

Замораживание динамики доменов спонтанного электрического поля в индуцированных микроволновым излучением состояниях с малой диссипацией

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 4 июня 2018 г.

После переработки 2 июля 2018 г.

В индуцированных микроволновым излучением состояниях двумерной электронной системы, характеризующихся почти бездиссипативным протеканием низкочастотного тока, выполнены исследования температурной зависимости микроволновой фото электродвижущей силы. При понижении температуры обнаружен плавный переход от бистабильного состояния, в котором фото электродвижущая сила демонстрирует переключения между двумя уровнями, связываемые с переворотами спонтанного электрического поля в доменной структуре, к стационарному состоянию. Переход происходит за счет смещения одного из уровней бистабильной фото электродвижущей силы к другому уровню и уменьшения частоты переключений. Полученные результаты свидетельствуют о замораживании динамической доменной структуры в состоянии, соответствующем более устойчивой конфигурации электрического поля.

DOI: 10.1134/S0370274X18150134

Значительное уменьшение диссипации при протекании низкочастотного тока через образцы с двумерными электронными системами, наблюдающееся под влиянием микроволнового излучения [1–4], обусловило большой интерес к свойствам неравновесных двумерных электронных систем под облучением. Подробный обзор исследований в этой области, выполненных до 2011 г., представлен в работе [5]. Состояния со стремящейся к нулю диссипацией, широко известные как “zero-resistance states” (ZRSs) [1], возникают в минимумах индуцированных микроволновым излучением осцилляций магнетосопротивления (“microwave induced resistance oscillations” – MIRO) [6, 7], когда магнетосопротивление, измеряемое на образцах холловской геометрии, стремится к нулю. Оказалось [3], что, как и в случае осцилляций Шубникова–де Гааза в классически сильных магнитных полях, минимумы магнетосопротивления соответствуют минимумам магнетопроводимости, в результате чего сопротивление образцов геометрии Корбино в ZRSs демонстрирует сильный рост. В то время как для объяснения индуцированных излучением осцилляций магнетосопротивления предложены

различные механизмы (см. обзор [5]), фактически единственное предложенное объяснение ZRSs [8] (см. также работы [9–11]) состоит в возникновении статической доменной структуры спонтанного электрического поля, направление которого различно в разных доменах. При этом в образце текут холловские токи, перпендикулярные электрическому полю. Эксперименты, направленные на поиск спонтанного электрического поля [12–14], показали, что микроволновое излучение может индуцировать стационарную фото-ЭДС, не связанную с ZRSs, существующую при всех значениях магнитного поля и осциллирующую относительно нулевого значения в функции поля [14]. Возникновение такой фото-ЭДС связано с существованием в образце встроенных электрических полей [14, 15], возникающих как вследствие ограниченности образца, так и модуляции потенциала, обусловленной различного типа неоднородностями, включая загиб зон около легированных контактов. Такая фото-ЭДС маскирует возникновение доменной структуры, а ее величина оказывается зависящей от конкретного образца [16]. Надежным свидетельством существования спонтанного электрического поля явилось наблюдение квазипериодических переключений микроволновой фото-ЭДС между двумя различными уровнями, происходящих в номиналь-

¹⁾e-mail: dorozh@issp.ac.ru

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

но стационарных внешних условиях исключительно в ZRSs [17]. Эффект переключений оказался связанным с изменением направления электрического поля на противоположное [16]. Этот результат находится в полном качественном согласии с картиной спонтанного нарушения симметрии при возникновении доменов, в которой состояния с противоположными ориентациями электрического поля являются равновероятными [8, 10].

Оказалось [18], что динамическая доменная структура наблюдается на образцах, изготовленных из гетероструктур GaAs/AlGaAs, в которых возможно движение зарядов в слое легирования, а средняя частота квазипериодических переключений коррелирует с проводимостью слоя. Это наблюдение явилось подтверждением идеи [19], что переключения являются следствием бистабильности спонтанного электрического поля и его экранирования зарядами слоя легирования. В отсутствие эффекта экранирования переключения между состояниями с противоположной ориентацией спонтанного электрического поля [10] могли бы происходить за счет флуктуаций. Возникающее в результате экранирования внешнее по отношению к двумерной электронной системе электрическое поле зарядов слоя легирования имеет ориентацию, противоположную спонтанному электрическому полю, и приводит к перевороту последнего [19]. После переворота начинается экранирование новой конфигурации спонтанного поля и процесс повторяется. В результате возникают автоколебания электрического поля, частота которых определяется временем динамического экранирования и оказывается прямо пропорциональной проводимости экранирующего слоя [19]. Флуктуации приводят к отклонениям автоколебаний от периодичности.

Проводимость слоя легирования зависит от температуры термоактивационным образом [18, 21, 20], в результате чего термоактивационным образом меняется и частота переключений микроволновой фото-ЭДС [18]. В данной работе мы представляем результаты по зависимости от температуры уровня микроволновой фото-ЭДС, между которыми происходят переключения, а также сообщаем о наблюдении исчезновения эффекта переключений при низкой температуре. Значение фото-ЭДС, реализующееся в возникающем стационарном состоянии, оказывается близким к максимальному уровню фото-ЭДС, который наблюдается при переключениях. Это наблюдение свидетельствует о “замораживании” одной из двух конфигураций спонтанного электрического поля и возникновении

статической доменной структуры, первоначально предсказанной теоретически [8].

Нами были исследованы три образца, изготовленные из одной гетероструктуры GaAs/AlGaAs, в которой селективное легирование было выполнено в тонкий слой GaAs. Такой способ легирования [22] позволяет получать образцы с высокой подвижностью двумерных электронов и наблюдать тонкие квантовые эффекты [23]. При этом, однако, проводимость слоя легирования может иметь заметную величину даже при низких температурах. Для данной гетероструктуры удалось измерить проводимость в области температур от 2 до 4 К, где ее величина менялась термоактивационным образом, а сопротивление слоя уменьшалось от 62 до 5.4 МОм/квадрат [18]. Образцы имели форму холловских мостиков. Для измерения микроволновой фото-ЭДС в мостиках дополнительно создавались внутренние омические контакты. Для изучения латерального распределения спонтанного электрического поля в образце обычно создавалась сетка из девяти внутренних контактов размером 60×60 мкм (подробнее см., например, работу [18]). Сигнал микроволновой фото-ЭДС измерялся при постоянном облучении образца между одним из внутренних контактов и внешним контактом, выбор которого не имел значения в силу очень малой величины микроволновой фото-ЭДС между различными внешними контактами [14]. Сигнал усиливался малошумящим усилителем, верхняя частота пропускания которого устанавливалась в пределах от 10 кГц до 1 МГц, и регистрировался многолучевым запоминающим осциллографом. Одновременно измерялись сигналы с трех различных внутренних контактов. Производились записи сигналов длительностью от 10 до 200 мс, каждая из которых содержала 256000 точек. В дальнейшем эти записи обрабатывались для получения средних величин частоты переключений микроволновой фото-ЭДС, длительности верхних и нижних импульсов, а также их амплитуды. Образцы размещались в прямоугольном волноводе сечением 6×12 мм и погружались в жидкий ^3He . Температура ванны изменялась откачкой паров ^3He ($T < 1.5$ К), а при более высоких температурах – откачкой паров ^4He в одноградусной камере, и измерялась калиброванным термометром. Плоскость двумерной электронной системы располагалась перпендикулярно волноводу и магнитному полю, которые были одинаково ориентированы.

Все исследованные образцы демонстрировали качественно одинаковые результаты. Ниже приведены данные, полученные на одном из образцов, в котором величина стационарной микроволновой фото-ЭДС,

связанной со встроенными в образце электрическими полями, была мала по сравнению с амплитудой переключений нестационарной фото-ЭДС, наблюдавшей исключительно в ZRS (см. рис. 1). На рисунке 1а

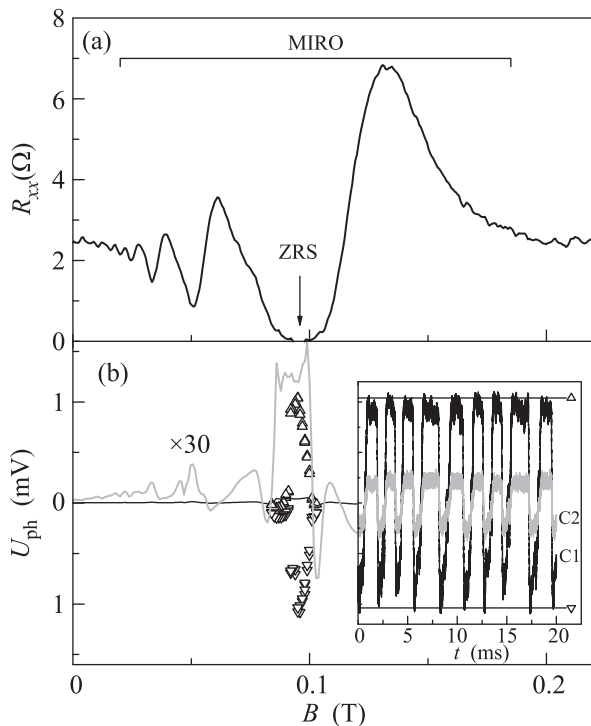


Рис. 1. Магнетосопротивление R_{xx} (a) и микроволновая фото-ЭДС U_{ph} (b), измеренные под непрерывным облучением частоты $f = 50$ ГГц, мощности на выходе генератора $P = -6$ дБм и температуре $T = 1.4$ К. На панели (b) показаны зависимости от магнитного поля фото-ЭДС, измеренной при помощи вольтметра постоянного тока (сплошные линии, светлая линия представляет величину, умноженную на 30) и амплитудных значений нестационарной фото-ЭДС (треугольники). Пример временной зависимости, измеренной в магнитном поле $B = 0.095$ Тл, приведен темной кривой C1 на вставке, где горизонтальными линиями, обозначенными треугольниками, отмечены амплитудные уровни сигнала. Светлой кривой C2 показан сигнал микроволновой фото-ЭДС, измеренный с другого внутреннего контакта, отстоящего на 150 мкм. Шкалы вертикальных осей на основном рисунке и вставке одинаковы

показаны индуцированные излучением осцилляции магнетосопротивления (MIRO), в основном минимуме которых величина магнетосопротивления стремится к нулю, реализуя ZRS. На рисунке 1b приведены зависимости от магнитного поля стационарной фото-ЭДС и экстремумов нестационарной фото-ЭДС, временная зависимость которой показана для двух контактов на вставке. Нестационарная фото-

ЭДС существует только в ZRS, а амплитуда переключений быстро падает при отходе от магнитного поля, соответствующего центру ZRS. Наблюдаемые синхронные переключения фото-ЭДС, измеренной на разных контактах, являются свидетельством корреляции фото-ЭДС на больших пространственных масштабах, связываемой с доменной структурой электрического поля [17]. Как видно из рис. 1b, при переключениях фото-ЭДС меняет свой знак. Такое поведение типично для образцов с малой величиной стационарной фото-ЭДС и свидетельствует о инверсии спонтанного электрического поля в доменах [16].

Типичная эволюция сигнала микроволновой фото-ЭДС при изменении температуры иллюстрируется панелями рис. 2а–f. Очевидным является

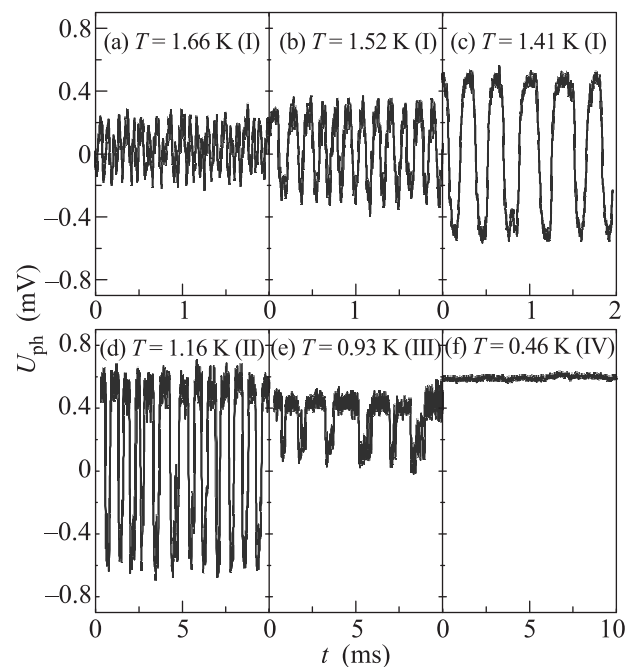


Рис. 2. Фрагменты временных зависимостей сигнала микроволновой фото-ЭДС U_{ph} , измеренного между внутренним и внешним контактами, для нескольких температур, указанных на соответствующих панелях (a)–(f). Отметим пятикратное различие шкал времени на верхних (a)–(c) и нижних (d)–(f) панелях. Измерения выполнены в магнитном поле $B = 92$ мТ под постоянным облучением частоты $f = 47.0$ ГГц, и мощности на выходе генератора $P = -6$ дБм. Отнесение панелей к областям температур I–IV сделано в соответствии с определением этих областей в тексте и на рис. 3

уменьшение частоты следования импульсов по мере понижения температуры (рис. 2а–е) и исчезновение импульсов при низких температурах (рис. 2f). Величина же фото-ЭДС меняется более сложным образом. Подробно это изменение показано на рис. 3а.

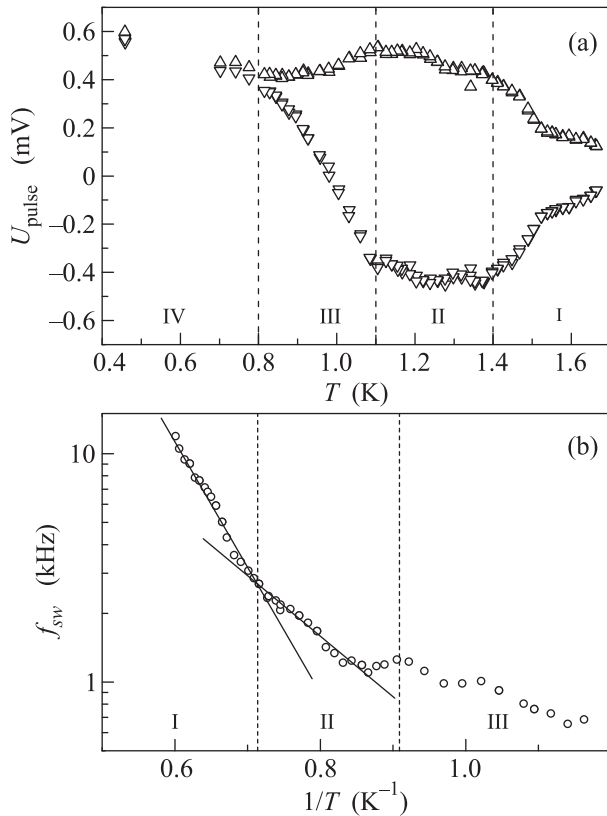


Рис. 3. Результаты обработки серии измерений, иллюстрируемые рис. 2. (а) – Зависимости от температуры средней величины микроволновой фото-ЭДС для отрицательных (треугольники с вершинами вниз) и положительных (треугольники с вершинами вверх) импульсов. Пунктирные линии отмечают области температур I, II, III и IV с различными температурными зависимостями сигналов фото-ЭДС (см. текст). (б) – Зависимость средней частоты импульсов от обратной температуры. Сплошные прямые линии соответствуют термоактивационным зависимостям с энергиями активации $\Delta_I = 12.7$ K и $\Delta_{II} = 6.2$ K в областях I и II соответственно. Разделение на различные области температур совпадает с приведенным на панели (а)

На этом рисунке представлены температурные зависимости средних величин микроволновой фото-ЭДС в максимумах и минимумах импульсов. На основании этих данных можно выделить четыре области температур (I, II, III и IV), поведение фото-ЭДС в которых проиллюстрировано рис. 2а–f. В первой из этих областей при понижении температуры наблюдается заметный рост амплитуды переключений. Существенно, что этот рост происходит как за счет увеличения фото-ЭДС в максимумах сигнала, так и за счет ее уменьшения в минимумах, так что сигнал остается примерно симметричным относительно нулевого уровня. В области II амплитуда меняется

слабо. Область III характеризуется слабой температурной зависимостью фото-ЭДС в максимумах сигнала, и ее быстрым ростом в минимумах. В конечном итоге при низких температурах (область IV) переключения исчезают и микроволновая фото-ЭДС становится независимой от времени (с точностью до уровня шума). При этом устанавливается значение фото-ЭДС, близкое к максимальному, наблюдавшемуся на кривых с переключениями. Изменение средней частоты переключений с температурой показано на рис. 3б (см. также работу [18]). Границы областей на этом рисунке соответствуют установленным на рис. 3а. Вблизи границы между областями I и II происходит заметное изменение температурной зависимости частоты переключений, которое может быть описано как изменение энергии активации, что продемонстрировано пересекающимися сплошными прямыми линиями. В области III происходит дальнейшее уменьшение частоты переключений, которые при этом становятся все более хаотическими (см. рис. 2е) и исчезают при низких температурах (область IV, рис. 2f). Экстраполяция температурной зависимости сопротивления слоя, измеренной в интервале 2–4 K [18] на границу области IV ($T = 0.8$ K) дает значение 170 ГОм/квадрат.

Представленное на рис. 3а поведение микроволновой фото-ЭДС указывает на наличие асимметрии двух состояний системы, между которыми происходят переключения. Наличие такой асимметрии очевидно и из формы импульсов, показанных на рис. 2д, е. Действительно, вершины положительных импульсов являются более плоскими, чем отрицательных, а длительность положительных импульсов больше, чем отрицательных. Изменение с температурой отношения этих длительностей показано на рис. 4а. Эта величина всегда больше единицы и возрастает при понижении температуры. В экспериментах по измерению зависимости микроволновой фото-ЭДС от времени при включении излучения (рис. 4б) было обнаружено, что первоначально всегда возникает положительный сигнал фото-ЭДС и только потом появляются отрицательные импульсы, быстро увеличивающиеся по амплитуде. Далее на временах порядка нескольких секунд возможно некоторое изменение амплитуды импульсов (при типичных использованных мощностях это изменение не превышало 20%), связанное, по-видимому, с разогревом образца как целого и повышением температуры ванны. Таким образом, состояние с положительной величиной фото-ЭДС во внутренней части образца (на внутренних контактах) является более устойчивым и реализует стационарное состояние при низкой темпе-

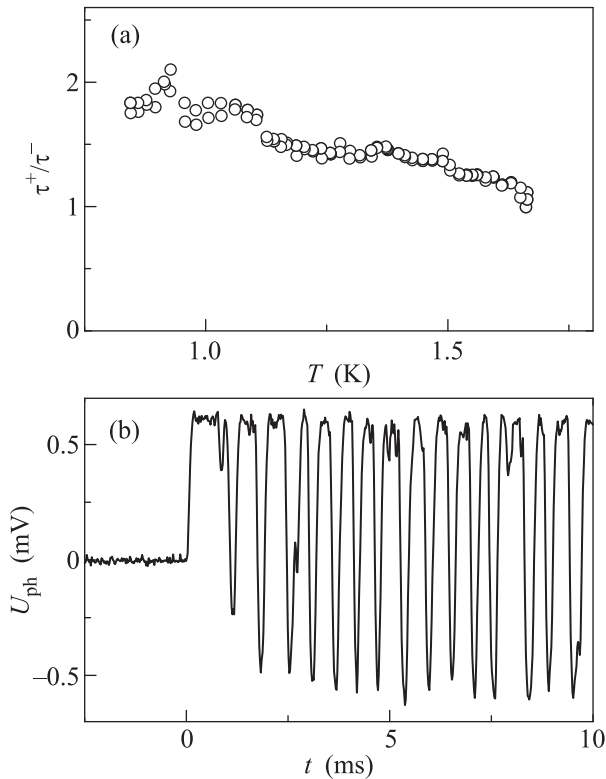


Рис. 4. (а) – Зависимость от температуры отношения длительности положительных импульсов к длительности отрицательных τ^+/τ^- , полученная на основании обработки тех же данных, что и результаты, показанные на рис. 3. (б) – Зависимость от времени сигнала микроволновой фото-ЭДС при включении ($t = 0$) излучения. Измерения выполнены в тех же условиях, что и для рис. 2 ($B = 92$ мТ, $f = 47.0$ ГГц, $P = -6$ дБм) при температуре $T = 1.4$ К

ратуре. Остается неясным, обусловлена ли наблюдаемая асимметрия существованием границы образца или связана с наличием внутренних контактов.

Рост амплитуды переключений при одновременном сохранении симметрии сигнала относительно нулевого значения, наблюдаемый в температурном диапазоне I, хорошо укладывается в представления об изменении знака спонтанного электрического поля в доменах как основном содержании эффекта переключений фото-ЭДС [16]. Такая инверсия спонтанного электрического поля предсказывается и моделью [19], рассматривающей экранирование этого поля зарядами слоя легирования. Наблюдаемое в диапазоне I сильное изменение уровней сигнала фото-ЭДС, по-видимому, отражает изменение величины спонтанного электрического поля E_0 в доменах. Это изменение может быть объяснено температурной зависимостью критической величины микроволновой

мощности $P^*(T)$, при которой возникает ZRS [24]. Такая температурная зависимость возникает в механизме микроволнового отклика в диссипативной проводимости, обусловленном неравновесной функцией распределения электронов по энергии [4, 24], вследствие возрастания времени энергетической релаксации электронов $\tau_{in}(T)$ при понижении температуры [24]: $E_0 \propto \sqrt{P - P^*}$ и $P^* \propto \tau_{in}^{-1}$. Рост величины фото-ЭДС в минимумах, происходящий в области III, лежит за пределами модели [19] в ее сегодняшней форме и требует своего объяснения.

Продемонстрированная выше близость устанавливаемой стационарной величины микроволновой фото-ЭДС к ее максимальному значению, наблюдающемуся в состояниях с переключениями (см. рис. 3а, а также сравни рис. 2d, 2f), является общим свойством исследованных образцов, независящим от конкретного контакта и условий наблюдения ZRS (величина магнитного поля, частота и мощность излучения), как это демонстрируется данными, приведенными на рис. 5. На наш взгляд, этот результат указы-

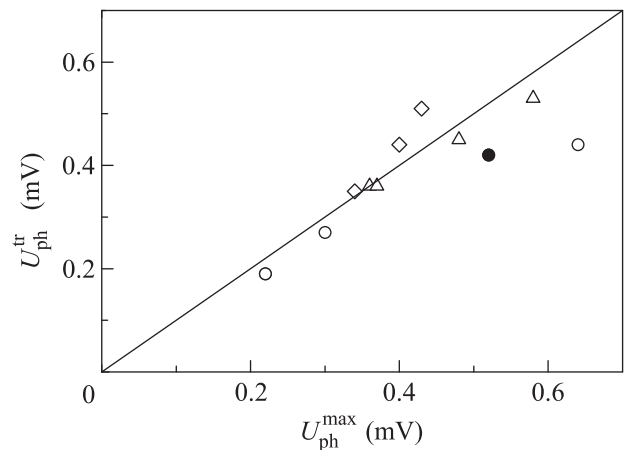


Рис. 5. Зависимость величины стационарной фото-ЭДС при исчезновении импульсов (граница областей III и IV) U_{ph}^{tr} от максимального значения фото-ЭДС U_{ph}^{max} , наблюдавшегося в динамическом доменном состоянии при более высокой температуре. Одинаковые символы соответствуют данным, измеренным на одном и том же контакте при различных значениях магнитного поля и частоты микроволнового излучения: (78 мТл, 40.4 ГГц), (78 мТл, 40.9 ГГц) и (92 мТл, 47.0 ГГц). При 78 мТл, 40.4 ГГц измерения были выполнены для двух различных величин микроволновой мощности. Сплошной кружок соответствует данным, представленным на рис. 3а. Сплошная прямая соответствует равным значениям сигналов: $U_{ph}^{tr} = U_{ph}^{max}$

вает на реализацию при низкой температуре доменной структуры, соответствующей более устойчивой

ориентации электрического поля в доменах. Такая “заморозка” может быть следствием вымораживания проводимости по слою легирования.

С.И. Дорожкин благодарен И.А. Дмитриеву и А.А. Капустину за полезные обсуждения. Работа поддержана Российским научным фондом (проект 14-12-00599). В. Уманский и Ю.Х. Смет выражают благодарность Немецко-израильскому фонду научных исследований и развития (German-Israeli Foundation for Scientific Research and Development – GIF).

1. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing, V. Narayanamurti, W. B. Jonson, and V. Umansky, *Nature* **420**, 646 (2002).
2. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 046807 (2003).
3. C. L. Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuttila, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 096803 (2003).
4. С. И. Дорожкин, *Письма в ЖЭТФ* **77**, 681 (2003).
5. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, and M. A. Zudov, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1709 (2012).
6. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons, and J. L. Reno, *Phys. Rev. B* **64**, 201311(R) (2001).
7. 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).
8. A. V. Andreev, I. L. Aleiner, and A. J. Millis, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 056803 (2003).
9. A. Auerbach, I. Finkler, B. I. Halperin, and A. Yacoby, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 196801 (2005).
10. I. Finkler, B. I. Halperin, A. Auerbach, and A. Yacoby, *J. Stat. Phys.* **125**, 1093, (2006).
11. I. G. Finkler and B. I. Halperin, *Phys. Rev. B* **79**, 085315 (2009).
12. R. L. Willett, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 026804 (2004).
13. А. А. Быков, *Письма в ЖЭТФ* **87**, 281 (2008).
14. 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).
15. I. A. Dmitriev, S. I. Dorozhkin, and A. D. Mirlin, *Phys. Rev. B* **80**, 125418 (2009).
16. 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).
17. S. I. Dorozhkin, L. Pfeiffer, K. West, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Nature Phys.* **7**, 336 (2011).
18. С. И. Дорожкин, В. Уманский, К. фон Клитцинг, Ю. Х. Смет, *Письма в ЖЭТФ* **107**, 68 (2018).
19. I. A. Dmitriev, *International Workshop “Recent Development in 2D Systems”, April 4–8, 2016, Okinawa, Japan.*
20. S. I. Dorozhkin, D. V. Sychev, and A. A. Kapustin, *J. Appl. Phys.* **116**, 203702 (2014).
21. С. И. Дорожкин, А. А. Капустин, *Письма в ЖЭТФ* **101**, 101 (2015).
22. K.-J. Friedland, R. Hey, H. Kostial, R. Klann, and K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4616 (1996).
23. V. Umansky, M. Heiblum, Y. Levinson, J. Smet, J. Nübler, and M. Dolev, *J. Cryst. Growth* **311**, 1658 (2009).
24. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner, A. D. Mirlin, and D. G. Polyakov, *Phys. Rev. B* **71**, 115316 (2005).