

## ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМАРОНОВ ПРИ ФАКТОРАХ ЗАПОЛНЕНИЯ ОТ 1 ДО 2

© 2025 г. П. С. Бережной<sup>1,2,\*</sup>, А. С. Кореев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

\*E-mail: pavel.s.berezhnoy@gmail.com

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 18.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Исследован спектр люминесценции двумерных электронных систем в диапазоне факторов заполнения от 1 до 2 при температуре 40 мК. Выявлены плазмаронные пики в спектре и их перестройка при факторе заполнения 4/3. При высокой мощности накачки обнаружены дополнительные пики, названные «двойными плазмаронами», что указывает на сложные взаимодействия в системе.

**Ключевые слова:** квантовый эффект Холла, двумерные электронные системы, плазмароны

**DOI:** 10.31857/S0367676525020065, **EDN:** CXTIUT

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к квантовому эффекту Холла (КЭХ) не угасает с 1980 года. Эффект проявляется в дискретизации значений поперечной проводимости, что делает его ярким примером квантовых явлений на макроскопическом уровне. Особый интерес представляют квазичастичные возбуждения, возникающие как в режиме дробного, так и целочисленного квантового эффекта Холла. Интерес к дробным возбуждениям основывается на достижениях в области топологических квантовых вычислений [1, 2] и вовлечении анионов (квазичастиц, не подчиняющихся ни бозонной, ни фермионной статистике, а в некоторых случаях, как и не-абелевых частиц при определенных степенях заполнения) для описания физических свойств двумерных электронных систем (ДЭС) [3]. С другой стороны, возбуждения целочисленного КЭХ такие как триплетные циклотронные магнитоэкситоны (ТЦМЭ), образующиеся в контексте квантово-холловского диэлектрика при электронном факторе заполнения  $v = 2$ , также привлекли к себе пристальное внимание [4]. Эти возбуждения характеризуются длительным временем жизни вплоть до миллисекунд, что позволяет создавать новую фазовую структуру — магнетофермионный конденсат [4].

Иным примером необычных возбуждения на  $v = 2$  служат плазмароны. Плазмарон представляет собой частный пример более общего класса заряженных возбуждений в металлах — трионов. Возможность существования связанных трионов

не вызывает сомнений, в то время как существование свободных трехчастичные комплексов встречает много критики. Тем не менее широко обсуждается вклад трионов в рекомбинационные спектры двумерных электронных систем [5, 6]. Ранее в работе [7] было продемонстрировано, что плазмароны проявляются в спектрах рекомбинации холловского изолятора на  $v = 2$  как отдельный пик, отщепленный по энергии от основных линий рекомбинации. На факторе заполнения  $v = 2$  возможно существование несколько различных двучастичных и трехчастичных комплексов. Самое простое возбуждение это магнитоплазмон который представляет собой связанное состояние электрона на первом свободном уровне Ландау и ферми-дырки на заполненном нулем. Магнитоплазмон можно возбудить и зарегистрировать в основном состоянии системы, например методом рамановской спектроскопии. Для трехчастичных комплексов необходимо неравновесное возбуждение системы. Обычно, в процессе интенсивного фотовозбуждения вблизи запрещенной зоны в системе появляется какое-то количество ферми-дырок. Так получается потому, что дырки из валентной зоны очень быстро релаксируют и вырывают электроны с нижайшего уровня Ландау. Эти ферми-дырки могут образовать связанное состояние с магнитоплазмоном. При этом если спины двух ферми-дырок (свободной и от магнитоплазмона) образуют спиновый триплет, то такой трехчастичный комплекс называют трионом. Если спины

двух ферми-дырок образуют спин-синглет, трехчастичный комплекс называют плазмароном. В последствии в работе [8] помимо прочего было указано, что похожие плазмароны существуют и при факторе заполнения  $v = 3/2$  и в окрестности. Однако, тогда подробно не исследовались свойства этих возбуждений. В отличие от тех, которые существуют на парамагнитном холловском изоляторе в дробном состоянии, наблюдается несколько пиков, что по всей видимости указывает на то, что магнитоплазмон имеет несколько точек высокой плотности состояний.

В данной работе мы внимательно изучили спектр люминесценции в диапазоне факторов заполнения от 1 до 2 при очень низких температурах около 40 мК. Было выявлено, что плазмаронные пики существуют в диапазоне от  $1.2 < v < 1.6$ . Также мы выявили, что на дроби  $v = 4/3$  плазмонный спектр перестраивается. Также, мы провели эксперимент по измерению зависимости излучения плазмонов по сравнению с обычной рекомбинацией от мощности накачки. Было выявлено, что при высокой плотности накачки появляется второй комплекс пиков в точности напоминающий плазмаронный. Данный эффект пока был назван двойными плазмаронами.

### МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образец был помещен в криостат растворения. Доступный диапазон температур составлял от 40 до 800 мК. Регулировка температуры осуществлялась подачей тока на резистивный нагреватель в смесительной камере. Криостат оснащен сверхпроводящим соленоидом развивающий поле вплоть до 14 Тл. Для улучшения отвода тепла от образца он был приклеен алюминиевой пастой к массивному медному столику.

Эксперимент ставился по двухсветоводной методике. Один файбер использовался для накачки лазером, а второй для сбора фотолюминесценции. Файбера располагались на расстоянии примерно 2 мм от образца. Апертура выходного пучка  $NA = 0.22$  что гарантирует величину светового пятна возбуждения  $< 1$  мм. Выходящий сигнал попадал на спектрометр с разрешением 1.5 А/мм. Полученный сигнал накапливался и усреднялся по примерно 10 сек с 5–10 усреднениями.

Для оптической накачки двумерной электронной системы использовали перестраиваемый лазер Toptica с шириной линии примерно 20 кГц. Контроль мощности осуществляли с помощью системы оптических фильтров и градиентного диска. Перед измерениями с варьированием мощности градиентный диск калибровали в независимом эксперименте. Для измерений использовался высокоподвижный образец GaAs/AlGaAs с плотностью  $2.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Плотность перед измерениями была проверена независимо с помощью оптической методики.

Были найдены оптические маркеры указывающие на целочисленные факторы заполнения в квантовом эффекте Холла и по ним посчитана плотность.

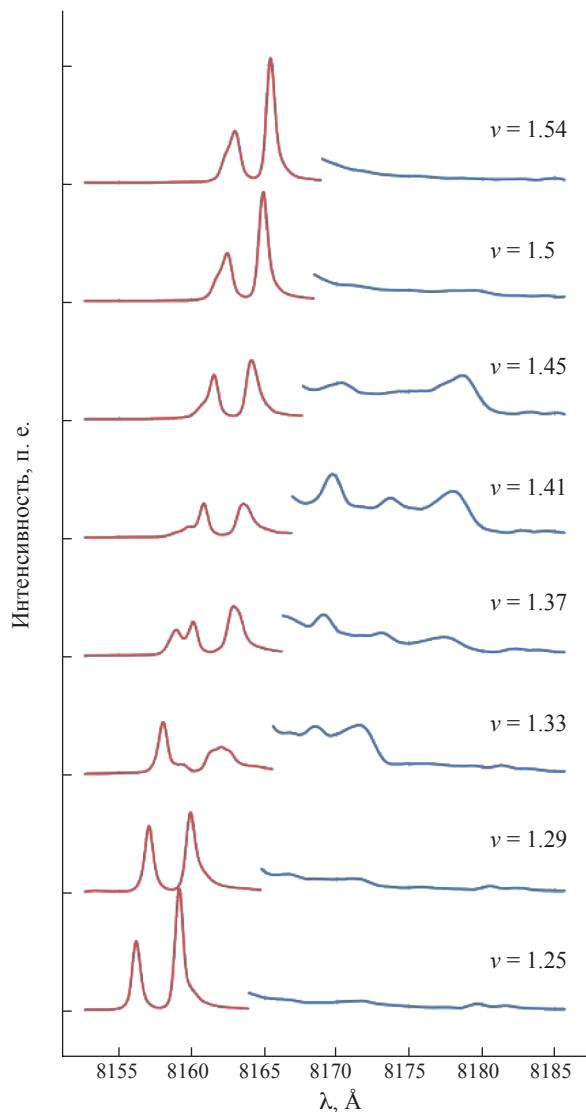
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в работе [8] было показано, что на факторе заполнения  $v = 1.5$  наблюдаются необычные спектры люминесценции плазмаронов с тремя пиками, в то время как на хорошо изученном факторе  $v = 2$  наблюдается только один [7]. До этого плазмароны наблюдались только в криостате с минимальной температурой в  $T = 0.45$  К. В этой работе мы продолжаем данное исследование в более низких температурах вплоть до 40 мК и в более широком диапазоне факторов заполнения.

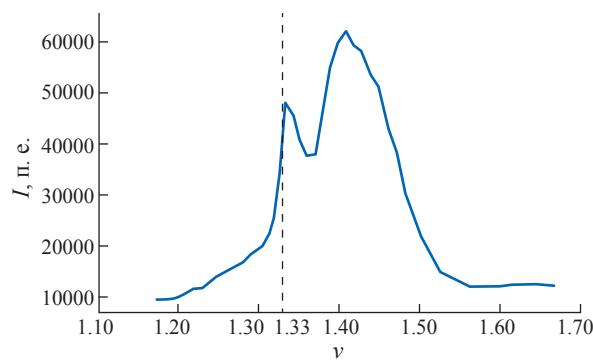
Нами было обнаружено, что при температуре 40 мК пики люминесценции, которые соответствуют плазмаронам, существуют в диапазоне факторов заполнения от  $v = 1.2$  до  $v = 1.6$ . На рис. 1 показаны спектры обычной люминесценции и плазмаронов. Обычная люминесценция существует при любых факторах заполнения, в то время как плазмаронная часть характерна только для  $v = 2$  и для исследуемого нами диапазона  $1.2 < v < 1.6$ . Наличие сразу трех пиков объясняется тем, что в нецелочисленных состояниях корреляционная функция нетривиальная, что создает несколько точек повышенной плотности состояний в дисперсии магнитоплазмона. Соответственно мы видим проявление этих точек в спектре плазмаронов как три пика. На рис. 2 показано как мощность люминесценции плазмаронов зависит от фактора заполнения. Как видно, пик мощности приходится на фактор заполнения  $v = 1.41$ . Интересно заметить, что на рис. 2 на факторе заполнения  $v = 4/3$  виден локальный максимум. В то же время на рис. 1 отчетливо видно, что на  $v = 4/3$  происходит качественная перестройка плазмаронного спектра. Нет никаких сомнений что в столь низкой температуре дробь  $4/3$  существует. Как известно дисперсия магнитоплазмона почти полностью определяется корреляционной функцией основного состояния. Понятно, что изменения в дисперсии магнитоплазмона обязаны отразиться в спектре плазмарона, что мы и наблюдаем.

Мы измерили температурную зависимость интенсивности излучения от температуры, но на криостате растворения мы можем разогреть образец только до 800 мК. Существенных изменений замечено не было, что согласуется с результатами работы [8], где критическая температура оценивалась в 1 К.

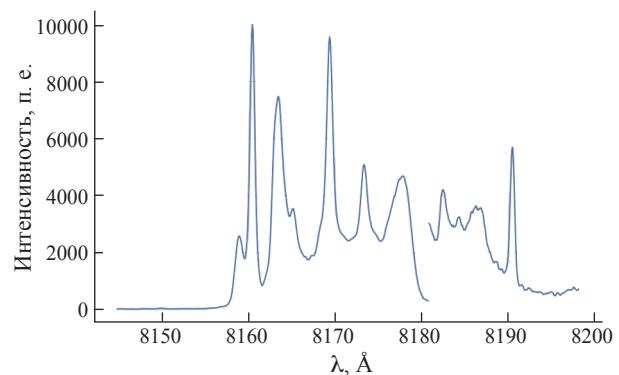
Чтобы выявить нелинейность спектра люминесценции от мощности накачки были проведены соответствующие измерения. Результаты представлены на рис. 4 в естественных коорди-



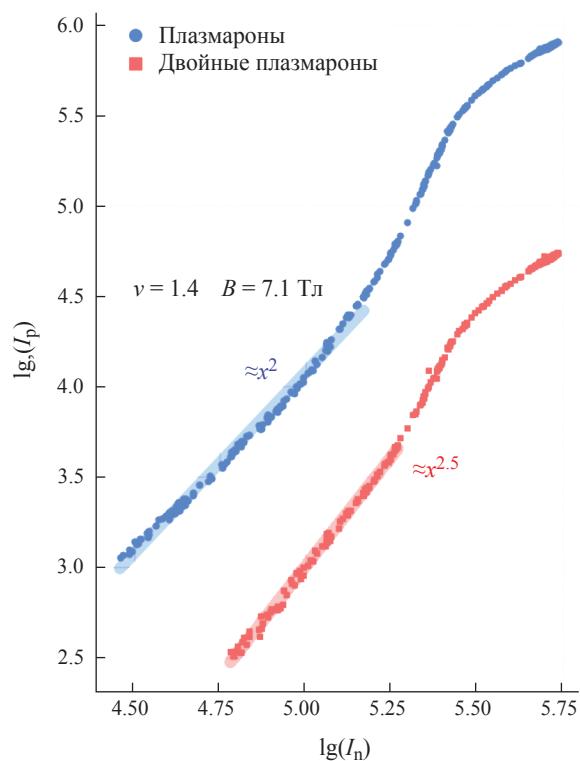
**Рис. 1.** Спектры люминесценции при разных факторах заполнения и фиксированной мощности накачки 20 мкВт и температуре 40 мК. Спектры люминесценции плазмаронов увеличены в 5 раз для наглядности.



**Рис. 2.** Полная мощность люминесценции плазмаронов в зависимости от фактора заполнения.



**Рис. 3.** Спектр люминесценции при мощности накачки 4.5 мВт. Дополнительно возникающие линии увеличены в 10 раз для наглядности



**Рис. 4.** График зависимости мощности плазмаронов от нормальной люминесценции. Здесь  $\lg(I_n)$  – десятичный логарифм полной мощности нормальной люминесценции и  $\lg(I_p)$  – десятичный логарифм полной мощности плазмаронов, как обычных, так и двойных.

натах: по оси  $x$  отложен логарифм мощности обычной люминесценции. В широком диапазоне мощностей зависимость мощности плазмаронов является квадратичной по мощности обычной люминесценции. Это происходит, потому что плазмаронам для существования необходимо существование неравновесного ансамбля фермидырок. При дальнейшем повышении мощности кривая меняет наклон. Не очевидно, это происходит по объективным причинам или от простого перегрева системы, так как мощность накачки вырастает до довольно больших значений вплоть до 4.5 мВт. Тем не менее нам удавалось удерживать температуру внутри камеры смешивания в пределах 100 мК. Выяснить температуру непосредственно образца представляется невозможным в данной постановке эксперимента. Хотя, косвенно можно заключить, что наверно она не слишком большая, потому что спектр, снятый на максимальной мощности (см рис. 3), все еще выглядит гладко.

Удивительным открытием было, что начиная с определенной плотности мощности становится видно второй комплекс из четырех пиков, как показано на рис. 3. Эти пики имеют интенсивность на два порядка меньшую чем оригинальные плазмандоны и отстоят от пиков обычной рекомбинации почти ровно в два раза дальше, чем оригинальные плазмароны. По этой причине я буду пока называть это двойными плазмаронами. На рис. 4 показано, что зависимость интенсивности спектра двойных плазмаронов похожа на обычные плазмароны, но всегда на примерно два порядка слабее. С одной стороны, можно объяснить появление дополнительных пиков в рамках плазмаронной концепции. Например, когда различных квазичастиц становится слишком много, плазмарон может образовывать короткоживущие связанные состояния с ними, пики рекомбинации которых мы и видим. Однако, тяжело поверить в образование такой сложной экситонной молекулы. Кажется, что если бы такой комплекс и мог образоваться, то очень быстро он распался бы обратно на плазмарон + квазичастица задолго до рекомбинации. Необходимо отметить, что когерентные свойства магнитоэкситонного конденсата в холловском диэлектрике также играют важную роль в понимании этих взаимодействий. В работе [9] исследуются когерентные свойства триплетных циклотронных магнитоэкситонов, что может помочь в дальнейшем прояснении природы наблюдаемых «двойных плазмаронов». Чтобы прояснить природу этих загадочных пиков люминесценции потребуются дальнейшие исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования показали, что плазмаронные возбуждения проявляются в виде характерных пиков в спектре люминесценции двумерных электронных систем при температурах до 40 мК и в диапазоне факторов заполнения от  $v = 1$  до  $v = 2$ . Особый интерес вызывает точка  $v = 4/3$ , где наблюдается изменения в корреляционной функции, что значительно влияет на дисперсию магнитоплазмона и, соответственно, на плазмаронный спектр. При высоких плотностях накачки мы выявили появление нового комплекса пиков, которые, вероятно, связаны с более сложными взаимодействиями внутри системы. Несмотря на успешную фиксацию различных возбуждений и перестроек спектра, природа наблюдаемых «двойных плазмаронов» требует дальнейшего исследования. Эти результаты открывают новые горизонты для изучения плазмонных и квазичастических эффектов в двумерных системах и расширяют наше понимание феноменов, обусловленных квантовым эффектом Холла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской научного фонда (проект № 22-12-00257).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Witzel W.M., Das Sarma S. // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. Art. No. 035322.
2. Kitaev A.Yu. // Ann. Physics. 2003. V. 303. P. 2.
3. Wilczek F. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. P. 957.
4. Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Dickmann S. et al. // Nature Commun. 2016. V. 7. Art. No. 13499.
5. Shay J.L., Johnston J.W.D., Buehler E., Wernick J.H. // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 27. P. 711.
6. Shields A.J., Pepper M., Ritchie D.A., Simmons M.Y. // Adv. Physics. 1995. V. 44. P. 47.
7. Zhuravlev A.S., Kuznetsov V.A., Kulik L.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. Art. No. 196802.
8. Kulik L.V., Kuznetsov V.A., Zhuravlev A.S. et al. // Phys. Rev. Res. 2020. V. 2. No. 3. Art. No. 033123.
9. Горбунов А.В., Тимофеев В.Б. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. С. 467; Gorbunov A.V., Timofeev V.B. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. P. 380.

## Revealing plasmaron dynamics at filling factors from 1 to 2

P. S. Berezhnoy<sup>a,b,\*</sup>, A. S. Koreev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Osipyan Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

<sup>b</sup>*National Research University «Higher School of Economics», Moscow, 101000, Russia*

\*e-mail: pavel.s.berezhnoy@gmail.com

We investigated the photoluminescence spectrum of two-dimensional electron systems in the filling factor range from 1 to 2 at a temperature of 40 mK. Plasmaron peaks have been identified and their restructuring observed at filling factor 4/3. At high pumping power, additional peaks, dubbed “double plasmarons” were detected, indicating complex interactions within the system.

*Keywords:* quantum Hall effect, two-dimensional electron systems, plasmarons