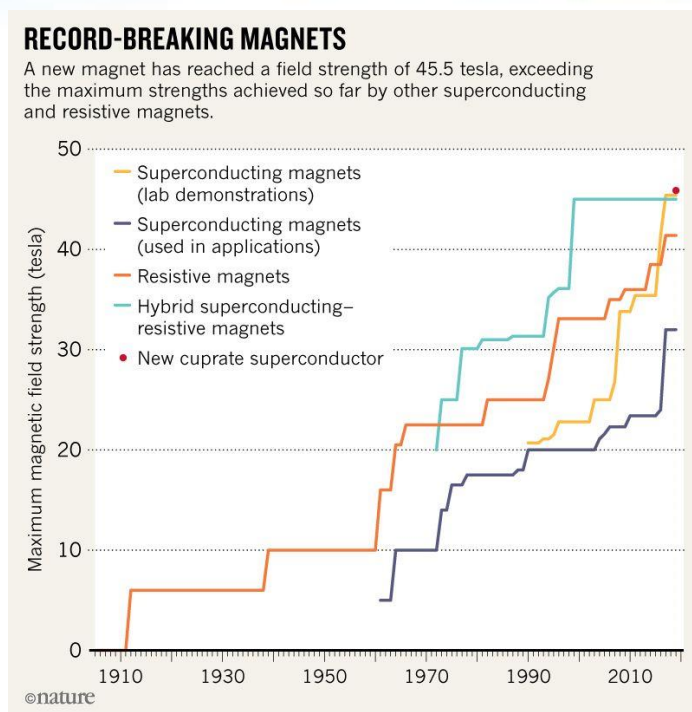


国内外强磁场实验室 科研动态

2019 年第二季度



中国科学院强磁场科学中心·科研办

2019/7/25



前 言

本科研动态的宗旨是为强磁场领域的科研技术人员提供国际上最新的科研成果以及各强磁场实验室发展动向，每季度发布一期。以下是美国、欧洲、日本和中国的强磁场实验室简介。

美国国家强磁场实验室

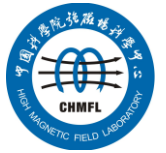
National High Magnetic Field Laboratory 又称 MagLab，是目前世界上规模最大，实验设施最全，用户最多的强磁场实验室。其稳态场部分位于 Tallahassee，脉冲场部分位于 Los Alamos，另有一个 high B/T 组位于 Gainesville。MagLab 于 1994 年建成并不断升级改造，创造并保持了多项世界纪录。

欧洲强磁场实验室

European Magnetic Field Laboratory (EMFL) 是由法国 Grenoble 的稳态场、Toulouse 的脉冲场、荷兰 Nijmegen 的稳态场以及德国 Dresden 的脉冲场实验室于 2015 年组合而成，有统一的用户申请入口。

日本强磁场实验室

日本的强磁场实验室没有整合在一起。比较著名的实验室有东京大学的 MegaGauss 实验室，东北大学的超导材料高场实验室 (HFLSM) 和 NIMS 的筑波磁体实验室 (TML)。



武汉脉冲强磁场科学中心

武汉的强磁场实验室隶属于华中科技大学，全称为国家脉冲强磁场科学中心（筹），其磁体装置 2014 年通过国家验收，建有 12 个三种类型的系列脉冲磁体，最高场强达到 90.6 T，位居世界第三、亚洲第一。

中国科学院强磁场科学中心

中国科学院强磁场科学中心位于合肥科学岛，其建设的稳态强磁场实验装置 2017 年通过国家验收，是世界上仅有的两个稳态磁场超过 40T 的实验室之一。稳态强磁场实验装置有 3 台水冷磁体创造世界纪录，混合磁体最高磁场达到 42.9T，磁体技术和综合性能处于国际领先地位。

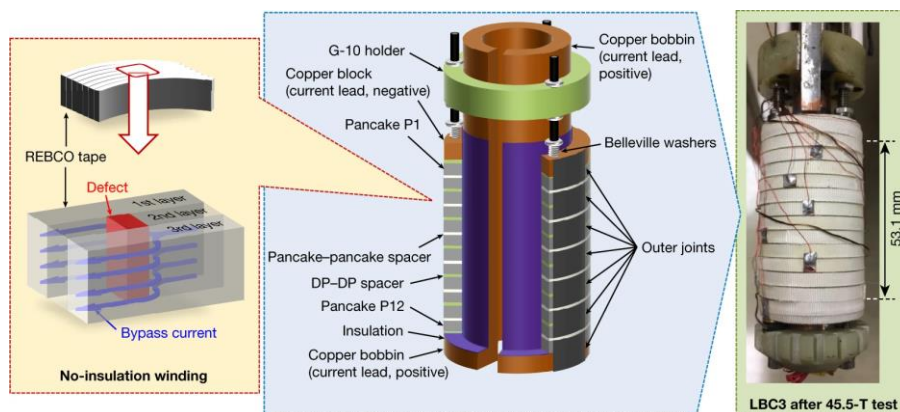
科研动态

1. 美国国家强磁场实验室

● 用高温超导磁体实现 45.5T 稳态磁场世界纪录

MagLab 通过在现有水冷磁体中插入高温超导内插磁体创造了 45.5T 的稳态磁场世界纪录。

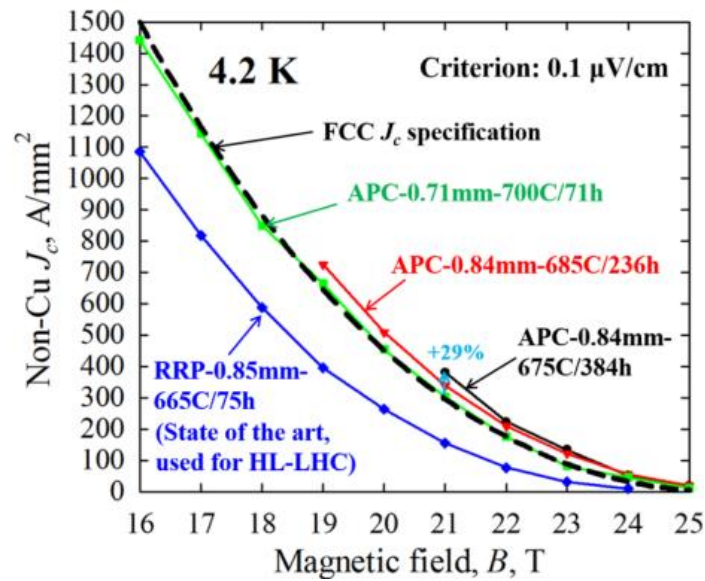
高温超导线圈内外径分别为 14mm 和 34mm，由 REBCO 带材绕制而成。该带材是在 30um 哈氏合金带上镀上 1.5um 厚的 REBCO 及其它涂层，杨氏模量达到 210GPa（大约为铜的两倍）。该线圈采用无绝缘工艺，电流密度达到惊人的 1420A/mm²，是 32T 全超导磁体的 5 倍。背景磁场由 31T/50mm 室温孔径水冷磁体提供。



Cite: [S. Hahn, et al. Nature 570, 496 \(2019\)](#)

● 铌三锡性能提升 50%

使用新的生长技术来细化晶粒和引入钉扎中心，美国的研究人员将铌三锡的临界电流提高了 50%。

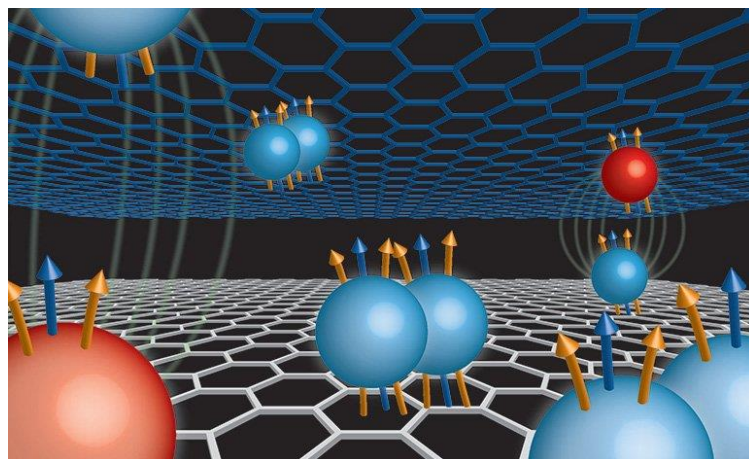


Cite: [X. Xu et al. Supercond. Sci. Technol. submitted](#)

● 双层石墨烯中的奇异量子态

MagLab 用户观察到一种以前未曾见过的量子霍尔态，揭示了量子系统中电子相互作用的本质，为未来的量子计算机建立了一个潜在的新平台。

强磁场下，双层石墨烯中产生了一系列分数量子霍尔态，其中一些与复合费米子模型表现出极好的一致性，而另一些则从未被预测或观察到。进一步的研究表明，这些新态是由复合费米子之间的配对产生的。相邻层间和层内的配对相互作用产生了各种新的量子现象。

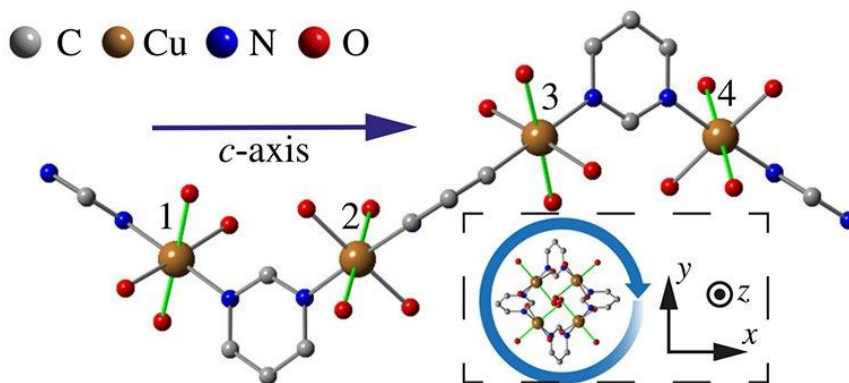


Cite: [J. I. A. Li, et al. Nature Phys. \(2019\)](#)

装置：水冷磁体

● 高场揭示铜离子链的磁性

对于反铁磁体，基态和第一激发态之间可能存在能量差异（有能隙），或者能量差为零（无能隙）。外加磁场可以驱动有能隙和无能隙相之间的量子相变。 $S=1/2$ 反铁磁海森堡链通常保持无能隙，但局部自旋环境可引发场致自旋能隙。本研究考察了具有手性交错自旋环境的一维系统 $[\text{Cu}(\text{pyrimidine})\text{H}_2\text{O}_4]\text{SiF}_6\cdot\text{H}_2\text{O}$ ，并发现了与非手性交错系统不同的行为。



Cite: [J. Liu et al. Phys. Rev. Lett. 122, 057207 \(2019\)](#)

装置：高场 EMR

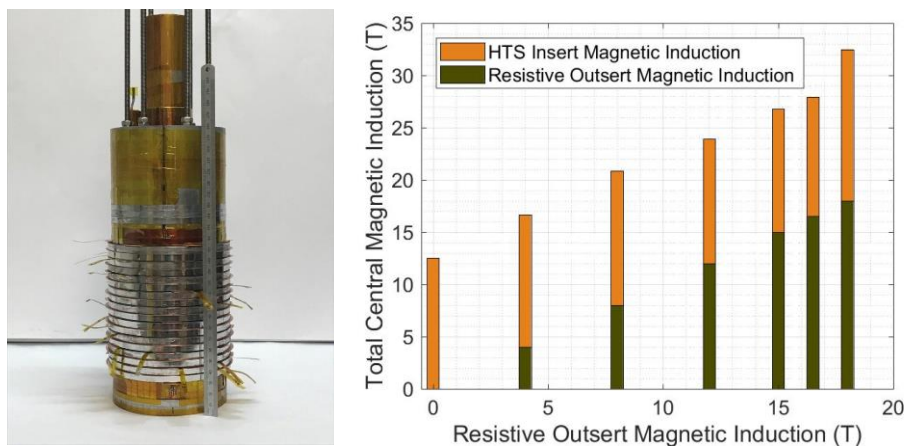
2. 欧洲强磁场实验室

● 高温超导内插磁体达到创纪录的 32.5T

法国强磁场实验室创造了一项新的世界纪录（注：19 年一季度完成，早于美国 45.5T 世界纪录），产生了 32.5T 的磁场。这为产生更强稳态磁场（50T）铺平了道路。常规超导材料收临界场限制，无法实现 23T 以上的磁场，因此目前世界最高稳态磁场（45T）是由外超导磁体和内水冷磁体产生的磁场叠加来

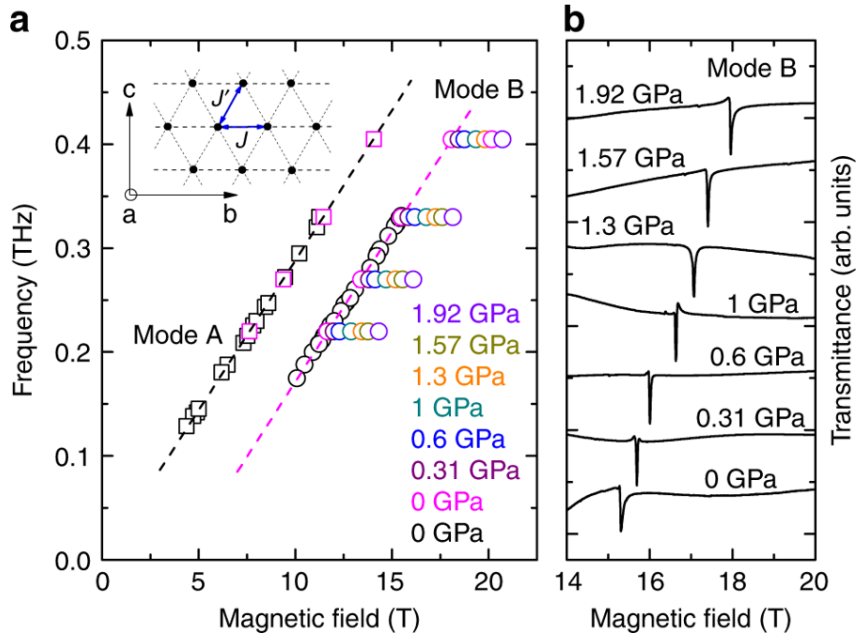
实现。为实现更高磁场和解决水冷磁体带来的高能耗问题，用高临界场的高温超导磁体内插磁体替代内水冷磁体是目前最为热门的技术路线。

本次测试的内插磁体（内径 38mm）通过将高温超导带材与金属带共同缠绕，之间无隔离无浸渍，使得在局部失超的情况下电流可以重新分配，因而具有出色的失超保护，以及足够大的机械强度。在测试中，内插磁体提供 14.5T 磁场，加上外围水冷磁体提供的磁场，总磁场达到 32.5T 的新纪录。



● 阻挫磁体中交换耦合的压力调节

自旋 1/2 三角晶格海森堡反铁磁体是一类最重要的阻挫量子磁体，体系中的几何挫折、量子波动和磁有序之间有着复杂的相互作用。尽管这类材料具有简单的磁性结构，但它们往往具有非常不寻常的磁性和非常丰富的相图。德累斯顿强磁场实验室的研究人员以 Cs_2CuCl_4 为研究对象，用静水压力代替化学掺杂来调控自旋哈密顿量。用这种方法不仅可以准连续地调整参数，还可通过测量 ESR 的峰位偏移量来精确监测。研究发现施以 2GPa 的压力可使该化合物中的交换耦合参数增加 70%，同时引发一系列新的磁场诱导相变。该工作的高压高场电子自旋共振（ESR）实验在日本仙台的东北大学进行，磁化测量在美国国家强磁场实验室完成。

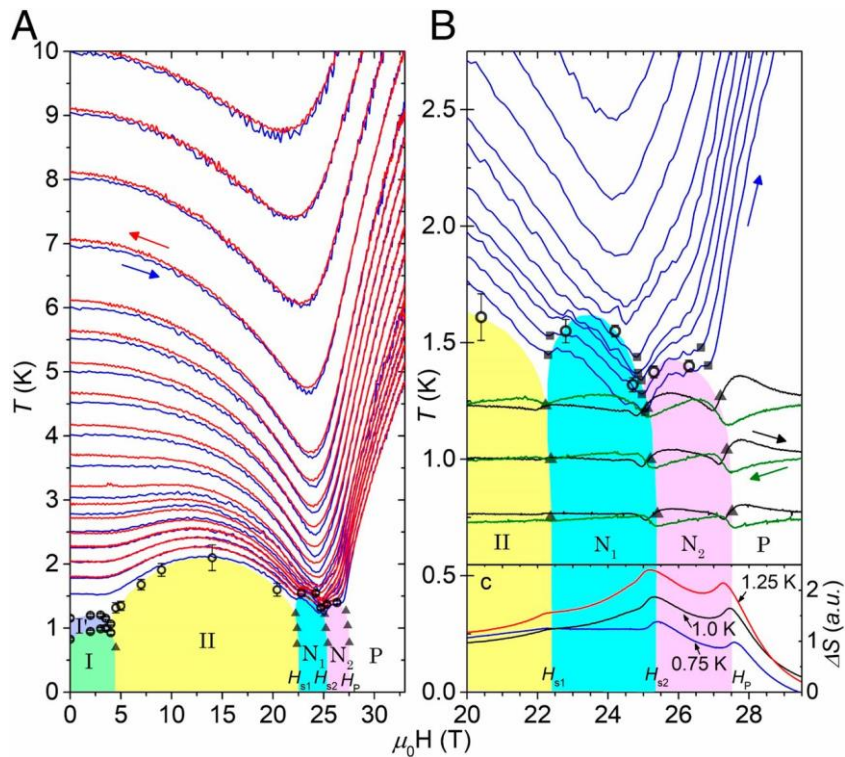


Cite: *S. A. Zvyagin, et al. Nature Commun. 10, 1064 (2019)*

装置：高场 ESR

3. 日本强磁场实验室

- 立方手征磁体中斯格明子与“刺猬”晶格之间的拓扑转变





阻挫铁磁体中的自旋向列相是高磁场下的奇异物质状态之一，可能是由双磁子束缚态的玻色-爱因斯坦凝聚而来。自旋向列相的序参量自旋四极矩在高磁场下难以用常规手段检测，因而长期缺乏实验证据。最近，日本科学家设计了一个用于脉冲磁场研究的量热计，并对热容和磁热效应进行了高达 33 T 的测量。这些结果为铜基钒铜矿结构材料中的自旋向列相提供了强有力的证据。

Cite: [Y. Kohama, et al. PNAS 116, 10686-10690 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

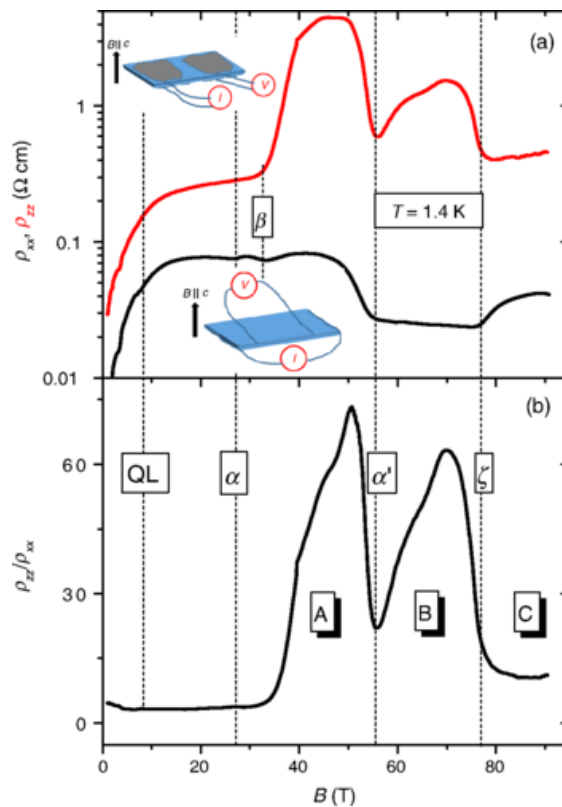
4. 武汉脉冲强磁场科学中心

● 强磁场下石墨电输运行为获得重要进展

将二维电子气体置于强磁场中，电子之间的相互作用会导致分数量子霍尔效应，其中电阻呈现量子化值。虽然二维电子气中分数量子霍尔效应已众所周知，但在凝聚态物理研究中，人们对相同条件下三维电子气体在超强磁场下的性质却知之甚少。石墨作为半金属材料，在研究高场下三维电子气的物理性质中扮演着重要角色，自 1981 年以来，物理学家们通过各种实验发现了不同磁场可以诱导石墨表现出不同的电子“相”，如已发现的“A 相”、“B 相”，这些都表明石墨中具有丰富的电子行为。

武汉强磁场中心的团队通过研究强磁场下半金属石墨中的电子行为，发现了一个新的“相”——“C 相”。他们将石墨样品置于高达 90.5T 的脉冲强磁场（磁场平行样品 c 方向）下，对面内（电流垂直磁场平面）和面间（电流平行磁场平面）两个方向的电阻行为进行了监测：当磁场强度达到 75T 时，这两个方向电阻率的比值急剧下降，出现了一个不同于已知的“A 相”、“B 相”的新相变

——“C相”，之后通过面内磁电阻下降进一步确定了这个新相的存在，75T 则被定义为“C相”的起始点。同时，转角磁电阻、霍尔效应等测量表明，“B相”在54T和75T之间产生的原因是由于自旋相反的电子-空穴配对的凝聚态——“激子绝缘体”，这一现象在电子相互作用的系统中很少被发现。



Cite: [Z. Zhu, et al. Phys. Rev. X 9, 011058 \(2019\)](#)

装置：脉冲磁体

● 螺旋链 $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 的强磁场磁性研究上取得新进展

低维和阻挫磁体由于强几何阻挫和量子自旋涨落往往呈现出新奇的非经典磁性，比如磁无序、自旋液体、分数量子磁化平台等。强磁场磁化和电子自旋共振(ESR)等测试方法是探索这些新奇现象的起源的重要手段。

武汉强磁场中心与中科院福建物构所合作，利用强磁场磁化和高频 ESR 研究了螺旋链 $\text{Co}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 的磁性，观察到强磁场诱导的量子 1/2 和 3/4 磁化平台。在

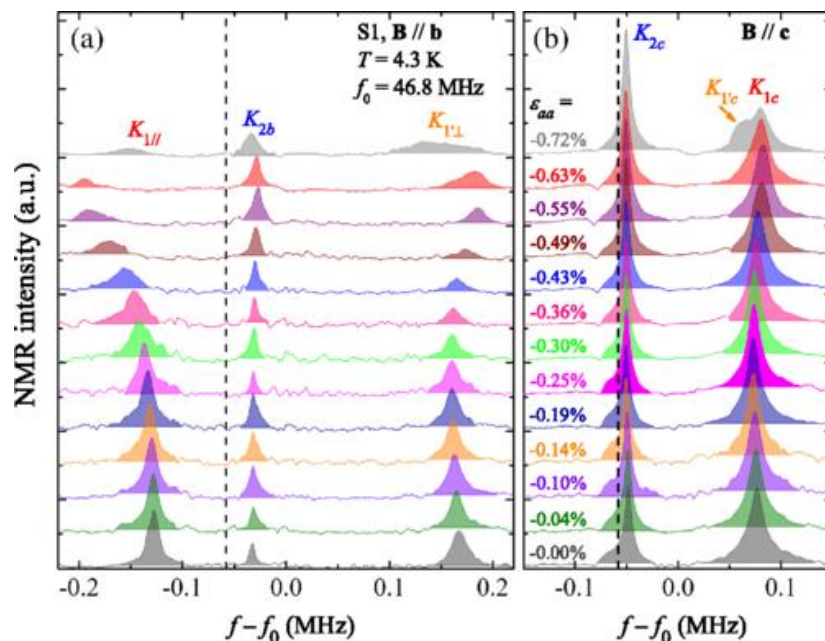
反铁磁中，同时出现经典的自旋翻转转变和量子磁化平台非常罕见，为理论研究提出了新的挑战。该研究还利用严格对角化模拟磁化曲线和第一性原理计算，合理地解释了 $1/2$ 和 $3/4$ 磁化平台的起源，并获得了主要的交换作用参数。

Cite: L. Yin, et al. Phys. Rev. B 99, 134434 (2019)

装置：高场 ESR

● Sr_2RuO_4 的超导电性研究取得重要进展

武汉强磁场中心的团队通过对 Sr_2RuO_4 进行 ^{17}O NMR 测量，发现所有 O 位置的奈特位移数值在应变下都明显增大，符合范霍夫奇点的特征。这个研究虽然是在正常态进行，但对研究 Sr_2RuO_4 的超导电性具有一定的启发性：一方面，从态密度角度看，自旋单态配对下 T_c 受态密度影响更大；而另一方面，由于范霍夫奇点同时也会增加 Stoner 因子，即体系趋近于铁磁不稳定性，从而增强了自旋三态的配对强度。该研究从实验上证实了 Sr_2RuO_4 中的范霍夫奇点，但要进一步揭示这种材料在应变下的超导配对性，还需要在更低温度即 T_c 以下进行更直接的测量。





Cite: [Y. Luo, et al. Phys. Rev. X 9, 021044 \(2019\)](#)

装置: NMR

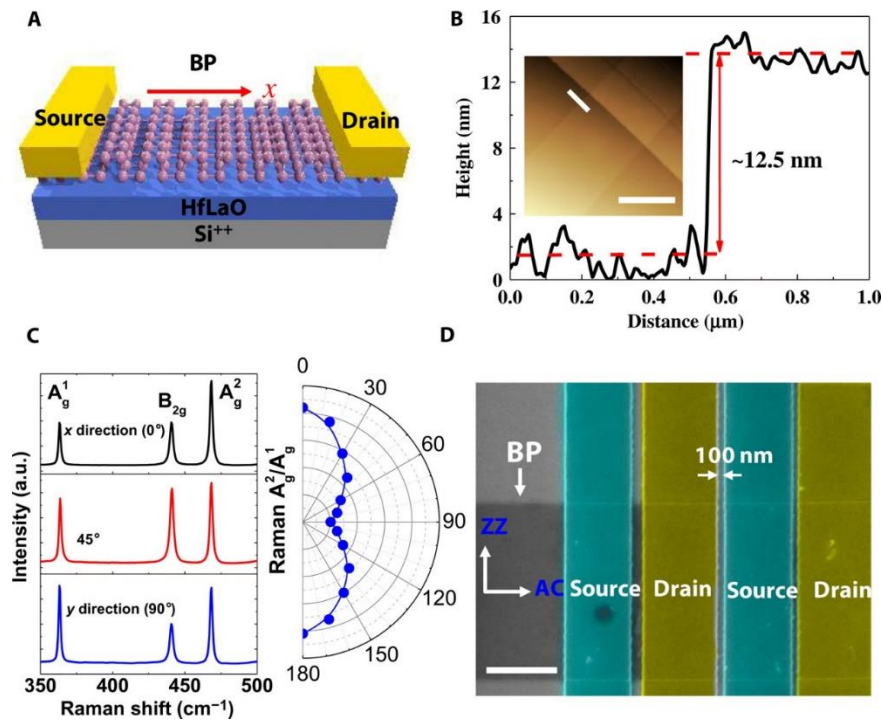
● 利用黑磷晶体管实现弹道输运

黑磷是一种单元素二维半导体材料, 具备很高的载流子迁移率、可调控的直接带隙 (0.3-2eV) 以及较大各向异性等众多特殊的电学和光学性能, 自 2014 年被报道以来一直是低维材料领域的研究热点。然而, 迄今为止, 实验上报道的黑磷晶体管的整体性能仍然低于预期。目前, 大部分的黑磷器件是以热氧化的 90nm 二氧化硅薄膜为栅介质, 不足之处表现为: 一方面, 二氧化硅的等效氧化物厚度为 90nm, 造成栅介质对沟道的栅控能力很弱; 另一方面, 二氧化硅薄膜包含很多缺陷和固定电荷, 对载流子有严重的散射。这些导致二氧化硅/黑磷的界面质量差, 降低了黑磷的迁移率, 严重制约着器件的整体性能。因此, 如何大幅提高黑磷晶体管的驱动电流和速度, 在短沟道器件中实现弹道输运是目前该领域的主要挑战之一。

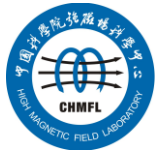
为解决这个难题, 该研究团队利用国家脉冲强磁场科学中心微纳器件平台, 提出了使用高介电常数薄膜 HfLaO 代替二氧化硅的方法: 原子层沉积的超薄高介电常数 HfLaO 栅介质的等效氧化物厚度只有 2.7nm, 有效提高了栅介质对沟道的栅控能力; 同时, 薄膜的表面粗糙度和缺陷密度也远小于二氧化硅, 确保了 HfLaO 薄膜与黑磷半导体之间的界面质量。通过背栅电压的掺杂作用, 接触电阻最小达到 $0.4\text{k}\Omega\cdot\mu\text{m}$ 。

同时, 该研究使用 Caughey Thomas 迁移率模型, 拟合了短沟道黑磷晶体管的饱和速度。室温下黑磷的空穴饱和速度为 $1.5\times 10^7\text{cm/s}$, 超过了所有半导体材料的空穴饱和速度。基于如此性能的器件, 成功实现了弹道输运。通过

MIT Virtual Source 模型提取了黑磷晶体管的弹道率。室温下 100nm 的黑磷晶体管的弹道率达到 36%，高于同等参数下硅基 MOS 器件。在低温 20K 时，弹道率提高到了 79.4%。模型计算预测在 20K 时，沟长为 10nm 的黑磷晶体管的弹道率接近 100%。



Cite: [X. Li, et al. Science Adv. 5, eaau3194 \(2019\)](#)



5. 中科院强磁场科学中心

- 强磁场中心实现标定微米线振动方向的新方案
- 强磁场中心研发出新型 c-KIT 激酶耐药突变选择性抑制剂
- 国际上首次实现非特定形状纳米样品单体磁化过程的实验测量
- 稳态强磁场生物安全性研究取得新进展
- 强磁场中心在多发性原发性肿瘤研究中取得新进展
- 强磁场中心发现老药阿昔替尼对胃肠间质瘤的新适应症

详见: <http://www.hmfl.cas.cn/xwzx/tt/>