

УДК 538.9

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ КВАНТОВОГО ЭФФЕКТА ХОЛЛА В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА

© 2024 г. В. Е. Бисти¹, *

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

*E-mail: bisti@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 16.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Проанализировано влияние электронного спинового резонанса на величину продольного сопротивления двумерного электронного канала в режиме квантового эффекта Холла вблизи целочисленных факторов заполнения. Увеличение сопротивления при нечетных факторах заполнения обусловлено эффективным увеличением температуры при поглощении с образованием дополнительных спиновых экситонов. При четных факторах заполнения поглощение, зависящее от спиновой поляризации системы при ненулевой температуре, приводит к переходу существующих комбинированных спин-флип возбуждений в расположенные выше по энергии короткоживущие возбуждения, что эквивалентно понижению эффективной температуры.

DOI: 10.31857/S0367676524020075, EDN: RTIOZX

ВВЕДЕНИЕ

Изучение осцилляций магнитопроводимости в режиме квантового эффекта Холла при микроволновом облучении в условиях электронного спинового резонанса (ESR) широко используется как метод изучения 2D электронной системы (2DES). Для квантовых ям на основе GaAs/AlGaAs этот метод использовался в работах [1–4]. В работах [1,2] метод изменения продольного магнитосопротивления при микроволновом облучении в условиях ESR резонанса при наблюдении осцилляций Шубникова–де Гааза использовался для определения g -фактора 2D электронов. В работе [3] изучалась температурная зависимость изменения магнитосопротивления в условиях EPR при факторе заполнения $\nu = 1$. В работе [4] осцилляции магнитопроводимости в условиях микроволнового облучения использовались для изучения релаксации ядерных спинов при их взаимодействии с 2D электронным газом.

Осцилляции магнитопроводимости в режиме квантового эффекта Холла использовались как метод изучения спинового состояния 2D электронов в гетеропереходе ZnO/MgZnO [5,6] и квантовой яме AlAs/AlGaAs [7]. В работе [5] явление электронного парамагнитного резонанса было изучено вблизи фактора заполнения 2 в гетеропереходе ZnO/MgZnO в наклонных магнитных полях.

Анализ интенсивности парамагнитного резонанса позволил установить, что при определенном угле в окрестности фактора заполнения 2 в двумерной электронной системе происходит фазовый переход, сопровождающийся масштабным изменением спиновой поляризации. В работе [6] изучалось изменение продольного сопротивления при облучении микроволновым излучением в условиях спинового резонанса $\hbar\omega_m = E_Z$ (ω_m – частота микроволнового поля, E_Z – энергия зеемановского расщепления электронов в ZnO) вблизи целочисленных факторов заполнения. Основным методом изучения ESR основывается на сильной чувствительности продольного сопротивления 2D канала к частоте микроволнового облучения. Использовалась методика, при которой одновременно измерялись сопротивление канала R_{xx} и изменение сопротивления δR_{xx} при резонансной частоте в зависимости от магнитного поля. Спиновый резонанс наблюдался как пик в δR_{xx} при медленном изменении магнитного поля и постоянной частоте микроволнового излучения. Эффект носит ярко выраженный резонансный характер, ширина резонанса очень мала. Амплитуды изменения сравнимы для четных и нечетных факторов заполнения, а знаки изменения продольного сопротивления противоположны. R_{xx} увеличивается в окрестности нечетных ν и уменьшается в окрестности четных ν . С ростом угла между направлением магнитного поля и нормалью

к поверхности для четных факторов заполнения отмечалось изменение знака δR_{xx} на противоположный, что объяснялось наблюдаемым ранее [5] переходом в ферромагнитное состояние.

Вопрос о влиянии микроволнового облучения в условиях ESR на знак и амплитуду изменения продольного сопротивления в режиме квантового эффекта Холла вблизи как нечетных, так и четных целочисленных факторов заполнения открыт и требует своего объяснения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Теорема Кона и теорема Лармора утверждают, что для циклотронных и ESR коллективных возбуждений в двумерной электронной системе при сохранении трансляционной и вращательной симметрии поправки за счет межчастичного взаимодействия равны нулю [8–10] независимо от фактора заполнения и энергии взаимодействия частиц. Величина спинового расщепления для невзаимодействующих электронов $E_Z = g\mu_B H$, где H — магнитное поле, g — g -фактор электронов в полупроводнике, μ_B — магнетон Бора. Следовательно, коллективные ESR возбуждения в гетеропереходе ZnO/MgZnO (системе двумерных электронов с сильным взаимодействием) при импульсе возбуждения $K = 0$ имеют энергию $E_Z = g\mu_B H$, где $g = 1.96$ — g -фактор электронов в ZnO. Эта энергия соответствует частоте резонансов, наблюдающихся при определенных значениях магнитных полей в работе [6]. В условиях эксперимента плотность двумерных электронов $n = 3.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ($r_s = 6$), температура $T = 0.5 \text{ K}$, ширина линии спинового резонанса $\delta < 2 \text{ мТл}$.

В [11,12] методом неупругого рассеяния света изучено поведение степени спиновой поляризации и величины обменной энергии вблизи $\nu = 1$ в 2DES на основе ZnO. Согласно [11], при $\nu < 1$ спиновая поляризация близка к 1, а при $1 < \nu < 1.1$ система деполяризуется по односпиновому сценарию (как для невзаимодействующих частиц). В работе [12] при значениях параметра Вигнера–Зейтца $r_s > 6$ методом неупругого рассеяния исследовалось поведение спиновой жесткости, определяемой из дисперсии спиновых экситонов, результат также подтвержден прямыми численными методами для конечного числа частиц; показано, что система с ростом $r_s > 6$ характеризуется изменением масштаба обменной энергии от кулоновской энергии межчастичного взаимодействия до циклотронной энергии квазичастиц ферми-жидкости.

Для квантовых ям GaAs/AlGaAs [13] и гетеропереходов ZnO/MgZnO [14] из анализа спектров излучательной рекомбинации двумерных электронов с фотовозбужденными дырками, связанными на удаленных акцепторах, изучена зависимость энергии Ферми и измерена зависимость

перенормированной массы квазичастиц от концентрации двумерных электронов. Показано, что в перпендикулярном магнитном поле концепция квазичастиц в двумерной ферми-жидкости сохраняется не только вблизи поверхности ферми, но и глубоко под ней, вплоть до дна зоны размерного квантования, поскольку уширение уровней Ландау оказывается значительно меньше, чем их энергия.

В экспериментах по изменению магнитосопротивления в условиях ESR [6] участвуют квазичастицы верхних уровней Ландау, вблизи энергии Ферми, поэтому для их объяснения можно применить понятие квазичастиц ферми-жидкости.

Характерные масштабы рассматриваемых величин ZnO/MgZnO в условиях эксперимента: эффективная масса объемного ZnO $m^* = 0.32 m_0$, масса квазидырок [14] $m_{qh} \sim 0.5 m_0$ для $n = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. В условиях эксперимента выполняются условия: $\delta/T \ll 1$ (~ 0.005), $T/E_Z \ll 1$.

Зеемановское расщепление $E_Z [\text{мэВ}] = g\mu_B H = 0.114 \cdot H [\text{Тл}]$. Циклотронное расщепление без учета перенормировки массы $\hbar\omega_c [\text{мэВ}] = 0.36 \cdot H [\text{Тл}]$, с учетом перенормировки массы $\hbar\omega_c [\text{мэВ}] = 0.24 \cdot H [\text{Тл}]$.

Теоретическое обоснование изменения магнитосопротивления в условиях EPR при факторе заполнения $\nu = 1$ было дано в работе [3] для квантовой ямы GaAs/AlGaAs. В системе имеются тепловые спиновые экситоны, часть которых распадается с образованием свободных носителей заряда. Сопротивление такой системы активационного типа:

$$R_{xx} \sim \exp\left(-\frac{\Delta}{2T}\right), \quad (1)$$

где Δ — энергия активации. Энергия активации (транспортная щель) полагалась равной энергии спинового экситона при импульсе, равном бесконечности. При этом полагалось, что кулоновская энергия мала по сравнению с циклотронной, что справедливо для GaAs, поэтому можно было не учитывать вышележащие уровни Ландау. Микроволновое поглощение приводит к образованию спиновых экситонов с нулевым импульсом. Образование дополнительных экситонов приводит к увеличению температуры системы электронов, что, в свою очередь, можно связать с увеличением продольного сопротивления.

В условиях эксперимента [6] на гетеропереходе ZnO/MgZnO при $\nu = 3$ и $\nu = 4$, кулоновская энергия велика по сравнению с циклотронной ($r_s = 6$), поэтому строгого обоснования модели, используемой в работе [3], в данном случае нет. Однако основную идею рассмотреть можно. Для электронов верхних подуровней, участвующих в поглощении и дающих вклад в сопротивление, взаимодействие с остальными электронами можно учитывать

в концепции ферми-жидкости, используя перенормированную массу квазичастиц из работы [14]. Кулоновское взаимодействие с учетом экранировки, согласно экспериментам [12], становится масштаба циклотронной энергии квазичастиц. Хотя степень спиновой поляризации систем с большим $r_s = 6$ может отличаться от идеальной, при нечетных факторах заполнения вероятность поглощения микроволнового излучения с образованием дополнительных спиновых экситонов велика, и увеличение продольного сопротивления можно качественно объяснить разогревом 2DES.

При четных факторах заполнения при $T = 0$ система в основном состоянии неполяризована, а при $T > 0$ существует некоторое количество возбужденных состояний, состоящих из квазиэлектронов и квазидырок: магнитоплазмонов со спином $S = 0$ (МР) и комбинированных спин-флип возбуждений со спином $S = 1$ и проекцией спина $S_z = 0, \pm 1$ (SF_0, SF_-, SF_+). Зеемановская энергия системы велика, поэтому преобладают возбуждения с меньшей энергией SF_- , в основном дающие вклад в активационную проводимость, и они же способны поглощать микроволновые фотоны. При поглощении образуются спин-флип возбуждения с $S_z = 0$ и магнитоплазмоны, эти возбуждения короткоживущие и быстро выводятся из системы, для их гибели не требуется спин-орбитального взаимодействия, достаточно только отдать энергию термостату. Число возбуждений с $S_z = -1$ уменьшается, что можно описать уменьшением их эффективной температуры. Уменьшение продольного сопротивления можно качественно объяснить эффективным охлаждением 2DES.

При изменении угла наклона магнитного поля к плоскости 2DES при четных факторах заполнения при переходе системы в ферромагнитное состояние изменяется и поведение системы в условиях ESR, что также находится в согласии с приведенными аргументами.

Для сравнения интенсивностей двух процессов можно сделать качественные оценки для изменения концентраций имеющихся в системе возбуждений, дающих вклад в сопротивление (δN_{SE} для нечетных ν и δN_{SF_-} для четных ν), учитывая, что $N_{SE} \ll N_H, N_{MP}, N_{SF0} \ll N_{SF_-} \ll N_H$ при $T/E_Z \ll 1, T/\hbar\omega_c^* \ll 1$. N_H — емкость уровня Ландау. $N_{SE}, N_{MP}, N_{SF0}, N_{SF_-}$ — концентрации соответствующих возбуждений, $\tau_{SE}, \tau_{SF_-}, \tau_{SF0}, \tau_{MP}$ — их времена жизни ($\tau_{SF0}, \tau_{MP} \ll \tau_{SF_-}$). Кроме того, предполагается, что поглощаемая мощность невелика ($\delta N_{SE} \ll N_{SE}, \delta N_{SF_-} \ll N_{SF_-}$) и система находится в стационарном состоянии.

Для нечетных ν

$$\begin{aligned} dN_{SE}/dt &= W_{SE} N_H - \delta N_{SE}/\tau_{SE} = 0; \\ \delta N_{SE} &= W_{SE} N_H \tau_{SE} \end{aligned} \quad (2)$$

Для четных ν

$$\begin{aligned} dN_{SF_-}/dt &= -W_{-0} N_{SF_-} - \delta N_{SF_-}/\tau_{SF_-} = 0; \\ \delta N_{SF_-} &= -W_{-0} N_{SF_-} \tau_{SF_-}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь W_{SE} — вероятность переворота спина электрона, находящегося на верхнем заполненном уровне Ландау, при микроволновом поглощении за счет спин-орбитального взаимодействия с образованием дополнительных спиновых возбуждений SE при нечетных ν . W_{-0} — вероятность переворота спина электрона или дырки из возбужденного состояния SF_- при микроволновом поглощении за счет спин-орбитального взаимодействия с образованием спиновых возбуждений SF_0 и МР при четных ν .

δN_{SE} и δN_{SF_-} оказываются разного знака. W_{SE} и W_{-0} зависят от фактора заполнения и температуры, но для соседних ν (3-4 или 7-8, как в условиях эксперимента) будут одного порядка. Наблюдаемые эффекты могут быть одного порядка при

$$\delta N_{SF_-}/\delta N_{SE} \sim (N_{SF_-}/N_H)(\tau_{SF_-}/\tau_{SE}) \sim 1. \quad (4)$$

Поскольку $N_{SF_-} \ll N_H$, необходимо, чтобы $\tau_{SF_-}/\tau_{SE} \gg 1$, т.е. спин-флип возбуждения должны быть существенно более долгоживущими, чем спиновые экситоны. Вопрос о релаксации спиновых экситонов и спин-флип возбуждений проанализирован в обзоре [15]. Из теоретического изучения следует, что существует множество релаксационных механизмов, требующих наличия взаимодействия, не сохраняющего спин, и взаимодействия, обеспечивающего обмен энергией при условии необратимости релаксационного процесса. Несохраниение спина дает учет спин-орбитального взаимодействия электронов. Диссипативный механизм возможен за счет кулоновского взаимодействия, взаимодействия электронов с плавным случайным потенциалом, электрон-фононного взаимодействия. Для спиновых экситонов в квантово-холловском ферромагнетике различные каналы релаксации были рассмотрены в [16]. Показано, что преобладает релаксация за счет взаимодействия с плавным случайным потенциалом. Релаксация спин-флип возбуждений в квантово-холловском изоляторе в низкотемпературной области [17] происходит безызлучательно, за счет рождения коротковолновых акустических фононов. Оценки для квантовых ям GaAs/AlGaAs: 10^{-4} с для SF_- и 10^{-7} с SE [15]. Можно полагать, что и для 2DES на гетероперехода ZnO/MgZnO также может быть $\tau_{SF_-}/\tau_{SE} \sim 10^2 - 10^3$. Выполнение условия (4) возможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что изменение сопротивления при поглощении микроволнового излучения зависит от фактора заполнения

(спинового состояния системы). Увеличение сопротивления при нечетных факторах заполнения объясняется поглощением с образованием дополнительных спиновых экситонов. Уменьшение сопротивления при четных факторах заполнения объясняется переходом тепловых комбинированных спин-флип возбуждений в расположенные выше по энергии короткоживущие возбуждения, что эквивалентно понижению эффективной температуры. Различные по природе эффекты могут быть одного масштаба.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФТТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stein D., v. Klitzing K., Weimann G. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51. No. 2. P. 130.
2. Dohers M., v. Klitzing K., Weimann G. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. No. 8. P. 5453.
3. Olshanetsky E., Caldwell J.D., Pilla M. et al. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. No. 16. Art. No. 165325.
4. Berg A., Dohers M., Gerhardt R.R., v. Klitzing K. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. No. 21. P. 2563.
5. Шепетильников А.В., Хисамеева А.Р., Нефедов Ю.А., Кукушкин И.В. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. № 10. С. 689; Shchepetilnikov A.V., Khisameeva A.R., Nefyodov Yu.A., Kukushkin I.V. // JETP Lett. 2021. V. 113. No. 10. P. 657.
6. Shchepetilnikov A.V., Khisameeva A.R., Nefyodov Yu.A., Kukushkin I.V. // Phys. Rev. B. 2021. V. 104. No. 7. Art. No. 075437.
7. Shchepetilnikov A.V., Khisameeva A.R., Nefyodov Yu.A., Kukushkin I.V. // Phys. Rev. B. 2021. V. 103. No. 19. Art. No. 195313.
8. Kohn W. // Phys. Rev. 1961. V. 123. No. 4. P. 1242.
9. Brillouin L. // Phys. Rev. 1945. V. 67. No. 7–8. P. 260.
10. Califano M., Chakraborty T., Pietilainen P., Hu C.-M. // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. No. 11. Art. No. 113315.
11. Ваньков А.Б., Кайсин Б.Д., Кукушкин И.В. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. № 4. С. 268; Van'kov A.B., Kaysin B.D., Kukushkin I.V. // JETP Lett. 2019. V. 110. No. 4. P. 296.
12. Van'kov A.B., Kukushkin I.V. // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. No. 23. Art. No. 235424.
13. Кукушкин И.В., Шмульт С. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101. № 10. С. 770; Kukushkin I.V. // JETP Lett. 2015. V. 101. No. 10. P. 693.
14. Solov'yev V.V., Kukushkin I.V. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. No. 11. Art. No. 115131.
15. Кулик Л.В., Горбунов А.В., Дикман С.М., Тимофеев В.Б. // УФН. 2019. Т. 189. № 9. С. 925; Kulik L.V., Gorbunov A.V., Dikman S.M., Timofeev V.B. // Phys. Usp. 2019. V. 62. No. 9. P. 865.
16. Dickmann S., Ziman T. // Phys. Rev. B. 2012. V. 85. No. 4. Art. No. 045318.
17. Dickmann S. // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. No. 16. Art. No. 116801.

Electron spin resonance impact on the longitudinal resistance in the quantum Hall regime

V. E. Bisti¹, *

¹*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

*e-mail: bisti@issp.ac.ru

The electron spin resonance impact on the longitudinal resistance in the quantum Hall regime near the integer filling factors is considered. For the odd filling factors extra spin excitons are created in the process of the microwave absorption, and the resistance increase due to the effective temperature rise. For the even filling factors in the absorption process depending on the temperature inspired spin polarization leads to transition of the spin-flip excitations to the higher energy short-lived excitations, and as a result the resistance is decreased due to effective temperature decrease.

Keywords: quantum Hall effect, spin resonance, longitudinal magnetoresistance.