

# 转角双层石墨烯中易调控的非线性霍尔效应

张 栩<sup>1</sup> 孟子杨<sup>1,†</sup> 黄美珍<sup>2</sup> 王 宁<sup>2</sup>

(1 香港大学物理系 香港 999077)

(2 香港科技大学物理系 香港 999077)

2023-09-01 收到

† email: zymeng@hku.hk

DOI: 10.7693/wl20230907

量子霍尔效应(quantum Hall effect, QHE)是霍尔效应的量子力学版本。一般分为整数量子霍尔效应(integer QHE)和分数量子霍尔效应(fraction QHE),其中整数量子霍尔效应由德国物理学家 von Klitzing 发现,他因此获得1985年诺贝尔物理学奖。分数量子霍尔效应由美籍华裔物理学家崔

琦、德国物理学家 Horst Störmer 和美国材料学家 Arthur Gossard 发现,前两位因此与美国物理学家 Robert Laughlin 分享了1998年诺贝尔物理学奖。

整数量子霍尔效应所描述的现象是,在向二维电子气体施加横向驱动电流时,纵向测量得到的电导平台为基本自然常数  $\frac{e^2}{h}$  整数倍。实验发现,电导平台对于环境的扰动极其稳定,测量所得电导的量子单位( $\frac{e^2}{h}$ )可以达到十亿分之一的精确度,如此高的精确度使得整数量子霍尔效应成为制定电阻标准,确定自然常数  $h$ (普朗克常数)和  $e$ (电子电荷)的标准方法。从物理学和数学的本质上讲,整数量子霍尔效应中出现的整数是一些拓扑量子数。在数学和拓扑学中,它们被称作陈数(Chern numbers,以纪念华裔数学家陈省身),并且它们与固体材料中的能带拓扑信息——非平庸的贝里曲率(nontrivial Berry curvature)息息相关。量子霍尔效应与其衍生出来的一系列效应,如量子反常霍尔效应、量子自旋霍尔效应,和本项研究发现的转角双层石墨烯中的非线性霍尔效应等,都具有新奇和广泛应用前景的电导输运性质和非平庸贝里曲率的数学本质。正是因为既具有应用与实验意义,又具有深刻的数学和物理学理论内涵,对于这些霍尔效应现象的研究,在近二十多年里如雨后春笋般出现,在凝聚态物理学、量子材料科学和量子信息科学等方面,不断创造出研究的热潮。

与此同时,以石墨烯为首的二维量子材料,因其优良的电热性能,易于通过电场和磁场连续调控和简单而非平庸的拓扑性质,受到全世界物理学和材料科学人员的追捧。尤其是近年来在“魔角” $1.08^\circ$ 转角的双层石墨烯中发现的强关

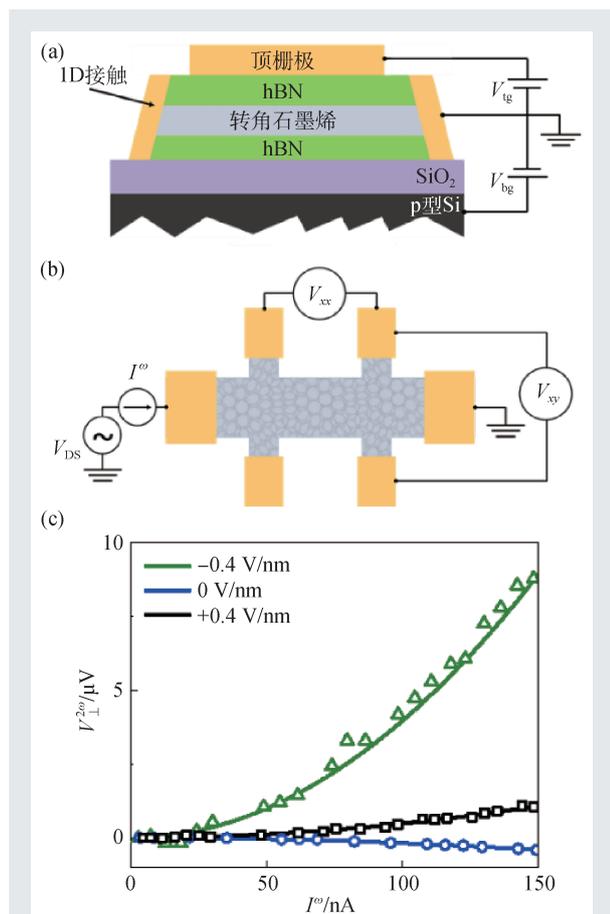


图1 转角双层石墨烯实验装置 (a)转角双层石墨烯样品结构,上下两个栅极使得实验中可以独立调节转角双层石墨烯中的垂直电场强度以及载流子浓度;(b)非线性霍尔效应的测量示意图;(c)转角双层石墨烯填充数为-1.5时,非线性霍尔电压随电场发生剧烈变化,并始终与注入电流成二次方关系<sup>[1]</sup>

联绝缘性和超导电性，更是将转角石墨烯等二维量子摩尔材料研究推向了高潮。关于石墨烯中的种种霍尔效应研究，人们已经发现了很多新奇的现象，而对于转角石墨烯中的霍尔效应研究，仍然还有很多亟待探索的地方。本项研究正是填补了这样的空白，发现了转角双层石墨烯中的易调控的非线性霍尔效应。

转角石墨烯所代表的二维量子摩尔材料，其突出优点是易于调控，可以通过连续扫描转角度数、电场和磁场，精细控制系统中的相互作用强度和电子的填充数，这样就可以超越传统量子霍尔效应器件(如二维电子气材料)的诸多限制。但是，转角石墨烯的能带比较复杂(具有长程关联效应的拓扑平带体系)，并且由于摩尔尺度远大于晶格尺度，系统中的应力和非均匀性等因素都需要在模型计算中体现。在这一背景下，我们通过理论、计算和实验结合的方式，深入研究了转角双层石墨烯中的非线性霍尔效应，发现材料中的贝里曲率偶极矩可以随着拓扑平带色散的调节而改变的物理机制。实验系统的示意图和基本结果如图1所示，研究团队使用垂直材料方向电场作为调节平带色散的手段，在对转角石墨烯施加频率为 $\omega$ 的横向驱动电流时，观察到纵向频率为 $2\omega$ 的非线性电压响应明显地随垂直材料方向电场的调节有增大、减小甚至反向的变化，并通过计算贝里曲率偶极矩随着拓扑平带色散的变化而从理论上完美地解释了实验现象。这项具有国际影响力的成果，刚刚作为编辑推荐文章发表在物理学刊物 *Physical Review Letters* [1]。

本项研究的理论与数值计算研究团队，近几年来在量子摩尔材料的模型设计和大规模计算求解方面取得不少前期的突破，如发展出来的动量空间量子蒙特卡洛算法[2]，发现的关联平带系统中时间反演对称性破缺温度由于低能激子而远低于基态能隙的物理规律[3, 4]，都在从理论和

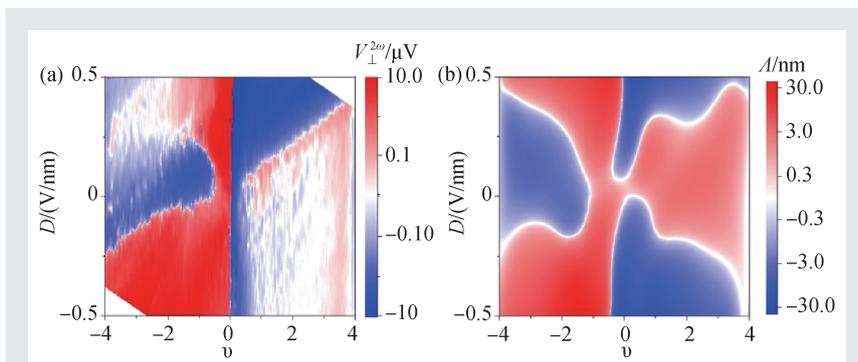


图2 理论计算与实验结果的完美对比 (a)双层转角为 $1.30^\circ$ 的石墨烯样品，在调控垂直电场( $D$ )和电子占据数( $\nu$ )时的非线性霍尔效应数据；(b)对应实验样品条件下的理论计算结果。计算在考虑单轴应力为0.3%时的贝里曲率偶极矩 $A \equiv \sum_n \int_k \partial f_0 \cdot \Omega_n$ ，贝里曲率的符号(图中红色和蓝色代表正负号)与实验观测几近定量吻合[1]

数值计算的角度推动转角双层石墨烯等摩尔材料实验的进展。本项研究的实验团队在贝里曲率引起的新奇输运现象方面也做出许多前期的准备性工作，如在二硫化钼中观察到贝里曲率引起的谷霍尔效应[5]，在转角过渡金属硫族化合物中观察到贝里曲率偶极矩引起的非线性霍尔效应[6]等，在量子摩尔材料制备到样品的电磁场调控和输运性质的准确测量等方面都是具有影响力的工作。这些准备性的工作为本项研究的成功打下了基础。

研究团队通过计算发现，与一般的拓扑材料不同，转角石墨烯特有的拓扑平带可以对贝里曲率的动量空间分布实现高效的调控，让本来只应该局域在能带边缘的贝里曲率可以随着平带色散的调节在能带中较大的区域自如滑动。于是，正比于贝里曲率多极矩的反常速度所产生的非线性输运现象，即在对样品施加频率为 $\omega$ 的横向驱动电流时，观察到纵向频率为 $2\omega$ 的非线性电压响应，就可以通过调节平带的色散关系而敏锐地变化。如此一来，贝里曲率发生明显变化不必只通过常规的能带关闭—重新打开过程，在转角双层石墨烯的拓扑平带中，还可以通过调节平带的色散连续滑动贝里曲率的热点来实现，与之相应的非线性霍尔效应也就可以在实验中敏锐地进行调控。

如图2所示，非线性霍尔效应实验观测结果与理论计算十分吻合，这也就意味着实验看到的对外场敏感的非线性输运行为的确来自于贝里曲

率偶极矩(或者贝里曲率热点在拓扑平带中的滑动)。在不同单轴应力、不同转角的实验中观察到的变化趋势可以通过贝里曲率得到的理论计算结果完美解释。

本项研究对于量子摩尔材料和非线性霍尔效应在新的实验载体中实现,都具有重要的意义。众所周知,与电磁非线性响应相关的二倍频与整流技术在激光倍频、光伏发电等光学领域(光可以视为高频的电磁场)已经有了比较长时间的发展,高频整流已广泛应用于红外、远红外和亚毫米波段的探测器和传感器技术。然而,电子二极管和光子二极管的工作频率之间存在所谓的太赫兹间隙(0.1—10 THz),这段频率内的非线性响应研究正方兴未艾。本项研究不仅具有拓扑平带中贝里曲率滑动调控非线性霍尔效应的理论和实验凝聚态物理学上的学术意义,也使得人们有理由相信,转角石墨烯中容易被调控的低频电流驱动非线性霍尔响应将有潜力在产业界(包括新材料和量子信

息等)的低频电流倍频与整流等应用中大展拳脚。主要原因在于非线性霍尔效应中电信号的倍频和整流是通过材料的固有量子特性——贝里曲率偶极矩决定的,不具有传统电子器件中的电压阈值或过渡时间限制。通过在转角石墨烯中调控贝里曲率偶极矩,有望实现室温下具有巨大响应和超高灵敏度的太赫兹探测。

### 参考文献

- [1] Huang M Z, Wu Z F, Zhang X *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 131: 066301
- [2] Zhang X, Pan G P, Zhang Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2021, 38: 077305
- [3] Pan G P, Zhang X, Lu H Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 130: 016401
- [4] Zhang X, Pan G P, Chen B B *et al.* Phys. Rev. B, 2023, 107: L241105
- [5] Wu Z F, Zhou B T, Cai X *et al.* Nature Communications, 2019, 10: 611
- [6] Huang M Z, Wu Z F, Hu J X *et al.* National Science Review, 2022, 10: nwac232

### 读者和编者

## 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》  
—《物理》四十年集萃—

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑

户名:中国科学院物理研究所  
帐号:11 250 1010 4000 5699  
(请注明《物理》编辑部)  
咨询电话:010-82649029; 82649277  
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅2年《物理》杂志,将获赠物理类科普图书或《岁月留痕——《物理》四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址:北京市中关村南三街8号中科院物理所,100190

收款人姓名:《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

