

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.05.017

量子点接触中的动态量子输运

王萍, 岳晓凯, 于白茹

(四川大学物理学院, 成都 610064)

摘要: 实验测量量子点接触结构的动态量子输运. 观察到导纳的实部和虚部都出现明显的台阶, 为负值的虚部反应了器件的电感性响应的特性. 但是零磁场条件下的导纳平台有波动, 这是背散射导致的结果. 外加磁场可以有效地抑制背散射, 改善平台的平整程度, 实验观察到当磁场为 0.3 T 左右时就可以得到比较理想的平台. 当磁场进一步增大时, 可以观察到磁耗散效应, 并且由此可以估算器件的零磁量子能带的间距.

关键词: 量子点接触; 动态输运; 背散射; 磁耗散

中图分类号: O562.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)05-0903-06

Dynamical transport measurements of a quantum point contact

WANG Ping, YUE Xiao-Kai, YU Bai-Ru

(College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: We report the experimental measurements of dynamic quantum transport in a quantum point contact structure. Both the real and the imaginary parts of the admittance show significant steps, and the imaginary parts of the admittance reflect the inductive response of the time-dependent oscillating voltage. However, the plateaus around zero magnetic field are not perfect flat due to backscattering. The external magnetic field can effectively suppress backscattering and improve the quantity of the quantized steps. The flatter plateaus are observed when the magnetic field extends to 0.3 T. Continuing to increase the magnetic field, the magnetic depletion effect will play role, and thus the sub-band spacing of the zero magnetic field can be estimated.

Keywords: Quantum point contact; Dynamical transport; Backscattering; Magnetic depletion effect

1 引言

1988年首次在实验上观察到量子点接触 QPC (quantum point contact) 中的电导量子化^[1], 使得量子点接触的输运性质的研究成为凝聚态物理的一大热点. 同时, 量子点接触作为实现量子线^[2-3]和量子点^[4-5]等结构的基础, 更加成为实验和理论研究的重点. 随着分子束外延、电子束刻蚀等技术的进步, 使得电子的迁移率有大幅提高

($10^7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). 这给实验研究光激发零电阻态^[6]以及弱磁场、高填充因子条件下的低能光子诱导的 $1/4$ 循环移位磁阻^[7]等提供了可能. 同时此类材料在没有光辐射的输运性质依然吸引着很多的实验研究^[8]. 这是由于在弱磁场情况下, 巨磁阻以及在零磁场附近小而窄的负磁阻峰^[8]等现象可以研究电子的去相位相干机制, 得到电子的相位相干长度, 是可以反映系统重要性质的物理量.

收稿日期: 2018-12-05

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFF0200403); 国家自然科学基金重点项目(11234009)

作者简介: 王萍(1992-), 女, 达州市人, 硕士生, 研究方向为介观与低维物理.

通讯作者: 于白茹. E-mail: yubrscu@126.com

在量子信息^[9]和量子计算机^[10]广阔应用价值的指引下,动态运输的性质相比于直流运输显得更加重要.早在 19 世纪,就有许多关于介观电路的动态运输的理论研究^[12-13].随着测量手段和测量精度的不断提高,最近有不少理论预言在实验上得到证实.比如 RC 介观电路中的电荷弛豫电阻^[14],RL 介观电路的特征时间是电子通过电路的渡越时间^[15].这些和经典宏观电路不同的现象都是量子效应的体现.

在理论上,Büttiker 对 QPC 结构的动态电导进行了研究^[12].当第一个通道打开后,始终为负值的虚部是电子的动态电感响应的标志.最近,Gabelli 等人^[14]通过 Hall bar 和 QPC 的串联,在实验上实现了介观的量子 RL 电路,并且验证了之前的理论.紧接着 Hohls 等人^[16]对 QPC 结构的导纳进行了进一步测量,通过直流和交流运输的对比,得到如下的结果:导纳的实部和直流电导的结果一致,导纳的虚部随频率线性增加,而且虚部平台之间的高度随频率的变化是完美的一次函数关系.几年之后,Washio 等人^[17]在更宽的频率范围内,重复了类似的实验,得到了相同的线性频率依赖关系.2012 年,Hashisaka 等人^[18]通过加长 QPC 的两端 Hall bar,在更高的频率(最大 3 GHz)下,观察到了体系的分布电容.这是由于边界等离子体的波长和体系的长度可比,这时就需要考虑沿着边界的相位积累.那么在实验中一个单独的 QPC 的动态运输性质会是怎么样的?

本实验通过测量 QPC 的动态导纳,主要观察垂直施加于样品表面的磁场会对电子的运输带来哪些影响.实验发现导纳的实部和虚部都随着门电压出现类似于直流运输情况的电导平台,而且在零磁场的时候导纳的实部恰好是量子电导($2e^2/h$)的整数倍.而垂直施加的磁场主要有两个非常直观的影响:一是对电导平台平整度的优化,二是平台长度的调节.这两个影响可以分别通过磁场对背散射的抑制和磁场对子带间的能量差值也就是子带数目的改变加以解释.

2 样品和测量

GaAs/AlGaAs 异质结界面形成 2DEG,电子的浓度是 $n_s = 1.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$,电子的迁移率是 $2 \times 10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,由此可估算电子的平均自由程 $\ell_e \approx 12.4 \text{ } \mu\text{m}$.在样品表面通过分裂门技术制

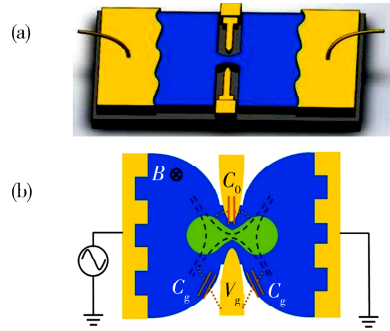


图 1 (a) 样品几何结构的示意图;(b) 样品中各种电容性耦合的示意图

Fig. 1 (a) Schematic picture of the sample; (b) schematic picture of various capacitive couplings in the sample

作一对金属门,如图 1 所示.当在此对门上施加负的直流电压 V_g ,由此产生的电势可以将门电极下面一定深度的电子排开,由此实现对导纳的调控.门之间的间隔大约为 300 nm,门之间能够允许电子通过的宽度很明显会受到 V_g 的控制.在样品的两端是通过欧姆接触实现交流信号的输入和输出.同时整个测量电路采用了 $Z = 50 \text{ } \Omega$ 电阻匹配同轴线实现交流信号的有效加载.通过牛津的 He3-He4 稀释制冷机,使得样品的温度稳定在 20 mK.为了研究磁场对运输的影响,0~0.8 T 的磁场被垂直于样品表面施加,使用网络分析仪测量样品的透射系数 S_{21} .考虑到样品的特征电阻(约 10 K Ω)远远大于测量线路上的其它电阻,所以可以非常方便地通过 $G(\omega) = S_{21}/2Z$ 得到导纳.在第一个通道打开前,样品在强反射系数的情况下主要呈现电容性.在第一个通道打开后,由于边缘通道的动态电感效应,样品呈现电感性.由此可以将第一个通道的打开认定为电容性向电感性响应转变的点,这样便可以对原始测量数据实现校准.

3 理论

Büttiker 在关于量子点接触结构的动态电导的理论研究中,已经给出了导纳的理论表达^[13].考虑到电子的屏蔽效应,和横向负电势的作用,他们采用偶极子模型进行了理论研究.为了简化,但足以保证得到物理本质,他们将金属门和 2DEG 之间的耦合忽略掉,通过引入量子电容将电子和电子的相互作用考虑了进去.但对于实验研究,金属门和 2DEG 之间的耦合却不能忽略.基于 Büttiker 理论,考虑了金属门和 2DEG 之间的耦合,利用电荷和电流守恒,得到了 QPC 结构的低频导纳^[19]:

$$G(\omega) = G_0 - i\omega E \tag{1}$$

其中

$$G_0 = 2e^2/h(N_t + T) \tag{2}$$

$$E = \frac{N_t + T}{N} C_{\mu g} + \frac{(N_t + T)^2}{2N^2} (NC_q - C_{\mu g}) \tag{3}$$

$$C_{\mu g} = \frac{(C_g + 2C_0)NC_q}{C_g + 2C_0 + NC_q} \tag{4}$$

$$C_{g0} = C_g + 2C_0 \tag{5}$$

G_0 具有和直流输运相同的形式, 正如图 2 所示那样, 实部呈现明显的量子化台阶. 值得注意的是, E 是一个为正的, 这正是电感性响应的标志. 同时, 前文提到的通道打开之前的电容性响应, 即钳断电容, 可以在数据校准的时候通过相位的调

节扣除^[15]. N 是总的通道数, 也就是填充因子, 通过 hn_s/eB (h 是普朗克常数) 直接与外加磁场联系起来. 由此可知, N 反比于磁场 B . N_t 是完全透射的通道数目, T 是部分透射通道的透射系数. C_0 是图 1(b) 中左右两个绿色示意区之间耦合产生的电容, C_g 是金属门极和 2DEG 之间的耦合电学电容, C_{g0} 是由 C_0 和 C_g 构成的样品的总的几何电容. C_q 是与态密度 (ν) 有紧密联系的量子电容, $C_q = e^2\nu$. 由表达式 (1)~(5) 可知, 考虑和外界的耦合, QPC 的二端导纳依然可以表示为电阻和电感的组合, 即: $G(\omega) = 1/R - i\omega L/R^2$.

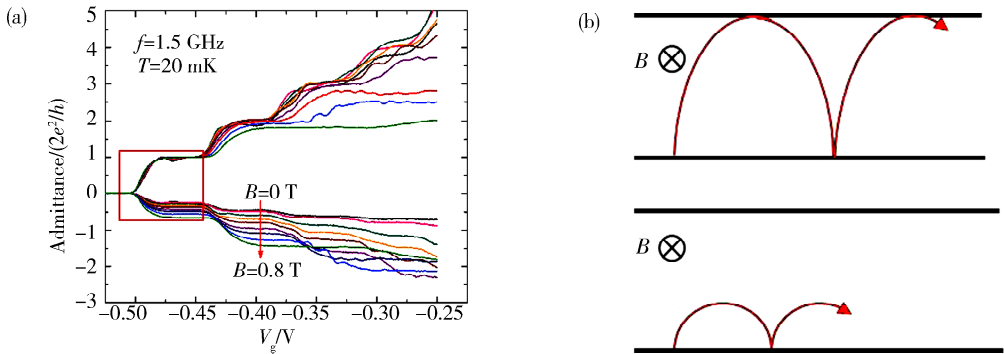


图 2 (a) 样品在 0~0.8 T 磁场内导纳的实部和虚部随 QPC 门电压的变化; (b) 磁场抑制背散射示意图
Fig. 2 The real and imaginary parts of the admittance as a function of the QPC voltage when the a magnetic field in range of 0~0.8 T; (b) schematic diagram of magnetic fields suppress backscattering

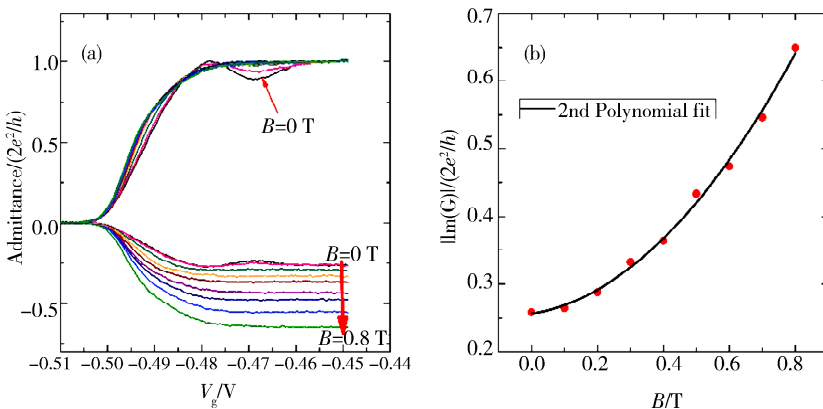


图 3 (a) 图 2(a) 中矩形区域的放大视图; (b) 当门电压固定在 -0.45 V 时, 虚部的绝对值随磁场的变化以及二次函数的拟合图, 电纳的绝对值随磁场的变化规律
Fig. 3 (a) An enlarged view of the square area in Fig. 2(a); (b) when the QPC voltage is fixed at -0.45 V, the absolute values of the imaginary parts show as a quadratic function of the magnetic field

4 结果与讨论

图 2(a) 是测量频率为 1.5 GHz、温度为 20 mK 时不同磁场下导纳实部和虚部随门电压的变

化. 首先, 可以看到导纳的实部和虚部都随门电压出现非常明显的台阶, 这是量子化的显著特征. 其中实部的台阶高度为量子化电导 ($2e^2/h$) 的整数倍, 这也表明交流输运中的实部的输运特征非

常类似直流输运,与方程(1)和(2)吻合.同时虚部虽然也有几乎和实部类似的台阶,但是台阶高度却不再是 $2e^2/h$ 整数倍,这是由于虚部是和交变信号频率紧密联系的量,正比于频率^[16].由方程(1)可知,图 2(a)中的虚部完全体现了当通道打开后 QPC 结构的电感响应.由虚部坪台高度和已知频率可以估算单个通道的电感值为 $0.8 \mu\text{H}$,这和之前的实验结果^[14, 16]吻合得很好.

为了更清楚地展示磁场对电导坪台平整度的影响,图 3(a)给出了图 2 中矩形区域的放大图.由图 3(a)可以看到,在零磁场的时候,第一个电导坪台(黑色曲线)并不是非常理想的坪台,而是有一定的波动.此现象是由于体系中存在背散射^[20].在介观电子输运中,电子的相位是一个非常重要的物理量,这是介观输运不同于宏观输运的基本原因.本实验样品的尺寸和电子的平均自由程相比,已经进入弹道输运,而且在 20 mK 的温度下,声子与电子之间的非弹性散射已经弱到可以忽略.在此条件下,电子的与电子之间的散射则显得很重要.近期的许多实验已经证明,此类条件下,电子和电子之间的小能量转移的相互作用是电子去相位干性的主要机制^[21];同时,来自于其他杂质或者不规则势产生的背散射也会对输运产生明显的影响,比如我们观察到的非理想的电导坪台.但是,背散射会被外加的磁场抑制,也就是磁场可以调节电导坪台的平滑程度.这是由于电子在磁场中运动,受到来自于磁场的洛伦兹力,从而使电子的轨道发生弯曲,呈跳跃状与通道壁碰撞.如果磁场使得电子的回旋半径小于电接触宽度,电子将沿通道一侧前进,背散射得到抑制(见图 2(b)).正如本实验结果所示,在零磁场下的非理想电导坪台随着磁场的增加变得越来越平滑,当磁场增加到 0.3 T 的时候,就可以观察到比较理想的坪台. Büttiker^[22]指出,一个适当的磁场可以完全抑制由杂质或者不规则势导致的背散射.或许这也是霍尔效应在高磁场的条件下,相对于弱磁场的电导坪台有更高精度的原因.同时,需要注意的是,在更高的磁场条件下,除了坪台光滑程度的变化,还有另外一种现象—磁耗散^[23].在更高的电导坪台上出现的波动,已有很好的解释^[23].在量子点接触结构中,必须分为两种形式的点接触讨论:逐渐收缩和突变收缩.对于前者,子带之间没有散射,在收缩区域内的输运是绝热的,电导的量子化就很自然.对于后者,计算

表明只要收缩区不要太短或太长,均可看到好的电导坪台.太短,坪台有倾斜;太长,坪台有振荡.

图 3(b)是将门电压固定在 -0.45 V 时,电纳的绝对值随磁场的变化规律.散点是实验数据,实线是该散点关于磁场的二次函数拟合.可以看到非常理想的拟合结果,这与式(3)对应.为了更直观地理解到电纳和磁场的二次依赖关系,作如下补充解释.电子的速度在存在电场和磁场的时,可以通过电场和磁场的比值近似得到,即电子的速度 $v_D \propto 1/B$.用 ℓ_g 表示 QPC 门极的长度,电子的态密度可以表示为 $\nu = \ell_g/hv_D$.如果注意到 $N \propto 1/B$,则 NC_q 与磁场无关.此时,式(3)的 $C_{\mu g}$ 和 NC_q 都是和磁场无的量.那么式(3)就可以很好地解释图 3(b)的二次函数图像.

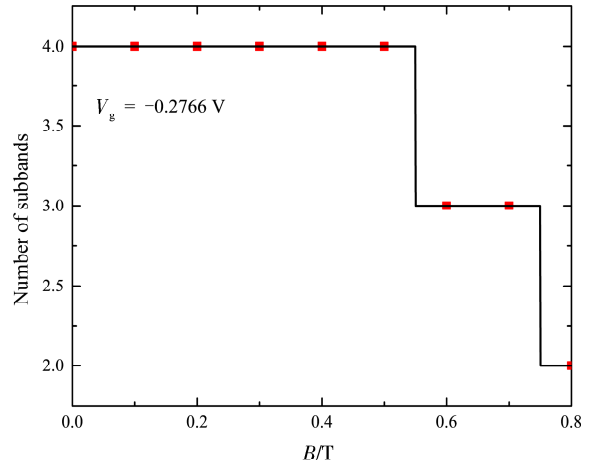


图 4 当 QPC 电压固定在 -0.2766 V 时,图 2 中观察到的坪台个数随磁场的变化以及通过方程(8)的拟合

Fig. 4 The number of occupied subbands as a function of magnetic field (square dots) at a fixed value of the gate voltage. The solid curve corresponds to fit with Eq. (8)

在理论研究 QPC 结构时,用一个抛物线势阱 $1/2m^* \omega_0^2 y^2$,表示横向的限制势是很合理且常用的, m^* 是电子的有效质量 $0.067m_e$.电子在通过这样的结构的时候,可以理解为电子的波函数在波导中传播.当存在外加的垂直于 2DEG 表面的磁场时,需要对电子波函数的色散关系做出修改.导纳的实部可以表示为^[20]:

$$G_0(B) = \frac{2e^2}{h} N_i \quad (6)$$

其中

$$N_i = \text{Int} \left[\frac{E_F - 2V_0}{\hbar\omega} + \frac{1}{2} \right] \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 + \omega_c^2}, \omega_c = \frac{eB}{m^*} \quad (8)$$

其中 E_F 是体系的费米能, V_0 是 QPC 中的静电势.

外加磁场会增加子带之间的能量间距 ($\hbar\omega$), 在一定的门电压下, 电子能够占据的子能带数将会减小, 表现为电导的减小. 此时需要更大的门电压变化去实现新的子带的占据导通, 表现为电导平台的变长. 这些在图 2 都可以清楚地观察到.

为了更深入研究磁耗散, 将门电压固定在一 0.2766 V, 观察不同磁场条件在电导平台的数目, 即导通的子带数目的变化规律, 见图 4. 利用方程 (7), 对图 4 的实验数据进行拟合得到 ω_0 , 这是可以反映子带能量间隔的物理量. 由拟合参数得到 $\hbar\omega_0 = 1.54 \text{ meV}$, 与之前的实验数据^[20, 23-24] 相吻合.

通过方程 (8) 知道, 在磁场很弱的时候, 电子的输运主要受到横向势, 即 ω_0 的控制. 但当磁场逐渐增加, ω_c 的影响越来越大, 也就是磁场对输运的影响越来越明显. 如果将拟合得到的 ω_0 代入 $\omega_c = eB_0/m^*$ 可以得到 B_0 大概是 0.9 T, 这和实验中观察到磁场达到 0.8 T 时电导平台出现的明显变化吻合得很好.

5 总 结

本文测量了 QPC 结构在 mK 温度下的 GHz 频率的导纳. 首先观察到导纳实部和虚部都有非常明显的平台. 但是在零磁场的电导平台有一定波动, 这是由于体系中存在背散射的缘故. 当施加一个垂直于 2DEG 表面的磁场, 可以看到平台的平整度有了非常明显的改善. 当磁场达到 0.3 T 左右时, 平台已经比较理想了. 继续增大磁场, 观察到了磁耗散效应. 这是由于磁场使得体系子能带间的间距变大, 使得能被电子占据的子带数目变少, 表现为电导下降和电导平台变长. 同时我们利用实验数据和理论的拟合, 估算了样品在零磁场下的子能带间距, 和已有的结果吻合得很好.

参考文献:

- [1] Wees B J, Houten H, Beenakker C W J, *et al.* Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas [J]. *Phys Rev Lett*, 1988, 60: 848.
- [2] Wang T, Hsieh T H, Chen T W. Quantum confinement effects on low-dimensional electron mobility [J]. *J Appl Phys*, 1993, 74: 426.
- [3] Picciotto R, Stormer H L, Pfeiffer L N, *et al.* Four-terminal resistance of a ballistic quantum wire [J]. *Nature*, 2001, 411: 51.
- [4] Liu W, He J H, Guo H Z, *et al.* Electrochemical capacitance modulation in a interacting mesoscopic capacitor induced by internal charge transfer [J]. *Phys Rev B*, 2018, 97: 165420.
- [5] Liu W, Guo H Z, He J H, *et al.* Universal charge relaxation resistance and electrochemical capacitance suppression in an interacting coherent capacitor [J]. *Phys Rev B*, 2018, 97: 195436.
- [6] Mani R G, Smet J H, Klitzing K, *et al.* Zero-resistance states induced by electromagnetic wave excitation in GaAs/AlGaAs heterostructures [J]. *Nature*, 2002, 420: 646650.
- [7] Mani R G, Smet J H, Klitzing K, *et al.* Demonstration of a 1/4 cycle phase shift in the radiation-induced oscillatory-magnetoresistance in GaAs/AlGaAs devices [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 146801.
- [8] Bockhorn L, Gornyi I V, Schuh D, *et al.* Magnetoresistance induced by rare strong scatterers in a high-mobility two-dimensional electron gas [J]. *Phys Rev B*, 2014, 90: 165434.
- [9] Schönenberger C. Two indistinguishable electrons interfere in an electronic device [J]. *Science*, 2013, 339: 1041.
- [10] Qi X. Dose gravity come from quantum information [J]. *Nature Phys*, 2018, 14: 984.
- [11] Wang Y H, Li Y, Yin Z, *et al.* 16-qubit IBM universal quantum computer can be fully entangle [J]. *Quantum Inform*, 2018, 4: 46.
- [12] Büttiker M. Quantized transmission of a saddle-point constriction [J]. *Phys Rev B*, 1990, 41: 7906 (R).
- [13] Christen T, Büttiker M. Low frequency admittance of a quantum point contact [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77: 143.
- [14] Gabelli J, Fève G, Berroir J M, *et al.* A violation of Kirchhoffs laws for a coherent RC circuit [J]. *Science*, 2007, 313: 499.
- [15] Gabelli J, Fève G, Kontos J, *et al.* The relaxation time of a chiral quantum R-L circuit [J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 166806.
- [16] Hohls F, Fricke C, Haug R J. Admittance of a quantum point contact [J]. *Physica E*, 2008, 40: 1760.
- [17] Washio K, Hashisaka M, Kamata H, *et al.* Ad-

- mittance measurement for a quantum point contact in a multiterminal quantum Hall device [J]. *J Appl Phys*, 2011, 50: 04DJ04.
- [18] Hashisake M, Washio K, Kamata H, *et al.* Distributed electrochemical capacitance evidence in high-frequency admittance measurements on a quantum Hall device [J]. *Phys Rev B*, 2013, 85: 1554224.
- [19] Liu W, He J H, Guo H Z, *et al.* Boundary scattering effects on the dynamic magnetotransport of a ballistic quantum point contact [J]. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 251604.
- [20] Wees B J, Kouwenhoven L P, Willems E M M, *et al.* Quantum ballistic and adiabatic electron transport studied with quantum point contacts [J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 43: 12431.
- [21] Samaraweera R L, Liu H C, Gunawardana B, *et al.* Coherent backscattering in quasi-ballistic ultra-high mobility GaAs/AlGaAs 2DES [J]. *Sci Rep*, 2018, 8: 10061.
- [22] Büttiker M. Absence of backscattering in the quantum Hall effect in multiprobe conductors [J]. *Phys Rev B*, 1988, 38: 9375.
- [23] Wees B J, Kouwenhoven L P, Houten H, *et al.* Quantized conductance of magnetoelectric subbands in ballistic point contacts [J]. *Phys Rev B*, 1988, 38: 3625.
- [24] Wharam D A, Ekenberg U, Pepper M, *et al.* Empirical relation between gate voltage and electrostatic potential in the one-dimensional electron gas of a split-gate device [J]. *Phys Rev B*, 1989, 39: 6283.
- [25] Chapellier M, Goldman M, Chau V H, *et al.* Magnétisme nucléaire-production et observation d'un état antiferromagnétique nucléate [J]. *CR Acad Sci*, 1969, 268: 1530.

引用本文格式:

中文: 王萍, 岳晓凯, 于白茹. 量子点接触中的动态量子输运[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 903.

英文: Wang P, Yue X K, Yu B R. Dynamical transport measurements of a quantum point contact [J]. *J Sichuan Univ; Nat Sci Ed*, 2019, 56: 903.