Письма в ЖЭТФ, том 102, вып. 12, с. 927 – 931 © 2015 г. 25 декабря

Наблюдение осцилляций магнетосопротивления, индуцированных микроволновым излучением, в $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ гетеропереходе

А. В. Щепетильников[+*1)], *Ю. А. Нефёдов*[+], *И. В. Кукушкин*[+]

[+]*Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия*

[*]*Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный, Россия*

Поступила в редакцию 22 октября 2015 г.
После переработки 3 ноября 2015 г.

Индуцированные микроволновым излучением осцилляции магнетосопротивления и магнетопроводимости системы двумерных электронов обнаружены в $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ гетеропереходе. Структура характеризовалась большой плотностью электронов, $n = 6.5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$, и чрезвычайно малой подвижностью в 10^5 см^2 В$^{-1}$с$^{-1}$. Это явно указывает на то, что подвижность двумерных электронов не является критическим параметром для наблюдения стимулированных СВЧ-излучением осцилляций. Образцы были выполнены как в виде мостика Холла, так и в геометрии Корбино. Разрешалось по меньшей мере 4 осцилляции, амплитуда которых растет с увеличением магнитного поля, а фаза совпадает для всех осцилляций с номером > 1 и равна 0.25. Показано, что фотоЭДС, индуцированная микроволновым излучением, также осциллирует периодично по обратному магнитному полю.

DOI: 10.7868/S0370274X15240066

Стимулированные излучением СВЧ-диапазона осцилляции магнетосопротивления систем двумерных электронов впервые наблюдались в высокоподвижных $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ гетероструктурах [1, 2]. Было показано, что в высокочастотном электромагнитном поле диагональное магнетосопротивление ρ_{xx} образцов, выполненных в виде стандартных мостиков Холла, осциллирует периодично по обратной величине магнитного поля B, перпендикулярного плоскости образца. Период этих осцилляций определяется отношением частоты ω СВЧ-излучения к частоте циклотронного резонанса $\omega_c = \dfrac{eB}{m}$:

$$\delta\rho \sim A \sin(2\pi\epsilon + \phi). \tag{1}$$

Здесь $\delta\rho$ – индуцированный высокочастотным полем вклад в сопротивление образца, а $\epsilon = \omega/\omega_c$. Фаза ϕ может зависеть от номера осцилляции [3]. Амплитуда осцилляций A экспоненциально уменьшается с ростом ϵ и растет при увеличении мощности микроволнового излучения P линейно при малых P и пропорционально $P^{1/2}$ при больших [3]. Начиная с некоторого значения P, сопротивление образца вблизи минимумов первых осцилляций должно становиться отрицательным. Однако вместо этого система переходит в состояние с нулевым сопротивлением [2, 4].

Впоследствии индуцированные микроволновым излучением гигантские осцилляции магнетосопротивления и состояния с нулевым сопротивлением были обнаружены в образцах, выполненных не только в виде холловских мостиков, но и в геометрии Корбино [5, 6] и Ван дер Пау [7]. Более того, такие осцилляции наблюдались и в бесконтактных экспериментах [8, 9]. В работах [10, 11] было показано, что СВЧ-излучение индуцирует не только осцилляции магнетосопротивления двумерной электронной системы, но и сходные по структуре осцилляции фото-Э.Д.С.

Индуцированные СВЧ-излучением осцилляции магнетосопротивления и состояния с нулевым сопротивлением наблюдались в основном в $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ гетероструктурах, а также в двумерной системе электронов на поверхности гелия [12]. Лишь недавно данный эффект был обнаружен в другой полупроводниковой системе – двумерной дырочной системе в Ge/SiGe квантовой яме [13]. Однако количество осцилляций сопротивления, продемонстрированных в указанной работе, не превышало двух, а состояния с нулевой проводимостью не были достигнуты. Таким образом, поиск других полупроводниковых гетероструктур, проявляющих описанные выше эффекты, остается чрезвычайно актуальным.

Одними из наиболее перспективных для указанной цели являются гетеропереходы $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$. Значительный прогресс в фор-

[1)] e-mail: shchepetilnikov@issp.ac.ru

мировании атомарно резких гетерограниц между оксидами позволил выращивать достаточно чистые $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ гетеропереходы [14, 15]. Подвижность электронов в таких образцах достигает величины $\mu = 10^6$ см^2 В$^{-1}$ с$^{-1}$ [16]. Заметим, что такие $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ образцы демонстрировали целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла [15]. Для наших исследований был выбран выращенный методом молекулярной лучевой эпитаксии $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ гетеропереход. Плотность электронов в нем составляла $6.5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$, а подвижность – 10^5 см^2 В$^{-1}$ с$^{-1}$ при температуре 1.5 К. В образцах такого типа заполнена лишь нижайшая подзона размерного квантования [17].

Индуцированные СВЧ-излучением осцилляции магнетосопротивления образца и состояния с нулевой проводимостью изучались в основном в образцах с большой подвижностью ($\mu > 3 \cdot 10^6$ см^2 В$^{-1}$ с$^{-1}$). Однако в работе [18] было продемонстрировано, что данное условие не является необходимым. В рамках данной работы будет показано, что осцилляции такого типа наблюдаются и в $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ гетеропереходе с чрезвычайно малой подвижностью в 10^5 см^2 В$^{-1}$ с$^{-1}$. Таким образом, можно сделать следующее важное заключение: подвижность двумерных электронов не является основным параметром для наблюдения индуцированных микроволновым излучением осцилляций. Вполне вероятно, что главной характеристикой системы служит двумерная проводимость σ_{2D} в нулевом магнитном поле (фактически, произведение подвижности и двумерной плотности электронов). Так, например, в работе [19] было показано, что именно отношение $2\pi\sigma_{2D}/c$ (где c – скорость света) является критически важной величиной, которой определяется наблюдение уникальных плазменных возбуждений в системе двумерных электронов. Важным аспектом проведенных исследований является тот факт, что эффективная масса электрона в $ZnO/Mg_xZn_{1-x}O$ гетеропереходах в пять раз превышает массу электрона в GaAs/AlGaAs гетероструктурах. Таким образом, исследование структур данного типа предоставляет уникальную возможность по изучению индуцированных СВЧ-излучением осцилляций сопротивления в системах с принципиально новыми параметрами.

Посредством фотолитографии были изготовлены два образца: один – в виде стандартного мостика Холла, другой – в виде диска Корбино. Для обеспечения электрического контакта с двумерной электронной системой на образец напылялись слои титана и золота. Образцы помещались в полутораградусную камеру криостата. В результате мы могли проводить измерения при температурах от 1.5 до 4.2 К в магнитных полях вплоть до 10 Т. Излучение с частотой от 30 до 140 ГГц доставлялось до образца по сверхразмерному волноводу. В качестве источников излучения использовались генератор K_U-диапазона и сопряженные с ним блоки умножения частоты, а также генератор на базе лавинно-пролетного диода (ЛПД) фирмы Terasense с фиксированной частотой 97 ГГц. Выходная мощность блоков умножения не превышала 4 мВт в диапазоне частот 60–90 ГГц и 1 мВт в диапазоне 90–140 ГГц. Мощность ЛПД-генератора составляла 100 мВт.

В ходе всех экспериментов частота падающего на образец излучения фиксировалась, а разворачивалось магнитное поле. При этом посредством синхронного детектора измерялось сопротивление образца. Частота переменного тока, пропускаемого по образцу, составляла 30 Гц, а его амплитуда не превышала 1 мкА.

На рис. 1 показана зависимость проводимости $G = 1/R$ образца, изготовленного в виде диска Корбино, от магнитного поля в отсутствие микроволнового излучения для температуры 1.5 К. Там же на вставке – принципиальная схема измерения кондактанса диска Корбино. В магнитных полях B, превышающих примерно 1.5 Т, ясно различимы осцилляции Шубникова–де Гааза. В отличие от стандартных GaAs гетероструктур в ZnO/MgZnO структурах четные факторы заполнения, как правило, выражены

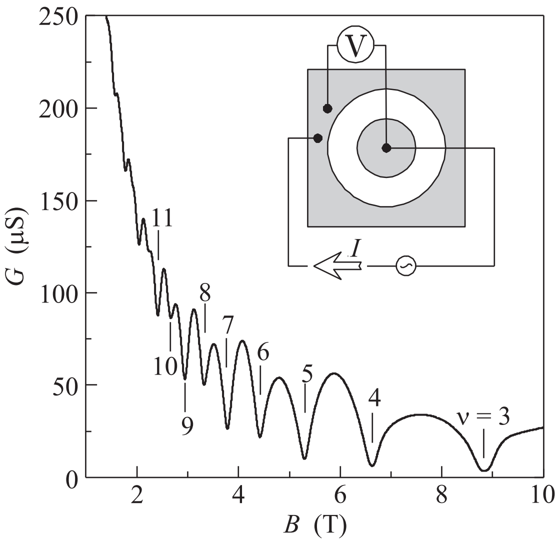

Рис. 1. Зависимость проводимости диска Корбино $G = 1/R$ от перпендикулярного магнитного поля. Измерения выполнены при температуре $T = 1.5$ К. На вставке показана принципиальная схема измерения кондактанса диска Корбино

хуже, чем нечетные (особенно в малых магнитных полях) [14].

При облучении образцов микроволновым излучением в малых магнитных полях как в мостике Холла, так и в диске Корбино возникают осцилляции сопротивления. Примеры таких осцилляций приведены на рис. 2. На верхней панели данного рисунка показаны зависимости сопротивления мостика Холла от магнитного поля при облучении образца СВЧ-излучением мощного ЛПД-генератора (синяя линия) и в отсутствие высокочастотного поля (черная линия). Линейный вид зависимости сопротивления от магнитного поля, хорошо заметный на черной кривой, связан с подмешиванием холловского сопротивления в силу неидеальности исполнения мостика Холла (потенциометрические контакты отстоят от края двумерного канала). Разница этих двух зависимостей представлена на панели (b). Явно различимы по меньшей мере четыре индуцированные микроволновым излучением осцилляции сопротивления.

Заметим, что для детектирования указанным способом стимулированных СВЧ-излучением осцилляций сопротивления в наших образцах было необходимо использовать источники большой мощности. Обойти данное ограничение можно, применяя методику двойного синхронного детектирования, позволяющую с большой точностью измерять индуцированный высокочастотным электромагнитным полем вклад в сопротивление образца. Для этого по образцам пропускался переменный ток с частотой $f \sim 1.5$ кГц и амплитудой $I_{\mathrm{RMS}} \sim 1$ мкА. Падающее на образец СВЧ-излучение амплитудно модулировалось на частоте $f_{\mathrm{mod}} \sim 30$ Гц. Первый синхронный детектор был настроен на частоту переменного тока и измерял сигнал, пропорциональный сопротивлению R образца. Второй синхронный детектор брал сигнал с выхода первого и был настроен на частоту модуляции СВЧ, т.е. измерял добавку δR к сопротивлению, вызванную СВЧ-излучением. Примеры измерения индуцированных микроволновым полем осцилляций сопротивления посредством методики двойного синхронного детектирования приведены на рис. 2a и b. На рис. 2c показана зависимость δR от магнитного поля для мостика Холла. Кондактанс диска Корбино резко падает с магнитным полем. Для учета этого эффекта была построена величина $-G\delta(1/G) = \delta G/G$ (рис. 2e). В схеме с двумя синхронными детекторами добавка $\delta\frac{1}{G}$ измерялась вторым детектором, а величина G – первым. Экспериментальные данные, продемонстрированные на рис. 2c и e, получены при облучении образцов СВЧ-излучением с частотой 97 ГГц (источником служил маломощный блок умножения частоты) при температуре 1.5 K.

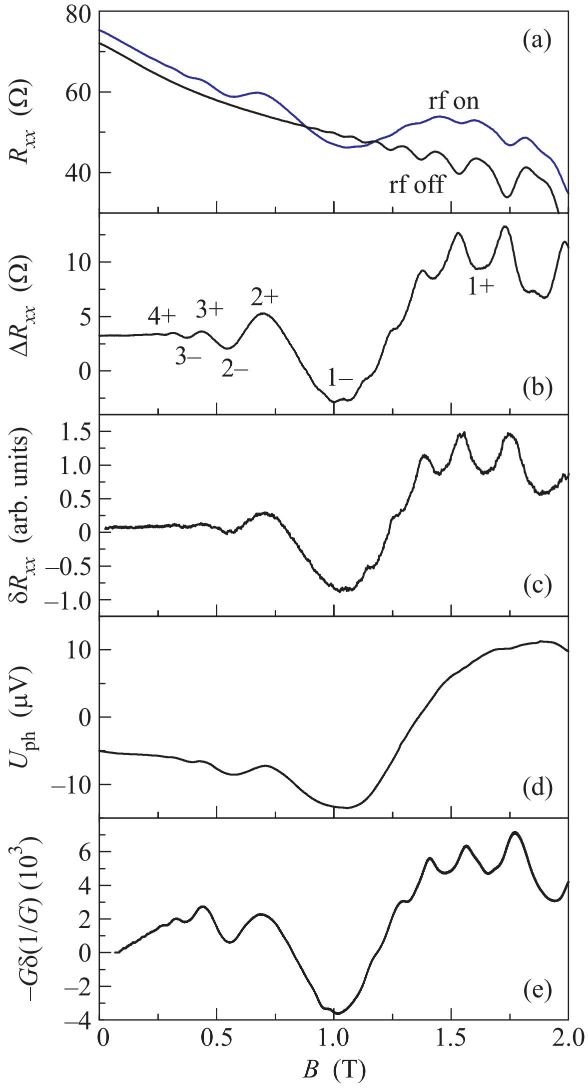

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Зависимости продольного сопротивления R_{xx} мостика Холла от магнитного поля, снятые последовательно при облучении образца СВЧ-излучением мощного ЛПД-генератора (синяя линия) и в отсутствие излучения (черная линия). (b) – Разность указанных зависимостей ΔR_{xx}. (c) – Индуцированный высокочастотным полем вклад δR_{xx} в мостике Холла, измеренный посредством методики двойного синхронного детектирования. (d) – ФотоЭДС, снятая на мостике Холла. (e) – Нормированная зависимость от магнитного поля вариации обратного кондактанса $-G\delta\frac{1}{G}$ в диске Корбино. Данные на панелях c, d и e получены при облучении образца маломощным умножителем частоты. Частота излучения во всех случаях 97 ГГц, температура образца $T = 1.5$ K

По периоду индуцированных микроволновым излучением осцилляций можно определить величину эффективной массы электрона, $m = 0.355\,m_0$. На рис. 3 приведены примеры полученных на диске Кор-

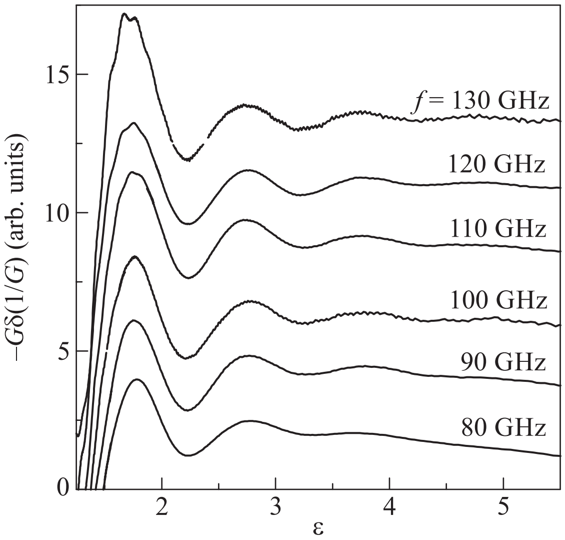

Рис. 3. Зависимости величины $-G\delta(1/G)$ от параметра $\epsilon = \omega/\omega_c$ ($m^* = 0.355\,m_0$) при облучении образца СВЧ-излучением различных частот. Экспериментальные данные нормированы на кондактанс и смещены по оси ординат для большей наглядности. Измерение $\delta(1/G)$ проводилось с помощью методики двойного синхронного детектирования при температуре $T = 1.5$ К

бино зависимостей $-G\delta(1/G)$ от параметра $\epsilon = \omega/\omega_c$, вычисленного с учетом значения $m = 0.355\ m_0$, для ряда частот f микроволнового излучения. Осцилляции хорошо разрешимы и периодичны по ϵ. Положение максимумов (ϵ_n^+) и минимумов (ϵ_n^-) осцилляций с номером n определяется выражением $\epsilon_n^{\pm} = n \mp \phi_n$, где фаза ϕ_n не зависит от номера осцилляции n для всех $n > 1$ и составляет $\phi_n = 0.25$. Определение ϕ для $n = 1$ затруднено, поскольку осцилляции Шубникова–де Гааза существенно искажают $-G\delta(1/G)$ в магнитных полях больше 1.5 Тл.

Амплитуда индуцированных микроволновым полем осцилляций сильно растет при уменьшении ϵ. Такое поведение полностью аналогично наблюдавшимся в GaAs/AlGaAs гетероструктурах эффектам. Заметим, что никаких биений осцилляций сопротивления, обусловленных спин-орбитальным взаимодействием [18, 20], обнаружено не было. Дело в том, что величина спин-орбитального расщепления в $\mathrm{ZnO/Mg}_x\mathrm{Zn}_{1-x}\mathrm{O}$ гетероструктурах пренебрежимо мала [21].

При облучении мостика Холла микроволновым излучением в отсутствие тока между контактами образца возникала разность потенциалов, осциллирующая по параметру ϵ. Пример таких осцилляций продемонстрирован на рис. 2d. Измерения фото-ЭДС проводились посредством одного синхронного детектора, настроенного на частоту амплитудной модуляции падающего на образец СВЧ-излучения. Общая форма и положение индуцированных микроволновым полем осцилляций фото-ЭДС, магнетосопротивления мостика Холла и величины $-G\delta(1/G)$ в диске Корбино совпадают. Сходные осцилляции фото-ЭДС наблюдались в GaAs/AlGaAs гетероструктурах [10, 11].

Итак, в настоящей работе в образцах, приготовленных из $\mathrm{ZnO/Mg}_x\mathrm{Zn}_{1-x}\mathrm{O}$ гетероперехода в виде мостика Холла и диска Корбино, были обнаружены стимулированные высокочастотным электромагнитным полем осцилляции магнетосопротивления, периодичные по параметру $\epsilon = \omega/\omega_c$. При этом разрешались по меньшей мере 4 осцилляции. Фаза для всех осцилляций с номером > 1 совпадала и была равна 0.25. Амплитуда осцилляций росла с уменьшением параметра ϵ. Аналогичные структуры наблюдались и в фото-ЭДС, индуцированной микроволновым излучением. Подвижность двумерных электронов для исследованной гетероструктуры составляет чрезвычайно малую величину ($10^5\,\text{см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$). Это явно указывает на то, что подвижность двумерных электронов не является критически важным параметром для наблюдения стимулированных микроволновым излучением осцилляций.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант # 14-12-00599). Авторы благодарны J. Falson за предоставленные для исследования гетероструктуры.

1. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, J. A. Simmons, and J. L. Reno, Phys. Rev. B **64**, 201311 (2001).
2. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing, V. Narayanamurti, W. B. Johnson, and V. Umansky, Nature (London) **420**, 646 (2002).
3. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, and M. A. Zudov Rev. Mod. Phys. **84**, 1709 (2012).
4. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **90**, 046807 (2003).
5. C. L.Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuuttila, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **91**, 096803 (2003).
6. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **87**, 638 (2008).
7. А. А. Быков, Д. Р. Исламов, А. В. Горан, А. К. Бакаров, Письма в ЖЭТФ **86**, 891 (2007).
8. A. A. Bykov, I. V. Marchishin, A. V. Goran, and D. V. Dmitriev, Appl. Phys. Lett. **97**, 082107 (2010).
9. I. V. Andreev, V. M. Muravev, I. V. Kukushkin, S. Schmult, and W. Dietsche, Phys. Rev. B **83**, 121308(R) (2011).

10. A. A. Bykov, JETP Lett. **87**, 233 (2008).
11. 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).
12. D. Konstantinov and K. Kono, Phys. Rev. Lett. **103**, 266808 (2009).
13. M. A. Zudov, O. A. Mironov, Q. A. Ebner, P. D. Martin, Q. Shi, and D. R. Leadley, Phys. Rev. B **89**, 125401 (2014).
14. A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Kita, Y. Ohno, H. Ohno, and M. Kawasaki, Science **315**, 1388 (2007).
15. A. Tsukazaki, S. Akasaka, K. Nakahara, Y Ohno, H. Ohno, D. Maryenko, A. Ohtomo, and M. Kawasaki, Nat. Mat. **9**, 889 (2010).
16. Y. Kasahara, Y. Oshima, J. Falson, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, and Y. Iwasa, Phys. Rev. Lett. **109**, 246401 (2012).
17. V. V. Solovyev, A. B. Van'kov, I. V. Kukushkin, J. Falson, D. Zhang, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, J. H. Smet, and M. Kawasaki, Appl. Phys. Lett. **106**, 082102 (2015).
18. А. А. Быков, А. К. Бакаров, Д. Р. Исламов, А. И. Торопов, Письма в ЖЭТФ **84**, 466 (2006).
19. V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, and I. V. Kukushkin, Phys. Rev. Lett. **114**, 106805 (2015).
20. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing, V. Narayanamurti, W. B. Johnson, and V. Umansky, Phys. Rev. B **69**, 193304 (2004).
21. Y. Kozuka, S. Teraoka, J. Falson, A. Oiwa, A. Tsukazaki, S. Tarucha, and M. Kawasaki, Phys. Rev. B **87**, 205411 (2013).