

Наблюдение изменений доменной структуры спонтанного электрического поля в двумерной электронной системе под микроволновым излучением

С. И. Дорожкин⁺¹⁾, В. Уманский^{*2)}, К. фон Клитцинг^{×2)}, Ю. Х. Смет^{×2)}

⁺Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черногловка, Россия

^{*}Department of Physics, Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel

[×]Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, D-70569 Stuttgart, Germany

Поступила в редакцию 28 сентября 2016 г.

После переработки 4 октября 2016 г.

На образце гетероструктуры GaAs/AlGaAs с двумерной электронной системой обнаружено, что в пределах одного индуцированного микроволновым излучением состояния со стремящимся к нулю сопротивлением возможны различные конфигурации доменов спонтанного электрического поля. Переходы между такими конфигурациями наблюдались при изменении как мощности излучения, так и магнитного поля. В общем случае конфигурация доменов оказывается сложнее существующих моделей. Для одной из наблюдавшихся конфигураций фрагмент распределения электрического поля в образце согласуется с ромбической доменной структурой, рассмотренной в работе I. G. Finkler and B. I. Halperin, Phys. Rev. B **79**, 085315 (2009).

DOI: 10.7868/S0370274X16220124

Большой интерес к свойствам неравновесных двумерных электронных систем (ДЭС) под микроволновым излучением возник в результате открытия [1, 2] индуцированных излучением гигантских осцилляций магнетосопротивления. Периодичность осцилляций в обратном магнитном поле определяется соизмеримостью кванта излучения и циклотронной энергии электронов: $2\pi\hbar f = n\hbar\omega_c$, где f – частота излучения, $\omega_c = eB/m^*c$ – циклотронная частота электронов с эффективной массой m^* в магнитном поле B ($e > 0$). Последовавшее вскоре наблюдение [3, 4], что в минимумах осцилляций магнетосопротивления, измеряемое на постоянном (низкочастотном) токе, может стремиться к нулю, значительно повысило интерес к таким исследованиям, а соответствующие состояния стали широко известны как “zero-resistance states” (ZRS)³⁾. Вскоре были предложены теоретические модели, позволяющие объяснить перечисленные экспериментальные результаты. Для осцилляций были предложены два механизма: появление дополнительного ка-

нала рассеяния электронов, связанного с непрямыми оптическими переходами [6–8], и формирование неравновесной функции распределения электронов, немонотонной по энергии [9–11]. Необходимо отметить, что возможность возникновения магнетоосцилляций за счет первого из механизмов была предсказана [12, 13] задолго до их наблюдения (более подробный список публикаций по теме см. в обзоре [14]). Любопытно, что оба механизма дают формулы для диссипативной проводимости, отличающиеся только зависящим от температуры коэффициентом [11], и предсказывают возможность отрицательной проводимости в минимумах осцилляций. Очевидно, что однородные состояния с отрицательной проводимостью должны быть неустойчивы. Применительно к ZRS спонтанное формирование неоднородной структуры было предсказано в работе [15]. Такая структура образуется доменами с фиксированной величиной электрического поля (и, соответственно, плотности холловского тока), разнонаправленного в соседних доменах. Прекурсор такой структуры был получен в работе [16] для системы конечного размера с отрицательной диссипативной проводимостью, стабильность которой обеспечивается положительным коэффициентом диффузии электронов. В работе [15] было предложено идентифицировать возникновение доменов электрического поля по появлению разности

¹⁾e-mail: dorozh@issp.ac.ru

²⁾V. Umansky, K. von Klitzing, J. H. Smet.

³⁾Для полноты картины надо отметить, что ZRS наблюдаются в классически сильных магнитных полях, и в них к нулю стремятся диссипативные компоненты как тензора магнетосопротивления, так и тензора магнетопроводимости [5].

электрических потенциалов между объемом и границей образца, измеряемой с использованием внутренних контактов. Первые исследования в этом направлении [17, 18] показали, что под влиянием облучения разность потенциалов возникает при всех значениях магнитного поля, а не только в ZRS. Более того, такая микроволновая фото-электродвижущая сила (фото-ЭДС) осциллирует в функции магнитного поля аналогично магнетосопротивлению и с тем же периодом. В отличие от магнетосопротивления осцилляции фото-ЭДС происходят относительно нулевого уровня. Знакопеременные магнито-осцилляции микроволновой фото-ЭДС были наблюдаемы также в образцах геометрии Корбино [19], где оба контакта располагаются на границе ДЭС, но сильно отличаются длиной контактной линии. Осцилляции объясняются [20] наличием в образце встроенного электрического поля и нарушением соотношения Эйнштейна между проводимостью и коэффициентом диффузии электронов в неравновесной ДЭС под облучением. Основным источником встроенного поля является, по-видимому, загиб зон около легированных контактов. В результате такая микроволновая фото-ЭДС маскирует спонтанное электрическое поле доменов. Выделить это спонтанное поле удалось в образцах, демонстрирующих в ZRS нерегулярные переключения фото-ЭДС преимущественно между двумя разными значениями [21, 22], а также автоколебания фото-ЭДС [23]. Временная нестабильность микроволновой фото-ЭДС в ZRS наблюдалась и другими авторами [17, 24]. Как было показано в работе [22], переключения фото-ЭДС между двумя значениями соответствуют изменению направления спонтанного электрического поля в доменах на противоположное без заметного изменения геометрии доменов. Установление этого факта позволяет характеризовать доменную структуру на основании данных о переключениях фото-ЭДС, полученных при помощи набора внутренних контактов, распределенных по образцу.

Доменная структура должна обеспечивать эквивалентность периметра образца, т.е. в значительной степени определяется его геометрией. Естественно, что флуктуационный потенциал также влияет на доменную структуру, однако считается [25], что в случае малого радиуса действия этого потенциала его влияние носит локальный характер. Здесь мы остановимся на доменной структуре в образцах прямоугольной формы [15, 26, 27], соответствующей форме исследованного нами образца. До сих пор теоретически анализировались только три геометрии доменов: полосковая [15, 26, 27], ромбическая и треугольная [26, 27], показанные на рис. 1. В полоско-

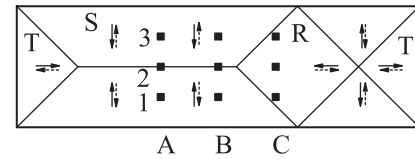


Рис. 1. Отмасштабированная схема образца с внутренними потенциальными контактами (темные квадраты). Тонкими линиями изображены границы доменов для структуры, предложенной в работе [27]. Треугольные, полосковый и ромбический домены обозначены буквами T, S и R, соответственно. Конфигурация спонтанного электрического поля в доменах показана сплошными и пунктирными стрелками для двух равновероятных конфигураций поля, между которыми наблюдаются переключения. Абсолютное значение электрического поля одинаково во всех доменах

вой геометрии спонтанное электрическое поле перпендикулярно границам доменов, а в треугольной и ромбической составляет с ними угол в 45° . Треугольные домены возникают около торцов образца и обеспечивают их эквипотенциальность. Отметим нетривиальный характер ромбической доменной структуры. Согласно работе [27], ее возникновение и сосуществование с полосковой оказываются возможными даже в неограниченной полоске вследствие одинаковости вкладов в функционал Ляпунова доменных границ для этих двух геометрий. Важной особенностью треугольного и ромбического доменов является равенство потенциалов спонтанного электрического поля вдоль прямолинейных отрезков, расположенных внутри домена и перпендикулярных горизонтальной оси образца. То есть для случая, показанного на рис. 1, потенциалы контактов C1, C2 и C3, обусловленные спонтанным электрическим полем доменов, одинаковы.

В данной работе доменная структура, возникающая в ZRS, изучалась при помощи матрицы из 9 внутренних потенциальных контактов. Такая методика не позволяет получить полную картину доменов в образце, особенно если таковая имеет сложную структуру, однако дает возможность изучать ее свойства и проводить сравнение с существующими моделями. Мы сообщаем о наблюдении переходов между различными доменными структурами, происходящих скачкообразно в пределах одного ZRS, а также фрагмента, соответствующего ромбическому домену.

Исследование выполнено на образце с ДЭС, изготовленном из гетероструктуры GaAs/AlGaAs в форме холловского мостика длиной 2.8 мм и шириной 0.6 мм (рис. 1). При гелиевых температурах плотность электронов в ДЭС равнялась $n_s = 2.6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а их подвижность $\mu = 6 \times 10^6 \text{ см}^2/\text{В.с}$.

Легированные контакты были созданы как по периметру мостика (на рис. 1 не показаны), так и внутри него. Девять внутренних контактов образовали прямоугольную матрицу 3×3 . Средний контакт матрицы был совмещен с центром мостика. На рисунке 1 горизонтальные ряды контактов пронумерованы, а вертикальные обозначены латинскими буквами. Расстояние между вертикальными рядами составляло 0.4 мм, а между горизонтальными – 0.15 мм. Размер внутренних контактов 0.06×0.06 мм². Образец был установлен в центре прямоугольного волновода сечением 6×12 мм² в криостате с жидким ³He. Магнитное поле было направлено перпендикулярно плоскости ДЭС. Температура измерений 1.5 К. Измерения выполнялись при непрерывном облучении постоянной мощности. Используемый генератор позволял получать излучение частоты f до 50 ГГц с мощностью P на выходе генератора до 5 мВт. Как показали измерения, внешние контакты, расположенные на периметре образца, имели одинаковый потенциал. Микроволновая фото-ЭДС измерялась между внутренним и внешним контактами. Соответствующее напряжение усиливалось предусилителем SR 560 с установленной полосой 0–10 кГц и регистрировалось цифровым запоминающим осциллографом с полосой до 4 ГГц. Одновременно регистрировались сигналы с трех различных внутренних контактов. Длительность записи обычно составляла 200 мс, а длина – 256000 значений на канал. Каждая запись дублировалась.

На рис. 2а–с приведены фрагменты зависимостей от времени напряжений на трех контактах, расположенных в столбце С, для трех значений микроволновой мощности. Результаты, показанные на рис. 2а, с, демонстрируют типичную картину [21, 22] квазипериодических переключений фото-ЭДС, происходящих при номинально постоянных внешних условиях. Прежде всего необходимо отметить синхронность импульсов на различных контактах, которая является свидетельством существования крупномасштабной структуры электрического поля, претерпевающей быстрые квазипериодические изменения между двумя конфигурациями. Как было показано в работе [22], основным содержанием этих изменений является переверт спонтанных электрических полей. В первом приближении импульсы представляют собой переключения между двумя уровнями фото-ЭДС с длительностью сигнала на верхнем (нижнем) уровне τ^{up} (τ^{dn}) (рис. 2а). Отметим асимметрию отрицательных и положительных импульсов, наблюдаемую на рис. 2а. Отрицательные импульсы имеют трапецеидальную форму, характеризующуюся моно-

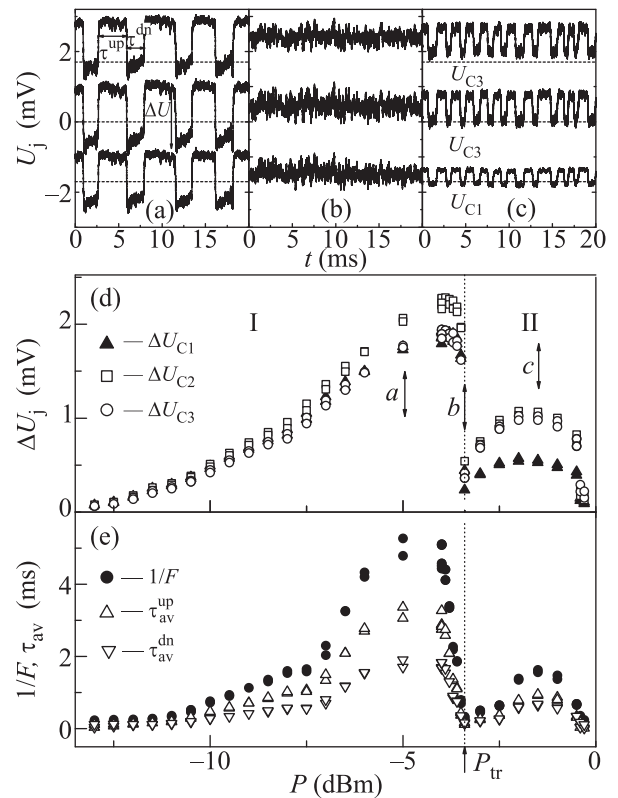


Рис. 2. (а)–(с) – Фрагменты зависимостей от времени напряжений U_j на контактах C1, C2 и C3 (снизу вверх) для разных значений микроволновой мощности P : (а) – $P = -5.0$ дБм; (б) – $P = -3.4$ дБм; (с) – $P = -1.5$ дБм. Верхняя и нижняя кривые смещены по вертикали на +1.7 и –1.7 мВ, соответственно. Нулевые уровни сигнала для каждой из кривых показаны пунктирными линиями. На рис. 2а показаны способы определения характеристик импульсов ΔU , τ^{up} и τ^{dn} . (d) – Зависимости от мощности величин ΔU_j , измеренных на разных контактах и усредненных по всем импульсам, зарегистрированным за время измерения. Данные приведены для всех записей, включая дублирующие. Стрелками a – c отмечены значения мощности, при которых были сделаны записи, показанные на панелях (а)–(с), соответственно. (e) – Зависимости от мощности обратной величины средней частоты следования импульсов F , а также длительностей τ_{av}^{up} и τ_{av}^{dn} , усредненных по всем импульсам. Вертикальная точечная прямая, проведенная через значение $P = P_{tr}$, разделяет области мощности I и II, соответствующие разным доменным структурам. Магнитное поле $B = 0.078$ Тл, частота излучения $f = 40.12$ ГГц

тонным возрастанием сигнала в промежутках между переключениями. В результате максимальная величина изменения напряжения при переключениях ΔU наблюдается на передних фронтах отрицательных импульсов. В дальнейшем для количественного описания переключений мы будем использовать ве-

личины ΔU , τ^{up} и τ^{dn} , усредненные по всем импульсам, зарегистрированным за время измерения. Упомянутая асимметрия проявляется также в различии длительностей сигнала на разных уровнях: τ^{up} обычно превышает τ^{dn} .

Зависимости ΔU_j , где j нумерует контакт, от мощности микроволнового излучения приведены на рис. 2d для контактов ряда С. Из этих данных очевидно, что в узком интервале мощности около значения $P \equiv P_{\text{tr}} = -3.4$ дБм происходит изменение доменной структуры. Действительно, если при $P < P_{\text{tr}}$ (область I) величины ΔU примерно равны для всех трех контактов, то при $P > P_{\text{tr}}$ (область II) $\Delta U_{C1} < \Delta U_{C2} \approx \Delta U_{C3}$. Кроме того, как видно из сравнения рис. 2a, c, в области II импульсы становятся более симметричными. Это проявляется также в уменьшении разницы между величинами $\tau_{\text{av}}^{\text{up}}$ и $\tau_{\text{av}}^{\text{dn}}$ (рис. 2e). При $P = P_{\text{tr}}$ величины ΔU_j резко уменьшаются, а средняя частота импульсов F (рис. 2e) сильно возрастает. В этой точке исчезает и квазипериодичность переключений. В результате сигналы с разных контактов, оставаясь коррелированными, приобретают форму шума (рис. 2b).

Остановимся подробнее на области I. Так как переключение между двумя значениями микроволновой фото-ЭДС соответствует изменению знака спонтанного электрического поля [22], примерное равенство амплитуд импульсов означает, что потенциал спонтанного электрического поля примерно одинаков на всех контактах столбца С. Как отмечалось выше, в рамках рассмотренных моделей такое возможно для ромбической или треугольной геометрии доменов и расположении всех контактов внутри одного домена. Для исследованного образца, в котором контакты столбца С находятся достаточно далеко от правого края образца, возможно только попадание контактов в ромбический домен (рис. 1). В случае примыкания ромбического домена к треугольному, как это изображено на рис. 1, все контакты столбца С действительно оказываются внутри одного ромбического домена. В области II $\Delta U_{C1} < \Delta U_{C3}$, т.е. сигналы с контактов, расположенных симметрично относительно горизонтальной оси образца, становятся различными. Следовательно, геометрия доменной структуры теряет симметрию относительно этой оси. Такие асимметричные структуры до сих пор не рассматривались. Отметим, что измерения с рядов А и В контактов всегда демонстрировали подобную асимметрию. Это значит, что наши наблюдения в режиме I согласуются только с фрагментом доменной структуры на рис. 1, расположенном в правой части образца и захватывающем ряд С контактов. Экс-

перимент указывает также на возникновение очень сложной структуры в точке перехода при $P = P_{\text{tr}}$. Во всех этих случаях, очевидно, интерпретация результатов в рамках существующих простых моделей доменных структур становится невозможной.

Аналогичный описанному выше переход между двумя различными доменными структурами наблюдается и при изменении величины магнитного поля, как это показано на рис. 3. Более того, на этом ри-

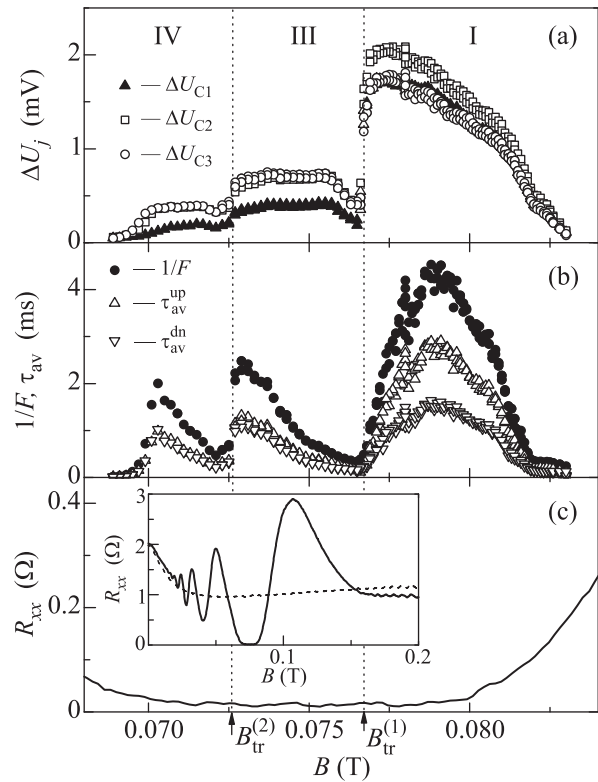


Рис. 3. Зависимости от магнитного поля величин ΔU_j (a), $1/F$, $\tau_{\text{av}}^{\text{up}}$ и $\tau_{\text{av}}^{\text{dn}}$ (b). (c) – Магнетосопротивление для того же диапазона магнитных полей, что и на рис. a, b. На вставке магнетосопротивление показано для более широкой области поля. Пунктирной кривой представлено сопротивление в отсутствие облучения. Вертикальные точечные линии выделяют области магнитного поля I, III и IV с разной доменной структурой. Частота излучения $f = 40.12$ ГГц, мощность $P = -4.0$ дБм

сунке видны два перехода, происходящие при значениях магнитного поля $B_{\text{tr}}^{(1)}$ и $B_{\text{tr}}^{(2)}$. Эти значения разделяют области полей I, III и IV, отмеченные на рис. 3⁴⁾. Представляет интерес проследить, что

⁴⁾ Отметим, что области I на рис. 2, 3 имеют общую точку: $P = -4$ дБм, $B = 0.078$ Тл. На этом основании мы считаем, что эти области есть сечения двумерной области I параметров P и B , в которой реализуется одна и та же доменная структура.

происходит с величиной магнетосопротивления при этих переходах. Результат такого эксперимента показан на рис. 3с. Приведенная на этом рисунке зависимость магнетосопротивления от магнитного поля была измерена в тех же условиях, при которых были получены данные для рис. 3а, б. Очевидно, что при изменении доменной структуры магнетосопротивление заметно не меняется, оставаясь близким к нулю. Таким образом показано, что в пределах одного ZRS могут реализоваться различные доменные структуры.

Для сравнения переходов по магнитному полю и по мощности излучения представляется полезным сравнить соотношения амплитуд импульсов и величин $\tau_{av}^{dn}/\tau_{av}^{up}$, которые заметно различаются по разные стороны от переходов. Такие результаты показаны на рис. 4. Из рисунка 4а очевидно, что при переходах скачком изменяется величина $\Delta U_{C1}/\Delta U_{C2}$, причем ее изменения примерно одинаковы на переходах по мощности и по магнитному полю. В результате значения этой величины оказываются близкими в областях параметров II (темные точки при $P > P_{tr}$) и III (светлые точки при $B < B_{tr}^{(1)}$). Подобное поведение, хотя выраженное менее ярко, демонстрирует величина $\tau_{av}^{dn}/\tau_{av}^{up}$ (рис. 4б). Это наблюдение дает основания думать, что наблюдаемые переходы по мощности и магнитному полю (при $B_{tr}^{(1)}$) сопровождаются одинаковым изменением конфигурации доменов. Величина же электрического поля в доменах оказывается различной.

В данной работе обнаружены переходы между различными конфигурациями доменов спонтанного электрического поля, возникающих под действием микроволнового излучения. Установлено, что реализующиеся в эксперименте доменные структуры в общем случае гораздо сложнее существующих модельных. Для одной из структур обнаружено, что геометрия спонтанного поля, наблюдающаяся в части образца, согласуется с доменной структурой, рассмотренной в работе [27].

Автор С.И. Дорожкин благодарен А.А. Капустину за полезные обсуждения. Работа была поддержана грантом Российского научного фонда (проект # 14-12-00599).

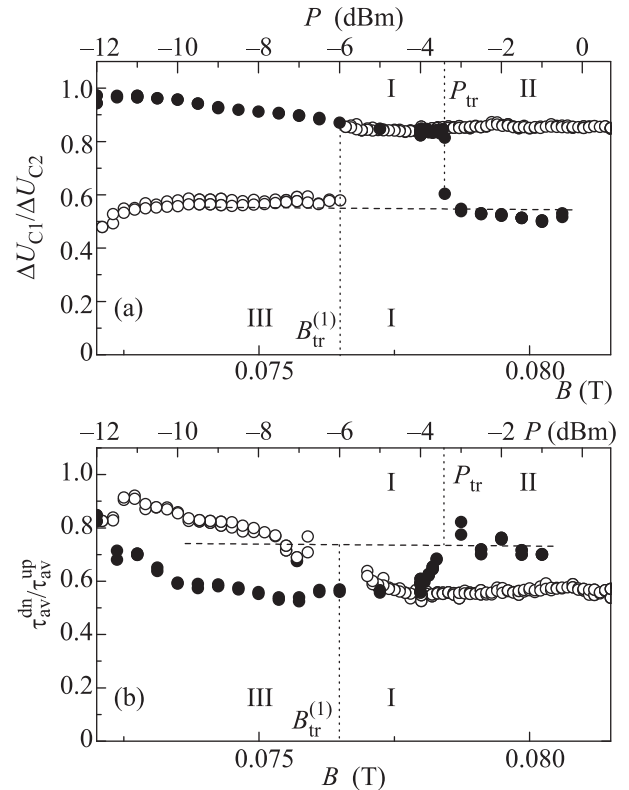


Рис. 4. Зависимость величин $\Delta U_{C1}/\Delta U_{C2}$ (а) и $\tau_{av}^{dn}/\tau_{av}^{up}$ (б) от магнитного поля при $P = -4$ дБм (светлые кружки, нижняя ось) и микроволновой мощности при $B = 0.078$ Тл (темные кружки, верхняя ось). Вертикальные точечные линии проведены через значения $P = P_{tr}$ на верхней и $B = B_{tr}^{(1)}$ на нижней частях рисунков. Шкалы на верхней и нижней горизонтальных осях выбраны таким образом, что значения $P = -4$ дБм и $B = 0.078$ Тл соответствуют одной и той же абсциссе. Горизонтальные пунктирные линии проведены для демонстрации близости результатов в областях параметров II и III

1. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons, and J. L. Reno, Phys. Rev. B **64**, 201311(R) (2001).
2. P. D. Ye, L. W. Engel, D. C. Tsui, J. A. Simmons, J. R. Wendt, G. A. Vawter, and J. L. Reno, Appl. Phys. Lett. **79**, 2193 (2001).

3. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing, V. Narayanamurti, W. B. Jonson, and V. Umansky, Nature **420**, 646 (2002).
4. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **90**, 046807 (2003).
5. C. L. Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuutila, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **91**, 096803 (2003).
6. A. C. Durst, S. Sachdev, N. Read, and S. M. Girvin, Phys. Rev. Lett. **91**, 086803 (2003).
7. V. Ryzhii, A. Chaplik, and R. Suris, Письма в ЖЭТФ **80**, 412 (2004) [JETP Lett. **80**, 363 (2004)].
8. M. G. Vavilov and I. L. Aleiner, Phys. Rev. B **69**, 035303 (2004).
9. S. I. Dorozhkin, Письма в ЖЭТФ **77**, 681 (2003) [JETP Lett. **77**, 577 (2003)].

10. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, and D. G. Polyakov, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 226802 (2003).
11. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner, A. D. Mirlin, and D. G. Polyakov, *Phys. Rev. B* **71**, 115316 (2005).
12. В. И. Рыжий, *ФТТ* **11**, 2577 (1969) [*Sov. Phys. Solid State* **11**, 2078 (1970)].
13. В. И. Рыжий, Р. А. Сулис, Б. С. Шамхалова, *ФТП* **20**, 2078 (1986) [*Sov. Phys. Semicond.* **20**, 1299 (1986)].
14. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, and M. A. Zudov, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1709 (2012).
15. A. V. Andreev, I. L. Aleiner, and A. J. Millis, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 056803 (2003).
16. S. I. Dorozhkin, I. A. Dmitriev, and A. D. Mirlin, *Phys. Rev. B* **84**, 125448 (2011).
17. R. L. Willett, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 026804 (2004).
18. S. I. Dorozhkin, I. V. Pechenezhskiy, L. N. Pfeiffer, K. W. West, V. Umansky, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 036602 (2009).
19. А. А. Быков, *Письма в ЖЭТФ* **87**, 281 (2008).
20. I. A. Dmitriev, S. I. Dorozhkin, and A. D. Mirlin, *Phys. Rev. B* **80**, 125418 (2009).
21. S. I. Dorozhkin, L. Pfeiffer, K. West, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Nature Phys.* **7**, 336 (2011).
22. S. I. Dorozhkin, V. Umansky, L. N. Pfeiffer, K. W. West, K. Baldwin, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 176808 (2015).
23. С. И. Дорожкин, *Письма в ЖЭТФ* **102**, 101 (2015).
24. А. А. Быков, *Письма в ЖЭТФ* **91**, 390 (2010).
25. A. Auerbach, I. Finkler, B. I. Halperin, and A. Yacoby, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 196801 (2005).
26. I. Finkler, B. I. Halperin, A. Auerbach, and A. Yacoby, *J. Stat. Phys.* **125**, 1093 (2006).
27. I. G. Finkler and B. I. Halperin, *Phys. Rev. B* **79**, 085315 (2009).