

# 追求“零”摩擦之境 - 结构超滑技术与科学

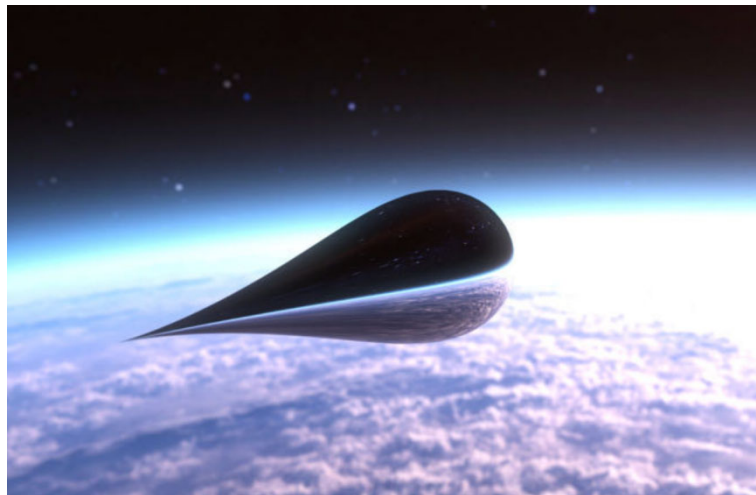
作者：田凯文<sup>1</sup>，黄轩宇<sup>2</sup>，彭德利<sup>2</sup>，向小健<sup>1</sup>，吴章辉<sup>2</sup>，欧阳稳根<sup>3</sup>，瞿苍宇<sup>1</sup>，徐芦平<sup>2</sup>，马明<sup>1,2</sup>，郑泉水<sup>1,2</sup>。

- 1: 深圳清华大学研究院超滑技术研究所
- 2: 清华大学微纳米力学与多学科交叉创新研究中心
- 3: 以色列特拉维夫大学化学系

引子 .....	2
结构超滑技术简介 .....	3
新科研模式探索 .....	4
技术与理论细节 .....	6
1. 结构超滑应用技术 .....	6
1-1. 超滑微发电机：微型器件供电难题的颠覆性解决方案 .....	6
1-2. 机械硬盘的新希望：超滑存储技术 .....	11
1-3. 结构超滑-RF MEMS 开关类器件新机遇 .....	15
1-4. 超滑微谐振器：谐振器领域的新突破 .....	17
1-5. 总结与展望 .....	20
2. 结构超滑理论 .....	21
2-1. 公度与非公度接触 .....	21
2-2. Frenkel-Kontorova 模型 .....	21
2-3. Aubry 转变 .....	23
2-4. 结构超滑的实现条件 .....	24
2-5. 现实体系的结构超滑 .....	25
2-6. 问题与挑战 .....	25
3. 结构超滑实验现象与技术 .....	26
3-1. 石墨岛体系 .....	26
3-2. 结构超滑带来的新奇现象 .....	29
3-2-1. 石墨岛的自回复现象 .....	29
3-2-2. 高速超滑与石墨岛的弹出现象 .....	30
3-2-3. 石墨岛的自锁现象 .....	31
3-2-4. 自清洁能力 .....	32
3-3. 结构超滑体系的零磨损 .....	32

3-4.结构超滑的实验技术和挑战 .....	33
3-4-1.结构超滑的尺度 .....	33
3-4-2.石墨岛的转移与组装 .....	34
3-5.其他结构超滑体系 .....	34
3-6.总结 .....	34
4.结构超滑研究简史 .....	35
后记 .....	36
注释 .....	36
参考文献 .....	错误! 未定义书签。

## 引子



**图 1:** 科幻小说《三体》三部曲中三体文明探测器“水滴”的想象图[1]。其表面绝对光滑，不会有任何摩擦磨损，材料强度极高。

在刘慈欣的著名科幻小说《三体》三部曲中，三体文明的宇宙探测器“水滴”无疑是极强大又极唯美、令人震撼的存在。“水滴”这名称来自探测器的外形（图 1）。在小说的设定里，由于“水滴”表面的所有原子都被强相互作用力死死地钉在一起，其表面呈现出原子级的绝对光滑，不会有任何摩擦和磨损。并且，“它的强度比太阳系中最坚固的物质还要高百倍，这个世界中的所有物质在它面前都像纸片般脆弱，它可以像子弹穿透奶酪那样穿过地球，表面不受丝毫损伤”（摘自小说原文）。在小说情节里，“水滴”正是靠着它的超高材料强度，和零摩擦零

磨损的摩擦学特性，只是利用最原始的撞击，就让人类两千多艘太空战舰几乎全军覆没，而它自己却没有任何损伤。

小说写到，“水滴则外形完美……用精致的唯美消弭了一切功能和技术的内涵，表现出哲学和艺术的轻逸和超脱”。“水滴”在材料力学和摩擦学方面达到的技术境界确实令人神往。然而，根据人类目前的科学理论，原子间的相互作用不可能是强相互作用，而是弱很多的电磁相互作用，因此，上述“水滴”无法被制造出来。

那么，有没有哪种现实的技术有接近“水滴”那样的摩擦学性质呢？答案是有的，一个代表性的技术便是 2012 年前后开启的结构超滑技术[2-5]。

## 结构超滑技术简介

**结构超滑** (structural superlubricity)，我们定义为直接接触（不需要加润滑剂）的两固体表面间相对滑动时，摩擦力几乎为零、磨损为零的状态[4, 5]。在这种状态下，其摩擦系数一般小至 $10^{-3}$ 量级或更低。长期以来，这种“零”摩擦状态只存在于科幻和理论猜测中。而现在，单个接触区域面积达  $100 \mu\text{m}^2$  量级的结构超滑已经能成熟地实现。单个更大接触面积乃至宏观的结构超滑的实现，仍然在研究之中[5]。读者还可以在后文中看到，结构超滑体系接触面两边材料的某些强度确实很强（比钢铁强上百倍），表面也做到了纳米级的平滑，这两点和“水滴”也是有相似之处的。

现在，让我们暂时从科幻的“水滴”回到日常生活，看看结构超滑技术可能具有什么改变我们生活的颠覆性应用。

在我们日常生活中，要降低无处不在的摩擦和磨损，使用润滑液是常见的做法。例如，自行车车轴上使用的润滑油，降低了相关零件的摩擦磨损，增长了自行车使用寿命。

但在微纳小尺度下（比人的头发丝直径更小），摩擦和磨损等表面效应会比在宏观尺度下更为显著【注一】。然而，在微纳小尺度接触面中使用润滑液却存在很大的困难。这是因为润滑液在微小尺度的限制下会非常粘稠（想象下粘稠的沥青），以及容易在压力下被挤出接触面，造成润滑失效[5]。因此，对于微小器

件来说，由于无法使用润滑液，要降低摩擦磨损就必须避免器件里运动部件间的接触，这也成为了长期以来微小器件的普遍设计“准则”。我们日常使用的各种电子设备，比如手机、电脑中，会大量用到这些微小器件。因此，这个设计“准则”极大地限制了研究者和发明家对于微小器件乃至各种电子设备的想象和发明。结构超滑技术**完全不需要润滑液**，恰恰能颠覆式地突破以上设计“准则”的限制，赋予各种器件和电子设备设计全新的想象空间。

结构超滑技术是一项平台性技术，除了以上提到的应用外，还有极大潜力被应用在高端制造、物联网、生物技术、绿色环保、航空航天等众多领域，催生一系列“从 0 到 1”的开创性和颠覆性技术。特别是，因为第四次工业革命的很多领域（如物联网和生物技术）都会以微米尺度的元件作为基础元件之一，而微米尺度的结构超滑技术已经成熟，因此这些颠覆性应用有望助推第四次工业革命。

为了加快结构超滑技术的产业转化，在深圳市政府、深圳市坪山区政府和深圳清华大学研究院的共同资助下，拥有相关世界顶尖技术和设备的全球第一个结构超滑研究机构——深圳清华大学研究院超滑技术研究所（简称“超滑所”）于 2020 年 11 月在深圳坪山正式启动运行[6]。超滑所由结构超滑技术的开拓者、中科院院士、清华大学教授郑泉水领衔，成员和合作者包括了结构超滑相关领域全世界最顶尖的一批专家，以及有志于结构超滑技术颠覆性应用的研发和商业化人员。

## 新科研模式探索

对于科研来说，科研想法（ideas）的开创性和绝妙程度（即契合某领域发展需要的程度），决定了最终科研成果的档次和影响力。在传统的科研模式中，很多 ideas 产生自科研团队内部的交流，以及学术会议或访问时研究者与少数同行的交流。然而，在这样的科研模式下，由于参与人员的背景单一且人数少，ideas 产生总量也就很小，不同领域的 ideas 碰撞交流产生新的绝妙 ideas 的几率也小。我们认为，对于第四次工业革命这样涵盖众多领域，且需要各领域紧密联系、协同发展的产业革命来说，传统的科研模式已经无法满足科技迅猛发展的需要，新的科研模式急需探索。其中，如何链接众多领域、倍增初始 ideas 的总量和多元

性、以及加快众多 ideas 碰撞产生新 ideas 的速度，是新科研模式探索的重点之一。

我们目前的一个尝试，是通过创作结构超滑“深度科普文”来充分调动全社会的理工人士的兴趣，激发他们产生与结构超滑科学与技术相关的科研 ideas。我们这里所谓的“深度科普文”，是介于普通科普文（面向所有公众）和学术论文（主要面向某领域专业人士）之间的一种科普文模式。优秀的普通科普文虽然生动易懂、有趣、对读者友好、读者面极广，但干货量（即专业知识量）和深度不足以激发科研 ideas。学术论文虽然干货量和深度足够，但通常写得不够生动易懂有趣，其他领域的专业人士很难看明白，读者面很窄。深度科普文的干货量和深度介于普通科普文和学术论文之间，同时尽量兼具生动易懂、有趣、对读者友好、且有启发性的特点。这些特点让深度科普文能够比学术论文有更广的读者群体，特别是让其他领域的专业人士容易看懂，且容易激发读者产生 ideas。

我们的另一个尝试，是把激发起来的大量科研 ideas 和对结构超滑感兴趣的人群汇集起来，形成一个生态。其中，一个重要步骤是把大量 ideas 通过 ideas 征集大会（Open Call）的形式集中，并且通过圆桌论坛、头脑风暴等组织形式，让不同背景人士的 ideas 高效率地互相激发，产生更多绝妙、意想不到的 ideas。这种 ideas 激发模式，由郑泉水团队在清华大学创立，在过去几年通过 X-Ideas 活动不断探索和优化，取得了很好的效果[7, 8]。超滑所会和产生优秀 ideas 的人士进一步合作，利用超滑所的科研平台，把这些 ideas 进一步发展、落实。

我们热诚欢迎所有对我们的主题（包括结构超滑和新科研模式探索）感兴趣的人士加入我们的网络兴趣社区（<http://forum.superlubricity.com/>），在论坛里充分自由地探讨交流。新 ideas 很可能在论坛交流里诞生（参见之前众包科研的成功案例 Polymath 项目[9]）。或者大家可以直接和我们联系（ssl\_contact@qq.com），以此建立长期合作关系。

本文会在技术与理论细节部分介绍超滑所正在研究的四项应用技术，作为对读者的启发，以及解说结构超滑的科学原理、讲解实验现象与技术。读者朋友可以选择自己感兴趣的部分阅读。为简洁起见，后文有些地方我们会用“超滑”代替“结构超滑”。鉴于摩擦和磨损问题在各个领域广泛存在，我们相信，这里展示的几项应用技术仅仅是冰山一角，超滑技术的其他可能应用超出我们团队目前

的想象。关于超滑技术的更多知识，读者可以参考我们 2016 年在科技导报发表的介绍长文[4]，以及我们 2018 年在 Nature 上发表的综述文章[5]。读者朋友如果有对结构超滑的疑问，欢迎前来我们的网络兴趣社区交流。

## 技术与理论细节

### 1. 结构超滑应用技术

下面，我们将介绍我们团队正在研发的四项结构超滑应用技术：超滑微发电机、超滑机械硬盘存储技术、超滑射频开关、超滑微谐振器。读者会看到这些应用技术是如何利用结构超滑技术，为相关技术领域的痛点问题提供了新的解决思路。读者可以选择自己感兴趣的应用技术阅读。

#### 1-1. 超滑微发电机：微型器件供电难题的颠覆性解决方案

微型分布式器件是一种尺寸小（纳米到毫米尺度）、数量庞大、且分布在各个应用场景中独立工作的器件。随着纳米制造技术和微加工技术的飞速发展，微型分布式器件有极大潜力被应用在下一代电子产品，比如物联网器件和微型机器人中，改变人类的生活。这些微型器件的数量将会极其庞大且分布广泛，因此外部集中供电给这些器件将会是极其困难的。所以，分布式的电源自供给（也就是每个器件自行采集能源）对于这些微型器件将会尤为重要。

那么，微型器件可以使用哪些原理和技术手段来实现电源自供给呢？

一个容易想到的技术是利用电磁感应发电。的确，电磁感应发电机目前在人类的电力供给中起到了至关重要的作用。然而，这种发电机的输出功率是和发电机转子尺寸的三次方成正比的。因此，如果转子较小，发电机的输出功率就会极低。所以，电磁感应发电难以应用到微型器件电源自供给中，而只是用于大型电器设备。

另一个容易想到的技术是（化学）电池技术。电池也是人类目前普遍使用的电力供给技术之一。对于电池来说，其储存的化学能与其体积（即尺寸的三次方）

成正比，因此其从化学能转化来的电能也和尺寸的三次方成正比。因此，小尺寸的微型电池能提供的电能(或者说输出功)自然就极少。目前电池确实主要用于非微型的消费类电子产品。

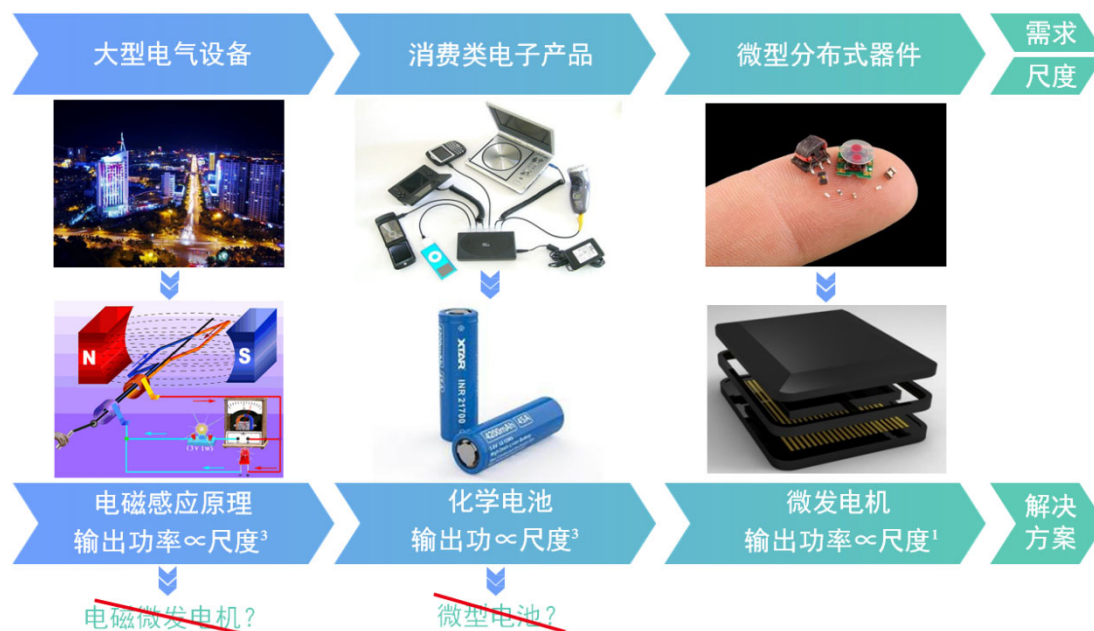


图 2:不同尺度下的供电需求及其解决方案和原理\*。

那么，有没有哪种技术是能够支持微型器件电源自供给的呢？

基于静电感应原理的微型发电机就是一个这样的技术！对于这种发电机来说，其输出功率正比于尺寸的一次方，因此在小尺度下具有较高的输出性能。这种原理的发电机有望将周边环境中随处可见、微弱、低频、或者随机的能量，例如心脏的跳动、血管的振动、水面的波动等，转化为电能，因此是实现微型器件电源自供给的理想技术。

摩擦纳米发电机，作为这种发电机的典型代表，自发明以来就获得了广泛的关注。这种发电机尺寸一般在微米到厘米量级，其名称之所以带“纳米”两字有历史原因，此处就不详谈了。图 3（a）展示了这种发电机的一种典型工作模式-接触分离模式。其工作原理如下[10]。当电介质 1 和 2 接触后，两表面会带上符号相反、大小相等的电荷（此即为接触起电，读者可想想冬天脱毛衣时起的静电）。这些电荷固定在电介质表面区域。在两个电介质被逐渐拉开的过程中，两电介质表面的这些电荷作为整体对外形成的电场发生变化。这会造成上下电极板中感应电荷的变化，从而外电路中形成电流。这样，外界对这个系统做的机械功就转化

成了电能。滑动模式的摩擦纳米发电机（图 3（b））的工作原理和接触分离式类似，只是运动模式不同。对于摩擦纳米发电机来说，电流的方向是和电介质相互运动的方向有关的。另外，虽然这里我们只讨论了两个电介质之间的接触起电，但电介质和导体之间也是可以接触起电的，只是导体的电荷可以移动。

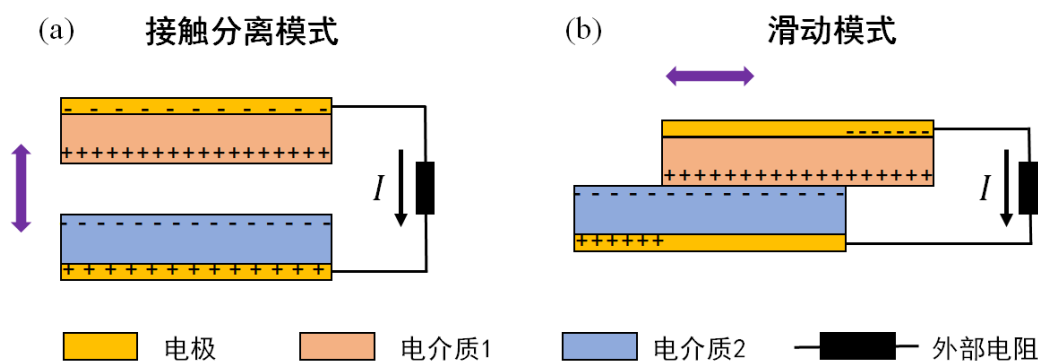


图 3: 摩擦纳米发电机的两种典型工作模式[11]: (a) 接触分离模式; (b) 滑动模式。图中正负号表示电荷聚集。I 是电流。紫色箭头表示电极板运动方向。

对于滑动模式来说，滑动过程中不可避免的摩擦和磨损，会导致发电机极易失效。例如图 4（a）所示，滑动模式发电机在工作 1000 个循环后表面出现了明显的磨损[12]。特别的，在小尺度下，摩擦磨损这些表面力的效应将变得尤为显著【注一】。对于接触分离模式的发电机来说，虽然其避免了摩擦磨损，寿命较长，但两电介质之间的空气极易发生静电击穿，从而导致电介质表面的固定电荷流失[13]，如图 4（b）所示。发电机的输出电流、电压和功率均和电介质表面的固定电荷量成正相关。因此，静电击穿会大大减小发电机的输出密度(即单位面积输出的电流、电压或者功率)。总结来说，摩擦磨损这一痛点问题，使得对于摩擦纳米发电机来说，高输出密度和长寿命二者不可得兼。



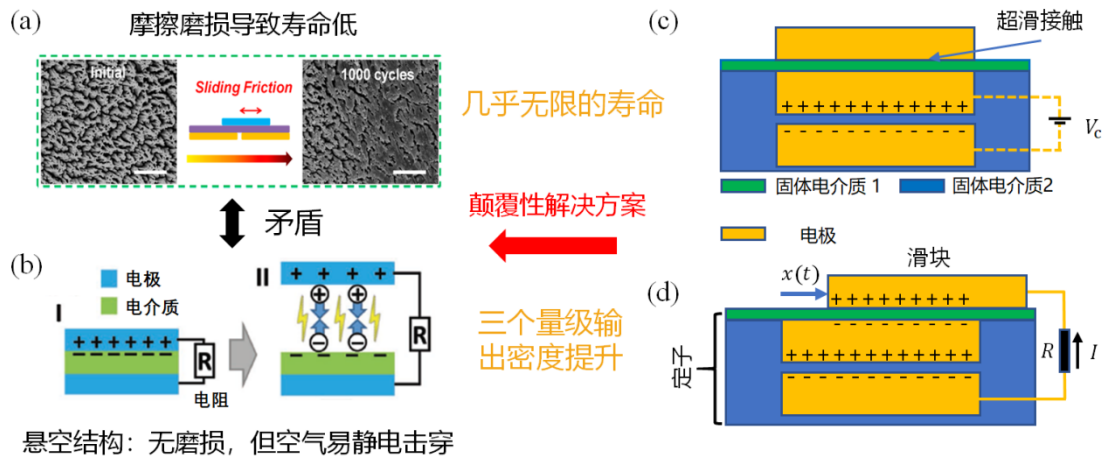


图 4: 微型发电机存在的矛盾以及超滑微发电机提供的颠覆性解决方案[14]。(a) 接触滑动模式存在的摩擦磨损问题。左侧和右侧图分别为滑动前和滑动了 1000 个循环后, 表面的电镜图片, 可以看出滑动 1000 个循环后表面出现了明显的磨损[12]。图片已获美国化学学会授权使用。(b) 接触分离模式存在的空气击穿问题, 当电极和电介质相互远离时空气发生击穿[13]。图片已获 John Wiley and Sons 授权使用。(c) 超滑微发电机的充电过程。外电路的虚线表示, 充电后该外电路会被移除。(d) 超滑微发电机的发电过程。充电后, 在滑块与定子里的底部电极间连接电阻。

我们设计的一种超滑微发电机建立在滑动模式的基础上, 利用结构超滑技术实现了接触界面的极低摩擦和磨损, 这给目前微发电机的困境提供了一种颠覆性的解决方案[14]。如图 4 (c) (d) 所示, 其结构包含三个电极和两个电介质, 其中顶部电极作为滑块与定子表面的电介质形成结构超滑接触。

这种超滑微发电机的发电过程如下。首先, 通过外部电源  $V_c$  给定子里的顶部电极和底部电极充上等大异号的电荷, 如图 4 (c) 所示。随后, 用外电路 (含一个电阻  $R$ ) 连接滑块和定子里的底部电极, 如图 4 (d) 所示。当滑块滑动时, 滑块与定子含有的电荷形成的电场将会随时间变化, 外电路中进而产生感应电流  $I$ 。因为摩擦磨损极低, 这种发电机拥有近乎无限的使用寿命。同时, 因为没有空气静电击穿, 它可实现极高的输出密度, 比接触分离模式的微型发电机高出三个数量级。该发电机更细致的工作原理读者可参考我们已发表的工作[14]。

除此之外, 近年来一种基于移动肖特基节的新型微发电机 (肖特基微发电机) [15-18] 被发明并得到了广泛的关注。其结构非常简单, 如图 5 所示。对这种发电机来说, 只需要金属 (或者半导体) 和半导体接触, 并且产生相对滑动,

即可产电流，且电流方向和滑动方向无关。目前肖特基起电的原理还不清楚。和滑动模式的摩擦纳米发电机一样，肖特基发电机在滑动过程中的摩擦磨损极大地限制了其寿命[18]。为了解决这个问题，我们使用了超滑材料实现金属和半导体的结构超滑接触，构造出了“肖特基超滑微发电机”[19]。我们实验上测得其可在  $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$  的接触面积下实现  $119\text{A}/\text{m}^2$  的高电流密度(电流大小为  $1.9\text{ nA}$ )，且具有几乎无限的寿命(实验显示其在至少 5,000 次工作过程中没有电流衰减)。

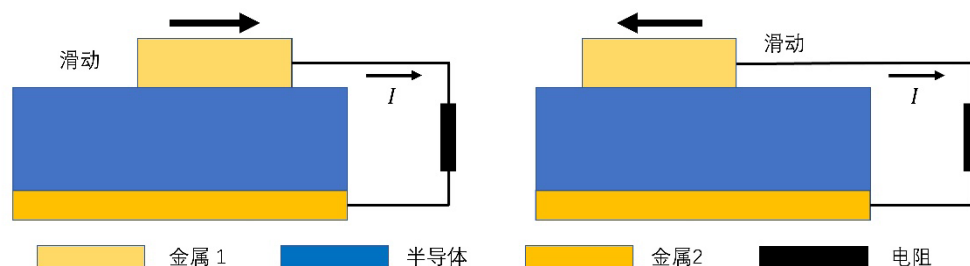


图 5: 肖特基微发电机的工作过程。

超滑微发电机作为独立式、长寿命、高输出密度、稳定的微型电源可以与其他微型器件集成，组成电源自供给的微型器件系统。这些系统将有望在应用在纳米机器人、分布式传感、智能芯片等领域。

最后，我们提供一些开放性的问题给读者进行思考：

1. 目前微米尺度 ( $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ ) 的肖特基超滑微发电机的输出大小(电流大小为  $1.9\text{ nA}$ ) 是否有不可替代的应用场景？
2. 对于超滑微发电机，如果大批量集成技术成功实现，可以将尺度集成到更大，从而实现更大的输出(输出性能正比于集成的数量)，那么，在不同尺度下(从  $10\mu\text{m}$  到  $1\text{mm}$ )，超滑微发电机对应的不可替代的应用场景有哪些？
3. 目前肖特基超滑微发电机的工作机理还不太清楚。一种可能的解释是肖特基节在相对滑动过程中，金属和半导体接触区域的耗尽层经历动态的建立和破坏，从而产生非平衡电场，驱动电子形成漂移电流。耗尽层是指金属和半导体接触表面发生电荷转移，达到平衡后形成的空间电荷区[20]。漂移电流是指在电场下，载流子(电子或者空穴)定向运动产生的电流。然而，目前对

动态非平衡肖特基节的理论研究手段仍然缺乏。您是否能够提出好的理论研究方法或者全新的机制解释？

4. 您能否给出一些建议，将外界环境随机的扰动转化为发电机稳定的相对运动？
5. 您能否针对本节主题提出全新的问题和方案？

## 1-2. 机械硬盘的新希望：超滑存储技术

在大数据时代，人们对数据存储的需求是指数级增长的。根据 IDC《Data Age 2025》报告，2025 年全球数据总量预计达到 175ZB(相当于约一万亿部高清电影)。目前，数据增长的速度已经超过了人类的存储能力发展速度，这对真正的大数据时代的到来构成了一大阻碍。然而，在现有技术条件下，传统机械硬盘（HDD，hard disk drive）和固态硬盘（SSD，solid-state drive）这两种市面上最常见的存储器在 2025 年都将逼近其存储密度极限[21]。

目前，消费类电子产品，如笔记本电脑，基本都用上了速度更快的 SSD。这给人们带来了一种感觉，觉得 SSD 可能马上要取代 HDD 了。但是，事实上，由于 HDD 单位存储容量的制造成本低，在未来较长一段时间内，HDD 仍然会和 SSD 在市场上共存。尤其是在数据中心，由于巨大的成本优势，HDD 仍将在较长一段时间内占据大部分市场[22]。

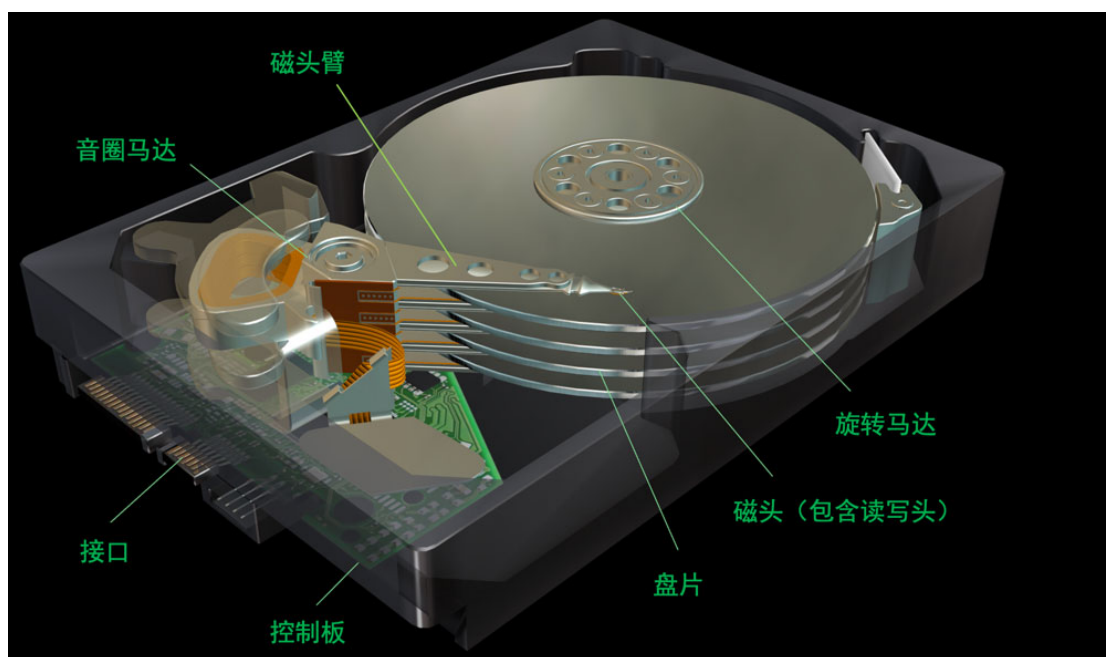


图 6： 机械硬盘结构图[23]。由 Animagraffs 制作。

为了弄清为何 HDD 已接近其存储密度极限，我们需要了解 HDD 的工作原理。HDD 主要由音圈马达、磁头臂、磁头（包含读写头）、盘片、旋转马达、控制电路板等构成（图 6）。读写数据时，旋转马达带动盘片高速旋转，盘片表面的气流发生变化，磁头在气流作用下在盘片表面悬浮（相当于飞行）。音圈马达通过磁头臂带动磁头在旋转的盘片上方移动，从而使得读写头可读写不同磁道（可以看作盘片上不同半径的圆圈）上的数据。磁头飞行在盘片表面来读写数据的这种结构形式，从 1973 年就开始使用了，它也被成为“温彻斯特结构”。

为什么磁头要飞行在磁盘表面上空，而不是简单地在磁盘表面滑动呢？答案是为了减少磨损。一个磁头在其一生中可以在磁盘表面飞行超过一百万公里。但如果是接触磁盘表面滑动，则它很快就会被磨损掉。

图 7 是磁头的照片。其中的黑色块体是磁头滑块，上面有按照空气动力学原理设计的“沟槽”。磁头滑块的这种设计使得磁头借助气流可以悬浮在磁盘表面。磁头的读写头在磁头滑块的旁边。

头盘间距，即磁头离盘片表面的磁介质材料表面的距离，是决定 HDD 存储面密度的一个重要因素。头盘间距越小，可支持的存储密度越高。如图 8，头盘间距包括了磁头滑块的保护层厚度、磁头飞高、磁盘表面润滑层厚度、和保护层厚度。

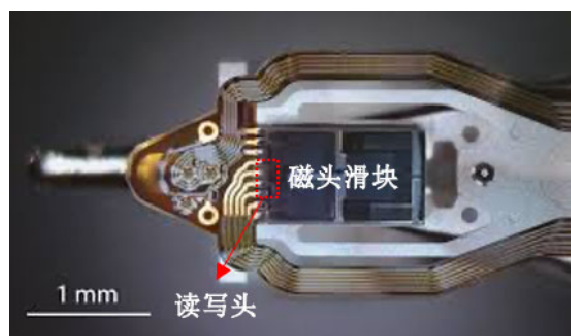


图 7： 磁头，该面是磁头朝向磁盘的一面[24]。

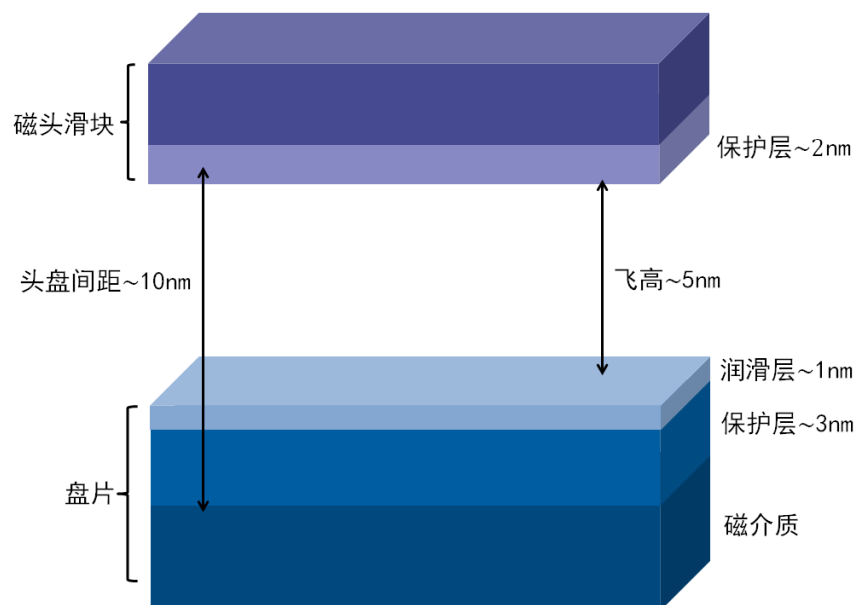


图 8： 头盘间距示意图[25]。

当下市场上 HDD 的存储密度约为  $1\text{TB}/\text{in}^2$ 。按照目前的技术水平，密度若要达到  $4\text{TB}/\text{in}^2$ ，磁头飞高则要减小到  $0.5\text{--}0.6\text{nm}$  [26]。而在未来，采用比特图案技术的 HDD，飞高则要进一步减小到  $0.2\text{nm}$ 。（比特图案技术是一种通过将盘片里的磁颗粒进行规则化排布，可进一步大幅提高 HDD 存储密度的技术）。然而，要把飞高做到如此之小，保证在读写数据过程中磁头不与盘片发生接触和碰撞，在技术上这是极其困难的。

读者或许已经可以猜到，如果超滑技术能成功应用于磁头滑块，磁头便可贴在磁盘的表面滑动而不用担心磨损问题。这样，飞高可以降为 0，存储密度可以大幅度提升。事实上，我们的确利用超滑技术在实验中做到了这点，如图 9 所示。此外，现有的磁头滑块的保护层和磁盘表面润滑层都可以去掉，头盘间距可进一步降低。由此可见，超滑技术可以帮助 HDD 突破存储密度瓶颈。

如超滑技术成功应用，则可突破沿用了近 50 年的温彻斯特结构。这种突破可能带来全新的 HDD 设计形式。比如，温彻斯特结构的磁头是通过复杂的空气动力学设计飞行在磁盘表面的，这导致一个磁头臂只能搭载一个磁头。引入超滑技术后，磁头可简单贴在磁盘表面滑动。此时，一个磁头臂原则上可搭载多个磁头（图 10）。多个磁头并行读写，有望大大提高现有 HDD 的读写速度。

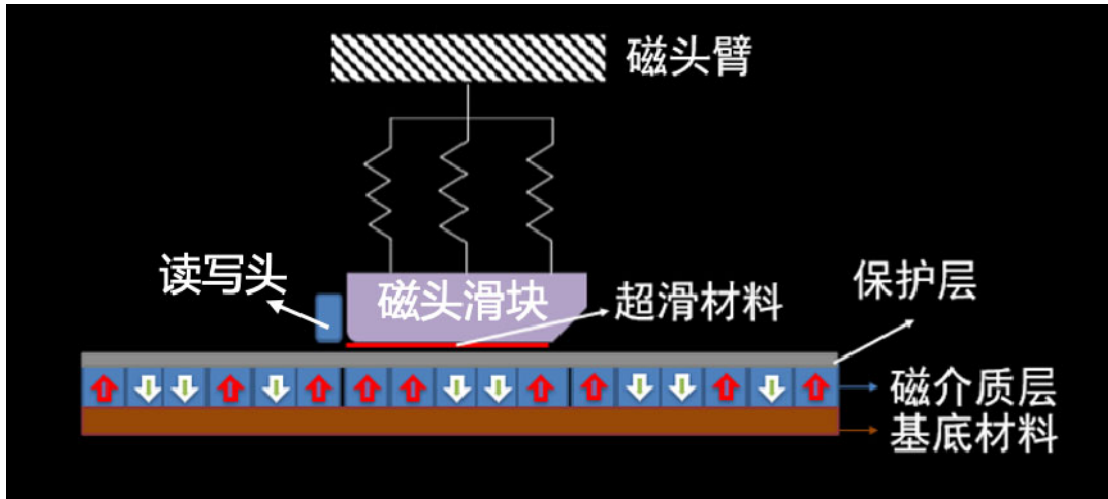


图 9： 超滑存储器示意图。超滑技术的引入，可使得磁头直接贴在磁盘表面滑动。图中上下箭头分别表示存储信息的磁颗粒的两种状态，对应 0 或 1。

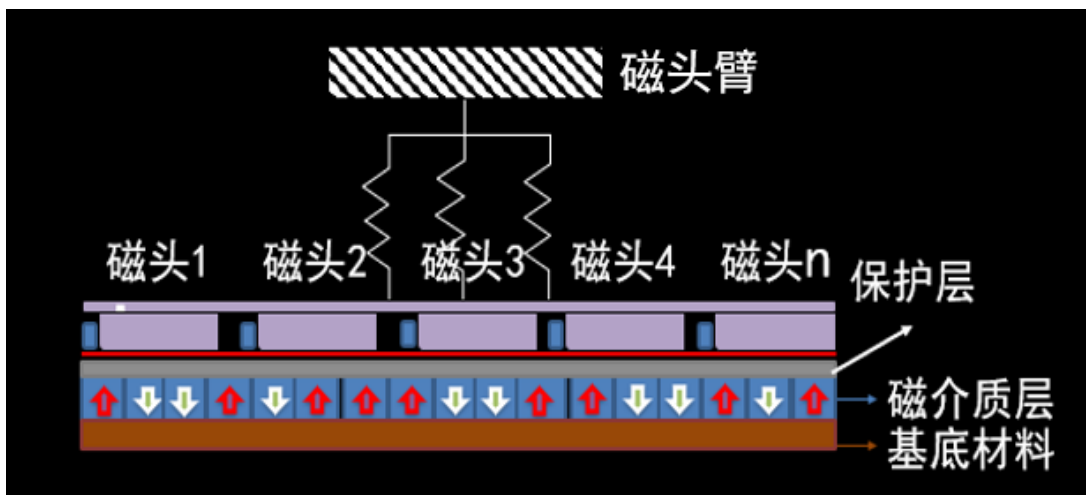


图 10： 超滑技术的引入，有望实现单磁头臂上的多磁头设计。

最后，我们提供一些开放性问题供读者思考：

1. 基于超滑接触、多磁头同时读写的技术，有哪些本文没提到的优势和挑战呢？
2. 实现一个微米尺度的滑块，在一个宏观表面上无磨损地滑移，这是一项底层技术。这个底层技术，除了应用在 HDD，还能有哪些有趣的应用呢？

### 1-3. 结构超滑-RF MEMS 开关类器件新机遇

微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, 简称 MEMS) 是集微传感器、微执行器、微结构、微能源、信号处理电路等于一体的微型器件或系统, 其尺寸在微米至毫米级别。射频 (Radio Frequency, 简称 RF) 是频率范围在 0.3MHz 至 300GHz 的高频交变电流或者高频电磁波的简称。RF MEMS 就是用于处理射频电流信号的 MEMS 器件, 具有小型化、低功耗、低成本、集成化等优势, 广泛应用于无线通讯系统 (4G 或者 5G)、雷达系统、自动化测试等电子设备中。

RF MEMS 器件中最为突出的代表是静电驱动接触式 RF MEMS 开关。这是一类利用静电力驱动开关开闭, 从而控制射频电流信号通断的射频器件。我们这里把这种开关简称“射频开关”。图 11 展示了其结构。其工作原理如下: 当在上下极板之间施加驱动电压  $V$  时, 悬臂梁在静电力作用下向下弯曲, 带动上触点与下触点发生闭合, 连通电流信号输入端与输出端。这时外界射频电流电路得以接通: 射频电流信号从输入端流入, 通过导电的悬臂梁, 经过上下触点, 然后从输出端流出。当撤销驱动电压  $V$  时, 悬臂梁恢复到初始状态, 上下触点分离, 输入端与输出端断开, 外界射频电流电路被切断。

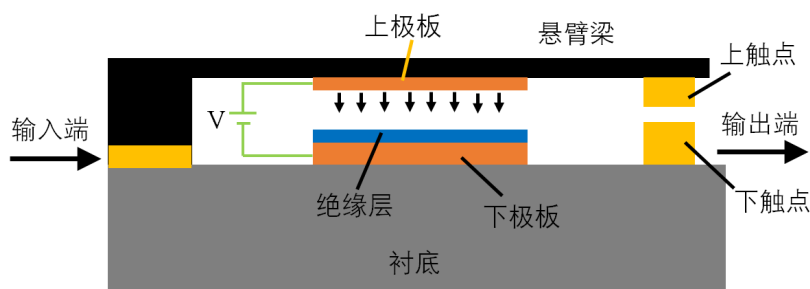


图 11: 静电驱动接触式 RF MEMS 开关结构示意图。其中黄色部分和悬臂梁均导电。衬底绝缘。

黑色箭头表示施加驱动电压  $V$  时, 悬臂梁受到的静电力的方向。

然而, 目前的接触式 RF MEMS 射频开关存在诸多应用限制。首先, 因为触点不可避免的摩擦磨损, 开关使用寿命较短 (几亿次)。其次, 因为上下触点闭合为机械式运动, 开\关状态的切换用时普遍较长 (微秒级)。另外, 为了防止环境中的杂质污染物落在触点等地方干扰开关运作, 整个射频开关必须要被密封。这

些弱点极大限制了射频开关的大规模应用。

我们基于结构超滑技术，设计并制造了新型静电驱动式 RF MEMS 开关，如图 12 所示。

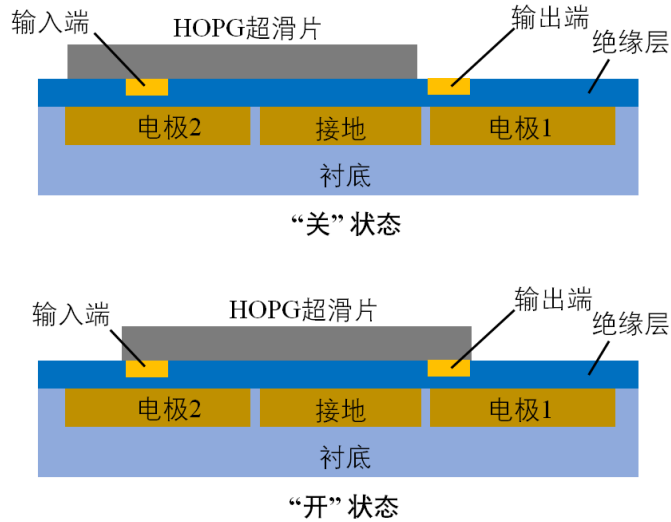


图 12: 结构超滑静电接触式 RF MEMS 开关结构图。其中导电的 HOPG 超滑片在静电力驱动下左右运动。

不同于传统的垂直驱动结构（图 11），我们的新型结构通过控制导电的 HOPG 超滑片（Highly Ordered Pyrolytic Graphite，简称 HOPG）与绝缘层间的滑动来控制信号的通断。HOPG 超滑片的尺寸在 10 微米量级。当在电极 1 上施加电压时，超滑片右侧边缘感应出和电极 1 上相反符号的电荷。在电场作用下，超滑片将受到向右的静电力，向右运动，连通输入端和输出端，开关处于“开”态。同理，当在电极 2 上施加电压时，超滑片会往左运动，输入端与输出端断开，开关处于“关”态。

由于超滑片与绝缘层间的往复滑动摩擦力极小，无磨损，且不存在冲击，超滑开关仅需极低的驱动电压就可以工作，且能拥有近乎无限寿命（五千亿次以上）。并且，由于超滑片质量极小（ $10^{-14}$  kg 量级），开关的闭合时间可以达到 100ns 量级，切换速度极快，可应用于高速场合。

对于结构超滑体系来说，其优异的摩擦学特性在日常环境条件下即可实现，且其具有神奇的表面自清洁效应 - 超滑片滑动时可以将绝缘层表面的污染物清



扫去除（详情会在实验现象和技术部分讲解），这使得超滑开关有望能和集成芯片一起封装在密封要求不高的塑料管壳里。由于 MEMS 器件的高密封封装环节一般占器件成本的 50% 以上，超滑开关因此可以极大地降低器件成本。另外，超滑片受到的静摩擦力在 50 nN 量级。考虑到超滑片极小的质量，水平方向上静摩擦力足以对超滑片进行约束，而垂直方向上范德华吸附力足以让超滑片不发生脱落。这些特性让新型超滑开关的结构变得十分简洁，容易与集成电路工艺实现一体化集成。

最后，我们提供一些问題供读者思考：

1. 怎么降低 HOPG 超滑片与金属线（在图 12 中即输入和输出端）间的接触电阻？
2. 可以有哪些途径和方法实现 HOPG 超滑片位置的可控调节？

#### 1-4. 超滑微谐振器：谐振器领域的新突破

要理解谐振器的工作原理，就需要首先明白什么是谐振。谐振又叫共振。（但在中文里，共振器和谐振器意思并不一样，这文中我们只讨论谐振器）。设想有一个弹簧加小球体系如图 13 所示。其中，小球的质量为  $m$ 。弹簧在一定的伸长长度范围内，弹簧回复力（或者说弹力）和伸长长度成正比，比例系数为  $k$ ，即弹簧的弹性刚度系数（或称弹性系数）。这个伸长长度范围也叫线性区间。对于该系统，系统的固有振动频率为  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 。如果在小球上施加频率为  $\omega_e$  的周期性外力  $F$ ，那么当  $\omega_e = \omega_0$  时，小球的振幅达到最大。我们称此时的系统发生了谐振，系统的振幅为谐振振幅，这时的频率也叫谐振频率。这里的谐振讨论都是针对线性区间而言的。

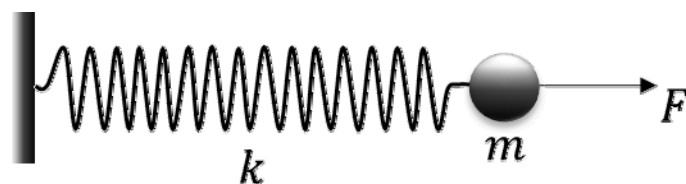


图 13： 弹簧振子图。

谐振器就是利用了谐振原理，表现出谐振行为的设备或系统，通常用于产生

特定频率的信号或选择特定频率的信号[27]。谐振器是很多电子设备中广泛使用的一种基本元器件。比如在手机中，我们就可通过调节谐振器的谐振频率，使谐振器被外界相应频率的信号激发谐振，从而选择出特定频率的信号，以此上网或者接电话。

伴随着器件小型化的趋势和微纳米工艺的发展，谐振器正逐步成为人类生产生活中的关键器件之一。然而，受限于自身的结构和运动方式，现有的微谐振器（即尺寸微小的谐振器，尺寸一般在百微米到毫米量级）在某些方面表现得不尽如人意。例如，谐振频率的可调节性较差（需要增加额外的装置来调节谐振器的谐振频率）、谐振频率的调节范围较小、谐振频率调节速度较低、谐振振幅过小、实际尺寸较大。关于这些缺陷如何限制了谐振器的应用，下面会详细探讨。

谐振频率可调对于微谐振器来说会是一个很大的加分项。首先，在微加工过程中，制作出来的微谐振器难免会和设计的有些偏差，导致实际谐振频率与预期谐振频率不同。若能实现谐振频率的调节，这一困境则可以避免。其次，在使用过程中，环境（如温度、湿度等）的变化同样也会造成微谐振器谐振频率的变化，这同样可以通过调节谐振频率来解决。此外，在一些应用场景中，比如采集海浪的振动能时，因为这些振动包含不同的频率，微谐振器频率如果可调则可以极大提高能量采集效率。然而，目前的谐振器弹性刚度和质量很难改变，这导致其谐振频率可调性较差，谐振频率的调节范围也较小。

谐振器的频率调节速度在一些应用场合中是一个关键制约因素。如当谐振器应用在控制系统中的机械逻辑器件中时，谐振器的频率调节速度会制约逻辑器件的运算速度。（机械逻辑器件是指利用机械状态的不同来表示 0 和 1 的逻辑器件，如位置、速度等的不同）。然而，目前的谐振器调频速度普遍不高。这就导致基于这些谐振器的机械逻辑器件的响应速度较低，一般只能用于电梯等对响应速度要求不高的控制电路中，大大限制了应用范围。

受限于微观尺度的粘附力等阻力【注一】，现有的 MEMS 谐振器结构大多为含有谐振梁的悬空结构，如图 14 所示。其中，谐振梁导电。通过在谐振梁和梁下方的电极之间施加交流电压，谐振梁就可在静电力作用下发生谐振。然而，若谐振梁谐振振幅较大，则谐振梁和下方电极之间的静电吸引力可能会大于谐振梁的形变回复力，导致谐振梁和电极吸合，造成谐振器失效。另外，谐振梁的线性区

间是很小的。这些因素限制了谐振梁的振幅，而较小的振幅使得这些谐振器灵敏度一般偏低。为了增大振幅，一个办法是增加谐振器的尺寸。但是加大尺寸无法满足器件小型化的需求。

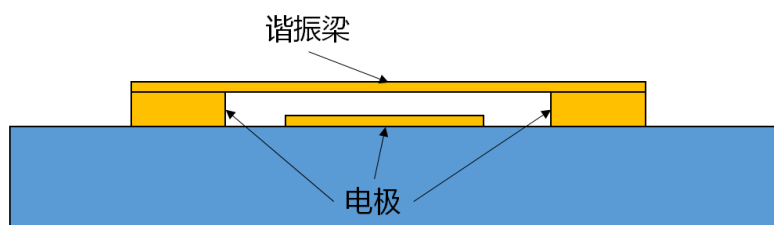


图 14: MEMS 谐振器的简化示意图。谐振梁导电，其两端分别固定在两端的电极上。

幸运的是，利用结构超滑技术，上述这些限制将不复存在。

我们设计的超滑微谐振器的结构如图 15 所示，它是由基底中的左右两个电极（电极 1 和电极 2），电介质 2，电介质 1 薄层以及石墨滑块构成。通过在电极 1 和 2 之间施加电压  $V$ ，超滑微谐振器可形成两个电容（电极 1-滑块组成的电容、电极 2-滑块组成的电容）。考虑到能量极小值原理，滑块会倾向于向使系统能量最小的地方运动。

经过理论计算和模拟，我们发现，滑块在两个电容之间运动时（需保证滑块与电极 1 和 2 均有正对面积），会受到形如  $F = -k(V)x$  的类似于弹簧的线性回复力。其中  $x$  是滑块位移， $V$  是施加的电压， $F$  是滑块受到的静电力。理论结果表明  $k(V) \propto V^2$ 。这意味着整个系统是一个谐振频率为  $\omega = \sqrt{k/m} \propto V$  的超滑微谐振器。

因此，我们可以很简单地直接通过调节电压  $V$  来调节谐振频率，不需要添加额外的装置来调频，故频率可调性很好、调频速度极快。并且一般可以从近 0 调节至百兆赫兹，调节范围也很大。此外，由于是滑动模式，滑块相对位移较大，超滑微谐振器的振幅也就较大（可以达到与滑块尺寸相当）。由于相对位移较大，这种谐振器作为振荡器（一种可以产生周期性信号的装置）产生的信号强度也相对较大，进而在信号传输方面也具有很大优势。另外，目前设计的超滑微谐振器的尺寸是 10 微米的量级，所以能够满足器件小型化需求。

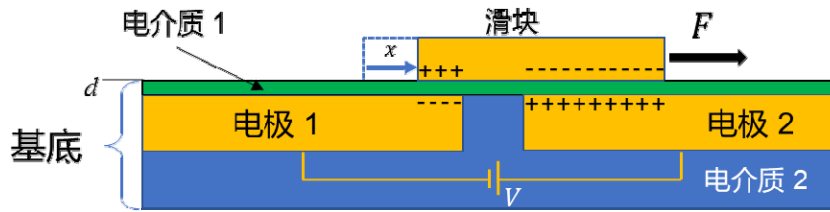


图 15: 超滑微谐振器原理图。正负号分别表示正负电荷的聚集。

下面，我们提供一些供读者思考的问题：

1. 您能想到哪些技术应用场景，可以充分体现超滑微谐振器的优势？
2. 目前的超滑微谐振器可以实现调节谐振频率的功能。那么，是否可以通过一些设计，使谐振器可以实现其他特殊功能（如调节带宽）呢？
3. 如果超滑微谐振器被应用在能量采集器中，如何使超滑微谐振器的谐振频率与外界振动频率保持一致？
4. 利用超滑微谐振器小尺寸和高灵敏度的特点，倘若在子弹上安装一个利用超滑微谐振器制做的微陀螺仪，是不是可以让子弹精确制导呢？

## 1-5. 总结与展望

我们在这部分介绍了几项超滑应用技术。这些应用技术都巧妙地利用了结构超滑技术，为相关技术领域的痛点问题提供了颠覆性的解决思路。可以大胆想象，未来利用结构超滑技术和其他新科技，人类可以在追求“零”摩擦的道路上走的更远。结构超滑技术的发展和大规模应用，很可能让人类的生产生活方式和体验发生翻天覆地的改变。

我们可以观想，表面由超滑材料打造、使用超滑微发电机、拥有近乎无限寿命的微纳机器人，正穿梭于人体之中，定点消灭着癌细胞。外太空中的卫星，正在展开几百米乃至上千米宽的超大天线。这些卫星，在支持天线展开的滑轮表面使用了超滑材料，从而突破了天线展开的面积限制。在铁轨和车轮接触面实现了宏观超滑的新型高铁，通过每列车厢的喷气式推进，正以每秒一千公里的速度，驰骋在神州大地上。。。

## 2. 结构超滑理论

### 2-1. 公度与非公度接触

为了解释结构超滑的基本原理，我们先引入“公度”与“非公度”的概念。这个概念的严格定义比较复杂。我们先以日常生活中的鸡蛋盒为例来简单说明，让读者朋友有个直观的认识。如图 16 所示，我们用两个蛋盒类比两个相同的晶格表面。晶格指晶体内原子排列的具体形式，而晶体可以简单理解为原子周期性规则排列形成的固体。

在图 16 (a) 中，当两蛋盒取向一致时，上面蛋盒的突起恰好嵌入下面蛋盒的凹陷之中，他们刚好卡住。此时我们说上下表面匹配，并把这种情形称为“公度”接触。此时根据日常生活经验，我们知道要把两个蛋盒沿侧向拉开需要花费很大力气，对应晶格界面来讲就是摩擦力很大。然而，如果我们将上面的蛋盒旋转一个角度之后再放到下面的蛋盒上，两个蛋盒就无法卡住了，如图 16 (b) 所示。此时我们说上下表面不匹配，并把这种情形称为“非公度”接触。此时只需要很小的力就能拉动上面的蛋盒，对应晶格界面来讲就是摩擦力很小。

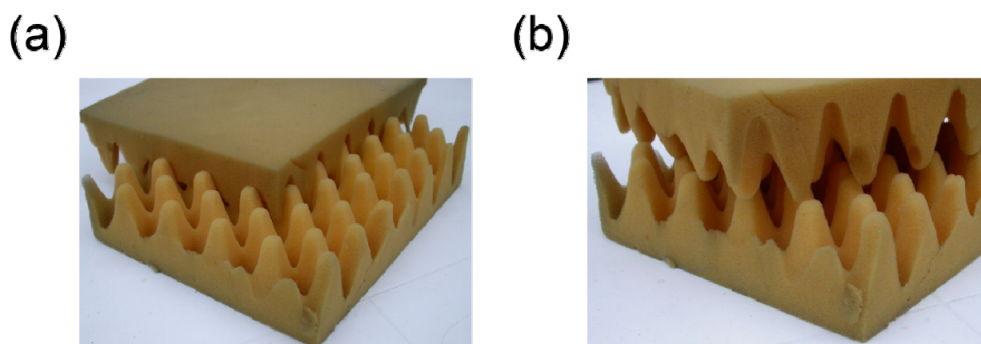


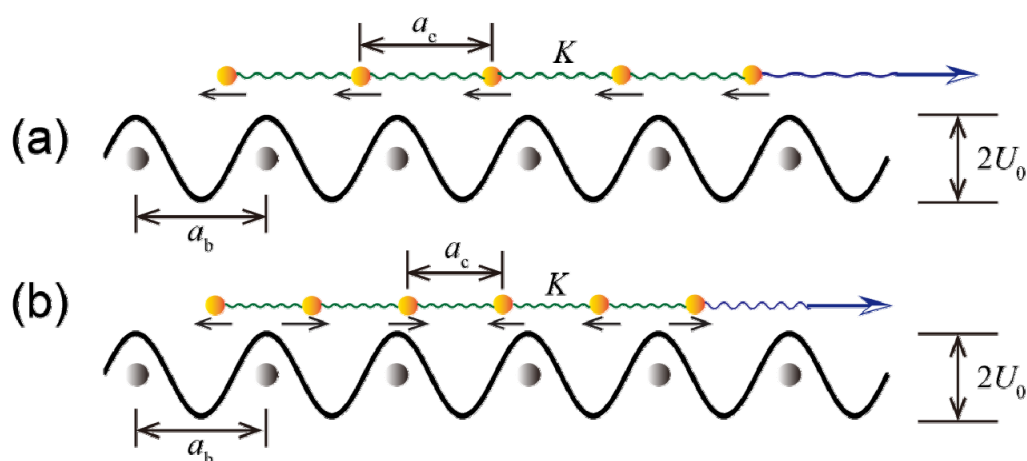
图 16: (a) 和 (b) 分别展示了二维下公度和非公度可以用鸡蛋盒来形象地理解[28]。

### 2-2. Frenkel-Kontorova 模型

超润滑 (superlubricity)，是摩擦系数极低(小至 $10^{-3}$ 量级或更低)的接触

状态的统称。超润滑这个概念包含使用润滑剂和不使用润滑剂两种情况。不需要使用润滑剂的结构超滑，是实现超润滑的一种重要方式。结构超滑和公度/非公度的概念密切相关。

为了对公度、非公度、和结构超滑有更精准的理解，我们用一个简单的模型——一维 Frenkel-Kontorova (FK) 模型[29]（见图 17 (a) 和 (b)）来进行说明。这个模型刻画了上下两表面的接触：上表面的  $N$  个小球（代表原子）通过弹簧首尾相接（周期为  $a_c$ ），在周期为  $a_b$  的下表面晶格基底上滑动。这里，弹簧代表了近邻原子间的相互作用。在 FK 模型中，原子链的每个原子都受到晶格基底的周期性作用，这个相互作用能量可以由一个余弦函数  $U_0 \cos \frac{2\pi x}{a_b}$  来描述。其中  $U_0$  代表原子和基底之间的相互作用强度， $x$  是原子的水平位置。在 FK 模型里，基底是刚性的（也就是假设其变形很小，可以忽略不计）。



**图 17：** 晶格的公度和非公度接触。(a) 和 (b) 分别表示一维 FK 模型下晶格公度与非公度的情形。图中黄色小球表示原子链中的原子，灰色小球表示基底中的原子，绿色波浪线表示连接黄色小球的弹簧，蓝色箭头表示施加的外力的方向（也是原子链的整体滑动方向）。黑色的起伏曲线表示链中单个原子和基底的作用能量随原子水平位置的变化。黄色小球下方的箭头表示链中原子受基底作用力的方向。

通过 FK 模型，我们容易想到，原子链和基底之间的静摩擦力取决于原子链中的原子在基底上的位置。这里静摩擦力是指移动整条原子链所需施加的最小外力。如果原子链的大部分原子和基底原子位置比较匹配（例如图 17 (a) 所示，原子链中每个原子都位于基底相邻两原子的正中间的右上方），那么移动原子链

时，这些原子都受到来自基底原子的阻力。读者可以形象地理解为这些原子都在“上坡”（这里的坡，是相互作用能曲线）。这些阻力形成合力使得整体摩擦力较大。

但如果原子链中的原子和基底原子位置不太匹配（例如图 17（b）所示，原子链中有的原子位于基底相邻两原子正中间左上方，有的位于正中间右上方位置），那么原子受力就会不均匀。这时，有些原子受力方向与原子链整体滑动方向相同，相当于“下坡”；有些则与滑动方向相反，相当于“上坡”。当链足够长时，链中原子受力大部分会相互抵消，整体摩擦力也就非常低。这就是 FK 模型下超润滑现象的简单机理。

知道了在 FK 模型下实现超润滑的机理后，很自然的一个问题是在什么条件下才能实现这种超润滑呢？一个显而易见的条件是上下表面原子之间的位置匹配程度要低。但这能否定量刻画呢？在一维下，我们确实可以引入一个参量  $\theta$  来定量描述这种匹配度，其定义为原子链和基底的晶格周期之比：

$$\theta = a_c/a_b.$$

理论上可以证明，对于无限大的体系， $\theta$  为有理数和无理数分别对应有静摩擦力和静摩擦力严格为零的情况 [29]。我们将这两种情况分别严格定义为一维下的**公度接触**和**非公度接触**。如果读者对这个理论定义不太理解，也可以暂时跳过这点，就简单地把公度理解为匹配度高，各个原子受力容易形成较大的、与整体滑动方向相反的合力；非公度理解为不匹配，各个原子受力相互抵消（可参考图 16 的鸡蛋盒）。由此我们得到超润滑的第一个条件：接触面是非公度的。

## 2-3. Aubry 转变

读者朋友可能会问：所有非公度表面都能呈现超润滑吗？答案是否定的。非公度表面能否实现超润滑还和接触表面的材料刚度，以及上下表面之间的相互作用强度相关。刚度是衡量材料变形难易程度的物理量，刚度越大，材料越难发生变形。读者可以把刚度简单理解为弹簧的弹性系数。研究发现，针对一维 FK 模型，可以引入一个参数

$$\lambda = \frac{4\pi^2 U_0}{K a_b^2} = K_{\text{eff}}/K$$

来描述实现超润滑的条件。这里 $K$ 是原子链的刚度， $K_{\text{eff}} = \frac{4\pi^2 U_0}{a_b^2}$  是两表面间相互作用的等效刚度。简单来说，当 $\lambda$ 较大时，接触面有静摩擦力。当 $\lambda$ 从大值逐渐减小到低于临界值 $\lambda_c$ 时，系统的静摩擦力会从非零值变为零。这个转变称为 **Aubry 相变**[29]。我们可以如下简单地理解这个转变。当上表面的刚度 $K$ 小，同时上下表面之间的相互作用 $U_0$ 强（从而 $K_{\text{eff}}$ 大）时， $\lambda > \lambda_c$ 。此时，上表面会在下表面的作用下发生局部变形，以使得上下表面的原子位置趋于匹配，因为这样系统能量更低。这时系统会接近公度的状态，摩擦力大。而当上表面刚度大，而上下表面间的相互作用弱（从而 $K_{\text{eff}}$ 小）时， $\lambda < \lambda_c$ 。此时，上表面变形很小，系统会保持非公度接触，呈现超润滑状态。

传统上，人们将这种由界面晶格非公度引起的超润滑称为“结构润滑”（structural lubricity）。我们在篇首定义的结构超滑（structural superlubricity），基本也是由这种界面晶格非公度引起的超润滑。但我们定义的结构超滑比起结构润滑，多了无磨损的特性。郑泉水教授领导的课题组经过多年的研究发现，近零磨损是结构超滑体系的一个重要特征，这一点在下文中还会再次强调。

## 2-4. 结构超滑的实现条件

综上所述，我们得到实现结构超滑所需的两个条件：1) 接触表面非公度；2) 材料刚度强于表面之间的相互作用等效刚度。其实这里还有两个隐含条件。3) 接触表面必须十分平滑[30]。读者可以想象，如果表面不平滑，那么在滑动时，表面凸起部分很容易发生碰撞而增加摩擦力和产生磨损。4) 接触两表面间不会形成化学键。如果有化学键生成，则会大大增加摩擦力和带来磨损（后文有关于磨损的详细讨论）。读者可以在后文看到，现实中二维层状材料可以满足这些条件，实现结构超滑。

以上关于非公度性的理论讨论都是针对一维的情况。对于二维表面，非公度性需要由另外的更复杂的方式来定义[31]。不过，我们还是可以简单地用匹配的概念来形象地理解二维情形下的晶格非公度性（见图 18 以及图 16 中的鸡蛋盒）。

另外，以上的讨论是针对两个晶体表面的接触。如果其中一个表面是非晶体，



我们也可以简单理解为接触面相当于形成了非公度接触。这是因为非晶体里原子排布不规则（混乱随机），两表面间自然也就不匹配，各原子受力很难形成较大合力了。

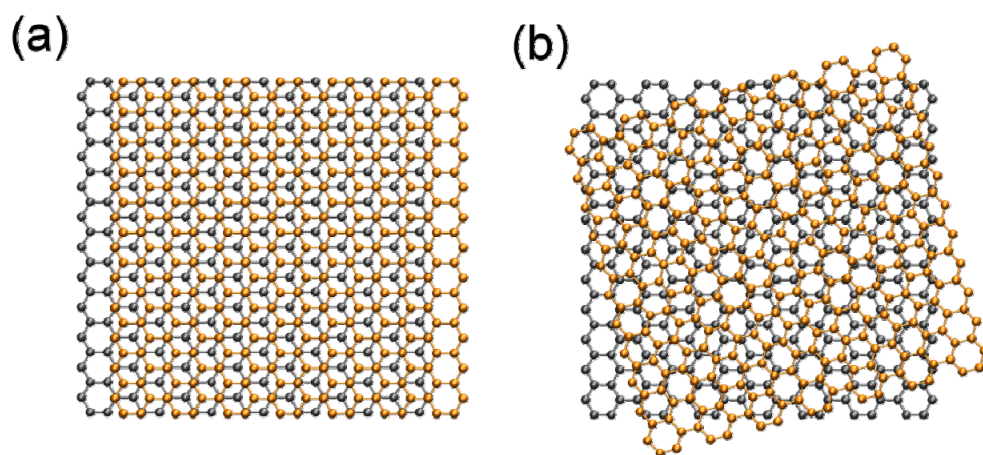


图 18: (a) 和 (b) 分别是二维下晶格公度（匹配）和非公度（不匹配）的示意图。其中黄色小球表示上表面的原子，灰色小球表示下表面的原子，小球间的连线表示化学键。

## 2-5. 现实体系的结构超滑

上面的讨论基本是基于无限大的晶格表面。而实验中的有限大体系会存在边界（即体系的边缘）。最新的研究发现[32]，体系边缘的化学键等因素会增加超滑体系的摩擦力。不过，上面公度和非公度的概念仍然适用（见上面鸡蛋盒的例子）。

另外需要指出的一点是，上文讨论的摩擦力均指静摩擦力，即滑动速度趋于零时的摩擦力。滑动速度不为零时的摩擦力称为动摩擦力。对于动摩擦，能量耗散（即摩擦生热）始终存在。即使对于无限大的非公度晶格接触，动摩擦力也不会严格为零，而是一个非常低的值。

由于上述两种因素，现实中结构超滑系统的摩擦力不可能严格为零。不过实际的测量发现，结构超滑体系的摩擦系数确实极低（小至 $10^{-3}$ 量级或更低）。

## 2-6. 问题与挑战

上述的 FK 模型虽然可以解释结构超滑的基本原理，但无法解释一些关键因

素对现实体系结构超滑状态的影响，如边缘化学键、材料弯曲变形、污染物在固体表面的吸附等。目前虽然针对这些关键因素分别发展了理论模型和计算方法来描述[33-36]，但是仍然缺乏可以综合考虑各种因素的跨尺度理论模型和高效的计算方法，无法为大尺度结构超滑体系的设计提供理论指导。为了达到这一目标，需要解决如下问题：

1. 建立既能考虑原子尺度的结构-摩擦关系又能描述宏观尺度摩擦特性的理论模型。
2. 发展跨越原子尺度-介观尺度（介观指从纳米到毫米）的计算方法，使得在理论上研究介观尺度下的超滑问题成为可能。

## 3. 结构超滑实验现象与技术

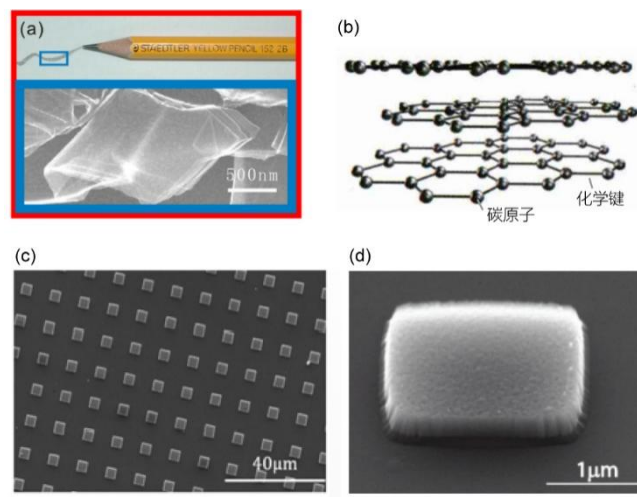
### 3-1. 石墨岛体系

上面我们从理论上讨论了实现结构超滑的条件。那么在现实中什么样的固体体系能够满足这些条件呢？“石墨岛”便是一个典型例子。

石墨是一种在日常生活和工业生产中都具有广泛应用的材料，它是碳的一种同素异形体，并且导电性、导热性、生物兼容性都很好。生活中常用的铅笔，其笔芯便含有石墨。微观上石墨具有层状的结构，使用扫描电子显微镜观察铅笔的笔迹，便可以看到其中包含大量这样的石墨薄片层（图 19（a））。如图 19（b）所示，石墨中的碳原子在层内排列成正六边形，同一层中的相邻碳原子彼此间通过很强的化学键相连，所以每一层石墨（也叫石墨烯）的刚度都很大。相邻的两层之间则是很弱的范德华相互作用力。范德华力是一种广泛存在于分子或原子间的作用力。类似石墨这样由一层层单原子层组成的材料也被称为“二维层状材料”。

“石墨岛”是以石墨作为原材料，通过成熟的微加工工艺制备而成的“岛状”结构（如图 19（d）所示）。在一块石墨材料的表面，使用芯片行业中常用的光刻等刻蚀技术，精密和可控地刻蚀掉一小部分材料，留下一个个方形的石墨“柱子”[2]。这些“柱子”的宽度和高度通常都在几个微米左右，如图 19（c）所示。这些凸起的石墨微柱，犹如海洋中一个个凸起的小岛，所以称作“石墨岛”。

图 19 (d) 显示了一个单独的石墨岛在高放大倍数的电子显微镜中的照片。上面提到石墨具有层状结构, 而一个石墨岛在厚度方向上便包含了成千上万层这样的片层结构 (这些层状结构因为太小了, 即使在图 19 (d) 的高倍电子显微镜中仍然无法看见)。

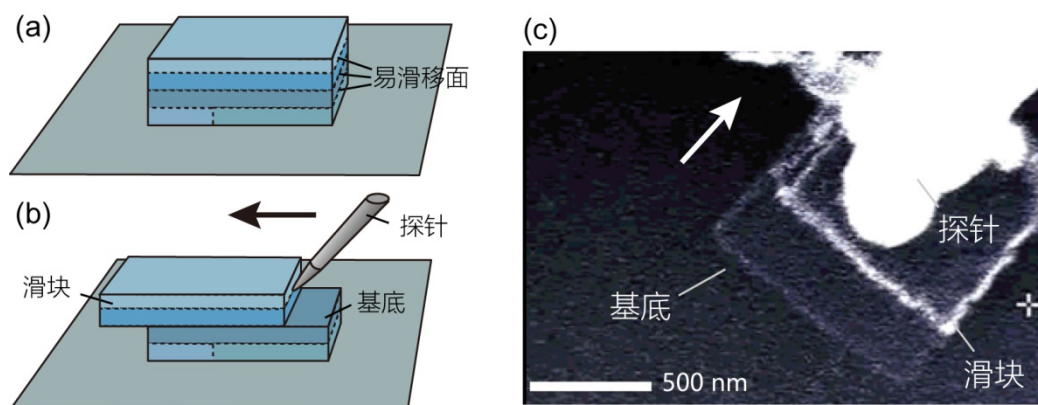


**图 19:** 石墨和石墨岛。(a) 用电子显微镜观察铅笔写下的笔迹。这些笔迹实际上是由大量微纳米尺度的石墨薄片组成[2]。图片已获美国物理学会授权使用。(b) 石墨的层状原子结构。碳原子 (图中黑色小球) 在层内通过化学键排列成正六边形 (短线表示化学键), 而相邻层间是很弱的范德华相互作用 (图中未画出)\*。(c) 使用微加工工艺制备而成的“石墨岛”阵列, 其包含了成百上千个“石墨岛”。(d) 一个单独的“石墨岛”的高倍电子显微镜照片[37]。图片已获美国物理学会授权使用。

接触界面非公度是实现结构超滑的条件之一, 这在石墨岛中是如何实现的呢? 原来一个石墨岛常常会包含好几块区域。在每个区域内, 原子按照一个确定的周期性规律排列 (例如图 19 (b) 所示的六方形结构这样的周期性规律)。这样的区域被称为一个晶粒。不同晶粒中的六方形结构一般朝着空间中不同的方向, 这方向被称为晶格取向。处于不同高度的相邻晶粒, 在其交界处, 两侧的晶格取向一般不同。因此, 交界处两表面原子位置就不太匹配, 非公度条件因此得到了满足。这些界面便是石墨岛中可能发生结构超滑的“易滑移面” (图 20 (a))。使用微纳米力学的实验手段, 我们可以精确地操纵一根微探针推动石墨岛, 此时石墨岛便会从某一个易滑移面裂开成为上下两片。我们不妨称上块叫做滑块, 而下块叫做基底。

读者可能会注意到，滑块和基底间的相互作用只有范德华作用，所以很弱，满足上面所提到的超滑所需的另一个条件：材料刚度大于两表面间的相互作用等效刚度。于是这时结构超滑便发生了（图 20（b））。

图 20（c）显示了一次真实的实验过程的扫描电子显微镜照片。在实际操作中，微探针的后端可以接上各种传感器，从而直接测量石墨滑块滑动的摩擦力。我们发现[38]这一超滑界面的摩擦系数低于  $3 \times 10^{-5}$ ，比滑冰用的冰刀与冰面间的摩擦系数还要低一千倍。将石墨岛放在不同的环境中进行实验后，我们发现这样的结构超滑现象在大气中[3]、高真空[39]、液体（例如水）浸泡中[40]、载流条件下[19]都能够稳定的实现。我们也测量了室温到接近  $200^{\circ}\text{C}$  [41]温度范围内的摩擦系数，证实了在这些温度范围下结构超滑能够实现。



**图 20：**石墨岛内的易滑移面和石墨岛超滑。(a) 一个石墨岛内部包含很多晶粒（此处用不同颜色表示），在两个相邻晶粒之间的界面上非公度条件自然地满足了，这些界面便是石墨岛中的“易滑移面”。(b) 使用微探针推动石墨岛时，石墨岛从某一个易滑移面处裂开，形成滑块和基底。图中黑色箭头指示了探针的推动方向。(c) 某次实验过程中的扫描电子显微镜照片（俯视图），图中白色箭头指示探针的推动方向[2]。图片已获美国物理学会授权使用。

我们的研究还发现，石墨岛体系能够实现超滑的另一个重要原因，是石墨岛中的接触界面可以达到纳米级光滑。通常的固体表面，即使肉眼看起来光滑如镜，在显微镜下看仍然是非常粗糙的。而我们对石墨岛界面的精细观察显示，发生超滑现象的石墨滑块和基底的界面普遍非常光滑，表面起伏在几纳米以下。我们也确实观察到，有一部分沿着易滑移面被推出来的石墨滑

块不能实现超滑，其摩擦力远远大于发生超滑的那些石墨滑块的摩擦力。相对应地，这些滑块与基底的接触界面并非纳米级光滑，而是存在台阶等缺陷[30]。这些缺陷的存在破坏了超滑。

## 3-2. 结构超滑带来的新奇现象

### 3-2-1. 石墨岛的自回复现象

具备超滑特性的石墨岛，可以发生许多非常新奇和有趣的现象，其中之一便是石墨岛的“自回复”现象[2]。

要理解石墨岛的“自回复”现象，首先需要了解表面能的概念。顾名思义，表面能意思是物质表面所具有的能量。对于液体，表面能有一个更为人们熟知的名字 - “表面张力”。与表面张力相关的现象随处可见，例如一些昆虫可以靠着水的表面张力在水面上“行走”。在太空的失重环境下，水滴总是倾向于成为完美的球形，这是因为表面张力促使液滴收缩。收缩成球形导致水滴总表面积达到最小。表面能和表面积成正比，所以水滴表面积的最小化也就意味着表面能的最小化。水滴成为球形这个现象故而也是普遍存在的能量最小化原理的体现。

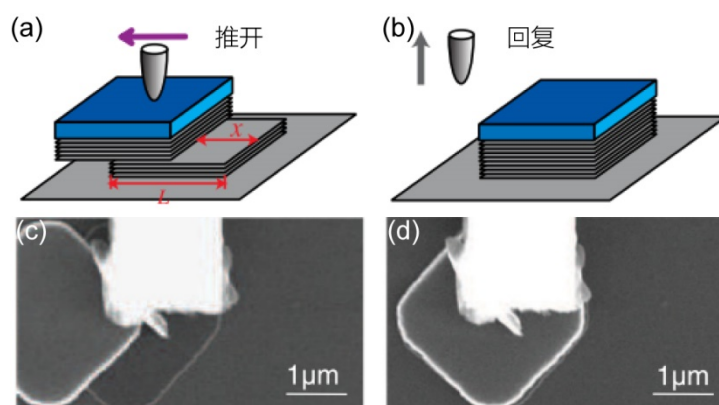
固体同样具有表面能，但我们却很少在固体表面见到表面能的作用。原因之一是固体接触的摩擦力通常都太大了，表面能的效应与之相比微乎其微。而在超滑石墨岛中，因为摩擦几乎为零，表面能的作用便显现了出来。图 21 展示了表面能在石墨岛中引起“自回复”现象的过程。

正如前面所说，我们可用一根微探针推开石墨岛，并推动上片滑块在下片基底上滑动。上片滑块被推出后，新的石墨表面便暴露出来，所以系统的总表面积是增加的。和液体一样，固体的表面能最小化也使得系统倾向于尽可能地减小总表面积，所以上片石墨滑块总是有回到初始位置的倾向。只要释放探针，滑块便会在这种倾向的驱动下自发地回到初始位置。这便是石墨岛的“自回复”现象。

在一定的条件下，表面能不仅会驱动石墨岛运动，还可以约束石墨岛的运动形式[42]。我们可以通过某些设计使得石墨岛按预想的方式运动，例如只平动不旋转，或者反之。

通过测量上述自回复运动的驱动力——自回复力，我们可以测得固体材料的一些重要材料参数例如解理能。这里，读者可把解理能简单理解为将单位面积的层状材料沿层撕开所需要的能量。对于层状材料，例如石墨，其解理能很难通过理论计算精确地获得，之前也缺乏有效的直接测量方法。我们使用一个带有传感器的探针推动石墨岛，测量了自回复力，进而成功实现了对石墨解理能的测量[41]。此外，如果将石墨岛浸泡在液体中，石墨岛仍然能发生自回复运动，但其驱动力不再是固体的表面能，而是固液界面的界面能。此时测量自回复力则可以测得固体和该液体之间的界面能[40]。

我们鼓励读者思考上面介绍的这种“自回复运动”可以应用到什么样的场景中。



**图 21：**石墨岛的自回复现象：(a) 使用探针推开石墨岛后，暴露出了新的石墨表面。其中灰色层状部分是石墨，蓝色部分是二氧化硅盖子。(b) 抬起探针，在表面能的驱动下，滑块会自发地回复到初始位置（即回到基底的正上方）。(c) (d) 某次实验中对应于 (a) 和 (b) 的扫描电子显微镜照片[3]。图片已获美国物理学会授权使用。

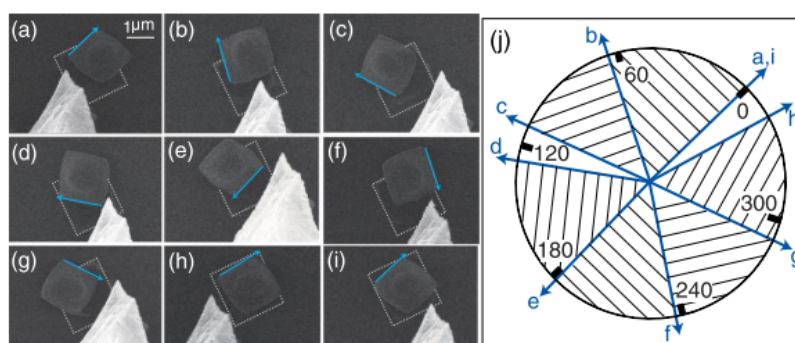
### 3-2-2. 高速超滑与石墨岛的弹出现象

由于摩擦极低，质量又很小，超滑状态的石墨岛滑块的自回复速度因此极快。通过精密的激光测量发现，石墨岛“自回复”运动的速度可以达到 25 m/s，与高速公路上行驶的汽车速度相当[43]。最近的研究还发现，通过探针施加压力挤压石墨岛，可以使得石墨片在压力达到一定的临界值时突然横向弹出，其速度可

以高达 294 m/s，这一速度甚至接近空气中的声速（340 m/s）[44]。理论分析表明，挤压过程中弹性变形所储存的能量在石墨片高速弹出时得到了释放，又因为界面摩擦极低，所以石墨片能达到极高的速度。同时理论模型还预言，通过精密地控制外部加载条件，在一些特定参数条件下，石墨岛不会弹出，而是往复地发生周期性振动。我们在实验上观察到这种振动的频率达到了 0.1 MHz 量级，并且品质因子极高（品质因子是表征振动中能量损失的参数，品质因子极高意味着能量损失极低）。因此，这样的系统有潜力做成一种高频率、极低损耗的机械振荡器。振荡器是一种可以产生周期性信号的装置。这样的振荡器在时钟信号等领域有许多潜在应用[43]。读者朋友可以思考这种弹出和震荡现象还可以有什么应用。

### 3-2-3. 石墨岛的自锁现象

前面提到，在石墨岛内部的晶粒界面处，因为其两侧的晶格取向天然地不同，所以非公度条件得到了满足，这也是超滑发生的必要条件。我们在实验中发现，如果人为地用探针转动石墨滑块，则可能将原本非公度的接触界面转到公度状态。此时，超滑现象消失，界面的摩擦力极大，从而令石墨岛出现“自锁”。因为摩擦力太大，上面提到的自回复现象也无法再发生了。有趣的是，因为石墨的正六边形晶体结构，每将滑块相对于基底转动  $60^\circ$  就会遇到一次公度情形。因此理论预测每转动  $60^\circ$  就会出现一次“自锁”，这恰恰与我们的实验观测吻合[3]（图 22）。



**图 22：** 石墨岛的自锁。把石墨岛旋转到某些特定的角度时，其超滑现象消失，发生自锁，自回复现象也无法发生。(a) - (i) 扫描电子显微镜照片显示，把石墨岛旋转到某些角度

时，用探针推开石墨岛然后抬起探针后，滑块仍然停留在原位，不能发生自回复现象。(j) 发生自锁的角度（蓝色箭头所示）彼此之间恰好总是间隔约  $60^\circ$ 。在两次自锁之间的任何角度（阴影区域所对应的角度）自回复现象都能发生，意味着在这些角度时石墨岛是超滑的[3]。(c 和 d 理论上应该重合，此处不重合是由于实验误差；a 和 h 同理)。图片已获美国物理学会授权使用。

当石墨岛发生自锁时，超滑就失效了，界面摩擦变得极高。解决这一问题的一种可能办法需要用到石墨岛的转移技术（后文会进一步解说）。将石墨滑块转移到另一种材料的基底表面后，因为石墨滑块与目标基底为两种不同的材料，这样的接触被称为“**异质结**”。由于构成异质结的两种材料晶格类型和晶格周期通常并不相同，因此无论如何旋转都能始终保持非公度特性，不会出现“自锁”的现象[45]。这样的超滑异质结可以在任意旋转后仍然保持超滑的特性。

读者可以思考，是否有其他解决“自锁”问题的途径，以及是否有巧妙利用“自锁”现象的应用场景？

#### 3-2-4. 自清洁能力

在很多情况下，转移石墨岛的目标基底是暴露在空气中的。因此，难以避免地会有空气中的污染物吸附到目标基底上，这些吸附物可能是水分子、碳氢化合物等等。转移石墨岛后，吸附物会夹杂在石墨岛和目标基底之间，这可能会破坏超滑状态。但是幸运的是，我们的研究发现石墨岛存在“**自清洁**”的能力。也就是说，即便界面初始是“脏”的（包含吸附物），通过来回滑动石墨岛，界面中夹杂的吸附物可以被“赶”出去。石墨岛就像一个“擦子”一样，把吸附物扫除到了基底表面的其他区域，从而使发生接触的地方变“清洁”了[38, 46, 47]。

### 3-3. 结构超滑体系的零磨损

以上我们主要讨论了结构超滑体系的近零摩擦力。下面我们简单说说结构超滑体系的磨损。一般来说，摩擦力极小时材料磨损也会极小，因此摩擦力极小的超滑体系的磨损应该也极小。另外，对于石墨等二维层状材料来说，其与其他材



料的接触面一般只有微弱的范德华作用，在接触面上无法形成连接两表面的化学键。很多磨损其实是接触面的化学键造成的（可以形象地理解为滑动时，接触面的化学键把两表面的部分材料“拉扯”出来小块，造成磨损）。所以，无法形成化学键也就意味着*原则上*无磨损。此外，这些二维层状材料的每一层内，原子都是由很强的化学键相连的，这意味着每一层的材料强度都很高，这些原子很难被磨掉。还有，根据我们日常经验，表面凹凸不平时，更容易发生磨损。二维层状材料表面极其平滑，所以不容易被磨损掉。因此，有理由相信结构超滑体系磨损极低，这也被我们最近的实验所证实[48]。

## 3-4. 结构超滑的实验技术和挑战

### 3-4-1. 结构超滑的尺度

值得注意的是，目前能够实现结构超滑的石墨岛，其尺寸存在一个上限，通常在 10 微米左右。我们猜测这是由于材料中总是不可避免地存在各种缺陷（比如台阶、杂质、空穴等）。这些缺陷以一定的密度随机地分布在材料内部。当石墨岛尺寸较小时，有一定的概率可以避开这些缺陷。而当石墨岛尺寸较大时，其内部出现缺陷的概率大幅度提高，从而使得原本可以超滑的界面不再具有超滑特性[30]。

前面的理论部分预言超滑接触的摩擦几乎为零，这是对于无穷大的理想接触面而说的。现实的超滑接触总是有限大的，因而存在边缘。我们发现，由于边缘存在大量缺陷（例如，容易形成化学键的活性基团，或者来自周围环境的吸附物），真实超滑接触的摩擦力虽然极低但并不严格为零，并且该极低的摩擦力几乎全部是由边缘贡献的[32]。所以在应用中，为了保证摩擦力极低，就要尽可能减少边缘区域占接触面的比例。而制作大尺寸的超滑块恰好可以实现较低的比例。

提高结构超滑的尺寸上限是结构超滑领域目前的重要挑战之一。这可能需要寻找一种满足超滑条件，同时内部缺陷极少的材料。或者是开发一种巧妙的加工方法，能够保证制备出的滑块中不包含缺陷。如何制备更大、更平整的超滑滑块，以及如何批量制备没有缺陷的超滑滑块，是该领域的一大挑战。我们鼓励读者从

自己的专业角度出发提出创造性的解决方案。

### 3-4-2. 石墨岛的转移与组装

要把超滑石墨岛应用在各种器件里,就需要将器件中发生接触的部位用超滑石墨滑块覆盖并把滑块固定住。为此,常常需要将超滑石墨滑块可控地转移到目标材料的表面。因为超滑石墨滑块的大小通常只有几微米,要拾取并转移这样的滑块原本并不是一件容易的事情。但我们在实验中发现,使用微探针不仅可以推动石墨滑块,还可以利用表面吸附力将滑块拾取起来。通过操纵探针可以将拾取的超滑滑块放置到另一个目标基底上。这个目标基底可以根据应用的具体需求来选择,它可以是石墨以外的任何平整的材料表面。例如半导体行业中最常见的硅、机械硬盘的盘片材料类金刚石等等。我们惊讶地发现,这样拾取并转移后的石墨岛,在很多材料表面仍然能保持极低的摩擦力。

通过上述基于微探针拾取的转移方式,我们验证了石墨岛的转移和超滑接触体系组装的可能性。但这一技术仍然存在成功率和效率低,难以集成化等问题。如何批量化、自动化地实现超滑接触体系的组装,是该领域的一大挑战。

## 3-5. 其他结构超滑体系

除了石墨岛体系,其他一些体系也可以实现结构超滑。例如,雒建斌、马天宝、李津津、刘艳敏、陈新春等研究的二维材料包裹原子力显微镜针尖或者微米球,然后和基底接触的体系[49-51];郑泉水、张如范、魏飞等研究的多壁碳纳米管内外壁的接触体系[52, 53];陈建敏等研究的二维异质纳米复合材料粉末体系[54];Sumant、张俊彦、雒建斌等研究的接触面有大量纳米卷轴的体系[55-57];Schirmeisen等研究的探针推动微纳米颗粒在基底滑动的接触体系[58, 59];Kawai等研究的纳米带接触体系[60]等。

## 3-6. 总结

综上所述,满足接触表面非公度、材料刚度强于表面之间的相互作用有效刚

度、表面纳米级平滑、且表面间无化学键形成的体系可以实现结构超滑。在实验上，通过石墨岛等体系，我们可以实现结构超滑，从而实现近乎为零的摩擦和磨损。在这样一个摩擦近似为零的体系中，我们可以观察到一系列新奇有趣的现象。超滑石墨滑块的制备技术和转移技术也构成了应用超滑技术的基础。

## 4. 结构超滑研究简史

结构超滑的一些初步概念，最早可以追溯到 Aubry, Peyrard, Hirano 等人于 20 世纪 80 年代至 90 年代早期的工作[61, 62]。他们在理论和概念上提出了由于非公度接触导致的摩擦力极低的、当时被称为超润滑（superlubricity）的接触状态。后来，人们将超润滑概括成一个工程概念，即摩擦系数小至 $10^{-3}$ 量级或更低的接触状态，而一般用“结构润滑（structural lubricity）”特指由于非公度接触导致的超润滑。2004 年，Frenken 等人实现了纳米尺度接触面的极低摩擦[63]，通常认为这是在实验上首次实现了纳米尺度下的结构润滑。

2012 年，郑泉水课题组基于石墨岛自回复性质，首次在大气环境下实现了微米尺度的结构超滑（接触面积高至  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ）[3]，开创了结构超滑技术，将该领域推向了实际应用。2016 年，郑泉水课题组明确了结构超滑的定义[4]，除了包含小至 $10^{-3}$ 量级或更低的摩擦系数以外，也强调了无磨损等摩擦学特性。2020 年，郑泉水团队开发了一种方法，第一次可以区分来自接触面内和边缘的摩擦力贡献[32]。

目前已实现的结构超滑状态的一些参数总结如下。最大单块全接触面积： $100\ \mu\text{m}^2$  [3]；最长尺度： $1\ \text{cm}$  [52]；最高滑动速度： $294\ \text{m/s}$  [44]；最低摩擦系数： $10^{-6}$  [44]；零磨损最长滑移距离： $108\ \text{km}$  [48]；零磨损最大压强： $9.45\ \text{GPa}$  [64]。

在结构超滑领域，近年来中国学者贡献显著。对于更广泛的超润滑领域，近年来中国学者也做出了重要贡献。例如，清华大学摩擦学国家重点实验室的雒建斌院士课题组，发现了多个水基液体的超润滑体系[65, 66]。中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室刘维民院士和张俊彦课题组，发展了无定形碳膜固体超润滑体系[67-69]。我们相信，随着国家对这些领域的重视和科研人员的努力，中国学者会在这些领域的未来发展中，发挥愈加重要的作用。

# 后记

感谢郭瑞东对本文语言表达方面的建议和反馈。

# 注释

注一：通常，一个物体的表面力和其表面积（近似正比于物体尺寸的平方）成正比，体积力（如重力）和体积（近似正比于尺寸的立方）成正比，所以表面力和体积力的比值(即表体比)和物体尺寸成反比，例如对于尺寸为 1m 的物体，其表体比为~1，而对于尺寸为 1  $\mu\text{m}$  的物体，其表体比高达  $10^6$ 。因此，在宏观大尺度下，表面力远远小于体积力，可以忽略不计。而在微纳小尺度下，表面力则远远大于体积力，表面力的效应非常显著。

注二：本文标注符号\*处，统一代表有关图片引自公开的网站。

# 参考文献

## Uncategorized References

- [1] 此图已获得图片创作者章彦博授权使用。
- [2] Q. Zheng, B. Jiang, S. Liu, Y. Weng, L. Lu, Q. Xue, J. Zhu, Q. Jiang, S. Wang, L. Peng, Self-retracting motion of graphite microflakes, *Phys Rev Lett* 100(6) (2008) 067205.
- [3] Z. Liu, J. Yang, F. Grey, J.Z. Liu, Y. Liu, Y. Wang, Y. Yang, Y. Cheng, Q. Zheng, Observation of microscale superlubricity in graphite, *Phys Rev Lett* 108(20) (2012) 205503.
- [4] 郑泉水, 欧阳稳根, 马明, 张首沫, 赵治华, 董华来, 林立 .超润滑：“零”摩擦的世界.科技导报 34, 12-26 (2016) .
- [5] O. Hod, E. Meyer, Q. Zheng, M. Urbakh, Structural superlubricity and ultralow friction across the length scales, *Nature* 563(7732) (2018) 485-492.
- [6] [http://ipingshan.sznews.com/content/2019-10/16/content\\_22547761.htm](http://ipingshan.sznews.com/content/2019-10/16/content_22547761.htm).
- [7] <https://news.tsinghua.edu.cn/info/1003/18366.htm>.
- [8] [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzIyMjgzNTE4Mw==&mid=2247485267&idx=1&sn=8923b3ae4c2280c4574d8171c795a65a&chksm=e8263fd3df51b6c51f1cc3a7d75a0e9e67977d6c6e2a4f94654a0d4ed4333af9f8a29bd6916a&mpshare=1&scene=1&srcid=0903hwSRN83nDJDxHhtnZt7V&sharer\\_sharetime](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIyMjgzNTE4Mw==&mid=2247485267&idx=1&sn=8923b3ae4c2280c4574d8171c795a65a&chksm=e8263fd3df51b6c51f1cc3a7d75a0e9e67977d6c6e2a4f94654a0d4ed4333af9f8a29bd6916a&mpshare=1&scene=1&srcid=0903hwSRN83nDJDxHhtnZt7V&sharer_sharetime).
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Polymath\\_Project](https://en.wikipedia.org/wiki/Polymath_Project).

- [10] S. Niu, S. Wang, L. Lin, Y. Liu, Y.S. Zhou, Y. Hu, Z.L. Wang, Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source, *Energy & Environmental Science* 6(12) (2013).
- [11] Z.L. Wang, J. Chen, L. Lin, Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors, *Energy & Environmental Science* 8(8) (2015) 2250-2282.
- [12] L.e.a. Lin, Robust Triboelectric Nanogenerator Based on Rolling Electrification and Electrostatic Induction at an Instantaneous, *ACS Nano* 9 (2015) 922-930.
- [13] Y. Zi, C. Wu, W. Ding, Z.L. Wang, Maximized Effective Energy Output of Contact-Separation-Triggered Triboelectric Nanogenerators as Limited by Air Breakdown, *Advanced Functional Materials* 27(24) (2017).
- [14] X. Huang, L. Lin, Q. Zheng, Theoretical study of superlubric nanogenerators with superb performances, *Nano Energy* 70 (2020).
- [15] S. Lin, Y. Lu, S. Feng, Z. Hao, Y. Yan, A High Current Density Direct-Current Generator Based on a Moving van der Waals Schottky Diode, *Adv Mater* 31(7) (2019) e1804398.
- [16] J. Liu, K. Jiang, L. Nguyen, Z. Li, T. Thundat, Interfacial friction-induced electronic excitation mechanism for tribo-tunneling current generation, *Materials Horizons* 6(5) (2019) 1020-1026.
- [17] J. Liu, M. Miao, K. Jiang, F. Khan, A. Goswami, R. McGee, Z. Li, L. Nguyen, Z. Hu, J. Lee, K. Cadien, T. Thundat, Sustained electron tunneling at unbiased metal-insulator-semiconductor triboelectric contacts, *Nano Energy* 48 (2018) 320-326.
- [18] J. Liu, A. Goswami, K. Jiang, F. Khan, S. Kim, R. McGee, Z. Li, Z. Hu, J. Lee, T. Thundat, Direct-current triboelectricity generation by a sliding Schottky nanocontact on MoS<sub>2</sub> multilayers, *Nat Nanotechnol* 13(2) (2018) 112-116.
- [19] X. Huang, X. Xiang, J. Nie, D. Peng, F. Yang, Z. Wu, H. Jiang, Z. Xu, Q. Zheng, Microscale Schottky superlubric generator with high direct-current density and ultralong life, *Nat Commun* 12(1) (2021) 2268.
- [20] Z. Zhang, J.T. Yates, Jr., Band bending in semiconductors: chemical and physical consequences at surfaces and interfaces, *Chem Rev* 112(10) (2012) 5520-51.
- [21] E. Grochowski, Future Technology Challenges for NAND Flash and HDD Products, *Flash Mem. Summit* (2012).
- [22] <https://investor.wdc.com/static-files/2697d98d-f456-4f32-af51-4a377c99bff6>.
- [23] <https://animagraffs.com/hard-disk-drive/>.
- [24] [https://en.wikipedia.org/wiki/Disk\\_read-and-write\\_head#/media/File:HDD\\_read-write\\_head.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Disk_read-and-write_head#/media/File:HDD_read-write_head.jpg).
- [25] B. Marchon, T. Pitchford, Y.-T. Hsia, S. Gangopadhyay, The Head-Disk Interface Roadmap to an Areal Density of Tbit/in<sup>2</sup>, *Advances in Tribology 2013* (2013) 1-8.
- [26] B.O. Marchon, T., Magnetic Spacing Trends: From LMR to PMR and Beyond, *IEEE Trans. Magn.* 45 (2009) 3608–3611.
- [27] <https://encyclopedia.thefreedictionary.com/resonator>.
- [28] <https://en.wikipedia.org/wiki/Superlubricity>.

- [29] A. Vanossi, N. Manini, M. Urbakh, S. Zapperi, E. Tosatti, Colloquium: Modeling friction: From nanoscale to mesoscale, *Reviews of Modern Physics* 85(2) (2013) 529-552.
- [30] K. Wang, C. Qu, J. Wang, B. Quan, Q. Zheng, Characterization of a Microscale Superlubric Graphite Interface, *Phys Rev Lett* 125(2) (2020) 026101.
- [31] O. Hod, The registry index: a quantitative measure of materials' interfacial commensurability, *Chemphyschem* 14(11) (2013) 2376-91.
- [32] C. Qu, K. Wang, J. Wang, Y. Gongyang, R.W. Carpick, M. Urbakh, Q. Zheng, Origin of Friction in Superlubric Graphite Contacts, *Phys Rev Lett* 125(12) (2020) 126102.
- [33] W. Ouyang, S.N. Ramakrishna, A. Rossi, M. Urbakh, N.D. Spencer, A. Arcifa, Load and Velocity Dependence of Friction Mediated by Dynamics of Interfacial Contacts, *Phys Rev Lett* 123(11) (2019) 116102.
- [34] W. Ouyang, A.S. de Wijn, M. Urbakh, Atomic-scale sliding friction on a contaminated surface, *Nanoscale* 10(14) (2018) 6375-6381.
- [35] W. Ouyang, M. Ma, Q. Zheng, M. Urbakh, Frictional Properties of Nanojunctions Including Atomically Thin Sheets, *Nano Lett* 16(3) (2016) 1878-83.
- [36] W. Ouyang, Y. Cheng, M. Ma, M. Urbakh, Load-velocity-temperature relationship in frictional response of microscopic contacts, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 137 (2020).
- [37] Z. Liu, J.Z. Liu, Y. Cheng, Z. Li, L. Wang, Q. Zheng, Interlayer binding energy of graphite: A mesoscopic determination from deformation, *Physical Review B* 85(20) (2012).
- [38] C.C. Vu, S. Zhang, M. Urbakh, Q. Li, Q.C. He, Q. Zheng, Observation of normal-force-independent superlubricity in mesoscopic graphite contacts, *Physical Review B* 94(8) (2016).
- [39] 王稳. 多物理环境下石墨的结构超润滑行为及其层间解理能 (博士论文). (清华大学, 2015).
- [40] C. Qu, W. Cao, B. Liu, A. Wang, F. Xie, M. Ma, W. Shan, M. Urbakh, Q. Zheng, Direct Measurement of Adhesions of Liquids on Graphite, *The Journal of Physical Chemistry C* 123(18) (2019) 11671-11676.
- [41] W. Wang, S. Dai, X. Li, J. Yang, D.J. Srolovitz, Q. Zheng, Measurement of the cleavage energy of graphite, *Nat Commun* 6 (2015) 7853.
- [42] C. Qu, S. Shi, M. Ma, Q. Zheng, Rotational Instability in Superlubric Joints, *Phys Rev Lett* 122(24) (2019) 246101.
- [43] J. Yang, Z. Liu, F. Grey, Z. Xu, X. Li, Y. Liu, M. Urbakh, Y. Cheng, Q. Zheng, Observation of high-speed microscale superlubricity in graphite, *Phys Rev Lett* 110(25) (2013) 255504.
- [44] D. Peng, Z. Wu, D. Shi, C. Qu, H. Jiang, Y. Song, M. Ma, G. Aeppli, M. Urbakh, Q. Zheng, Load-induced dynamical transitions at graphene interfaces, *Proc Natl Acad Sci U S A* 117(23) (2020) 12618-12623.
- [45] Y. Song, D. Mandelli, O. Hod, M. Urbakh, M. Ma, Q. Zheng, Robust microscale superlubricity in graphite/hexagonal boron nitride layered heterojunctions, *Nat Mater* 17(10) (2018) 894-899.

- [46] Z. Liu, P. Boggild, J.R. Yang, Y. Cheng, F. Grey, Y.L. Liu, L. Wang, Q.S. Zheng, A graphite nanoeraser, *Nanotechnology* 22(26) (2011) 265706.
- [47] M. Ma, I.M. Sokolov, W. Wang, A.E. Filippov, Q. Zheng, M. Urbakh, Diffusion through Bifurcations in Oscillating Nano- and Microscale Contacts: Fundamentals and Applications, *Physical Review X* 5(3) (2015).
- [48] D. Peng, J. Wang, H. Jiang, S. Zhao, Z. Wu, K. Tian, M. Ma, Q. Zheng, 100 km wear-free sliding achieved by microscale superlubric graphite/DLC heterojunctions under ambient conditions, *Natl Sci Rev* 9(1) (2022) nwab109.
- [49] S.W. Liu, H.P. Wang, Q. Xu, T.B. Ma, G. Yu, C. Zhang, D. Geng, Z. Yu, S. Zhang, W. Wang, Y.Z. Hu, H. Wang, J. Luo, Robust microscale superlubricity under high contact pressure enabled by graphene-coated microsphere, *Nat Commun* 8 (2017) 14029.
- [50] Y. Liu, A. Song, Z. Xu, R. Zong, J. Zhang, W. Yang, R. Wang, Y. Hu, J. Luo, T. Ma, Interlayer Friction and Superlubricity in Single-Crystalline Contact Enabled by Two-Dimensional Flake-Wrapped Atomic Force Microscope Tips, *ACS Nano* 12(8) (2018) 7638-7646.
- [51] J. Tian, X. Yin, J. Li, W. Qi, P. Huang, X. Chen, J. Luo, Tribo-Induced Interfacial Material Transfer of an Atomic Force Microscopy Probe Assisting Superlubricity in a WS<sub>2</sub>/Graphene Heterojunction, *ACS Appl Mater Interfaces* 12(3) (2020) 4031-4040.
- [52] R. Zhang, Z. Ning, Y. Zhang, Q. Zheng, Q. Chen, H. Xie, Q. Zhang, W. Qian, F. Wei, Superlubricity in centimetres-long double-walled carbon nanotubes under ambient conditions, *Nat Nanotechnol* 8(12) (2013) 912-6.
- [53] Q. Zheng, Q. Jiang, Multiwalled carbon nanotubes as gigahertz oscillators, *Phys Rev Lett* 88(4) (2002) 045503.
- [54] P. Li, P. Ju, L. Ji, H. Li, X. Liu, L. Chen, H. Zhou, J. Chen, Toward Robust Macroscale Superlubricity on Engineering Steel Substrate, *Adv Mater* 32(36) (2020) e2002039.
- [55] D. Berman, S.A. Deshmukh, S.K. Sankaranarayanan, A. Erdemir, A.V. Sumant, Friction. Macroscale superlubricity enabled by graphene nanoscroll formation, *Science* 348(6239) (2015) 1118-22.
- [56] Z. Gong, J. Shi, B. Zhang, J. Zhang, Graphene nano scrolls responding to superlow friction of amorphous carbon, *Carbon* 116 (2017) 310-317.
- [57] P. Huang, W. Qi, X. Yin, J. Choi, X. Chen, J. Tian, J. Xu, H. Wu, J. Luo, Ultra-low friction of a-C:H films enabled by lubrication of nanodiamond and graphene in ambient air, *Carbon* 154 (2019) 203-210.
- [58] D. Dietzel, M. Feldmann, U.D. Schwarz, H. Fuchs, A. Schirmeisen, Scaling laws of structural lubricity, *Phys Rev Lett* 111(23) (2013) 235502.
- [59] E. Cihan, S. Ipek, E. Durgun, M.Z. Baykara, Structural lubricity under ambient conditions, *Nat Commun* 7 (2016) 12055.
- [60] S. Kawai, A. Benassi, E. Gnecco, H. Sode, R. Pawlak, X. Feng, K. Mullen, D. Passerone, C.A. Pignedoli, P. Ruffieux, R. Fasel, E. Meyer, Superlubricity of graphene nanoribbons on gold surfaces, *Science* 351(6276) (2016) 957-61.
- [61] M.A. Peyrard, S. Peyrard, Aubry - 1983 - Critical behaviour at the transition by breaking of analyticity in the discrete Frenkel-Kontorova model, *J. Phys. C Solid*

State Phys 16 (1983) 1593–1608.

[62] M. Hirano, K. Shinjo, Atomistic locking and friction, *Phys Rev B Condens Matter* 41(17) (1990) 11837-11851.

[63] M. Dienwiebel, G.S. Verhoeven, N. Pradeep, J.W. Frenken, J.A. Heimberg, H.W. Zandbergen, Superlubricity of graphite, *Phys Rev Lett* 92(12) (2004) 126101.

[64] 孙陶陶, 大载荷范围下的石墨层间结构超滑行为研究 (博士论文), 清华大学, 2021.

[65] J. Li, Y. Liu, J. Luo, P. Liu, C. Zhang, Excellent lubricating behavior of *Brasenia schreberi* mucilage, *Langmuir* 28(20) (2012) 7797-802.

[66] C.-H. Zhang, Z.-Z. Ma, J.-B. Luo, X.-C. Lu, S.-Z. Wen, Superlubricity of a Mixed Aqueous Solution, *Chinese Physics Letters* 28(5) (2011).

[67] C. Wang, S. Yang, Q. Wang, Z. Wang, J. Zhang, Super-low friction and super-elastic hydrogenated carbon films originated from a unique fullerene-like nanostructure, *Nanotechnology* 19(22) (2008) 225709.

[68] L. Wei, B. Zhang, Y. Zhou, L. Qiang, J. Zhang, Ultra-low friction of fluorine-doped hydrogenated carbon film with curved graphitic structure, *Surface and Interface Analysis* 45(8) (2013) 1233-1237.

[69] J. Jiang, J. Hao, P. Wang, W. Liu, Superlow friction of titanium/silicon codoped hydrogenated amorphous carbon film in the ambient air, *Journal of Applied Physics* 108(3) (2010).