文章编号: 1007-4252(2025)06-0436-13 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0039 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0039

量子电阻研究进展

孔自强[1,2], 姜程鑫[1,2], 冯 宇[1,2], 刘晨曦[1,2], 宋俊驰[1,2], 章子曾[1,2], 郝玄峥[1,2], 冯 建[3], 王浩敏[1,2,*]

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海市计量测试技术研究院有限公司, 上海 201203)

摘要: 量子霍尔电阻标准是基于量子霍尔效应建立的电阻计量基准, 其量子化的霍尔电阻(即量子电阻)仅由基本物理常数普朗克常数 *h* 和元电荷 *e* 共同决定, 可用于高精度复现国际单位制中的欧姆、安培等基本单位, 在计量学与精密测量领域具有重要的应用价值与发展前景。系统综述量子电阻的研究进展, 涵盖量子霍尔效应的发展历程、理论基础与材料体系的演进, 详细介绍器件制备和掺杂方法、器件性能特征以及量值传递系统的原理, 并对该领域的未来前景进行展望。

关键词: 量子霍尔电阻标准; 量子霍尔效应; 载流子浓度; 器件和阵列; 量值传递

中图分类号: TM934.11; TN305.2 **文献标志码:** A

Research advances in quantum resistance

KONG Ziqiang[1,2], JIANG Chengxin[1,2], FENG Yu[1,2], LIU Chenxi[1,2], SONG Junchi[1,2], ZHANG Ziceng[1,2], HAO Xuanzheng[1,2], FENG Jian[3], WANG Haomin[1,2,*]

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: The quantum Hall resistance standard is a resistance metrology benchmark established based on the quantum Hall effect. The quantized Hall resistance, i.e., the quantum resistance, is determined solely by the fundamental physical constants—the Planck constant *h* and the elementary charge *e*. It enables high-accuracy reproduction of base units such as the ohm and the ampere in the International System of Units (SI), holding significant application value and development prospects in metrology and precision measurement. This paper provides a comprehensive review of the research progress on quantum resistance, covering the historical development of the quantum Hall effect, its theoretical foundations, and

收稿日期: 2025−09−10; **修订日期:** 2025−09−17

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFF0612502); 国家自然科学基金项目(No. 62374169); 上海市协同创新项目(No. XTCX-KJ-2024-02); 集成电路材料全国重点实验室研究项目(No. NKLJC-Z2023-B01); 上海市基础研究计划集成电路项目(No. 25JD1404300).

作者简介: 孔自强(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为量子电阻器件和芯片(E-mail: kongzq@mail.sim.ac.cn).

通信作者: 王浩敏(1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新型半导体异质材料及器件(E-mail: hmwang@mail.sim.ac.cn).

the evolution of material systems. It presents detailed discussions on device fabrication and doping methods, device performance characteristics, and the principles of resistance value transfer systems. The paper offers a perspective on the future outlook of this field.

Key words: quantum Hall resistance standard; quantum Hall effect; carrier density; device and array; value transfer

0 引言

自 2019 年国际单位制(international system of units, SI)修订并将冯·克利青常数确立为电阻的普适参考基准以来, 量子霍尔电阻标准(quantum Hall resistance standard, QHRS)在计量学中的地位不断提升, 已成为现代电阻量值传递与溯源体系的关键依据[1-2]。该标准建立在量子霍尔效应(quantum Hall effect, QHE)的基础上, 利用二维电子气在强磁场环境中表现出的电阻量子化行为, 实现高准确度的电阻计量; 其量值仅取决于基本物理常数——普朗克常数 h 和元电荷 e, 因而具有优异的可复现性与长期稳定性。量子电阻, 即量子化的霍尔电阻, 不仅是一个基础物理现象的表现, 更是一个可直接在宏观尺度上被精确测量的物理量, 这使其成为联系微观量子世界与宏观电学测量的重要桥梁。

本综述系统回顾量子电阻的研究进展, 主要内容包括量子电阻的物理机制和起源、量子霍尔效应的发现过程与理论框架, 以及可用于实现该效应的材料体系的发展动态。特别地, 重点评述近年来广泛研究的石墨烯基量子电阻器件, 包括其制备工艺、掺杂手段及阵列集成策略; 分析该类器件的关键性能参数, 如电子输运特性与测量不确定度, 并系统梳理目前用于电阻标准比对的测量设备, 尤其是各类电阻电桥的技术原理与研究进展。通过对上述内容的全面梳理与讨论, 本文旨在为领域内后续研究提供参考, 以推动量子霍尔电阻标准在理论与应用方面的进一步优化与发展。

1 量子霍尔电阻标准

量子电阻是通过量子霍尔电阻标准实现的, 该标准建立在量子霍尔效应的基础上, 其核心物理机制源于量子霍尔效应中电阻的量子化行为。

1.1 量子霍尔效应

量子霍尔效应是凝聚态物理学在过去 40 年中所取得的一项具有深远影响的重大发现[3-14]。该效应不仅革新了人们对物质分类与物相的理解, 而且为拓扑物态这一新兴领域的形成奠定了坚实的实验与理论基础。

该领域的起点可追溯至 1980 年, 克劳斯·冯·克利青在研究硅基金属-氧化物-半导体场效应晶体管中的二维电子气在极低温与强磁场条件下的输运特性时, 意外发现了整数量子霍尔效应(integer quantum Hall effect, IQHE)[2]。该效应的标志性特征为霍尔电阻 R_{xy} 出现精确的量子化平台, 即 $R_{xy}=h/(ve^2)$ (v 为整数填充因子), 且纵向电阻 R_{xx} 消失。该发现的革命性意义在于, 霍尔电阻的量子化值仅由基本物理常数 h 和 e 决定, 不受材料几何尺寸和具体缺陷的影响, 从而为电阻测量提供了新的自然标准。因此, 克劳斯·冯·克利青荣获了 1985 年的诺贝尔物理学奖, 同时由他提出的常数 R_K ($R_K=h/e^2$)也被称为冯·克利青常数。从物理角度, IQHE 可通过无相互作用的电子气模型予以解释: 强磁场将二维电子气的连续能态密度转化为高度简并的朗道能级, 当费米能级位于朗道能级间的能隙时, 体系的体相表现为绝缘行为, 而样品边界则出现受拓扑保护的手性边缘态。如图 1(a)所示, 该边缘态具有明确的手性, 其传播方向由外磁场方向决定, 且与电子自旋无关, 从而保证了量子输运的鲁棒性[3]。

此后, 量子霍尔效应的研究主要向两个重要方向扩展。一是对电子关联效应的深入研究: 1982 年, Tsui 等[4] 利用高迁移率 GaAs/AlGaAs 异质结, 在极低温和更强的磁场条件下发现了分数量子霍尔效应(fractional quantum Hall effect, FQHE), 霍尔电阻平台出现在分数填充因子处(如 v = 1/3、2/5 等)。FQHE 无法由单粒子图像来解释, 其物理根源在于电子之间的强关联作用。Laughlin[5] 随后提出以其姓名命名的波函数理论, 指出在分数量子霍尔体系中电子与磁通量子结合构成复合费米子, 进而形成具有能隙的量子液体态。该态具有拓扑序, 支持分数电荷与任意子统计。1998 年, Tsui、

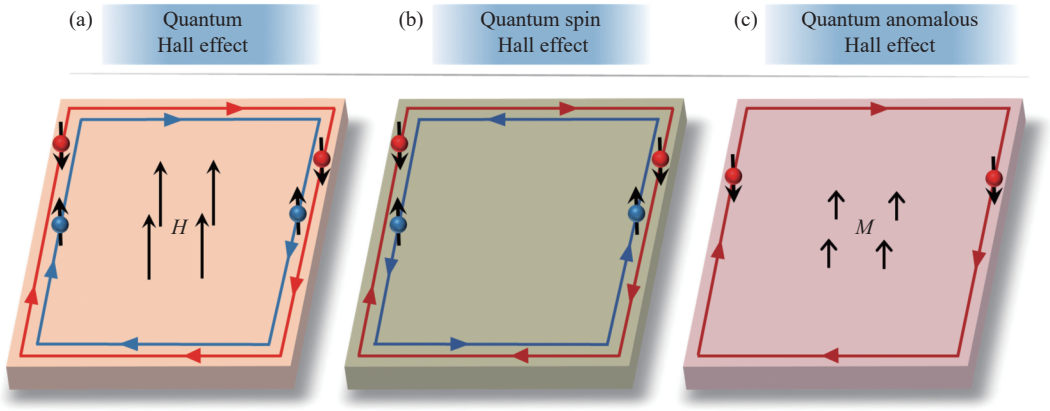

图 1　3 种量子霍尔效应中的边缘态。(a) 常规量子霍尔效应：具有相反自旋的电子沿相同方向运动；(b) 量子自旋霍尔效应：具有相反自旋的电子沿相反方向运动；(c) 量子反常霍尔效应：沿边缘运动的电子具有明确的自旋方向(图中为自旋向下)

Fig. 1　Edge states in the three types of quantum Hall effects. (a) Conventional quantum Hall effect: electrons with opposite spins move in the same direction; (b) quantum spin Hall effect: electrons with opposite spins move in opposite directions; (c) Quantum anomalous Hall effect: electrons moving along the edge have a definite spin direction (here, spin down)

Störmer 和 Laughlin 因相关贡献共同获得了诺贝尔物理学奖。二是拓扑能带理论的发展。2004 年，Novoselov等[6] 成功分离出单层石墨烯，并在该体系中观测到半整数量子霍尔效应[7-8]。尽管该体系的电阻表现出半整数量子化(图 2(a))，但该效应的拓扑性质仍由整数陈数所刻画，因此可视为 IQHE 在具有线性色散和无质量狄拉克费米子的体系中的一种表现形式。正是在这个意义上，广义的 QHE 通常涵盖 IQHE、FQHE 以及石墨烯中的半整数 QHE，三者的共同物理基础为朗道能级量子化，而微观机制则从单电子图像扩展至多体关联与拓扑能带理论。

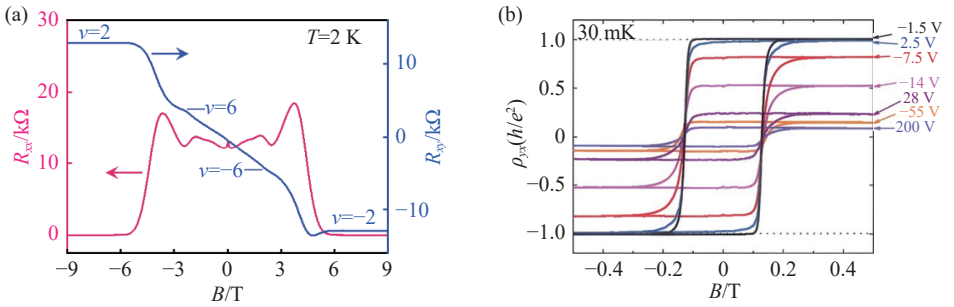

图 2　半整数量子霍尔效应和量子反常霍尔效应。(a)石墨烯中的半整数量子霍尔效应，图中标注出了 $h/(ve)^2$ 量子化电阻平台；(b)Cr-$(Bi,Sb)_2Te_3$ 拓扑绝缘体中的量子反常霍尔效应，图中标注出了 h/e^2 量子反常电阻平台[13]

Fig. 2　Half-integer quantum Hall effect and quantum anomalous Hall effect. (a) Half-integer quantum Hall effect in graphene, with the quantized resistance plateaus of $h/(ve)^2$ indicated in the figure; (b) quantum anomalous Hall effect in Cr-$(Bi,Sb)_2Te_3$ topological insulator, where the quantized anomalous resistance plateaus of h/e^2 are indicated in the figure[13]

进入 21 世纪后，量子霍尔效应的研究范式逐渐由外场调控转向内禀拓扑量子态的实现。2005 年，Kane 等[9] 从理论上预言在石墨烯中可实现量子自旋霍尔效应(quantum spin Hall effect, QSHE)；几乎同时，Bernevig 等[10] 提出可在 HgTe/CdTe 量子阱中实现该效应，并于 2007 年被 König 等[11] 通过实验证实。QSHE 本质上是一种二维拓扑绝缘体态，其物理根源在于自旋轨道耦合所产生的内禀等效磁场可在不破坏时间反演对称性(time-reversal symmetry, TRS)的前提下为不同自旋的电子诱导出相反手性的边缘态。如图 1(b)所示，该体系的边界处存在一对自旋动量锁定的螺旋边缘态，其输运性质受 TRS 保护，对非磁杂质散射具有免疫力[3]。QSHE 的发现显著推动了自旋电子学与拓扑物态的研究进展。

在 QSHE 研究取得重要突破之后，学界将目光

投向了一个更具挑战性的方向: 如何在无外磁场的条件下实现量子化的霍尔电导, 即量子反常霍尔效应(quantum anomalous Hall effect, QAHE)。这一概念最早由 Haldane[12] 于 1988 年在石墨烯模型中提出, 但实验实现一直极为困难。要实现 QAHE, 材料必须同时具备两个关键特性: 一是长程铁磁序, 以自发打破时间反演对称性; 二是强自旋轨道耦合, 从而诱导出非平庸的拓扑能带结构。2013 年, Chang 等[13] 在铬掺杂的 $(Bi,Sb)_2Te_3$ 拓扑绝缘体薄膜中成功观测到 QAHE, 如图 2(b)所示。该材料本身已具有拓扑绝缘体特性, 通过磁性掺杂引入铁磁序, 最终在零磁场环境下实现了量子化霍尔电导平台, 即 $\sigma_{xy}=e^2/h$。与常规 QHE 中的手性边缘态和 QSHE 中的螺旋边缘态不同, QAHE 的边缘态为手征型单向传输通道, 其传导方向不由外磁场决定, 而取决于材料的固有磁化方向。更值得注意的是, QAHE 的边缘态通常具备自旋极化的特征(图 1(c)), 即边缘电子具有确定的自旋取向(在该实验中以自旋向下为主), 这一特性源于铁磁拓扑绝缘体的本征物性[3, 14]。由于其独特的无损手性边缘输运和自旋极化特性, QAHE 被认为在未来低功耗电子器件中具有广阔的应用前景[15]。

综上, 人们对量子霍尔效应家族的深入研究极大促进了凝聚态物理中拓扑物态理论与实验的发展, 并为精密测量提供了革命性的技术手段。

1.2　实现量子霍尔效应的材料体系

近年来, 随着材料科学与实验技术的持续发展, 人们已证实可在多种材料体系中实现量子霍尔效应, 如图 3 所示。其中, 部分材料体系已成功应用于量子霍尔电阻标准器件的制备, 另一部分虽然在走向实用化过程中仍面临诸多挑战, 但仍展现出潜在的应用价值。

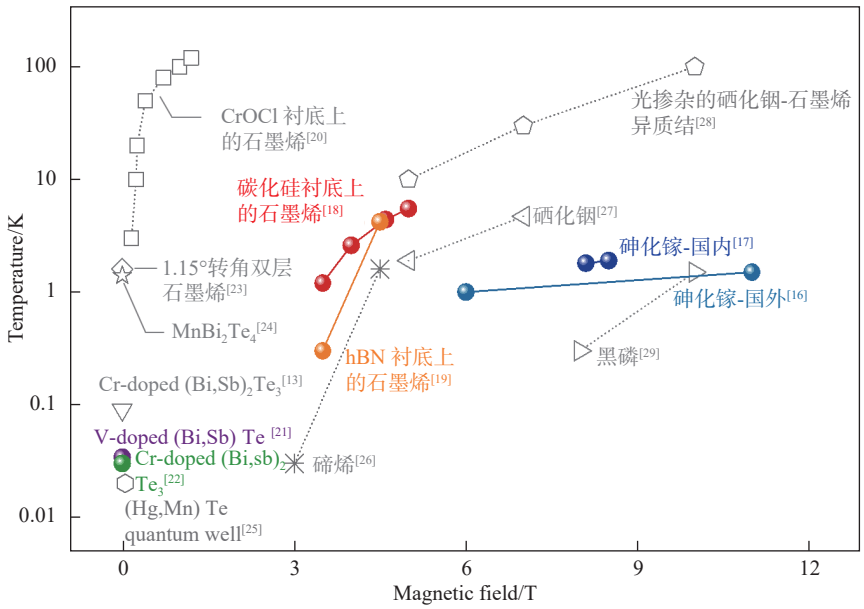

图 3　不同材料体系中实现量子霍尔效应所需的磁场和温度。彩色点线表示对应的材料体系已成功应用于量子霍尔电阻标准器件的制备; 灰色点线表示对应的材料体系仅实现了量子霍尔效应, 目前暂未应用于量子霍尔电阻标准器件的制备[13, 16-29]

Fig. 3　The magnetic field and temperature required to achieve the quantum Hall effect in different material systems. The colored labels indicate that the corresponding material systems have been successfully applied in the fabrication of quantum Hall resistance standard devices, while the gray labels indicate that the corresponding material systems have only demonstrated the quantum Hall effect[13, 16-29]

目前, 已成功应用于量子霍尔电阻标准器件制备的材料体系主要包括砷化镓(GaAs)异质结[16-17]和石墨烯基材料[18-20]。传统的 GaAs/AlGaAs 异质结具有极高的电子迁移率和优异的能带可调控性, 是最早实现量子霍尔效应并被用作电阻标准的材料平台[16]。该材料可在较宽温度和磁场范围内产生稳定的量子霍尔平台, 因而在国内外被长期用作计量体系的基准器件。近年来, 石墨烯因其独特的狄拉克电子结构和极高的载流子迁移率而备受关注。特别是在碳化硅(SiC)衬底上制备的外延石墨

烯[18]和 hBN(hexagonal boron nitride)封装的高质量石墨烯[19],不仅被成功观测到量子霍尔效应,还展现出更高的工作温度和更低的临界磁场,成为新一代量子电阻标准的有力候选材料。此外,铬(Cr)或钒(V)掺杂的拓扑绝缘体,如 $(Bi,Sb)_2Te_3$ 等,也在特定条件下实现了可用于计量研究的量子反常霍尔效应[13, 21-22]。

此外,许多新材料虽能在实验中表现出量子霍尔效应,但因量子平台稳定性不足、制备工艺复杂、对极低温与强磁场的依赖性强或器件性能重复性不佳等因素,尚未能广泛应用于实际的标准器件中。这类材料包括多种石墨烯衍生物与二维材料体系,例如 CrOCl 衬底上的石墨烯[20]、1.15°转角双层石墨烯[23]以及本征或掺杂的拓扑绝缘体(如 $MnBi_2Te_4$)[24]等。其他低维半导体,如 (Hg, Mn)Te 量子阱[25]、碲烯[26]、InSe[27]、光诱导掺杂的 InSe-石墨烯异质结[28]及黑磷[29]也显示出实现量子霍尔效应的潜力,但目前在平台宽度、杂质散射抑制和环境稳定性等方面暂未完全满足计量应用的需求。

总体来看,量子霍尔电阻标准的材料基础正逐步由传统砷化镓体系扩展至二维材料,尤其是石墨烯及其衍生物。石墨烯材料以其独特的能带特性、高迁移率和更宽松的量子化条件,被视为发展高实用型量子电阻标准的理想体系。因此,本文后续将重点围绕石墨烯基材料,特别是碳化硅衬底上的石墨烯基材料,展开对量子电阻器件的制备工艺、掺杂方法及阵列集成技术的综述,并对相关器件的电子输运性能与测量不确定度进行系统分析。

2 石墨烯基量子电阻的制备

2.1 单个量子电阻器件的制备

近年来,外延石墨烯在量子电阻研究中备受关注。以碳化硅为衬底的石墨烯量子电阻器件在结构与工艺上不断被优化,多个团队[30-38]在器件设计及性能提升方面取得了重要进展。

2010 年,Tzalenchuk 等[30]首次提出基于外延石墨烯的量子霍尔电阻标准,并采用化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)法制备了高质量石墨烯,结合电子束光刻技术制作电极,在低温下实现高精度电阻测量,其沟道宽度约 2 μm,推动了对量子电阻器件的标准化应用。2015 年,Ribeiro-Palau 等[18]通过优化生长参数(如降低温度与延长退火时间),降低了薄膜缺陷,提高了器件的电学稳定性和重复性,其霍尔棒结构的沟道宽度为 100 μm。2018 年,He 等[31]通过高分子辅助分子掺杂技术调控载流子浓度,制备出沟道宽度达 5 mm 的宏观器件,显著提升了器件的实用性与一致性,拓展了石墨烯在量子电阻标准中的应用前景。

2.2 量子电阻阵列的制备

近年来,人们在量子霍尔电阻阵列研究中取得了显著进展,实现了多值量子化电阻复现,拓宽了其量程,促进了其在计量体系中的集成与应用。

2019 年,Kruskopf 等[32-33]研制出可复现 $h/(3e^2)$ 量值的无交叉型量子霍尔电阻阵列,采用超导 NbTiN 互连电极来降低接触电阻,提升了稳定性和复现精度,为工程应用奠定了基础。2020 年,Park 等[34]通过并联多个石墨烯器件,实现了 $5h/e^2$ 电阻输出,并表现出良好的重复性。2021 年,Panna 等[35]优化了阵列结构,将 13 个霍尔元件并联,以 NbTiN 为互连材料,实现了约 1 kΩ 的电阻复现,并提出了抑制串扰和寄生效应的新方案。2022 年,He 等[36]研制出含 118 个并联元件的大规模阵列,如图 4 所示。该阵列采用 NbN 超导电极,复现了量值约 109 Ω 的电阻,显著提高了其在低温下的稳定性和可靠性,展现出在国际标准传递中的应用潜力。

目前,各研究团队[32-38]在阵列结构设计、超导互连(如 NbTiN 和 NbN)及一致性方面已取得系列成果。虽然在规模、材料和目标阻值方面存在差异,但外延石墨烯量子霍尔电阻阵列表现出优异的计量可行性,成为发展多值电阻标准的重要方向。

2.3 掺杂方法

在碳化硅基石墨烯量子电阻研究中,掺杂是调控电子特性以满足量子计量要求的关键技术,主要包括 ZEP520A 型光刻胶、氟化富勒烯($C_{60}F_{48}$)、离子源电晕放电、稀释王水、硝酸气体、F_4TCNQ 及六羰基铬掺杂等。

2011 年,Lara-Avila 等[39]研究了基于 ZEP520A 型光刻胶的可逆光控掺杂,通过紫外光照和加热实现了对载流子浓度的调节。随后,Satrapinski 等[40]进一步优化该技术,显著增强了量子电阻测量的稳

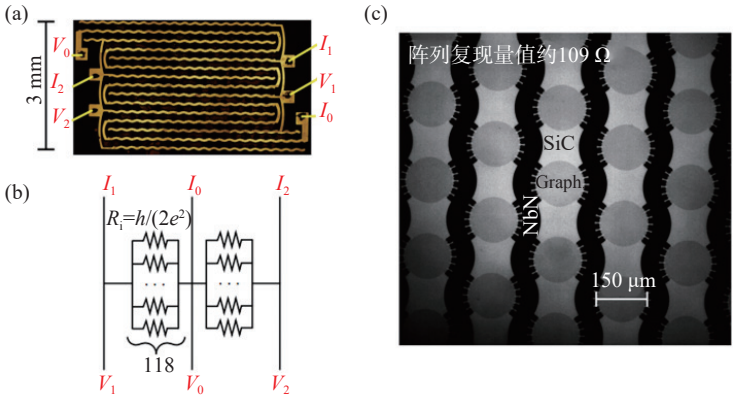

图 4　复现电阻量值约 109 Ω 的量子霍尔电阻标准阵列器件[36]。(a)阵列器件的照片; (b)阵列结构示意图, 单侧由 118 个霍尔元器件并联连接而成; (c)阵列的光学显微镜图像

Fig. 4　Quantum Hall resistance standard array device with a reproduced resistance value of approximately 109 Ω[36]. (a) Photograph of the array device; (b) schematic diagram of the array structure, consisting of 118 Hall elements connected in parallel on one side; (c) optical microscope image of the array

定性和精度。2015 年, Ribeiro-Palau 等[18] 和 Lafont 等[41] 通过实验证实了该方法在提升电输运性能和重复性方面的作用。2013 年, Tadich 等[42] 通过 $C_{60}F_{48}$ 掺杂实现了石墨烯的载流子类型转变; 2014 年 Lartsev 等[43]采用电晕放电技术, 成功使石墨烯的费米能级跨越狄拉克点; 2017 年 Yang 等[44] 利用稀释王水在避免石墨烯过度氧化的前提下, 有效调控了器件的载流子浓度与迁移率。

此外, 硝酸气体掺杂[45] 具有操作简便的优点, 但稳定性有限; F_4TCNQ[31, 38, 46-47] 与六羰基铬掺杂[48] 更为稳定。2018 年, He 等[31] 通过聚合物辅助实现了 F_4TCNQ 均匀掺杂, 表现出优异的长期稳定性, 如图 5 所示; 2019 年, Rigosi 等[48] 利用六羰基铬实现了对石墨烯的可逆掺杂, 可通过调控湿度与温度来调节载流子浓度, 增强了器件灵活性。

综上, 不同掺杂方法在稳定性、可逆性和操作性上各有优劣, 需结合实际应用需求进行选择, 以优化石墨烯的量子计量性能。

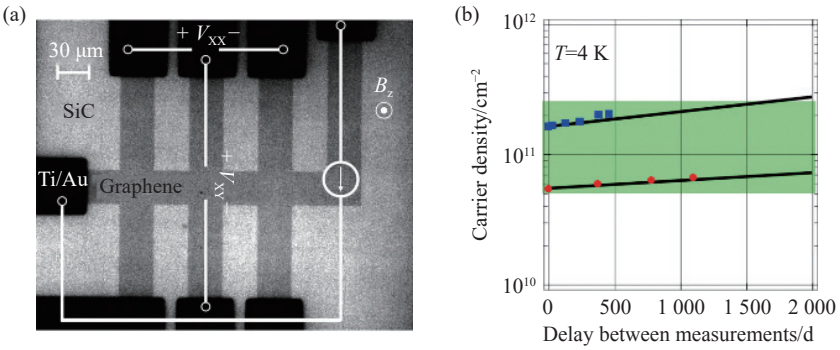

图 5　F_4TCNQ 掺杂的长期稳定性[38]。(a)F_4TNCQ 掺杂后器件的光学显微照片; (b)使用 F_4TNCQ 掺杂后器件载流子浓度随时间的变化关系, 红点和蓝点代表两个不同样品

Fig. 5 The long-term stability of F_4TCNQ doping[38]. (a) Optical micrograph of the device after doping with F_4TNCQ; (b) time-dependent carrier density of the devices with F_4TCNQ doping, with red and blue dots representing two different samples

3　量子电阻器件的性能

3.1　温度、电流和磁场对输运特性的影响

以碳化硅衬底上的石墨烯量子电阻器件为研究对象, 采用六羰基铬掺杂将其载流子浓度调控到 N 型 10^{11} cm^{-2} 左右, 使器件能够在±9 T 磁场范围内进入填充因子 $\nu=2$, 即达到阻值为 $R_K/2$ 的量子霍尔平台。

图 6 展示了掺杂后的石墨烯量子电阻器件在不同温度下的磁输运特性曲线, 施加的电流均为

10 μA。图 6(a)和(b)分别为不同温度下器件的纵向电阻 R_{xx} 和霍尔电阻 R_{xy} 随磁场的变化曲线。结果表明，随着测量温度从 2 K 上升至 50 K，器件在零磁场下的纵向电阻逐渐减小，且 R_{xx} 进入零平台(实际平台值接近于 0 但不为 0)的临界磁场也随之增大。当温度升高到 50 K 时，器件在±9 T 磁场下的纵向电阻已高于该平台，表明在该温度下器件无法在 9 T 磁场下实现完全量子化。此外值得注意的是，器件的霍尔电阻进入阻值为 $R_K/2$ (≈ 12.9 kΩ)的量子化平台的临界磁场也随温度的升高而增大，这反映了器件的量子化程度随着温度的升高而降低的特性。

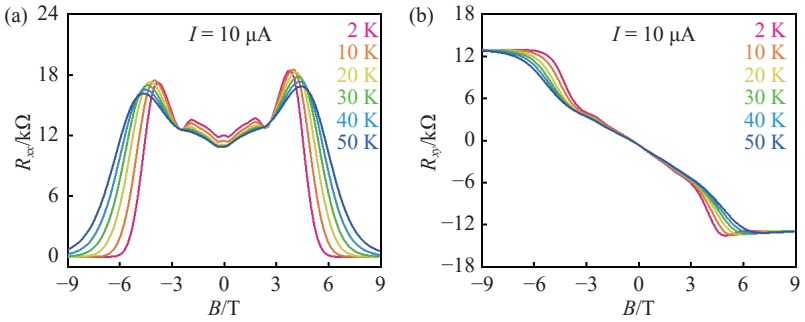

图 6 温度对量子电阻器件磁输运特性的影响。碳化硅衬底上的石墨烯霍尔器件在不同温度下测量的(a)纵向电阻和(b)霍尔电阻的磁输运曲线

Fig. 6 The influence of temperature on the magneto-transport properties of QHRS devices. Magneto-transport measurement curves of the (a) longitudinal resistance and (b) Hall resistance of graphene Hall devices on silicon carbide substrates at different temperatures

另外，我们固定测量温度为 2 K 不变，研究了电流大小对碳化硅衬底上石墨烯量子电阻器件磁输运特性的影响。图 7 展示了不同电流下器件的磁输运测量结果，可以看出，随着测量电流从 1 μA 增加至 500 μA，石墨烯量子电阻器件在零磁场下的纵向电阻逐渐降低。同时，纵向电阻和霍尔电阻分别进入零平台和阻值为 $R_K/2$ 的量子化平台的临界磁场均随测量电流的增大而增大。

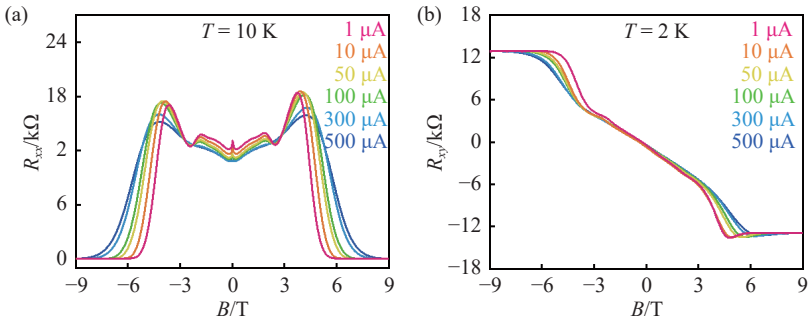

图 7 电流对量子电阻器件磁输运特性的影响。碳化硅衬底上石墨烯霍尔器件在不同电流下测量的(a)纵向电阻和(b)霍尔电阻的磁输运曲线

Fig. 7 The influence of probing current on the magneto-transport properties of QHRS devices. Magneto-transport measurement curves of the (a) longitudinal resistance and (b) Hall resistance of graphene Hall devices on silicon carbide substrates at different currents

3.2 温度和电流对量值不确定度的影响

在量子电阻器件的性能评估中，除电输运特性外，量值不确定度亦是关键性能指标之一；该指标反映了测量结果的离散程度，是衡量器件计量可靠性的核心依据。本节主要介绍温度和电流对量子电阻器件不确定度的影响。不确定度的结果通过直流电流比较仪(direct current comparator, DCC)测量得到(直流电流比较仪的详细介绍参见本文第 4 小节)。

图 8 展示了量子电阻器件和标称值为 10 kΩ 的实物标准电阻之间的不确定度测量结果，其中量子电阻为待测电阻，实物电阻为被比较的标准电阻。此处使用的 10 kΩ 实物电阻为国家一级标准电阻。图 8(a)为 3~5 T 磁场范围内量子电阻器件的量值不确定度随磁场变化的散点图。其中，蓝色散点代

表首次测量结果, 红色散点代表一周后的重复测量结果。可以看出, 器件在一周前后的霍尔电阻不确定度几乎无变化, 体现出良好的时间稳定性。同时, 随着磁场强度的增加, 其不确定度呈下降趋势, 并在 5 T 磁场下达到最优, 为 10^{-8} 量级。图 8(b)为相同时间跨度内, 不同电流下量子电阻器件与标准实物电阻之间不确定度的变化情况。可以看到, 随着电流从 10 μA 增加至 100 μA, 不确定度呈先降低后升高的趋势, 并且在 30 μA 时达到最优。这一趋势可从两个方面来理解: 一方面, 增大电流有助于改善测量精度; 另一方面, 过大电流所引发的热效应可能导致霍尔电阻的量子化程度略微降低, 从而在一定程度上增大了不确定度。这两个方面因素的综合作用可能导致了该现象的发生。

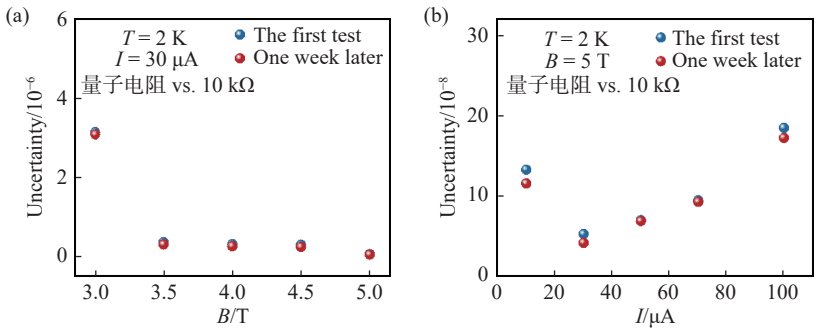

图 8　碳化硅衬底上的石墨烯量子电阻器件的不确定度测量结果。测量得到的量子电阻不确定度随(a)磁场和(b)电流变化的散点图

Fig. 8 The uncertainty measurement results of graphene-based QHRS device on silicon carbide substrates. Scatter plots of the uncertainty of quantum resistance measured with respect to changes in (a) magnetic field and (b) current

3.3　载流子浓度和沟道尺寸的关系

我们在实验和文献调研过程中发现了一个值得关注的趋势: 较大尺寸的量子电阻器件往往在较低磁场下即可进入量子化电阻平台, 而较小尺寸的器件则通常需要更高的磁场才能实现该状态。这一趋势是否蕴含更深层的物理机制?

为探究该问题, 我们基于近期发表的文献统计了不同沟道宽度下器件进入量子化电阻平台所对应的临界磁场, 并将结果汇总于图 9。从图 9 可以看出, 随着沟道宽度的增加, 临界磁场呈现下降趋势, 表明器件尺寸确实对量子电阻行为有一定影响, 较宽沟道的石墨烯霍尔器件似乎更容易在较低磁场下实现量子化电阻平台。然而, 量子霍尔效应一般被认为是一种鲁棒性现象, 不应依赖于材料的几何尺寸。因此, 目前所观察到的尺寸依赖性值得进一步的实验验证和深入探讨。

4　量值传递设备及其原理

根据量子霍尔效应的基本原理, 量子电阻基准能够实现基于基本物理常数的电阻量值复现。然而, 其典型量值(如 $R_K/2 \approx 12.9$ kΩ)并非常见的十进制整数阻值。因此, 为将实际使用的标准电阻准确溯源至量子基准, 必须借助高精度的电阻比较设备, 通常称为电阻电桥[52]。多年来, 基于安匝平衡原理的量值传递设备不断发展, 依次出现了 DCC[53-54]、低温电流比较仪(cryogenic current comparator, CCC)[55-58]以及低频电流比较仪(low frequency

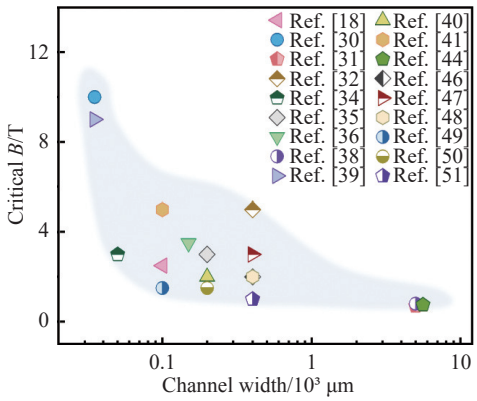

图 9　石墨烯基量子电阻器件进入量子化平台的临界磁场与对应沟道宽度的散点图。图中标签标注了数据来源文献[18, 30-32, 34-36, 38-41, 44, 46-51], 浅蓝色阴影区域勾勒出了数据的整体趋势

Fig. 9 Scatter plot of the critical magnetic field for entering the quantized plateau and the corresponding channel width of graphene Hall devices. The labels denote the data's reference sources[18, 30-32, 34-36, 38-41, 44, 46-51], while the light blue shading outlines the overall trend of the data

current comparator, LFCC)[59-63]。这些设备在提高测量准确度与实用性的进程中逐步成为量子电阻量值传递系统中不可或缺的组成部分。

4.1 直流电流比较仪

1964 年, Kusters 等[53] 首次提出并实现了 DCC 电桥, 为高精度电阻比对奠定了技术基础。该电桥的基本原理如图 10(a)所示, 待测电阻 R_X 和待比较的标准电阻 R_S 和分别接入主、从两个独立电流回路。通过闭环反馈控制, 从电流源实时跟踪主电流源, 使电流 I_X 与 I_S 保持恒定或成比例变化, 从而显著降低电流源稳定性对测量结果的影响。

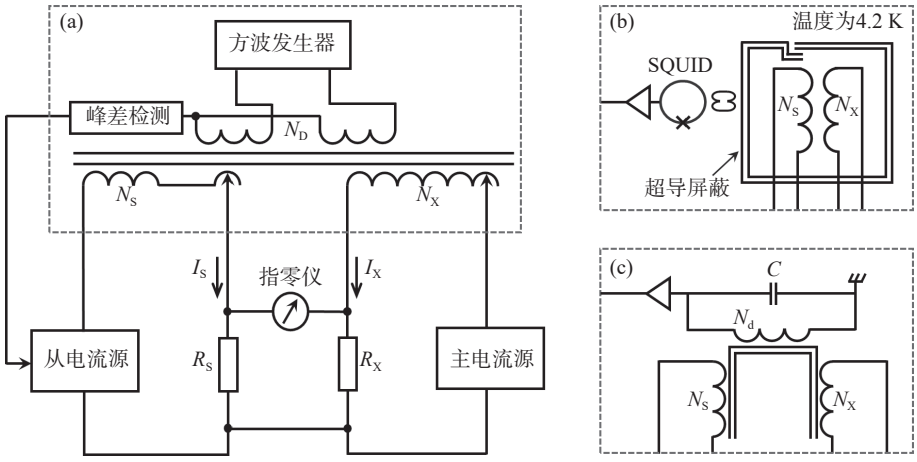

图 10 (a)DCC 电桥的原理图; (b)将图(a)中虚线框部分替换为图(b), 则为 CCC 电桥的原理图; (c)将图(a)中的虚线框部分替换为图(c), 则为 LFCC 电桥的原理图

Fig. 10 (a) Schematic diagram of the DCC bridge circuit; (b) replacing the dashed box in (a) with (b) yields the schematic diagram of the CCC bridge circuit; (c) replacing the dashed box in (a) with (c) yields the schematic diagram of the LFCC bridge circuit

DCC 的核心结构由高磁导率环形铁芯及绕制其上的绕组构成。通过设定原边匝数 N_X 和副边匝数 N_S 来确定理论电流比例。采用磁调制技术, 通过检测绕组(匝数为 N_D) 感测铁芯内的磁通变化, 反馈系统据此调节从动电流 I_S, 直至实现磁平衡, 此时满足安匝平衡关系 $I_XN_X = I_SN_S$。在实现磁平衡的同时, 通过调节匝数比或电流值使两个电阻两端的电压达到平衡, 即 $I_XR_X = I_SR_S$。联立以上两个关系式可得 $R_X = R_S(N_X/N_S)$, 据此可实现电阻值的精确比较。

DCC 电桥具有结构简单、操作便捷及易于维护的优点, 被广泛应用于商用量子霍尔电阻标准装置中, 其典型测量不确定度可达 10^{-8} 量级。然而, 受限于磁调制噪声、磁芯非线性及漏磁等因素的影响, DCC 电桥难以实现更高水平的准确度[54]。

4.2 低温电流比较仪

为解决 DCC 电桥中漏磁通对测量带来的限制, Harvey[55] 于 1972 年提出了 CCC 电桥的概念。CCC 电桥的基本原理如图 10(b)所示, 其核心创新在于将比较绕组(匝数分别为 N_X、N_S)密封于超导屏蔽腔体内, 利用超导体的迈斯纳效应屏蔽所有外部磁干扰和内部漏磁通, 从而形成一个近乎理想的磁隔离环境。在该环境中, 磁平衡检测不再采用磁调制的方式, 而是使用灵敏度更高的超导量子干涉仪(superconducting quantumn interference device, SQUID)作为磁传感器。SQUID 检测两个绕组产生的磁通差, 并通过反馈控制从动电流 I_S 以维持安匝平衡关系; 同时考虑电压平衡条件, 即可推导出电阻比值。整个超导屏蔽系统、绕组及 SQUID 需置于液氦环境中以维持超导状态。

CCC 电桥凭借优异的磁屏蔽性能与 SQUID 的高灵敏度, 可实现 10^{-9}~10^{-10} 量级的测量不确定度, 成为目前准确度最高的电阻比较技术[56-58]。然而, 该技术对电磁环境极为敏感, SQUID 易受干扰失锁, 且需依赖液氦或低温制冷系统, 导致运行与维护成本较高。因此, CCC 电桥直至 20 世纪 90 年代中后期才逐渐在一些国家的标准实验室中投入应用。迄今为止, 它仍是全球最高等级电阻比对与量子霍尔电阻测量的主流方案, 其数字化控制系统也已日益成熟。

4.3 低频电流比较仪

针对 DCC 灵敏度不足及 CCC 低温要求苛刻的问题, Delahaye 等[59] 于 1991 年提出了旨在兼顾高精度与实用性的 LFCC 电桥。LFCC 电桥在一定程度上融合了前述两类比较仪的优点, 其基本结构如图 10(c)所示。

LFCC 采用高磁导率铁氧体磁芯, 并在原、副边绕组(匝数分别为 N_X、N_S)外部施加严密电磁屏蔽, 以抑制漏磁和外界干扰, 其关键创新在于引入了谐振放大与相敏检测技术: 将检测绕组(匝数为 N_d)与可调电容 C 并联构成 LC 谐振电路, 其工作频率通常设定在约 10 Hz 的低频范围。该频率避开了直流附近 $1/f$ (f 为频率)噪声显著的区域, 同时可有效抑制热电势等直流干扰效应。通过谐振增强检测信号, 再结合锁相放大器进行相敏解调, 显著提高了磁平衡检测的灵敏度。

LFCC 电桥通过低频工作并结合电磁屏蔽、谐振及相敏检测技术, 在室温条件下实现了接近 CCC 级别的高测量灵敏度[60-63], 其在抑制低频噪声、消除热电势和提升信号分辨能力方面显著优于 DCC, 并且能够避免 CCC 的低温依赖性, 降低运维成本。目前, 国际计量局已采用 LFCC 进行量子霍尔电阻的量值传递工作, 表明该技术已成为新一代高精度、高实用性电阻传递电桥的重要发展方向。

5 展望

量子电阻研究的未来发展将集中于器件集成化及系统性革新。以碳化硅基石墨烯为代表的新材料体系可在低磁场强度及较高工作温度条件下实行稳定运行, 有望推动量子霍尔电阻标准器件朝小型化、实用化方向发展, 从而促进其在工业环境中的广泛应用。通过构建高集成度量子电阻阵列, 可实现十进制范围内任意电阻值的直接量子化复现, 这将深刻重构现有的电阻量值溯源体系。

上述技术进展最终将推动量子电阻标准向芯片化、网络化方向演进, 并在不断提升基准准确度的同时, 持续降低测量不确定度, 从而为量子技术与精密制造领域提供可靠的计量支撑。

参考文献:

[1] BIPM. The international system of units (SI)[EB/OL]. https://www.bipm.org/en/measurement-units.

[2] KLITZING K V, DORDA G, PEPPER M. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance[J]. Physical Review Letters, 1980, 45(6): 494-497.

[3] OH S. The complete quantum Hall trio[J]. Science, 2013, 340(6129): 153-154.

[4] TSUI D C, STORMER H L, GOSSARD A C. Two-dimensional magnetotransport in the extreme quantum limit[J]. Physical Review Letters, 1982, 48(22): 1559-1562.

[5] LAUGHLIN R B. Anomalous quantum Hall effect: An incompressible quantum fluid with fractionally charged excitations[J]. Physical Review Letters, 1983, 50(18): 1395-1398.

[6] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.

[7] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene[J]. Nature, 2005, 438(7065): 197-200.

[8] ZHANG Y, TAN Y W, STORMER H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene[J]. Nature, 2005, 438(7065): 201-204.

[9] KANE C L, MELE E J. Quantum spin Hall effect in graphene[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(22): 226801.

[10] BERNEVIG B A, HUGHES T L, ZHANG S C. Quantum spin Hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells[J]. Science, 2006, 314(5806): 1757-1761.

[11] KÖNIG M, WIEDMANN S, BRÜNE C, et al. Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells[J]. Science, 2007, 318(5851): 766-770.

[12] HALDANE F D M. Model for a quantum Hall effect without landau levels: Condensed-matter realization of the "parity anomaly"[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(18): 2015-2018.

[13] CHANG C Z, ZHANG J, FENG X, et al. Experimental observation of the quantum anomalous Hall effect in a magnetic topological insulator[J]. Science, 2013, 340(6129): 167-170.

[14] POIRIER W, DJORDJEVIC S, SCHOPFER F, et al. The ampere and the electrical units in the quantum era[J].

Comptes Rendus Physique, 2019, 20(1/2): 92-128.

[15] ZHAO Y F, ZHANG R, MEI R, et al. Tuning the Chern number in quantum anomalous Hall insulators[J]. Nature, 2020, 588(7838): 419-423.

[16] DELAHAYE F, JECKELMANN B. Revised technical guidelines for reliable dc measurements of the quantized Hall resistance[J]. Metrologia, 2003, 40(5): 217-223.

[17] 钟青, 王雪深, 李劲劲, 等. 1 kΩ 量子霍尔阵列电阻标准器件研制[J]. 物理学报, 2016, 65(22): 275-280.

[18] RIBEIRO-PALAU R, LAFONT F, BRUN-PICARD J, et al. Quantum Hall resistance standard in graphene devices under relaxed experimental conditions[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(11): 965-971.

[19] DEAN C R, WANG L, MAHER P, et al. Hofstadter's butterfly and the fractal quantum Hall effect in moiré superlattices[J]. Nature, 2013, 497(7451): 598-602.

[20] WANG Y, GAO X, YANG K, et al. Quantum Hall phase in graphene engineered by interfacial charge coupling[J]. Nature Nanotechnology, 2022, 17(12): 1272-1279.

[21] PATEL D K, FIJALKOWSKI K M, KRUSKOPF M, et al. A zero external magnetic field quantum standard of resistance at the 10^{-9} level[J]. Nature Electronics, 2024, 7(12): 1111-1116.

[22] OKAZAKI Y, OE T, KAWAMURA M, et al. Quantum anomalous Hall effect with a permanent magnet defines a quantum resistance standard[J]. Nature Physics, 2022, 18(1): 25-29.

[23] SERLIN M, TSCHIRHART C L, POLSHYN H, et al. Intrinsic quantized anomalous Hall effect in a moiré heterostructure[J]. Science, 2020, 367(6480): 900-903.

[24] DENG Y J, YU Y J, SHI M Z, et al. Quantum anomalous Hall effect in intrinsic magnetic topological insulator $MnBi_2Te_4$[J]. Science, 2020, 367(6480): 895-900.

[25] SHAMIM S, BEUGELING W, BÖTTCHER J, et al. Emergent quantum Hall effects below 50 mT in a two-dimensional topological insulator[J]. Science Advances, 2020, 6(26): eaba4625.

[26] QIU G, NIU C, WANG Y, et al. Quantum Hall effect of Weyl fermions in n-type semiconducting tellurene[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(7): 585-591.

[27] BANDURIN D A, TYURNINA A V, YU G L, et al. High electron mobility, quantum Hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe[J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(3): 223-227.

[28] BHUIYAN M A, KUDRYNSKYI Z R, MAZUMDER D, et al. Photoquantum Hall effect and light-induced charge transfer at the interface of graphene/InSe heterostructures[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(3): 1805491.

[29] LI L, YANG F, YE G J, et al. Quantum Hall effect in black phosphorus two-dimensional electron system[J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(7): 593-597.

[30] TZALENCHUK A, LARA-AVILA S, KALABOUKHOV A, et al. Towards a quantum resistance standard based on epitaxial graphene[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(3): 186-189.

[31] HE H, KIM K H, DANILOV A, et al. Uniform doping of graphene close to the Dirac point by polymer-assisted assembly of molecular dopants[J]. Nature Communications, 2018, 9: 3956.

[32] KRUSKOPF M, RIGOSI A F, PANNA A R, et al. Next-generation crossover-free quantum Hall arrays with superconducting interconnections[J]. Metrologia, 2019, 56(6): 065002.

[33] KRUSKOPF M, RIGOSI A F, PANNA A R, et al. Two-terminal and multi-terminal designs for next-generation quantized Hall resistance standards: contact material and geometry[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(9): 3973-3977.

[34] PARK J, KIM W S, CHAE D H. Realization of $5h/e^2$ with graphene quantum Hall resistance array[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(9): 093102.

[35] PANNA A R, HU I F, KRUSKOPF M, et al. Graphene quantum Hall effect parallel resistance arrays[J]. Physical Review B, 2021, 103(7): 075408.

[36] HE H, CEDERGREN K, SHETTY N, et al. Accurate graphene quantum Hall arrays for the new International System of Units[J]. Nature Communications, 2022, 13: 6933.

[37] NOVIKOV S, LEBEDEVA N, HÄMÄLÄINEN J, et al. Mini array of quantum Hall devices based on epitaxial

graphene[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(17): 174504.

[38] HE H, LARA-AVILA S, KIM K H, et al. Polymer-encapsulated molecular doped epigraphene for quantum resistance metrology[J]. Metrologia, 2019, 56(4): 045004.

[39] LARA-AVILA S, MOTH-POULSEN K, YAKIMOVA R, et al. Non-volatile photochemical gating of an epitaxial graphene/polymer heterostructure[J]. Advanced Materials, 2011, 23(7): 878-882.

[40] SATRAPINSKI A, NOVIKOV S, LEBEDEVA N. Precision quantum Hall resistance measurement on epitaxial graphene device in low magnetic field[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(17): 173509.

[41] LAFONT F, RIBEIRO-PALAU R, KAZAZIS D, et al. Quantum Hall resistance standards from graphene grown by chemical vapour deposition on silicon carbide[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6806.

[42] TADICH A, EDMONDS M T, LEY L, et al. Tuning the charge carriers in epitaxial graphene on SiC(0001) from electron to hole *via* molecular doping with C60F48[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(24): 241601.

[43] LARTSEV A, YAGER T, BERGSTEN T, et al. Tuning carrier density across Dirac point in epitaxial graphene on SiC by corona discharge[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(6): 063106.

[44] YANG Y, CHENG G, MENDE P, et al. Epitaxial graphene homogeneity and quantum Hall effect in millimeter-scale devices[J]. Carbon, 2017, 115: 229-236.

[45] CHEN L X, WANG H S, KONG Z Q, et al. Gaseous catalyst assisted growth of graphene on silicon carbide for quantum Hall resistance standard device[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(2): 2201127.

[46] YIN Y, CHATTERJEE A, MOMENI D, et al. Tailoring permanent charge carrier densities in epitaxial graphene on SiC by functionalization with F4-TCNQ[J]. Advanced Physics Research, 2022, 1(1): 2200015.

[47] YIN Y, KRUSKOPF M, BAUER S, et al. Quantum Hall resistance standards based on epitaxial graphene with *p*-type conductivity[J]. Applied Physics Letters, 2024, 125(6): 064001.

[48] RIGOSI A F, KRUSKOPF M, HILL H M, et al. Gateless and reversible Carrier density tunability in epitaxial graphene devices functionalized with chromium tricarbonyl[J]. Carbon, 2019, 142: 468-474.

[49] JANSSEN T J B M, ROZHKO S, ANTONOV I, et al. Operation of graphene quantum Hall resistance standard in a cryogen-free table-top system[J]. 2D Materials, 2015, 2(3): 035015.

[50] KRUSKOPF M, BAUER S, PIMSUT Y, et al. Graphene quantum Hall effect devices for AC and DC electrical metrology[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(7): 3672-3677.

[51] CHAE D H, KRUSKOPF M, KUCERA J, et al. Investigation of the stability of graphene devices for quantum resistance metrology at direct and alternating current[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(6): 065012.

[52] 宋海龙, 孙毅, 于珉, 等. 量子霍尔效应在电阻标准中的应用综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 12-22.

[53] KUSTERS N L, MOORE W J M, MILJANIC P N. A current comparator for the precision measurement of D-C ratios[J]. IEEE Transactions on Communication and Electronics, 1964, 83(70): 22-27.

[54] MACMARTIN M P, KUSTERS N L. A direct-current-comparator ratio bridge for four-terminal resistance measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1966, 15(4): 212-220.

[55] HARVEY I K. A precise low temperature dc ratio transformer[J]. Review of Scientific Instruments, 1972, 43(11): 1626-1629.

[56] JECKELMANN B, JEANNERET B. The quantum Hall effect as an electrical resistance standard[J]. Reports on Progress in Physics, 2001, 64(12): 1603.

[57] SANCHEZ C A, WOOD B M, INGLIS A D. CCC bridge with digitally controlled current sources[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1202-1205.

[58] WILLIAMS J M, JANSSEN T J B M, RIETVELD G, et al. An automated cryogenic current comparator resistance ratio bridge for routine resistance measurements[J]. Metrologia, 2010, 47(3): 167.

[59] DELAHAYE F, BOURNAUD D. Low-noise measurements of the quantized Hall resistance using an improved cryogenic current comparator bridge[C]//Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements. New York: IEEE, 1990: 304-305.

[60] DELAHAYE F. An ac-bridge for low-frequency measurements of the quantized Hall resistance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991, 40(6): 883-888.

[61] DELAHAYE F, BOURNAUD D. Accurate AC measurements of standard resistors between 1 and 20 Hz[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2): 287-291.

[62] SATRAPINSKI A, PÖNTYNEN H, GÖTZ M, et al. A low-frequency current comparator for precision resistance measurements[C]//Proceedings of the 29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements. New York: IEEE, 2014: 760-761.

[63] SATRAPINSKI A, GÖTZ M, PESEL E, et al. New generation of low-frequency current comparators operated at room temperature[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(6): 1417-1424.