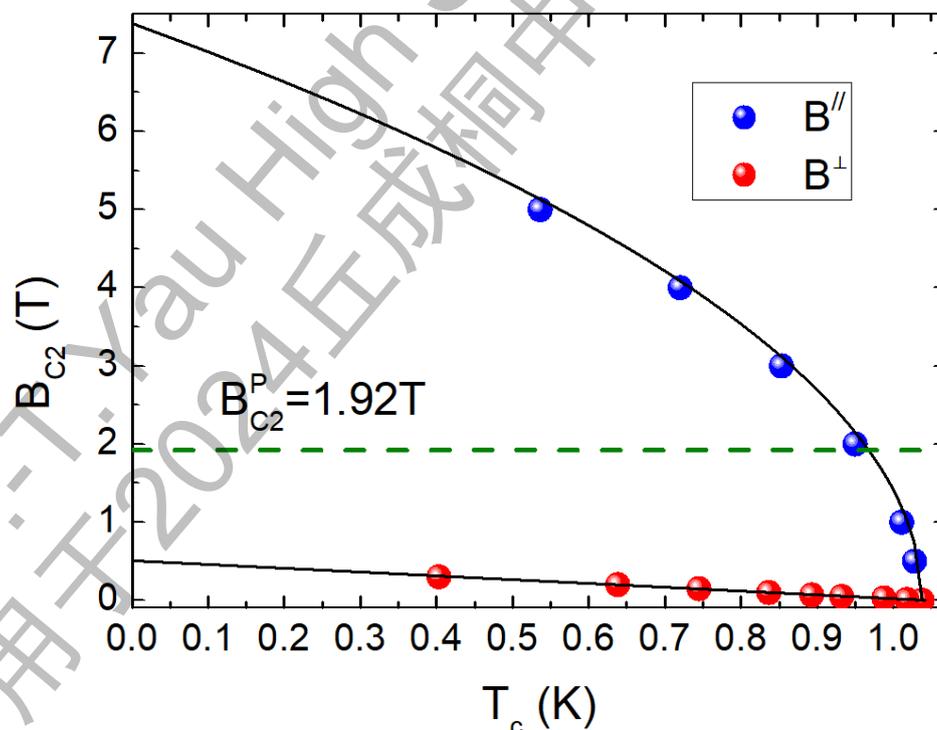


图 9: 不同磁场方向的上临界磁场 B_{c2} 与超导转变温度 T_c 的演化关系。

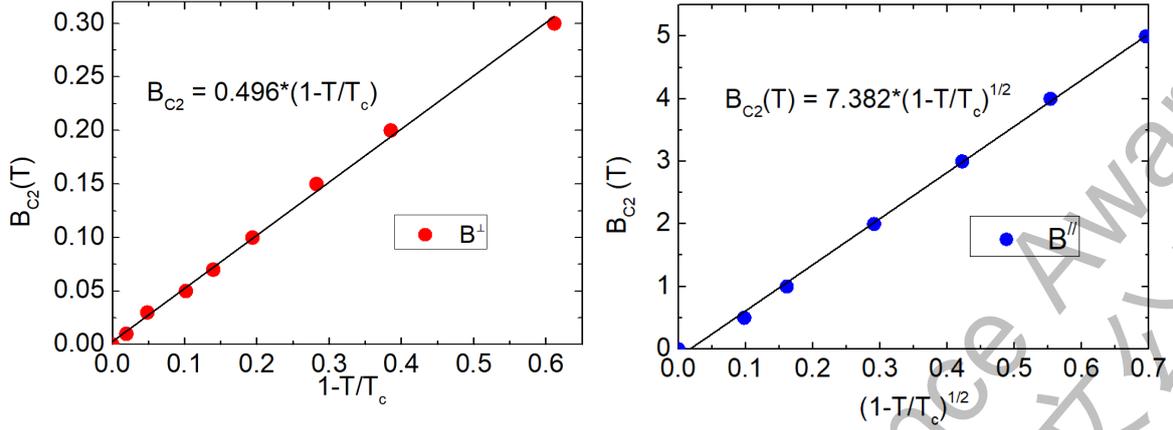


图 10: 上临界磁场的拟合曲线。

左图: 磁场垂直薄膜; 右图: 磁场平行薄膜。

基于上临界磁场的测量结果, 我们还可以做进一步的分析, 计算超导关联长度 ξ_{GL} 和超导层厚度 d_{SC} 。根据二维超导的金兹堡-朗道理论, 关联长度 ξ_{GL} 和超导层厚 d_{SC} 与上临界磁场 $B_{c2}(T)$ 遵循如下关系【5, 6】:

$$B_{c2}^{\perp}(T) = \frac{\Phi_0}{2\pi\xi_{GL}^2(0)} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) \quad (1)$$

$$B_{c2}^{\parallel}(T) = \frac{\Phi_0\sqrt{12}}{2\pi\xi_{GL}(0)d_{SC}} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1/2} \quad (2)$$

其中 $\Phi_0 = 2.068 \times 10^{-15}$ 韦伯为磁通量量子, 是一个常数。

基于方程 (1) 和方程 (2), 图 10 给出了磁场垂直 (左图) 和平行 (右图) 薄膜表面的上临界磁场的拟合结果。可以看到, 金兹堡-朗道理论可以很好地描述不同方向的上临界磁场 $B_{c2}^{\perp}(T)$ 和 $B_{c2}^{\parallel}(T)$ 。通过线性拟合, 我们可以得到两个磁场方向的斜率, 分别对应 $T = 0$ 的上临界磁场 $B_{c2}^{\perp}(0) = 0.5T$ 和 $B_{c2}^{\parallel}(0) = 7.4T$ 。由方程 (1) 和方程 (2) 还可以计算得到关联长度 $\xi_{GL} = 25.7nm$ 和超导层厚度 $d_{SC} = 6.01nm$, 前者远大于后者, 进一步表明 LSAT/KTaO₃ (111) 异质结界面超导具有二维特征。

3.4 霍尔电阻

霍尔效应是测量材料载流子浓度的一个重要方法。当导体置于磁场内, 流经导体的载流子会受到洛伦兹力而发生偏转, 从而在与电流垂直的方向产生一横向电压, 此即霍尔电压。

通过测量恒定电流下的霍尔电压随磁场的变化，我们可以得到霍尔系数 R_H ：

$$R_H = \frac{V_{xy}}{I \times B} = \frac{R_{xy}}{B} \quad (3)$$

其中 V_{xy} 是霍尔电压、 R_{xy} 为霍尔电阻， B 为磁感应强度。在本实验中，对待测样品施加电流和磁场后，通过测量通道两侧电极 $V+$ 和 V_{Hall} 之间的电势差(如图 3 样品电极所示)，就可得到霍尔电压。

图 11 展示了温度为 2K 和 0.35K 的霍尔电阻随磁场的变化 $R_{xy}(B)$ 。从图可以看出，不同温度下的霍尔电阻变化很小，表明载流子浓度对温度的依赖性不强。实验还发现，霍尔电阻随磁场线性变化（注：0.35K 位于超导态，当外加磁场抑制超导后，正常态的霍尔电阻 $R_{xy}(B)$ 呈现出线性变化），其斜率为负值，表明载流子类型为电子型。通过线性拟合，我们得到霍尔系数 $R_H = -7.785 \text{ m}^2/\text{C}$ 。然后，通过公式 $n = \frac{1}{R_H \times e}$ （注： e 为电子的电荷量），可得到载流子浓度 $n = 8.028 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。需要特别指出的是，对于普通金属材料，其载流子浓度通常在 10^{23} cm^{-3} 量级，换算到纳米级的界面薄层，载流子浓度高达 10^{16} cm^{-2} ，比我们所得到的 LSAT/KTaO₃ (111) 异质界面的载流子浓度高 3 个量级，说明该界面超导出现在极低载流子浓度的体系中。如何在这种低载流子异质结界面形成超导？这仍然是一个未解之谜，还有待进一步的研究。

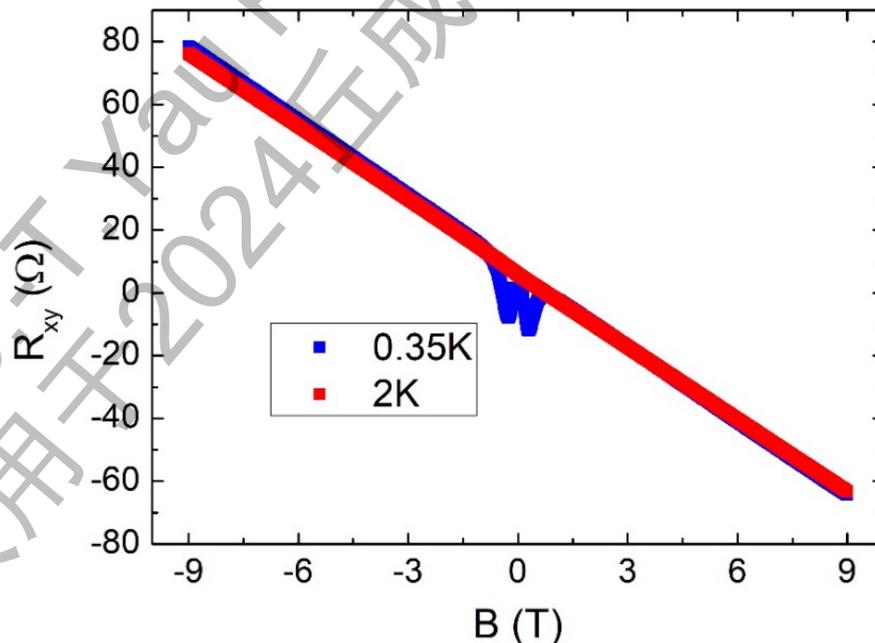


图 11：不同温度下霍尔电阻随磁场的变化。

四、总结与展望

利用脉冲激光沉积系统，本文成功制备了氧化物异质 ($\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})(\text{Al}_{0.65}\text{Ta}_{0.35})\text{O}_3/\text{KTaO}_3(111)$ ，首次在这两个绝缘氧化物的界面发现了超导电性，并系统地研究了其超导性质，为研究界面超导的起源及其奇异性质提供了新的材料体系，具有重要科学意义。

表 3 不同界面超导材料的参数对比

材料名称	载流子浓度 ($\times 10^{13} \text{cm}^{-2}$)	T_c (K)	$B_{c2}^{\perp}(0)$	$B_{c2}^{\parallel}(0)$	超导层厚 (nm)	关联长度 (nm)
LAST/KTO(111)	~8	1.04	0.5	7.4	~6	~25
LAO/STO(100) [2]	~4	0.3	0.065	-	~10	~70
EuO/KTO(111) [3]	~10	2.0	1.8	>18	~5	~13
LAO/KTO(110) [4]	~7	0.9	0.44	5.24	~8	~30

为进一步研究不同参量对界面超导性质的影响，表 3 列出了本项目所获得的 LAST/ $\text{KTaO}_3(111)$ 界面超导的相关参数，并与文献上已知的其他界面超导材料进行了对比。从表中可以发现，这些界面超导材料都具有很低的载流子浓度和很强的超导各向异性，平行于薄膜的上临界磁场均远大于垂直于薄膜的情况，并且前者远大于常规超导体的泡利顺磁极限。怎样理解极低载流子体系中的超导电性及其上临界性磁场仍是一个重要的科学问题，需要进一步的理论和实验的研究。此外，我们还发现超导转变温度 T_c 与超导层厚和关联长度 ξ 存在某种对应关系。从现有数据来看，超导层厚和关联长度越小，超导转变温度看似越高。这些实验结果为进一步探索和调控界面超导提供了重要的实验证据，有助于我们进一步理解界面超导的形成机制。

在下一步研究中，我们还可以开展更多的实验测量来研究 LAST/ $\text{KTaO}_3(111)$ 界面超导的形成机理及相关性质。例如，通过偏压的方法来调节载流子浓度，详细研究载流子浓度和薄膜厚度对超导 T_c 的影响，以及自旋-轨道耦合强度与上临界磁场之间的关系。

参考文献

- 【1】 A. Ohtomo and H. Y. Hwang, *Nature (London)* **427**, 423 (2004).
- 【2】 N. Reyren, S. Thiel, A. D. Caviglia, L. F. Kourkoutis, G. Hammerl, C. Richter, C.W. Schneider, T. Kopp, A. S. Rüetschi, D. Jaccard, M. Gabay, D. A. Muller, J.M. Triscone, and J. Mannhart, *Science* **317**, 1196 (2007).
- 【3】 C. Liu, X. Yan, D. Jin, Y. Ma, H. Hsiao, Y. Lin, T. M. Bretz-Sullivan, X. Zhou, J. Pearson, B. Fisher, J. S. Jiang, W. Han, J. M. Zuo, J. Wen, D. D. Fong, J. Sun, H. Zhou, A. Bhattacharya, *Science* **371**, 716 (2021).
- 【4】 Z. Chen, Z. Liu, Y. Sun, X. Chen, Y. Liu, H. Zhang, H. Li, M. Zhang, S. Hong, T. Ren, C. Zhang, H. Tian, Y. Zhou, J. Sun, and Y. Xie, *Phys. Rev. Lett.* **126**, 026802 (2021)
- 【5】 Y. Kozuka, M. Kim, C. Bell, B. G. Kim, Y. Hikita, and H. Y. Hwang, *Nature (London)* **462**, 487 (2009).
- 【6】 Y. Saito, Y. Kasahara, J. Ye, Y. Iwasa, and T. Nojima, *Science* **350**, 409 (2015).

致 谢

本文作者袁凯睿系浙江省杭州第二中学 2023 级学生。2024 年 1 月，本人顺利通过浙江省科协组织的全国“中学生英才计划”的笔试和面试等选拔考试，有幸成为浙江大学“英才计划”的一名学员，导师为浙江大学物理学院杰出青年基金获得者谢燕武教授。“中学生英才计划”旨在选拔一批品学兼优的高中生走进大学，在导师的指导下开展科学研究和科研实践。2024 年度，浙江省共选拔了约 50 名英才计划学员，其中物理类 10 名。

入选英才计划后，本人尽可能地利用周末和节假日等课余时间，在谢燕武教授的实验室进行科研实践。在导师和实验室同学的指导下，我先从简单的实验开始，例如电极的焊接、真空泵的使用、低温设备的操作等。经过一段时间的学习和实践后，我开始接触一些专业仪器设备的训练，例如薄膜材料的制备以及电阻等简单物性的测量。此外，根据浙江大学英才计划的培训方案，我也有幸聆听了其他几位英才计划导师的讲座，包括超导、电子关联、二维材料与器件等方面的学术报告，增强了我对学科的了解。

高一结束时，我决定利用暑假这个难得的机会，专心在谢老师实验室开展科学研究，并且准备参加丘成桐科学竞赛。为了挑选合适的研究课题，我跟谢老师进行了多次探讨，谢老师也给我提供了一些可能的选项。我在查阅了一些文献，并且请教了实验室的一些研究生后，决定尝试开展氧化物界面超导这个课题的研究。首先，两个不同绝缘体的界面可以形成超导，这是一种非常神奇的现象，我很想探究其奥秘。其次，谢老师是界面超导研究方面的权威专家，我很荣幸能有机会接触最前沿的研究课题。通过前期学习，我熟悉了薄膜制备和低温输运测量等实验方法，并且也自学了部分大学物理的课程，基本具备该方面的研究能力。

在确定了研究课题后，我开始在导师的指导下，在实验室张蒙博士后的带领下开展科学研究。经与导师讨论，我们选用了商用靶材 $(\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7})(\text{Al}_{0.65}\text{Ta}_{0.35})\text{O}_3$ 作为研究对象，通过脉冲沉积的方法将其沉积在 KTaO_3 (111)基片上，并通过低温输运测量来表征其界面超导。我们尝试制备了多个氧化物异质结样品，一开始并不很顺利，但在摸索了不同的生长条件后，最终成功制备了高质量的样品，并且在该材料中发现了界面超导。为了突出研究重点，本论文只展示了其中 2 个代表性样品的数据。

本论文是在导师谢燕武教授的无偿指导下，由本人独自完成的，所有研究结果都没在其他地方发表，也没有参加其他比赛。在论文选题、实验方案的确定、实验数据的分析、以及论文撰写等方面，谢老师都亲力亲为，耐心指导。谢老师为我提供了宝贵的学习机会、优越的科研条件，启蒙我的科学研究，我非常感谢谢老师为我提供的一切，由衷地钦佩谢老师的为人与博学。此外，我还要特别感谢实验室成员张蒙博士，他在实验过程中提供了许多具体的帮助和指导。

指导老师简介

谢燕武，浙江大学物理学院求是特聘教授，博士生导师，国家杰出青年科学基金获得者。长期从事复杂氧化物界面的前沿研究。近年来，聚焦界面超导，致力于探索新体系、发展高效调控方法、挖掘低维超导物理，从界面角度探索非常规超导的机理。迄今在 Science、Nature Materials、Nature Communications、Physical Review Letters、Advanced Materials 等国际著名期刊发表研究论文近 80 篇，他引 2500 余次。曾获“浙江大学 2021 年度十大学术进展”。培养的研究生中，获浙江大学竺可桢奖一名，获浙江大学优秀博士论文奖一名。