

Автоколебания спонтанного электрического поля в неравновесной двумерной электронной системе под микроволновым излучением

Памяти В. Ф. Гантмахера посвящается

С. И. Дорожкин¹⁾

Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 3 июня 2015 г.

В состояниях со стремящейся к нулю диссипацией на постоянном токе, возникающих в двумерных электронных системах под микроволновым излучением, обнаружены автоколебания микроволновой фото-ЭДС с нерегулярными погасаниями. Наблюдаемая картина может быть обусловлена переходами в фазовом пространстве системы между устойчивым полюсом и предельным циклом (бифуркации Андронова–Хопфа), происходящими под влиянием флуктуаций.

DOI: 10.7868/S0370274X15140052

Облучение высокосовременных двумерных электронных систем (ДЭС) микроволновым излучением приводит к появлению в них осцилляций магнетосопротивления ρ_{xx} , отражающих соизмеримость энергии фотона и циклотронной энергии: $\hbar \cdot 2\pi f = n\hbar\omega_c$, и, следовательно, периодичных по обратному магнитному полю. Здесь f – частота излучения, $\omega_c = eH/m^*c$ – циклотронная частота электронов с эффективной массой m^* в магнитном поле H , перпендикулярном плоскости ДЭС, $n = 1, 2, 3, \dots$ ($e > 0$). Такие осцилляции были обнаружены в гетероструктурах GaAs/AlGaAs²⁾ [1, 2] с двумерными электронами. Позже они наблюдались в дырочных каналах структур Ge/SiGe [4] и в невырожденной двумерной электронной системе на поверхности жидкого гелия [5]. Амплитуда осцилляций может существенно превышать величину темнового магнетосопротивления. В результате в максимумах осцилляций сопротивление может возрасти в несколько раз, а в основных минимумах (малые значения n) – стремиться к нулевому значению. Состояния со стремящейся к нулю величиной магнетосопротивления были практически одновременно обнаружены в работах [6, 7] и получили название *zero-resistance states*. Индуцированные излучением осцилляции магнетосопротивления наблюдаются в пределе сильного магнитного поля, когда недиагональная компонента тензора магнетосопротивления ρ_{xy} существенно больше диагональной компоненты ρ_{xx} . Поскольку обычная связь

между тензорами магнетосопротивления и магнетопроводимости в неравновесном состоянии под облучением сохраняется [8, 9], диагональные компоненты этих тензоров пропорциональны и в основных минимумах осцилляций ρ_{xx} диссипативная проводимость σ_{xx} также стремится к нулю. В этой статье мы будем называть состояния в минимумах осцилляций с $\rho_{xx} \propto \sigma_{xx} \rightarrow 0$ состояниями с нулевой диссипацией (СНД). Теории, основанные на рассмотрении линейного отклика неравновесной одномерной электронной системы на внешнее постоянное электрическое поле, позволяют объяснить индуцированные излучением осцилляции магнетосопротивления/магнетопроводимости. Однако они допускают отрицательные значения этих величин в минимумах осцилляций. (Подробное рассмотрение существующих теоретических подходов см. в обзоре [10].) Фактически единственное существующее в настоящее время объяснение состояний с нулевой диссипацией основывается на неустойчивости однородных состояний с отрицательной проводимостью и спонтанном возникновении доменной структуры, образованной бездиссипативными холловскими токами и соответствующими им холловскими электрическими полями [11]. Плотность холловского тока определяется параметрами N-образной зависимости электрического поля вдоль тока от его величины [11, 12].

Возникновение доменной структуры могло бы быть идентифицировано по возникновению в СНД электрического потенциала внутри образца с двумерной электронной системой, как это было предложено в работе [11]. Однако измерение индуцированных микроволновым излучением электрических

¹⁾ e-mail: dorozh@issp.ac.ru

²⁾ Осцилляции магнетосопротивления наблюдаются и при дробных значениях отношения $2\pi f/\omega_c = p/q$, где p и q – целые числа (см. работы [3] и ссылки в них).

потенциалов при помощи внутренних контактов к образцу [13, 14] показало, что микроволновая фото-ЭДС, измеряемая при помощи такого контакта, существует при любом магнитном поле и осциллирует относительно нулевого значения при изменении поля синхронно с магнетосопротивлением [14]. Возникновение такой регулярной фото-ЭДС, осциллирующей в функции магнитного поля, объясняется наличием в образце встроенных электрических полей (в частности, загибом зон около легированных контактов) и нарушением соотношения Эйнштейна между проводимостью и коэффициентом диффузии электронов в неравновесном состоянии ДЭС под облучением [14–16]. Фаза магнетоосцилляций регулярной фото-ЭДС такова, что максимумы фото-ЭДС реализуются в положениях минимумов магнетосопротивления. Наличие регулярной фото-ЭДС маскирует возникновение спонтанного электрического поля доменов.

Спонтанный вклад в фото-ЭДС, существующий исключительно в СНД и проявляющийся в нерегулярных переключениях фото-ЭДС между двумя различными значениями (эффект бистабильности), происходящих синхронно в значительной части образца, был обнаружен недавно в работе [17] (см. также [18]). Этот результат явился первым экспериментальным свидетельством в пользу возникновения доменной структуры из-за спонтанного нарушения симметрии. Оказалось, что эффект бистабильности наблюдается в узких интервалах частот микроволнового излучения, тогда как СНД существуют в широкой частотной области. Данный факт может быть связан с зависимостью доменной структуры от распределения микроволнового электрического поля в образце и случайным характером возникновения двух почти равновероятных конфигураций доменов, допускающих переключения между ними. В связи с этим обстоятельством возникает вопрос о том, что происходит в СНД, в которых эффект бистабильности не наблюдается. Данная работа реализует одну из возможностей исследования этого вопроса.

Нами выполнены исследования временной эволюции сигнала фото-ЭДС в СНД после включения микроволнового излучения. Наблюдалась качественно различная динамика фото-ЭДС для случаев бистабильной и стационарной временных асимптотик сигнала. Обнаружено, что установление стационарной асимптотики может происходить через возбуждение автоколебаний с нерегулярными погасаниями увеличивающейся длительности. Аналогично переключениям фото-ЭДС при бистабильности автоколебания фото-ЭДС синхронны на различных контактах, распределенных по образцу.

Исследованный образец был изготовлен из гетероструктуры GaAs/AlGaAs, в которой темновые плотность электронов и подвижность при гелиевых температурах составляли $n_s = 2.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 6 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Образец имел форму мостика Холла длиной 2.8 мм и шириной 0.6 мм и содержал 17 омических контактов, 9 из которых находились внутри мостика (см. рис. 1а). На рисунке горизонталь-

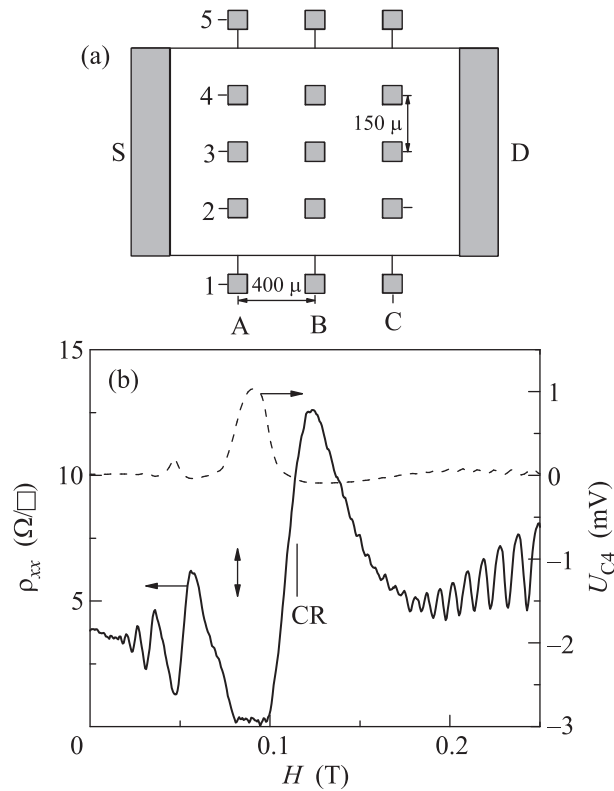


Рис. 1. (а) – Схема образца с двумерной электронной системой в плоскости рисунка. Серыми областями показаны омические контакты. (б) – Зависимости от магнитного поля удельного магнетосопротивления ρ_{xx} (сплошная кривая, левая ось) и усредненной по времени микроволновой фото-ЭДС на контакте С4 (штриховая кривая, правая ось), измеренные при температуре 0.5 К под непрерывным облучением частоты $f = 48.1 \text{ ГГц}$ и мощности $P = 0.4 \text{ мВт}$. Положение циклотронного резонанса ($2\pi f = \omega_c$) для электронов с эффективной массой $m^* = 0.067m_e$ показано вертикальным отрезком с надписью “CR”. Вертикальной стрелкой отмечено положение по магнитному полю ($H = 0.082 \text{ Тл}$, $2\pi f/\omega_c = 1.4$), при котором производились время-зависимые измерения фото-ЭДС

ные ряды контактов пронумерованы, а вертикальные обозначены латинскими буквами. Внутренние контакты к образцу имели размер $60 \times 60 \text{ мкм}^2$.

Образец был установлен в центре прямоугольного волновода сечением $6 \times 12 \text{ мм}^2$ в кристате с жидким ^3He . Магнитное поле было перпендикулярно плоскости ДЭС. Измерения выполнялись при температурах 0.5 и 1.5 К. Облучение производилось от генератора гармонических колебаний, обеспечивающего плавную перестройку частоты до 50 ГГц и мощности излучения. Для использованных частот излучения установление стационарной мощности на выходе генератора после включения сигнала происходило за время, меньшее 1 мкс. Измерения магнетосопротивления выполнялись по четырехточечной схеме с использованием потенциальных контактов рядов 1 и 5. Микроволновая фото-ЭДС измерялась между внутренним контактом (ряды 2–4) и одним из контактов на периметре образца. В отсутствие тока через образец контакты на периметре имели одинаковый потенциал. Поэтому выбор конкретного внешнего контакта не играл роли. Микроволновая фото-ЭДС, возникающая на внутренних контактах, усиливалась прецизионным предусилителем SR560 с максимальной шириной полосы пропускания от постоянного тока до 1 МГц. После этого усредненное по времени значение измерялось цифровым вольтметром, а временная зависимость сигнала фото-ЭДС регистрировалась при помощи цифрового запоминающего осциллографа. Одновременно могли быть записаны временные зависимости с трех различных контактов.

На рис. 1b показаны магнетоосцилляции сопротивления под микроволновым облучением и усредненной по времени микроволновой фото-ЭДС, полученные в условиях стационарного облучения. Очевидно, что когда магнетосопротивление стремится к нулю, фото-ЭДС достигает максимума. Это позволяет использовать ее измерения для более детального изучения СНД. На рис. 2а показана эволюция во времени сигнала микроволновой фото-ЭДС, измеренного в СНД (см. вертикальную стрелку на рис. 1b), после включения в момент $t = 0$ непрерывного микроволнового излучения, в условиях которого были получены данные на рис. 1b. При $t = 0$ сигнал скачком возрастает до значения 1.3 мВ, а затем медленно увеличивается в интервале $0 < t < t_0$ ($t_0 \approx 0.08 \text{ с}$). При $t > t_0$ сигнал начинает осциллировать во времени (рис. 2b) с периодом T , медленно изменяющимся во времени (рис. 2d). С момента $t = t_i$ ($t_i \approx 2.5 \text{ с}$) осцилляции начинают прерываться на интервалы времени Δt (см. рис. 2а, с и d), разбиваясь на серии. Значения Δt имеют большой разброс и возрастают с течением времени (рис. 2d). При $t > t_f$ ($t_f \approx 3.8 \text{ с}$) осцилляции исчезают, а величина сигнала $U_{A4} \approx 1.5 \text{ мВ}$ остается

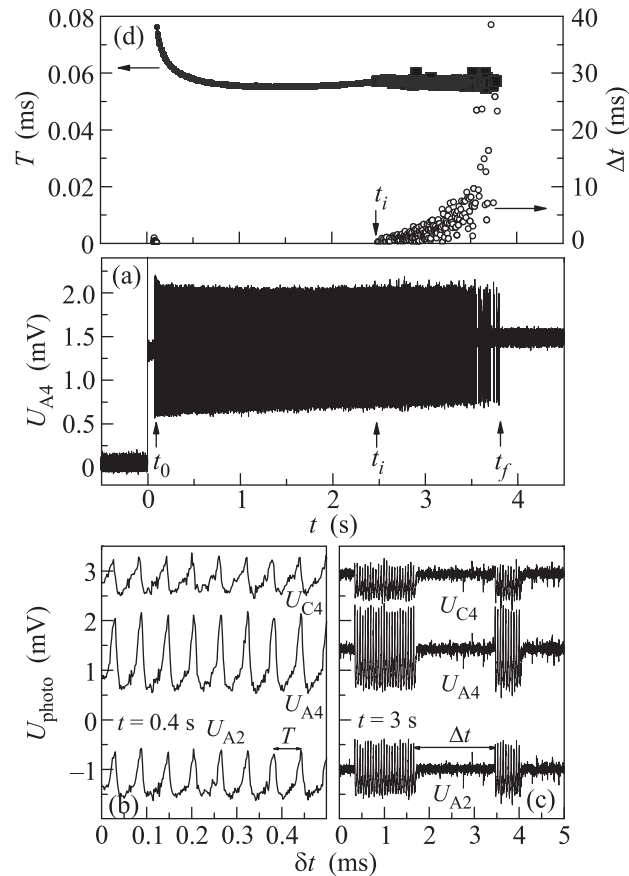


Рис. 2. (а) – Зависимость от времени сигнала микроволновой фото-ЭДС на контакте А4 в магнитном поле $H = 0.082 \text{ Тл}$, отмеченном вертикальной стрелкой на рис. 1b. Момент времени $t = 0$ соответствует включению непрерывного микроволнового излучения частоты $f = 48.1 \text{ ГГц}$ и мощности $P = 0.4 \text{ мВт}$. Фрагменты временных зависимостей сигналов фото-ЭДС, измеренные одновременно на контактах А2, А4 и С4 через $t = 0.4 \text{ с}$ (b) и 3 с (c) после включения излучения. Сигналы с А2 и С4 сдвинуты по вертикальной оси на -2 и 2 мВ соответственно. Данные получены при тех же экспериментальных условиях, что и на рис. 2а. (d) – Зависимости от t периода осцилляций T , усредненного по ста последовательным осцилляциям (темные кружки) и по числу осцилляций в серии, меньшему 100 (квадраты). Светлыми кружками показана длительность временных интервалов Δt между сериями импульсов (см. рис. 2c). Данные получены из анализа рис. 2а. Температура 0.5 К

постоянной во времени. Все отмеченные изменения сигнала происходят синхронно на контактах, расположенных в различных частях образца (см. рис. 2b и c). Различие между сигналами с различных контактов состоит только в их величине. Таким образом, наблюдаемая нестационарная картина отражает из-

менение распределения крупномасштабных электрических полей в образце. Необходимо отметить, что автоколебания наблюдались исключительно в режиме СНД, а времена t_i и t_f в разных измерениях могли отличаться в разы.

Наблюдаемая осцилляционная картина типична для автоколебаний, возникающих в нелинейных динамических системах (амплитуда и период автоколебаний не зависят от начальных условий). Возбуждение колебаний является результатом бифуркации Андронова–Хопфа, происходящей при изменении параметров системы и соответствующей переходу системы в ее фазовом пространстве от устойчивого фокуса к устойчивому предельному циклу. Любопытным наблюдением являются нерегулярные погасания и возгорания колебаний, которые, по-видимому, свидетельствуют о флуктуациях параметров, описывающих исследуемую нелинейную систему в процессе ее релаксации к стационарному состоянию. Необходимо, однако, отметить, что вывод о релаксации к стационарному распределению электрического поля в образце естественным образом ограничен чувствительностью используемого метода как по амплитуде, так и по частоте изменения микроволновой фото-ЭДС.

Представляет интерес сравнить динамику сигнала микроволновой фото-ЭДС после включения излучения, представленную на рис. 2, со случаем, когда временная асимптотика демонстрирует эффект бистабильности. Соответствующие результаты, полученные в условиях СНД при другой частоте излучения и более высокой температуре, приведены на рис. 3. Картина сигналов с различных контактов, возникающая при больших значениях времени t , показана на рис. 3б. Она представляет собой нерегулярные переключения сигнала между двумя значениями, повторяющиеся через интервал времени Δ , как это и наблюдалось в работах [17, 18]. Значения Δ для различных переключений могут заметно отличаться. Например, отмеченные на рис. 3б значения Δ_1 и Δ_2 отличаются более чем в полтора раза. Усредненные по 20 и 100 последовательным переключениям значения Δ показаны на рис. 3с открытыми и закрытыми символами соответственно. Приведенная на рис. 3с зависимость демонстрирует изменение Δ в течение примерно одной секунды после включения излучения и стабилизацию при больших временах. Отметим несколько очевидных различий между динамикой сигналов, показанных на рис. 2 и 3 (помимо качественно различной временной асимптотики). На рис. 2 очевидно существование трех уровней сигналов, два из которых соответствуют максимумам

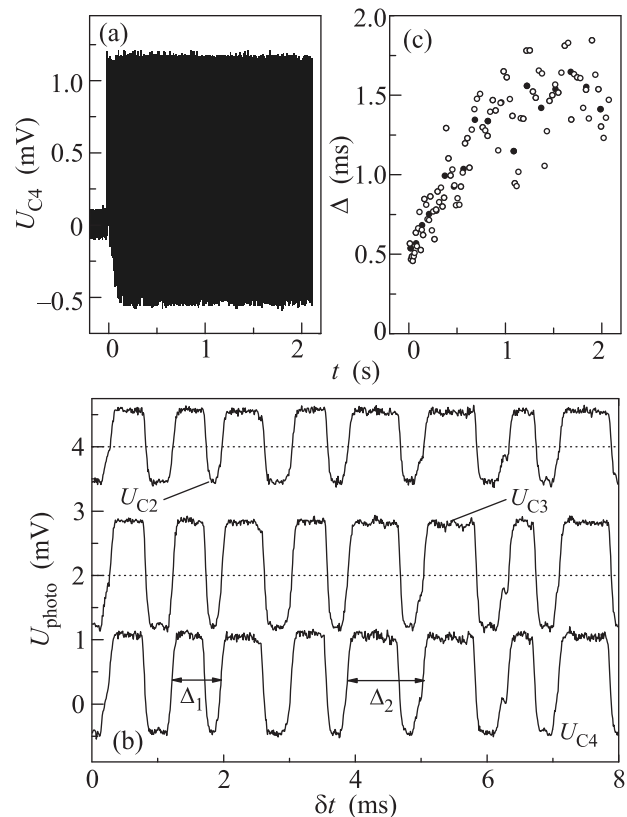


Рис. 3. (а) – Временная зависимость микроволновой фото-ЭДС на контакте С4, соответствующая включению излучения частоты $f = 40.7$ ГГц и мощности $P = 0.16$ мВт в момент времени $t = 0$. Магнитное поле $H = 0.077$ Тл, $2\pi f/\omega_c = 1.27$. (б) – Фрагменты временных зависимостей микроволновой фото-ЭДС для трех различных контактов (С2, С3 и С4) для измерения, показанного на рис. 3а при $t = 2$ с. Сигналы с контактов С3 и С2 сдвинуты вверх по вертикальной оси на 2 и 4 мВ соответственно (соответствующие нулевые уровни показаны пунктиром). (с) – Зависимость от времени среднего квазипериода Δ , усредненного по 20 (открытые кружки) и 100 (закрытые кружки) квазипериодам. Температура 1.5 К

мам и минимумам осцилляций, а третий – значению фото-ЭДС при погасании осцилляций. На рис. 3 выделяется только два уровня сигнала. Осцилляции на рис. 2 являются практически периодическими, тогда как время повторения импульсов Δ на рис. 3 сильно изменяется от события к событию. Существенно отличаются и характерные времена повторения в эффекте бистабильности и период осцилляций: типичные значения отношения Δ/T превышают порядок величины. Наконец, эффект бистабильности возникает сразу после включения излучения, в то время как осцилляции появляются по истечении времени t_0 . Указанные различия, по-видимому, связаны с

определяющей ролью флуктуаций в переключениях, наблюдаемых в режиме бистабильности, в то время как роль флуктуаций в режиме автоколебаний состоит в погасаниях и возгораниях этих колебаний.

В данной работе наблюдались два режима в динамике микроволновой фото-ЭДС: периодические автоколебания и нерегулярные переключения между двумя уровнями сигнала. Полученные результаты являются проявлением как детерминированной динамики системы, так и влияния флуктуаций.

Автор благодарен В. Уманскому (V. Umansky) за предоставление гетероструктуры GaAs/AlGaAs для изготовления образцов. Автор отмечает полезное обсуждение текста статьи с И.А. Дмитриевым. Работа поддержана Российским научным фондом (проект 14-12-00599).

-
1. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons, and J. L. Reno, *Phys. Rev. B* **64**, 201311(R) (2001).
 2. P. D. Ye, L. W. Engel, D. C. Tsui, J. A. Simmons, J. R. Wendt, G. A. Vawter, and J. L. Reno, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 2193 (2001).
 3. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. B* **73**, 041303(R) (2006); И. В. Печенежский, С. И. Дорожкин, И. А. Дмитриев, *Письма в ЖЭТФ* **85**, 84 (2007); S. I. Dorozhkin, J. H. Smet, K. von Klitzing, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Письма в ЖЭТФ* **86**, 616 (2007).
 4. M. A. Zudov, O. A. Mironov, Q. A. Ebner, P. D. Martin, Q. Shi, and D. R. Leadley, *Phys. Rev. B* **89**, 125401 (2014).
 5. D. Konstantinov and K. Kono, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 266808 (2009).
 6. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing, V. Narayanamurti, W. B. Jonson, and V. Umansky, *Nature* **420**, 646 (2002).
 7. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 046807 (2003).
 8. C. L. Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuttila, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 096803 (2003).
 9. А. А. Быков, *Письма в ЖЭТФ* **87**, 638 (2008).
 10. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, and M. A. Zudov, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1709 (2012).
 11. A. V. Andreev, I. L. Aleiner, and A. J. Millis, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 056803 (2003).
 12. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner, A. D. Mirlin, and D. G. Polyakov, *Phys. Rev. B* **71**, 115316 (2005).
 13. R. L. Willett, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 026804 (2004).
 14. 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).
 15. I. A. Dmitriev, S. I. Dorozhkin, and A. D. Mirlin, *Phys. Rev. B* **80**, 125418 (2009).
 16. S. I. Dorozhkin, I. A. Dmitriev, and A. D. Mirlin, *Phys. Rev. B* **84**, 125448 (2011).
 17. S. I. Dorozhkin, L. Pfeiffer, K. West, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Nat. Phys.* **7**, 336 (2011).
 18. S. I. Dorozhkin, V. Umansky, L. N. Pfeiffer, K. W. West, K. Baldwin, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 176808 (2015).