УДК 538.9

РЕЗОНАНСНАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В УСЛОВИЯХ ДРОБНОГО КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА

© 2021 г. Е. И. Белозеров^{1, 2}, А. С. Журавлев^{1, *}, Л. В. Кулик^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

"Институт физики твердого тела Российской академии наук", Черноголовка, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия *E-mail: and.zhur@gmail.com

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

Обсуждается новый экспериментальный метод исследования объемных состояний в условиях дробного квантового эффекта Холла.

DOI: 10.31857/S0367676521020058

Одним из подтвержденных экспериментальных методов изучения объемных электронных состояний в режиме дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ) является резонансное отражение [1]. Именно в сигнале резонансного отражения впервые была обнаружена линия, связанная с состоянием ДКЭХ 1/3, отделенная спектрально от разрешенных одночастичных оптических переходов двумерной электронной системы (2D-ЭС) [2]. Однако этот метод в силу своей сложности не подходит для рутинных измерений 2D-ЭС в режиме ДКЭХ; использование же нерезонансного отражения невозможно в силу неконтролируемого фотоиндуцированного вклада в конечный результат измерений. Причина некорректности использования нерезонансной фотолюминесценции (ФЛ) состоит в том, что при возбуждении вклад в регистрируемый сигнал дают не только двухчастичные возбужденные состояния 2D-ЭС, для которых выполняются условия "скрытой симметрии", но и трехчастичные состояния, для которых никаких симметрийных ограничений на спектральные характеристики сигнала нет [3]. В работе впервые применена методика резонансной фотолюминесценции (РФЛ) для исследования состояния ДКЭХ 1/3, что позволило избавиться от нежелательной фотолюминесценции трехчастичных комплексов. Показано, что в этом случае нарушения "скрытой симметрии" не наблюдается, однако амплитуда сигнала РФЛ в условиях формирования объемного состояния ДКЭХ 1/3 изменяется настолько сильно, что это

изменение может служить индикатором этого дробного состояния.

Была использована гетероструктура с одиночной квантовой ямой GaAs/AlGaAs шириной 19 нм, с концентрацией электронов в двумерном канале $0.84 \cdot 10^{11}$ см⁻² и подвижностью более $3.5 \cdot 10^7 \text{ см}^2 \cdot \text{B}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$. Гетероструктура помещались в откачиваемый резервуар с жидким ³He, который, в свою очередь, помещался в криостат со сверхпроводящим соленоидом. Оптические измерения проводились в диапазоне температур 0.45-4.2 К и в диапазоне магнитных полей 0-14 Тл с использованием двухсветоводной методики. Один световод служил для резонансного и нерезонансного возбуждения 2D-ЭС, а второй – для сбора сигнала ФЛ и РФЛ от образца и передачи сигнала на входную щель решеточного спектрометра, оборудованного охлаждаемой ПЗС камерой. Для резонансной накачки использовался полупроводниковый перестраиваемый узкополосный лазер "TOptica", а для нерезонансной – широкополосный диод с длиной волны фотовозбуждения 780 нм.

При температуре бани 1.6 К принципиальной разницы в спектрах ФЛ и РФЛ не наблюдается. Спектр состоит из двух основных линий, соответствующих оптическим переходам с нулевого уровня Ландау зоны проводимости на нулевой уровень Ландау первой размерноквантованной зоны тяжелых дырок валентной зоны квантовой ямы $(hh^{10} - e_0)$, а также слабой линии, связанной с переходом на нижайший по энергии спиновой подуровень подзоны легких дырок $(lh^{10} - e_0)$ (рис. 1).



Рис. 1. Спектры нерезонансной фотолюминесценции 2D-ЭС, измеренные в двух магнитных полях при двух температурах 0.5 К (красные сплошные линии) и 1.6 К (черные сплошные линии). Стрелками указаны оптические переходы, не соответствующие каким либо разрешенным двухчастичным оптическим переходам в 2D-ЭС.

Уменьшение температуры бани до 0.5 К приводит к появлению трех дополнительных особенностей в спектрах ФЛ непосредственно в области формирования ДКЭХ 1/3 (10.4 Тл). Новые линии не связаны с какими-либо одночастичными оптическими переходами в 2D-ЭС (рис. 1). Аналогичное уменьшение температуры в области больших магнитных полей, где состояние 1/3 уже не наблюдается, приводит к появлению шести новых спектральных особенностей, что делает интерпретацию связи спектров ФЛ с определенным состоянием ДКЭХ затруднительной (рис. 1).

Основным экспериментальным результатом представленной работы является пороговое изменение интенсивностей линий РФЛ в условиях формирования ДКЭХ 1/3 при понижении температуры гелиевой бани (рис. 2). Если при температуре 1.6 К интенсивности линий переходов с нулевого уровня Ландау отражают заселенность электронных и дырочных уровней Учитывая, что практически все равновесные электроны при 0.5 К находятся на нижайшем уровне Ландау, получается парадоксальный результат: концентрация электронов на верхнем спиновом подуровне Ландау много меньше, чем на нижнем, сила осциллятора оптических переходов с нижнего спинового подуровня выше, чем с верхнего, а амплитуда РФЛ с верхнего спинового подуровня на порядок величины превышает амплитуду РФЛ с нижнего спинового подуровня. Наблюдаемый эффект имеет универсальный характер; т.е. не зависит от энер-



Рис. 2. Спектры резонансной фотолюминесценции (РФЛ) в области формирования ДКЭХ 1/3 при двух температурах 0.5 К (красные сплошные линии) и 1.6 К (черные сплошные линии), измеренные при резонансном возбуждении оптического перехода из размерно-квантованной подзоны легких дырок. На вставке в логарифмическом масштабе показаны зависимости отношений амплитуд линий РФЛ для перехода с верхнего и нижнего спиновых подуровней нулевого уровня Ландау электронов от магнитного поля, измеренные при температурах 0.5 К (красные сплошные точки) и 1.6 К (черные сплошные точки).

гии используемого резонанса для фотовозбуждения РФЛ. Столь сильное увеличение амплитуды РФЛ может быть связано с формированием в двумерной системе неравновесного когерентного состояния из электронов на верхнем спиновом подуровне нулевого уровня Ландау. С использованием результатов точной численной диагонализации для описания основного и возбужденных состояний электронной системы на факторе заполнения 1/3 в духе работы [4], можно показать, что нижайшим по энергии возбужденным состоянием является не зарядовое возбуждение, как считалось до сих пор [5], а спиновое, причем в дисперсионной зависимости спинового возбуждения существует локальный (ротонный) минимум примерно на двух обратных магнитных длинах, в котором могут конденсироваться спиновые возбуждения. Однако, в не зависимости от физической природы наблюдаемой модификации спектра РФЛ, сама эта модификация служит экспериментальным маркером дробного состояния 1/3, а методика РФЛ может рассматриваться в качестве нового инструмента зондирования дробных состояний квантового эффекта Холла.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (про-ект № 20-02-00230).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Dickmann S. et al. // Nat. Commun. 2016. V. 7. Art. No 13499.
- 2. *Кулик Л.В., Журавлев А.С., Бисти В.Е. и др. //* Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. С. 659.
- Zhuravlev A.S., Kuznetsov V.A., Kulik L.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. Art. No 196802.
- Chakraborty T., Pietilainen P., Zhang F.C. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. P. 130.
- Girvin S.M., MacDonald A.H., Platzman P.M. // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 54. P. 581.

Resonant photoluminescence under conditions of the fractional quantum Hall effect

E. I. Belozerov^{*a*, *b*}, A. S. Zhuravlev^{*a*, *}, L. V. Kulik^{*a*}

^aInstitute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia ^bNational Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000 Russia *e-mail: and.zhur@gmail.com

A new experimental technique is proposed for studying bulk states of the fractional quantum Hall effect.