

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104216

量子霍尔效应在电阻标准中的应用综述*

宋海龙¹ 孙毅² 于珉¹ 何家伟² 赵 佺² 黄晓钉²

(1.北京航天科技发展有限公司 北京 100080; 2.北京东方计量测试研究所 北京 100086)

摘要:量子霍尔效应为电学计量提供了最高电阻标准,近年来随着新材料的发现和新技术的进步,量子化霍尔电阻标准也正在发生新的进展。全面介绍了量子化霍尔电阻标准的发展过程,描述量子霍尔效应的发现及其理论和普适性,阐述基于砷化镓和基于石墨烯的量子电阻器件以及量子电阻阵列的发展过程,分析新型石墨烯量子化霍尔电阻标准的优势及其发展现状,总结直流电流比较仪电桥、低温电流比较仪电桥和常温低频电流比较仪电桥等3种电阻传递装置原理和优缺点,并展望量子化霍尔电阻标准的发展方向。

关键词:量子霍尔效应;电阻标准;石墨烯;电阻电桥

中图分类号: TB971 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Review on the application of quantum Hall effect in resistance standard

Song Hailong¹ Sun Yi² Yu Min¹ He Jiawei² Zhao Quan² Huang Xiaoding²

(1. Beijing Hang Tian He Science Technology Development Co. Ltd, Beijing 100080, China;

2. Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100086, China)

Abstract: Quantum Hall effect provides the basis for primary resistance standard in electrical metrology. With discovery of new material and development of new technology, new progress is seen in quantum Hall resistance standard (QHRS). The development of QHRS is reviewed, starting from description of discovery of quantum Hall effect and its theory and universality, followed by introduction of GaAs-based and graphene-based quantum Hall devices and quantum resistance array, advantages of the new graphene-based QHRS and its development status are introduced, different types of resistance bridges, including direct current comparator, cryogenic current comparator and low frequency current comparator, are summarized, and development trend of QHRS is prospected.

Keywords: quantum Hall effect; resistance standard; graphene; resistance bridge

0 引言

电阻标准在电学计量中十分重要,传统采用一组实物电阻作为最高电阻标准,存在电阻量值缓慢变化且易受环境影响等问题。1980年冯·克里青发现量子霍尔效应(QHE)后,基于QHE开发的量子化霍尔电阻大幅提升电阻标准的准确度,并解决传统实物电阻标准的稳定性问题。2004年成功获得石墨烯,和传统的砷化镓材料相比,石墨烯可以在高温区和低磁场环境下复现QHE,为新型量子化霍尔电阻标准提供了发展方向。

目前石墨烯材料和量子电阻器件的制备技术正在逐渐成熟,石墨烯量子电阻器件正在进入实用化,基于石墨烯的低成本、小型化新型量子化霍尔电阻标准发展迅速;常用的量子电阻传递装置也由准确度稍差的室温直流电流比较仪电桥和需液氮运行的低温电流比较仪电桥,正在向室温下可运行的高准确度低频电流比较仪电桥发展。

为全面总结量子霍尔效应和量子化霍尔电阻的发展过程、现状并展望未来发展趋势,本文系统介绍量子霍尔效应的发现和理论,并对量子化霍尔电阻器件、量子电阻标准和电阻传递装置的发展进行综述。

收稿日期: 2021-04-22 Received Date: 2021-04-22

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01012601)项目资助

1 量子霍尔效应的基本原理

1.1 霍尔效应

霍尔效应在 1879 年由美国物理学家埃德温·赫伯特·霍尔发现,是指流过电流 I 的导体施加垂直磁场 B ,导体内流动的电荷受到洛伦兹力而偏向一边,在横向产生电压(霍尔电压) V_H 的现象,如图 1 所示,霍尔电压为:

$$V_H = \frac{B}{N_s e} I = R_H I \quad (1)$$

式中: B 为所施加磁场的磁感应强度; N_s 为导体表面电子浓度; e 为基本电荷常数; I 为导体中流过的电流。可见霍尔电压 V_H 与 I 和 B 成正比。根据霍尔效应制成的霍尔器件已在很多领域广泛应用。

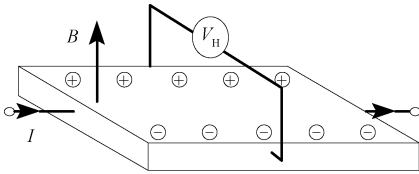


图 1 霍尔效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Hall effect

1.2 量子霍尔效应的发现

1980 年,德国物理学家冯·克里青在研究低温和强磁场中的半导体特性时发现 QHE^[1]。如图 2(a) 所示,在低温和强磁场环境中的高迁移率二维电子气(2DEG),其横向霍尔电阻 R_H 呈现一系列和自然常数 h/e^2 相关的平台,对应的纵向电阻 R_{xx} 则迅速降低为 0,如图 2(b) 所示,此时 2DEG 处于无损耗状态。量子化霍尔电阻平台为:

$$R_H = h/ie^2 = R_K/i \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数; i 为正整数(称为填充系数); $R_K = h/e^2$ 为冯克里青常数。

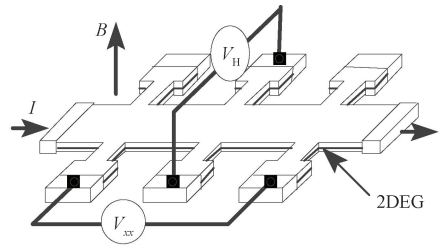
QHE 提供了全新的方法来确定精细结构常数,在计量领域可以用来作为电阻标准。QHE 是当代物理学一个重大发现,冯·克里青因此获得 1985 年的诺贝尔物理学奖。

1.3 量子霍尔效应的理论

2DEG 置于低温和强磁场 B 中,忽略电子自旋和塞曼能,自由电子的哈密顿量为^[2]:

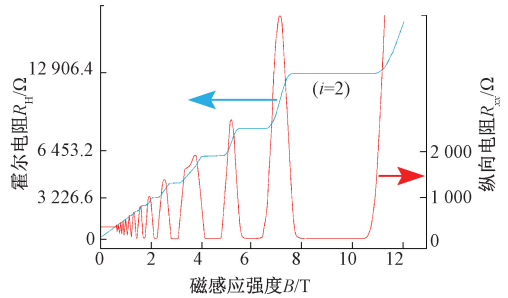
$$H = \frac{1}{2m} [\mathbf{P} + e\mathbf{A}]^2 \quad (3)$$

式中: m 为电子有效质量; \mathbf{P} 为动量算子; \mathbf{A} 为矢量势,有关系式 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 。解薛定谔方程,问题简化为简谐振子方程,简谐振子的能量本征值也就是朗道能级为分立的,如图 3(a) 所示,表示如下:



(a) 量子霍尔电阻样品结构图及其测量

(a) Shape of quantum Hall resistance sample and its measurement



(b) 霍尔电阻-磁场曲线图

(b) Hall resistance-magnetic field profile

图 2 量子霍尔效应

Fig. 2 Quantum Hall effect

$$E_n = \hbar\omega_c \left(n + \frac{1}{2} \right) \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中: $\omega_c = eB/m$ 为电子回转运动频率; $\hbar = h/2\pi$ 为约化普朗克常数; n 为整数。电子回转运动量子化,相对于回转运动中心方向,朗道能级(LL)高度简并,每个 LL 的电子态密度为 eB/h ,与磁通量子密度 $N_B = B/\phi_0$ 相等。LL 中每个电子态占据的表面为 $2\pi l_B^2 = 1/N_B$ (其中磁长度 $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$),对应一个磁通量子穿过的面积。在量子霍尔状态下引入填充系数 $i = N_s/N_B$,式(1)转换得到式(2)的量子霍尔电阻平台值。通过调整 B 或载流子浓度可以改变填充系数。

在实际的 2DEG 中总存在杂质或无序,杂质对电子的散射作用使得 LL 被展宽,以 E_n 为中心的窄能带称为扩展态,在 LL 之间的部分称为局域态,如图 3(b) 所示,只有在扩展态才能承载电流。改变填充系数 i ,可以连续调节费米能级 E_F ,当其位于对应于局域态的能量时,霍尔电阻与磁场无关,出现霍尔平台。同时,能隙阻止向扩展态的激发,避免了能耗,因此 $R_{xx} \sim 0$ 。

1.4 量子霍尔效应的普适性

QHE 是普适的量子效应,量子化霍尔电阻与 h/e^2 相关联,与 2DEG 材料无关。1981 年,劳克林提出了关于 QHE 的解释,表明 QHE 的普适性源于哈密顿量的规范不变性^[3]。巴蒂克提出量子化值的精确性是由于不存在散射^[4]。已经证明,霍尔电导拓扑不变^[5-6],电子间相互作用和引力场也不会对 QHE 产生影响^[7-8]。

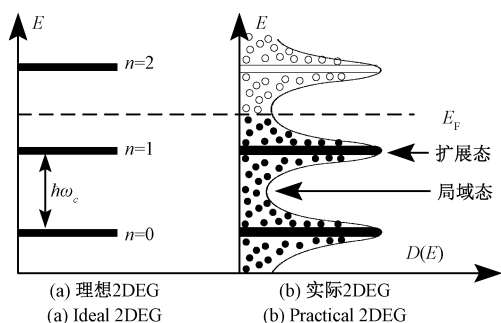


图 3 2DEG 中朗道能级量子化

Fig. 3 Quantization of Landau levels in 2DEG

在实验方面,通过对几只量子电阻的一致性进行测试,证明 QHE 重复性可以达到 10^{-10} 量级^[9];通过将砷化镓异质结的第 4 台阶与 Si-MOSFET 的第 2 台阶进行比较^[10],证明量子霍尔电阻与材料及朗道能级指数无关;进一步地,针对不同类型、不同电特性、不同几何形状的器件和不同的台阶进行测试,已经验证量子霍尔电阻与材料、器件和台阶数无关^[11-13]。在将石墨烯与砷化镓异质结中的 QHE 进行比较中,发现量子化霍尔电阻一致性达到 8.6×10^{-11} ^[14]。

2 量子化霍尔电阻器件

利用 QHE 复现高准确度电阻值,需要依赖半导体技术制备量子化霍尔电阻器件,并获得高质量的二维电子气。经过多年的发展,基于 GaAs/AlGaAs 异质结的量子化霍尔电阻器件制备技术已经成熟,基于新型石墨烯材料的器件的制备技术也正在快速发展,同时计量专家也在开发基于多个量子化霍尔棒并联的阵列器件,以提供多种电阻值来满足电阻计量需求。

2.1 基于砷化镓异质结的量子电阻器件

虽然 QHE 是在 Si-MOSFET 中被首次发现,但是由于其复现 QHE 所需要的磁场更强 (>12.5 T) 且温度更低 (0.5 K),计量学家很快采用 GaAs/AlGaAs 异质结构制备量子霍尔器件^[15]。GaAs/AlGaAs 异质结构及在界面处形成的 2DEG 如图 4 所示,采用分子束外延 (MBE) 或金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术可以制备异质结^[16],并利用调制掺杂技术提高载流子迁移率。采用光刻和蚀刻等技术进行霍尔棒成形,典型几何形状如图 2 (a) 所示,尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$,设置 3 对霍尔电极和 1 对电流电极 (源极和漏极)。量子电阻样品中电极的质量十分重要,一方面,接触电阻会直接影响测量准确度,甚至可能会造成样品无法进入量子化状态,另一方面,在使用中样品会经历多个高低温循环,电极必须能够可靠接触 2DEG。电极常采用顺序蒸发 AuGeNi 合金和退火,

在量子霍尔工作区接触电阻在 $10 \sim 50 \text{ m}\Omega$ 的范围^[17],随时间和温度循环保持稳定,能够实现电极与 2DEG 的良好接触。中国计量院用分子束外延生长砷化镓异质结构制备量子化霍尔电阻器件,应用于中国电阻基准^[18]。

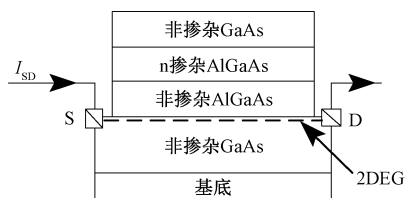


图 4 GaAs/AlGaAs 异质结构

Fig. 4 GaAs/AlGaAs heterostructure

将砷化镓异质结量子电阻样品置于约 1.5 K 的环境温度,施加约 10 T 的磁场,采用约 $70 \mu\text{A}$ 的测量电流,在 $i=2$ 平台样品的霍尔电阻不确定度可以达到 1×10^{-9} 。在经过大量试验后,已经总结出样品特性和表征的技术准则^[19],通过检查纵向电阻、电流变化特性和磁场变化特性等来确认量子电阻是否充分量子化。

2.2 基于石墨烯的量子电阻器件

2004 年,科学家诺奥肖洛夫和盖姆从石墨中首次获得石墨烯^[20],他们因此获得 2010 年诺贝尔物理学奖。石墨烯具有独特的优良性能,在多领域具有广泛的应用前景^[21]。石墨烯在室温下出现量子霍尔效应^[22-23],吸引了计量专家的关注。

石墨烯的碳原子按六边形晶格整齐排布,是纯正二维 (2D) 结构,如图 5 所示,由于原子排列结构特殊,石墨烯量子霍尔电阻台阶有 $1/2$ 的偏移^[24],其量子化霍尔电阻的表达式为:

$$R_{\text{H}} = \pm \frac{h}{4(i + 1/2)e^2} \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$



图 5 石墨烯结构和石墨烯量子霍尔电阻样品

Fig. 5 Graphene structure and graphene-based quantum Hall resistance sample

砷化镓异质结等传统 2DEG 材料的相邻朗道能级间隔 $\Delta E_{\text{LL}} \propto B$,而石墨烯材料的相邻朗道能级间隔 $\Delta E_{\text{LL}} \propto \sqrt{B}$ ^[25],因此如图 6 所示,与传统 2DEG 相比,石墨烯具有更宽的第 2 个霍尔电阻平台,且其起始磁感应强度更低,考虑到石墨烯复现 QHE 所需要的温度和磁场条件都得到明显改善,因此基于石墨烯的量子电阻标准装置的制

冷系统复杂程度可以大大降低,强磁体的体积可以显著缩小,同时石墨烯的击穿电流也更高,能够加大测试电流,从而提升电阻测试准确度,可见石墨烯是制备量子化霍尔电阻器件的理想材料。

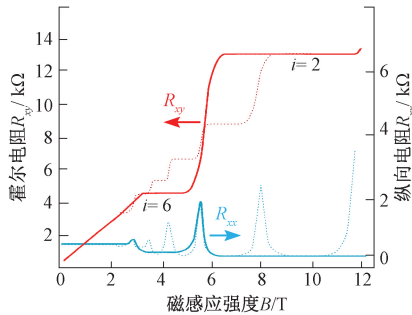


图 6 石墨烯(实线)和传统 2DEG(虚线)中 QHE 的比较

Fig. 6 Comparison of QHE in graphene (solid lines) and conventional 2DEG (dashed lines)

为了开发计量级石墨烯量子电阻,各国专家尝试了机械剥离、化学气相沉积(CVD)、碳化硅(SiC)外延生长(EG)等不同方法并调节过程参数来制备石墨烯,以提高石墨烯材料的产量和品质。

机械剥离法属于物理方法,所获得的石墨烯电学性质较好,但是存在所获得的石墨烯尺寸小、生产效率较低等问题。利用机械剥离法获得的石墨烯材料($15\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$)来制备量子电阻,可以达到 10^{-7} 量级的不确定度^[26],由于样品尺寸较小,因此触点不稳定,测试电流较小,性能无法进一步提升。利用大面积($150\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$)机械剥离石墨烯材料制备的量子化霍尔电阻并采用 GaAs 作为基底,获得了 10^{-9} 量级的不确定度^[27]。

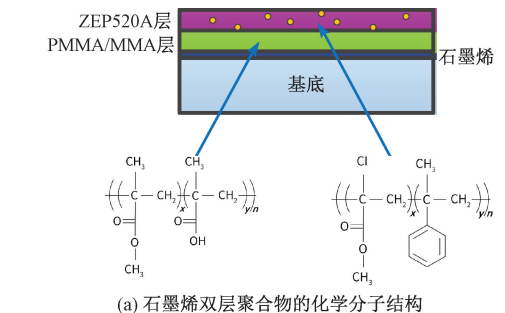
CVD 法通过选择基底材料和调整生产过程参数来制备大面积、均匀一致的石墨烯^[28],但是其中的基底转移环节可能会带来污染和造成石墨烯损坏,因此生成的石墨烯要比机械剥离石墨烯的电性能要差^[29],生产的石墨烯存在横向线缺陷(皱纹和晶界)会造成量子霍尔电阻无法充分量子化的问题^[30]。研究发现,在 CVD 制备工艺流程中增加铜箔预清洗环节,并在升温过程中调整氩气流速,可以提升制备石墨烯的质量^[31]。用 CVD 石墨烯制备量子电阻,采用碳化硅作为基底,在磁感应强度为 3.5 T 和温度为 10 K 的实验环境,测试电流为 0.5 mA,不确定度可以达到 1×10^{-9} ^[32]。

EG 法是在高真空或惰性气体环境下高温热解 SiC 直接生长石墨烯,由于无需基底转移这一环节,所制备的石墨烯质量好,适合于开发量子电阻器件^[33]。在利用 EG 石墨烯制备量子电阻进行的测试中,获得了与传统量子电阻标准类似的测试结果^[34]。由于 EG 石墨烯和基底之间的界面层有电荷转移,其最大击穿电流密度远超传统量子电阻^[35]。但是 EG 石墨烯的生产机理复杂,所制

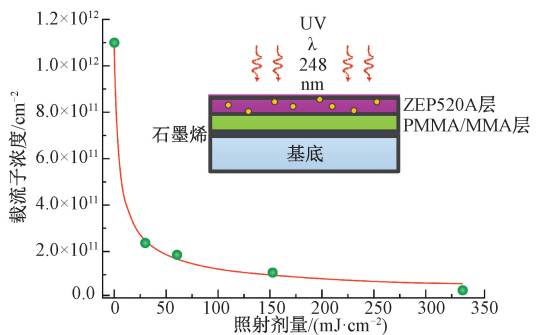
备石墨烯的品质与多项工艺参数相关,其生产工艺有待进一步优化^[36-37]。

基于石墨烯的量子电阻适合于开发新型量子电阻标准,实验证明石墨烯量子电阻标准和传统砷化镓量子电阻标准的性能相当或更好^[38-39],但目前石墨烯载流子浓度调控、欧姆接触和器件的稳定性及一致性等关键问题仍需进一步研究^[40-41]。

石墨烯原始材料的载流子浓度很高,为了使低磁场环境中的石墨烯能够复现 QHE,需要对其载流子浓度进行调控。通过电晕放电离子产生静电势,可以调控 EG 石墨烯载流子浓度^[42],但在调控过程中,当调控效果达到要求时,需立即将量子电阻样品放入低温环境,以保持调控效果,因此这种调控方法还有待改进。另外一种常用的方法是光化学调控载流子浓度,在 EG 石墨烯上旋涂两层聚合物后照射紫外线^[43],见图 7,目前这种调控方法已经成功应用于量子电阻标准^[32-44]。化学掺杂也被用来控制载流子浓度^[45],测试发现与传统砷化镓量子电阻标准的性能相当,测试中经历长时间内多次热循环,载流子浓度并未发生显著变化^[46]。



(a) Chemical formulae of the two layers of polymers above graphene



(b) Carrier density control of graphene by photochemical gating

图 7 石墨烯旋涂双层聚合物和载流子浓度光化学调控

Fig. 7 Spinning two layers of polymers above graphene and carrier density control by photochemical gating

和传统砷化镓量子电阻器件一样,电极的触点稳定性和接触电阻是影响石墨烯量子电阻性能的一个重要因素。采用两级敷金属环节,可以改进欧姆接触的性能^[47]。美国国家标准与技术研究院(NIST)在制作电极

时,在 Pd/Au 触点上部分覆盖 Ti/Au,并利用石墨烯的曲线边沿提高物理粘合力,降低接触电阻^[48]。研究发现,霍尔电阻管脚处的贯通双层石墨烯会带来干扰,而造成接触电阻的增大,在扩大金属触点并覆盖双层石墨烯后,接触电阻降低至 40Ω ^[49]。在理论方面,已经建立起接触电阻的物理模型,基于此模型,金属电极材料、栅极电压、掺杂浓度、金属与石墨烯原子距离等对接触电阻的影响已经得以探讨^[50]。

实验发现,双层石墨烯覆盖率与载流子浓度呈近似线性相关^[51],因此在器件制备过程中,应采用非破坏性的方法对石墨烯材料进行表征,选择纯单层的区域进行器件成形。在大气环境中,石墨烯会受到大气中的分子污染而造成电性能变化,因此需要对石墨烯样品进行表面钝化处理。可以在样品表面涂覆 PMMA^[43],而 NIST 则在样品表面涂覆非晶态氮化硼(a-BN)^[52-53],以保证石墨烯量子电阻样品的电性能能够长时间保持稳定。

2.3 量子化霍尔电阻阵列

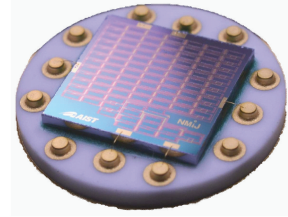
砷化镓异质结样品中,在第 2 个和第 4 个平台上才能观察到良好量子化,因此,单个量子霍尔器件可以提供阻值为 $R_k/2 \approx 12.9 \text{ k}\Omega$ 或 $R_k/4 \approx 6.45 \text{ k}\Omega$ 的标准。而次级电阻标准范围是从毫欧到兆欧的十进制整数电阻,从单个量子化霍尔电阻的非整数电阻传递到整数电阻存在量值传递链长、传递需要依赖液氮工作的低温电流比较仪电桥等问题。通过多个霍尔棒串并联组合形成量子霍尔阵列标准(QHARS),可以拓展量子电阻标准的阻值,满足计量应用需求。

在 1984 年,串并联霍尔棒来获得量子化霍尔电阻任意分数值的思想就已经被提出^[54]。继而,基于霍尔电阻的串并联特性的深入研究,已经证明霍尔器件之间的冗余连接可以消除连线电阻和接触电阻的影响^[55]。利用最少个数霍尔棒设计十进制阻值 QHARS 的方法促进了阵列的实际实现^[56]。

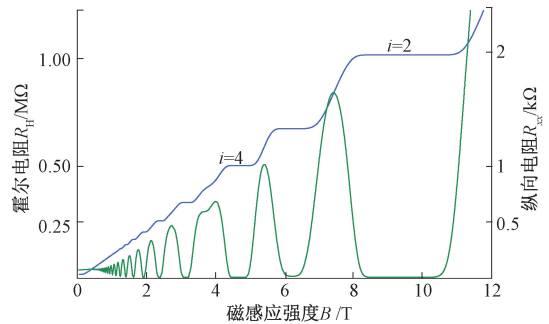
由多个霍尔棒并联组成的低阻值量子电阻阵列的击穿电流更大,因此可以提高信噪比,降低对传递电桥的要求。在基于砷化镓的 QHARS258 和 QHARS129 标准的测试试验中,测量电流可以高达 2 mA ^[57],随后的文献中提到 QHARS129 和 QHARS100 的测量电流高达 4 mA ^[58],这个量值的测量电流可以利用常规电桥进行测量。

目前,量子化霍尔电阻阵列可以实现 $100 \Omega \sim 1 \text{ M}\Omega$ 的阻值范围。阻值为 100Ω 的霍尔电阻阵列由 145 个砷化镓基霍尔棒制备获得^[58],阻值为 $1 \text{ M}\Omega$ 的霍尔电阻阵列由 88 个霍尔棒制备获得^[59],如图 8 所示。中国计量院用 29 个霍尔棒制备出阻值为 $1 \text{ k}\Omega$ 的量子霍尔电阻阵列,150 个霍尔棒制备出 100Ω 的阵列^[60-61]。经验证,采用砷化镓研制的量子霍尔电阻阵列样品和测量系统的准

确度满足当前实际计量应用需求^[62]。



(a) $1 \text{ M}\Omega$ 量子霍尔电阻阵列器件
(a) $1 \text{ M}\Omega$ quantum Hall resistance array device



(b) 量子霍尔电阻阵列器件的电阻测量曲线
(b) Resistance measurement curve of quantum Hall resistance array

图 8 量子霍尔电阻阵列器件($1 \text{ M}\Omega$)及其电阻测量曲线

Fig. 8 Quantum Hall resistance array device ($1 \text{ M}\Omega$) and its resistance measurement curve

用石墨烯制备量子化霍尔电阻阵列的尝试工作也已开展^[63-64],结果表明在外延石墨烯上大规模集成量子霍尔器件是可行的。NIST 报道了利用石墨烯开发量子霍尔电阻阵列的最新进展^[65],采用超导无交叉和多种联结技术并对石墨烯触点进行特殊处理,与标称电阻值的一致性达到 10^{-9} 量级,值得关注。

霍尔阵列器件的制备面临着多项挑战。首先,由于阵列器件是由多个霍尔棒串并联构成,因此要求 2DEG 具有良好的一致性和量子平台足够宽,以确保在相同的磁场下,所有霍尔棒都充分量子化。为实现各层之间连接的电隔离,电极触点和绝缘层的质量十分重要,制备过程中出现的缺陷可能会造成器件无法正常工作。目前,由于缺少计量领域的大量试验研究基础,仍旧缺少一个如何快速确定阵列标准工作状态良好的技术指南。

3 量子化霍尔电阻标准

随着 QHE 理论的发展和量子化霍尔电阻器件制备技术的进步,大量实验证明了 QHE 的普适性和良好的复现性,国际计量局推荐自 1990 年 1 月 1 日起使用 QHE 作为电阻标准,自此 QHE 被正式用于计量学中。一些国家级重点实验室相继建立量子化霍尔电阻标准,量子电阻标准不受外界环境干扰,具有高准确度、高稳定性和复现性良好等优点。应用之后比之前采用实物电阻标准的

稳定性和复现准确度提高了 2~3 个数量级^[66]。中国计量院紧跟国际前沿技术,在 2003 年建成了量子化霍尔电阻标准装置,标准装置的综合不确定度达到 2.4×10^{-10} ^[67],达到国际领先水平。采用量子基准和计算基准可以解决航天电测领域的多项难题^[68]。量子电阻标准和量子电压标准在 2019 年 5 月 20 日正式启用的新国际单位制 SI 中也发挥着重要的桥梁作用^[69]。

3.1 传统量子化霍尔电阻标准

传统量子化霍尔电阻标准采用 GaAs/AlGaAs 异质结作为量子霍尔电阻样品,其复现 QHE 需要约 10 T 的高磁场和 1.5 K 的低温环境,标准装置由量子电阻样品、液氮杜瓦、超导磁体和电阻传递电桥组成,图 9 给出了的示意图中包括样品、杜瓦和超导磁体及控制柜等部分。液氮为样品和超导磁体提供低温环境,也为常用的低温电流比较仪(CCC)电桥提供工作所需的低温。这样的标准装置,可以提供 10^{-9} 量级的不确定度,但是必需液氮才能运行,存在成本高、系统复杂等问题。

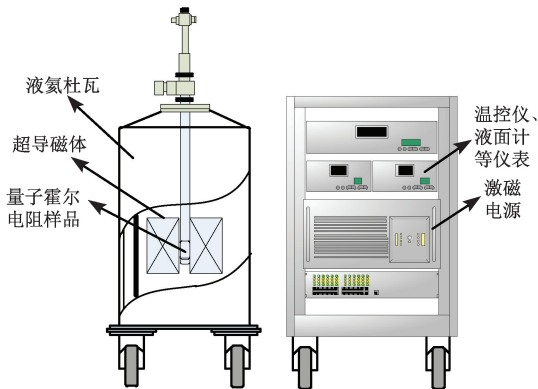


图 9 传统量子霍尔电阻标准示意图

Fig. 9 Schematic diagram of traditional quantum Hall resistance standard

解决上述问题的关键在于量子化霍尔电阻样品的制备,德国联邦物理技术研究院(PTB)利用改变砷化镓异质结中的间隔层来降低载流子浓度^[70],降低复现 QHE 对磁场强度的要求。加拿大国家研究委员会(NRC)利用所生产的砷化镓量子电阻样品,将 8 T 的磁体置于⁴He 的杜瓦中,配合直流电流比较仪(DCC)电桥,降低了标准装置的复杂程度^[71]。

3.2 免液氮量子化霍尔电阻标准

石墨烯能够在更高温度和更低磁场的环境复现 QHE,石墨烯为开发简单实用、成本更低的量子电阻标准带来了全新的方向。随着石墨烯制备和制冷技术的发展,近年来各国专家努力开发小型化免液氮量子霍尔电阻标准,并已经取得了较大的进展。基于石墨烯的免液氮量子化霍尔电阻标准示意图如图 10 所示,采用制冷机

提供石墨烯复现 QHE 所需的低温,提供强磁场的超导磁体体积也大幅缩小。

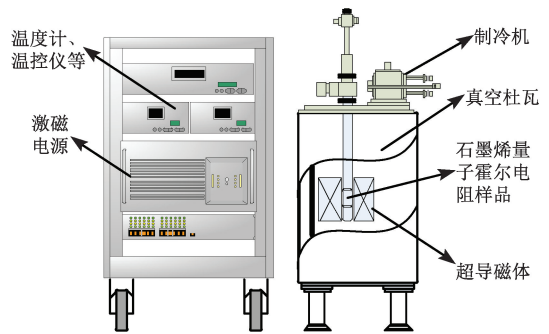


图 10 基于石墨烯的免液氮量子霍尔电阻标准示意图

Fig. 10 Schematic diagram of graphene-based cryo-free quantum Hall resistance standard

4 电阻传递装置

QHE 精确复现的电阻是非整数值,而利用量子化霍尔电阻基准校准的是阻值为十进制数值的实物电阻标准,为使实物电阻标准准确溯源至精确的量子霍尔电阻值,需要高准确度的电阻传递装置。经过多年的开发,计量专家设计了不同的电流比较仪式电阻传递电桥,电阻电桥正在向着准确度高、实用性强的方向发展,在量子化霍尔电阻的测量中发挥着重要作用。

4.1 DCC 电桥

1964 年,库斯特首次提出并实现 DCC 电桥^[74-75],其原理如图 11 所示,被比较的两只电阻分别置于主、从电流源回路中,从电流源跟踪主电流源,二者保持不变或同步变化,从而可以消除电流源稳定性对测量结果的影响。将原、副边线圈及检测线圈绕于一个高磁导率环形磁芯上,通过施加调制信号利用反馈回路调整从动电流源来获得磁通平衡即有 $I_p N_p = I_s N_s$,同时调整绕组的匝数比使得电压平衡即有 $I_p R_p = I_s R_s$,当磁通平衡和电压平衡同时满足时,可得到 $R_s = R_p N_s / N_p$,从而完成两只电阻阻值的比较。

DCC 电桥具有操作和维护简单等优点,目前商业化的量子化霍尔电阻标准测量装置大多采用此方法,标称可以达到 10^{-8} 量级的不确定度,但这种方法受到调制噪声的限制,漏磁通是影响测量准确度的主要原因^[76]。

4.2 CCC 电桥

1972 年哈维提出了 CCC 电桥的概念^[77],解决 DCC 电桥存在的漏磁通问题。CCC 电桥的基本原理如图 12 所示,两个绕组线圈置于处于超导态的屏蔽结构内,利用迈斯纳效应彻底消除磁泄漏,使用超导量子干涉器件(SQUID)检测两个绕组的磁通平衡,并进行反馈控制从

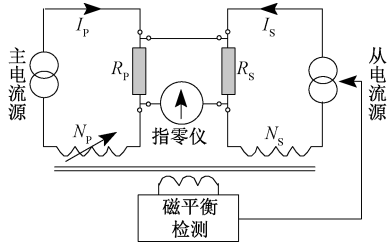


图 11 DCC 电桥原理

Fig. 11 Schematic diagram of DCC bridge

电流源,利用同时满足的电压平衡和磁通平衡,可以实现两只电阻的阻值比较。其中的超导屏蔽及其内部绕组线圈和 SQUID 都处于液氦制冷的 4.2 K 低温环境。

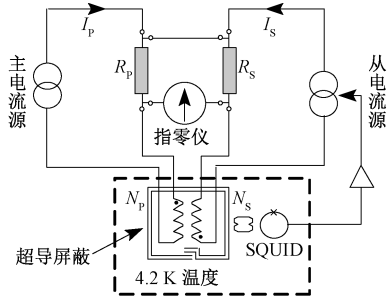


图 12 CCC 电桥原理

Fig. 12 Schematic diagram of CCC bridge

CCC 电桥具有高准确度和高灵敏度等优点,其测量不确定度可以达到 10^{-9} 量级。但是它对恒温实验室的电磁环境要求比较高,受干扰容易失锁,需要使用液氦,运行成本高,调试和应用比较复杂,在 20 世纪 90 年代中后期才开始在一些计量实验室进入实用阶段,目前在高精度量子化霍尔电阻测量中,大多采用 CCC^[78-80],CCC 电桥的数字化已经实现^[81-82]。

4.3 低频电流比较仪 (LFCC) 电桥

如前所述,DCC 电桥的灵敏度低,CCC 电桥灵敏度高但是需要液氦条件,为解决这两种电桥的问题,1991 年出现了可以在室温运行的 LFCC 电桥^[83-85]。其原理如图 13 所示,绕组 N_p 和 N_s 绕制在高磁导率磁芯上,检测绕组 N_d 检测磁平衡,外部进行电磁屏蔽。可调电容 C_r 调谐检测绕组的谐振频率,调谐电路两端的电压反馈控制从电流源。利用辅助绕组 N_φ 和 N_q 完成锁相和正交调节来平衡电桥。

LFCC 电桥利用屏蔽结构克服磁通泄漏,通过谐振技术发挥相敏检波的优势、提高磁通平衡的检测灵敏度。相比于直流测量,LFCC 电桥在 $1/f$ 噪声抑制、热电势消除、灵敏度提升等方面优势明显。BIPM 的 QHR 量传就是采用的这种 LFCC 电桥,代表着新一代电阻传递电桥的发展方向^[86]。

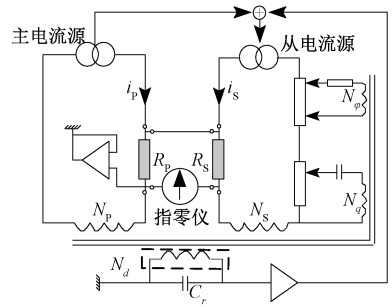


图 13 LFCC 电桥原理

Fig. 13 Schematic diagram of LFCC bridge

5 展 望

QHE 具有普适性和良好的复现性,其理论发展已经比较完备,多年来为电学计量提供了最高电阻标准。近年来石墨烯材料和器件制备技术逐渐成熟,基于石墨烯的新型量子电阻标准装置成为研究热点并得到迅速发展,因其具有成本低、操作简单等优点,被认为是新一代量子电阻标准,将促进电阻计量扁平化发展。量子化霍尔电阻阵列可以拓展量子电阻标准的阻值,提供整数阻值的量子化霍尔电阻,是量子霍尔电阻标准装置的重要发展方向。低频电流比较仪电桥可以在室温环境下运行,完成电阻值的高精度传递,代表着量子化霍尔电阻传递装置的发展方向。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陈颖健. 量子霍尔效应[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1993.
CHEN Y J. Quantum Hall Effect[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1993.
- [3] LAUGHLIN R B. Quantized Hall conductivity in two dimensions[J]. Physical Review B, 1981, 23(10): 5632-5633.
- [4] BÜTTIKER M. Absence of backscattering in the quantum Hall effect in multiprobe conductors[J]. Physical Review B, 1988, 38(14): 9375-9389.
- [5] NIU Q, THOULESS D J, WU Y S. Quantized Hall conductance as a topological invariant[J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1985, 31(6): 3372-3377.
- [6] THOULESS D J. Topological interpretations of quantum Hall conductance[J]. Journal of Mathematical Physics, 1994, 35(10): 5362-5372.
- [7] YENNIE D R. Integral quantum Hall effect for nonspecialists[J]. Review of Modern Physics, 1987,

- 59(3): 781-824.
- [8] HEHL F W, OBUKHOV Y N, ROSENOW B. Is the quantum Hall effect influenced by the gravitational field? [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 96804.
- [9] SCHOPFER F, POIRIER W. Testing universality of the quantum Hall effect by means of the Wheatstone bridge[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(5): 054903.
- [10] HARTLAND A, JONES K, WILLIAMS J M. Direct comparison of the quantized Hall resistance in gallium arsenide and silicon[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 66(8): 969-973.
- [11] JECKELMANN B, INGLIS A D, JEANNERET B. Material, device, and step independence of the quantized Hall resistance [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1995, 44 (2): 269-272.
- [12] JECKELMANN B, JEANNERET B, INGLIS D. High-precision measurements of the quantized Hall resistance; Experimental conditions for universality [J]. *Physical Review B*, 1997, 55(19): 13124-13134.
- [13] JECKELMANN B, RUFENACHT A, JEANNERET B, et al. Optimization of QHE-devices for metrological applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2001, 50(2): 218-222.
- [14] JANSSEN T J B M, FLETCHER N E, GOEBEL R, et al. Graphene, universality of the quantum Hall effect and redefinition of the SI system[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(9): 093026.
- [15] HARTLAND A. The quantum Hall effect and resistance standards[J]. *Metrologia*, 1992, 29(2): 175-190.
- [16] POIRIER W, DJORDJEVIC S, SCHOPFER F, et al. The ampere and the electrical units in the quantum era[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2019, 20: 92-128.
- [17] JUCKNISCHKE D, BUHLMANN H J, HOUDRÉ R, et al. Properties of alloyed AuGeNi-contacts on GaAs/AlGaAs heterostructures[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1991, 40(2): 228-230.
- [18] 钟源, 贺青, 钟青, 等. 用于量子化霍尔电阻标准的 GaAs/AlGaAs 异质结二维电子气结构[J]. *计量学报*, 2010, 31 (6): 543-546.
ZHONG Y, HE Q, ZHONG Q, et al. GaAs-AlGaAs heterostructures for quantized Hall resistance standard by the NIM [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2010, 31 (6): 543-546.
- [19] DELAHAYE F, JECKELMANN B. Revised technical guidelines for reliable dc measurements of the quantized Hall resistance [J]. *Metrologia*, 2003, 40 (5): 217-233.
- [20] 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.
- [21] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene[J]. *Nature Materials*, 2007, 6(3): 183-191.
- [22] NOVOSELOV K S, JIANG Z, ZHANG Y, et al. Room-temperature quantum Hall effect in graphene [J]. *Science*, 2007, 315(5817): 1379.
- [23] GIESBERS A J M, ZEITLER U, KATSNELSON M I, et al. Quantum-Hall activation gaps in graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(20): 206803.
- [24] 钟源, 贺青. 石墨烯在计量科学中的应用[J]. *计量学报*, 2011, 32(3): 285-288.
ZHONG Y, HE Q. Application of graphene in metrology[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2011, 32 (3): 285-288.
- [25] JANSSEN T J B M, TZALENCHUK A, LARA-AVILA S, et al. Quantum resistance metrology using graphene[J]. *Reports on Progress in Physics* 2013, 76(10): 104501.
- [26] GUIGNARD J, LEPRAT D, GLATTLI D C, et al. Quantum Hall effect in exfoliated graphene affected by charged impurities: Metrological measurements [J]. *Physical Review B*, 2012, 85(16): 165420.
- [27] WOSZCZYNA M, FRIEDEMANN M, GÖTZ M, et al. Precision quantization of Hall resistance in transferred graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(16): 164106.
- [28] LI X, CAI W, AN J, et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils[J]. *Science*, 2009, 324(5932): 1312-1314.
- [29] PETRONE N, DEAN C R, MERIC I, et al. Chemical vapor deposition-derived graphene with electrical performance of exfoliated graphene [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2751-2756.
- [30] LAFONT F, RIBEIRO-PALAU R, HAN Z, et al. Dissipative quantum Hall effect in polycrystalline CVD graphene [C]. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*. Rio de Janeiro: IEEE CPEM, 2014: 42-43.
- [31] WANG X, LI J, ZHONG Q, et al. Improvement of chemical vapor deposition graphene for quantum Hall resistance standards [C]. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*. Ottawa: IEEE CPEM, 2016.
- [32] 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): 965-972.
- [33] REAL M A, LASS E A, LIU F, et al. Graphene epitaxial growth on sic (0001) for resistance standards[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation &*

- Measurement, 2013, 62(6): 1454-1459.
- [34] TZALENCHUK A, LARA-AVILA S, KALABOUKHHOV A, et al. Towards a quantum resistance standard based on epitaxial graphene [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(3): 186-189.
- [35] ALEXANDER-WEBBER J A, BAKER A M R, JANSSEN T J B M, et al. Phase space for the breakdown of the quantum Hall effect in epitaxial graphene [J]. Physical Review Letters, 2013, 111(9): 096601.
- [36] JANSSEN T J B M, TZALENCHUK A, YAKIMOVA R, et al. Anomalously strong pinning of the filling factor $\nu=2$ in epitaxial graphene [J]. Physical Review B, 2011, 83(23): 233402.
- [37] 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.
- [38] JANSSEN T J B M, WILLIAMS J M, FLETCHER N E, et al. Precision comparison of the quantum Hall effect in graphene and gallium arsenide [J]. Metrologia, 2012, 49(3): 294-306.
- [39] OE T, RIGOSI F, KRUSKOPF M, et al. Comparison between NIST graphene and AIST GaAs quantized Hall devices [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3103-3108.
- [40] POIRIER W, SCHOPFER F, GUIGNARD J, et al. Application of the quantum Hall effect to resistance metrology [J]. Comptes Rendus Physique, 2011, 12(4): 347-368.
- [41] 蒲晓庆, 吴静, 闫旭. 基于石墨烯的量子化霍尔电阻研究综述[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(3): 25-30.
PU X Q, WU J, YAN X. Review of quantum Hall resistance using graphene [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(3): 25-30.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] HE H, KIM K H, DANILOV A, et al. Uniform doping of graphene close to the charge neutrality point by polymer-assisted spontaneous assembly of molecular dopants [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 3956.
- [46] 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.
- [47] NOVIKOV S, LEBEDEVA N, PIERZ K, et al. Fabrication and study of large-area QHE devices based on epitaxial graphene [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64(6): 1533-1538.
- [48] MATTIAS K, ELMQUIST R E. Epitaxial graphene for quantum resistance metrology [J]. Metrologia, 2018, 55(4): R27-R36.
- [49] YAGER T, LARTSEV A, CEDERGREN K, et al. Low contact resistance in epitaxial graphene devices for quantum metrology [J]. AIP Advances, 2015, 5(8): 087134.
- [50] 蒲晓庆, 吴静, 郭强, 等. 石墨烯与金属的欧姆接触理论研究[J]. 物理学报, 2018, 67(21): 362-367.
PU X Q, WU J, GUO Q, et al. Theoretical study on ohmic contact between graphene and metal electrode [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(21): 362-367.
- [51] YAGER T, LARTSEV A, YAKIMOVA R, et al. Wafer-scale homogeneity of transport properties in epitaxial graphene on SiC [J]. Carbon, 2015(87): 409-414.
- [52] RIGOSI A F, LIU C I, WU B Y, et al. Examining epitaxial graphene surface conductivity and quantum Hall device stability with parylene passivation [J]. Microelectronic Engineering, 2018, 194: 51-55.
- [53] RIGOSI A F, LIU C I, GLAVIN N R, et al. Electrical stabilization of surface resistivity in epitaxial graphene systems by amorphous boron nitride encapsulation [J]. ACS Omega, 2017, 2(5): 2326-2332.
- [54] SYPHERS D A, FANG F F, STILES P J. Multiple connected quantized resistance regions [J]. Surface Science, 1984, 142(1-3): 208-214.
- [55] DELAHAYE F. Series and parallel connection of multiterminal quantum Hall-effect devices [J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(11): 7914-7920.
- [56] ORTOLANO M, ABRATE M, CALLEGARO L. On the synthesis of quantum Hall array resistance standards [J]. Metrologia, 2013, 52(1): 31-39.
- [57] POIRIER W, BOUNOUH A, HAYASHI K, et al. $R_K/100$ and $R_K/200$ quantum Hall array resistance standards [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(5): 2844-2854.
- [58] POIRIER W, BOUNOUH A, PIQUEMAL F, et al. A new generation of QHARS: Discussion about the technical criteria for quantization [J]. Metrologia, 2004, 41(4): 285-294.
- [59] TAKEHIKO O, SUCHETA G, TARO I, et al.

- Development of 1 M Ω quantum Hall array resistance standards[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2016, 66(6): 1475-1481.
- [60] ZHONG Q, WANG X, LI J, et al. New design of decimal nominal value resistance based on quantum Hall array [C]. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements*. Rio de Janeiro: IEEE CPEM, 2014. 542-543.
- [61] 钟青, 王雪深, 李劲劲, 等. 1 k Ω 量子霍尔阵列电阻标准器件研制[J]. *物理学报*, 2016, 65(22): 275-280.
ZHONG Q, WANG X S, LI J J, et al. A 1 k Ω standard resistor device based on quantum Hall array[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(22): 275-280.
- [62] 蔡建臻, 黄晓钉, 潘攀. 新型量子霍尔电阻样品计量应用研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(4): 484-488.
CAI J Z, HUANG X D, PAN P. Research in measurement and application of new type quantum Hall resistance sample[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(4): 484-488.
- [63] LARTSEV A, LARA-AVILA S, DANILOV A, et al. A prototype of $R_K/200$ quantum Hall array resistance standard on epitaxial graphene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(4): 44506.
- [64] NOVIKOV S, LEBEDEVA N, HAEMAELAEINEN J, et al. Mini array of quantum Hall devices based on epitaxial graphene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, DOI: 10.1063/1.4948675.
- [65] 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.
- [66] 张钟华. 量子计量基准及 SI 基本单位的重新定义[J]. *电子测量与仪器学报*, 2007, 21(1):1-5.
ZHANG ZH H. Quantum measurement standards and redefinition of the SI unit[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2007, 21(1): 1-5.
- [67] 张钟华, 贺青, 李正坤, 等. 量子化霍尔电阻国家标准的研究[J]. *计量学报*, 2005, 26(2): 97-101.
ZHANG Z H, HE Q, LI ZH K, et al. A study on the national standard of quantum hall resistance[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2005, 26(2): 97-101.
- [68] 黄晓钉, 佟亚珍, 蔡建臻. 电学前沿计量技术在航天型号保障中的应用[J]. *宇航计测技术*, 2019, 39(2): 6-9.
HUANG X D, TONG Y ZH, CAI J ZH. Application of electro leading edge measurement technology in aerospace model service[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2019, 39(2): 6-9.
- [69] 刘民, 孙毅. 国际单位制的基本常数综述[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1): 1-9.
- LIU M, SUN Y. Review of elementary constants in international system of units[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(1): 1-9.
- [70] PIERZ K, SCHUMACHER B. Fabrication of quantum Hall devices for low magnetic fields [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1999, 48(2): 293-295.
- [71] INGLIS A D. A cheaper, simpler quantized Hall resistance standard [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1999, 48(2): 289-292.
- [72] 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.
- [73] RIGOSI A F, PANNA A R, PAYAGALA S U, et al. Graphene devices for tabletop and high-current quantized Hall resistance standards [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2019, 68(6): 1870-1878.
- [74] 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.
- [75] MACMARTIN M P, KUSTERS N L. A direct-current-comparator ratio bridge for four-terminal resistance measurements[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1966, 15(4):212-220.
- [76] 贺青. 改进量子化霍尔电阻标准计量特性的若干方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
HE Q. Study on ways to improve metrologic characteristics of quantumized Hall electric resistance reference [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [77] HARVEY I. K. A precise low temperature DC ratio transformer[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 1972, 43(11): 1626-1629.
- [78] 张钟华, 贺青. 低温电流比较仪介绍[J]. *电测与仪表*, 2000, 37(4): 9-11.
ZHANG ZH H, HE Q. Introduction of the cryogenic current comparator [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2000, 37(4): 9-11.
- [79] 鲁云峰, 赵建亭, 贺青, 等. 基于低温电流比较仪的微弱电流精密测量技术[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(12): 2812-2817.
LU Y F, ZHAO J T, HE Q, et al. Low current precision measurement technique based on cryogenic current comparator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(12): 2812-2817.

- [80] JECKELMANN B, JEANNERET B. The quantum Hall effect as an electrical resistance[J]. Reports on Progress in Physics, 2001, 64: 1602-1655.
- [81] SANCHEZ C A, WOOD B M, INGLIS A D. CCC Bridge with digitally-controlled current sources [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2009, 58(4): 1202-1205.
- [82] 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): 167-174.
- [83] DELAHAYE F M, BOURNAUD D. Low-noise measurements of the quantized hall resistance using an improved cryogenic current comparator bridge[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1991, 40(2): 237-240.
- [84] DELAHAYE F. An AC-bridge for low-frequency measurements of the quantized Hall resistance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1991, 40(6): 883-888.
- [85] DELAHAYE F, BOURNAUD D. Accurate AC measurement of standard resistors between 1 and 20 Hz[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1993, 42(2): 287-291.
- [86] SATRAPINSKI A, GÖTZ M, PESEL E, et al. New generation of low-frequency current comparators operated at room temperature[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2017, 66(6): 1417-1424.

作者简介



宋海龙, 分别在 1997 年、1999 年和 2003 年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士和博士学位, 现为北京航天科技发展有限公司技术总监, 主要研究方向为量子计量、电磁学计量等。

E-mail: sh_hit@sina.com

Song Hailong received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 1997, 1999, and 2003, respectively. Now he is Technical Director in Beijing Hang Tian He Science Technology Development Co., Ltd. His main research interests include quantum metrology and electric-magnetic metrology, etc.

孙毅, 2005 年于北京邮电大学获得学士学位, 2013 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 现为北京东方计量测试研究所科研生产处处长, 主要研究方向为量子计量、空间计量、电磁学计量、航天器地面测试设备等。

E-mail: service@cast514.com



Sun Yi received his B. Sc. degree from Beijing University of Post and Telecommunication in 2005, M. Sc. degree from Beihang University in 2013. Now he is a director of scientific research and production department at Beijing Orient Institute of Measurement and Test. His main research interests include quantum metrology, space metrology, electric-magnetic metrology, and spacecraft ground testing equipment, etc.



于琨, 1997 年毕业于北京理工大学, 现为北京航天科技发展有限公司总经理, 主要研究方向为电磁计量产品开发。

E-mail: ym13601185114@163.com

Yu Min graduate from Beijing Institute of Technology in 1997, now he is President of Beijing Hang Tian He Science Technology Development Co., Ltd. His main research interest includes development of electric-magnetic metrology products.



何家伟, 2012 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为北京东方计量测试研究所工程师, 主要研究方向为电磁计量与量子计量等。

E-mail: hjwcast514@sina.com

He Jiawei received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2012. Now he is an Engineer in Beijing Orient Institute of Measurement and Test. His main research interests include electric-magnetic metrology and quantum metrology etc.



赵全, 2008 年于中北大学获得学士学位, 2018 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 现为北京东方计量测试研究所工程师, 主要研究方向为量子计量和电磁学计量等。

E-mail: zhaoquan@cast514.com

Zhao Quan received his B. Sc. degree from North University of China in 2008, M. Sc. degree from Beihang University in 2018. Now he is an Engineer in Beijing Orient Institute of Measurement and Test. His main research interests include quantum metrology and electric-magnetic metrology etc.



黄晓钉, 现为北京东方计量测试研究所研究员, 主要研究方向为电学计量和量子测量技术。

E-mail: huangxiaoding1@sina.com

Huang Xiaoding is a professor in Beijing Orient Institute of Measurement and Test. His main research interests include electrical metrology and quantum metrology.