

Keithley 在二维金属材料研究中的应用

近日中国科学院物理研究所张广宇、杜罗军团队通过范德华挤压技术成功制备出原子级厚度的二维金属材料（如铋、锡、铅等），实现了非层状金属在量子限域下的稳定存在【1】。科研人员观察到了新的声子模式、强烈增强的电导率、具有 p 型行为的显著场效应和大的非线性霍尔电导率。实验证明单层铋材料展现出 9.0×10^6 S/m 的室温电导率，较块体材料提升一个数量级，并观测到巨非线性霍尔响应 ($\sigma^2 \omega \approx 0.22 \mu\text{m V}^{-1} \Omega^{-1}$)，为量子器件、柔性电子等领域开辟了新方向。

经典二维材料以其原子级厚度、独特的电学 / 机械性能和多样的结构，成为纳米技术领域的基础材料，和二维金属材料相比在结构、电学行为和稳定性方面有较大不同。

特性	经典二维材料（如石墨烯、MoS ₂ ）	二维金属材料（如单层铋）
结构	层状，范德华堆叠	非层状，依赖外部封装稳定
电学行为	半导体 / 绝缘体 / 半金属	金属性，高电导率（如 Bi 达 9×10^6 S/m）
稳定性	空气稳定（h-BN、石墨烯）	需封装（如 MoS ₂ 包裹）
典型应用	晶体管、传感器	量子器件、高频元件

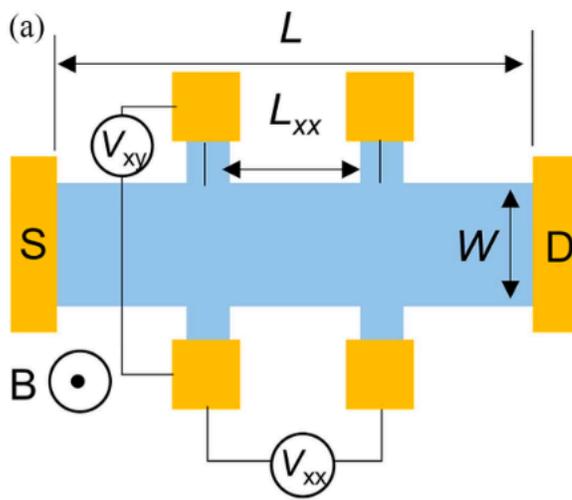
正因为二维金属材料展现的特性，使得量子器件及其机理有可能产生新的突破，基于单层铋的平带特性与强关联效应，其巨非线性霍尔响应为量子计算中的 Berry 曲率调控提供了理想平台。并且二维金属的高电导率 (9.0×10^6 S/m) 与低功耗调控特性，使其成为超薄互联或高频晶体管沟通的核心材料。

二维材料电学测试和表征及主要测试设备主要包括：

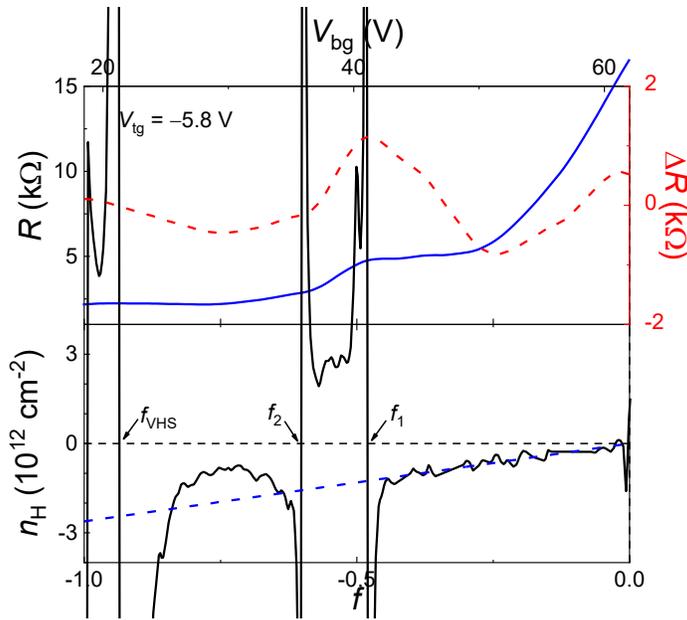
- 四探针法测试方块电阻：6517 或 4200A
- TLM 测试接触电阻率、载流子迁移率：DAQ 7510 或者 SMU

- Hall Bar 测试：6221/2182A
- 开关比、阈值电压、功耗等通用半导体参数测试：4200A

Hall 测试是研究二维材料电输运的重要测试手段，通过将材料设计成 Hall Bar 的结构，在外加磁场下，在不同温度下对 Hall 电阻进行高精度的测量。由于二维材料有着非常奇异的特性，诸如量子 Hall 效应、量子反常 Hall 效应、自旋 Hall 效应、非线性 Hall 效应 (NLHE) 等测试，逐渐揭示了时间反演和对称性破缺下二维材料与三维体材料等巨大差异，为光电探测、量子测量、新型计算等开辟新的途径。



上图【2】为典型的 Hall Bar 结构，用于测量 Hall 电阻，并通过 $n_H = -(1/e)(dR_{xy}/dB)^{-1}$ 推导载流子密度，该函数 n_H 是底栅的函数，因此在测试中需要对底栅 bg 增加一个可控的 V_{bias} 。

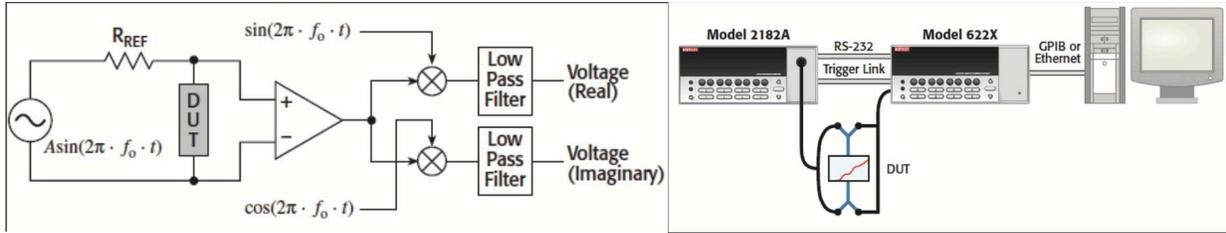


上如图为 $T=1.5\text{K}$ 时, n_H 在 $V_{bg}=62\text{V}$ 和 18.5V 时改变符号, 对应着价带填充 $f=0$ 和 $f=-1$ 全满的状态【3】。

二维材料中 Hall 测试的挑战

- 1.特殊的测试条件: 一般条件下, 被测样品被放置在低温(通常是超导)及磁场环境中, 其低温最低可达 0.1mK , 磁场可高达 16T 。在极端条件下, 磁场可达几十特斯拉脉冲强磁场, 压力可达数 GPa 。PPMS 可以提供一般条件下的测试环境, 在此环境下, 测试电缆连线需考虑热效应及对测试结果的误差因素。
- 2.需要极小或极大电阻的测试: 在超导条件下, 被测样品电阻可能低至 $\text{n}\Omega$ 级。而极端情况下, 被测样品电阻可能高达 $\text{G}\Omega$ 级, 通常的阻抗测试方法远远达不到要求。
- 3.需要测试极小电压、电流及微分电导: 此时信号往往淹没在噪声中, 需要特殊的测试手法抑制噪声, 提取有效信号分量。

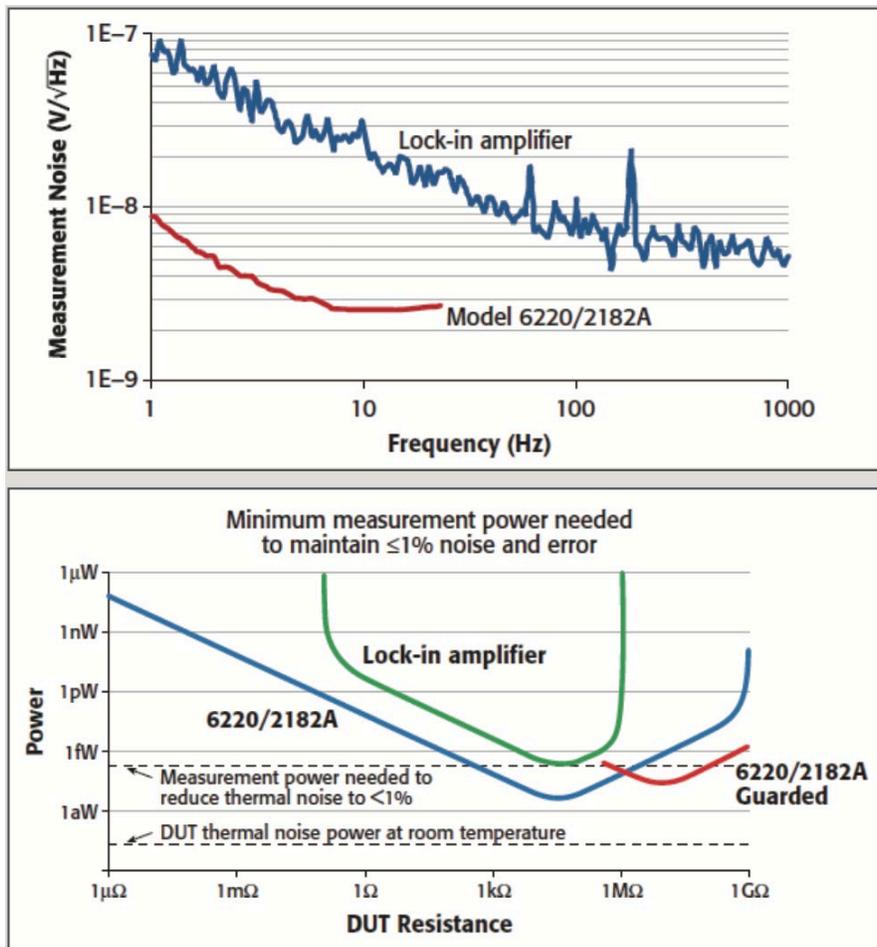
为应对电输运测试面临的挑战, 必须添加高精度适合极低电平测试的仪器体为必要的补充, 该仪器必须具备去除噪声的自力。以锁相放大器为代表的 AC 法和以 Keithley 622x 低电平电流源/2182A 纳伏计组合为代表的 Delta 模式是两种主要的应对挑战的方法, 两种方法的框图如下:



图：AC 法和 Delta 法测试原理

6221/2182A 组合的 Delta 模式可以提供准直流电流反向技术的测量和计算，以消除温差电动势的影响，每个 Delta 读数都是根据一个通道的两个电压测量结果计算而来；一个测量电流源的正相，一个测量负相，从而使噪声降低 1000 倍。

AC 法和 Delta 模式法各有优势，相辅相成，一般在电输运测试时都配置。下图示意出两者应用范围：



从上两图可以看出，锁放可在更高频率应用，比如脉冲测试，但锁放较适合 $100\text{m}\Omega\sim 1\text{M}\Omega$ 范围的测试，而 Delta 模式可测试更低电平的信号，也更适合低于 $100\text{m}\Omega$ 及大于 $1\text{M}\Omega$ 的电阻测试。

根据 Hall Bar 的结构，测试组网需要一下信号的激励与采集：

1. SD 方向的电流注入
2. V_{xx} 方向的电压采集，用于测试材料本体的电导率 σ_{xx}
3. V_{xy} 方向电压采集，用于测试材料霍尔电阻 σ_{xy}

通常情况下， V_{xx} 和 V_{xy} 需要同时测量，特别是在一些拓扑绝缘体和自旋材料的研究中，需要观测到在磁场下或自身磁性影响下能带劈裂后呈现量子化的霍尔电阻和相对应的体电阻的变化，用于判定材料是否满足拓扑绝缘体的性质【4】。

- **量子霍尔效应：** $\sigma_{xy} = \frac{ve^2}{h}$ ， $\sigma_{xx} = 0$
- **量子反常霍尔效应：** $\sigma_{xy} = \frac{ve^2}{h}$ ， $\sigma_{xx} = \infty$
- **量子自旋霍尔效应：** $\sigma_{xy} = 0$ ， $\sigma_{xx} = \frac{2e^2}{h}$

一台 2182A 配备两个电压采集通道，可以同时采集 V_{xx} 和 V_{xy} ，配合 6221 产生的高精度电流，可以方便、准确的完成 Hall 测试。

除了低电平测试仪器，通常电输运测试还要配置 SMU 作为直流激励源。特殊情况下还需要 AFG 作为交流激励源，采集卡或示波器用于采集锁放输出信号。高频输运特性的研究是电输运特性测试的发展方向，研究高频输运特性时，需配置带宽达 GHz 的任意波形发生器。



6221 电流源



2182A 纳伏表



6517B 静电计



2400 系列SMU

方案优势:

- 100fA~100mA 电流输出，1nV 电压测试灵敏度，高达 10nΩ电阻测量灵敏度
- 泰克独有的 TSP LINK 连接 6221/2182A，自动完成 Delta 模式测试
- Delta 模式可降低噪声 1000 倍
- 多型号高精度 SMU 供激励源选择
- 领先的 AWG 为高频输运特性研究提供强力支持
- 电输运测试领域普遍采用

引用:

- 【1】 [Doi.org/10.1038/s41586-025-08711-x](https://doi.org/10.1038/s41586-025-08711-x)
 - 【2】 [Doi.org/10.1007/s11432-024-4033-8](https://doi.org/10.1007/s11432-024-4033-8)
 - 【3】 [Doi.org/10.1093/nsr/nwac232](https://doi.org/10.1093/nsr/nwac232)
 - 【4】 DOI: 10.1103/PhysRevX.14.021051
-