

МАГНИТНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ MgZnO/ZnO

© 2025 г. А. С. Кореев^{1,*}, П. С. Бережной^{1,2}, А. Б. Ваньков^{1,2}

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

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

*E-mail: koreyev.alexis@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 18.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Представлены результаты исследования двумерных электронных систем, реализованных в гетероструктурах MgZnO/ZnO , с высоким значением параметра взаимодействия. С помощью метода неупругого рассеяния света наблюдаются ферромагнитные переходы и спиновые текстуры. Изучены дисперсионные зависимости ключевых энергетических параметров.

Ключевые слова: квантовый эффект Холла, дробный квантовый эффект Холла, двумерные электронные системы, сильно коррелированные двумерные электронные системы.

DOI: 10.31857/S0367676525020073, EDN: CXK1AX

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования на базе гетероструктур ZnO/MgZnO дали новый импульс в решении ряда фундаментальных проблем физики двумерных электронных систем (ДЭС). В этих гетероструктурах реализуются высокоподвижные ДЭС со значениями параметра $r_s \approx 10\text{--}30$, что предопределяет доминирующий характер кулоновских корреляций. В этой ранее недостижимой области параметров претерпели качественные изменения свойства ДЭС при экстремально низких температурах. В частности, кулоновские корреляции искажают иерархию уровней Ландау, что сказывается на появлении новых фаз целочисленного и дробного квантового эффекта Холла [1], при $r_s \approx 30$ обнаружены даже свидетельства вигнеровской кристаллизации [2]. В состояниях с четными факторами заполнения обнаружена ферромагнитная неустойчивость стоуновского типа, сильнейшая перенормировка спинового и орбитального расщепления уровней Ландау. Кроме того, в режиме сильного взаимодействия $r_s \gg 1$ оказывается перенормированной и сама энергия электрон-электронного обменного взаимодействия. Контринтуитивно она оказывается не усиленной, а напротив — многократно ослабленной. Причиной таких трансформаций энергетического спектра является сильное кулоновское смешивание уровней

Ландау, видоизменяющее характер корреляций между электронами.

Несмотря на качественную перестройку энергетического спектра, спиновая конфигурация несжимаемых состояний КЭХ является коллинеарной и определяется заполнением некоторого числа спиновых подуровней. При отклонении от несжимаемых состояний магнитный порядок в основном состоянии даже слабо взаимодействующих ДЭС становится топологически нетривиальным. Так, за счет конкуренции между обменным и зеемановским взаимодействием заполнение спиновых уровней Ландау электронами может происходить отнюдь не по одночастичному сценарию — могут реализовываться спин-текстурные возбуждения типа скирмионов [3] (топологических объектов, плавно нарушающих магнитный порядок вихреобразной конфигурацией), скирмионных жидкостей и кристаллов [4]. Существование таких текстур подтверждено экспериментами на высококачественных ДЭС на основе GaAs, в частности, по ускоренной спиновой деполяризации [5, 6] и по наличию в спектре низкоэнергетических коллективных возбуждений дополнительной спиновой моды [7, 8], что указывает на нарушение спин-вращательной симметрии системы. В других двумерных структурах, например, на основе ZnO и AlAs, такие текстуры оказываются энергетически невыгодными из-за большого зеемановского расщепле-

ния и уменьшенной в результате перенормировки обменной энергии [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Эксперименты проводились на гетероструктурах $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Подвижности в двумерном транспортном канале превышали $\mu_t = 4 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Электронные плотности в образцах составляли от 1.14 до $2.85 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Эксперимент проводился в криостате с откачкой паров He^3 и температурой $\approx 0.5 \text{ К}$ в магнитном поле, достигавшем 16 Тл . Оптические измерения были выполнены с помощью перестраиваемого по длине волны Ti-Sr лазера с резонансным удвоением частоты с диапазоном длин волн $366\text{--}367 \text{ нм}$ вблизи прямой оптической щели ZnO . Два кварцевых многомодовых оптических световода, ориентированных под разными углами к поверхности образца, использовались для оптической накачки ДЭС и для сбора рассеянного сигнала. Измерения дисперсии коллективных возбуждений проводились методом резонансного неупругого рассеяния света (НРС). Передаваемый импульс регулировался в диапазоне $1.0\text{--}3.0 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ изменением взаимной ориентации световодов и наклоном подвижного столика, на котором располагался образец. Сигнал записывался с помощью спектрометра с азотно-охлаждаемой CCD -камерой. Для достижения максимальной точности в определении положения пиков НРС было использовано статистическое усреднение данных с $N \approx 20\text{--}30$ спектров.

Объектами изучения были спектры НРС на спиновых экситонах (SE) в диапазоне факторов заполнения $0.3 \leq \nu \leq 2$. В коллинеарных по направлению спина ферромагнитных состояниях целочисленного КЭХ спиновой экситон ровно один, и его дисперсия стартует от зеемановской энергии согласно теореме Лармора [10]. При нецелочисленных факторах заполнения возможны различные сценарии спиновых превращений. В частности, при формировании неколлинеарных спиновых фаз, из-за нарушения спин-вращательной симметрии, возможно появление дополнительной низкоэнергетической спиновой моды [7, 8]. Однако при качественно иных параметрах системы похожие симптомы в спектре нижайших спиновых возбуждений можно наблюдать и в ДЭС на основе ZnO .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показана эволюция обработанных позиций пиков SE в зависимости от фактора заполнения для двух образцов при двух различных проекциях импульса. Для удобства анализа многочастичного вклада из энергий вычтена величина зеемановской энергии. На рис. 1а очевидна

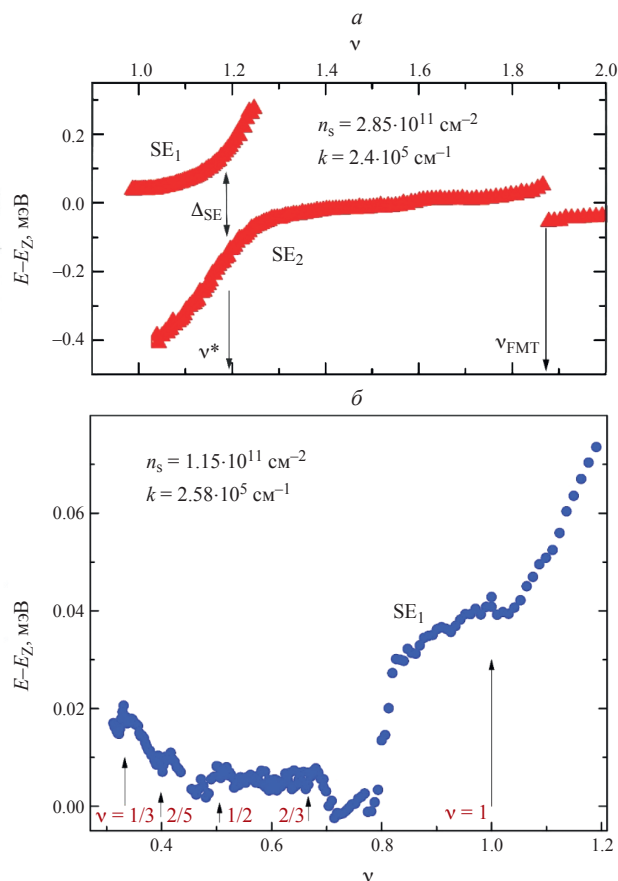


Рис. 1. Зависимости энергии мод спинового экситона за вычетом зеемановской энергии от фактора заполнения при $1 \leq \nu \leq 2$ на одном образце (а) и $\nu < 1$ на другом (б). Для каждого графика указаны величины концентрации носителей и двумерного импульса. Положение минимума энергетического расщепления мод E_1 и E_2 Δ_{SE} отмечено ν^* . Положение ферромагнитного перехода, отмечено ν_{FMT} .

асимметричная картина спиновых возбуждений и наличие дополнительной моды SE_2 с энергией значительно ниже зеемановского расщепления. Верхняя ветвь SE_1 произрастает из ферромагнитного спинового экситона и приобретает дополнительный многочастичный вклад в энергию при отклонении в сторону $\nu > 1$. Примечательно, что центром антипересечения мод на этом и остальных образцах является точка $\nu \approx 1.19$. Нижняя ветвь исчезает при стремлении к $\nu = 1$, но соответствующая экстраполяция кривой упирается в энергию значительно ниже зеемановской. Для дальнейшего анализа важно также обратить внимание на тот факт, что нижняя мода является исчезающим остатком от спинового экситона парамагнитной фазы и непрерывно эволюционирует к точке, обозначенной на графике ν_{FMT} . При этом факторе заполнения парамагнитная фаза исчезает, а вместо нее появляется ферромагнитная с известной дисперсией [11]. В окрестности этого перехода каждой фазе соответствует одна

экситонная мода и нет никаких признаков существования спиновых текстур.

На рис. 1б помимо упомянутого поведения в окрестности холловского ферромагнетика $\nu = 1$ результирующая зависимость обменного вклада в энергию SE от фактора заполнения имеет максимум при $\nu = 1/3$. При ν в диапазоне $1/3 \dots 1$ обменный вклад в энергию SE значительно уменьшен, но остается положительным — это свидетельствует о сохранении ферромагнитной конфигурации. Слабые локальные пики обменной энергии наблюдаются вблизи других состояний $\nu = 2/5, 1/2, 2/3$, но едва выделяются на фоне зашумленности данных. Качественно иной масштаб энергии в окрестности состояния ДКЭХ $\nu = 2/3$ демонстрирует исчезновение электрон-дырочной симметрии на нижайшем уровне Ландау вследствие перемешивания уровней Ландау. В том числе на это указывает резкий обвал энергии при $\nu \approx 0.8$.

В картине коллективных возбуждений происходят существенные изменения при изменении наклона магнитного поля, относительно поверхности образца (рис. 2а). Спиновые моды SE₁ и SE₂ продолжают демонстрировать неизменность в антипересечении до достижения угла Θ_c , но при больших углах наклона положение фактора заполнения ν^* начинает смещаться в сторону больших факторов заполнения (квадратные символы на рис. 2а). В то же время положение скачкообразного фазового перехода ν_{FMT} смещается в сто-

рону меньших факторов заполнения непрерывно, начиная с угла, соответствующего ферромагнитному переходу на факторе $\nu = 2$ [12].

При дальнейшем увеличении наклона гибридизация двух мод становится неразрешимой. При этом в зависимости энергии SE от фактора заполнения проявляется симметрия с центром на факторе заполнения $\nu = 3/2$ (рис. 2б). В левой части графика многочастичный вклад в энергию положительный, а в правой — отрицательный. Это полностью согласуется с положительной спиновой жесткостью ферромагнитной фазы при $\nu = 1$ и отрицательной при $\nu = 2$. Области фазовых переходов расширяются на областях $1 < \nu < 1.3$ и $1.7 < \nu < 1.3$ соответственно. Границы этих областей близки к $\nu \approx 4/3$ и $\nu \approx 5/3$, что указывает на возможную ключевую роль этих состояний ДКЭХ в изменении спиновой структуры ДЭС.

Неожиданный факт — при промежуточных факторах заполнения между обеими понятными ферромагнитными фазами спиновые возбуждения резко перестраиваются — их энергия утрачивает обменно-кулоновский вклад и сравнивается с зеemannовской при $\nu \rightarrow 3/2$ (рис. 2б). Необходимо отметить, что на этих экспериментальных кривых наблюдалась область факторов заполнения (укрупненные символы), где было невозможно спектрально разрешить наличие тонкой структуры линий SE, наблюдается лишь некоторое уширение пиков НРС. В любом случае, по надлому зависимости многочастичной энергии SE от фактора заполнения угадываются два фазовых перехода — из квантово-холловских ферромагнетиков вблизи $\nu = 1$ и $\nu = 2$ в предположительно парамагнитную фазу в окрестности $\nu = 3/2$. Интерес вызывает также дисперсионная зависимость ключевых энергетических параметров. Расщепление Δ_{SE} двух антипересекающихся мод SE несмотря на некоторый разброс точек показывает окололинейную зависимость от импульса (рис. 3а). Это указывает на кулоновскую природу расщепления мод. Несколько точек на дисперсионных кривых от безразмерного импульса для $\nu = 1/3$ и $\nu = 1$ приведены на рис. 3б. Из этих данных можно извлечь спиновую жесткость состояний КЭХ $\nu = 1/3$ и $\nu = 1$ (представлены на рис. 3б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение, проведенное исследование двумерных электронных систем (ДЭС) на основе гетероструктур MgZnO/ZnO позволило раскрыть новые аспекты магнитного упорядочения в условиях сильных кулоновских корреляций. Была установлена важная роль кулоновского смешивания уровней Ландау в формировании спиновых возбуждений и их эволюции при изменении угла наклона магнитного поля. Эти наблюдения свидетельствуют о нетривиальной динамике спиновой конфигурации. При этом спи-

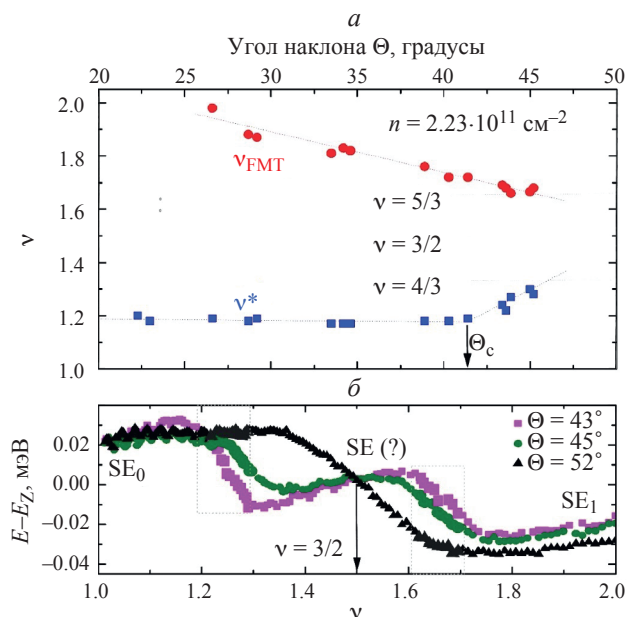


Рис. 2. Зависимости факторов заполнения точки антипересечения ν^* (квадратные символы) и ферромагнитного перехода ν_{FMT} (круглые символы) от угла наклона магнитного поля (а). Эволюция многочастичного вклада в энергию спиновых экситонов от фактора заполнения при углах, превышающих Θ_c (б).

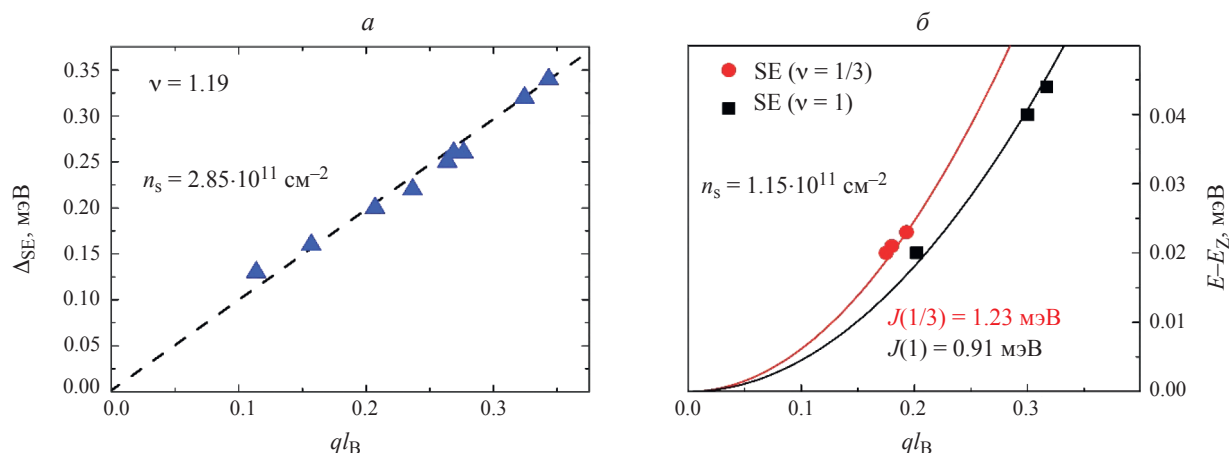


Рис. 3. Дисперсионные зависимости энергетического расщепления двух мод SE в области проявления спиновых текстур (а) и энергии SE на факторах заполнения $\nu = 1$ и $\nu = 1/3$ (б).

новая жесткость демонстрирует качественно новое поведение, обусловленное сильной кулоновской перенормировкой. Таким образом, исследование открывает путь к более глубокому пониманию природы взаимодействий в двумерных электронных системах с сильными корреляциями. Выявленные фазовые переходы и спиновые текстуры представляют особый интерес для фундаментальной физики и могут стать основой для будущих разработок.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Falson J., Maryenko D., Friess B. et al. // Nature Phys. 2015. V. 11. P. 347.
2. Falson J., Sodemann I., Skinner B. et al. // Nature Mater. 2022. V. 21. P. 311.
3. Fertig H.A., Brey L., Cote R., MacDonald A.H. // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 11018.
4. Brey L., Fertig H.A., Cote R., MacDonald A.H. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 2562.
5. Barrett S.E., Dabbagh G., Pfeiffer L.N. et al. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 74. P. 5112.
6. Aifer E.H., Goldberg B.B., Broido D.A. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76. P. 680.
7. Gallais Y., Yan J., Pinczuk A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. Art. No. 086806.
8. Drozdov I.K., Kulik L.V., Zhuravlev A. S. et al. // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. Art. No. 136804.
9. Van'kov A.B., Kaysin B.D., Volosheniuk S., Kukushkin I.V. // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. Art. No. 041407(R).
10. Ваньков А.Б., Кукушкин И.В. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. № 2. С. 112; Van'kov A.B., Kukushkin I.V. // JETP Lett. 2021. V. 113. P. 102.
11. Ваньков А.Б., Кореев А.С., Бережной П.С., Кукушкин И.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 2. С. 158; Van'kov A.B., Koreyev A.S., Berezhnoy P.S., Kukushkin I.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 2. P. 133.
12. Van'kov A.B., Kaysin B.D., Kukushkin I.V. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. Art. No. 235401.

Magnetic phase transitions and collective effects in MgZnO/ZnO heterostructures

A. S. Koreev^{a,*}, P. S. Berezhnoy^{a,b}, A. B. Van'kov^{a,b}

^a*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

^b*National Research University «Higher School of Economics», Moscow, 101000, Russia*

*e-mail: koreyev.alexis@yandex.ru

We presented the results of a study of two-dimensional electron systems implemented in MgZnO/ZnO heterostructures with high interaction parameters. Using the inelastic light scattering method, we observed ferromagnetic transitions and spin textures. We also studied the dispersion dependences of key energy parameters.

Keywords: quantum Hall effect, fractional quantum Hall effect, two-dimensional electron systems, strongly correlated two-dimensional electron systems