УДК 535.2

# СПИНОВОЕ ЛОКАЛЬНО НЕСЖИМАЕМОЕ СОСТОЯНИЕ ДРОБНОГО КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА ПРИ *v* = 3/2

© 2021 г. Л. В. Кулик<sup>1, \*</sup>, А. С. Журавлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт физики твердого тела Российской академии наук", Черноголовка, Россия \*E-mail: kulik@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 28.08.2020 г. После доработки 25.09.2020 г. Принята к публикации 28.10.2020 г.

Экспериментально исследованы нейтральные возбуждения в двумерной электронной системе с орбитальным и спиновым квантовым числом 1 в окрестности фактора заполнения 3/2. Обнаружено, что при v = 3/2 наблюдается гигантское уменьшение скорости релаксации возбуждений в основное состояние, несмотря на то, что количество свободных мест в основном состоянии, подходящих для релаксации возбуждений, макроскопически велико. Показано, что нейтральные возбуждения с орбитальным и спиновым квантовым числом 1 в состоянии 3/2 являются примером топологически защищенного возбуждения с различными спиновыми упорядочениями в основном и возбужденных состояниях, а само состояние 3/2 является примером локально несжимаемого дробного состояния квантового эффекта Холла, которое не является ни лафлинской жидкостью, ни целочисленным состоянием композитных фермионов.

DOI: 10.31857/S0367676521020174

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В течение последних нескольких лет авторами работы развивались оригинальные оптические методы создания спиновых возбуждений в двумерной электронной системе (2D-ЭС) и мониторинга их релаксации в основное состояние [1]. Из информации о том, как релаксируют спиновые возбуждения, можно сделать заключения о том, как локально устроена спиновая плотность в основном состоянии [2]. В представленной работе обсуждаются эксперименты по релаксации спиновых возбуждений в окрестности фактора заполнений 3/2. Одним из наиболее интересных результатов является доказательство того, что фактор заполнения 3/2 является особой точкой для основного состояния двумерной электронной системы в GaAs/AlGaAs гетероструктурах, в окрестности которой ее спиновые свойства меняются кардинально. Таким образом, нарушается фундаментальная электрон-дырочная симметрия, что существенно ограничивает класс возможных волновых функций, описывающих дробное состояние 3/2, и, по-видимому, закрывает вопрос о возможности использования этого дробного состояния для построения топологического квантового компьютера. Кроме того, данный факт находится в противоречии с картиной, подтверждаемой прямыми измерениями средней по образцу спиновой поляризации (симметричной по обе стороны от фактора заполнения 3/2), в которой 3/2 является исходной точкой для иерархии уровней Ландау композитных фермионов [3]. Таким образом, дробное состояние 3/2 является уникальным физическим объектом, не аналогичным ни спинполяризованному состоянию 5/2, ни частично поляризованному по спину состоянию композитных фермионов 1/2, для которого электрон-дырочная симметрия выполняется с точностью до подмешивания электронных состояний с вышележащих уровней Ландау.

#### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили на высококачественных гетероструктурах с симметрично легированными одиночными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs с концентрацией электронов в двумерном канале от  $1.8 \cdot 10^{11}$  до  $2.6 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и подвижностью более  $(1.5-4.0) \cdot 10^7$  см<sup>2</sup> · B<sup>-1</sup> · c<sup>-1</sup>. Симметричное легирование требовалось для минимизации проникновения электронной волновой функции в барьер квантовой ямы. Ширины квантовых ям составляли 30–40 нм. Поскольку имеется качественное совпадение экспериментальных результатов для различных гетероструктур, мы сосредоточимся на результатах, полученных для гетероструктур с шириной квантовой ямы 31 нм и концентрацией  $2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Рассматриваемые образцы помещались в криостат с жидким <sup>3</sup>He, который, в свою очередь, помещался в криостат со сверхпроводящим соленоидом. Оптические измерения проводились в диапазоне температур 0.45–1.5 К.

В экспериментах использовали методику с двумя световодами [4]. Один световод служил для непрерывного резонансного и нерезонансного фотовозбуждения 2D-ЭС. Размер фотовозбужденного пятна составлял 1 мм<sup>2</sup>. Второй световод использовалось для сбора сигнала резонансного отражения и сигнала фотолюминесценции от пятна фотовозбуждения, а также для передачи регистрируемых сигналов на входную щель спектрометра, оснащенного CCD-камерой. Широкополосный лазерный диод (длина волны возбуждения 780 нм и спектральная ширина 10 нм) использовался в качестве оптического источника для формирования неравновесного ансамбля спиновых возбуждений и сигнала фотолюминесценции, тогда как резонансное отражение было получено с помощью перестраиваемого диодного лазера "TOptica" со спектральной полосой 20 кГц. Время релаксации возбуждений измерялось во временном диапазоне 1-1000 мкс путем модуляции накачки лазерного диода с помощью генератора импульсов. Плотность фотовозбуждения варьировалась в пределах 1-100 мкВт/мм<sup>2</sup>, что не приводило к перегреву 2D-ЭС. Следует отметить, что резонансное отражение само по себе не связано с образованием возбуждений, однако сигналы резонансного отражения 2D-ЭС и фотолюминесценции спектрально перекрываются. Для измерения спектров фотолюминесценции резонансное возбуждение отключалось. Паразитное отражение от поверхностей гетероструктуры фильтровалось скрещенными линейными поляризаторами, помещенными между световодами и исследуемым образцом. Поскольку в магнитном поле поглощается и испускается только циркулярно поляризованное излучение, сигнал резонансного отражения от 2D-ЭС проходит через линейный поляризатор собирающего оптического волокна, в то время как сигнал паразитного нерезонансного отражения линейно поляризованного лазерного луча от поверхностей гетероструктуры подавляется.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

При коэффициентах заполнения ниже и выше 3/2 (1.3 и 1.7) сигналы отражения (*RR*) и фотоиндуцированного отражения (*PRR*) [4] совпадают (рис. 1). Это ожидаемый результат, так как 2D-ЭС имеет только частичную спин-поляризацию [3], и существует макроскопическое количество свободных мест для релаксации возбужденного электрона на нулевой уровень Ландау без переворота спина и с испусканием фотона с циклотронной энергией. В этом случае 2D-ЭС переходит в воз-



**Рис. 1.** Спектры резонансного отражения (*RR*) (черные линии) и фотоиндуцированного резонансного отражения (*PRR*) (красные линии) при различных факторах заполнения 2D-ЭС в окрестности v = 3/2, измеренные с мощностью фотовозбуждения 100 мкВт/мм<sup>2</sup>. Примеры процессов *RR* и *PRR* показаны на диаграмме.

бужденное спиновое состояние, из которого он так же легко релаксирует в основное состояние с испусканием фотона электронного спинового резонанса. Эти релаксационные процессы лежат в наносекундном временном диапазоне [5], поэтому невозможно накопить какое-либо значительное количество возбуждений с такими короткими временами жизни и плотностью фотовозбуждения, используемой в эксперименте.

С уменьшением фактора заполнения 2D-ЭС количество незанятых мест на нулевом уровне Ландау увеличивается и соответственно возрастают сигналы RR и PRR. Однако принципиальный интерес представляет не абсолютная величина сигнала отражения, а распределение свободных узлов между двумя спиновыми состояниями на нулевом уровне Ландау:  $\alpha = (I_{\downarrow} - I_{\uparrow})/(I_{\downarrow} + I_{\uparrow})$  (рис. 2). Соотношение пустых мест на верхнем и нижнем спиновых подуровнях Ландау монотонно убывает от коэффициента заполнения 1.6 до коэффициента заполнения 1. При факторе заполнения 1 нижний спиновый подуровень Ландау почти полностью заполнен, а верхний спиновый подуровень Ландау практически пуст (холловский ферромагнетик). Следовательно, наблюдаемая картина отражения КР распределения пустых



**Рис. 2.** Величина  $\alpha = (I_{\downarrow} - I_{\uparrow})/(I_{\downarrow} + I_{\uparrow})$ , измеряемая по интегральной интенсивности резонансного отражения (*RR*) (черные точки) и фотоиндуцированного резонансного отражения (*PRR*) (красные точки), как функция фактора заполнения.

мест между двумя спин-подуровнями является естественной.

Неожиданным является то, что сигнал PRR при нерезонансном возбуждении не равен нулю в окрестности фактора заполнения 3/2 (рис. 2). Измеренное время жизни неравновесных спиновых возбуждений достигает значений более 10 мкс, что лишь на порядок меньше времени жизни аналогичных возбуждений в холловском диэлектрике при коэффициенте заполнения 2. Следует иметь в виду, что при коэффициенте заполнения 2 электронная система находится в несжимаемом целочисленном квантовом состоянии Холла с большой запрещенной зоной на уровне Ферми, в то время как состояние 3/2 является холловским проводником без запрещенной зоны. Даже в несжимаемом состоянии холловского ферромагнетика при *v* = 1 релаксация возбуждений с орбитальным и спиновым квантовым числом 1 происходит намного быстрее, чем при факторе заполнения 3/2. Это происходит, несмотря на то, что количество пустых мест на нижнем спиновом подуровне в холловском ферромагнетике намного меньше, чем в состоянии 3/2.

Знание зависимостей плотности неравновесных возбуждений от плотности фотовозбуждения и времени релаксации возбуждений, полученных из исследований холловского диэлектрика v = 2[6, 7], позволяет оценить неравновесную плотность возбуждений с орбитальным и спиновым квантовым числом 1 при факторе заполнения 3/2. При максимально допустимой плотности фотовозбуждения, не вызывающей перегрева электронной системы, 100 мкВт/мм<sup>2</sup>, это значение составляет менее 1 процента от общего количества квантов магнитного потока на одном уровне Ландау. Из рис. 2 грубая оценка переворотов спина в основном состоянии 2D-ЭС составляет около 25 на каждый возбужденный электрон; т.е. формирование одного спинового возбуждения с орбитальным и спиновым квантовым числом 1 сопровождается перестройкой десятков спинов в основном состоянии. Соответственно, релаксация в основное состояние также сопровождается десятками переворотов спина и перестройкой спиновой текстуры. Несмотря на металлическую проводимость 2D-ЭС при v = 3/2, можно утверждать, что электроны в основном состоянии объединены в спиновые текстуры. Спиновые упорядочения в основном и возбужденном состояниях топологически несовместимы. Как следствие, вблизи фотовозбужденного электрона возникает физическое явление, подобное несжимаемости 2D-ЭС (локальная несжимаемость), что является причиной огромных экспериментальных времен релаксации возбужденных электронов.

Наши эксперименты качественно подтверждают транспортные измерения латерально-ограниченного 2D-ЭС при v = 3/2 [8, 9]. Квантование холловской проводимости, обнаруженная Чжаном, Фу и соавторами, может происходить из-за локальной несжимаемости и соизмеримости параметров ограничивающего потенциала проводника с размером одной или нескольких спиновых текстур. Ток заряда при 3/2 осуществляется не отдельными электронами, а спиновыми текстурами. Когда размер сужения холловского проводника становится соизмеримым с размером спиновой текстуры, транспорт в объеме 2D-ЭС прекращается, и остается только транспорт по краевым каналам. Таким образом, дробное состояние 3/2 в пространственно ограниченной геометрии является примером локально несжимаемого дробного состояния, которое не является ни лафлинской жидкостью, ни целочисленным состоянием композитных фермионов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью оптических методов исследованы возбужденные состояния с орбитальным и спиновым квантовым числом 1 вблизи дробного состояния квантового эффекта Холла при v = 3/2. Обнаружено сильное уменьшение скорости релаксации возбуждений. Показано, что при изменении спинового числа электронной системы на единицу и пространственном перераспределении электронной плотности за счет изменения орбитального квантового числа возбужденного электрона спиновое квантовое число основного состояния изменяется на несколько десятков. Это означает, что электроны объединены в спиновые текстуры, причем спиновые конфигурации текстур различны в возбужденном и основном состояниях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kulik L.V., Gorbunov A.V., Zhuravlev A.S. et al. // Sci. Rep. 2015. V. 5. Art. No 10354.
- Kulik L.V., Kuznetsov V.A., Zhuravlev A.S. et al. // Sci. Rep. 2018. V. 8. Art. No 10948.
- Tiemann L., Gamez G., Kumada N., Muraki K. // Science. 2012. V. 335. P. 828.

- 4. Кулик Л.В., Горбунов А.В., Дикман С.М., Тимофеев В.Б. // УФН. 2019. Т. 189. № 9. С. 955; Kulik L.V., Gorbunov A.V., Dickmann S.M., Timofeev V.B. // Phys. Usp. 2019. V. 62. Р. 869.
- 5. Журавлев А.С., Кулик Л.В., Кузнецов В.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108. С. 440.
- Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Dickmann S. et al. // Nat. Commun. 2016. V. 7. Art. No 13499.
- Kulik L.V., Gorbunov A.V., Zhuravlev A.S. et al. // Sci. Rep. 2015. V. 5. Art. No 10354.
- 8. *Zhang Y.* The physicochemical properties of secondary organic materials. PhD thesis. Cambridge: Harvard University, 2009. P. 125.
- 9. *Fu H., Wu Y., Zhang R. //* Nat. Commun. 2019. V. 10. P. 4351.

## Locally incompressible form of the fractional quantum Hall effect at v = 3/2

## L. V. Kulik<sup>*a*, \*</sup>, A. S. Zhuravlev<sup>*a*</sup>

<sup>a</sup>Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia \*e-mail: kulik@issp.ac.ru

We studied neutral excitations in a two-dimensional electron gas with an orbital momentum 1 and spin projection over the magnetic field axis 1 in the vicinity of a filling factor of 3/2. It is shown that in the vicinity of 3/2, a significant increase in the relaxation time ( $\tau = 13 \,\mu$ s) for the excitations to the ground state is exhibited even though the number of vacancies in the lowest energy level is macroscopically large. The decrease in the relaxation rate is related to the spin texture transformation in the ground state induced by spin flips and electron density rearrangement. Based on the experimental data we believe that the 3/2 state is an example of a locally incompressible fractional quantum Hall state.