

## Аномалии дробного квантового эффекта Холла в широкой баллистической проволоке

© З.Д. Квон<sup>¶</sup>, Е.Б. Ольшанецкий, А.Е. Плотников, А.И. Торопов, Ж.К. Порталь<sup>\*,+,-</sup>

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск

\* Grenoble High Magnetic Fields Laboratory, MPI-FKF and CNRS, B.P.166,  
F-38042 Grenoble, France

+ INSA 135, Avenue de Ranguel 31077 Toulouse Cedex 4, France

- Institut Universitaire de France

(Получена 14 января 2002 г. Принята к печати 22 января 2002 г.)

Экспериментально исследован магнитотранспорт баллистической проволоки в режиме целочисленного и дробного квантования. Обнаружена нелинейная зависимость фактора заполнения ( $\nu$ ) уровня Ландау в условиях ультраквантового предела от магнитного поля, возникающая при определенной реализации самосогласованного электростатического потенциала проволоки. Предположено, что обнаруженный эффект является результатом влияния взаимодействия между электронами на частично заполненном уровне Ландау на этот потенциал, приводящего к уменьшению концентрации электронов в проволоке с ростом магнитного поля при  $\nu < 1$ .

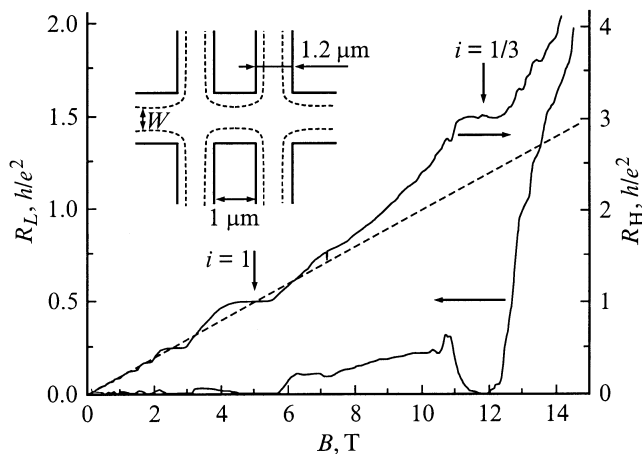
После появления работ [1] и ряда последующих экспериментов нет никаких сомнений, что во многих случаях транспорт в режимах целочисленного и дробного квантового эффекта Холла определяется краевыми токовыми состояниями. Они представляют собой широкие полосы (их ширина намного превышает соответствующую магнитную длину) сжимаемой электронной жидкости и значительно более узкие несжимаемые, расположенные на краях образца. Влияние широких сжимаемых полос впервые было продемонстрировано в работе [2]. Однако в [2] фактически изучалось только двухтерминальное сопротивление проволоки, а интересный и важный вопрос о поведении холловской ( $R_H$ ) и продольно диссипативной ( $R_L$ ) компонент сопротивления проволоки в случае магнитотранспорта, осуществляемого краевыми токовыми состояниями, ширина которых сравнима с шириной проволоки, оставался открытым. Впервые одновременное измерение  $R_H$  и  $R_L$  широкой баллистической проволоки ( $L_H \ll W \ll l$ ,  $L_H$  — магнитная длина,  $l$  — длина свободного пробега) было проведено в работе [3], где был обнаружен ряд аномалий в поведении  $R_H$  и  $R_L$ , объясненных существованием сжимаемых полос электронной жидкости, ширина которых сравнима с шириной проволоки.

В данной работе сообщается еще об одной аномалии, возникающей в широкой баллистической проволоке в режиме дробного холловского квантования, — нелинейной зависимости фактора заполнения  $\nu$  уровня Ландау при  $\nu < 1$  от магнитного поля. Предположено, что подобная нелинейность связана с влиянием магнитного поля на самосогласованный электростатический потенциал проволоки, приводящим к уменьшению электронной концентрации в проволоке с ростом величины магнитного поля в условиях ультраквантового предела ( $\nu < 1$ ).

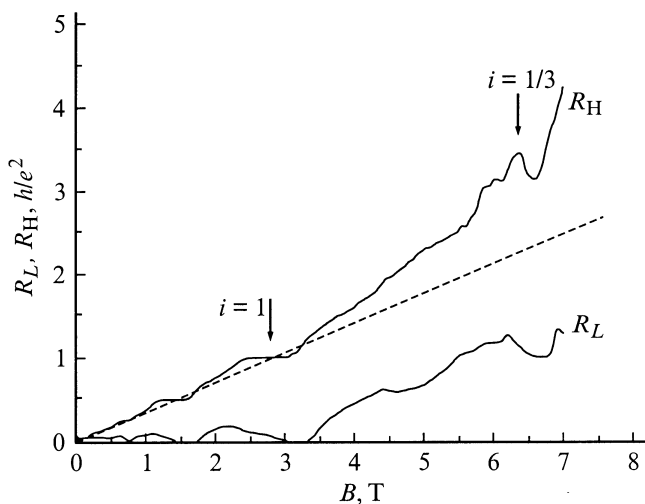
Экспериментальные образцы, исследованные в работе, представляли собой проволоки с потенциометрическими контактами. Проволочные структуры были изготовлены с помощью электронной литографии и последующего плазмохимического травления (схематическое изображение проволоки и ее литографические размеры показаны на вставке к рис. 1). В качестве исходного материала служил гетеропереход AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом, имеющим подвижность  $\mu = 10^6 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при концентрации электронов  $N_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (соответствующая длина свободного пробега  $l_e = 8 \text{ мкм}$ ) и расположенным на расстоянии 150 нм от поверхности структуры. Отметим, что глубина травления не превышала 50 нм, благодаря чему поверхность, подвергаемая плазменной обработке, находилась от двумерного электронного газа на расстоянии, большем, чем толщина спейсера ( $d_{sp} = 60 \text{ нм}$ ). Тем самым было исключено заметное влияние флуктуационного потенциала по краям проволоки. После изготовления проволоки на нее напылялся металлический TiAu-затвор, подача напряжения на который позволяла менять концентрацию электронов в проволоке. Измерения проводились по стандартной четырехзондовой схеме при температурах 40 мК–1 К в магнитных полях до 15 Тл. Измерительный ток не превышал 1 нА, чтобы исключить эффекты разогрева.

На рис. 1 показаны результаты измерения диссипативного  $R_L$  и холловского  $R_H$  магнитосопротивления проволоки при значении затворного напряжения  $V_g = -0.35 \text{ В}$ . На первый взгляд, он демонстрирует стандартную картину поведения  $R_L$  и  $R_H$  в режиме квантового эффекта Холла. В магнитных полях, соответствующих целочисленному фактору заполнения  $\nu$ , наблюдаются минимумы  $R_L$  и соответствующие плато холловского квантования, а при факторе  $\nu < 1$  — минимум в зависимости  $R_L(B)$  и плато на зависимо-

<sup>¶</sup> E-mail: kvon@thermo.isp.nsc.ru  
Fax: 8(3832)332771



**Рис. 1.** Зависимости от магнитного поля холловской ( $R_H(B)$ ) и продольной ( $R_L(B)$ ) компонент сопротивления проволоки при  $V_g = -0.35$  В,  $T = 50$  мК (штриховой линией показана зависимость  $R_H = B/eN_s$ ). На вставке — схематическое изображение проволоки.



**Рис. 2.** Зависимости от магнитного поля холловской ( $R_H(B)$ ) и продольной ( $R_L(B)$ ) компонент сопротивления проволоки при  $V_g = -0.5$  В,  $T = 50$  мК (штриховой линией показана зависимость  $R_H = B/eN_s$ ).

сти  $R_H(B)$ , соответствующие  $\nu = 1/3$ . Однако более внимательный анализ обнаруживает отклонение от этой картины. На рисунке сплошной линией проведена прямая, соответствующая зависимости  $R_H = B/eN_s$  ( $N_s = 1.2 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ ). Хорошо видно, что в области малых полей эксперимент точно следует этой зависимости, а там, где появляются плато целочисленного квантования, она идет приблизительно через их середину. Именно такая картина наблюдается для макроскопического двумерного электронного газа как в режиме квантового эффекта Холла, так и в режиме дробного квантового эффекта Холла. Однако на рис. 1 в магнитных полях, соответствующих ультракванто-

му пределу, т.е. при  $\nu < 1$  (в данном случае при полях, превышающих 5 Тл), экспериментальная зависимость  $R_H(B)$  начинает заметно отклоняться от прямой, идя выше нее. Этот факт заставляет предположить, что в этих условиях нарушается линейная зависимость фактора заполнения уровня Ландау от магнитного поля, наблюдаемая во всех макроскопических двумерных системах. Однако сам факт нелинейной зависимости  $R_H(B)$  не позволяет сделать этот вывод однозначно. Точное заключение можно сделать из положения плато дробного холловского квантования, позволяющего однозначно определить фактор заполнения уровня Ландау. На рис. 1 видно хорошо выраженное плато холловского квантования, соответствующее фактору заполнения  $\nu = 1/3$ . Середина этого плато лежит при значении магнитного поля  $B = 11.7$  Тл, значительно меньшем, чем следует из стандартной линейной зависимости, которая дает для нее  $B = 15$  Тл. Отметим, что минимум в зависимости  $R_L(B)$  также лежит при  $B = 11.7$  Тл, а не при  $B = 15$  Тл. Таким образом, приведенные экспериментальные результаты по дробному холловскому квантованию однозначно указывают на возникновение в проволоке нелинейной зависимости фактора заполнения уровня Ландау от магнитного поля. Эта нелинейность приводит к тому, что определенное значение  $\nu$  в ультраквантовом пределе достигается при меньшей величине магнитного поля, чем в случае обычной линейной зависимости. Подобному поведению можно найти объяснение, только допустив, что концентрация электронов в проволоке начинает уменьшаться с ростом магнитного поля, как только фактор заполнения становится меньше единицы. Это означает, что при определенных условиях, реализованных в данном эксперименте, магнитное поле в условиях частично заполненного уровня Ландау может влиять на самосогласованный электростатический потенциал проволоки. Этот вывод подтверждается и экспериментами при меньшей концентрации электронов. На рис. 2 показаны зависимости  $R_H(B)$  и  $R_L(B)$  при затворном напряжении  $V_g = -0.5$  В. Там же показана зависимость  $R_H = B/eN_s$  уже при существенно меньшей концентрации электронов ( $N_s = 7 \cdot 10^{10}$  см $^{-2}$ ). Хорошо видно, что отклонение от нее начинается, как только магнитное поле становится больше 3 Тл, т.е. когда фактор заполнения становится меньше единицы. Это также подтверждается положениями плато дробного холловского квантования, тоже соответствующего  $\nu = 1/3$ , и минимума на зависимости  $R_L(B)$ . Правда, плато уже искажено мезоскопическими флуктуациями, а минимум выражен заметно слабее и сдвинут относительно плато в большие поля. Тем не менее это не мешает определить с достаточной точностью фактор заполнения и увидеть все ту же нелинейность зависимости  $\nu(B)$ . Таким образом, независимо от концентрации электронов в нулевом магнитном поле, как только в проволоке реализуется частично заполненный уровень Ландау, возникает нелинейная зависимость  $\nu(B)$ , причем степень нелинейности остается почти одинаковой для обоих значений  $N_s$ .

Следует отметить, что отмеченная нелинейность наблюдается не на всех проволоках. В проволоках с меньшим значением порогового напряжения этот эффект не наблюдался и фактор заполнения вел себя так же, как и в макроскопическом случае. Отсюда следует, что существование нелинейности в определяющей степени зависит от формы электростатической потенциальной ямы, реализуемой в данной проволоке.

Обсудим описанные выше результаты. Они свидетельствуют, что при определенных условиях в широкой баллистической проволоке фактор заполнения частично заселенного уровня Ландау растет с ростом магнитного поля быстрее, чем дает линейная зависимость, характерная для макроскопических образцов. Наиболее вероятным объяснением обнаруженного эффекта является предположение о том, что концентрация двумерных электронов на частично заполненном уровне Ландау в широкой баллистической проволоке начинает уменьшаться с ростом магнитного поля. В принципе нет ничего удивительного, что магнитное поле может влиять на  $N_s$ . Качественно механизм этого влияния можно представить следующим образом. Очевидно, что самосогласованный электростатический потенциал, реализуемый в проволоке, есть результат сложения электростатических полей, связанных с зарядом спейсера, металлического затвора, поверхностных состояний и, главное, с экранирующим зарядом электронов на частично заполненном уровне Ландау. Именно перечисленные факторы приводят к образованию сжимаемых и несжимаемых полос электронной жидкости в проволоке. Формирование указанного самосогласованного потенциала в немалой степени зависит от характера электрон-электронного взаимодействия на этом уровне, в свою очередь зависящего от фактора его заполнения и от  $N_s$ . Это и может привести к влиянию магнитного поля на концентрацию электронов. Однако однозначное решение поставленной проблемы может дать только построение последовательной теории частично заполненного уровня Ландау в баллистической проволоке, учитывающей все указанные выше факторы.

## Список литературы

- [1] D.B. Chklovskii, B.I. Shklovskii, L.I. Glazman. Phys. Rev. B., **46**, 4026 (1992).
- [2] S.W. Hwang, D.C. Tsui, M. Shayegan. Phys. Rev. B., **48**, 8161 (1993).
- [3] Z.D. Kvon, E.B. Olshanetsky, M. Casse, A.Y. Plotnikov, D.K. Maude, J.C. Portal, A.I. Toropov. Physica B, **298**, 155 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

## Fractional Quantum Hall effect anomalies in wide ballistic wires

Z.D. Kvon, E.B. Olshanetsky, A.Y. Plotnikov, A.I. Toropov, J.C. Portal<sup>\*,+,−</sup>

Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

\* Grenoble High Magnetic Fields Laboratory,  
MPI-FKF and CNRS, B.P. 166,  
F-38042 Grenoble, France

+ INSA 135,

Avenue de Rangueil 31077 Toulouse Cedex 4, France

− Institut Universitaire de France

**Abstract** Magnetotransport of the ballistic wire fabricated on the basis of high mobility 2D electron gas in an AlGaAs/GaAs heterostructure is experimentally studied in integer QHE and fractional QHE regimes. It has been found that there is a nonlinear dependence of the Landau level filling factor  $\nu$  at  $\nu < 1$  on the magnetic field occurring under certain realization of a self-consistent electrostatic potential in the wire. It is supposed that this effect results from the electron-electron interaction at a partially occupied Landau level which leads to decreasing the electron density with the magnetic field rise.