

## Неравновесный химический потенциал в двумерном электронном газе в режиме квантового эффекта Холла

© Д.А. Похабов<sup>\*\*</sup>, А.Г. Погосов<sup>\*\*</sup>, М.В. Буданцев<sup>\*</sup>, Е.Ю. Жданов<sup>\*\*</sup>, А.К. Бакаров<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>+</sup> Новосибирский государственный университет,  
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: pokhabov@isp.nsc.ru

(Получена 2 февраля 2016 г. Принята к печати 10 февраля 2016 г.)

Исследовано неравновесное состояние двумерного электронного газа в режиме квантового эффекта Холла в холловских мостиках, снабженных дополнительными внутренними контактами, помещенными внутрь мостика. Изучены магнетопольные зависимости напряжения между различными парами контактов при различных температурах. Обнаружено, что напряжение между внутренним и внешним контактами демонстрирует пики значительной амплитуды в узких интервалах магнитных полей вблизи целочисленных факторов заполнения. Кроме этого, зависимость напряжения от магнитного поля в этих интервалах демонстрирует гистерезис, тогда как напряжение между внешними контактами остается нулевым во всем диапазоне магнитных полей. Возникновение наблюдаемых пиков напряжения и их гистерезисное поведение можно объяснить неравновесием химических потенциалов краевых и объемных состояний, возникающим в результате неравновесного перераспределения заряда между краевыми и объемными состояниями при развертке магнитного поля в условиях квантового эффекта Холла. Результаты работы существенно дополняют общепринятую картину квантового эффекта Холла, явно указывая на наличие значительного неравновесия на краю двумерного электронного газа: экспериментально наблюдаемая величина разности электрохимических потенциалов между краем и объемом в десятки раз превышает расстояние между уровнями Ландау.

### 1. Введение

Типичное поведение магнетосопротивления двумерного электронного газа (ДЭГ) в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) заключается в появлении плато квантования холловского и в занулении продольного сопротивления вблизи целочисленных факторов заполнения. Однако такая картина не отражает некоторые существенные особенности, возникающие в режиме КЭХ. В ряде экспериментальных работ по изучению намагниченности [1,2], переноса заряда [3,4], локального электростатического потенциала [5,6] вблизи целочисленных факторов заполнения были обнаружены гистерезисные явления при изменении магнитного поля, указывающие на неравновесность состояния ДЭГ в режиме КЭХ. В литературе до сих пор нет однозначной микроскопической картины этих явлений, хотя чаще всего такое поведение объясняется возникновением в ДЭГ долгоживущих неравновесных токов. Ввиду отсутствия магнетосопротивления в режиме КЭХ обычные магнетотранспортные измерения практически не дают полезной информации о состоянии ДЭГ в этом режиме. Однако, как было показано в работах [7–11], если сблизить края ДЭГ, создав в нем узкий проводящий канал, гистерезисные явления можно наблюдать и в магнетосопротивлении. Эти результаты, наряду с результатами изучения пространственного распределения локального электростатического потенциала [5,6], позволили сделать вывод о том, что неравновесные токи протекают в субмикронном промежутке вдоль периметра образца.

В работе [11] было сделано предположение, что в ДЭГ в режиме КЭХ разбивается на две подсистемы — „край“ и „объем“, между которыми отсутствует равновесие, т. е. уровни электрохимических потенциалов объема и края ДЭГ значительно отличаются. Модель, основанная на этом предположении, объясняет возникновение неравновесных токов на краю ДЭГ, а также ряд гистерезисных явлений, наблюдающихся в ДЭГ. Однако модель не позволяет оценить величину неравновесия, т. е. величина разности электрохимических потенциалов между краем и объемом ДЭГ остается неизвестной. В экспериментах по измерению намагниченности ДЭГ [1] неравновесная намагниченность ДЭГ в режиме КЭХ в 20–60 раз по амплитуде превышает равновесную намагниченность де Гааза–ван Альфена. Если попытаться объяснить эти измерения в рамках указанной модели, то разность электрохимических потенциалов между краевыми и объемными состояниями ДЭГ должна в десятки раз превышать расстояние между уровнями Ландау  $\hbar\omega_c$ , где  $\omega_c$  — циклотронная частота. Численные оценки, опирающиеся на результаты магнетотранспортных измерений [10], дают аналогичный результат и также позволяют утверждать, что неравновесие между краем и объемом может в несколько раз превышать циклотронную щель  $\hbar\omega_c$ . В настоящей работе приведены результаты измерений разности потенциалов между краевыми и объемными состояниями в холловских мостиках, снабженных как обычными внешними омическими контактами (расположенными вдоль периметра мостика), так и дополнительными внутренними омическими контактами (по-

мешенными внутрь мостиков). Измерения проводились при различных направлениях развертки магнитного поля в отсутствие каких-либо внешних источников токов и напряжений. Похожие измерения обсуждались в работе [4], однако исследуемые образцы имели форму дисков Корбино и не позволяли провести сравнительные измерения магнетосопротивления. Образцы, исследуемые в настоящей работе, позволяют проводить как обычные измерения магнетосопротивления, так и измерять разность потенциалов между краевыми и объемными состояниями ДЭГ. Полученные в работе результаты объясняются в рамках теории квазиупругих переходов между уровнями Ландау (QUILLS) [13], а также рассмотрен механизм внутриуровневых переходов.

## 2. Методика эксперимента

Экспериментальные образцы были изготовлены на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии и содержащих ДЭГ с электронной подвижностью  $0.8 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$  и плотностью  $1.8\text{--}2.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при температуре 4.2 К. Глубина залегания ДЭГ составляла 125 нм. Геометрия экспериментальных образцов задавалась методом оптической литографии. Образцы с размерами  $3 \times 5 \text{ мм}$  имели топологию холловских мостиков (рис. 1). Омические потенциометрические контакты располагались как вдоль края образца (внешние контакты 1–6), так и внутри образца (внутренние контакты 7, 8). Контакты к ДЭГ были созданы диффузией Ge, Ni и Au из пленки толщиной 2000 Å, напыленной на поверхность гетероструктуры, при температуре 420°C.

Измерения проводились в диапазоне температур от 0.5 до 4.2 К. Магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости ДЭГ и изменялось в диапазоне 0–11 Тл. Скорость развертки магнитного поля варьировалась в диапазоне 0.01–0.04 Тл/с. Для изучения неравновесного состояния ДЭГ проводилось измерение напряжения между различными парами контактов вольтметром Keithley 2000 Multimeter с большим входным сопротивлением ( $> 10 \text{ ГОм}$ ) при развертке магнитного

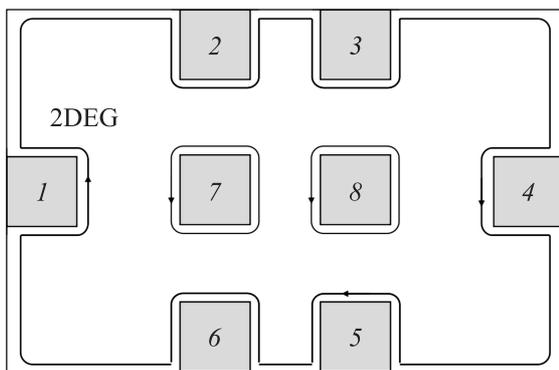


Рис. 1. Схематическое изображение образцов.

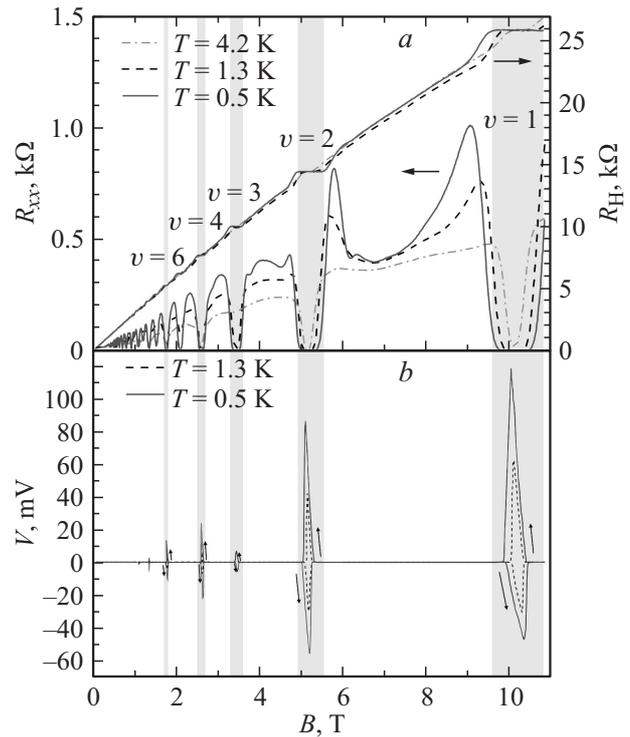


Рис. 2. *a* — продольное и холловское магнетосопротивление образца. *b* — зависимость напряжения между внутренним и внешним контактами от магнитного поля. На фоне плато холловского сопротивления, соответствующих целым четным и нечетным факторам заполнения, наблюдается гистерезис напряжения.

поля без пропускания какого-либо тока через образец. Измерения магнетосопротивления проводились методом синхронного детектирования в режиме линейного отклика на переменном токе амплитудой 10 нА с частотой 7 Гц.

## 3. Экспериментальные результаты

На рис. 2, *a* приведены результаты измерения магнетосопротивления ДЭГ при различных температурах в диапазоне от 0.5 до 4.2 К. Продольное магнетосопротивление имеет нулевания, а холловское — плато, вблизи целочисленных факторов заполнения, что указывает на то, что ДЭГ находится в режиме целочисленного КЭХ. При этом магнетосопротивление, как продольное, так и холловское, не зависит от направления развертки магнитного поля, т. е. не демонстрирует гистерезис.

Чтобы изучить неравновесное состояние ДЭГ, были измерены зависимости напряжения между различными парами контактов от магнитного поля. Напряжение между любой парой внешних контактов остается нулевым во всем диапазоне магнитных полей. В то же время напряжение между внутренними и внешними контактами демонстрирует пики значительной амплитуды в узких интервалах магнитного поля вблизи целых факторов

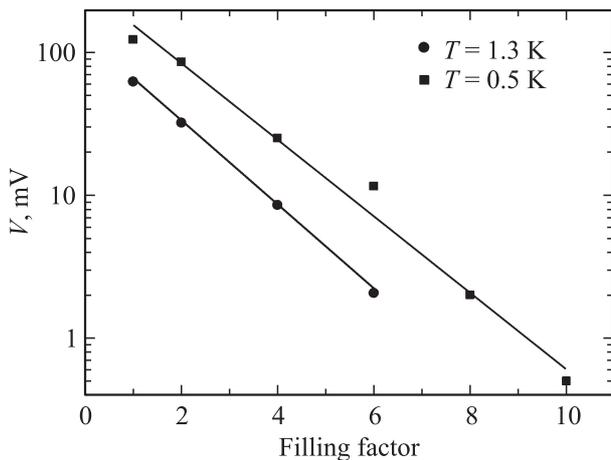


Рис. 3. Зависимость амплитуды гистерезиса от фактора заполнения при  $T = 0.5$  К.

заполнения (см. рис. 2, *b*). Кроме того, зависимость напряжения от магнитного поля в этих интервалах демонстрирует гистерезисное поведение по отношению к направлению развертки магнитного поля. Наблюдаемый гистерезис не зависит от скорости развертки в диапазоне от 0.01 до 0.04 Тл/с. Амплитуда гистерезиса имеет экспоненциальную зависимость от фактора заполнения (см. рис. 3). Наиболее выраженный гистерезис наблюдается при факторе заполнения  $\nu = 1$  при температуре 0.5 К. Величина напряжения достигает  $V_{\text{up}} \approx 50$  мВ при развертке магнитного поля вверх и  $V_{\text{down}} \approx 150$  мВ при развертке магнитного поля вниз. Величина экспериментально наблюдаемых напряжений указывает на то, что разность электрохимических потенциалов между краем и объемом примерно в 5–15 раз превышает расстояние между уровнями Ландау ( $\hbar\omega_c \sim 10$  мэВ, где  $\omega_c$  — циклотронная частота). Различия амплитудных значений напряжений  $V_{\text{up}}$  и  $V_{\text{down}}$  при разных направлениях развертки может быть связано с обсуждавшимися в статье [11] различиями в профиле электростатического потенциала на краю ДЭГ при разных направлениях развертки магнитного поля. Другим фактором, обуславливающим разницу между  $V_{\text{up}}$  и  $V_{\text{down}}$ , может быть различие периметров краевых состояний, прилегающих к внутреннему и внешним контактам соответственно, т. е. различие периметра внутреннего контакта и периметра всего образца. Более детальное объяснение различия амплитудных значений напряжений  $V_{\text{up}}$  и  $V_{\text{down}}$  при разных направлениях развертки требует дальнейшего изучения.

Зависимость напряжения от магнитного поля в области гистерезиса можно условно разделить на четыре практически линейных участка АВ, ВС, CD и DA (см. рис. 4). Линейность зависимости напряжения от магнитного поля объясняется тем, что заряд, перенесенный между краем и объемом, пропорционален изменению магнитного потока [12]. В то же время наблюдается

небольшая асимметричность гистерезиса относительно целых значений фактора заполнения, проявляющаяся в различии наклонов  $dV/dB$  слева (участок АВ на рис. 4) и справа (участок ВС) от экстремума (точка В). Подобное поведение, как правило, объясняется наличием какой-либо электрической емкости — верхнего затвора [2], или специально присоединяемых между краем и объемом ДЭГ емкостей [4]. При наличии такой дополнительной емкости заряд перераспределяется не только из объема на край ДЭГ, но также происходит зарядка дополнительной емкости. В этом случае напряжение определяется не только зарядом, перенесенным между краем и объемом ДЭГ, но и зарядом, вытесненным на емкость. В нашем случае сигнал ограничивается паразитной емкостью измерительного прибора ( $\sim 0.1$  пФ) и емкостью кабелей, используемых для измерений. В любом случае измеряемое напряжение пропорционально разности электрохимических потенциалов между краевыми и объемными состояниями ( $V \propto \Delta\mu$ ) и отсутствие паразитной емкости привело бы к еще большему измеряемому напряжению.

Была изучена зависимость магнетосопротивления от предыстории развертки. Для этого развертка магнитного поля останавливалась в области гистерезиса и затем направление развертки изменялось на противоположное. Было обнаружено, что участки минорных петель, лежащие внутри гистерезисной петли и обозначенные штриховыми линиями (см. рис. 4), имеют равные наклоны  $dV/dB$ , которые совпадают с наклоном участка CD предельной петли, соответствующего такому же направлению развертки. Что касается остальных участков минорных гистерезисных петель, то они полностью совпадают с соответствующими участками предельной петли ABCD. Наклон кривой на выходе из гистерезиса ограничивается пробоем КЭХ. По всей видимости, в ДЭГ в режиме КЭХ происходят два конкурирующих процесса: с одной стороны, развертка магнитного поля перераспределяет заряд между краем и объемом, создавая критическое поле пробоя КЭХ [13] между

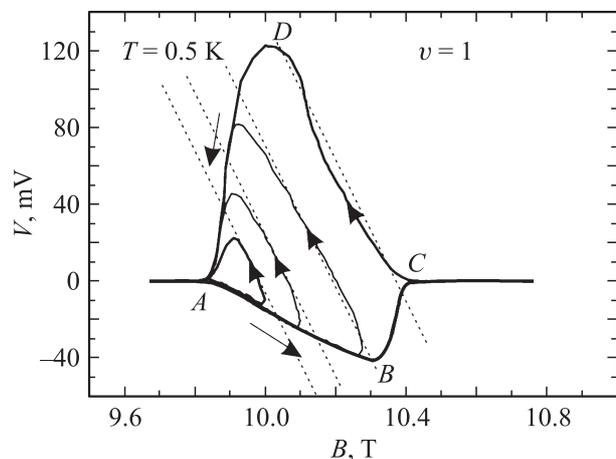


Рис. 4. Минорные петли гистерезиса напряжения.

краем и объемом, с другой стороны, неравновесный заряд релаксирует благодаря наличию этого критического поля на краю. Более детально механизмы релаксации неравновесного заряда рассматриваются в следующей главе.

#### 4. Обсуждение результатов

Наличие напряжения между внутренними и внешними контактами в узких диапазонах магнитных полей, соответствующих режиму КЭХ, явно указывает на неравновесие между краевыми и объемными состояниями в ДЭГ. Величина возникающего напряжения свидетельствует о значительной разности электрохимических потенциалов между краем и объемом, в несколько раз превышающей расстояние между уровнями Ландау. В то же время знак напряжения говорит об обеднении края ДЭГ при увеличении магнитного поля и его перезаполнении при уменьшении магнитного поля. Этот экспериментальный результат находится в соответствии с результатами, полученными в работе [4], а также теоретическими предсказаниями микроскопической модели неравновесия, предложенной в работе [11].

##### 4.1. Межуровневые переходы

Механизмом, ограничивающим неравновесие, по-видимому, является проба КЭХ, сопровождающийся переходами между заполненным и пустым уровнем Ландау на краю образца. Следует учесть, что при изменении фактора заполнения происходит значительное перераспределение электронов между уровнями Ландау. Например, переход от фактора заполнения  $\nu = 1$  к фактору заполнения  $\nu = 2$  сопровождается переходом половины всех электронов ДЭГ ( $\sim 10^7$  электронов) с первого на второй уровень Ландау. Достаточно большая циклотронная щель ( $\hbar\omega_c \sim 10$  мэВ при  $\nu = 1$ ) затрудняет прямые переходы электронов между объемными состояниями на разных уровнях Ландау при низких температурах ( $k_B T \sim 0.36$  мэВ при  $T = 4.2$  К). Поэтому переходы между уровнями Ландау, по-видимому, происходят через краевые состояния.

Теория квазиупругих переходов между уровнями Ландау (QUILLS), сопровождающихся передачей энергии и импульса фононам, была построена в работе [13], где было найдено, что критическое поле пробоя имеет характерную величину  $\hbar\omega_c/el_B$ , где  $e$  — элементарный заряд,  $l_B$  — магнитная длина, которая составляет несколько десятков нанометров. Учитывая экспериментальный факт, что электрическое поле между краем и объемом ДЭГ возникает лишь в узкой области вдоль края шириной  $W_0 \sim 0.5-1$  мкм [6,10] и умножив эту ширину на характерную величину критического поля и заряд электрона, получим разность электрохимических потенциалов  $\Delta\mu \approx (W_0/l_B) \cdot \hbar\omega_c = (10-20)\hbar\omega_c$ , что полностью согласуется с экспериментально наблюдаемым неравновесием.

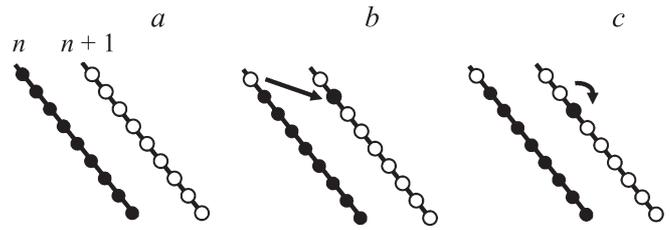


Рис. 5. Схематическое изображение перехода электрона между уровнями Ландау на краю и последующей термализации неравновесного электрона в объеме ДЭГ.

##### 4.2. Внутриуровневые переходы

После межуровневого перехода неравновесного электрона происходит его „термализация“ за счет внутриуровневых переходов с краевых состояний в объем ДЭГ (см. рис. 5) и сопровождается передачей энергии и импульса фоновой подсистеме. Смещение электрона поперек края на величину  $\Delta x$  приводит к изменению компоненты импульса электрона вдоль края  $\hbar\Delta q_y$  на величину

$$\hbar\Delta q_y = \hbar\Delta n x / l_B^2 = eB\Delta x, \quad (1)$$

где  $l_B$  — магнитная длина. Этот импульс передается фонону, закон дисперсии которого определяется соотношением

$$\Delta E = \hbar s \Delta q_y, \quad (2)$$

где  $s$  — скорость звука.

Подставляя сюда выражение (1), получим зависимость энергии электрона от координаты на краю ДЭГ:

$$\Delta E = \omega_c m^* s \Delta x, \quad (3)$$

где  $m^*$  — эффективная масса,  $\omega_c$  — циклотронная частота.

Учитывая, что электрическое поле между краем и объемом ДЭГ возникает лишь в узкой области вдоль края шириной  $\sim 1$  мкм [6,10], и подставив это значение в уравнение (3), получим еще одну численную оценку величины дисбаланса электрохимических потенциалов края и объема ДЭГ, которая также составляет несколько  $\hbar\omega_c$ :

$$\Delta\mu = \frac{m^* s}{\hbar} \Delta x \hbar\omega_c \cong 3\hbar\omega_c. \quad (4)$$

Изменение магнитного потока в режиме КЭХ изменяет плотность состояний на уровнях Ландау, что в свою очередь приводит к переносу заряда между краем и объемом ДЭГ. Учитывая, что число краевых состояний значительно меньше числа объемных состояний, даже незначительное перераспределение заряда между краевыми и объемными состояниями приводит к значительному неравенству электрохимических потенциалов края и объема ДЭГ. Неравновесное перераспределение электронов внутри уровня Ландау, по-видимому, прекращается при достижении критического поля пробоя КЭХ на краю образца (модель межуровневых переходов). Кроме этого, на краю устанавливается электрическое поле, необходимое для „термализации“ неравновесных

краевых электронов (модель внутриуровневых переходов). Рассмотренные модели межуровневых и внутриуровневых переходов подтверждают качественные соображения и дают оценку разности электрохимических потенциалов между краем и объемом  $\Delta\mu \gg \hbar\omega_c$ , что хорошо согласуется с результатами эксперимента.

## 5. Заключение

Проведены прямые измерения разности электрохимических потенциалов между различными парами контактов в холловских мостиках, снабженных дополнительными внутренними контактами, вожженными в объем ДЭГ, как функции магнитного поля. Полученные результаты указывают на то, что неравновесное состояние ДЭГ состоит в отсутствии равновесия между краем и объемом ДЭГ и проявляет себя в разности электрохимических потенциалов между контактами, вожженными в край и в объем ДЭГ. Наблюдаемая в эксперименте разность электрохимических потенциалов между краем и объемом ДЭГ имеет огромную величину (150 мэВ), что в десятки раз превышает расстояние между уровнями Ландау ( $\hbar\omega_c \sim 10$  мэВ). Напряжение между краем и объемом возникает в магнитных полях, соответствующих холловским плато, и меняет знак при изменении развертки магнитного поля, т.е. обнаруживает гистерезисное поведение. В то же время дополнительные измерения магнетосопротивления показали, что при этом наблюдается типичное для КЭХ поведение магнетосопротивления, а области возникновения разности потенциалов находятся строго в центрах плато холловского магнетосопротивления. Появление разности потенциалов между внутренними и внешними контактами, по-видимому, является следствием неравенства электрохимических потенциалов между краевыми и объемными состояниями, возникающим в ДЭГ в режиме КЭХ в результате неравновесного перераспределения заряда между краевыми и объемными состояниями. Предложенная физическая картина, предполагающая сильное ( $\Delta\mu \gg \hbar\omega_c$ ) неравновесие между краевыми и объемными состояниями, существенно дополняет общепринятую картину КЭХ, а также позволяет объяснить ряд гистерезисных явлений, таких как гистерезисы намагниченности и магнетосопротивления, наблюдающихся в режиме КЭХ.

Авторы выражают благодарность М.В. Энтину и А.А. Шевырину за полезные обсуждения. Представленная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00405 мол\_а и научного проекта № 16-02-00579.

## Список литературы

- [1] A. Usher, M. Elliott. *J. Phys.: Condens. Matter*, **21**, 103 202 (2009).
- [2] N. Ruhe, G. Stracke, Ch. Heyn, D. Heitmann, H. Hardtdegen, Th. Schäpers, B. Rupprecht, M.A. Wilde, D. Grundler. *Phys. Rev. B*, **80**, 115 336 (2009).
- [3] V.M. Pudalov, S.G. Semenchinsky, V.S. Edelman. *Sol. St. Commun.*, **51**, 713 (1984).
- [4] V.T. Dolgoplov, A.A. Shashkin, N.B. Zhitenev, S.I. Dorozhkin, K.V. Klitzing. *Phys. Rev. B*, **46**, 12 560 (1992).
- [5] J. Huels, J. Weis, J. Smet, K.V. Klitzing, Z.R. Wasilewski. *Phys. Rev. B*, **69**, 085 319 (2004).
- [6] T. Klaffs, V.A. Krupenin, J. Weis, F.J. Ahlers. *Physica E*, **22**, 737 (2004).
- [7] М.В. Буданцев, А.Г. Погосов, А.Е. Плотников, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, Ж.К. Портал. *Письма ЖЭТФ*, **86**, 294 (2007).
- [8] М.В. Буданцев, А.Г. Погосов, А.Е. Плотников, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, Ж.К. Портал. *Письма ЖЭТФ*, **89**, 49 (2009).
- [9] М.В. Буданцев, А.Г. Погосов, А.Е. Плотников, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, Ж.К. Портал. *Письма ЖЭТФ*, **89**, 103 (2009).
- [10] M.V. Budantsev, A.G. Pogosov, D.A. Pokhobov, E.Yu. Zhdanov, A.K. Bakarov, A.I. Toropov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **456**, 012 005 (2013).
- [11] М. В. Буданцев, Д.А. Похабов, А.Г. Погосов, Е.Ю. Жданов, А.К. Бакаров, А.И. Торопов. *ФТП*, **48**, 1458 (2014).
- [12] R.B. Laughlin. *Phys. Rev. B*, **23**, 5632 (1981).
- [13] L. Eaves, F.W. Sheard, *Semicond. Sci. Technol.*, **1**, 346 (1986).

Редактор К.В. Емцев

## Imbalance of the chemical potential in a 2DEG in the quantum Hall effect regime

D.A. Pokhobov<sup>\*+</sup>, A.G. Pogosov<sup>\*+</sup>, M.V. Budantsev<sup>\*</sup>, E.Yu. Zhdanov<sup>\*+</sup>, A.K. Bakarov<sup>\*+</sup>

<sup>\*</sup> Institute of Semiconductor Physics,  
630090 Novosibirsk, Russia  
<sup>+</sup> Novosibirsk State University,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** Nonequilibrium state of a two-dimensional electron gas (2DEG) in the quantum Hall effect (QHE) regime has been studied in Hall bars equipped with additional inner contacts, placed inside the bar. The magnetic field dependence of the voltage drop between different pairs of contacts has been measured at different temperatures. The voltage drop between inner and outer contacts demonstrates peaks with significant amplitude in narrow intervals of magnetic field near the integer filling factors. Moreover, the magnetic field dependence inside these intervals demonstrates a hysteretic behaviour. At the same time voltage drop between outer contacts remains zero in the whole range of magnetic fields. The occurrence of the observed voltage peaks and their hysteretic behaviour can be explained by a charge transfer between bulk and edge of the Hall bar caused by magnetic field flux change in the QHE regime. The results of the study significantly complement the common picture of QHE, clearly indicating the presence of significant imbalance at the edge of the 2DEG: the experimentally observed difference of electrochemical potentials between the edge and the bulk is ten times greater than the distance between the Landau levels.