未来信息材料与新物性研究

郭 辉

副研究员

纳米物理与器件实验室N12课题组 (https://n04.iphy.ac.cn)

联系方式：13126758891　　E-mail：guohui@iphy.ac.cn

高鸿钧院士研究团队

中国科学院物理研究所文件

物发人字〔2023〕4号

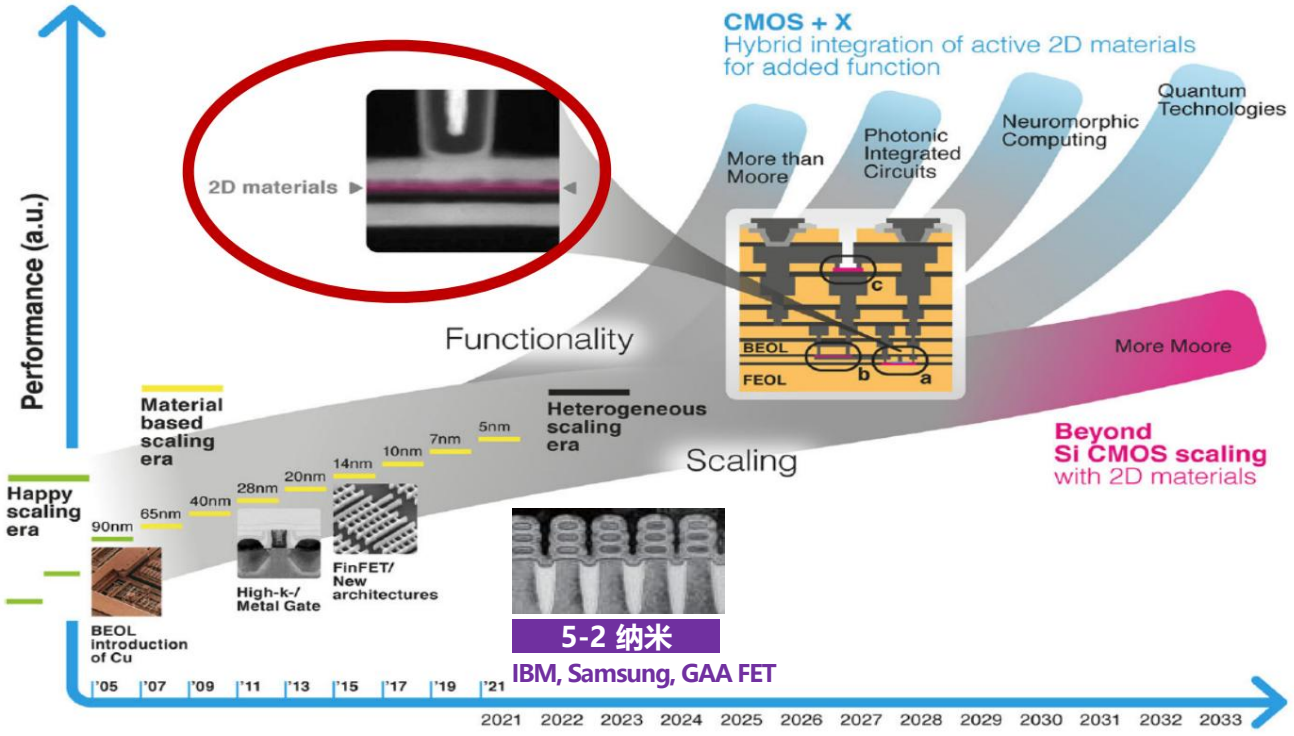
序号	学术方向召集人	组　名	组　长	方　向
	高鸿钧	未来信息材料与新物性		
		N04	高鸿钧	未来信息材料及器件物理
		N11	杜世萱	纳米结构及其器件的理论计算研究
		N12	杨海涛	低维关联电子材料的制备及其物性

为什么要做

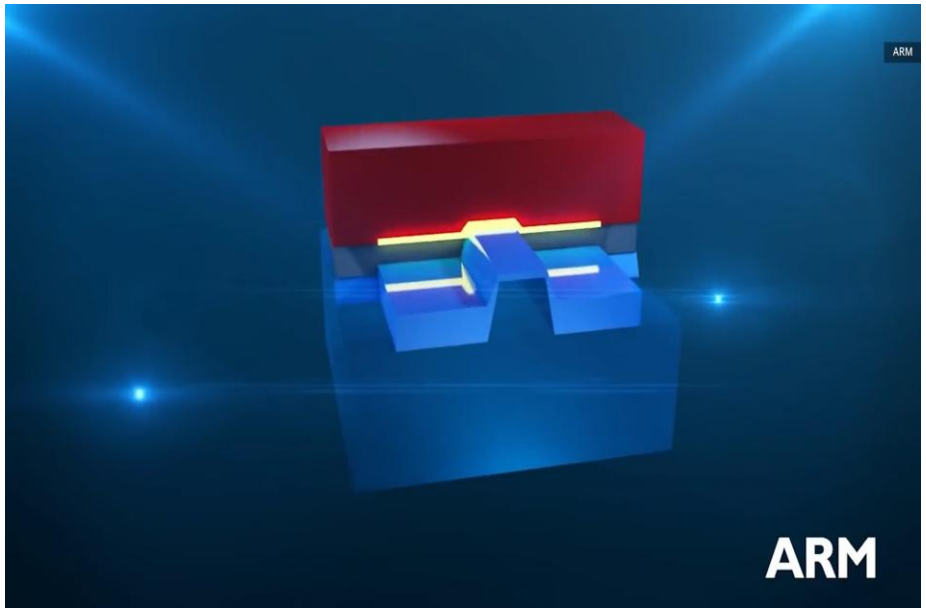
未来信息材料与新物性研究?

一、未来信息器件的发展趋势

- 信息技术的核心是 **芯片**；其功能越来越强大，集成度越来越高
- 构成芯片的 **“单元器件”** ---**晶体管**的尺寸越来越小；尺度进入2 nm 技术节点，进一步发展的趋势是**尺寸更小，速度更快，功耗更低**
- 目前，Si基芯片高速发展的态势变缓，意味着**巨大挑战的来临**



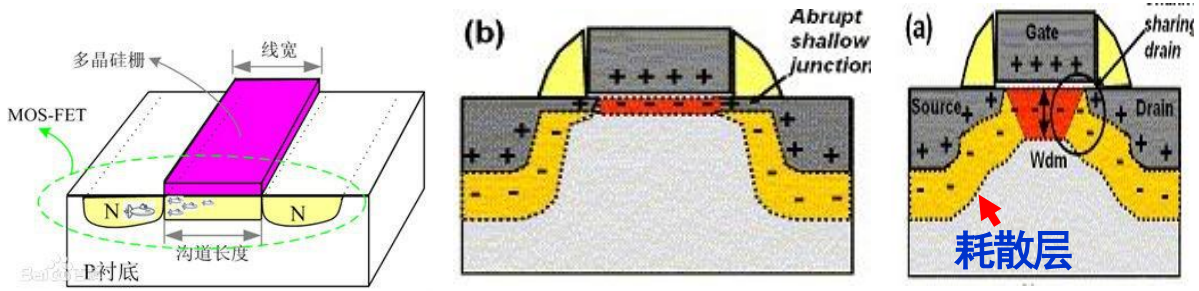
晶体管构型的演化



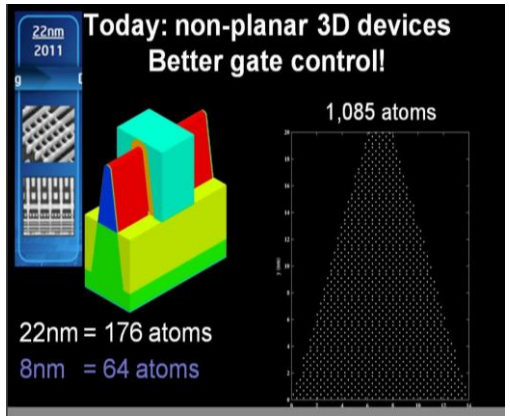
芯片发展：硅基极限 ⇨ 低维材料的机遇

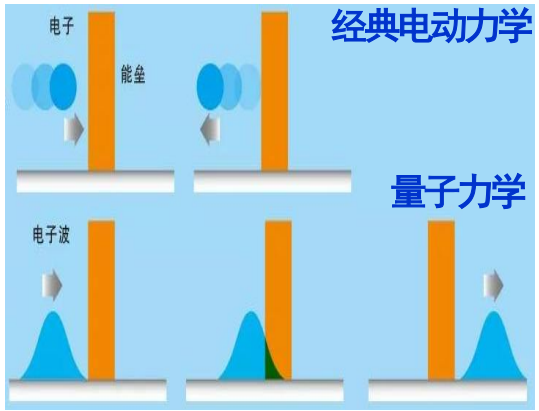
- 短沟道效应会造成严重的漏电流
- 传统电子器件到物理尺寸极限，量子效应会影响器件性能
- 由于无法避免的厚度波动、表面粗糙度、表面悬挂键等影响，进入亚纳米技术节点， Si基器件电学性能退化严重，必须换赛道

短沟道效应

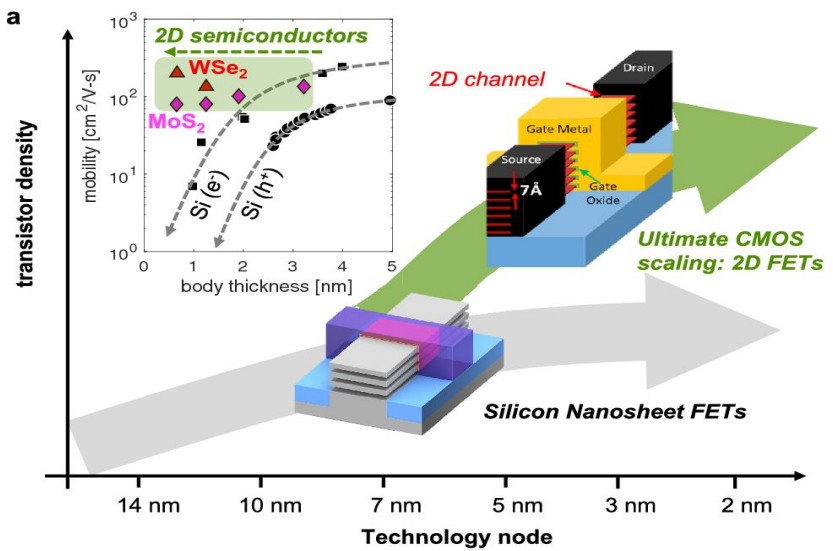


量子隧穿





原子层芯片 ⇨ 原子芯片

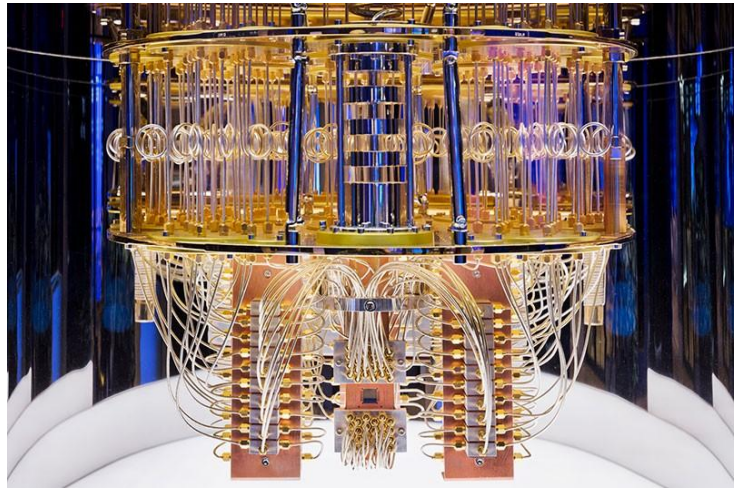


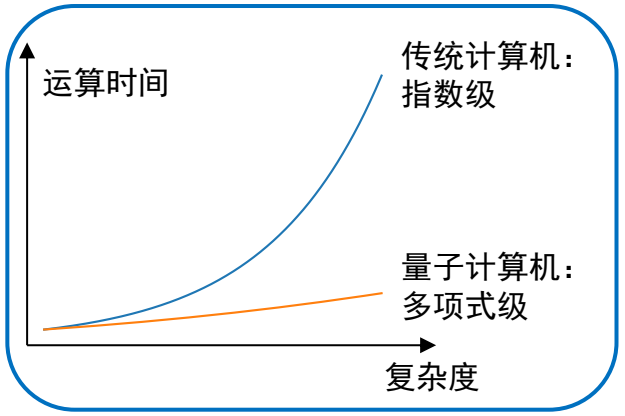
二维原子晶体：
超薄物理厚度、无悬挂键、高迁移率；
微缩极限下的理想非硅沟道材料。

未来信息科学与器件的发展

❑量子器件、量子计算机解决海量存储和高速计算难题

量子计算机





量子计算的实现方案

方案	超导	离子阱	NMR	光子	NV色心	量子点	拓扑量子计算
相对优势	可扩展性较好	相干时间长，错误率低	相干时间较长	相干时间长，易于网络化	室温，相干时间长	与现有半导体工业结合	理论相干时间长，错误率低
相对劣势	相干时间较短	操作速度慢	可扩展性较差	可扩展性较差，难以存储	可扩展性较差	可扩展性较差	实验仅处于起步阶段

谷歌开发54量子比特超导量子芯片，宣称实现"量子霸权(quantum supremacy)"

IBM开发了127个量子比特的超导量子计算机"IBM Eagle"

中科大构建62比特超导量子计算原型机"祖冲之号"，实现可编程二维量子行走

中科大等单位成功构建76个光子的量子计算原型机"九章"

拓扑量子计算：将非阿贝尔任意子进行编织构建拓扑量子比特，有本征容错性，可以解决其他方案面临的量子退相干与量子纠错问题。

研究团队聚焦于未来量子信息材料与新物性的研究

怎么去做

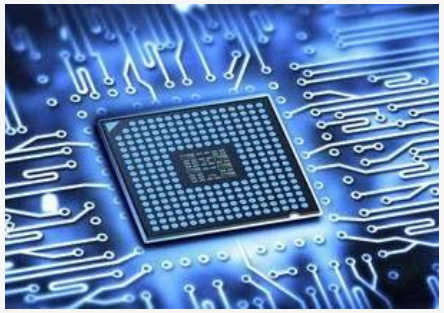
未来量子信息材料与新物性研究?

发展原子尺度的制造未来信息材料的技术

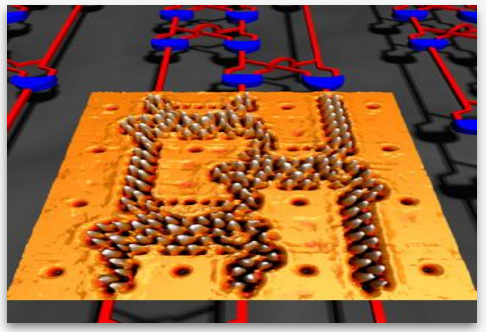
制造技术的四个时代

石器时代 (8700BC)
铜器时代 (2300BC)
铁器时代 (700BC)

第一次工业革命 (1784)
第二次工业革命 (1870)



第三次工业革命 (1964)
第四次工业革命 (2013)



10^{-3} 米

制造1.0时代
（手工制造）

10^{-6} 米

制造2.0时代
（机械制造）

10^{-8} 米

制造3.0时代
（微纳加工）

10^{-10} 米

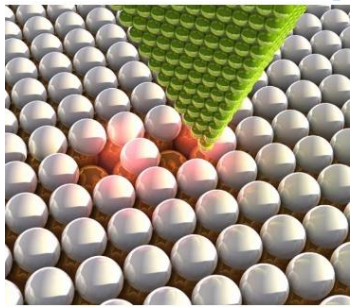
制造4.0时代
（原子制造）

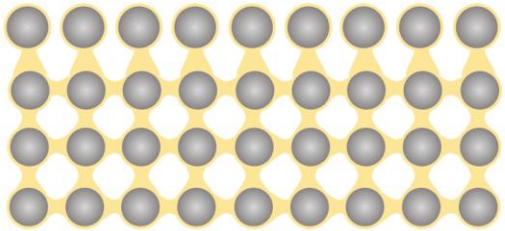
MADE IN CHINA 中国制造 2025 “制造强国战略”

原子级精准制造科学与技术已成为国际科技竞争的高地

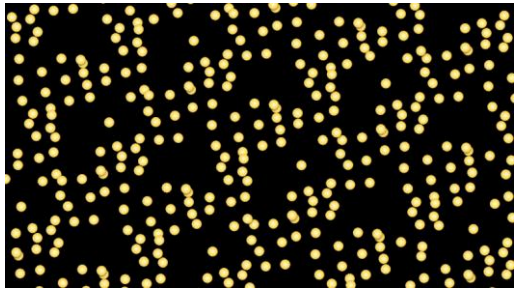
原子级制造

❑ **原子级制造：将能量精准作用于原子/原子层，通过对物质世界的基本单位——原子的规模化精准操控，实现原子限域去除或有序构筑，获得逼近理论极限性能产品，是变革性制造范式。**

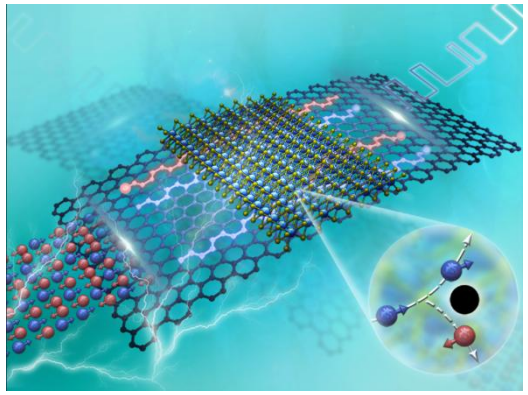




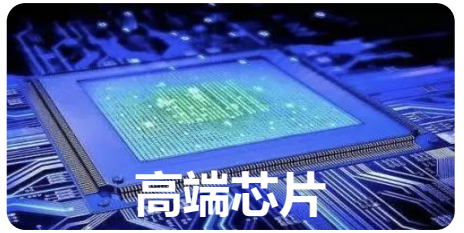
原子层去除

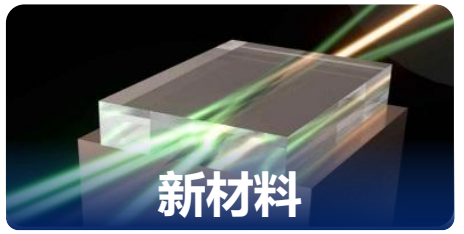


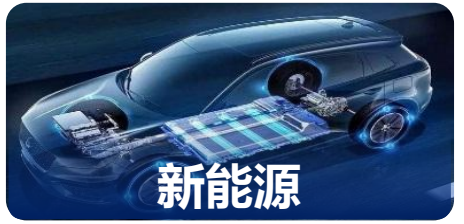
原子有序构筑

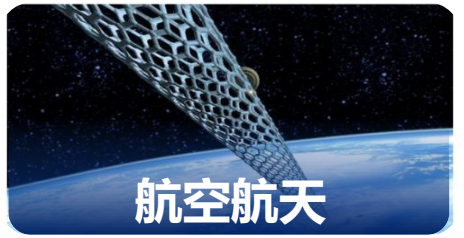


超常性能结构或器件



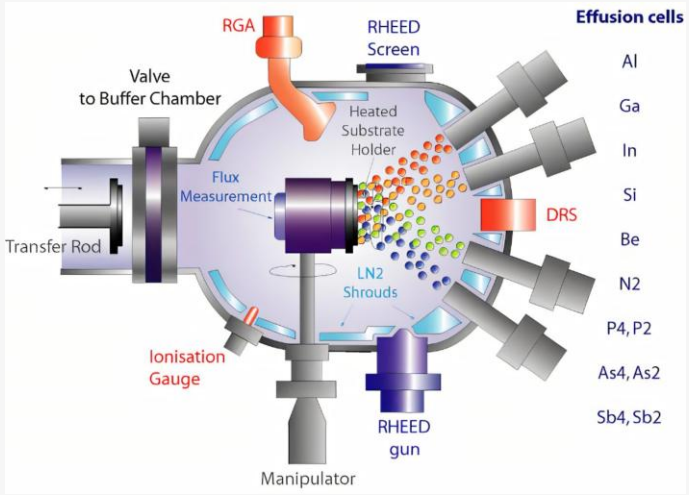


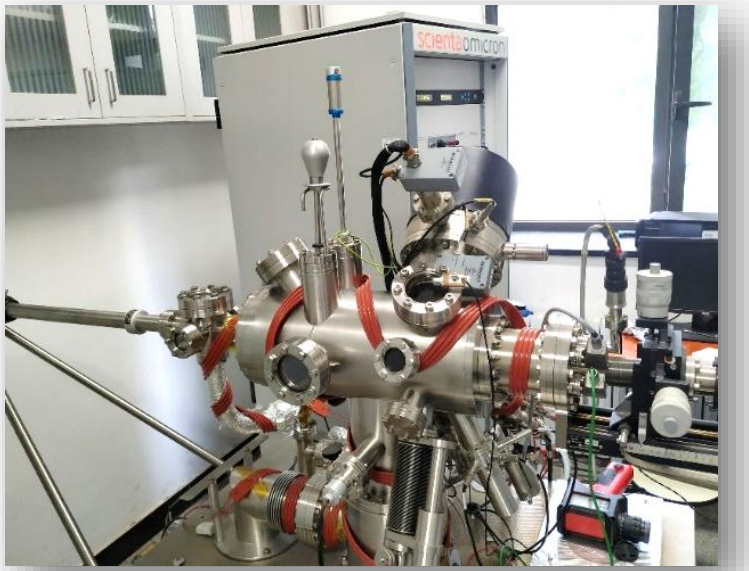




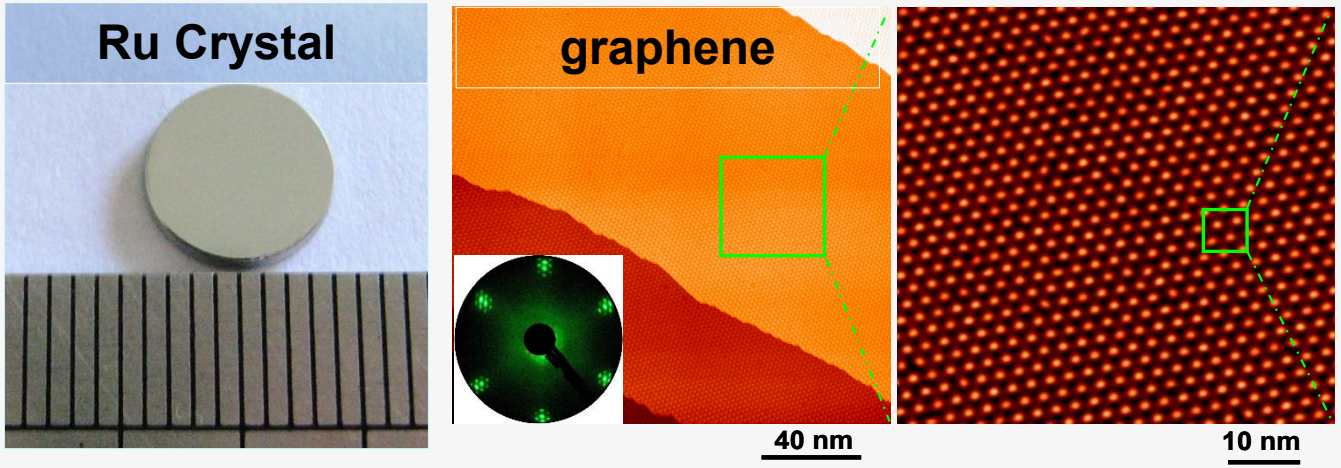
未来信息材料的制备方法-----单原子自组织生长方法

超高真空分子束外延（MBE）



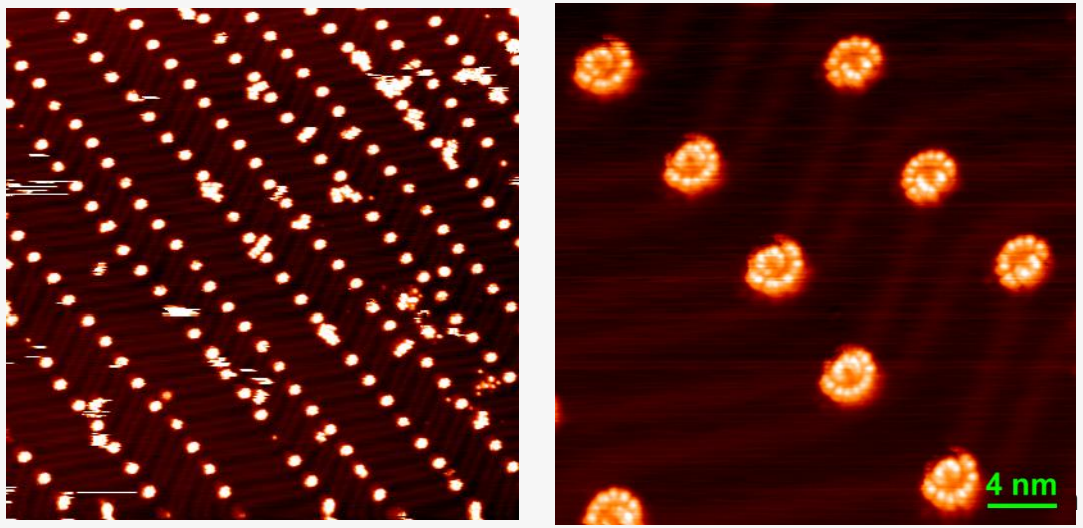


高质量、大面积低维材料



H.-J. Gao *et al*. Adv. Mater. 21,2777(2009); 26,4820 (2014)

分子组装

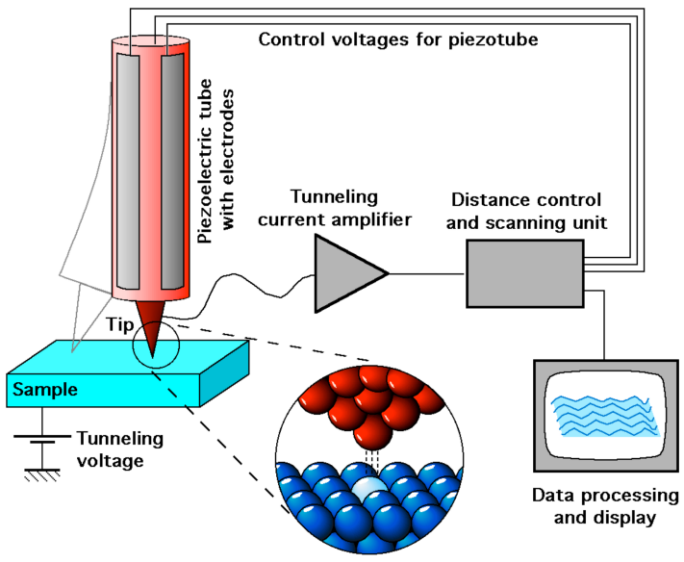


可用于纳米机器的单分子马达阵列

H.-J. Gao *et al*. PRL 101, 197209 (2008)

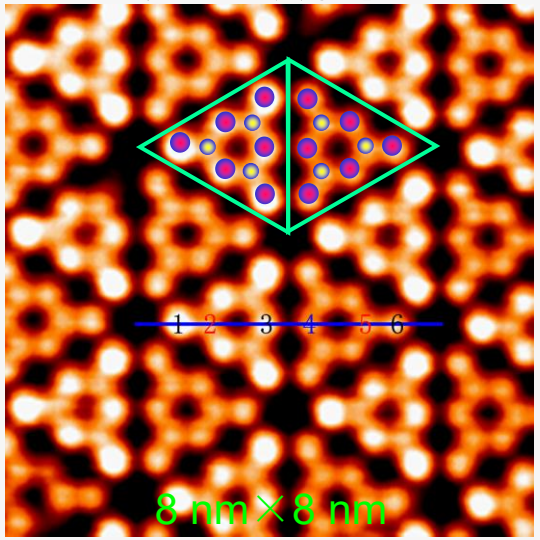
未来信息材料的制备方法-----扫描探针原子操纵方法

扫描隧道显微镜（STM）

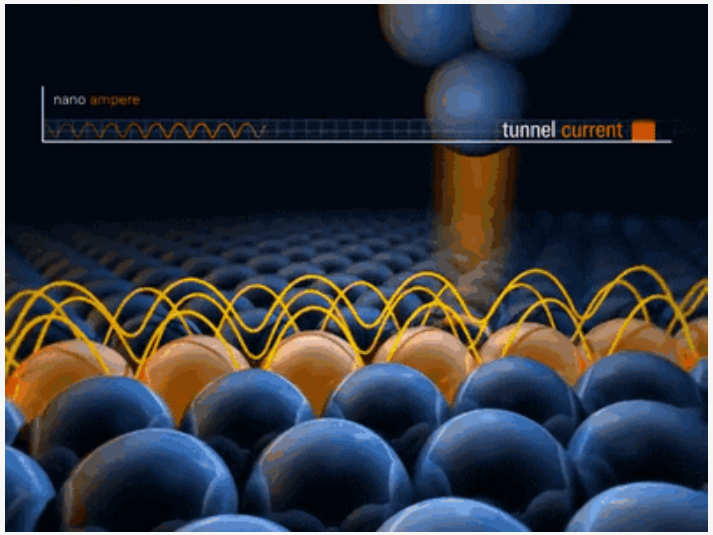


1986年诺贝尔物理学奖

原子成像

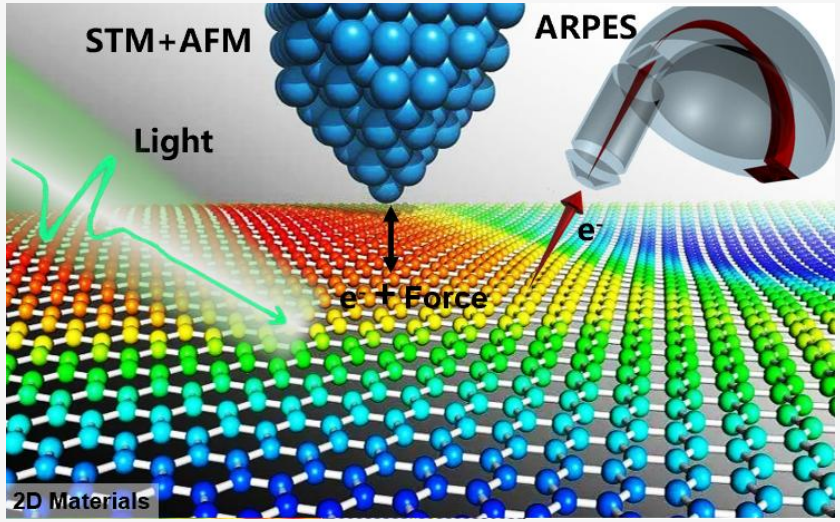


STM原位探测和操纵



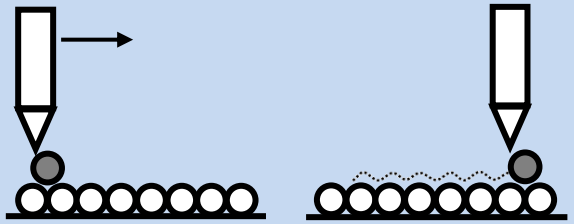
可控的表界面晶格和电子态构筑

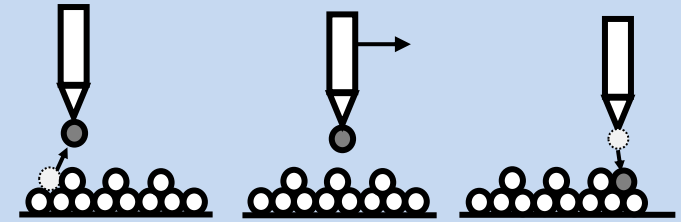
外场调控



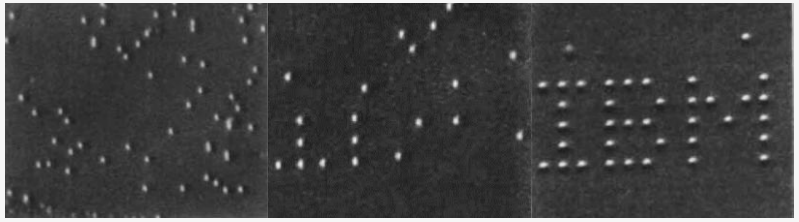
未来信息材料的制备方法-----扫描探针原子操纵方法

扫描探针原子操纵

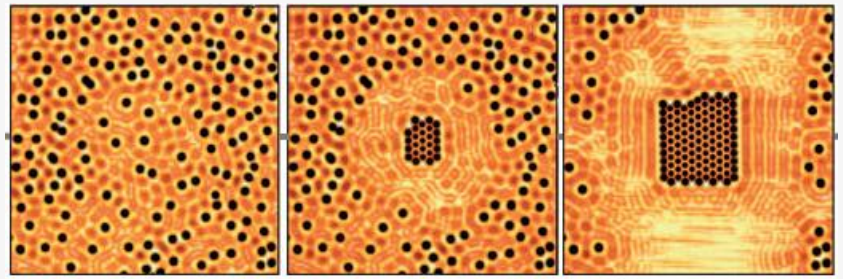




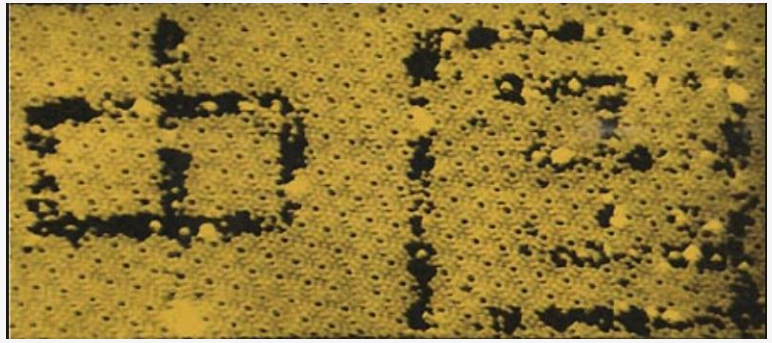
单原子移动



单原子构筑

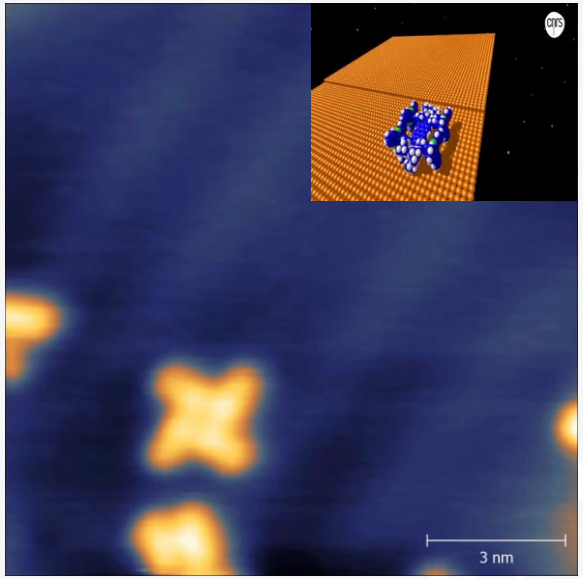


单原子刻蚀



(高鸿钧院士团队1995年实现)

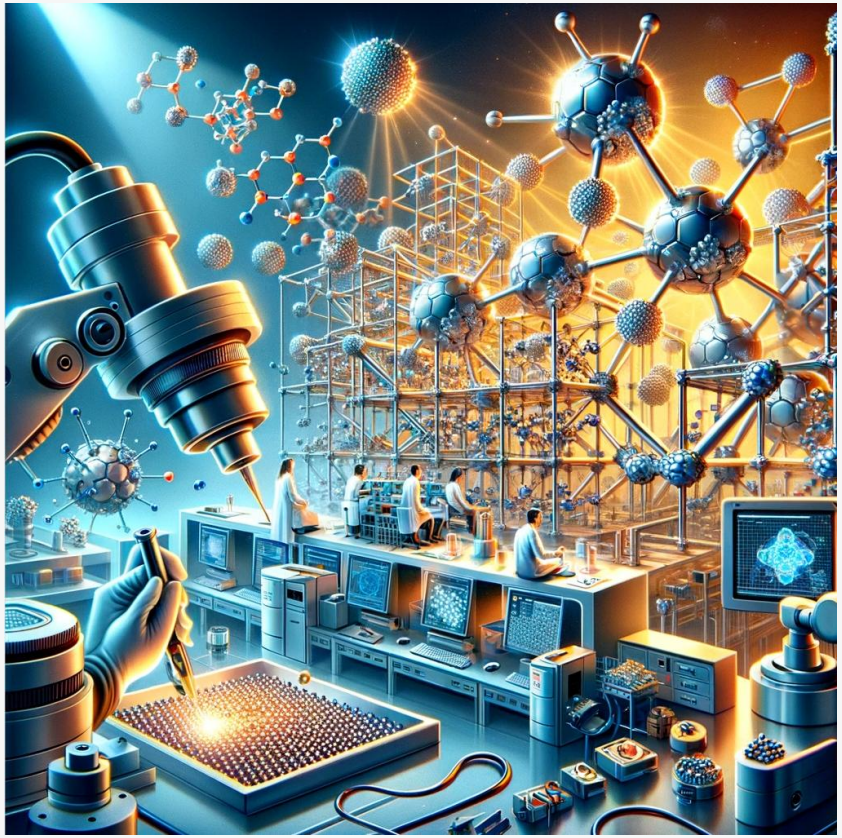
分子组装



未来信息材料的制备方法-----扫描探针原子操纵方法

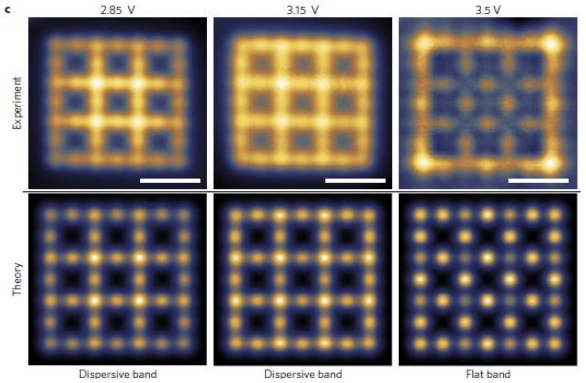
IBM:原子机器人

未来的原子制造场景



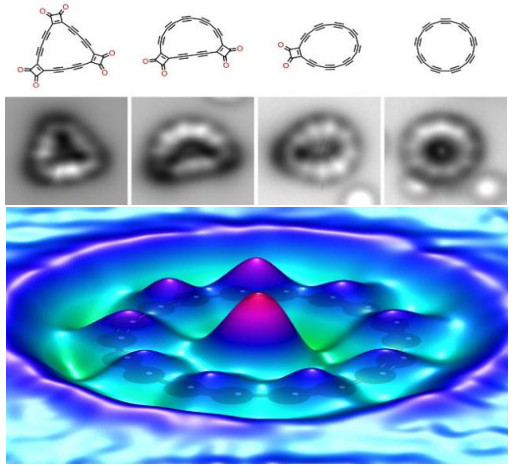
基于扫描探针原子操纵技术初步实现特定结构的人工量子晶格

Cl 原子缺陷构筑Lieb晶格



R. Drost, et al. *Nat. Phys.* **13**, 668 (2017)

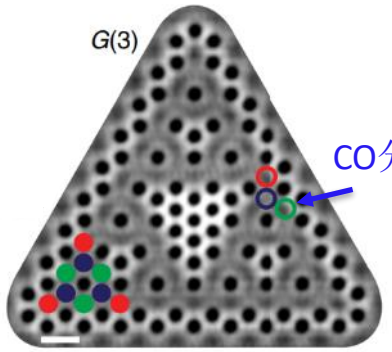
原子操纵构筑18个碳原子环



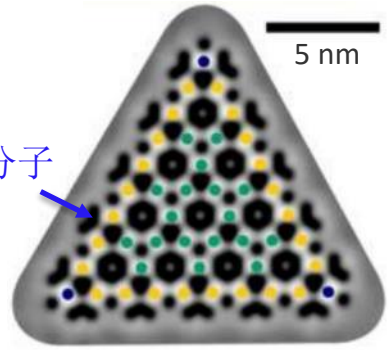
R. Ma, et al. *Nature*, **577**, 60 (2020)

人工电子晶格的电子态

三角分形晶格

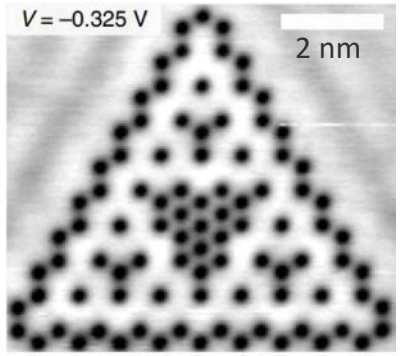


Kagome晶格

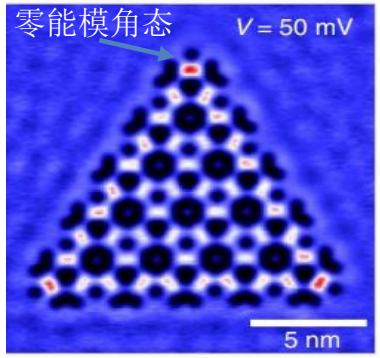


CO分子

电子态map图



电子态map图

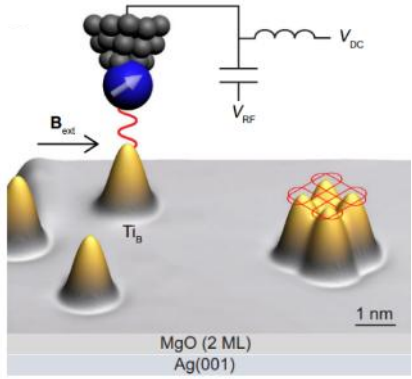


荷兰Utrecht大学：研究了CO分子分形结构的电荷序和二阶拓扑绝缘电子态，实现了 100 μeV 的能量分辨率。

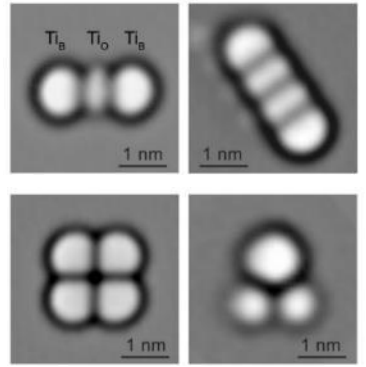
S. N. Kempkes, et al. *Nat. Mater.* **18**,1297(2019)

人工磁性晶格的自旋态

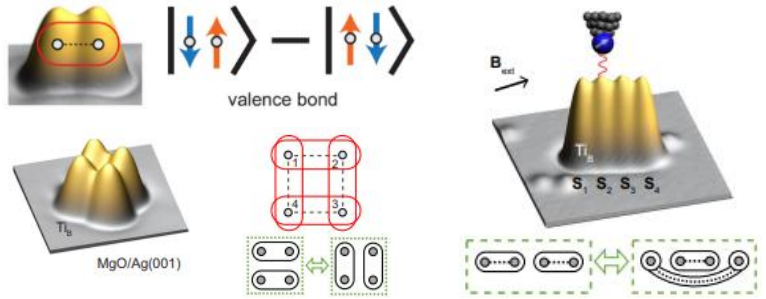
ESR-STM研究Ti原子的物态



不同人工自旋磁体的STM像



不同Ti原子构型具有不同的自旋耦合态

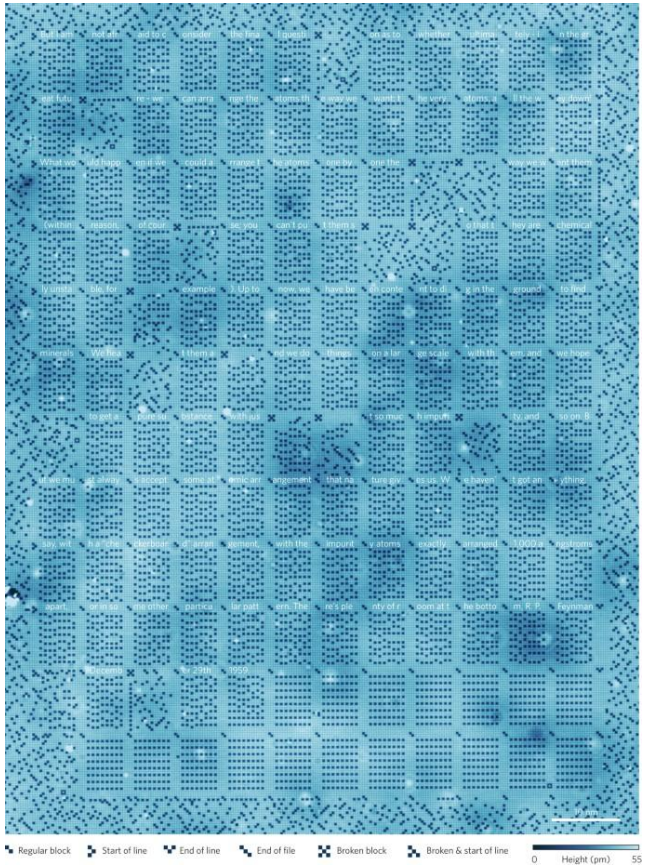


IBM研究中心：原子操纵构筑和研究了了三自旋和四自旋相互作用自旋体系，实现了 100 neV 的自旋能量分辨率。

K. Yang, et al. *Nat. Comm.* **12**,993 (2021)

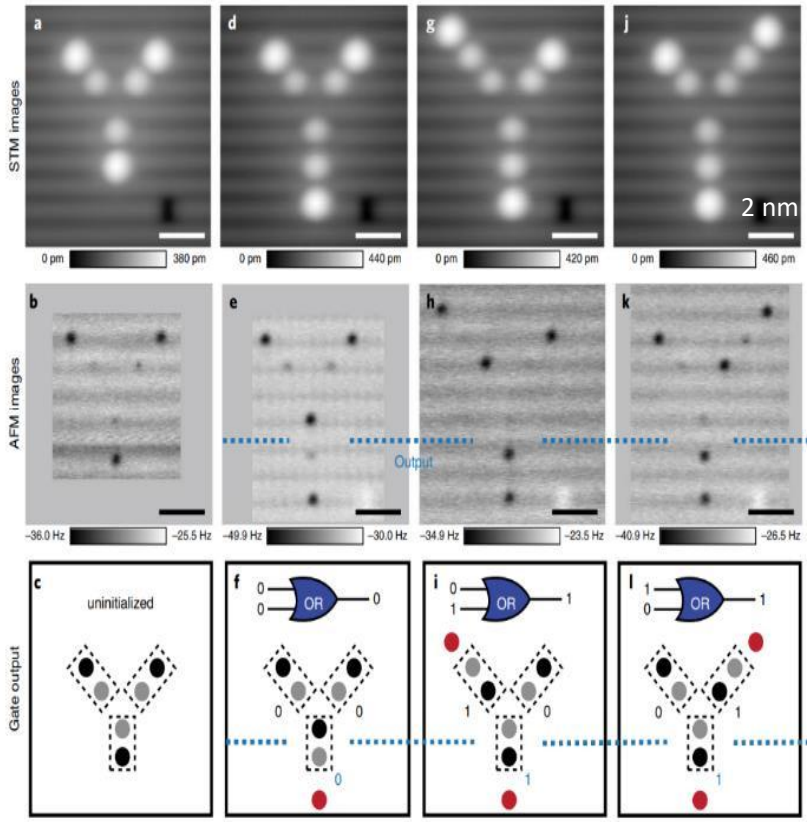
基于扫描探针原子操纵技术初步实现特定功能的信息器件

初步实现宏量原子操纵



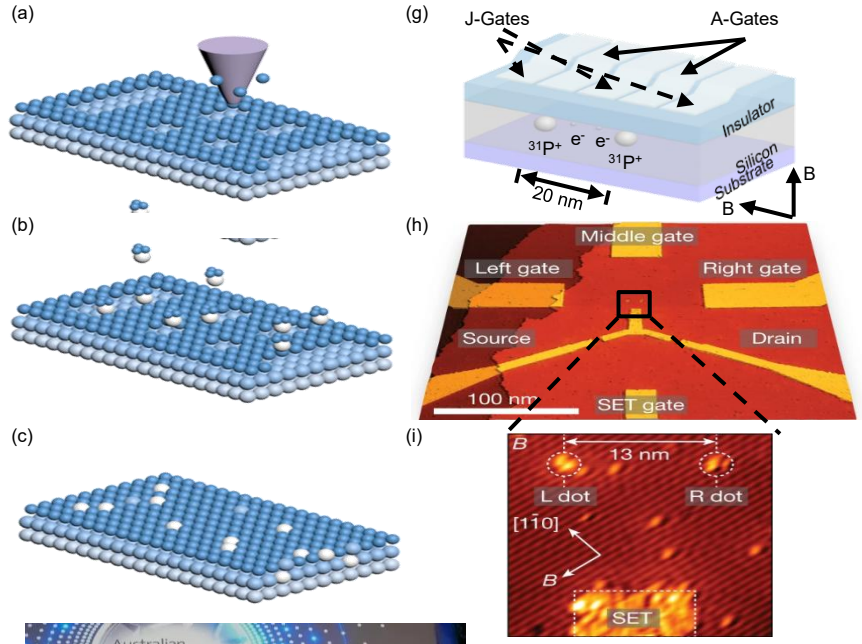
荷兰Delta大学：自动操纵Cu(100)表面的Cl空位实现了1016位字节（8128个bit，5万余原子）的单原子信息存储模型器件

双硅原子逻辑门模型器件



加拿大Alberta大学：原子操纵Si双原子形成Y形的“或”门逻辑器件，施加针尖电流初步实现了0和1态的输出

双量子比特器件



澳大利亚
硅量子计算公司

澳大利亚New South Wales大学：扫描探针操纵P原子精准放置于Si基材中构建出器件，器件包含四个门来控制量子比特的电化学势

A. F. Otte, et al. *Nat. Nanotech.* **11**, 926 (2016)

T. Huff et al., *Nat. Electronics.* **1**, 636 (2018)

M. Y. Simmons et al., *Nature* **571**, 371 (2019)

http://n04.iphy.ac.cn/

我们有能力去开展

未来量子信息材料与新物性研究?

“未来量子信息材料与新物性”研究团队的人员构成

N04:STM的原子尺度构筑及物性表征

李 更
副研究员/博导

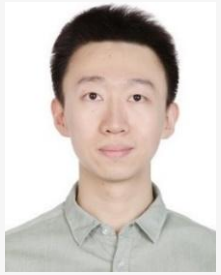
陈 辉
副研究员/博导

博后：李思宇、韩相和

极低温
STM

极低温
AFM

朱诗雨
副研究员



黄 立
副主任工程师

博后：郭剑峰、郑琦

杨海涛
研究员

郭 辉
副研究员

博后：胡国静、弓子召
赵振、祝轲

鲍丽宏
研究员/博导

博后：张凯

N12:MBE构筑低维信息材料及器件制作

□ 强有力的团队+全链条的研究

高鸿钧院士介绍

高鸿钧： 院士, 曾任中科院副院长

发展中国家科学院院士

德国国家科学院院士

国家杰出青年基金获得者

陈嘉庚数理科学奖（2018）

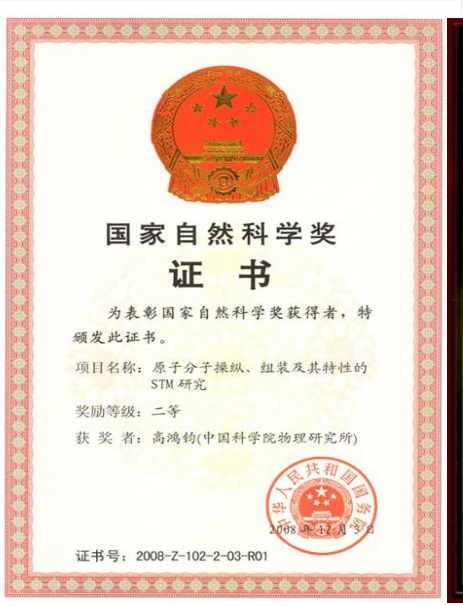
中国科学院杰出科技成就奖 （2013）

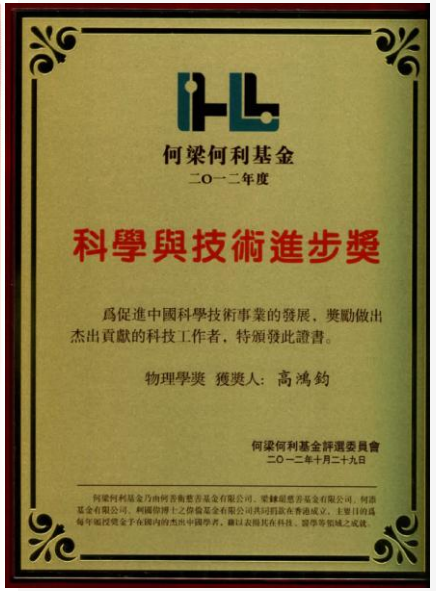
何梁何利基金科学与技术进步奖(2012)

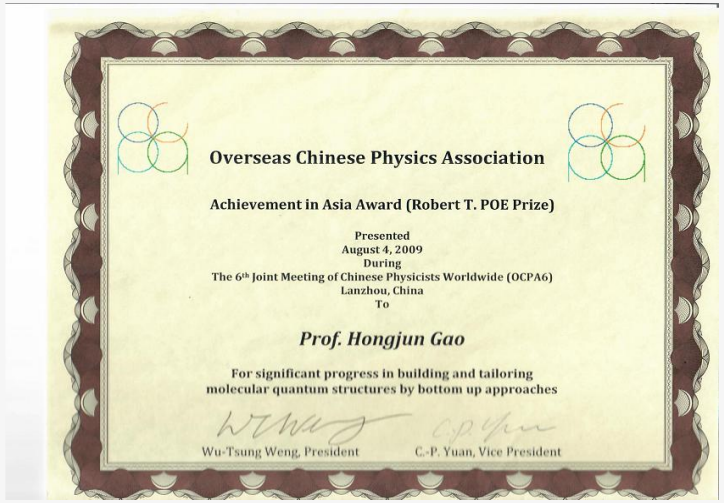
德国“洪堡研究奖”（2010）

发展中国家科学院(TWAS)物理奖（2009）

全球华人物理学会“亚洲成就奖”（2008）


国家自然科学奖
证 书
为表彰国家自然科学奖获得者，特颁发此证书。
项目名称：原子分子操纵、组装及其特性的STM研究
奖励等级：二等
获 奖 者：高鸿钧(中国科学院物理研究所)
证书号：2008-Z-102-2-03-R01


何梁何利基金
二〇一二年度
科學與技術進步獎
爲促進中國科學技術事業的發展，獎勵做出杰出貢獻的科技工作者，特頒發此證書。
物理學獎 獲獎人：高鸿鈞
何梁何利基金評選委員會
二〇一二年十月二十九日


Overseas Chinese Physics Association
Achievement in Asia Award (Robert T. POE Prize)
Presented
August 4, 2009
During
The 6th Joint Meeting of Chinese Physicists Worldwide (OCPA6)
Lanzhou, China
To
Prof. Hongjun Gao
For significant progress in building and tailoring molecular quantum structures by bottom up approaches
Wu-Tsung Weng, President
C.-P. Yuan, Vice President

高鸿钧院士介绍

研究方向：在单原子、单分子层次上精准制备低维功能纳米结构、新奇物性的高精度表征及多层次调控、基于新奇物性的功能器件构筑。重点研究超导拓扑材料的拓扑物态及其在量子计算中的应用以及新型低维量子体系的物性研究。

- **文章发表：**SCI文章500余篇，其中Science 4 篇、 Nature 3 篇、 Phys. Rev. Lett. 25 篇、Nature子刊 48 篇、长篇综述Chem. Soc. Rev. 1 篇、Nano Lett. 27 篇、Adv. Mater. 25 篇，SCI引用50000余次。
- **获奖情况：**马约拉纳任意子获得了2018年 “中国十大科技进展/新闻”、 2020年，高鸿钧院士领导的“马约拉纳任意子的直接观测研究团队”获中科院先进集体称号等。

■学术任职：第九届中国真空学会理事长，国际真空科学、技术与应用联合会纳米科学委员会主席，Chinese Physics B、物理学报主编，2D Materials编委等。

■承担项目情况：“低维信息器件”基金委基础科学中心首席科学家，“新型低维体系的结构设计和精准制备”国家重点研发计划“纳米科技”重点专项首席科学家，“高质量硅插层石墨烯的可控制备”国家重点研发计划“纳米科技”重点专项首席科学家等。

团队具有一流的科研“利器”

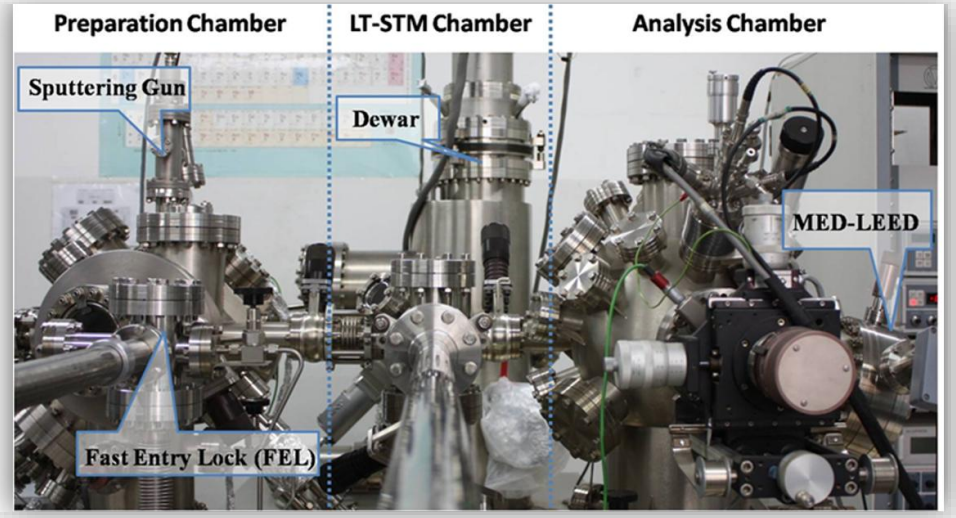
高质量单晶功能衬底制备系统

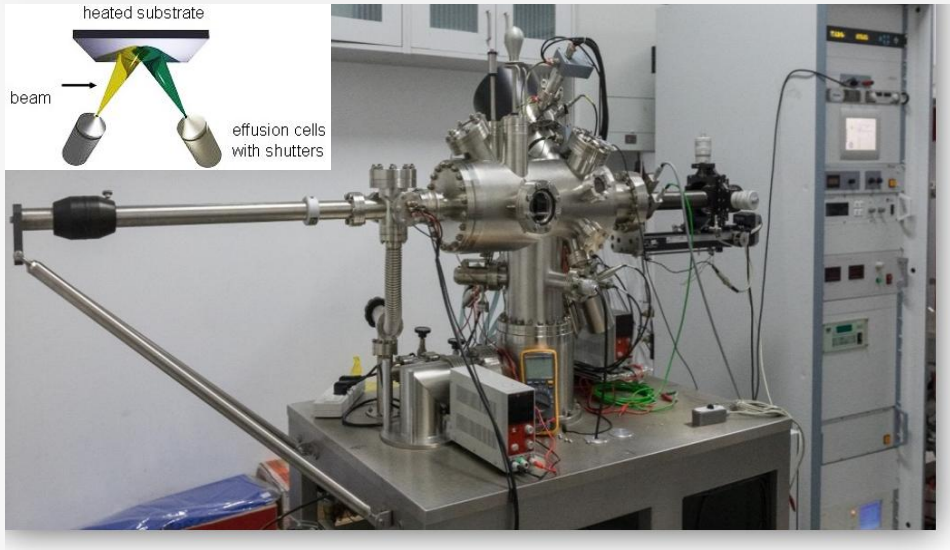
高温激光浮区单晶炉

激光脉冲沉积系统（PLD）

多套MBE联合制备系统

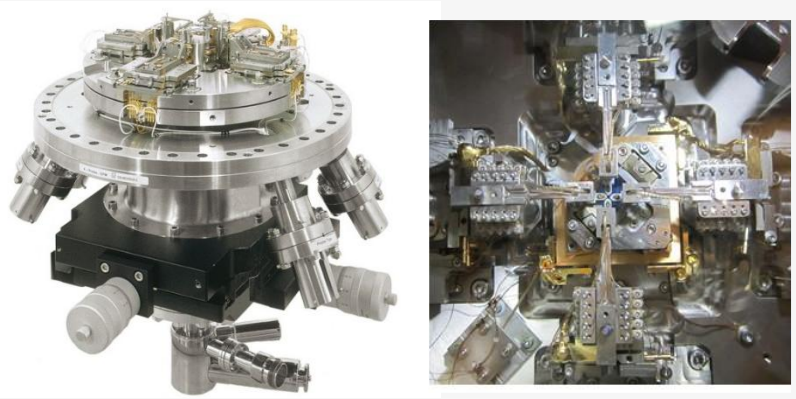
超高真空分子束外延系统：原子级精准生长低维材料

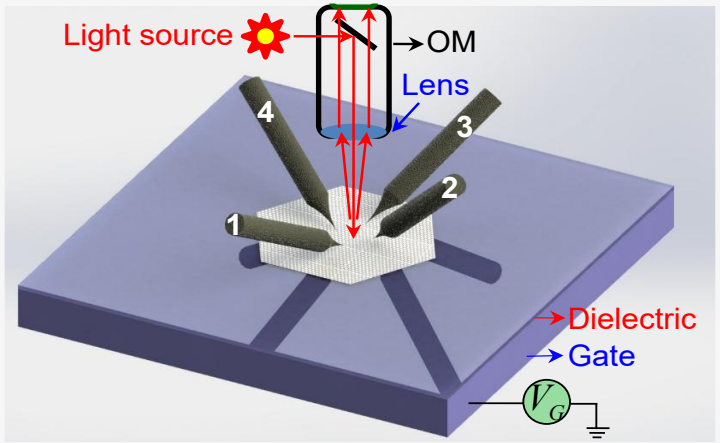




团队具有一流的科研“利器”

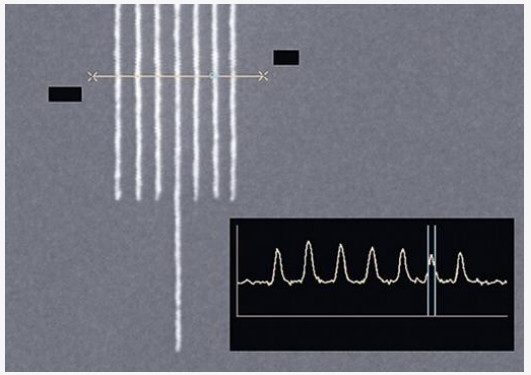
低温高真空四探针STM系统
原位电学输运性能研究





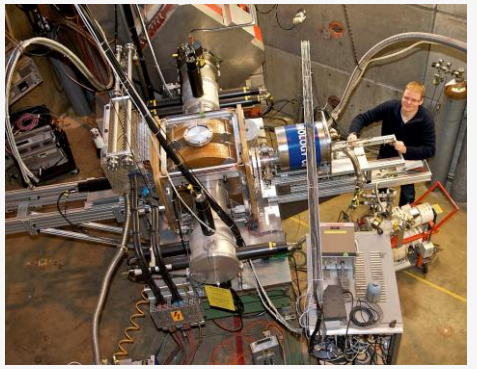
电子束光刻系统（EBL）
器件制备

Raith -eLine Plus



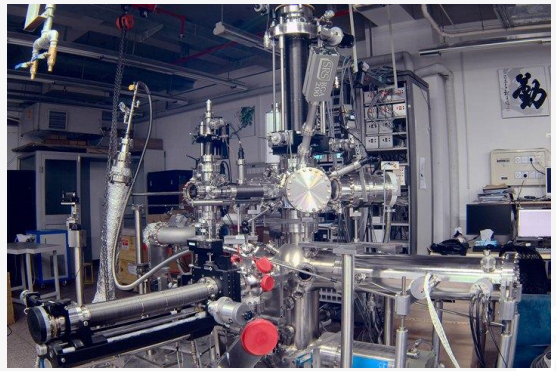
低维信息材料精准表征

缪子自旋共振 (μSR)



瑞士PSI, Detection： 0.01 Oe

时间分辨ARPES

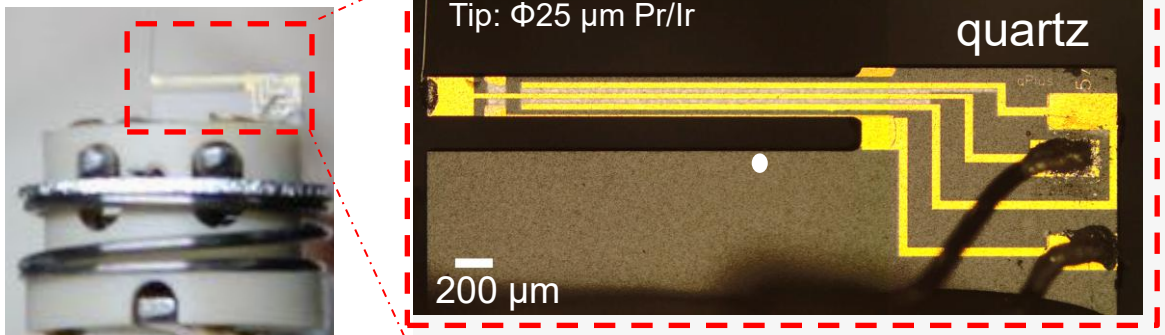


上交大, Time scale： 70 fs

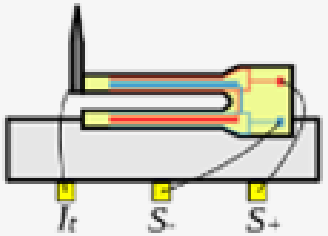
团队具有一流的科研“利器”

低温超高真空nc-AFM/STM-MBE系统：低维材料低温物性研究系统

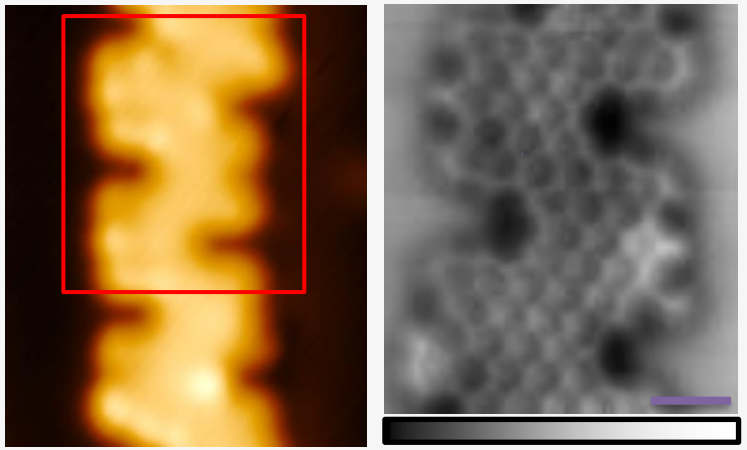
4 K，可以进行化学键分辨成像



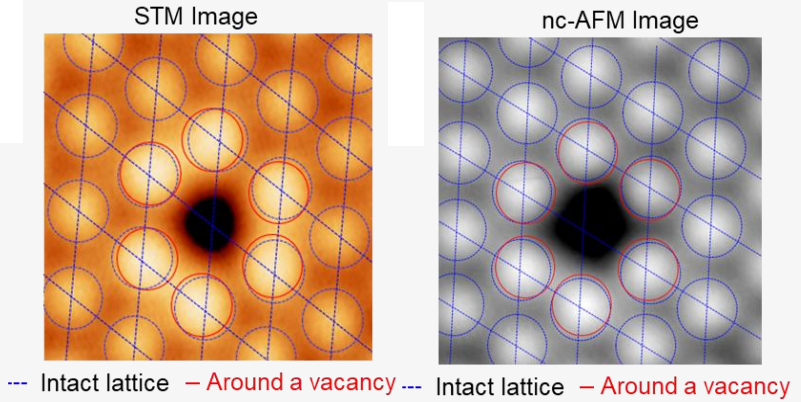
STM/AFM 针尖



qPlus 型
力传感器



S掺杂的石墨烯纳米带（局部C-S键断裂）



研究激发态的极化子起源

团队具有一流的科研“利器”

自行设计全系列极低温-强磁场-超高真空隧道显微镜

400 mK， 11 T

100 mK，11 T

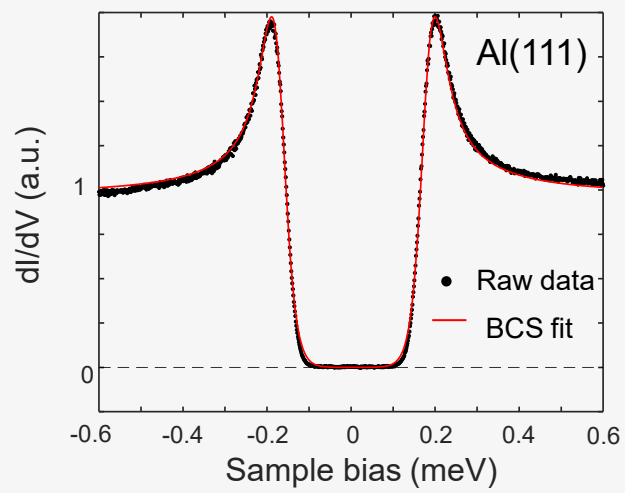
30 mK，9+2+2 T

5 mK，16 T

^{3}He-^{4}He制冷系统，能量分辨率: ΔE = 50.00 μeV，有效温度: T_{eff} = 50-170 mK

团队具有一流的科研“利器”

居国际前沿的测量精度

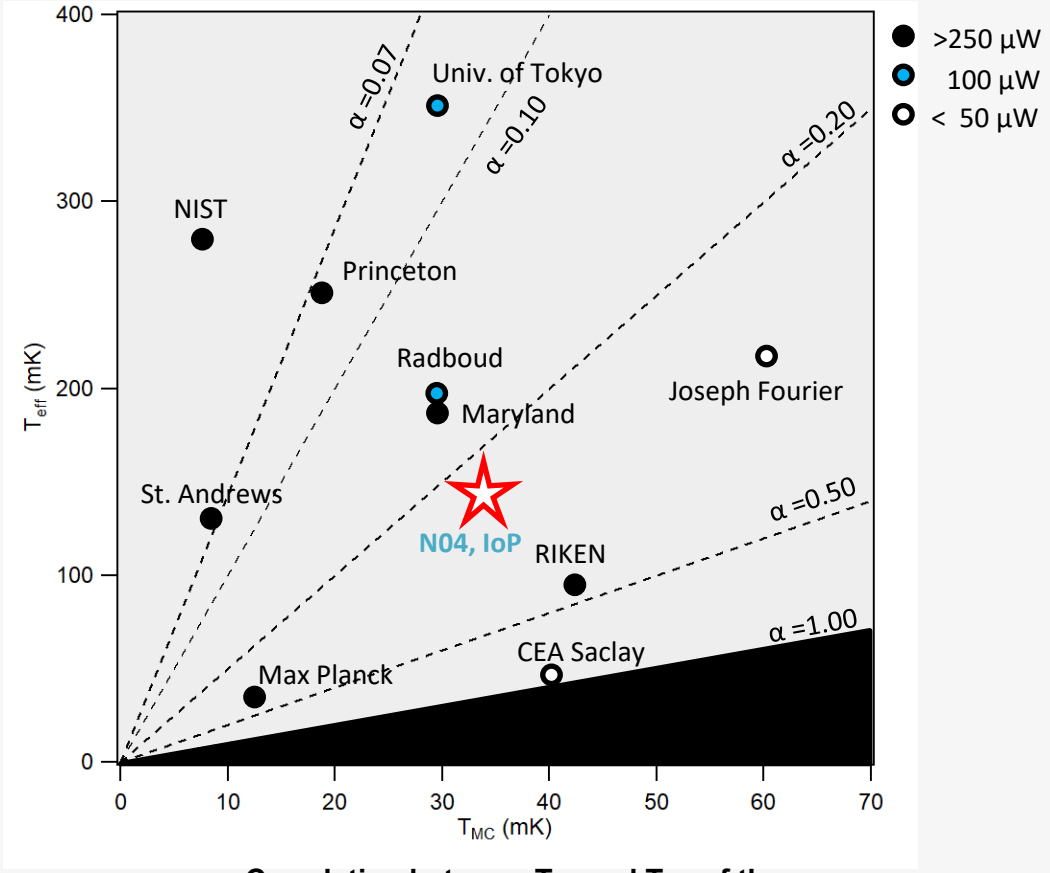


Typical tunneling spectrum of a W tip measured on Al(111) surface

Sample Temperature: T_{sample} = 34 mK

Energy resolution: ΔE = 50 μeV

Effective temperature: T_{eff} = 170 mK



Correlation between T_{eff} and T_{MC} of the representative DR-STM systems

团队具有广泛的国际合作关系

M. Ouyang
U. Maryland

H. Fuchs
U. Münster

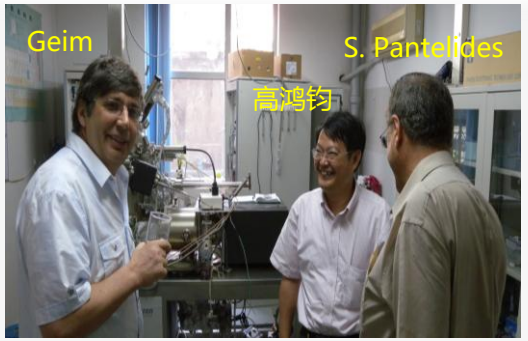
W. A. Hofer
Newcastle U.

A. Geim
U. Manchester

X. L. Feng
Technische U. Dresden

Z. Q. Wang
Boston College

每年联合举办量子材料与器件研究相关的国际会议



英国纽卡斯尔大学W. A. Hofer 教授参与组会讨论

我们团队的成果如何?

文章发表情况

2024年

1. 一维到二维生长的石墨烯螺旋中的手性转化 *Nature Mater. volume 23, 331 (2024)*
2. 笼目晶格磁性外尔半金属中 “自旋轨道极化子”的原子级精准构筑与物性调控 *Nature Commun. 15, 2301 (2024)*
3. 新型钛基笼目金属$CsTi_3Bi_5$的创制及其超导电性和电子向列相 *Nature Commun. 15, 9626 (2024)*
4. 金模板辅助剥离法制备大面积二维材料及其莫尔超晶格的高效精准构筑 *Adv. Mater. 36, 202313511 (2024)*

2023年

1. 多种超导体中发现配对密度波 *Nature 618, 910 (2023)*
2. 实现了Ballbot”型吸附的一维共价分子链 *Nat. Chem. 15, 1737 (2023)*
3. 笼目超导体中非平庸能带结构和电子向列序 *Nat. Phys. 19, 1827 (2023)*
4. 转角石墨烯纳米带异质结构 *Nat. Commun. 14, 1018 (2023)*

2022年

1. 大面积、高度有序和可调控的马约拉纳零能模格点阵列的实现 *Nature 606, 890 (2022)*
2. 在CoSi手性单晶中发现手性锁定电荷密度波 *Nat. Commun. 13, 2914 (2022)*
3. 利用MBE生长出新型二维材料Si_9C_{15}的构筑 *Adv. Mater. 34, 2204779 (2022)*
4. 制备出钛掺杂笼目超导体$CsV_{3-x}Ti_xSb_5$并建立了多种电子关联相的演化相图 *Sci. Bull. 67, 2176 (2022)*
5. 揭示笼目超导体CsV_3Sb_5中有序化电子态对费米面的影响 *Phys. Rev. Lett. 129, 157001 (2022)*

文章发表情况

2021年

1. 笼目超导体中配对密度波的发现 — *Nature 599, 222 (2021)*
2. LiFeAs中实现涡旋马约拉纳零能模 — *Nature Commun. 12, 4146 (2021)*
3. 20纳秒写入/擦除时间超快非易失存储器的实现 — *Nat. Nanotechnol. 16, 882 (2021)*

2020年

1. 用STM/STS观测到马约拉纳零能模的近量子化电导平台 — *Science, 367, 189(2020)*
2. 在铁基超导体$CaKFe_4As_4$的磁通涡旋中直接观察到Majorana零能摸 — *Nature Commun., 11, 5688(2020)*
3. 新型二维原子晶体硒化亚铜的制备及其纯热驱动结构相变 — *Adv. Mater., 32, 1908314(2020)*

2019年

1. 可调控物性和构造新器件的“石墨烯折纸术” — *Science 365, 1036 (2019)*
2. 单分子结中可调的巨磁电阻现象 — *Nature Common. 10, 3599 (2019)*
3. 铁基超导体中涡旋基态的半整数量级的偏移 — *Nature Physics 15, 1181 (2019)*

2018年

1. 在铁基超导体材料中观察到马约拉纳束缚态 — *Science 362, 333 (2018)*
2. 蜂窝状CuSe单层结构及其拓扑物性 — *Adv. Mater. 30, 1707055 (2018)*
3. 利用AFM针尖调控双层和三层石墨烯中畴壁孤子 — *Nat. Nanotechnol. 13, 204 (2018)*

代表性研究成果 (I)：铁基超导体中的马约拉纳零能模

每年必发Science、Nature的团队，今年果然又发了！

原创 倪思洁 中国科学报 2022-06-09 08:53 发表于北京

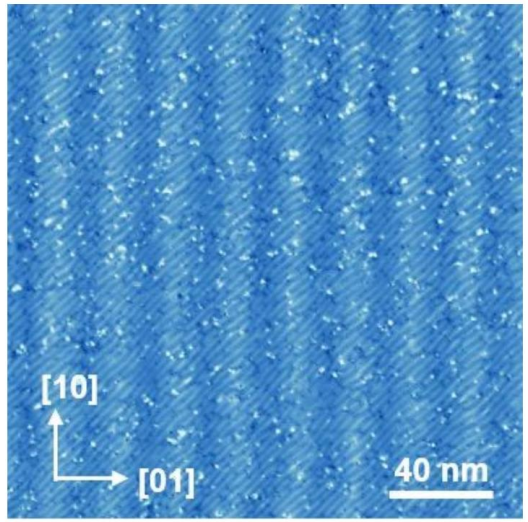
文 | 《中国科学报》记者 倪思洁

奋进新征程 建功新时代

2021年8月底的一个深夜，北京北四环边，白日的喧嚣已归于平静，中国科学院物理研究所（以下简称物理所）的灯仍然亮着，实验室里静得只剩下呼吸声。

在一个裹着银色锡纸的仪器边，副研究员李更等待着实验结果。

几乎就在一瞬间，困意彻底远离了他。因为此时的电脑屏幕上，原本应该平整的四方图案出现了竖向的波纹，波纹中还穿插着斜向的条纹。

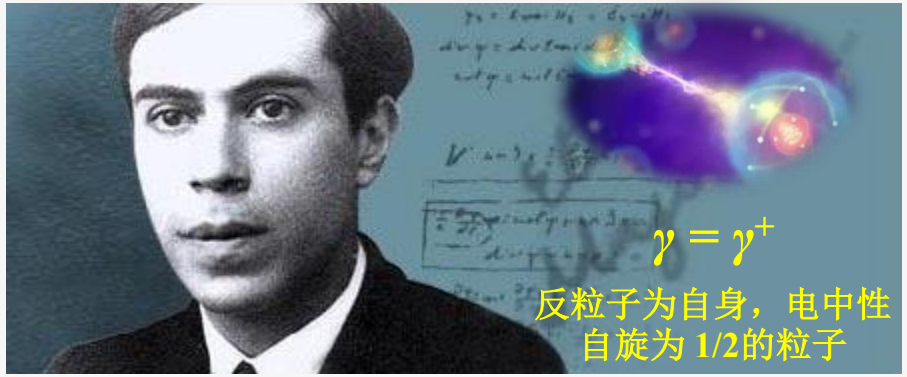


大面积、高度有序和可调控的“马约拉纳零能模‘格点阵列’”的实现

Nature 606, 890 (Published: 08 June 2022)

拓扑量子比特构筑基元：马约拉纳零能模

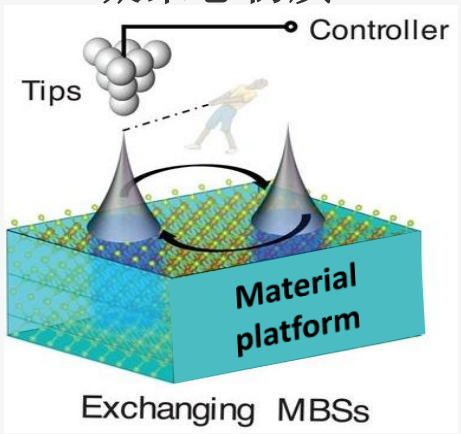
Ettore Majorana(意大利)预言马约拉纳费米子



中微子

轻子的一种，最基本的粒子之一，质量很小、不带电

凝聚态物质

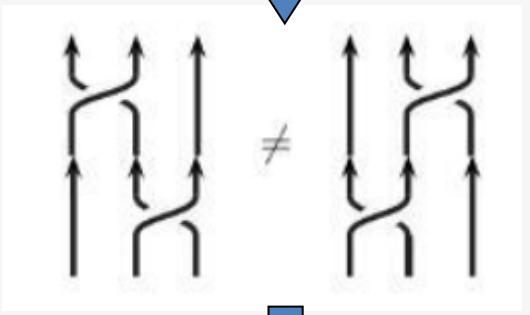


其中的马约拉纳费米子是一种特殊的零能激发态(准粒子)，只在(准)二维系统中出现---马约拉纳零能模

马约拉纳零能模(MZM)——**服从非阿贝尔统计规律，是构筑拓扑量子比特的基本单元**

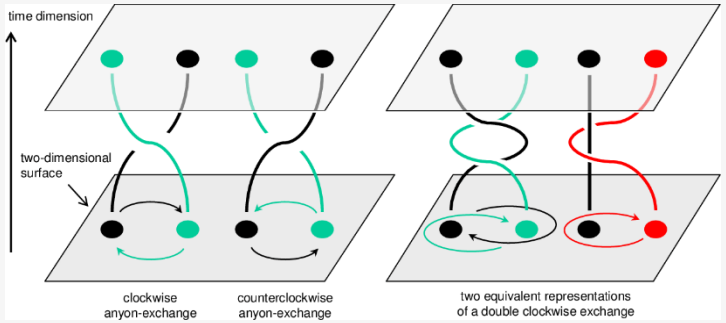
$$\Psi(\alpha_1,\alpha_2) = e^{i\beta}\Psi(\alpha_2,\alpha_1)$$

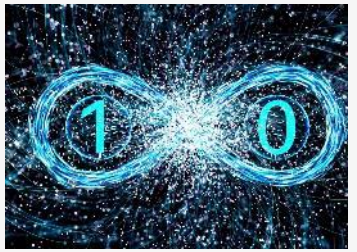
β 可为任意相位 ↓ 编织操作



矩阵乘法
非局域波函数
局部微扰不会影响整体

↓ 构筑拓扑量子比特

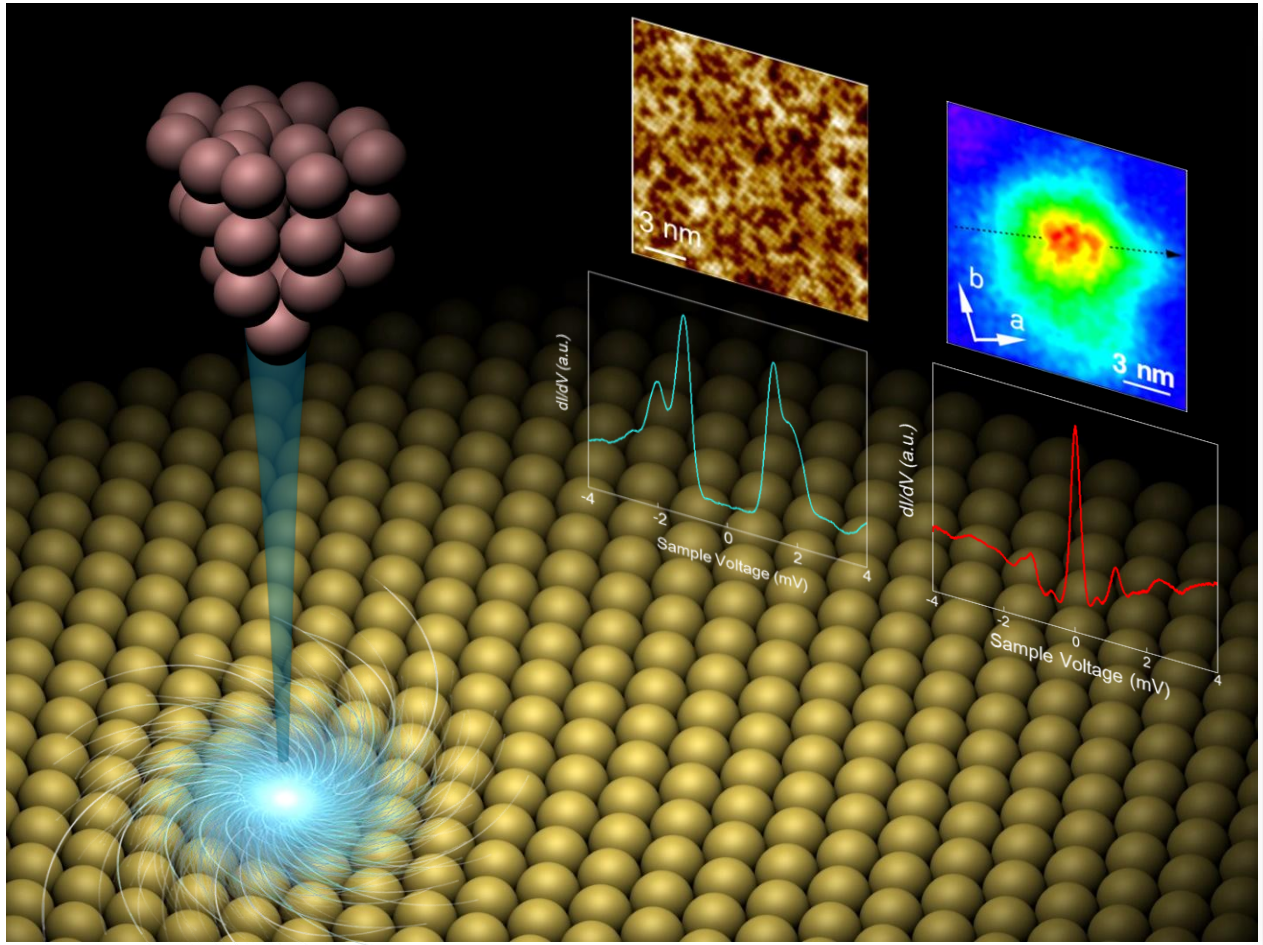


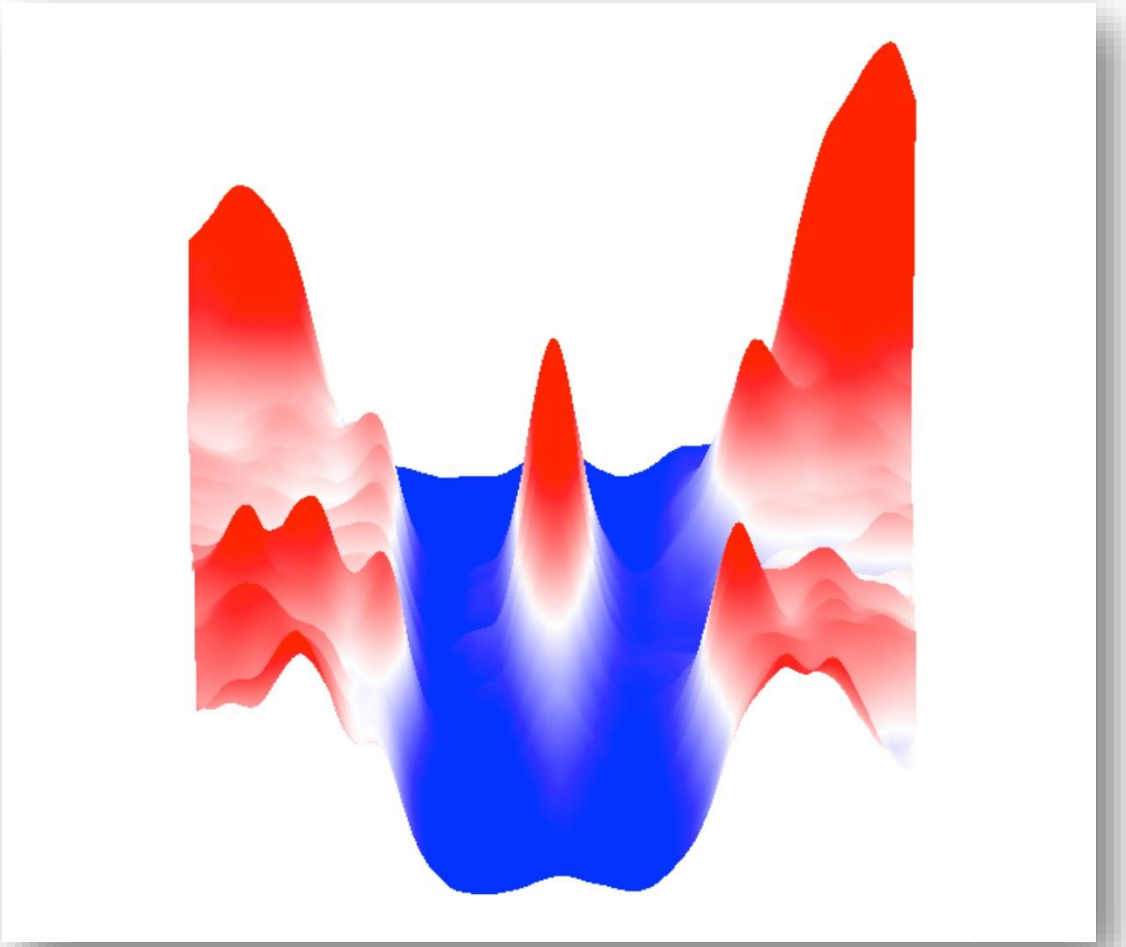


C. Nayak *et al., Rev. Mod. Phys.* (2008)

应用于未来拓扑量子计算，具有高容错率，极高的运算量和运算速度！

用STM在铁基超导体Fe(Te, Se)中探测到马约拉纳零能模

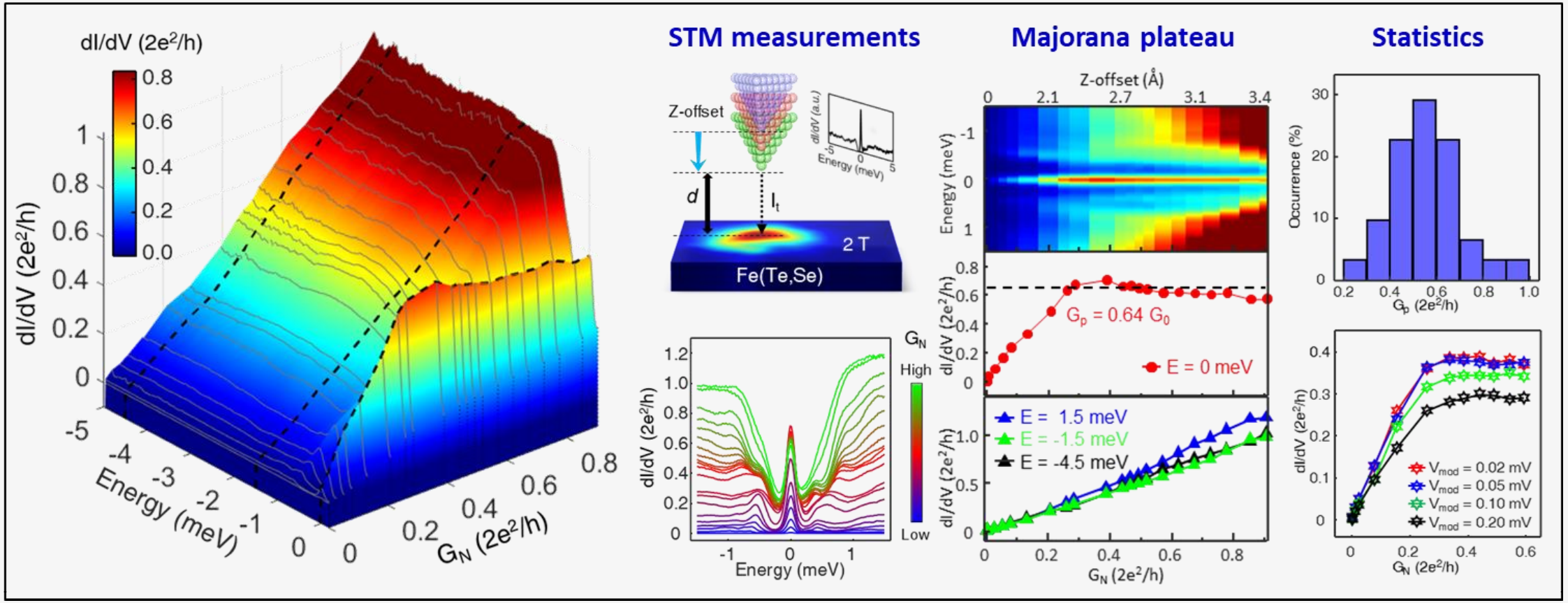




- 首次在单一块体超导材料Fe(Te, Se)中发现马约拉纳零能模
- 它的纯度高且能在相对高的温度下实现，不容易受到其他准粒子的干扰

H.-J. Gao et al., Science, *362*, *333* (2018)

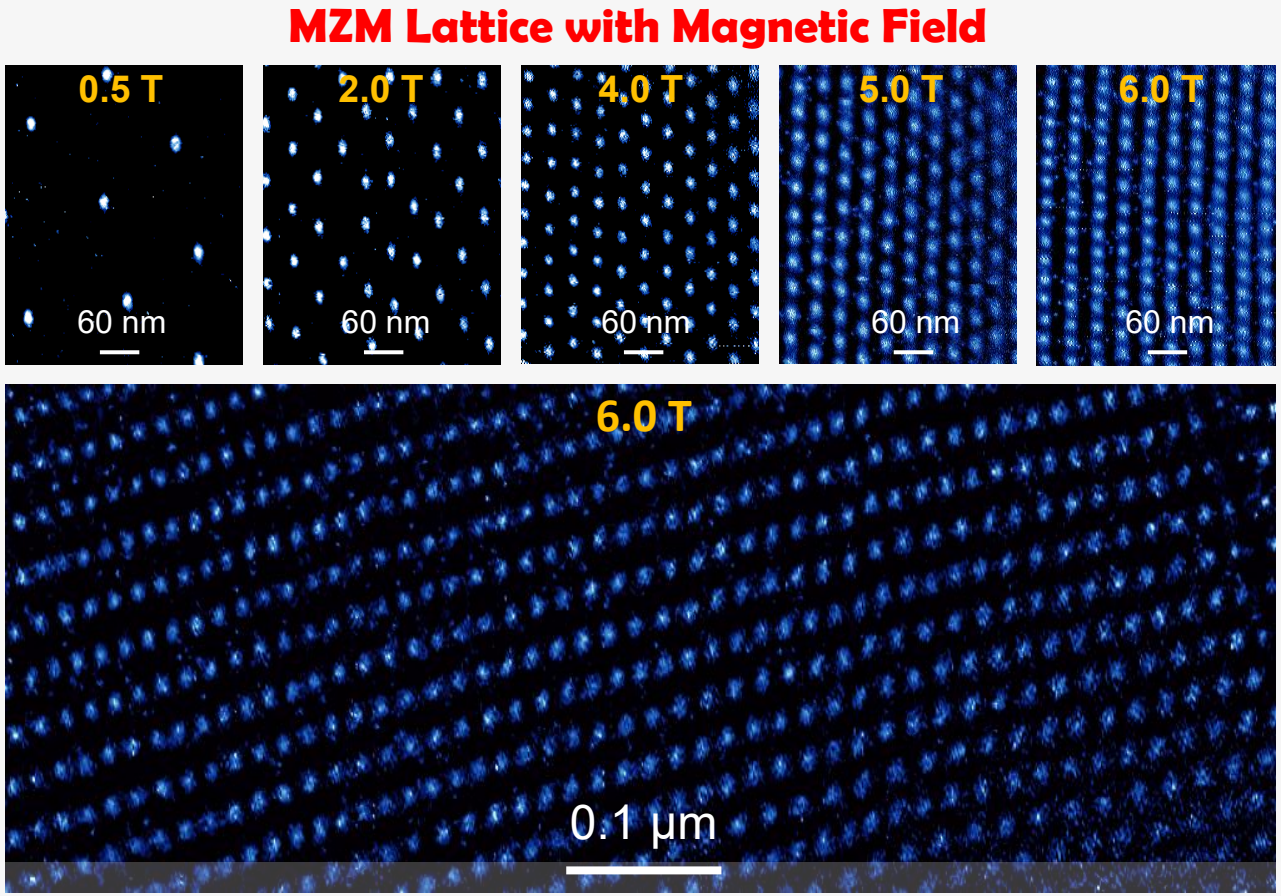
马约拉纳零能模的实验证据2：近量子化电导平台



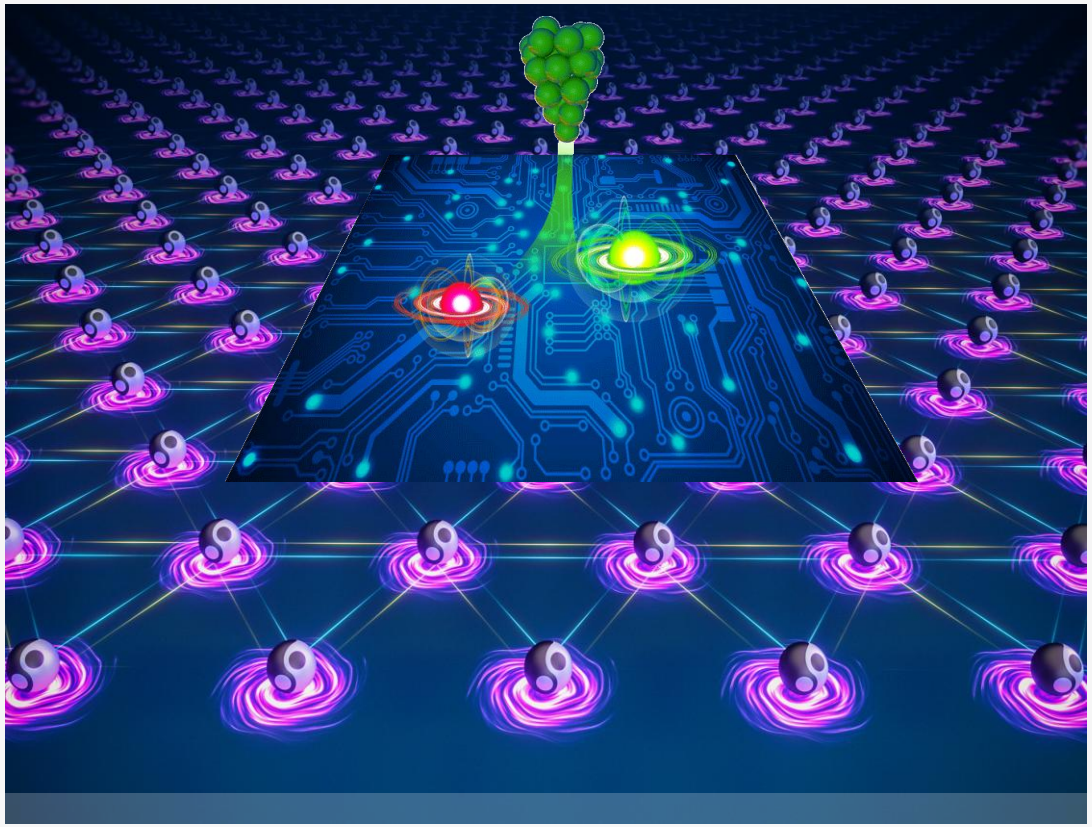
- 在国际上首次观测到了磁通涡旋中马约拉纳零能模的近量子化电导平台，证实了马约拉纳零能模的本征粒子-空穴对称性，是马约拉纳零能模存在的具有里程碑意义的实验证据。

H.-J. Gao et al., Science 367, 182 (2020)

大面积、高度有序和可调控的“马约拉纳零能模格点阵列”的实现



马约拉纳零能模阵列的编织操作示意图

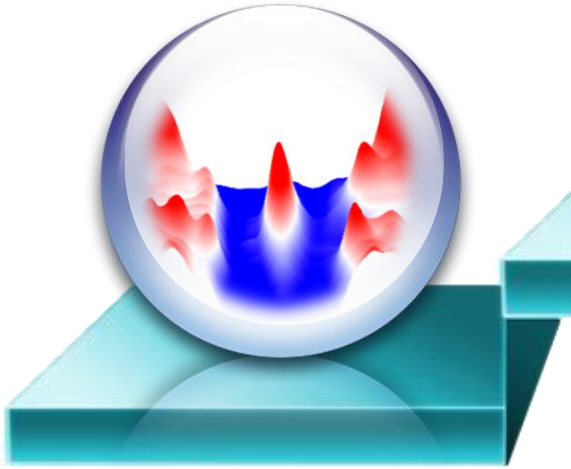


- 利用大面积、有序可控的马约拉纳零能模阵列实现编织操作，进一步实现拓扑量子计算。

H.-J. Gao et al., Nature, 606, 890 (2022)

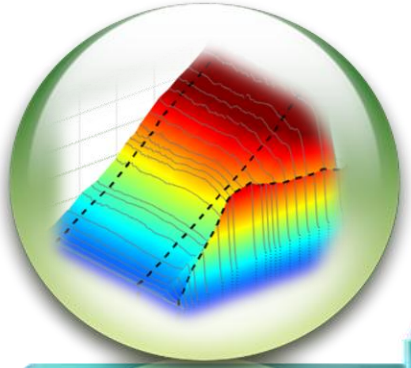
铁基超导马约拉纳零能模研究的发展路线图

➢ 首次观测到“纯净的”马约拉纳零能模



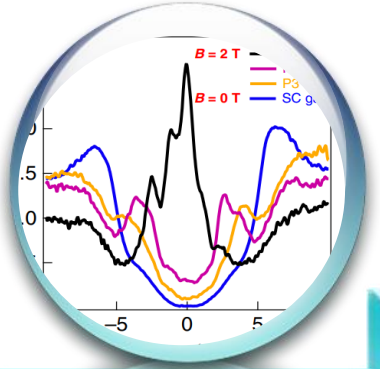
Science (2018)

➢ 马约拉纳零能模进一步确凿的实验证据



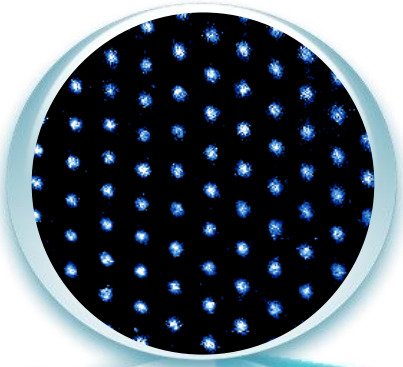
Science (2020)
Nat. Phys. (2019)

➢ 铁磷基超导体中马约拉纳零能模



Nat. Commun. (2020)
Nat. Commun. (2021)
Nat. Commun. (2021)
Nat. Commun. (2021)

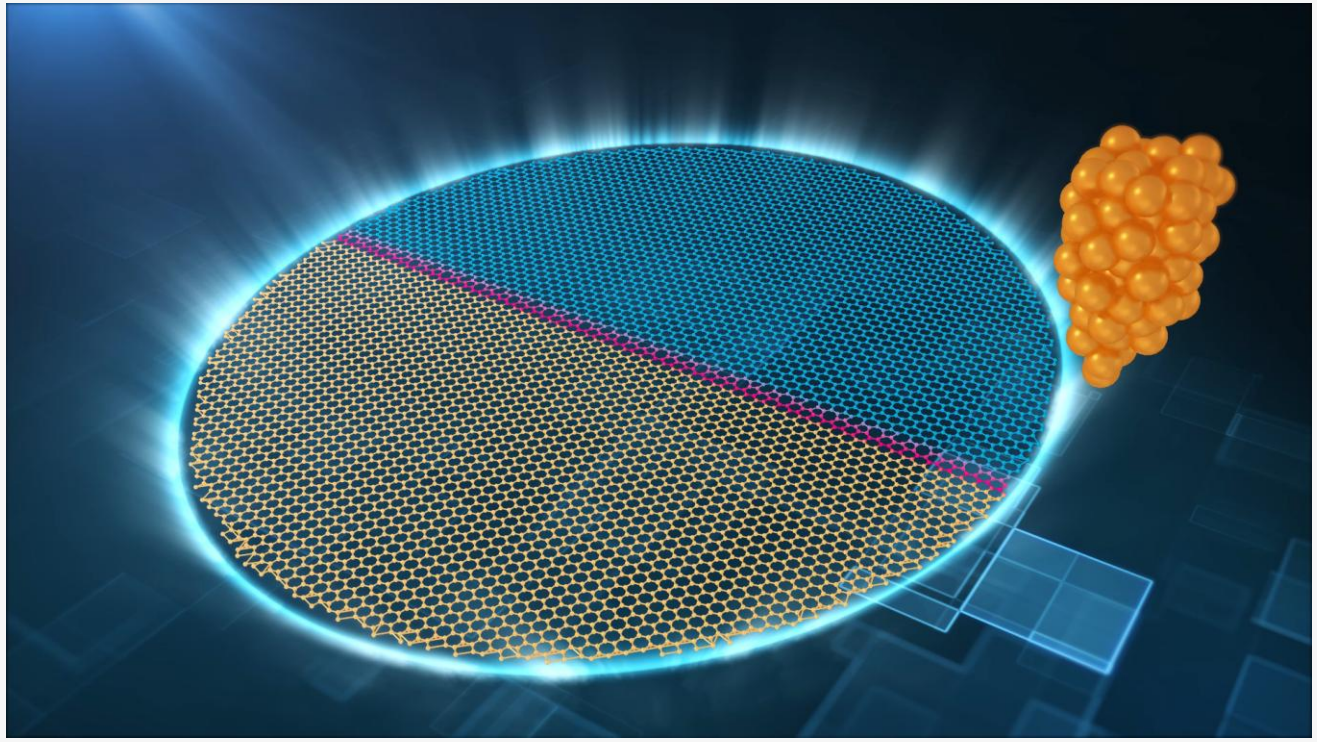
➢ 铁砷基超导体中马约拉纳零能模有序可调阵列

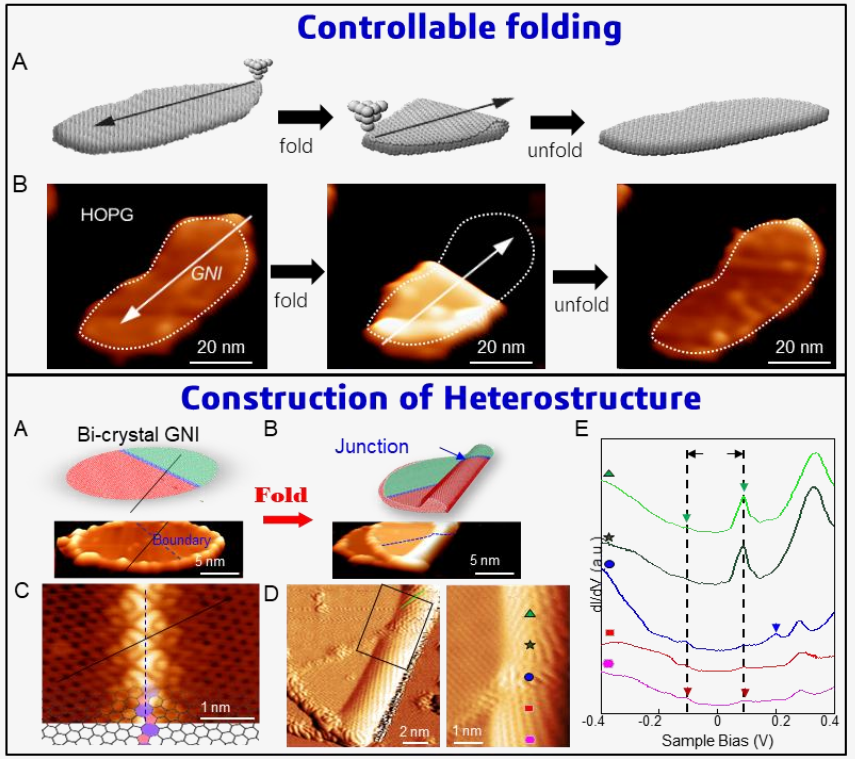


Nature (2022)

代表性研究成果 (II)：原子操纵

原子操纵: 可调控物性和构造新器件的“石墨烯折纸术”

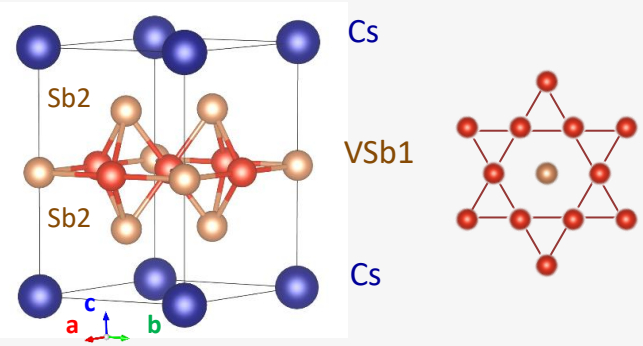


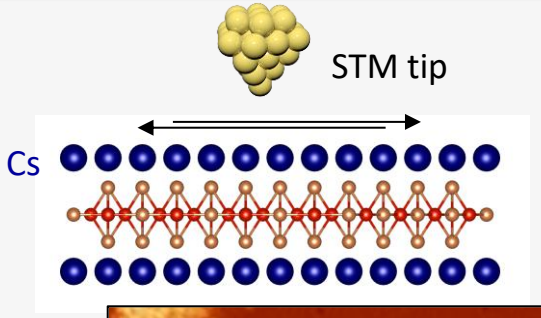


在国际上首次实现了原子级精准控制、按需定制的石墨烯纳米结构，该研究工作是目前世界上最小尺寸的石墨烯折纸，对构筑新型量子材料与量子器件（机器）及其应用具有重要意义。

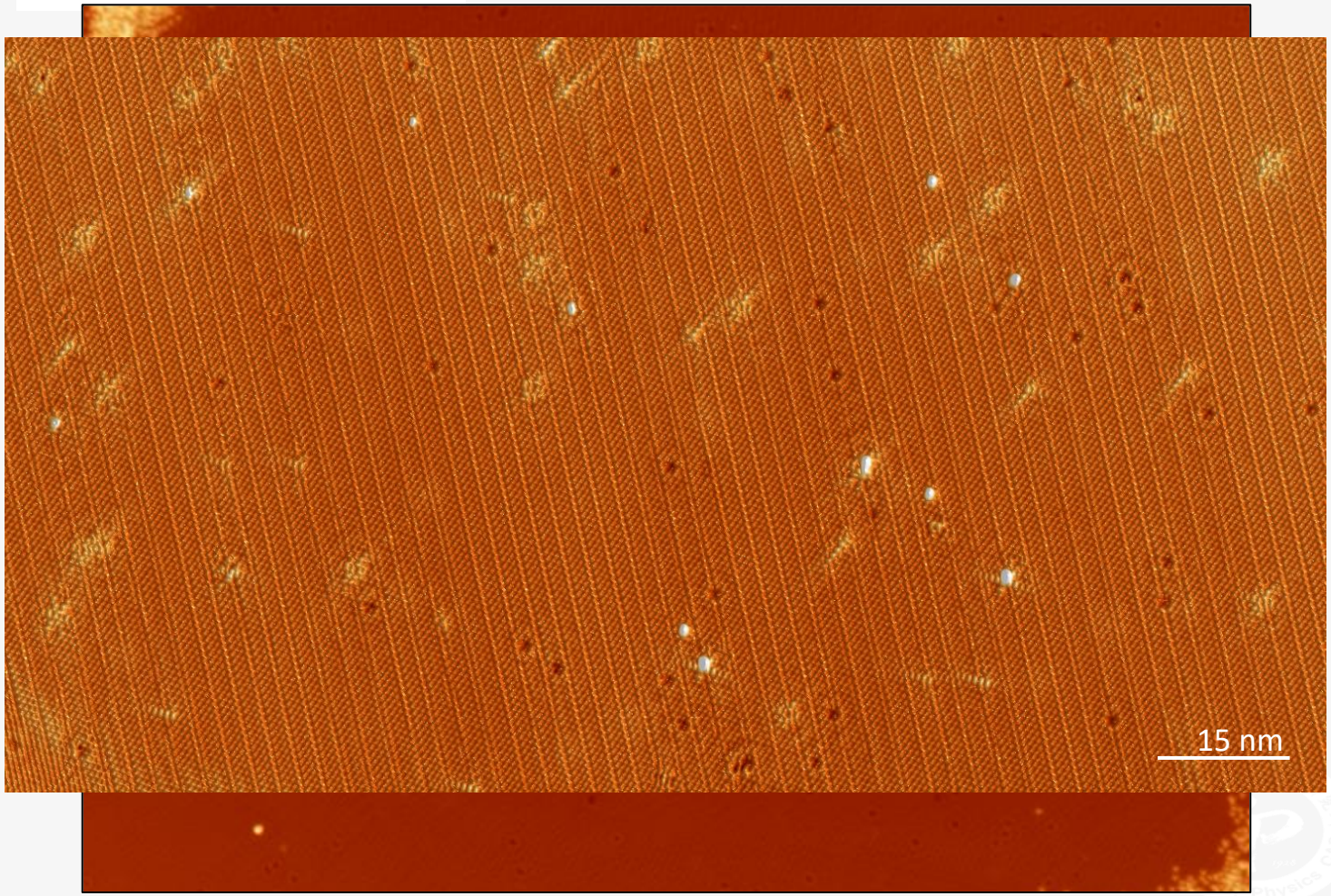
H.-J. Gao et al., Science 365, 1036 (2019)

原子操纵：“笼目”超导体中的配对密度波

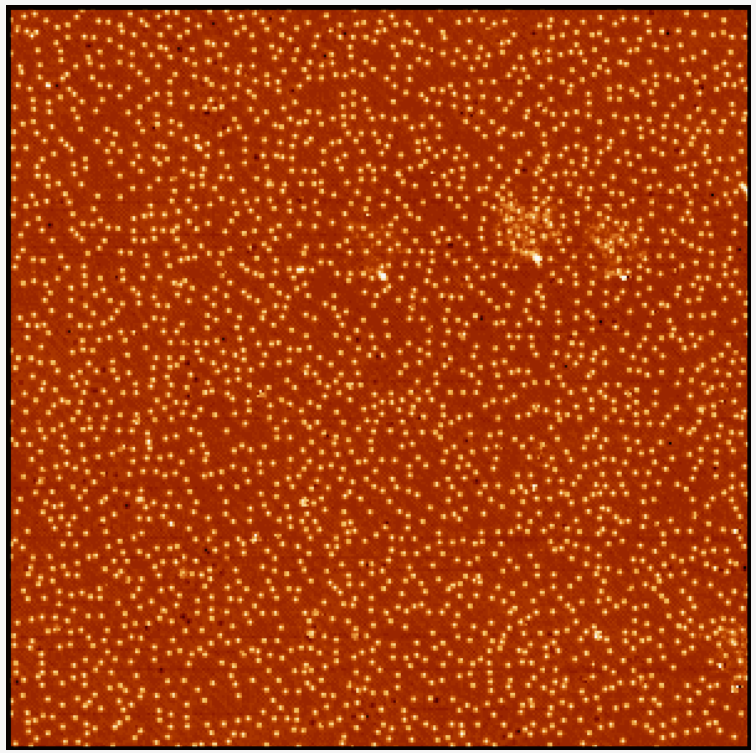




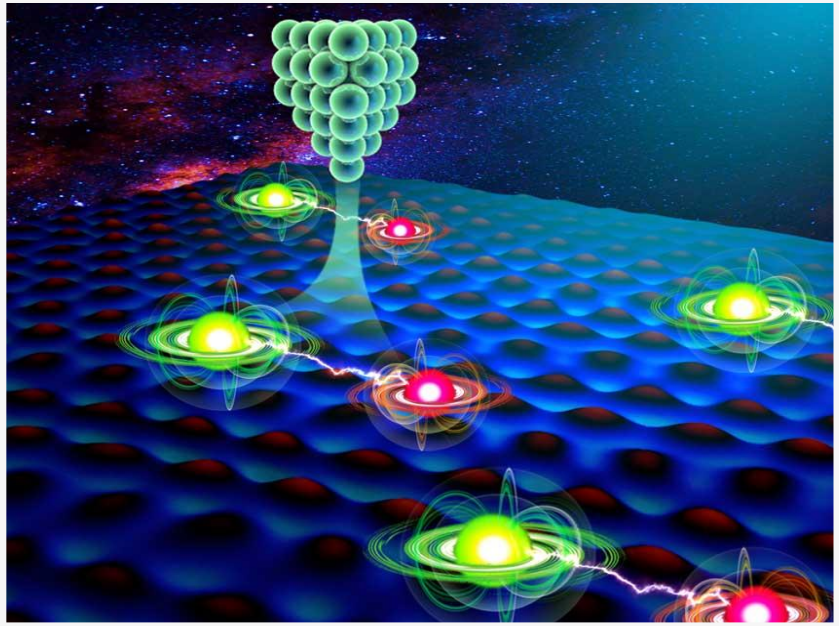
大面积干净Sb表面STM 图像

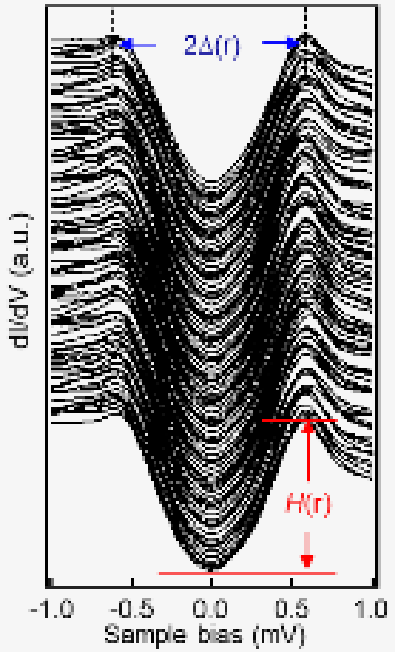


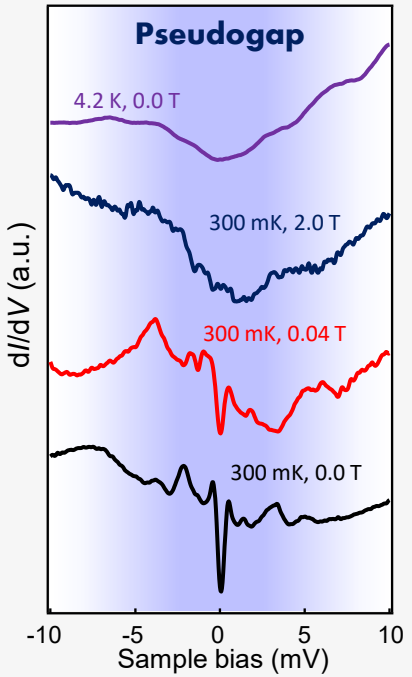
原子操纵

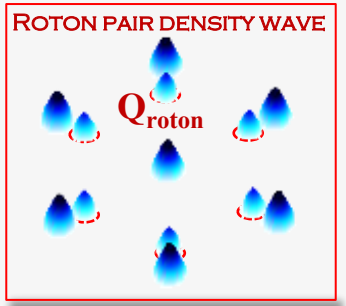


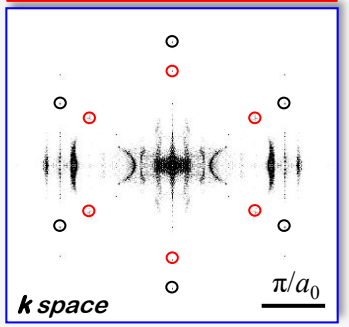
首次在新型“笼目”超导体中发现配对密度波和非常规超导特性









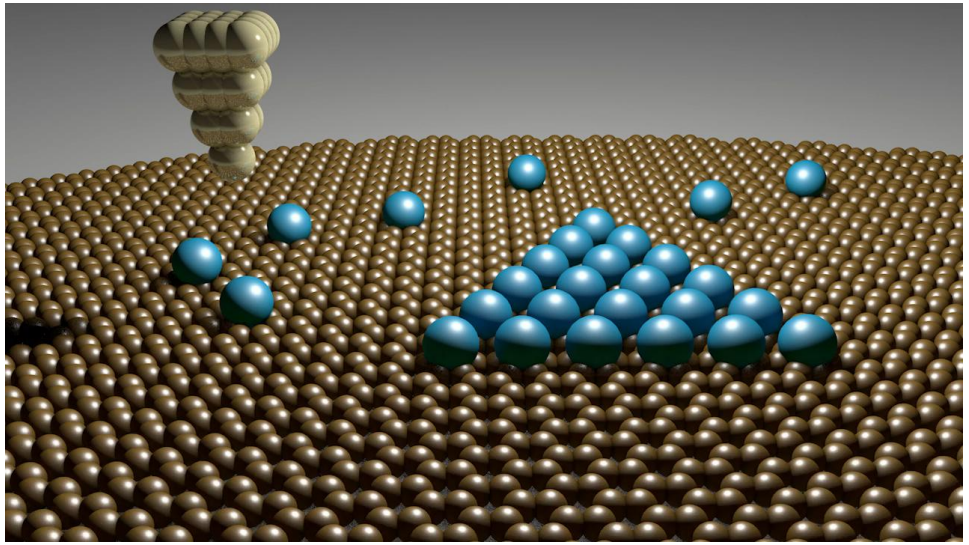


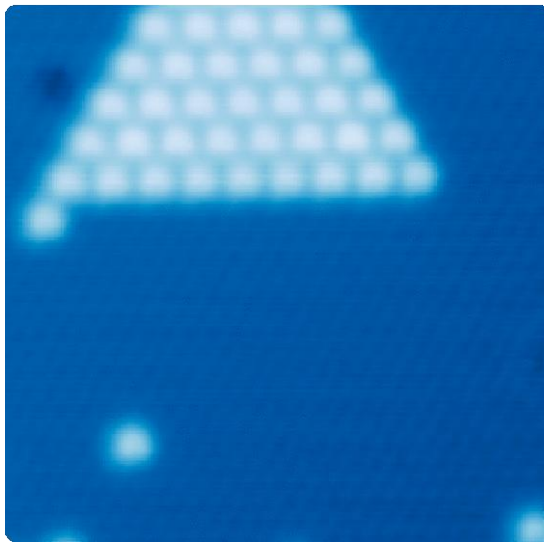
- 在笼目CsV_3Sb_5超导体中发现非常规超导态与配对密度波(PDW)。这种PDW不同于普通超导体中的PDW，其与超流态中的旋子（roton）激发态行为类似，称之为roton-PDW;

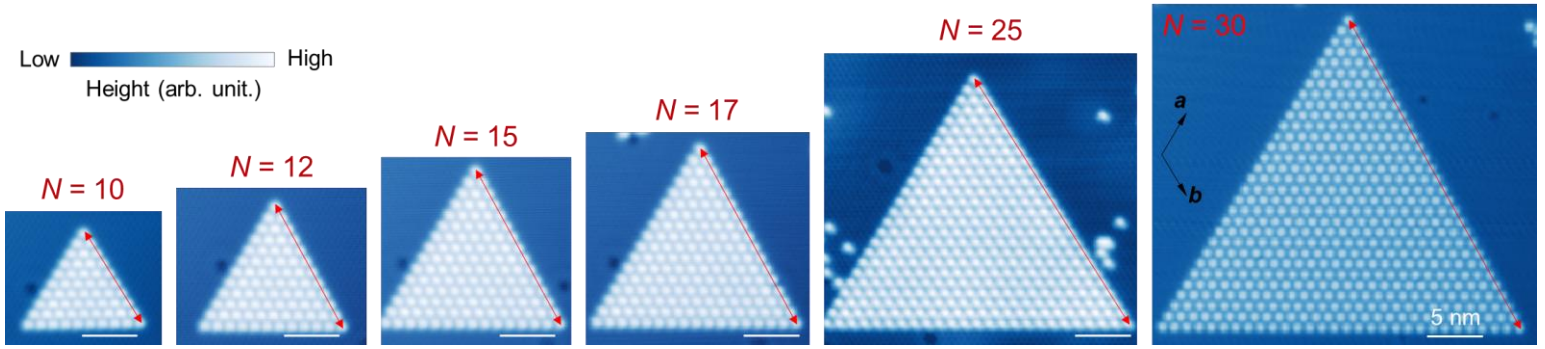
- 国际上首次在“笼目”超导体中发现非常规PDW。这不仅在原子尺度揭示了“笼目”超导体的非常规超导态的独特性质，也是实验上首次在铜基超导体外的超导体系发现非常规配对密度波，对揭示配对密度波的形成机制及其和非常规超导体超导机理的关联有着重大的意义。

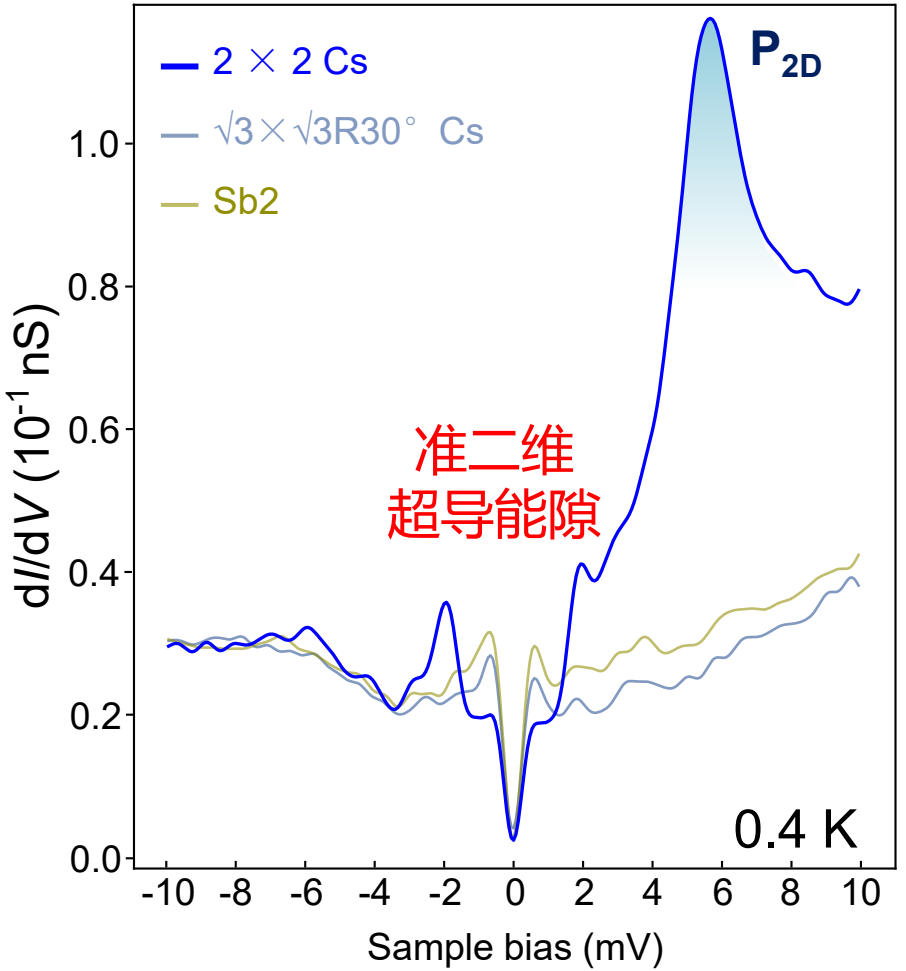
H. Chen, H. T. Yang, Hong-Jun Gao et al., Nature 599, 222 (2021)

原子操纵: 笼目金属CsV_3Sb_5表面准二维超导态与原子级精准调控(400mK)







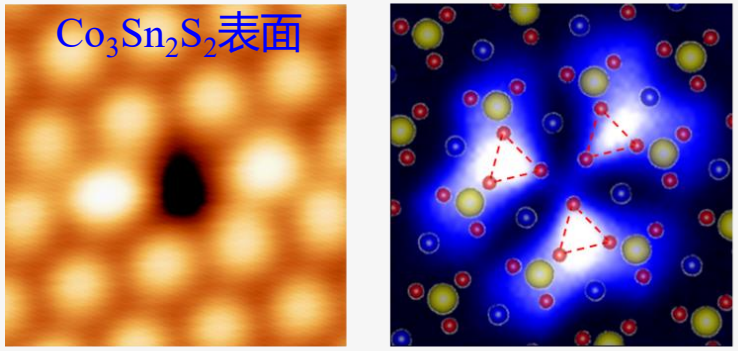


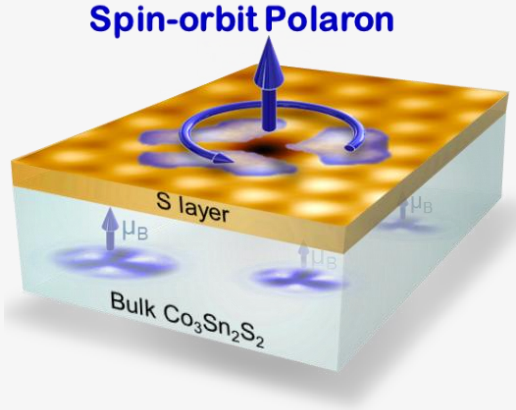
- 新型2×2 Cs重构面上存在表面能带束缚态和演生准二维超导态，和准二维超导态中的新型配对密度波；
- 基于原子操纵技术实现了准二维超导态的调控，证明该新型超导与2×2 Cs的重构面积大小、三维电荷序的堆垛相位缺陷存在紧密联系。

Hong-Jun Gao et al., (Nature Nanotechology, online, 2025)

原子操纵: Weyl半金属材料的人工结构构筑及物性研究 (4 K)

单原子操纵：发现自旋轨道极化子



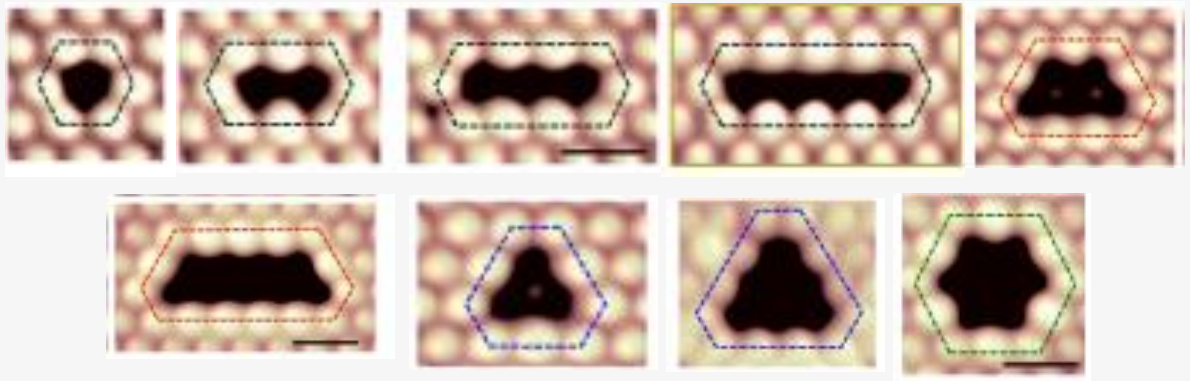


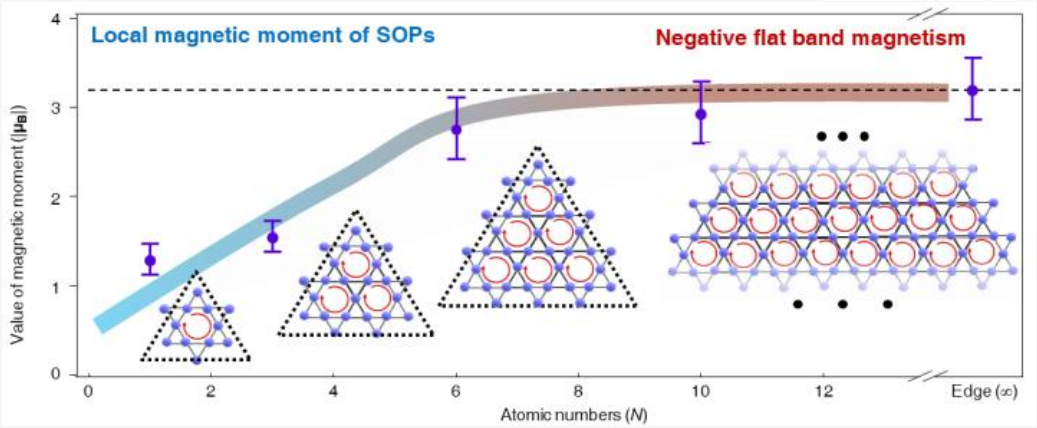
三重旋转对称性空间分布的束缚态激发

❑ S原子缺陷附近高度自旋极化的激发态，形成空间局域的”自旋轨道极化子” 表明轨道磁化作用对局域化磁矩起主导作用

H.-J. Gao et al., Nature Commun. 11, 5613(2020)

多原子操纵：平带负磁机制



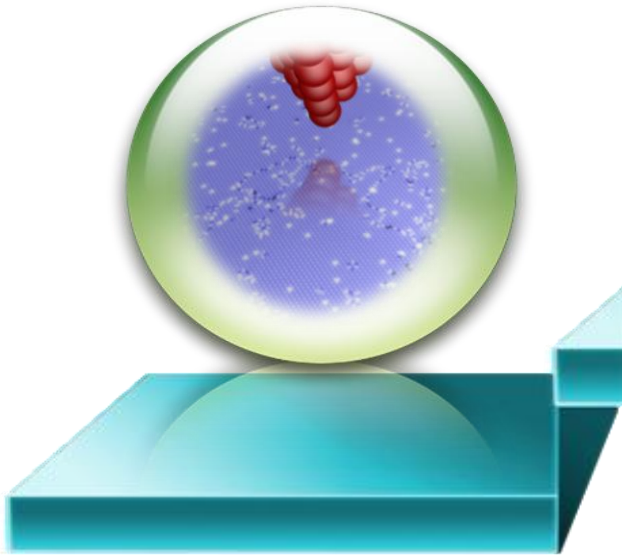


❑ 在磁性外尔$Co_3Sn_2S_2$表面操纵S原子构成图案结构,通过调控自旋轨道极化作用成功调制出平带负磁机制

H.-J. Gao et al., Nature Commun. 15, 2301 (2024)

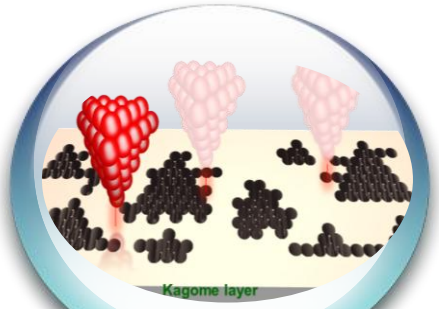
原子级操纵构筑低维量子功能材料的系统进展

- 笼目超导体表面结构与物性调控 (<4K)



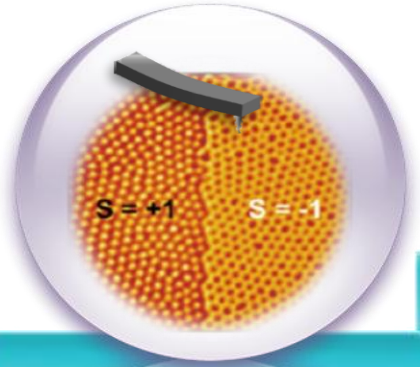
Nature (2021)
Science Bulletin (2022)
Nat. Commun. (2023)
Nat. Commun. (2024)

- 笼目磁性材料低维结构与物性调控 (<180K)



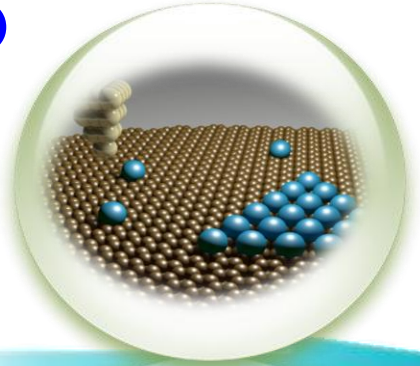
Nat. Commun. (2020)
Nat. Commun. (2023)
Nat. Commun. (2024)

- 室温二维材料的拓扑磁结构的精准构筑 (>300K)



Nature Nanotechnol.
Under review

- 笼目金属衍生物态的原子级精准调控



Nature Nanotechology,
(online, 2025)

- 基于多探针系统自主操纵…
- 结合人工智能和材料生长…
- 扩展到其它特殊晶格材料…

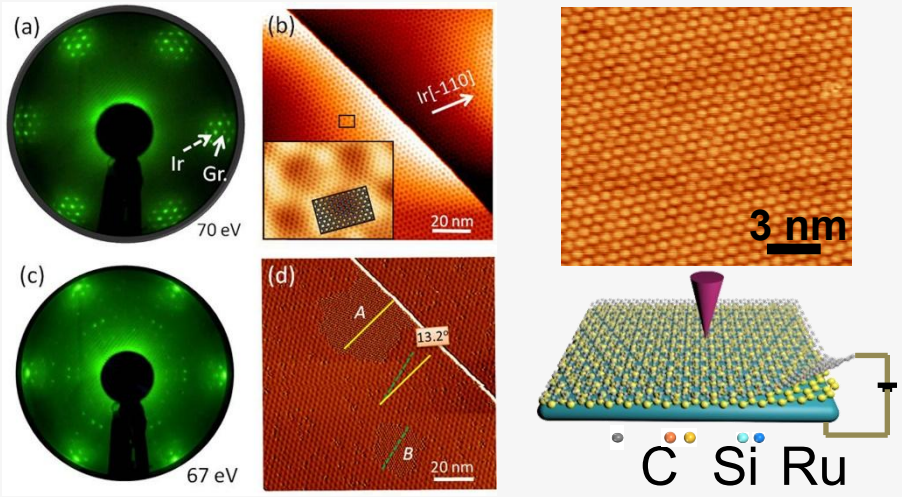
代表性研究成果 (III): 新型低维材料的构筑

N04制造的

“中国标签”

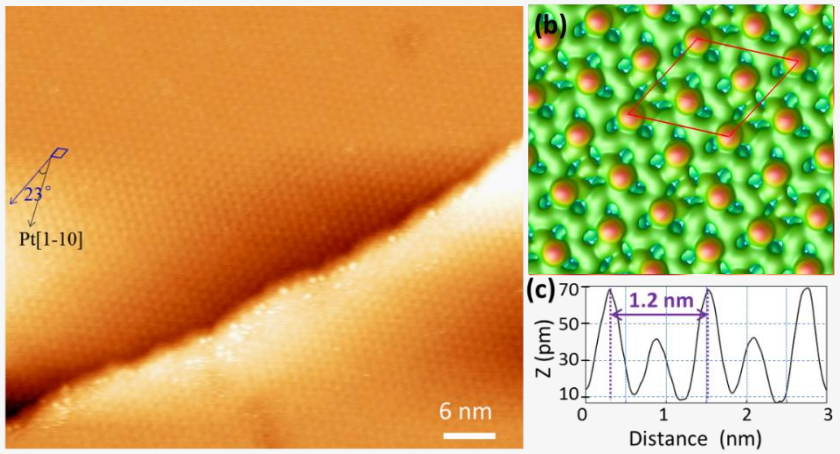
二维材料

首次在Ru上制备出石墨烯



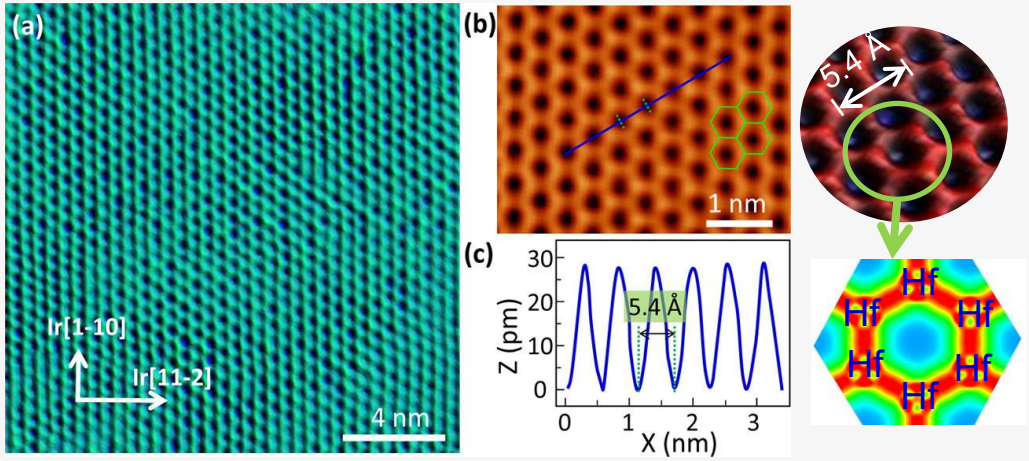
Adv. Mater. 21,2777(2009); 26,4820 (2014)

首次在Pt上制备出锗烯



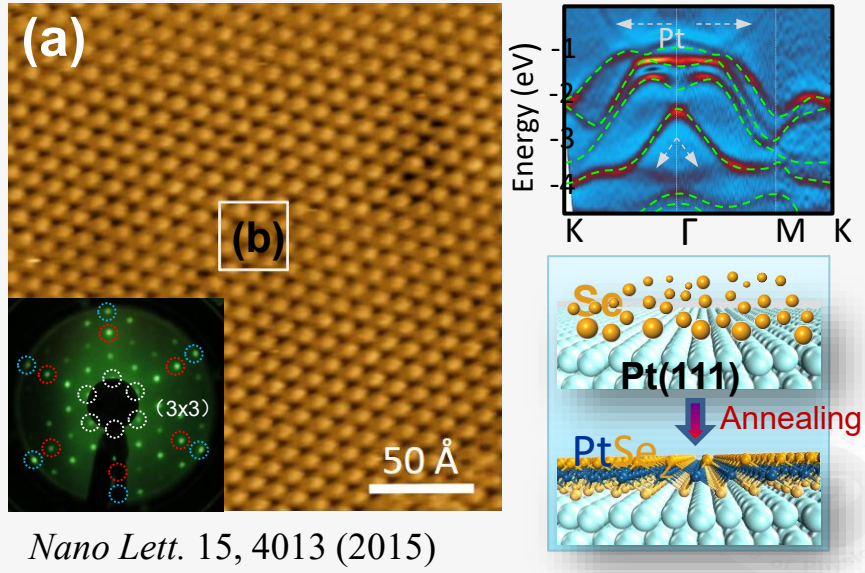
Adv. Mater. 26, 4820 (2014)

首次在铱表面制备出了铪烯



Nano Lett. 13, 4671 (2013)

首次制备出$PtSe_2$二维原子晶体



Nano Lett. 15, 4013 (2015)

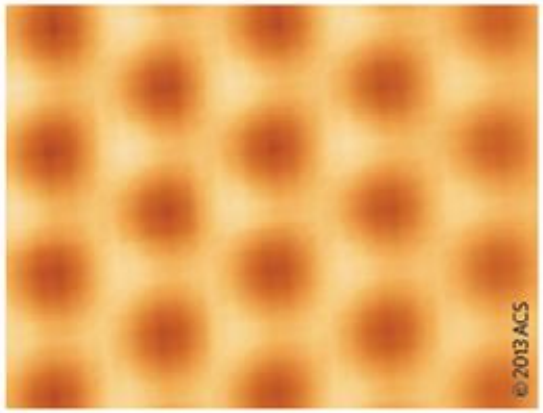
首次制备出了铪烯

铪烯被自然纳米技术杂志做亮点报道

TWO-DIMENSIONAL MATERIALS

Hafnium honeycombs

Nano Lett. http://doi.org/nvr (2013)



Graphene has a variety of intriguing properties because of its honeycomb lattice. Other materials with such two-dimensional structures are known including hexagonal boron nitride and silicene. However, these materials, like graphene, are typically made of *p*-block elements. Yeliang Wang, Shengbai Zhang, Hong-Jun Gao and colleagues have now shown that two-dimensional honeycomb lattice structures can also be created using transition metal atoms.

The researchers — who are based at Beijing National Laboratory of Condensed Matter Physics, Jilin University and Rensselaer Polytechnic Institute — created a crystalline layer of hafnium on an iridium(111) surface.

www.nature.com/nnano/archive/categ_reshighlts_102013.html

nature nanotechnology

Search

Journal home > Archive > Research Highlights

Journal content

- Journal home
- Advance online publication
- Research Highlights
- Current issue
- Archive
- Focuses
- Press releases

Journal information

- Guide to authors
- Online submission
- For referees
- Pricing
- Contact the journal
- Subscribe
- Help
- About this site

2013 Research Highlights archive

Archive type:

Issues | Subjects | Article categories | Research highlights

Research Highlights from:

2013 | 2012 | 2011 | 2010 | 2009 | 2008 | 2007 | 2006

Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct

This archive contains all the Research Highlights that were published on the *Nature Nanotechnology* website on a weekly basis between June 2006 and December 2009. Research Highlights are now published in the journal every month.

October 2013 Research Highlights top

Two-dimensional materials: Hafnium honeycombs

Owain Vaughan

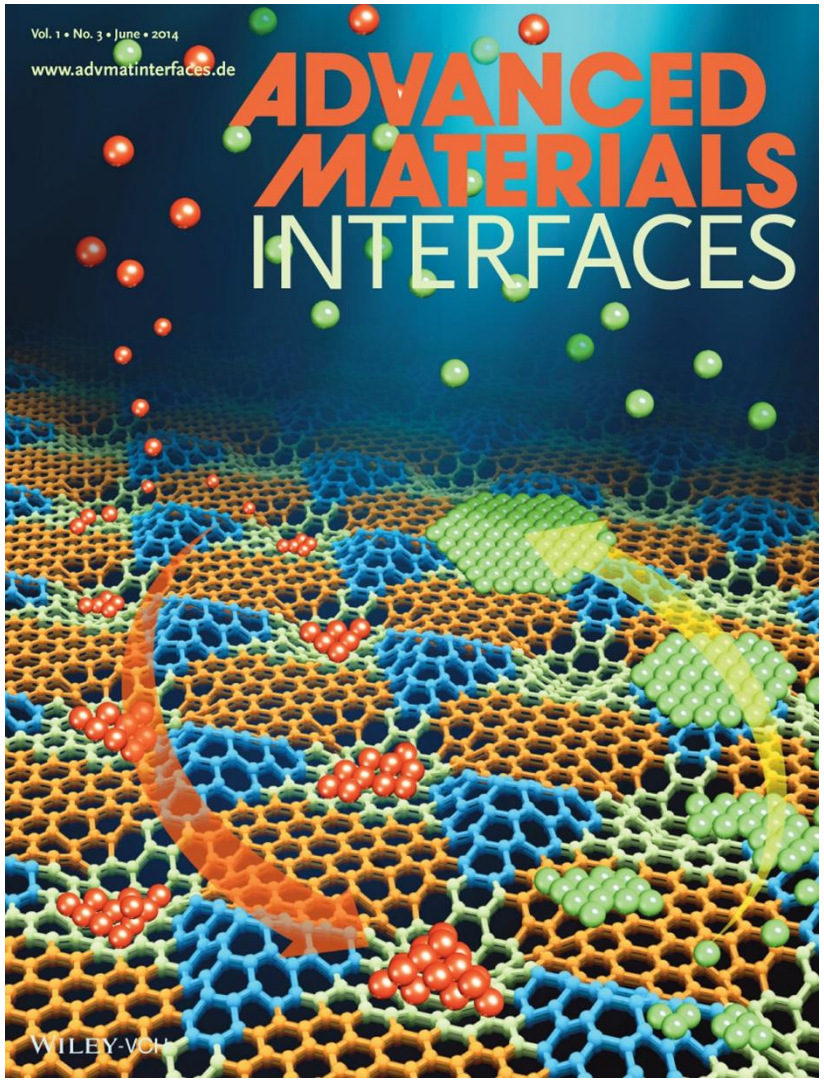
doi:10.1038/nnano.2013.211

Published online: 04 October 2013

Full Text

图案化二维材料

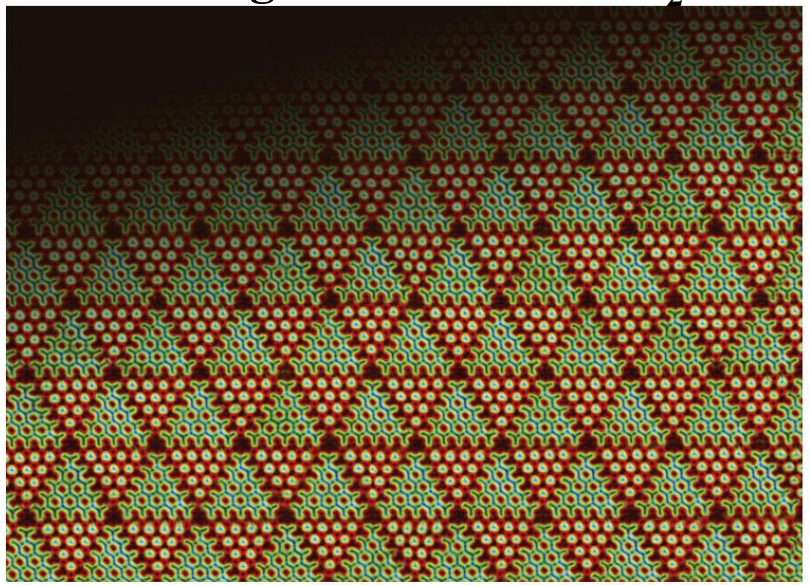
Metal Clusters：Growth Mechanism on a Graphene/Ru(0001) Template



基于石墨烯的二维材料-纳米尺度自然图案

Adv. Mater. Interfaces 1, 1300104 （2014）

Triangular tiling pattern formed by alternating 1H- and 1T-$PtSe_2$ areas



Featuring work from the research teams of Professor Hong-Jun Gao's group, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China.

Epitaxial growth and physical properties of 2D materials beyond graphene: from monatomic materials to binary compounds

This review provides a comprehensive overview of the fabrication of 2D materials based on epitaxial growth in an ultra-high vacuum experimental environment. Techniques including intercalation, templated molecular adsorption, and direct selenization and tellurization of metal substrates, are particularly described.

As featured in:

See Hong-Jun Gao *et al.*, *Chem. Soc. Rev.*, 2018, **47**, 6073.

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY

rsc.li/chem-soc-rev

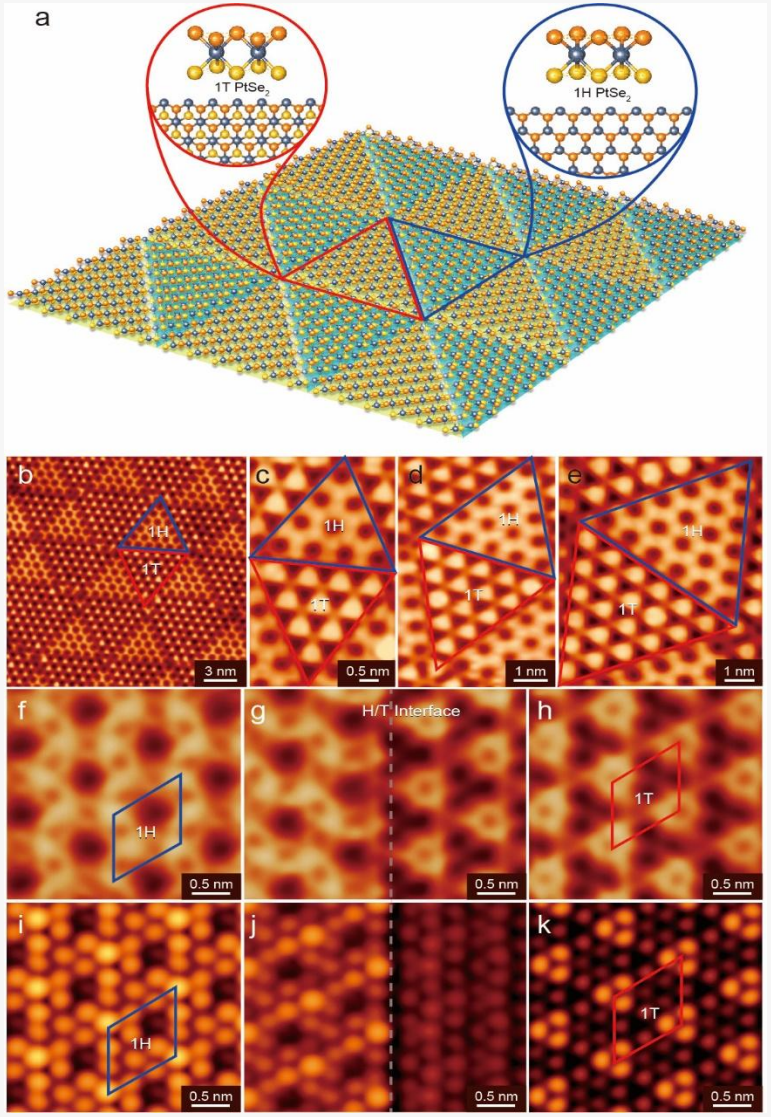
Registered charity number: 207890

基于硫族化合物的二维材料-纳米尺度自然图案

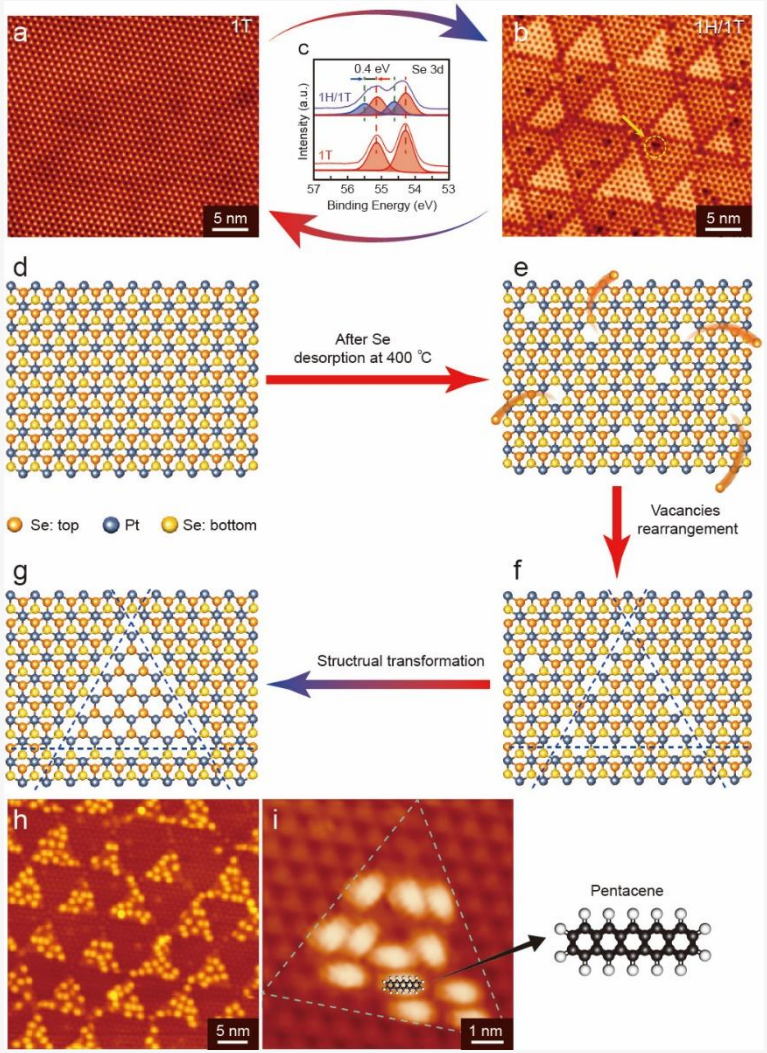
Chem. Soc. Rev. 47, 6073 (2018)

三角形图案化的 1H/1T-$PtSe_2$ 单层薄膜

Triangular tiling pattern by annealing at 400 °C.

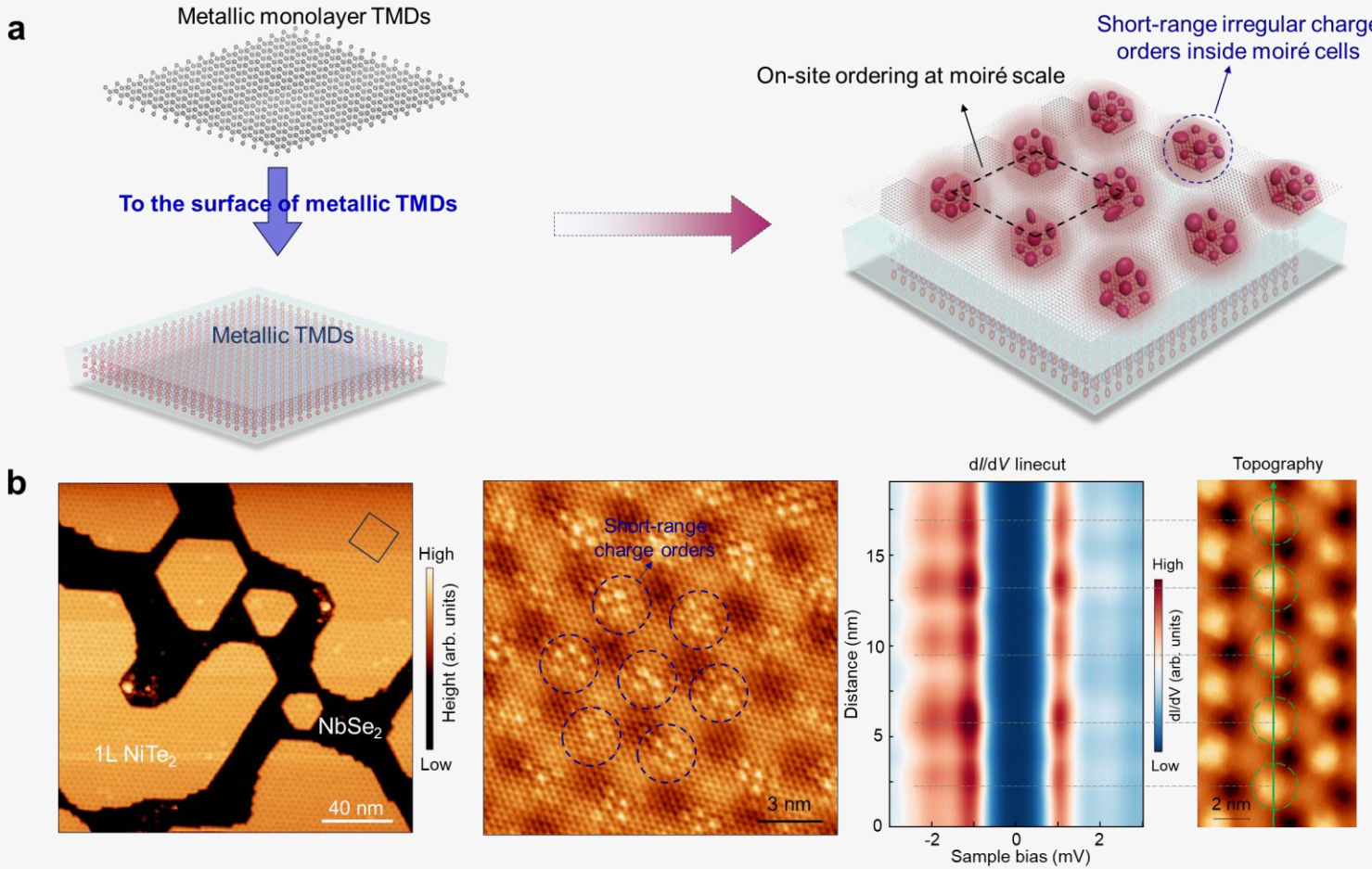


The reverse process can be realized by adding Se and annealing at 270°C.



并五苯分子选择性吸附在三角形的 1H-$PtSe_2$区域

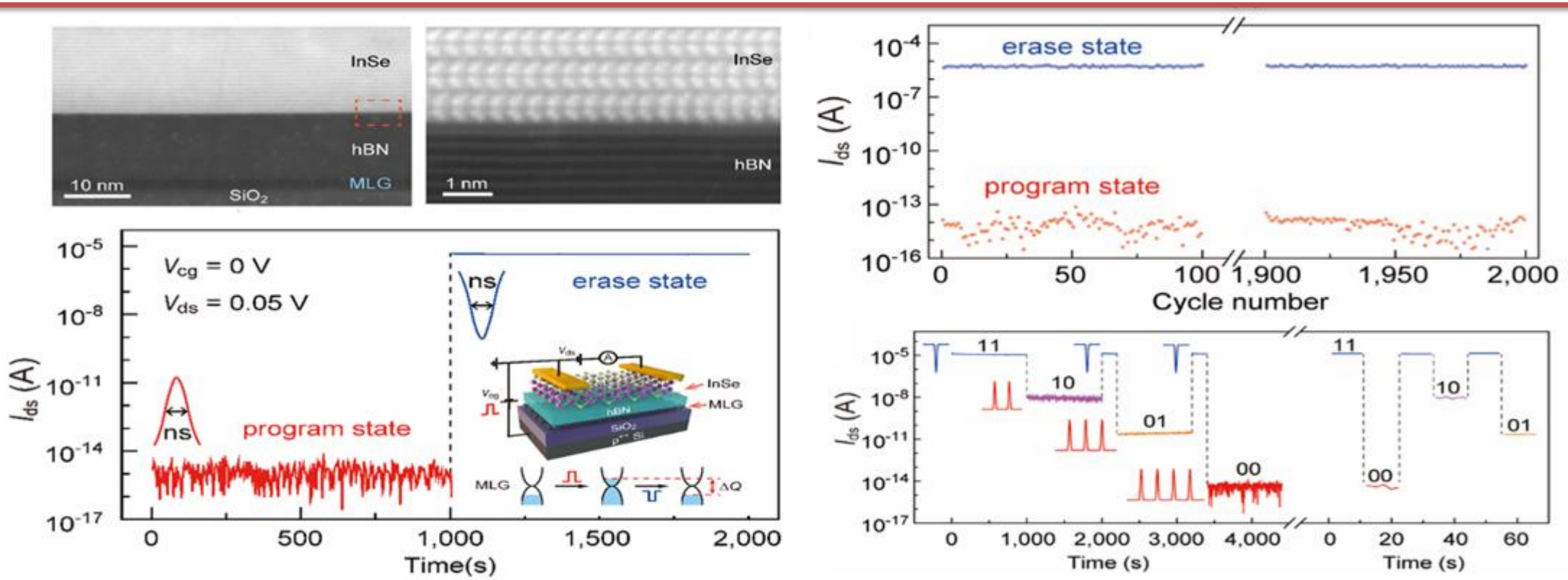
精准构筑具有短程电荷密度调制的非公度摩尔超晶格



- 利用分子束外延生长技术，原子级精准构筑拓扑半金属/超导体非公度摩尔超晶格，展现出摩尔尺度有序但原子尺度无序的电荷密度调制态，并诱导产生短程有序配对密度调制态。
- 这种自发局部无序但超晶格尺度有序的特征与原晶态类似，故命名为电子原晶态(Electron Procrystalline State, EPC)，为探索新型量子现象及其在器件中的潜在应用提供了一个有价值的平台。

H. Guo,…, H.T. Yang, *et al*. Nat. Commun. (Accepted, 2025)

代表性研究成果(IV): 成功实现20纳秒写入/擦除时间超快非易失存储器

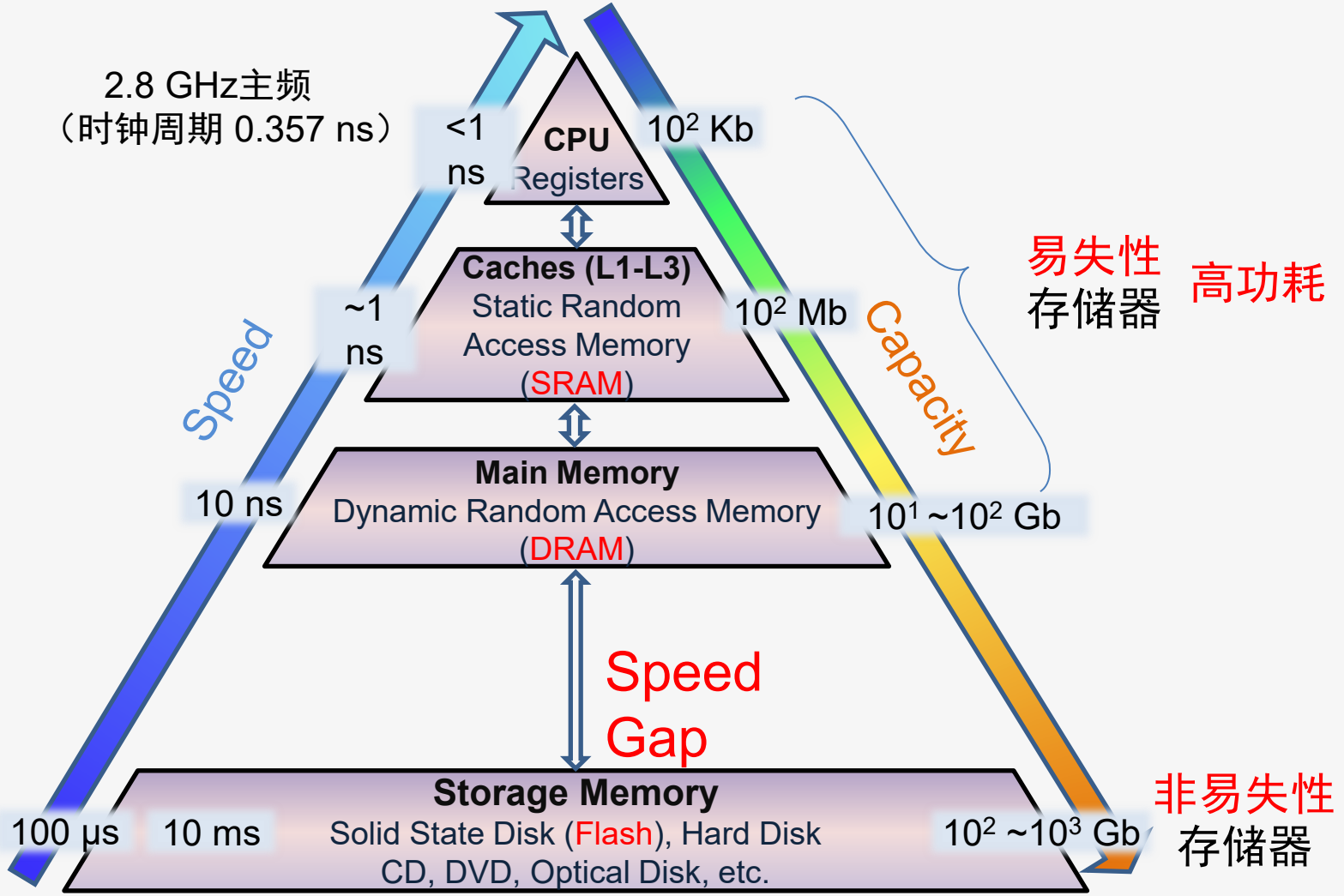


- 利用二维范德瓦尔斯异质结的原子级锐利界面及增强的界面耦合特性，首次成功构筑了超快、非易失浮栅存储器件。实现了其纳秒级（~20 ns）的读写时间（商用闪存器件为百微秒），极高的擦除/写入比（~10^{10}）和极长的存储时间（10年以上）；
- 无需修改商用的器件结构，为进一步开发基于范德瓦尔斯异质结构的高性能电子器件提供了新思路，对于发展未来高性能非易失存储器具有重要意义。

H.-J. Gao et al., Nature Nanotechnology 16, 882 (2021)

超快非易失存储器的研究意义

计算机层级存储结构



影响和评价 *Nature Nanotechnology*的报道与评论

nature › nature nanotechnology › news & views › article

VAN DER WAALS HETEROSTRUCTURES

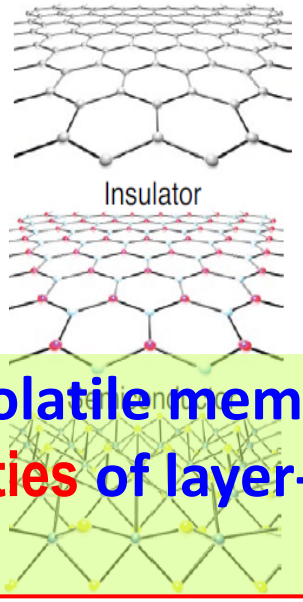
Ultra-fast non-volatile memory

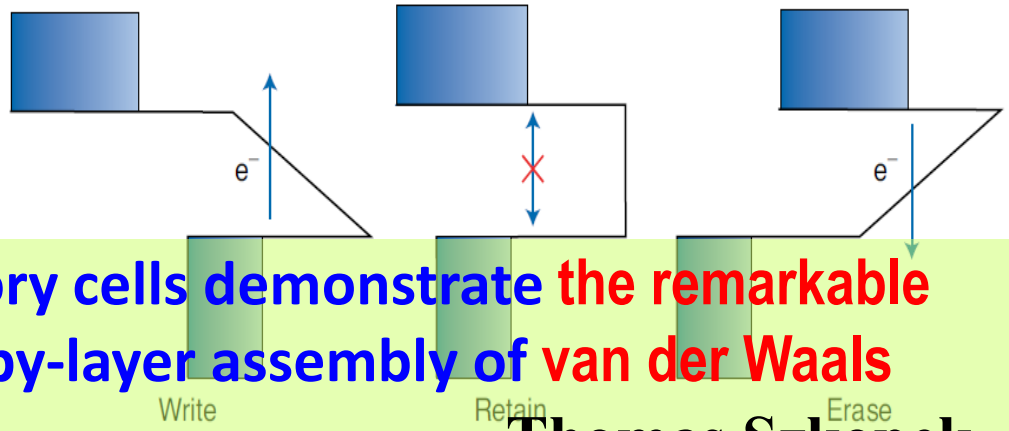
Van der Waals heterostructures serve as a platform for memory devices with ultra-fast writing speeds and non-volatile retention times, motivating their use in integrated circuits and systems.

Thomas Szkopek

Canada Research Chair in Nanoscale Electronics
HydroQuébec Nanoengineering Scholar Award

The proliferation of mobile electronics that has enabled our digital age relies on advances in information storage technology. Mobile applications demand an ever-increasing amount of information to be recorded in memory at ultra-fast speeds, with write times less than 100 nanoseconds. Moreover, the memory must be non-volatile, reliably retaining information for a decade (around 300 million seconds) without having to draw power from the distinctly limited energy of a battery. The grand challenge at the semiconductor device level is to control electronic charge on a storage element with [illegible] layers of





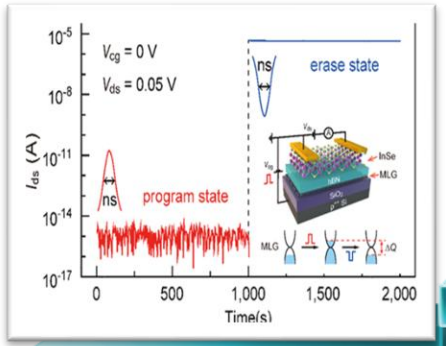
The ultra-fast non-volatile memory cells demonstrate the remarkable engineering possibilities of layer-by-layer assembly of van der Waals heterostructures.

--- Thomas Szkopek

超快非易失存储器件展示了逐层组装范德瓦尔斯异质结的非凡的制造可能性。 ---Thomas Szkopek (McGill University)

全力发展低维量子信息器件

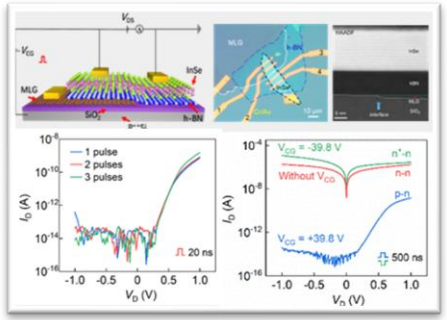
20纳秒读/写超快非易失存储器



Nat. Nanotech. 16, 882 (2021)

- 对于发展未来高性能非易失存储器具有重要意义

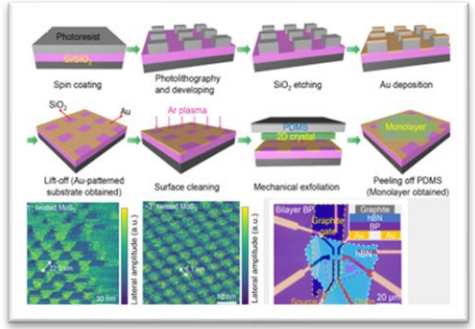
超快可编程二维原子晶体同质结



Adv. Mater.35, 230106 (2023)

- 超快可重构二维电子器件及其集成对于未来构筑存算一体器件、类脑计算器件具有重要意义。

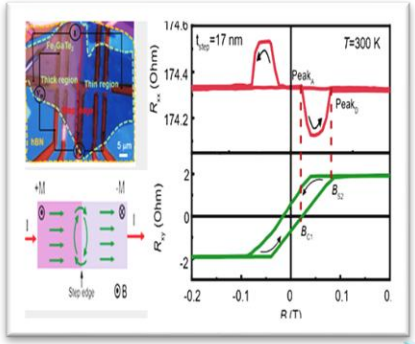
金模板辅助剥离法制备大面积二维材料及莫尔超晶格的精准构筑



Adv. Mater., 2313511 (2024)

- 发展了一种普适性的金模板辅助的机械剥离方法;
- 可高效构筑多种高质量、大面积单/少层二维原子晶体材料，及转角双层/多层TMD同质结，角度对准精度达~0.3°。

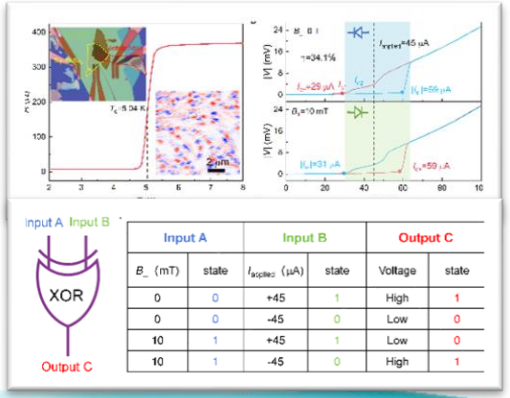
范德华铁磁材料Fe_3GaTe_2中室温反对称磁阻的发现



Adv. Mater., 2403154 (2024)

- 设计了一种具有平面对称性破缺的Fe_3GaTe_2纳米器件，并观察到室温反对称磁阻;
- 随磁场变化出现高、中、低三种电阻态，可编码为-1, 0, 1 实现多态磁随机存储和逻辑电路。

极化零场超导二极管及其逻辑运算功能的实现



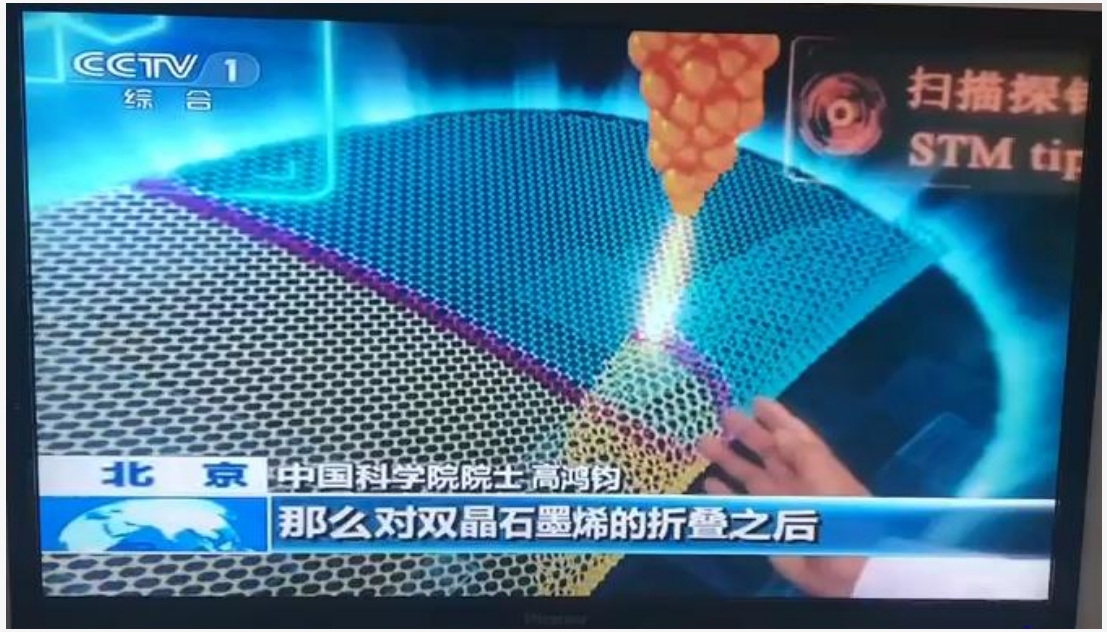
Input A		Input B		Output C	
B_- (mT)	state	$I_{applied}$ (μA)	state	Voltage	state
0	0	+45	1	High	1
0	0	-45	0	Low	0
10	1	+45	1	Low	0
10	1	-45	0	High	1

Nat. Electronic (2025, submitted)

- 构建出$NbSe_2$/FGT/$NbSe_2$范德华铁磁超导约瑟夫森异质结；
- 零场的二极管效率高达34.1%;
- 可进行低功耗的XOR逻辑门运算。

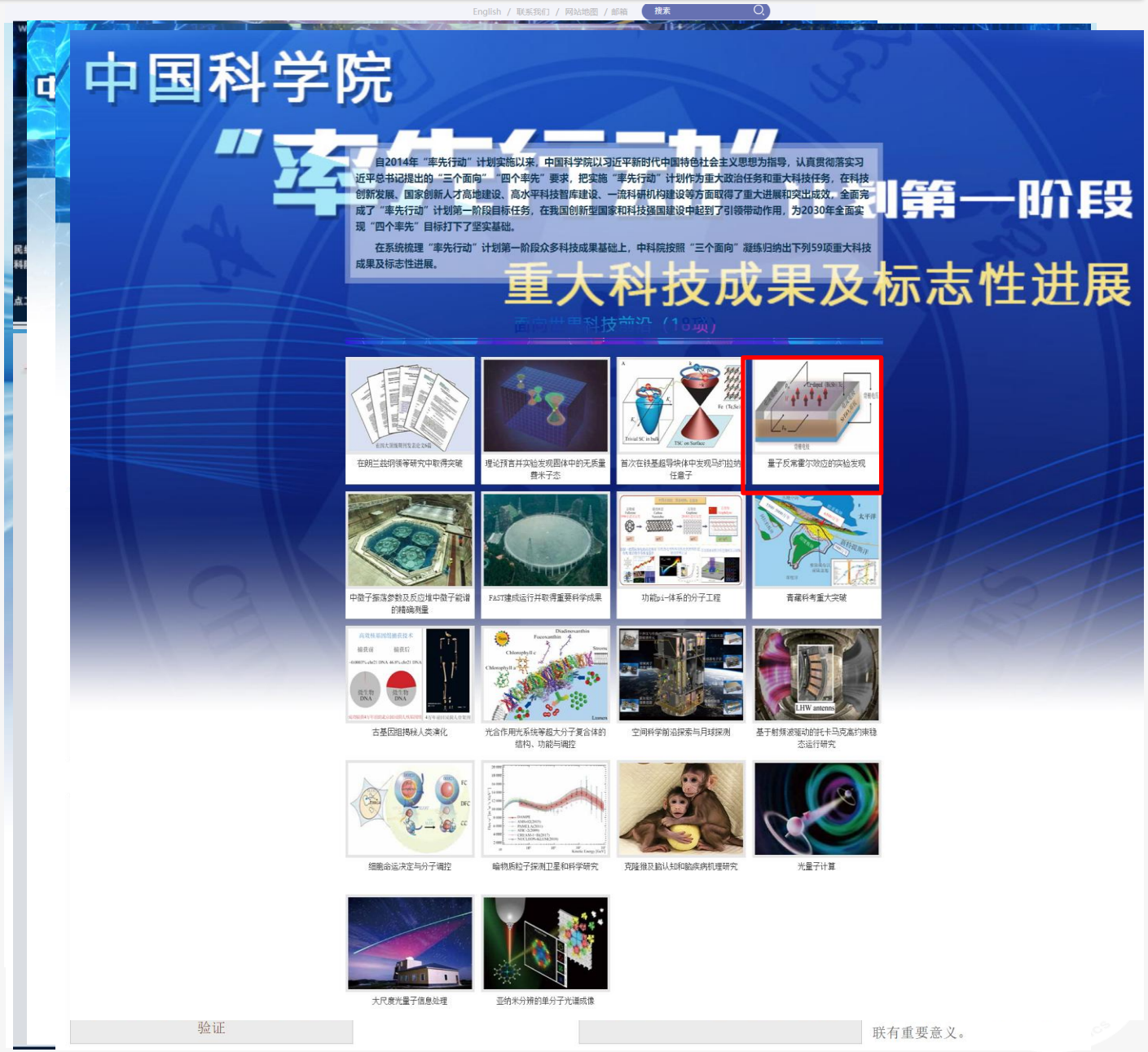
研究成果获奖情况

可调物性和构造新器件的石墨烯“折纸术”



STM操纵技术实现石墨烯纳米岛的折叠

Science 365, 1036 (2019)

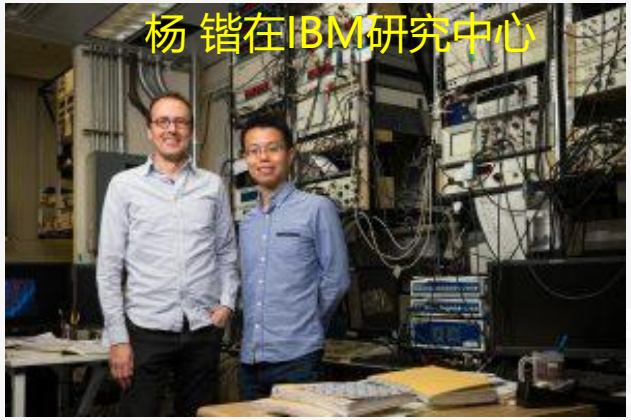


组内学生毕业发展情况

- 2004届毕业生：
  王业亮 （北京理工大学集成电路学院院长，教授，杰青）
- 2006届毕业生
  林 晓 （中国科学院大学副校长，教授，杰青）
- 2006届毕业生：
  秦志辉（湖南大学物理学院，教授，副院长）
- 2007届毕业生：
  路军岭（中国科技大学大学物理学院，教授，杰青）
- 2008届毕业生：
  郇 庆（中科院物理所，研究员，杰青）
- 2011届毕业生：
  张晨栋（武汉大学物理学院，教授，青千，副院长）
- 2013届毕业生：
  黄 元（北京理工大学前沿交叉科学研究院，教授，优青）
- 2015届毕业生：
  杨 锴（中科院物理所，研究员，青千）
- 2017届毕业生：
  武 旭（北京理工大学前沿交叉科学研究院，教授，青千）
- 2018届毕业生：
  王东飞（北京理工大学物理学院，教授，青千）

王业亮

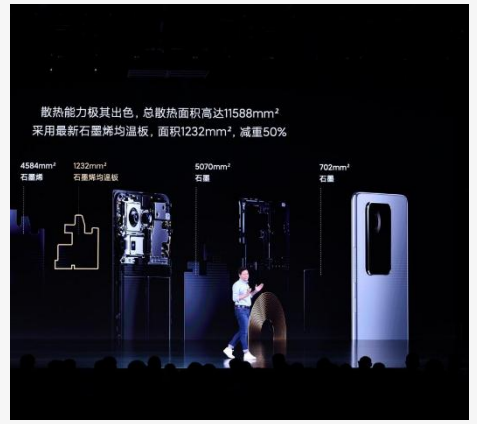
林 晓


杨 锴在IBM研究中心

组内学生毕业发展情况

国外发展情况

- 2006届毕业生：
  高　利（加州大学北岭分校，教授，物理所所有会北美分会会长）
- 2010届毕业生：
  江　楠（美国伊利诺伊大学芝加哥分校，教授）
- 2008毕业生：
  田继发（美国怀俄明大学，副教授）
- 2006届毕业生：
  徐栋川（新加坡南洋理工大学，教授）



成果转化情况

- 2008届毕业生：
  蔡金明（昆明理工大学材料科学与工程学院教授，青千）

- 2008届毕业生：
  郇　庆（中国科学院物理研究所N13课题组长，杰青）

中|科|艾|科|米
CASAcme Technology

欢迎青年才俊的加入我们的研究团队！

科技强国 锐意进取　良好的科研和文化氛围　齐心聚力 团结奋进

高鸿钧院士(hjgao@iphy.ac.cn)

欢迎各位青年才俊的加入！

http://n04.iphy.ac.cn/
http://n12.iphy.ac.cn/

感兴趣的同学可具体联系杨海涛老师（Tel:13911434365, e-mail: htyang@iphy.ac.cn），
周末、假期到组里参观、短暂实习；大学生科创计划；毕业设计。