



清华大学
Tsinghua University

扫描栅极显微镜及其应用

Scanning Gate Microscopy (SGM) and its Applications

清华大学工程力学系 黄云帆

yf-huang19@mails.tsinghua.edu.cn

2024.06.07



Multiscale Interfacial Transport Laboratory



目录

- 引言
 - 背景简介
 - 发展历史
- 基本原理
 - SGM 的基本原理简介
 - 各类 SPM 方法辨析
 - SGM 的技术改进及注意事项
- 应用举例
 - 量子点接触中的一维电子输运
 - 磁场中的二维电子轨迹
 - 二维电子的弹道/粘性/欧姆输运
- 总结与展望



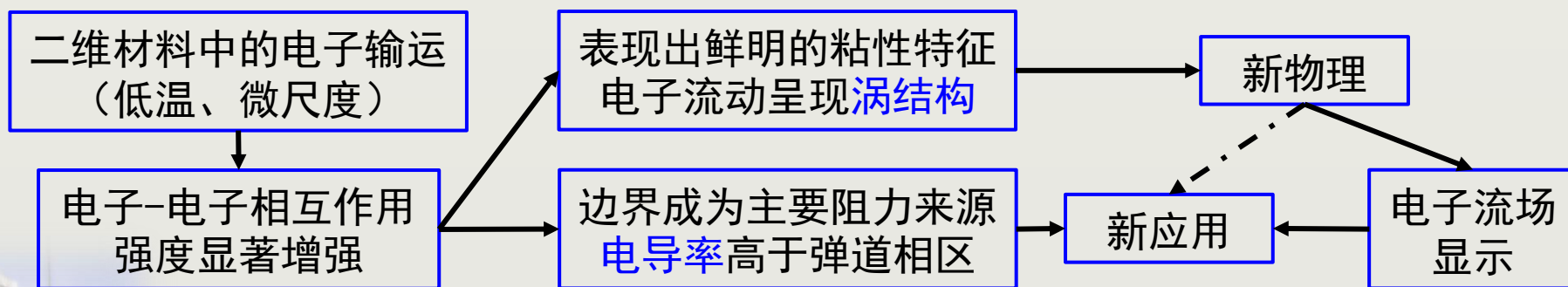
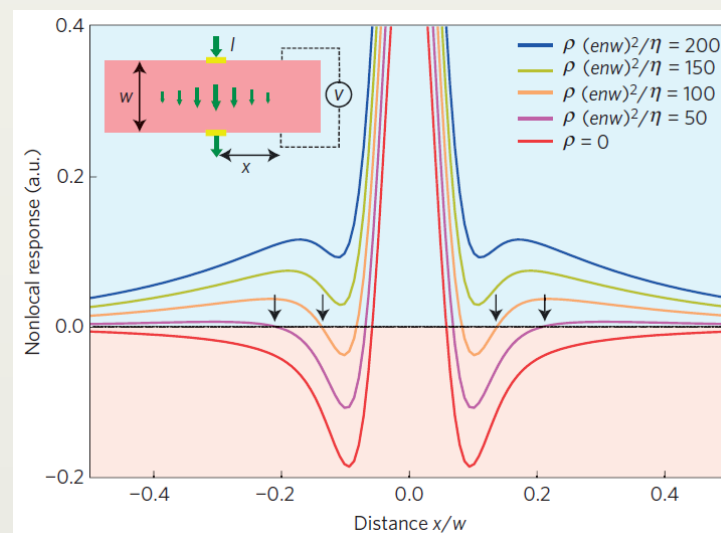
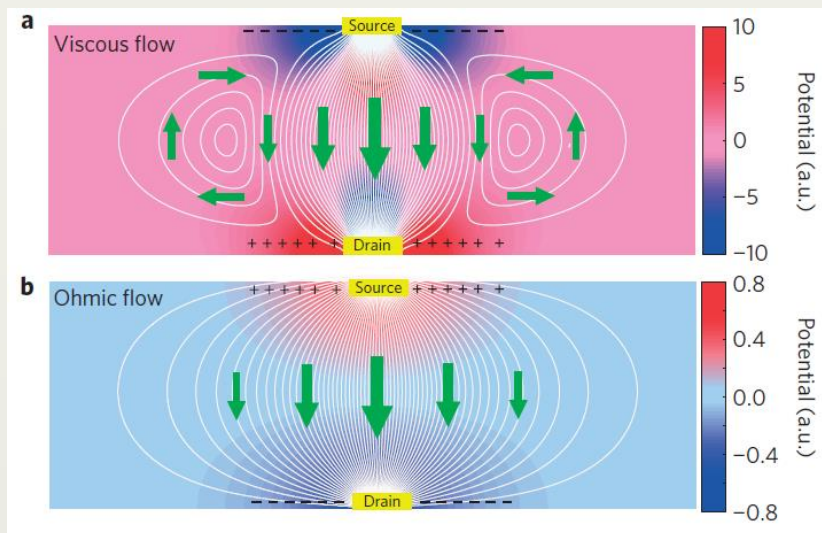


目录

- 引言
 - 背景简介
 - 发展历史
- 基本原理
- 应用举例
- 总结与展望



背景简介



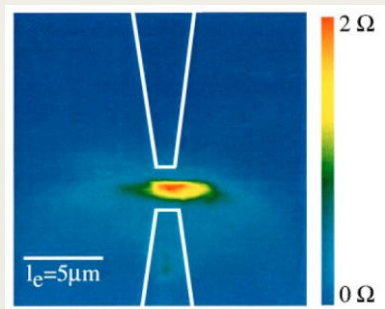
[1] LEVITOV L, FALKOVICH G. Electron viscosity, current vortices and negative nonlocal resistance in graphene [J].

Nature Physics, 2016, **12**: 672-675.

[2] BRAEM B A, PELLEGRINO F M D, PRINCIPI A, et al. Scanning gate microscopy in a viscous electron fluid [J].

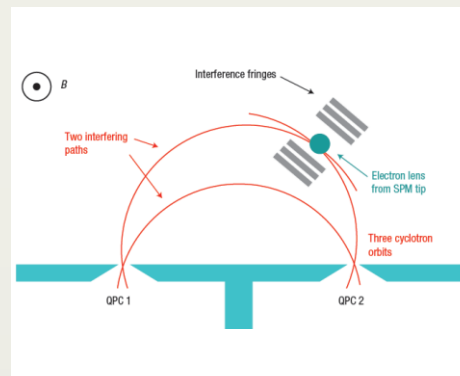
Physical Review B, 2018, **98**(24): 241304.

发展历史



利用SGM对量子点接触内的弹道输运进行细致研究并发表综述文章，掀起了SGM电子流场显示的热潮

Topinka (2000-2003)

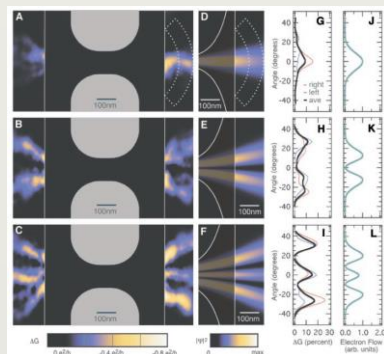


将SGM首次拓展到二维电子气的粘性输运研究中，讨论了带电探针对粘性相区内电子流动的影响

Braem (2018)

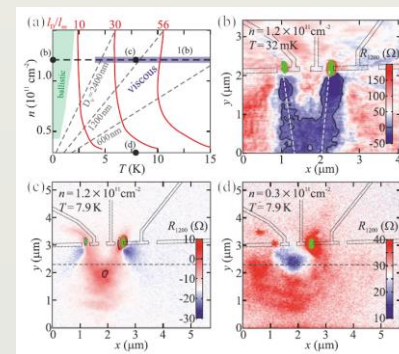
Eriksson (1996)

第一次在低温AFM中使用带电荷的探针，测量其对量子点接触附近电阻的影响



Aidala (2007)

利用低门电压SGM形成电子透镜，研究邻近量子点接触间的电子在磁场中的弹道输运



- [1] ERIKSSON M A, BECK R G, TOPINKA M, et al. *Applied Physics Letters*, 1996, **69**(5): 671-673.
- [2] TOPINKA M A, WESTERVELT R M, HELLER E J. *Phys Today*, 2003, **56**(12): 47-52.
- [3] AIDALA K E, PARROTT R E, KRAMER T, et al. *Nature Physics*, 2007, **3**(7): 464-468.
- [4] BRAEM B A, PELLEGRINO F M D, PRINCIPI A, et al. *Physical Review B*, 2018, **98**(24): 241304.



目录

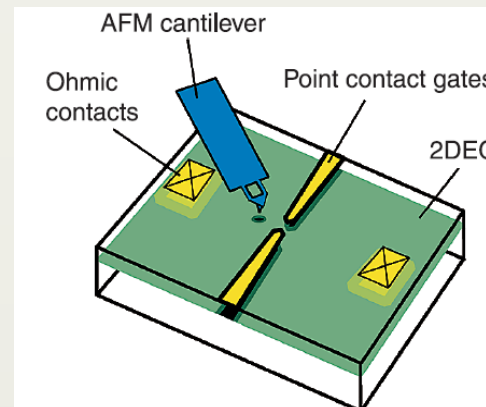
- 引言
- 基本原理
 - SGM 的基本原理简介
 - 各类 SPM 方法辨析
 - SGM 的技术改进及注意事项
- 应用举例
- 总结与展望



SGM 的基本原理简介

基本原理

1. (带电)针尖与样品局部电容耦合
2. 样品局部感应电荷充当背散射源
3. 样品原流场受背散射源扰动
4. 样品系统电阻值发生改变
5. 局部电流越大, 电阻改变越大

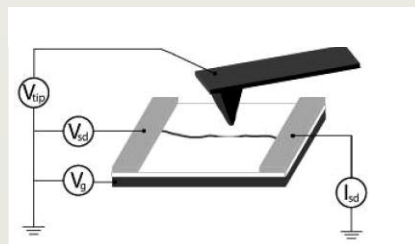


典型 Scanning Gate Microscopy 构造^[1]

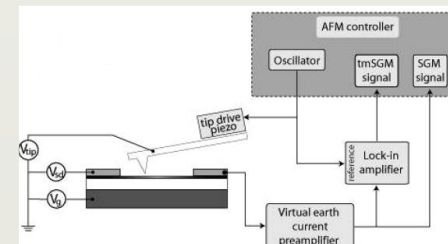
基本参数

- 针尖高度: $> 100 \text{ nm}$
- 门电压: $0.01 \sim 5 \text{ V}$
- 影响区域^[2]: $\sim 100 \text{ nm}$
- 横向分辨率: $\sim 1 \text{ nm}$
- 工作温度: $< 10 \text{ K}$

静止悬臂 SGM^[3]



振动悬臂 SGM^[3]



适用性

- ✓ 对于纳米/低温系统, 系统输运性质对局部扰动十分敏感, 测量灵敏度较高
- ? 对于薄膜等准二维系统, 系统输运性质对局部扰动很不敏感, 测量灵敏度很低

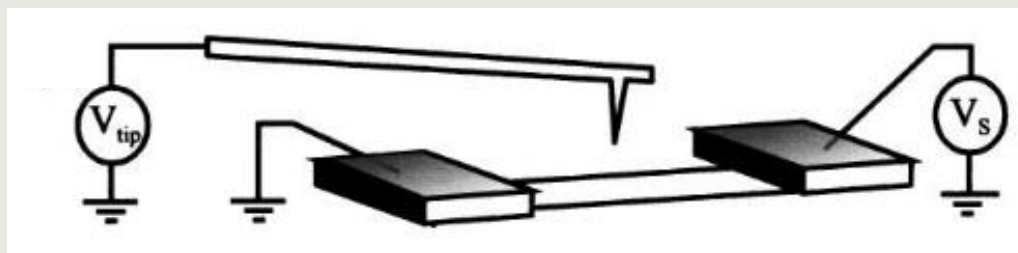
[1] TOPINKA M A, LEROY B J, SHAW S E J, et al. *Science*, 2000, **289**(5488): 2323-2326.

[2] ERIKSSON M A, BECK R G, TOPINKA M, et al. *Applied Physics Letters*, 1996, **69**(5): 671-673.

[3] WILSON N R, COBDEN D H. *Nano Lett*, 2008, **8**(8): 2161-2165.

各类 SPM 方法辨析

方法简称	英文全称	检测信号	反演物理量	分辨率
AFM	Atomic Force Microscopy	探针-样品的原子间作用力	局部高度	0.1 nm (横向) 0.01 nm (纵向)
STM	Scanning Tunneling Microscopy	探针-样品间的隧道电流	局部高度	0.1 nm (横向) 0.01 nm (纵向)
EFM	Electrostatic Force Microscopy	探针-样品间的静电作用力	局部电荷量	1 nm (横向)
SCM	Scanning Capacitance Microscopy	探针针尖感应出的电荷量	局部电势	1 nm (横向)
SGM	Scanning Gate Microscopy	样品材料通道的电阻变化	局部电流	1 nm (横向)



各类 SPM 的统一示意图^[3]

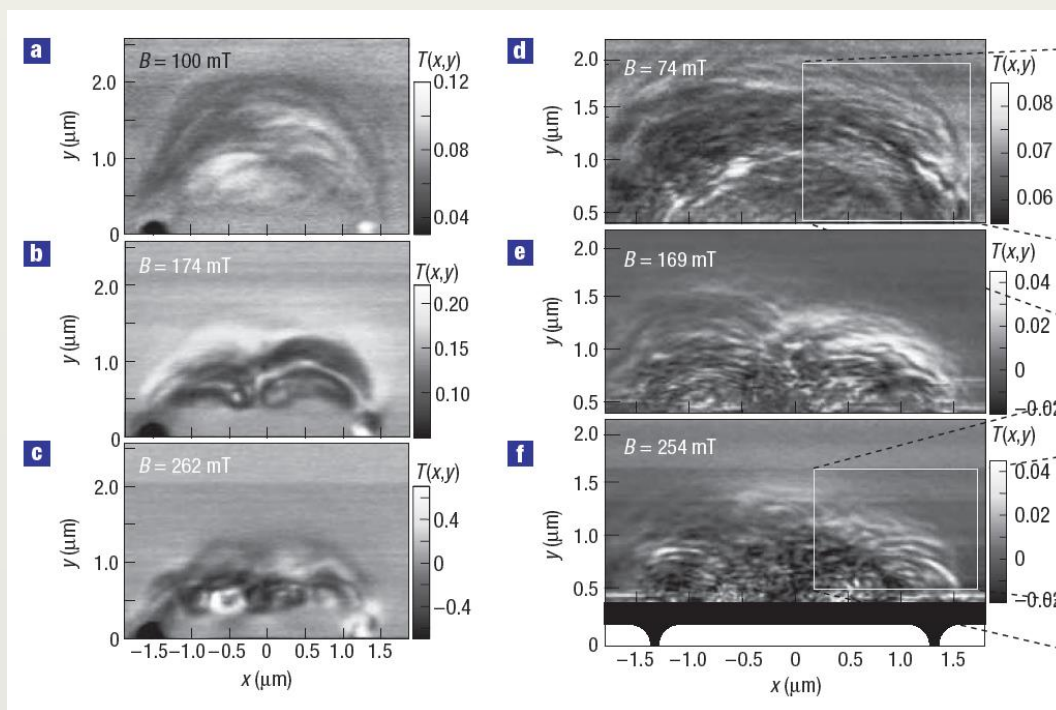
[1] KALININ S V, BONNELL D A, FREITAG M, et al. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(27): 5219-21

[2] WOODSIDE M T, MCEUEN P L. *Science*, 2002, **296**(5570): 1098.

[3] BACHTOLD A, FUHRER M S, PLYASUNOV S, et al. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(26): 6082-6085.

SGM 的技术改进及注意事项

- SGM 基于对电子原有流场的扰动^[1]
 - 对于高门电压SGM，样品局部电荷将被完全耗尽，仅适于探测近直线的简单轨迹
 - 对于低门电压SGM，样品局部电荷仅被部分消耗，更适于探测曲率较大的弯曲轨迹

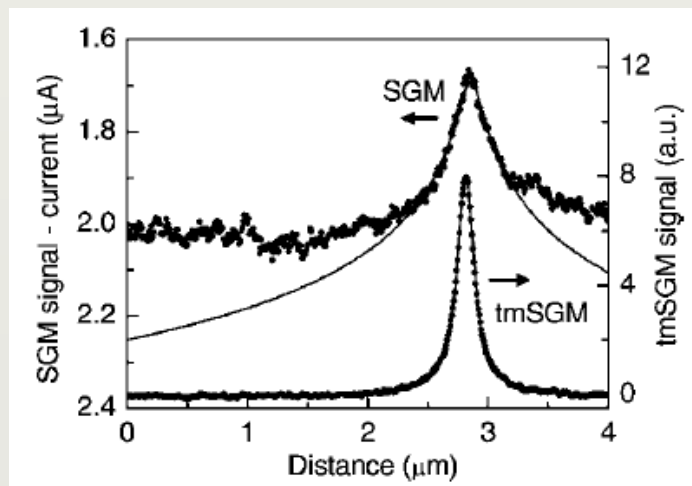


- [1] AIDALA K E, PARROTT R E, KRAMER T, et al. *Nature Physics*, 2007, **3**(7): 464-8.
- [2] WILSON N R, COBDEN D H. *Nano Lett*, 2008, **8**(8): 2161-2165.
- [3] GILDEMEISTER A E, IHN T, SIGRIST M, et al. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(21): 213113.
- [4] BACHTOLD A, FUHRER M S, PLYASUNOV S, et al. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(26): 6082-5.
- [5] WOODSIDE M T, MCEUEN P L. *Science*, 2002, **296**(5570): 1098.



SGM 的技术改进及注意事项

- SGM 基于对电子原有流场的扰动^[1]
 - 对于高门电压SGM，样品局部电荷将被完全耗尽，仅适于探测近直线的简单轨迹
 - 对于低门电压SGM，样品局部电荷仅被部分消耗，更适于探测曲率较大的弯曲轨迹
- SGM 基于的电容耦合具有较强的非局域性^[2]
 - 对于静止探针SGM，信号与电容直接相关，非局域背景干扰导致信噪比较低
 - 对于振动探针SGM，信号与电容的导数相关，局域性更好使得信噪比更高



[1] AIDALA K E, PARROTT R E, KRAMER T, et al. *Nature Physics*, 2007, 3(7): 464-8.

[2] WILSON N R, COBDEN D H. *Nano Lett*, 2008, 8(8): 2161-2165.

[3] GILDEMEISTER A E, IHN T, SIGRIST M, et al. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(21): 213113.

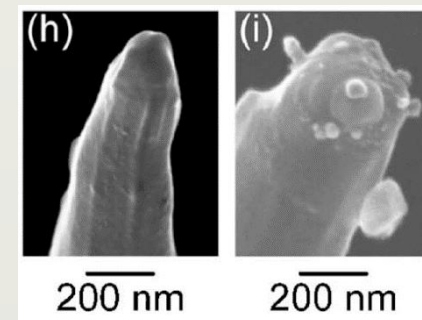
[4] BACHTOLD A, FUHRER M S, PLYASUNOV S, et al. *Physical Review Letters*, 2000, 84(26): 6082-5.

[5] WOODSIDE M T, MCEUEN P L. *Science*, 2002, 296(5570): 1098.



SGM 的技术改进及注意事项

- SGM 基于对电子原有流场的扰动^[1]
 - 对于高门电压SGM，样品局部电荷将被完全耗尽，仅适于探测近直线的简单轨迹
 - 对于低门电压SGM，样品局部电荷仅被部分消耗，更适于探测曲率较大的弯曲轨迹
- SGM 基于的电容耦合具有较强的非局域性^[2]
 - 对于静止探针SGM，信号与电容直接相关，非局域背景干扰导致信噪比较低
 - 对于振动探针SGM，信号与电容的导数相关，局域性更好使得信噪比更高
- SGM 为低温测量，为清洁针尖需特殊处理^[3]
 - 移入系统及校准时，洁净针尖易受到二次污染
 - 更换受污染针尖后，系统降低到测量温度所需冷却时间较长
 - 借鉴STM的强电场闪光处理方法，可在SGM中进行类似操作
- SGM 与 EFM/SIM 配合使用，提高电子流场成像的灵敏度和分辨率^[4,5]



[1] AIDALA K E, PARROTT R E, KRAMER T, et al. *Nature Physics*, 2007, 3(7): 464-8.

[2] WILSON N R, COBDEN D H. *Nano Lett*, 2008, 8(8): 2161-2165.

[3] GILDEMEISTER A E, IHN T, SIGRIST M, et al. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(21): 213113.

[4] BACHTOLD A, FUHRER M S, PLYASUNOV S, et al. *Physical Review Letters*, 2000, 84(26): 6082-5.

[5] WOODSIDE M T, MCEUEN P L. *Science*, 2002, 296(5570): 1098.

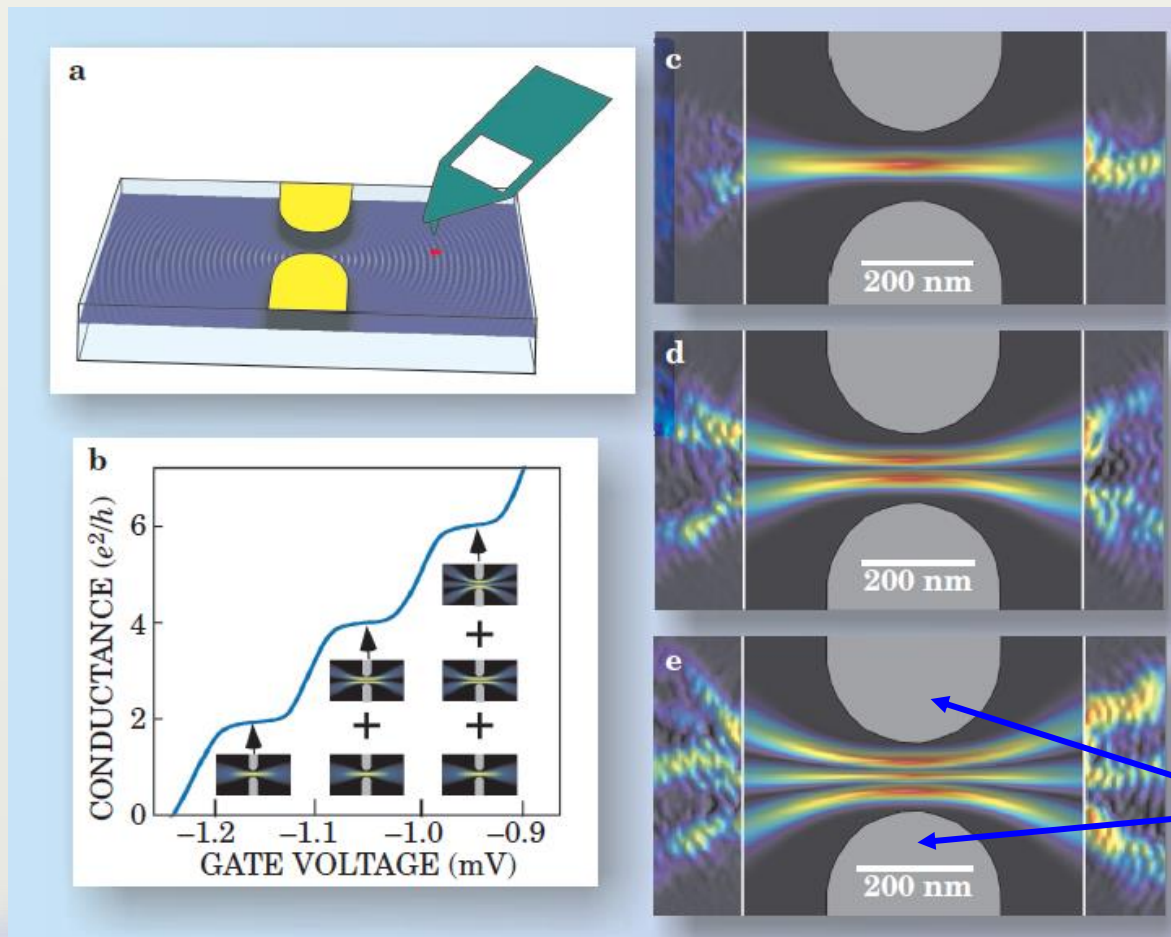


目录

- 引言
- 基本原理
- 应用举例
 - 量子点接触中的一维电子输运
 - 磁场中的二维电子轨迹
 - 二维电子的弹道/粘性/欧姆输运
- 总结与展望



应用举例 1：量子点接触中的一维电子输运

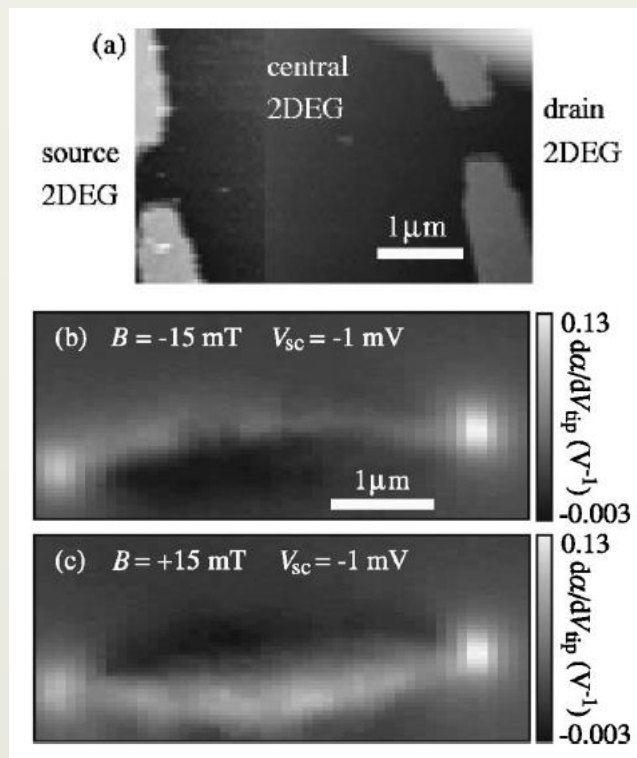


(GaAs/AlGaAs)
单个量子点接触
间电子的量子化
弹道输运轨迹^[1]

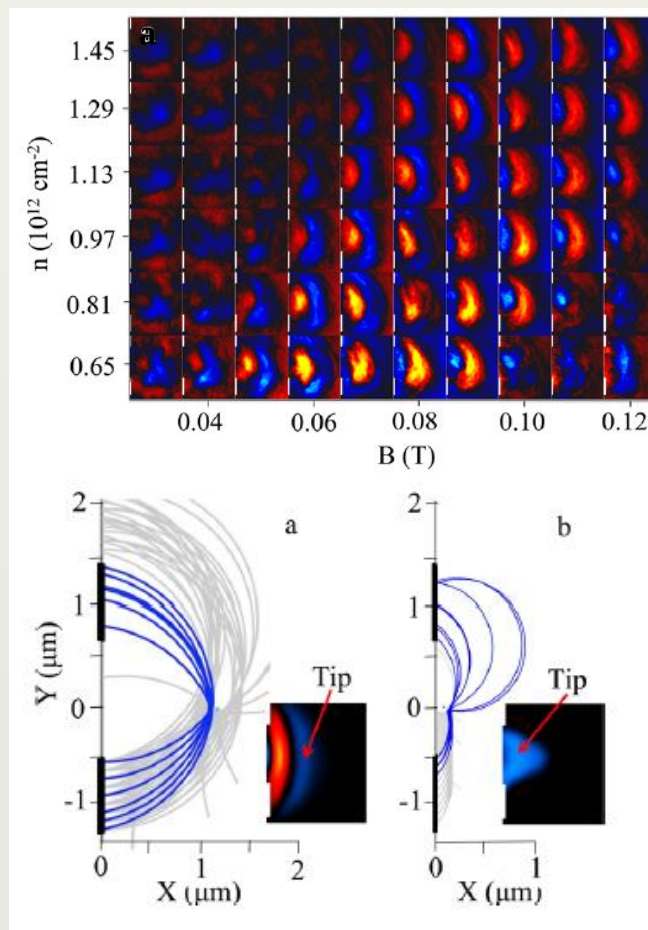
量子点接触
(Quantum Point
Contact)

[1] TOPINKA M A, LEROY B J, SHAW S E J, et al. Imaging Coherent Electron Flow from a Quantum Point Contact [J]. *Science*, 2000, **289**(5488): 2323–2326; TOPINKA M A, LEROY B J, WESTERVELT R M, et al. Coherent branched flow in a two-dimensional electron gas [J]. *Nature*, 2001, **410**(6825): 183-6; TOPINKA M A, WESTERVELT R M, HELLER E J. Imaging electron flow [J]. *Phys Today*, 2003, **56**(12): 47-52.

应用举例 2：磁场中的二维电子轨迹



(GaAs/AlGaAs) 对侧量子点接触间磁场中的电子轨迹^[1]



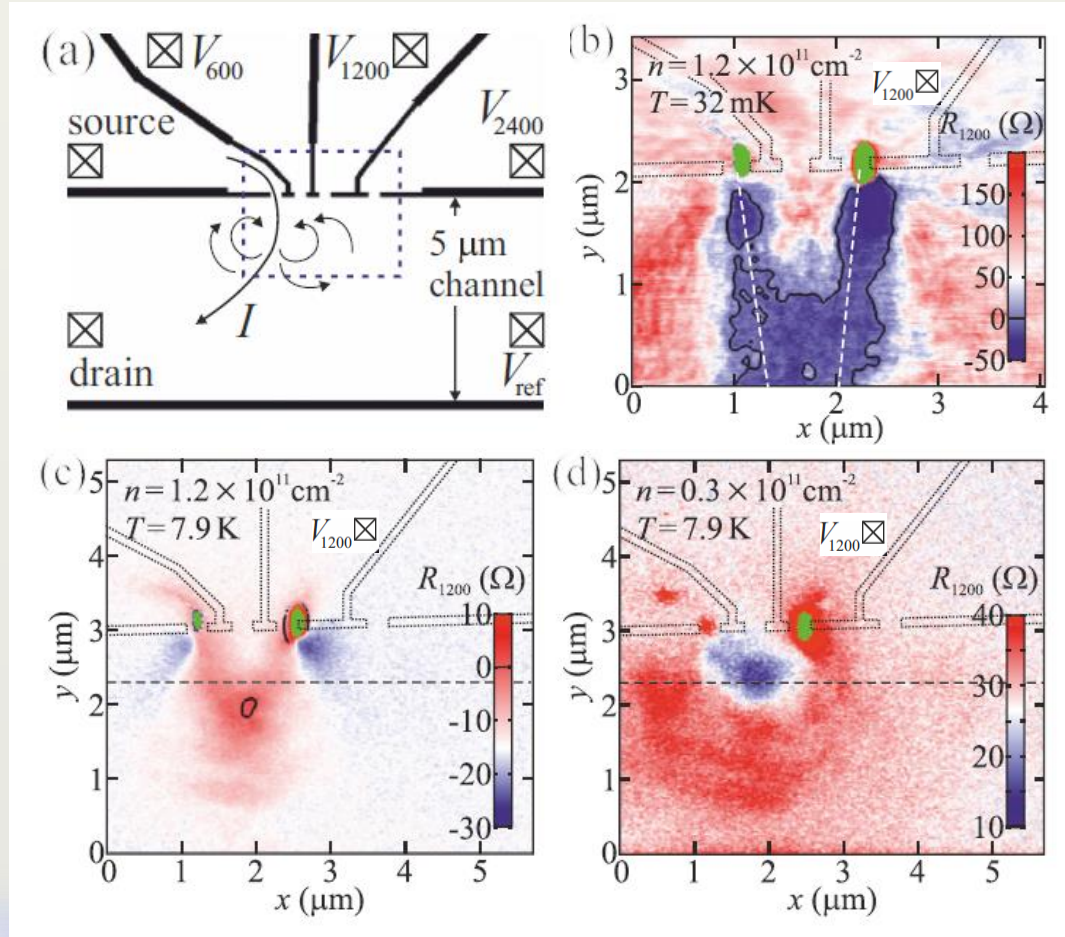
(石墨烯) 同侧量子点接触间磁场中的电子轨迹^[2]

	B (T)
(a)	0.09
(b)	0.14

[1] CROOK R, SMITH C G, SIMMONS M Y, et al. Imaging cyclotron orbits and scattering sites in a high-mobility two-dimensional electron gas [J]. *Physical Review B*, 2000, **62**(8): 5174-8.

[2] BHANDARI S, LEE G-H, KLALES A, et al. Imaging Cyclotron Orbits of Electrons in Graphene [J]. *Nano Lett*, 2016, **16**(3): 1690-4.

应用举例 3：二维电子的弹道/粘性/欧姆输运



(GaAs/AlGaAs) 点源邻近流场测量及弹道/粘性/欧姆相区的识别^[1]

	l_D (μm)	D_v (μm)
(b)	36	$\gg 10$
(c)	16	1.2
(d)	1.6	0.17

[1] BRAEM B A, PELLEGRINO F M D, PRINCIPI A, et al. Scanning gate microscopy in a viscous electron fluid [J]. *Physical Review B*, 2018, **98**(24): 241304.



目录

- 引言
- 基本原理
- 应用举例
- 总结与展望





总结与展望

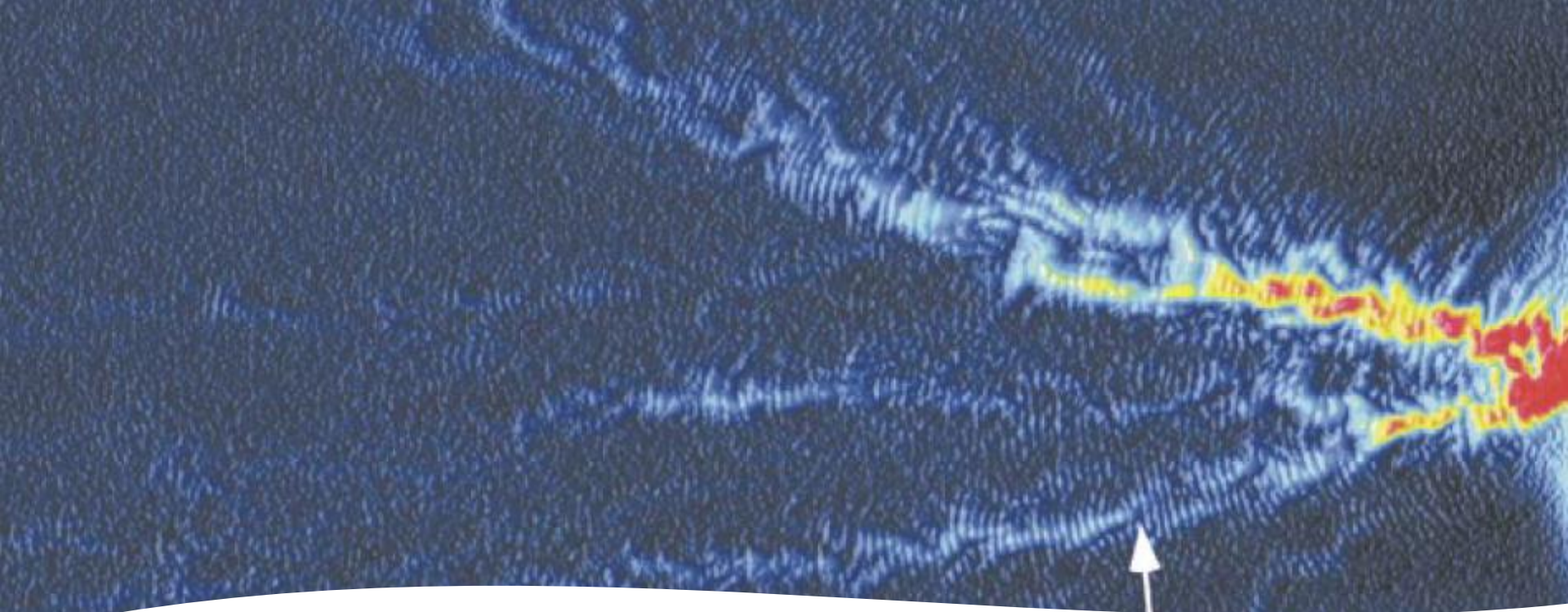
- 总结

- 近年来电子水动力学的兴起使得电子流场成像技术重新焕发了生机
- SGM将AFM探针改造为栅极，实现了对电子流场信息的测量
- SGM通过引入振动悬臂、低门电压、强电场闪光等延拓了其适用范围

- 展望

- SGM的技术特点决定了它并非一种广泛适用的方法，如二维材料的电子流场测量、超低温的环境条件、亚微米量级的电容耦合半径等，而目前其在电子水动力学领域的应用还不多，因此后续的改进和发展空间还很大
- SGM作为一种将实验图像与物理解释相结合的对电子流场进行间接成像的定性方法，与形貌/成分/结构分析等具有简单定量映射的分析技术有很大差别，因此如何构建在实验结果-物质性质方面更加普适的映射也有待进一步研究





谢谢大家！
欢迎提问！

清华大学工程力学系 黄云帆
yf-huang19@mails.tsinghua.edu.cn

