



二维系统研究中的无电极输运方法

赵利利 吴蒙蒙 林文璐 刘阳

Contactless transport method of two-dimensional electron system studies

Zhao Li-Li Wu Meng-Meng Lin Wen-Lu Liu Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 127303 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220246

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220246>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声子晶体中的表面声波赝自旋模式和拓扑保护声传输

Pseudospin modes of surface acoustic wave and topologically protected sound transmission in phononic crystal

物理学报. 2019, 68(22): 227805 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191363>

IV–VI族化合物半导体异质结二维电子气研究进展

Recent progress on IV–VI compound semiconductor heterojunction two-dimensional electron gas

物理学报. 2019, 68(16): 166801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191074>

活性剂对表面声波作用下薄液膜铺展的影响

Effect of surfactants on thin film spreading under influence of surface acoustic wave

物理学报. 2019, 68(21): 214703 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190791>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管中二维电子气的极化光学声子散射

Polar optical phonon scattering of two-dimensional electron gas in AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2020, 69(15): 157303 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200250>

InAlN/GaN异质结二维电子气波函数的变分法研究

Variational study of the 2DEG wave function in InAlN/GaN heterostructures

物理学报. 2018, 67(2): 027303 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171827>

高超声速模型尾迹电子密度二维分布反演方法

Inversion method of two-dimensional distribution of electron density in hypersonic model wake

物理学报. 2022, 71(11): 115202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212345>

专题: 低维材料的新奇物性

二维系统研究中的无电极输运方法*

赵利利 吴蒙蒙 林文璐 刘阳†

(北京大学物理学院, 量子材料科学中心, 北京 100871)

(2022年2月8日收到; 2022年3月15日收到修改稿)

介绍了两种极低温环境下无接触电极输运的测量方法——电容测量和表面声波测量. 两种方法通过高频电场与电子的相互作用来研究量子系统体态的物理特性. 首先介绍了在极低温下通过高精度电容测量研究高质量二维电子气特性的初步结果. 实验装置具备在 10 mK—300 K, 0—14 T 环境中对小于 1 pF 的电容实现 0.05% 以上分辨率的能力. 还介绍了利用表面声波研究二维电子系统的结果, 可以在 0.1 nW 的输入激励下获得小于 10^{-5} 的灵敏度. 这些测量手段在研究二维系统尤其是无法制作高质量接触电极的材料中具有广泛的应用前景.

关键词: 二维电子气, 量子霍尔效应, 电容, 表面声波**PACS:** 73.20.Mf, 73.43.Lp, 73.43.Nq**DOI:** 10.7498/aps.71.20220246

1 引言

电阻测量是研究二维系统的物理性质常用的方法, 测量的激励信号一般使用准直流的频率 (约 10 Hz). 这种测量方法关注量子系统稳态的传输特性. 常见的微波测量, 如微波共振峰测量 (microwave resonances)^[1] 和微波诱导电阻振荡 (microwave-induced resistance oscillations, MIRO)^[2] 测量等, 通过施加与激发能 Δ 相当的微波 (约 10 GHz), 研究辐射作用下量子系统的激发态. 而当激励频率介于两者之间时, 可以研究体系的动态性质. 这种测量方法利用间接接触二维系统以通过电子与高频电场的相互作用来研究体系的局域特性, 排除了接触电极和边缘效应带来的影响, 使得物理现象更为简洁和清晰. 在实验中, 通过顶栅电极产生的交流电场或在极性材料中通过声波产生的压电效应均可以实现这一类的无接触电极测量.

电容测量是物理研究中一种极为实用的表征材料和器件特性的技术. 在量子系统中, 宏观量子

态的变化会引起载流子态密度和化学势的改变. 这些量子效应所引起的等效电容称为量子电容. 通过测量量子电容随磁场、载流子浓度等的变化可以研究量子相变等物理现象. 相比于传统的输运测量, 量子电容测量能够直接探测到量子系统的压缩率等信息, 同时该方法可以集中关注体系内局部区域内的载流子特性, 使得测量结果的量子效应更明显, 对量子态的探测灵敏度更高. 除了量子电容测量之外, 还可以利用载流子与表面声波产生的压电场之间的相互作用来研究系统的压缩率、电导率等特性. 在这两种测量中, 通过合理地设计器件结构, 电子在测量过程中都只在量子体系内移动. 这两种方法都是广义的、无需接触电极的输运测量方法, 在二维体系研究中有丰富的应用前景.

2 电容测量

2.1 测量原理

能够在强磁场环境中, 在极低温到室温范围内进行精确电容测量的技术对物理科学研究具有非

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFA0308403) 和国家自然科学基金 (批准号: 92065104, 12074010) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyang02@pku.edu.cn

常高的价值. 利用电容测量可以实现对材料应力应变、热膨胀系数和弹性模量等力学信号的测量. 宏观量子态对带电粒子态密度的调制会引出器件的一个等效电容, 即量子电容. 相比于传统的输运测量, 量子电容仅与介观量子态在待测区域内的性质有关, 基本排除了电接触等干扰因素的影响; 电容测量无需接触样品边界, 能够测量非边缘效应; 量子电容测量还能够直接探测到不参与导电的载流子, 可以用于研究诸如 Wigner 晶体等量子态的特性. 这种局域化的测量相比于传统输运测量更加灵敏, 更容易探测到量子态的形成. 高精度量子电容的测量结果可以用于分析待测区域内载流子费米能级附近的态密度变化, 从而用于研究待测系统中的能级精细结构. 而且由于电容测量的局域性和高灵敏度, 可以用于研究常规输运测量中无法观测的量子态特性.

相比于其他电容测量, 用于研究载流子中量子现象的量子电容测量要困难得多. 一方面, 高质量二维材料样品面积通常很小 (约 $100 \mu\text{m}^2$), 样品总电容值可能小至数十 fF, 而且量子效应引起的电容变化通常约为总电容的 1% 量级. 另一方面, 待测电容样品需要处于低温设备中, 依靠数米长的连接线与处于室温端的测量仪器连接. 连接线有大约 100 pF 的寄生电容存在, 大大增加了测量难度. 除此之外, 最重要的难点在于研究载流子的量子特性时, 测量信号不能影响系统本身的性质, 因此必须使用 $\lesssim \text{mV}$ 的测量激励. 1992 年, 贝尔实验室的 Ashoori 等^[3] 开发出基于低温前级放大器的电容测量方案, 实现了在极低温强磁场环境中对 fF 量级电容的精确测量. 尽管截止到现在, 世界范围内仅有极个别课题组能够进行此类测量, 但是在该方向已有大量高价值的发现^[3–17].

2.2 实验装置

不同于 Ashoori 等的设计, 本文采取的设计思路是在低温端利用无源器件构造电桥, 同时将测量频率提高至 10—100 MHz, 并采用射频分布式电路设计思路将电桥信号耦合到室温, 之后利用实验室自行研制的射频锁相放大器精确地测量电桥输出信号的幅度和相位. 与依赖于低温前级放大器的设计相比, 本文采用的技术方案在低温端的功率消耗仅有约 10 nW, 几乎不会影响样品温度. 而且样品从极低温到室温的变温过程中也无需任何标定,

可以从室温到极低温连续测量样品的电容变化, 研究体系中温度引起的相变^[18,19].

如图 1(a) 所示, 电容测量通过一个低温端的无源电桥实现. 电桥包括样品电容 C_{DUT} 、参考电容 C_r 、参考电阻 R_r 和配平电阻 R_h . R_h 为高迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 的沟道电阻, 通过调节栅极电压可以改变沟道电阻大小, HEMT 可以在低温下正常工作. 信号源产生的高频激励信号通过变压器和隔离电容生成电桥的差分输入信号并耦合到 $V_{\text{IN}+}$ 和 $V_{\text{IN}-}$ 端口, 电桥的输出电压信号 V_{OUT} 由同轴线连接到室温端并通过变压器耦合到室温前级放大器中. 测量时选择相对更高的激励频率 (10—100 MHz) 以取得精度和时间上的平衡. 我们自行设计了基于超外差技术的射频锁相放大器以获得 V_{OUT} 的幅度及其相对于 V_{IN} ($V_{\text{IN}} = V_{\text{IN}+} - V_{\text{IN}-}$) 的相位差. 如图 1(b) 所示, 测量中改变调节配平电阻 R_h 的阻值, 并利用电桥输出 V_{OUT} 的幅度和相位将其分解为 V_X 和 V_Y 两个正交分量. V_X 对应了电桥输出, 而 $V_X = 0$ 则对应了电桥平衡点. 通过平衡关系 $C_{\text{DUT}}/C_r = R_r/R_h$ 可计算出待测电容 C_{DUT} . 在平衡点附近, $V_X \propto \kappa = R_h/(R_h + R_r)$, 定义灵敏度 $S = \partial V_X/\partial \kappa$, 并利用电桥的对偶关系 $S = C_{\text{DUT}}/(C_{\text{DUT}} + C_r)$ 推导出待测电容值. 而 V_Y 几乎不随 $\kappa = R_h/(R_h + R_r)$ 的变化而变化, 主要是由于信号线路间电容耦合引起的干扰输出, 同时也包含了样品电容中的串联寄生电阻分量.

文献 [20] 采用了基于低温放大器的电容测量方案, 在测量约 300 fF 的电容时实现了 $1.7 \text{ fF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率. 由于低温放大器的热功耗, 稀释制冷机 (Triton 200) 的温度由 15 mK 上升至 50 mK. 本文的测量装置使用无源电桥法^[18,19], 在 1 mV 的输入激励下, 测量约 500 fF 的电容可实现 $220 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率. 并且无源电桥法能够工作在稀释制冷机 (Triton 400) 的基准温度 ($< 10 \text{ mK}$). 该实验装置稳定度可以保持在 72 h 仅产生不到千分之一的变化, 在经过仔细标定之后可以测量电容绝对值. 其次, 无源电桥法通过原位测量电桥中的电阻能够对温度和磁场的影响进行精确修正, 利用实时测量结果直接计算得出待测电容值. 而低温放大器的增益很容易受到温度和频率的影响, 因此基于低温放大器的电容测量方案不适于进行连续变温和变频实验.

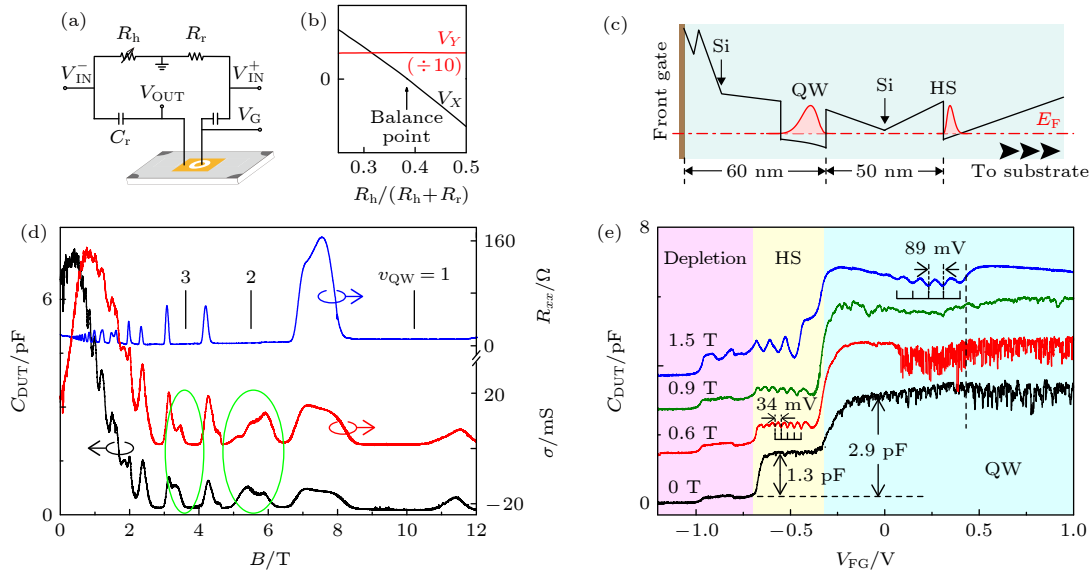


图 1 利用电容测量研究二维电子系统 (a) 测量使用的无源电桥和待测样品结构示意图; (b) 电桥输出随电阻臂电阻比例的变化; (c) 测量中使用的 GaAs/AlGaAs 异质结样品结构, 样品中包含两层二维电子气, 分别位于量子阱 (QW) 和缓冲层的异质结界面 (HS) 处; (d) 常规输运得到的纵向电阻 R_{xx} (蓝色)、由电容测量方法得到的电容 C_{DUT} (黑色) 和电导 σ (红色) 随磁场变化的曲线; (e) 电容随顶栅栅压 V_{FG} 的变化展示了多平台结构, 分别对应于耗尽状态、异质结填充和量子阱填充的状态

Fig. 1. Studying the high-mobility two-dimensional electron gas via capacitance measurement: (a) Schematic diagram of passive bridge and sample geometry. (b) The bridge output varies with the resistance ratio of the resistance arm. (c) The GaAs/AlGaAs heterostructure. The sample contains two layers of two-dimensional electron gas, which locate at the heterojunction interface (HS) of the buffer layer and the quantum well (QW), respectively. (d) The longitudinal resistance R_{xx} (blue) obtained by conventional transport measurement, the capacitance C_{DUT} (black) and the conductance σ (red) obtained by capacitance measurement. (e) The capacitance versus the top gate voltage V_{FG} shows multi-plateau corresponding to the state of depletion, heterojunction filling and quantum well filling, respectively.

2.3 实验结果

图 1 利用一个具体的样品测量介绍了高精度电容测量在研究二维电子系统中的应用. 在稀释制冷机 (Triton 400) 中, 我们安装了低损耗高频测量线路, 并自行设计样品座. 改装后制冷机的基准温度基本不变 (约 10 mK). 测试中使用的 GaAs/AlGaAs 半导体异质结样品结构如图 1(c) 所示. 样品由分子束外延方式在 GaAs 衬底上生长了总厚度 110 nm 的 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 的三明治结构, 其中 20 nm 宽的 GaAs 量子阱 (quantum well, QW) 在距离样品表面约 60 nm 深处, 在量子阱两侧各有两个 δ -掺杂层. 在衬底缓冲层和三明治结构的界面处也形成了一个异质结结构 (heterostructure, HS), 其中也形成了高质量的二维电子气. 实验中使用了 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的样品, 在 4 个角上利用 InSn 退火制作了欧姆接触电极. 在样品中央蒸镀 Ti/Au 制作了同心圆形状的顶栅, 内外半径分别为 60 和 80 μm . 在实验中测量两个顶栅之间的电容, 如图 1(a) 所示. 测量中, 利用一个串联电容

可以在其中一个顶栅上施加直流偏置电压 V_{FG} 来调节该顶栅之下的二维电子气浓度. 需要强调的是, 样品 4 个角上的欧姆接触主要用于保护二维电子气以及利用 V_{FG} 调节电子浓度, 电容测量中的电子充放电过程无需经过这些电极. 测量的结果完全取决于二维电子气内部的电学性质而不包括边缘重构引起的干扰.

利用高精度的电容测量方法能够获取比常规输运更完整的器件信息. 图 1(d) 中蓝色曲线是通过样品 4 个角上的接触电极利用低频锁相技术使用恒流法测量得到的准直流输运结果 (约 17 Hz). 当量子阱中的二维电子系统的朗道能级填充因子等于整数时, R_{xx} 出现了零电阻平台, 代表发生了整数量子霍尔效应. 图 1(d) 中黑色曲线是利用本文方法测量得到的电容随磁场变化的结果. 从该曲线上首先观察到的是在 $B \geq 0.5 \text{ T}$ 磁场下电容随磁场增大而快速减小. 这一变化是由于当电子的散射时间 τ 与磁回旋频率 $\omega_c = eB/m^*$ 相当时 ($\omega_c \tau \gtrsim 1$), 二维电子系统的电导率下降, 从而引起器件的等

效电容下降. 利用这一特性可以估算得到电子的散射时间 $\tau \approx 0.8$ ps, 对应的迁移率 $\mu \approx e\tau/m^* \approx 2 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. 测量电容的同时也可以从电桥输出的 V_Y 分量中得到介于两个顶栅之间环形区域中二维电子气的电导, 如图 1(d) 中红色曲线所示. 在零磁场条件下 $\sigma \approx 20$ mS, 可以得到量子阱中二维电子气的迁移率约为 $\mu \approx 2 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 与前面分析电容的结果相当. 需要说明的是, 图 1(c) 所示样品包含两层平行的二维电子系统, 利用传统的输运方法几乎无法可靠地获取量子阱中二维电子气的迁移率信息. 图 1(d) 中的电容和电导曲线还包含了更多的有效信息. 在常规输运测量中几乎只能观测到量子阱中二维电子气整数量子霍尔效应的零电阻平台, 在电容测量信号中, 还能观察到由异质结中二维电子气所引起的信号, 即图 1(d) 中绿色方框中所示特征. 这是由于量子阱中二维电子气处于绝层的整数量子霍尔效应, 无法屏蔽顶栅电场, 从而使异质结中的二维电子气被观测到.

在电桥中引入一个串联的隔直电容, 可以在某一个顶栅上引入直流偏置 V_{FG} 改变该顶栅下方的二维电子气浓度. 利用电容随该偏置电压的变化可以获得更多的信息, 如图 1(e) 所示. 当 $B = 0$ T 时, 如图 1(e) 中黑色曲线所示, 在 $V_{\text{FG}} \lesssim -0.7$ V 时, 电容值几乎等于零, 这时表明量子阱和异质结中的二维电子气都被排空 (图 1(e) 中标注 Depletion 的区域). 当 V_{FG} 升高时, 异质结处的二维电子气开始形成, 结果中出现了一个高度约为 1.3 pF 的电容平台. 进一步提高 V_{FG} , 电容出现了第二个高度约 2.9 pF 的平台, 对应于量子阱中出现的二维电子气. 利用这两个平台高度的比值以及异质结中电子的等效位置在界面偏右约 10 nm 位置, 可以得到量子阱中电子的分布中心位于量子阱中心偏右约 3—4 nm 的位置, 与仿真计算结果相符合. 并且可以看到两个平台随 V_{FG} 变大略有增加, 对应了二维电子气浓度增加的过程中电子分布中心会逐步靠近样品表面. 当样品放置于磁场中时, 平台区域的电容出现了随磁场的振荡. 这个振荡周期与样品电导率的振荡都来自于二维电子系统费米面的振荡. 图 1(e) 中非零磁场的曲线在第二个平台处随磁场增加电容会略有减小, 这可能是因为散射时间 τ 随浓度增加略有增加, 使得测量得到的电容值有所下降. 这一电容下降的趋势在 $V_{\text{FG}} \approx 0.5$ V 附近出现了拐点, 对应了量子阱中二维电子气的第二个量子

阱束缚能级被填充时引起的费米面态密度变化. 图 1(e) 中在低磁场下电容测量在正向 V_{FG} 时有很大的抖动, 这主要是由样品表面有微弱导电性引起的. 而在负向大偏压时的耗尽区有微弱的电容响应, 可能是由于样品电子浓度不均匀导致局部有残余电子.

综上所述, 实验中可以利用高精度电容测量方法获取很多利用常规输运测量难以获取的二维系统细节信息. 这种测量方法电子无需通过边缘或接触电极离开系统, 因此对高质量电极的依赖性很低, 有更强的材料适用性. 在接下来的实验中还需要通过更进一步的测量和更细致的分析来理解测量得到的结果.

3 表面声波测量

电容测量利用两个顶栅施加交变电场, 测量电子在该电场作用下的输运性质. 而在具有压电效应的材料中, 如 GaAs 等, 也可以利用表面声波 (surface acoustic waves, SAWs) 产生压电场, 并通过测量电子对声波的吸收和延时作用实现无接触电极的输运测量. 表面声波是一种振幅随深入表面深度指数衰减的弹性波, 通常它只能在表面 10 μm 厚度内传播. 可以利用图 2(a) 和图 2(b) 所示的样品结构, 通过对表面声波的衰减和传播速度进行测量, 来探究电子被表面声波通过压电效应产生的周期性电场驱动的性质, 并借此研究二维电子系统中出现的不同的量子态^[21,22]. 利用第 2 节提到的射频锁相测量装置可以对小于 -115 dBm (约 3.2 fW) 微弱信号的幅度和相位进行精确测量, 从而实现在 -70 dBm (约 0.1 nW) 输入激励下对表面声波波速实现 $<10^{-5}$ 精度的测量. 实验中分别各采用 75 对 20 μm 周期的叉指电极用于表面声波的发射和接收. 图 2(c) 给出了测量该器件得到的幅频和相频特性曲线. 可以看出, 测量得到表面声波中心频率约 144.8 MHz, 带宽约 2 MHz. 通带内从发射到接收的传输效率 S_{21} 约 -45 dB, 阻带抑制比约 10 dB. 根据相频特性的斜率可以得到表面声波的相速度约 2800 m/s.

图 2(d) 给出了利用表面声波研究超高迁移率二维电子气样品的初步结果. 样品浓度 $n \approx 2.08 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$, 迁移率 $\mu \approx 1.3 \times 10^3 \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$. 测量中使用 -70 dBm 的输入射频信号. 需要说明的是,

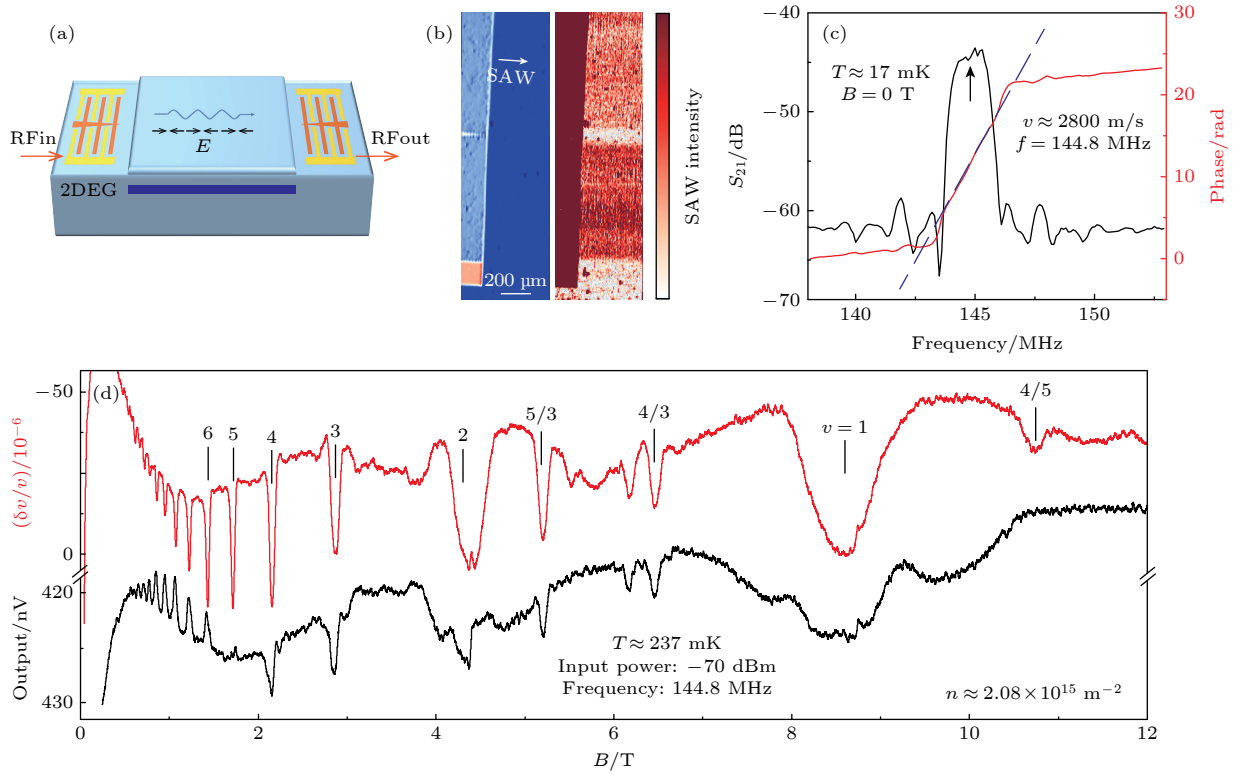


图 2 表面声波原理及测量结果 (a) 测量的样品结构, 通过湿法刻蚀去除叉指电极附近的二维电子气, 刻蚀深度足够浅而不会影响表面声波传播; (b) 利用光学方法测量得到的表面声波电极和表面声波强度分布; (c) 在 17 mK 测量得到的表面声波器件的幅频以及相频特性, 利用相频特性曲线斜率可以得到测量延迟并推导出声波波速约 2800 m/s; (d) 表面声波测量得到的声波幅度和声速随磁场的变化. 在强磁场中, 当二维电子气出现量子霍尔效应时声波幅度增加, 波速会加快

Fig. 2. SAW measurement setup and results: (a) The sample structure. We remove the two-dimensional electron gas near the cross-finger electrodes by wet etching. The etching depth is shallow enough without affecting SAW propagation. (b) SAW intensity distribution measured by optical method. (c) Amplitude and phase of device measured at 17 mK. The SAW velocity is about 2800 m/s deduced from the slope of the phase vs. frequency dependence. (d) The amplitude and velocity of SAW measured with the magnetic field. At high magnetic field, the amplitude and the velocity of SAW increase when the quantum Hall effect occurs in the two-dimensional electron gas.

-70 dBm 的输入信号完全不会引起位于稀释式制冷机中的样品的温度变化, 测量温度可以低至约 10 mK. 输入信号中仅有一小部分被转换成表面声波信号, 接收叉指拾获的信号约 -115 dBm. 图 2(d) 表明利用我们自行设计的射频锁相放大器可以以极高的信噪比准确地测量这一微弱信号的幅度和相位变化. 当二维电子气形成不可压缩的量子霍尔态时, 电子与声波压电场之间的相互作用会显著减弱, 接收电极的输出信号会变大. 根据因果系统的 Kramas-Kronig 关系, 声波衰减的变化也会伴随着声波传播速度的变化: 电声耦合减弱的时候衰减也会减少 (信号幅度会增加), 而传播速度则会相应增加. 在通常情况下, 相位变化能够更灵敏地反映电声耦合的强度. 图 2(d) 给出了在 237 mK 温度下测量得到的相位变化. 首先可以注意到, 当二维电子气形成量子霍尔效应时声波速度会增加, 从而在

图 2(d) 中表现为一个极小值. 图 2(d) 采用了较高的测量温度以增加电子对声波的响应速度, 减小强磁场下电子局域化对测量的影响.

4 结 论

本文介绍了两种非常规的输运测量手段——电容测量和表面声波测量. 利用高精度电容测量和表面声波可以研究高频电场与二维体系的相互作用, 从而探究不同量子态的演变规律. 与传统输运相比, 由于两者都关注二维系统体态的变化, 从而可以排除样品边缘态的干扰; 无需接触电极而是通过电场与电子相互作用实现测量, 避免了接触电阻的影响. 对于一些由于功函数失配等因素导致很难制作高质量接触电极的二维材料, 使用无需接触电极的测量手段将会更加简单和有效.

感谢南京大学现代工程与应用科学学院的樊星博士和芦红教授, 普林斯顿大学的 Y. J. Chung 和 L. N. Pfeiffer 提供的二维电子气样品及讨论。

参考文献

- [1] Chen Y, Lewis R M, Engel L W, Tsui D C, Ye P D, Pfeiffer L N, West K W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 016801
- [2] Zudov M A, Du R R, Simmons J A, Reno J L 2001 *Phys. Rev. B* **64** 201311
- [3] Ashoori R C, Stormer H L, Weiner J S, Pfeiffer L N, Pearton S J, Baldwin K W, West K W 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 3088
- [4] Kaplit M, Zemel J N 1968 *Phys. Rev. Lett.* **21** 212
- [5] Voshchenkov A M, Zemel J N 1974 *Phys. Rev. B* **9** 4410
- [6] Smith T P, Goldberg B B, Stiles P J, Heiblum M 1985 *Phys. Rev. B* **32** 2696
- [7] Mosser V, Weiss D, Klitzing K, Ploog K, Weimann G 1986 *Solid State Commun.* **58** 5
- [8] Smith T P, Wang W I, Stiles P J 1986 *Phys. Rev. B* **34** 2995
- [9] Yang M J, Yang C H, Bennett B R, Shanabrook B V 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 4613
- [10] Eisenstein J P, Pfeiffer L N, West K W 1994 *Phys. Rev. B* **50** 1760
- [11] Zibrov A A, Kometter C, Zhou H, Spanton E M, Taniguchi T, Watanabe K, Zaletel M P, Young A F 2017 *Nature* **549** 360
- [12] Irie H, Akiho T, Muraki K 2019 *Appl. Phys. Express* **12** 063004
- [13] Eisenstein J P, Pfeiffer L N, West K W 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 674
- [14] Deng H, Pfeiffer L N, West K W, Baldwin K W, Engel L W, Shayegan M 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 116601
- [15] Jo J, Garcia E A, Abkemeier K M, Santos M B, Shayegan M 1993 *Phys. Rev. B* **47** 4056
- [16] Zibrov A A, Rao P, Kometter C, et al. 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 167601
- [17] Tomarken S L, Cao Y, Demir A, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 046601
- [18] Zhao L, Lin W, Fan X, Song Y, Lu H, Liu Y 2022 *Rev. Sci. Instrum.* **93** 053910
- [19] Zhao L, Lin W, Chung Y J, Baldwin K W, Pfeiffer L N, Liu Y 2022 arXiv: 2201.06203 [cond-mat.mes-hall]
- [20] Verbiest G J, Janssen H, Xu D 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 084706
- [21] Willett R L, Paalanan M A, Ruel R R, West K W, Pfeiffer L N, Bishop D J 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 112
- [22] Friess B, Peng Y, Rosenow B, von Oppen F, Umansky V, von Klitzing K, Smet J H 2017 *Nat. Phys.* **13** 1124

SPECIAL TOPIC—Novel properties of low-dimensional materials

Contactless transport method of two-dimensional electron system studies*

Zhao Li-Li Wu Meng-Meng Lin Wen-Lu Liu Yang[†]

(International Center for Quantum Materials, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 8 February 2022; revised manuscript received 15 March 2022)

Abstract

We introduce two contactless measurement methods at extremely low temperature: capacitances and surface acoustic waves. Both methods can be used to study the physical properties of the quantum system through the interaction between electrons and high frequency electric field. We first present preliminary results of high-mobility two-dimensional electron systems studied by a high-precision capacitance measurement method at extremely low temperature. Our setup can resolve $< 0.05\%$ variation of a < 1 pF capacitance at 10 mK–300 K and 0–14 T. Second, we also study two-dimensional electron systems using surface acoustic waves. We can use 0.1 nW excitation and obtain $< 10^{-5}$ sensitivity. These measurement methods may be widely applied to the study of two-dimensional systems, especially the materials without high quality contacts.

Keywords: two-dimensional electron systems, quantum hall effect, capacitance, surface acoustic wave

PACS: 73.20.Mf, 73.43.Lp, 73.43.Nq

DOI: 10.7498/aps.71.20220246

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFA0308403) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 92065104, 12074010).

[†] Corresponding author. E-mail: liuyang02@pku.edu.cn