

## Наблюдение электронного парамагнитного резонанса в индуцированном микроволновым излучением фотонапряжении

А. В. Щепетильников<sup>1)</sup>, А. Р. Хисамеева, Ю. А. Нёфедов, И. В. Кукушкин

*Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

Поступила в редакцию 2 октября 2019 г.

После переработки 2 октября 2019 г.

Принята к публикации 3 октября 2019 г.

Фотонапряжение, индуцированное микроволновым излучением, было изучено в режиме квантового эффекта Холла в двумерных электронных системах, заключенных в AlAs квантовую яму и ZnO/MgZnO гетеропереход. При фиксированной частоте микроволнового излучения и плавном развороте магнитного поля в измеряемом фотонапряжении наблюдался острый пик, соответствующий парамагнитному резонансу двумерных электронов проводимости. Отметим, что парамагнитный резонанс таким способом в двумерных электронных системах наблюдался впервые. Продемонстрировано, что подобный метод детектирования парамагнитного резонанса работает при принципиально различных геометриях омических контактов к двумерному каналу: мостике Холла и диске Корбино. Произведено сравнение со стандартной методикой детектирования спинового резонанса по изменению сопротивления двумерной электронной системы при поглощении микроволнового излучения.

DOI: 10.1134/S0370274X19210057

В низкоразмерных полупроводниковых гетероструктурах спиновая степень свободы электронов представляет собой крайне перспективный объект для изучения как с практической, так и с фундаментальной точек зрения. Огромное количество красивых фундаментальных физических явлений обусловлено наличием спина у носителя заряда: аномальный [1, 2] и спиновый эффекты Холла [3, 4], скирмионные кристаллы и жидкости [5, 6], квантовохолловский ферромагнетизм [7] и т.д. Прикладные исследования в области спиновой физики сосредоточены вокруг возможности использования электронного спина для хранения и обработки информации в рамках спиновой электроники [8], а также для проведения квантовых вычислений [9].

Одним из наиболее эффективных методов изучения физики спина в различных полупроводниковых структурах является электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) [10–19]. Однако прямой метод измерения поглощения микроволнового излучения по изменению добротности резонатора плохо применим для наблюдения парамагнитного резонанса двумерных электронов из-за малого числа спинов в системе [20]. Поэтому широкое распространение получила существенно более эффективная методика наблюдения ЭПР [10], впервые предложенная в 1983 г. Данный подход опирается на высокую чувствитель-

ность продольного сопротивления двумерного канала к поглощению микроволнового излучения, при этом ЭПР проявляет себя как острый пик в магнитосопротивлении образца при фиксированной частоте микроволнового излучения. В рамках данной работы впервые парамагнитный резонанс двумерных электронов был обнаружен в индуцированном микроволновым излучением фотонапряжении, возникающем на контактах к двумерной электронной системе. Данное экспериментальное наблюдение имеет ряд важных следствий. Во-первых, для детектирования резонанса в такой схеме не нужно пропускать через образец низкочастотный электрический ток, который, без сомнения, разогревает образец и может оказывать существенное влияние на ряд тонких физических явлений, например, на состояния дробного квантового эффекта Холла, отвечающие дробям высокого порядка [21]. Во-вторых, фотонапряжение несет дополнительную информацию о физических свойствах электронной системы. Так, экспериментальное изучение фотонапряжения вблизи состояний с нулевым сопротивлением, индуцированных микроволновым излучением, позволило установить доменную структуру таких состояний [22, 23] и даже изучить динамику междоменных переключений [24]. Обширные исследования интерференции плазменных возбуждений по фотонапряжению, обусловленному поглощением СВЧ-излучения, является еще одним ярким примером [25, 26]. Более того, неравновес-

<sup>1)</sup>e-mail: shchepetilnikov@issp.ac.ru

ные электроны, возникающие вблизи ЭПР, являются поляризованными по спину. С учетом того факта, что время транспортного рассеяния электронов существенно меньше, чем время потери фазы электронных спинов в режиме квантового эффекта Холла [27], поток носителей заряда, обуславливающий возникающее фотонапряжение, также имеет существенную спиновую поляризацию. Данный эффект аналогичен возникновению спинового тока при поглощении неполяризованного света [28].

В качестве объектов исследования были выбраны два типа структур, а именно – гетеропереход ZnO/MgZnO и 4.5 нм AlAs квантовая яма. В структурах ZnO/MgZnO треугольная квантовая яма, ограничивающая движение электронов в направлении роста структуры, образуется благодаря разнице во внутренних электрических поляризациях объемных полупроводников ZnO и MgZnO [29]. Электронная плотность и подвижность составляли  $n_s = 6 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu = 30 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . Гетероструктура AlAs/AlGaAs, выращенная на подложке GaAs вдоль направления [001] посредством молекулярно-лучевой эпитаксии, содержала AlAs квантовую яму шириной  $W = 4.5 \text{ нм}$ . Двумерная плотность электронов и подвижность соответствовали  $n_s = 4.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu = 35 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . Отметим, что электроны как в ZnO/MgZnO гетеропереходе, так и в AlAs-квантовой яме обладают большой эффективной массой [30, 31], в несколько раз превышающей массу электрона в стандартном GaAs. Такая большая эффективная масса электрона обеспечивает доминирование характерной кулоновской энергии межэлектронного взаимодействия над энергией Ферми, а значит, приводит к повышенному влиянию многоэлектронных корреляций на физические свойства таких структур, в том числе, и спиновые [32, 33].

В ходе исследования были апробированы принципиально различные геометрии контактов к 2D системам: мостик Холла с шириной 100 мкм и характерным расстоянием между контактами около 1 мм, а также диск Корбино с внутренним диаметром 0.5 мм и внешним 1 мм, схематические изображения которых представлены на вставках к рис. 1а и 2а, соответственно. Омический контакт к ZnO/MgZnO гетеропереходу формировался с помощью напыления слоев титана и золота непосредственно на поверхность образца, а к AlAs-квантовой яме – за счет вжигания индия в атмосфере образующего газа. Образцы погружались в криостат с откачкой паров  $^4\text{He}$  или  $^3\text{He}$ , что позволяло проводить измерения при температурах как  $T = 1.5 \text{ К}$ , так и  $T = 0.5 \text{ К}$ . Эксперименты проводились в перпендикулярном поверхно-

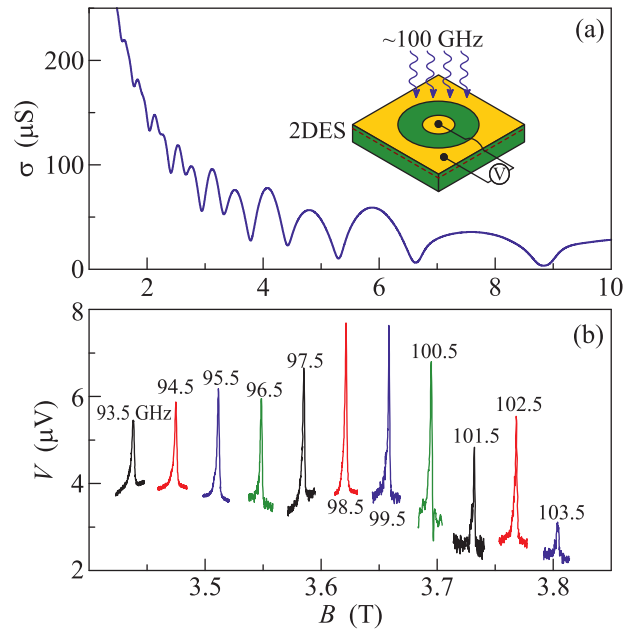


Рис. 1. (Цветной онлайн) (а) – Зависимость проводимости диска Корбино от перпендикулярного магнитного поля для гетероперехода ZnO/MgZnO. Измерения выполнены при температуре  $T = 1.5 \text{ К}$ . На вставке показано схематическое изображение образца. (б) – Типичные пики ЭПР в фотонапряжении, измеренные при различных частотах микроволнового излучения  $f = 93.5\text{--}103.5 \text{ ГГц}$

сти образца магнитном поле до 15 Тл и диапазоне частот микроволнового излучения  $f = 90\text{--}140 \text{ ГГц}$ . В качестве источника излучения использовался генератор микроволнового излучения и сопряженный с ним блок умножения частоты, выходная мощность которого не превышала 1 мВт. Микроволновое излучение, модулированное по амплитуде, доставлялось до образца по сверхразмерному волноводу. Сигнал индуцированного микроволновым излучением фотонапряжения детектировался посредством синхронного детектора, настроенного на частоту амплитудной модуляции излучения. В мостике Холла для максимизации значения сигнала напряжение измерялось между наиболее асимметричными контактами, а именно, между стоковым и одним из потенциометрических контактов, в геометрии диска Корбино – между внутренним и внешним контактами.

На рисунке 1а представлена характерная зависимость проводимости двумерной электронной системы в гетеропереходе ZnO/MgZnO от магнитного поля при температуре  $T = 1.5 \text{ К}$  на образце, выполненном в виде диска Корбино. Хорошо различимы осцилляции Шубникова–де Гааза. На панели (б) данного рисунка приведены типичные пики ЭПР, наблюда-

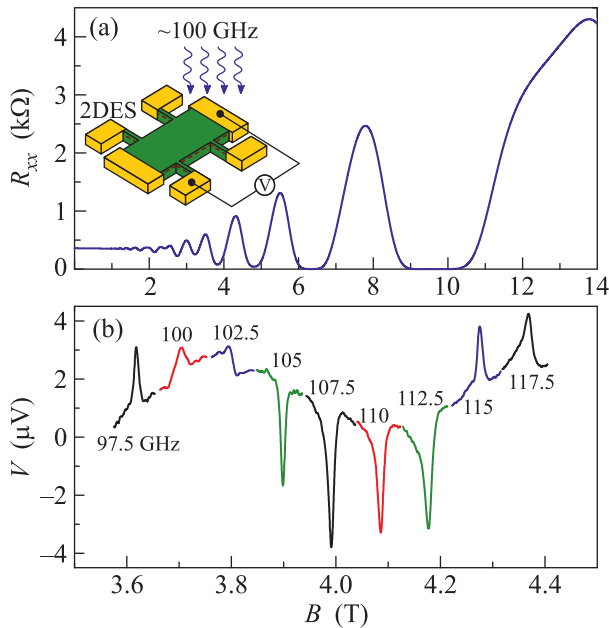


Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Магнитосопротивление Холловского мостика на основе гетероструктуры AlAs/AlGaAs, измеренное при температуре  $T = 0.5$  К. Низкотемпературные значения двумерной плотности и подвижности электронов составляли, соответственно,  $n_s = 4.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и  $\mu = 3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . На вставке показано схематическое изображение образца. (b) – Типичные пики ЭПР в фотонапряжении, измеренные при различных частотах микроволнового излучения  $f = 97.5\text{--}117.5$  ГГц

емые в индуцированном микроволновом излучении фотонапряжении вблизи нечетного фактора заполнения системы  $\nu = 9$ . Около каждого пика приведена соответствующая частота микроволнового излучения. Как видно, соотношение сигнал–шум на полученных в рамках предлагаемого подхода данных достаточно не только для точного определения положения резонанса, но и для анализа других параметров резонансного пика – его амплитуды и ширины.

Продемонстрируем, что парамагнитный резонанс наблюдается в такой схеме не только в другой контактной геометрии, но и в других полупроводниковых системах. На рисунке 2а показано магнитосопротивление двумерного канала, заключенного в 4.5 нм AlAs квантовую яму, при температуре  $T = 0.5$  К. При этом образец был выполнен в виде стандартного мостика Холла. Типичные пики парамагнитного резонанса, наблюдаемые в индуцированном микроволновом излучении фотонапряжении вблизи фактора заполнения  $\nu = 5$ , приведены на панели (b) того же рисунка. Хорошо видно, что форма пиков отличается от классического лоренциана и го-

раздо лучше описывается Фано-подобной формулой:  $\delta\rho \sim \frac{A + B\epsilon}{1 + \epsilon^2}$ . Здесь  $A$  и  $B$  – свободные параметры, а  $\epsilon = (B - B_0)/\delta B$ , где  $\delta B$  – полуширина пика. По всей видимости, данное обстоятельство обусловлено наличием фазы и, как следствие, интерференцией между возникающим при ЭПР и нерезонансным фоновым напряжениями.

Представляет интерес сравнить резонансные пики ЭПР, наблюдаемые в рамках стандартного подхода по сопротивлению двумерного канала и в фотонапряжении. На рисунке 3 показаны типичные за-

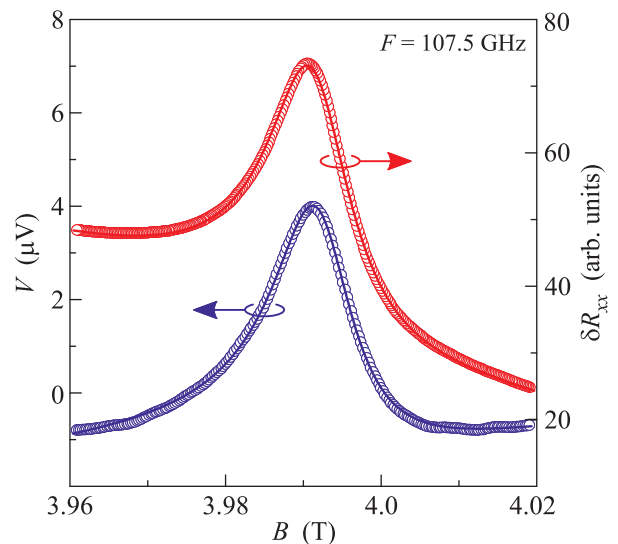


Рис. 3. (Цветной онлайн) Магнитополевая зависимость вблизи ЭПР фотонапряжения (синяя кривая) и добавки  $\delta R_{xx}$  к сопротивлению (красная кривая) для гетероструктуры AlAs/AlGaAs с шириной квантовой ямы 4.5 нм

висимости фотонапряжения (синие точки) и добавки  $\delta R_{xx}$  к сопротивлению образца (красные точки), обусловленной поглощением микроволнового излучения. На обеих кривых хорошо разрешимы резонансные пики, ширины и положения которых с хорошей точностью совпадают. Сплошной линией отображены аппроксимации данных пиков формулой, указанной выше.

На данный момент точный механизм выпрямления микроволнового излучения вблизи парамагнитного резонанса неизвестен и для его определения необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования. Однако, как правило, фотонапряжение в электронной системе возникает при рождении неравновесных носителей заряда, их дальнейшем распространении и рассеянии. Принципиально важным является наличие асимметрии в си-

стеме, например, асимметрия рассеяния, механизма фотовозбуждения или возбуждающего электромагнитного поля. По аналогии с возникновением фотонапряжения в режиме индуцированных микроволновым излучением осцилляций сопротивления [22] можно предположить, что ключевым фактором при генерации напряжения на контактах диска Корбино является неоднородность электромагнитного поля, обусловленная асимметрией геометрии металлических контактов к 2D системе. Этим же можно объяснить и наличие фотонапряжения на принципиально различных контактах, а именно, стоковом и потенциометрическом, в мостике Холла.

В заключение, парамагнитный резонанс двумерных электронов был обнаружен в индуцированном микроволновым излучением фотонапряжении, возникающем на контактах к двумерной электронной системе, впервые. При фиксированной частоте микроволнового излучения и плавном развороте магнитного поля парамагнитный резонанс наблюдался как острый пик в измеряемом фотонапряжении. Показано, что резонанс наблюдается при разных геометриях омических контактов к двумерному каналу: мостике Холла и диске Корбино. Произведено сравнение со стандартной методикой детектирования спинового резонанса по изменению сопротивления двумерной электронной системы при поглощении микроволнового излучения.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФТТ РАН при частичном финансировании Российского фонда фундаментальных исследований (грант #17-02-00122). А. В. Щепетильников выражает благодарность за поддержку гранту Президента РФ (МК-6705.2018.2).

1. C. X. Liu, X. L. Qi, X. Dai, Z. Fang, and S. C. Zhang, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 146802 (2008).
2. C.-Z. Chang, J. Zhang, X. Feng et al. (Collaboration), *Science* **340**, 167 (2013).
3. S. Murakami, N. Nagaosa, and S. C. Zhang, *Science* **301**, 1348 (2003).
4. M. Koenig, S. Wiedmann, C. Bruene, A. Roth, H. Buhmann, L. Molenkamp, X.-L. Qi, and S.-C. Zhang, *Science* **318**, 766 (2007).
5. G. Gervais, H. L. Stoermer, D. C. Tsui, P. L. Kuhns, W. G. Moulton, A. P. Reyes, L. N. Pfeiffer, K. W. Baldwin, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 196803 (2005).
6. A. V. Larionov, E. Stepanets-Khussein, and L. V. Kulik, *JETP Lett.* **105**, 238 (2017).
7. A. S. Zhuravlev, A. B. Van'kov, L. V. Kulik, I. V. Kukushkin, V. E. Kirpichev, J. H. Smet, K. von Klitzing, V. Umansky, and W. Wegscheider, *Phys. Rev. B* **77**, 155404 (2008).
8. I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).
9. L. M. K. Vandersypen and M. A. Eriksson, *Phys. Today* **72**, 38 (2019).
10. D. Stein, K. von Klitzing, and G. Weimann, *Phys. Rev. Lett.* **51**, 130 (1983).
11. M. Dobers, K. von Klitzing, and G. Weimann, *Phys. Rev. B* **38**, 5453 (1988).
12. R. Meisels, I. Kulac, F. Kuchar, and M. Kriechbaum, *Phys. Rev. B* **61**, 5637 (2000).
13. A. V. Shchepetilnikov, Y. A. Nefyodov, I. V. Kukushkin, and W. Dietsche, *J. Phys. Conf. Ser.* **456**, 012035 (2013).
14. M. Dobers, K. von Klitzing, J. Schneider, G. Weimann, and K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 1650 (1988).
15. A. Berg, M. Dobers, P. R. Gerhardt, and K. von Klitzing, *Phys. Rev. Lett.* **64**, 2563 (1990).
16. S. A. Vitkalov, C. R. Bowers, J. A. Simmons, and J. L. Reno, *Phys. Rev. B* **61**, 5447 (2000).
17. C. Hillman and H. W. Jiang, *Phys. Rev. B* **64**, 201308(R) (2001).
18. A. V. Shchepetilnikov, D. D. Frolov, Yu. A. Nefyodov, I. V. Kukushkin, D. S. Smirnov, L. Tiemann, C. Reichl, W. Dietsche, and W. Wegscheider, *Phys. Rev. B* **94**, 241302(R) (2016).
19. E. Olshanetsky, J. D. Caldwell, M. Pilla, Shu-chen Liu, C. R. Bowers, J. A. Simmons, and J. L. Reno, *Phys. Rev. B* **67**, 165325 (2003).
20. N. Nestle, G. Denninger, M. Vidal, C. Weinzierl, K. Brunner, K. Eberl, and K. von Klitzing, *Phys. Rev. B* **56**, R4359 (1997).
21. R. Willett, J. P. Eisenstein, H. L. Stoermer, D. C. Tsui, A. C. Gossard, and J. H. English, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 1776 (1987).
22. A. A. Bykov, *JETP Lett.* **87**, 233 (2008).
23. S. I. Dorozhkin, I. V. Pechenezhskiy, L. N. Pfeiffer, K. W. West, V. Umansky, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 036602 (2009).
24. S. I. Dorozhkin, L. Pfeiffer, K. West, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Nature Phys.* **7**, 336 (2011).
25. I. V. Kukushkin, M. Yu. Akimov, J. H. Smet, S. A. Mikhailov, K. von Klitzing, I. L. Aleiner, and V. I. Falko, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 235803 (2004).
26. D. A. Bandurin, D. Svintsov, I. Gayduchenko et al. (Collaboration), *Nat. Commun.* **9**, 5392 (2018).
27. A. V. Shchepetilnikov, Y. A. Nefyodov, and I. V. Kukushkin, *JETP Lett.* **97**, 574 (2013).
28. S. A. Tarasenko and E. L. Ivchenko, *JETP Lett.* **81**, 231 (2005).
29. J. Betancourt, J. J. Saavedra-Arias, J. D. Burton, Y. Ishikawa, E. Y. Tsymbal, and J. P. Velev, *Phys. Rev. B* **88**, 085418 (2013).

30. V. E. Kozlov, A. B. Van'kov, S. I. Gubarev, I. V. Kukushkin, V. V. Solovyev, J. Falson, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, and J. H. Smet, *Phys. Rev. B* **91**, 085304 (2015).
31. A. R. Khisameeva, A. V. Shchepetilnikov, V. M. Muravev, S. I. Gubarev, D. D. Frolov, Yu. A. Nefyodov, I. V. Kukushkin, C. Reichl, L. Tiemann, W. Dietsche, and W. Wegscheider, *Phys. Rev. B* **97**, 115308 (2018).
32. A. V. Shchepetilnikov, D. D. Frolov, Yu. A. Nefyodov, I. V. Kukushkin, L. Tiemann, C. Reichl, W. Dietsche, and W. Wegscheider, *Phys. Rev. B* **98**, 241302(R) (2018).
33. A. B. Van'kov, B. D. Kaysin, and I. V. Kukushkin, *Phys. Rev. B* **98**, 121412(R) (2018).