ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 2, с. 170–174

УДК 538.9

НАБЛЮДЕНИЕ СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА ДВУМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ В БЕСКОНТАКТНОЙ ГЕОМЕТРИИ

© 2021 г. А. Р. Хисамеева[1, *], А. В. Щепетильников[1], Ю. А. Нефёдов[1], И. В. Кукушкин[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
"Институт физики твердого тела Российской академии наук", Черноголовка, Россия

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

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

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) в двумерной системе на основе гетероперехода ZnO/MgZnO наблюдался посредством двух принципиально различных бесконтактных методик. В первой геометрии спиновый резонанс детектировался в сигнале пропускания широкополосного копланарного волновода, нанесенного на поверхность образца. Во второй методике, ЭПР проявлялся в изменение мощности радиоволнового сигнала, проходящего через пару Т-образных антенн "излучатель/детектор", емкостно связанных с двумерным каналом. Было проведено сравнение полученных результатов с данными, измеренными стандартной транспортной методикой детектирования ЭПР.

DOI: 10.31857/S0367676521020150

Последние десятилетия исследованиям спиновой степени свободы в низкоразмерных системах посвящается все больше работ не только с целью изучения фундаментальных физических явлений, но и для поиска потенциального прикладного применения. Вследствие прогресса в молекулярно-лучевой эпитаксии, селективно легированные полупроводниковые гетероструктуры оказались почти идеальными системами для таких исследований. Эксперименты продемонстрировали богатое разнообразие фундаментальных физических явлений, обусловленных спиновой степенью свободы, например: квантовый эффект Холла [1, 2], переход металл–изолятор [3, 4], скирмионные кристаллы [5], структуры с нетривиальной спиновой текстурой [6]. Перспектива прикладного применения в свою очередь связана с созданием элементов спиновой электроники, которые позволят обрабатывать и хранить информацию [7], а также проводить квантовые вычисления [8]. Актуальность данного направления приводит к поиску и исследованию материальных систем с новыми уникальными свойствами и разработке новых экспериментальных методик по изучению физики спина.

Одной из таких перспективных полупроводниковых структур является гетеропереход ZnO/MgZnO, который, в отличие от хорошо изученных GaAs/AlGaAs гетероструктур, характеризуется наличием относительно большой эффективной массы электронов ($m^* \approx 0.3m_0$), что приводит к доминированию кулоновской энергии над энергией Ферми. Данный факт открывает путь для исследования новых интересных явлений, связанных с сильным электрон-электронным взаимодействием [9–12]. Двумерная система в структуре ZnO/MgZnO формируется благодаря разнице значений внутренней электрической поляризации в ZnO и MgZnO [13]. Изменяя концентрацию Mg в MgZnO, можно варьировать ширину запрещенной зоны и степень поляризации в данном материале [14] и, как следствие, управлять двумерной плотностью электронов. С точки зрения прикладного применения, структуры ZnO/MgZnO обладают такими преимуществами как большая ширина запрещенной зоны (3.42 эВ), а следовательно, и большое значение электрического поля пробоя в сравнение с GaAs и Si, высокая скорость насыщения, химическая устойчивость.

В целях исследования спиновых свойств ДЭС наиболее эффективным методом является электронный парамагнитный резонанс [15, 16]. Стандартная методика детектирования, основанная на изменении добротности резонатора, не применима к ДЭС вследствие небольшого количества спинов [17]. В 1983 г. был предложен более эффективный метод [15], получивший широкое применение и основывающийся на высокой чувствительности продольного магнетосопротивле-

ния в режиме целочисленного квантового эффекта Холла к поглощению микроволнового излучения. В экспериментах электронный парамагнитный резонанс детектируется при фиксированной частоте микроволнового излучения как острый пик в магнитосопротивление образца. В рамках данной статьи были апробированы две принципиально различные бесконтактные методики для детектирования спинового резонанса электронов проводимости в ДЭС на основе гетероперехода ZnO/MgZnO. Их отличительной и важной особенностью является то, что к ДЭС не формировались омические контакты, а значит, образец не подвергался воздействию высокой температуры при термическом отжиге контактов. Более того, в измерениях не требовалось пропускать электрический ток через образцы, что могло бы приводить к разогреву образцов и влиять на исследуемые физические явления.

Исследования проводились на высококачественных гетеропереходах ZnO/MgZnO, в которых электронная плотность и подвижность составляли $n_s = 9.8 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$ и $\mu = 10^4$ см^2/(В · с). Образцы погружались в полутораградусную камеру криостата с возможностью откачки паров ^{4}He, что позволяло достигать температуры $T = 1.5$ K. Измерения проводились в перпендикулярном поверхности образца магнитном поле до 10 Тл. В эксперименте использовались два источника микроволнового излучения. В качестве источника возбуждающего излучения использовался генератор микроволнового излучения с сопряженными блоками умножения частоты в диапазоне $F = 60-140$ ГГц. Данное СВЧ излучение доставлялось до образца посредством сверхразмерного волновода. В качестве источника зондирующего излучения использовался дополнительный генератор (до 20 ГГц). Данное излучение передавалось к образцу по коаксиальной линии.

В случае копланарно-трансмиссионной методики [18] поверхность образца пассивировалась слоем фоторезиста толщиной 1 мкм (рис. 1*а*). На поверхности фоторезиста был сформирован копланарный волновод в форме меандра, ширина щели составляла 30 мкм. Параметры волновода выбирались для обеспечения характеристического импеданса $Z_0 = 50$ Ом. Сигнал от генератора зондирующего излучения подавался на центральный проводник, два боковых были заземлены. Проходящий сигнал создавал в щелях копланарного волновода высокочастотное электрическое поле, которое эффективно взаимодействовало с двумерными электронами, при этом излучение частично поглощалось. Для детектирования мощности СВЧ-сигнала на выходе копланарной линии применялся диод Шоттки. Мощность зондирующего излучения проходящего через копланарный волновод можно выразить как [19]:

$$P = P_{in} \exp(-\alpha\sigma_{xx}),$$

где P_{in} – мощность на входе копланарного волновода, σ_{xx} – действительная часть продольного сопротивления двумерного канала, а α – коэффициент, определяемый в основном геометрическими размерами и диэлектрическими свойствами окружения. Таким образом, анализ поглощения копланарной линии позволяет изучать проводимость двумерного канала без необходимости формирования омического контакта к нему.

Зависимость напряжения V, измеряемого на выходе Шоттки диода, от магнитного поля показаны на рис. 1*а* при частоте зондирующего излучения, проходящего через копланарный волновод, $f = 5$ ГГц. В области сильных магнитных полей осцилляции Шубникова–де Гааза хорошо разрешаются. Положения минимумов осцилляций точно соответствуют электронной концентрации, полученной для данной структуры из независимых транспортных измерений. При резонансном поглощении образцом возбуждающего излучения вблизи ЭПР проводимость двумерного канала и, как следствие, мощность зондирующего излучения на выходе копланарной линии резко изменялась. Таким образом, ЭПР может детектироваться как пик в сигнале пропускания зондирующего излучения (т.е., фактически, в напряжении, измеряемом на выходе Шоттки диода), при развороте магнитного поля и фиксированной частоте возбуждающего излучения. Для улучшения соотношения сигнал/шум применялась стандартная схема синхронного детектирования. Возбуждающее излучение модулировалось по амплитуде, а синхронный детектор был настроен на частоту данной амплитудной модуляции, брал сигнал с выхода диода Шоттки и таким образом измерял вариацию сигнала пропускания, обусловленную поглощением возбуждающего излучения двумерной электронной системой. На рис. 1*б* показан типичный пик ЭПР, измеренный таким способом, при частоте возбуждающего излучения $F = 72.6$ ГГц и частоте зондирующего излучения в 5 ГГц. Полученные данные демонстрируют, что бесконтактная копланарно-трансмиссионная методика может использоваться для исследования спинового резонанса двумерных электронов проводимости. Также на рис. 2*в* для сравнения показана кривая зависимости добавки δR_{xx} к сопротивлению образца для близкой частоты возбуждающего излучения $F = 72.75$ ГГц. В обоих случаях резонансные линии совпадают по форме и ширине резонанса.

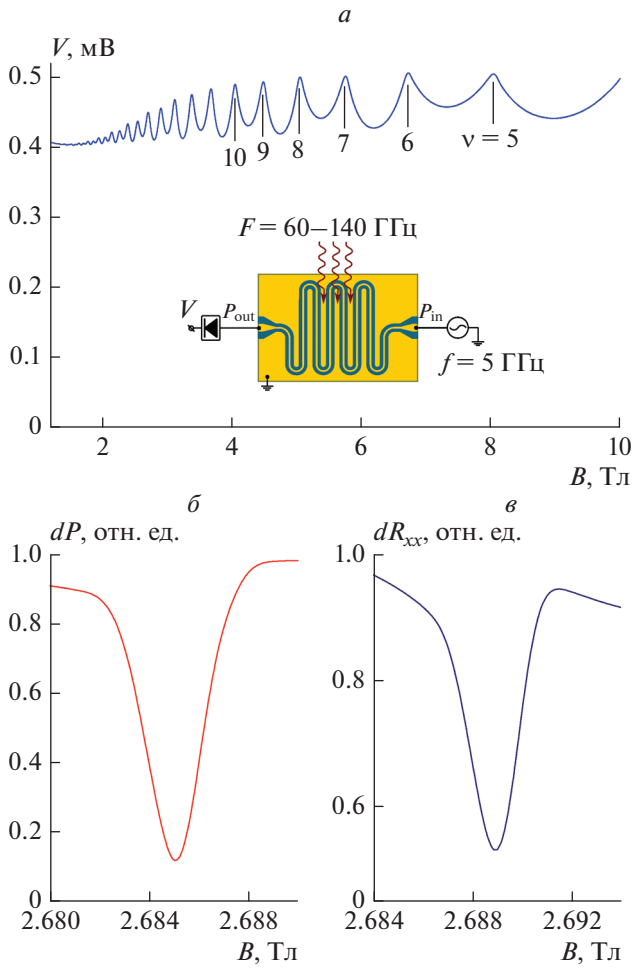

Рис. 1. Зависимость постоянного напряжения V на выходе диода Шоттки от магнитного поля B при $T = 1.5$ K. Частота зондирующего излучения $f = 5$ ГГц. Показаны положения нескольких минимумов Шубникова–де Гааза. Вставка: схематическое изображение экспериментальной установки (*а*). Типичный пик ЭПР в пропускании копланарного волновода при частоте возбуждающего излучения $F = 72.6$ ГГц. Частота зондирующего излучения 5 ГГц (*б*). Характерный пик ЭПР в зависимости добавки к продольному сопротивлению образца dR от магнитного поля B при частоте возбуждающего излучения $F = 72.75$ ГГц (*в*).

Вторая методика основывалась на детектировании ЭПР при анализе сигнала пропускания между двумя Т-образными антеннами, емкостно связанных с ДЭС [20, 21]. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 2*а*. Образец с ДЭС имел прямоугольную форму и крепился на специальном держателе с жестко закрепленными планарными Т-образными антеннами. Расстояние между краем образца и каждой из антенн составляло не менее 0.5 мм. Генератор зондирующего излучения был подключен к одной из антенн по коаксиальной линии. Данная антенна служила излучателем в радиочастотном диапазоне. Вторая антенна соединялась с коаксиальным детектором для измерения сигнала пропускания. Частота зондирующего излучения составляла 60 МГц, и соответствовала оптимальной чувствительности коаксиального детектора в исследуемом диапазоне частот. При этом часть зондирующего излучения поглощалась двумерным каналом, а значит, сигнал пропускания зависел от проводимости структуры. По аналогии с копланарно-трансмиссионным подходом использовалась методика синхронного детектирования. На рис. 2*б* приведена характерная магнитополевая зависимость измеряемой синхронным детектором добавки к напряжению на выходе Шоттки диода, обусловленной поглощением возбуждающего излучения вблизи ЭПР. Для сравнения на соседней панели (рис. 1*в*) приведены данные для стандартной транспортной методики детектирования ЭПР, которые с хорошей точностью совпадают между собой по ширине и форме. Полученный результат демонстрирует, как и в случае копланарно-трансмиссионного подхода, возмож-

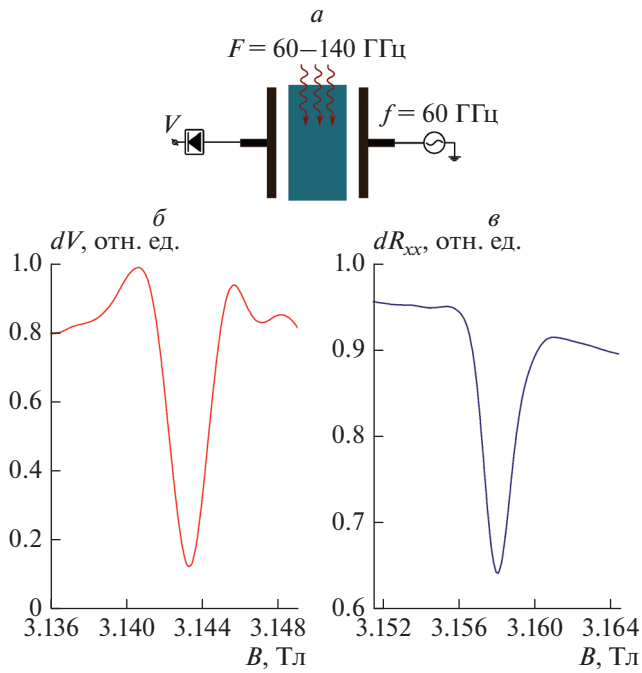

Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной методики (*а*). Магнитополевая зависимость вблизи ЭПР вариации выходного напряжении *dV*, обусловленного поглощением образцом возбуждающего излучения с частотой $F = 85.1$ ГГц (*б*). Пик ЭПР, полученный с использованием транспортной методики для частоты $F = 85.5$ ГГц (*в*).

ность применения предложенной методики не только для определения положения резонансного магнитного поля ЭПР, но и для анализа таких важных параметров как ширина и амплитуда спинового резонанса.

В заключение отметим, что, спиновый резонанс двумерных электронов был исследован в гетеропереходах ZnO/MgZnO в двух принципиально различных бесконтактных геометриях. В обоих подходах ЭПР наблюдался как острый пик в сигнале пропускания при фиксированной частоте возбуждающего излучения и развороте магнитного поля. В первом случае измерялось пропускание зондирующего излучения через копланарную линию, а во втором – через пару планарных Т-образных антенн. Было проведено сравнение полученных результатов с данными, полученными стандартной транспортной методикой детектирования ЭПР, которое показало, что две апробированные принципиально различные геометрии позволяют достоверно детектировать спиновый резонанс, а также исследовать другие важные параметры, такие как ширина и амплитуда.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФТТ РАН. Авторы благодарны J. Falson за предоставленные для исследования гетероструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Murakami S., Nagaosa N., Zhang S.C.* // Science. 2013. V. 301. P. 1348.
2. *Koenig M., Wiedmann S., Bruene C. et al.* // Science. 2007. V. 318. P. 766.
3. *Murzin S.S., Dorozhkin S.I., Landwehr et al.* // JETP Lett. 1998. V. 67. P. 113.
4. *Yaish Y., Prus O., Buchstab E. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 4954.
5. *Gervais G., Stoermer H.L., Tsui D.C. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 94. Art. No 196803.
6. *Yu X.Z., Onose Y., Kanazawa N. et al.* // Nature. 2010. V. 465. P. 901.
7. *Zutic I., Fabian J., Das Sarma S.* // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. P. 323.
8. *Vandersypen L.M.K., Eriksson M.A.* // Phys. Today. 2019. V. 72. P. 38.
9. *Kozlov V.E., Van'kov A.B., Gubarev S.I. et al.* // Phys. Rev. B. 2015. V. 91. Art. No 085304.
10. *Solovyev V.V., Kukushkin I.V.* // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. Art. No 115131.
11. *Shchepetilnikov A.V., Frolov D.D., Nefyodov Yu.A. et al.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 98. Art. No 241302(R).
12. *Van'kov A.B., Kaysin B.D., Kukushkin I.V.* // Phys. Rev. B. 2018. V. 98. Art. No 121412(R).
13. *Betancourt J., Saavedra-Arias J.J., Burton J.D. et al.* // Phys. Rev. B. 2013. V. 88. Art. No 085418.

14. *Tampo H., Shibata H., Maejima K. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. Art. No 202104.
15. *Stein D., v. Klitzing K., Weimann G.* // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51. Art. No 130.
16. *Dobers M., v. Klitzing K., Weimann G.* // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. Art. No 5453.
17. *Nestle N., Denninger G., Vidal M. et al.* // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. Art. No 4359.
18. *Shchepetilnikov A.V., Khisameeva A.R., Nefyodov Yu.A. et al.* // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. Art. No 125425.
19. *Engel L. W., Shahar D., Kurdak C. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. Art. No 2638.
20. *Grodnensky I.M., Heitmann D., v. Klitzing K. et al.* // Phys. Rev. B. 1991. V. 44. Art. No 1946(R).
21. *Shchepetilnikov A.V., Khisameeva A.R., Nefyodov Yu.A. et al.* // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. Art. No 075445.

Observation of spin resonance of two-dimensional electrons in contactless geometries

A. R. Khisameeva[a, *], A. V. Shchepetilnikov[a], Yu. A. Nefyodov[a], I. V. Kukushkin[a]

[a] *Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

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

Electron spin resonance (ESR) in a two-dimensional system based on the ZnO/MgZnO heterojunction was observed using two different contactless techniques. The first method was based on detection of ESR in transmission signal of broadband coplanar waveguide deposited on the sample surface. In the second geometry, spin resonance was observed in rf power transmission between two T-shaped antennas, which were capacitively coupled to a two-dimensional system. The results were compared with the data obtained via the standard transport method for ESR detection.