

Динамика доменов спонтанного электрического поля в двумерной электронной системе под микроволновым излучением и проводимость донорного слоя

С. И. Дорожкин⁺¹⁾, В. Уманский^{*2)}, К. фон Клитцинг^{×2)}, Ю. Х. Смет^{×2)}

⁺Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черногловка, Россия

^{*}Department of Physics, Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel

[×]Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Heisenbergstrasse 1, D-70569 Stuttgart, Germany

Поступила в редакцию 24 ноября 2017 г.

На образцах, изготовленных из одной гетероструктуры GaAs/AlGaAs с двумерной электронной системой, выполнены измерения температурных зависимостей частоты переключений спонтанного электрического поля, возникающего под микроволновым излучением и образующего доменную структуру, и проводимости слоя легирования, поставляющего электроны в систему. Обнаружено, что обе величины описываются термоактивационной зависимостью (закон Аррениуса) с близкими значениями энергии активации. Полученный результат указывает на связь между этими величинами и подтверждает гипотезу о том, что наблюдаемая динамика доменной структуры является следствием динамического экранирования спонтанного электрического поля доменов зарядами слоя легирования.

DOI: 10.7868/S0370274X18010125

Облучение двумерных электронных систем (ДЭС) с высокой подвижностью электронов микроволновым излучением частоты f_{mw} из диапазона 2–500 ГГц вызывает нетривиальные изменения их низкочастотных электрических свойств. К настоящему времени исследованы периодические по обратному магнитному полю осцилляции магнетосопротивления [1, 2] и магнетопроводимости [3], фото-гальванических сигналов [4–6], а также термо-ЭДС и емкости полевых транзисторов с ДЭС [7]. Период всех этих осцилляций определяется из условия соизмеримости кванта излучения и циклотронной энергии электронов: $\hbar 2\pi f_{mw} = n\hbar\omega_c$, где $\omega_c = |e|B/m^*c$ – циклотронная частота электронов с эффективной массой m^* в магнитном поле B , перпендикулярном ДЭС, $n = 1, 2, 3, \dots$. Наибольший интерес к этой области исследований был вызван наблюдением в минимумах осцилляций магнетосопротивления и магнетопроводимости состояний [3, 8–10], в которых обе эти величины стремятся к нулю при повышении мощности излучения и понижении температуры измерений. Такие состояния с малой диссипацией (СМД) на низкой частоте известны как ‘zero-resistance states’ [8]. Возникновение этих состояний было объяснено [11] спонтанным

образованием доменной структуры электрического поля вследствие неустойчивости однородного состояния ДЭС, имеющего отрицательную диссипативную проводимость при малых значениях электрического поля и меняющую знак при его конечной величине E_c [11, 12]. Более полную информацию о влиянии микроволнового излучения на свойства ДЭС можно найти в обзоре [13].

До настоящего времени убедительное свидетельство существования доменной структуры было получено только в экспериментах [14–17], в которых такая структура оказывалась зависящей от времени (временная нестабильность микроволновой фото-ЭДС наблюдалась также в работах [4, 18]). В этих экспериментах были обнаружены квазипериодические переключения между двумя уровнями сигнала микроволновой фото-ЭДС [14, 15, 17], а также его периодические автоколебания [16], происходящие в номинально стационарных экспериментальных условиях. Было установлено, что основным содержанием динамики доменной структуры является изменение направления электрического поля в доменах на противоположное [15]. Данное наблюдение коррелирует со спонтанным нарушением симметрии, происходящем при возникновении доменной структуры, при котором противоположные направления электрического поля в доменах равновероятны [11, 19]. В то же время механизм таких переключений оставался непо-

¹⁾e-mail: dorozh@issp.ac.ru

²⁾V. Umansky, K. von Klitzing, J. H. Smet.

нятым, так как переключения в результате флуктуаций представлялись маловероятными и не могли объяснить квазипериодический [14, 15, 17] или периодический [16] характер таких процессов. Недавно И.А. Дмитриевым было высказано предположение [20], что автоколебания электрического поля в доменах можно ожидать в случае, когда в исследуемых образцах существует слой (СНП), параллельный ДЭС и обладающий низкой проводимостью. В таком образце после возникновения доменной структуры начинается смещение зарядов в СНП, ведущее к экранированию спонтанного электрического поля в доменах. В некоторый момент возникающая доменная структура оказывается неустойчивой и происходит быстрое перераспределение электронов в ДЭС, имеющее результатом изменение знака спонтанного электрического поля, после чего процесс повторяется, приводя к автоколебаниям. Нелинейность задачи обусловлена нелинейной зависимостью проводимости ДЭС от электрического поля. В такой картине медленная динамика определяется процессом экранировки спонтанного электрического поля зарядами в СНП, а период автоколебаний пропорционален максвелловскому времени релаксации заряда в СНП с коэффициентом пропорциональности, зависящим от геометрии доменов. В результате частота переключений оказывается пропорциональной проводимости СНП. Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке изложенной выше идеи [20].

Динамические доменные структуры мы наблюдали [14–17] на образцах, изготовленных из двух гетероструктур GaAs/AlGaAs. В обеих гетероструктурах селективное донорное легирование было выполнено в тонкий слой GaAs. Такая методика легирования [21] дает возможность получения очень высокой подвижности двумерных электронов и наблюдения таких тонких эффектов, как квантовый эффект Холла на факторе заполнения $\nu = 5/2$ [22]. Однако, этот метод обычно приводит к конечной величине проводимости легированного слоя, которая уменьшается при понижении температуры. Нами было установлено существование такого проводящего слоя (СНП) при температурах эксперимента в обеих гетероструктурах. В этой работе приводятся результаты исследований, выполненных на образцах, изготовленных на одной из гетероструктур, где динамическая доменная структура наблюдалась в широком диапазоне экспериментальных параметров.

Исследования нестационарной доменной структуры выполнялись на образцах с внутренними потенциальными контактами (рис. 1а). Образец размещался в криостате с ^3He внутри волновода из

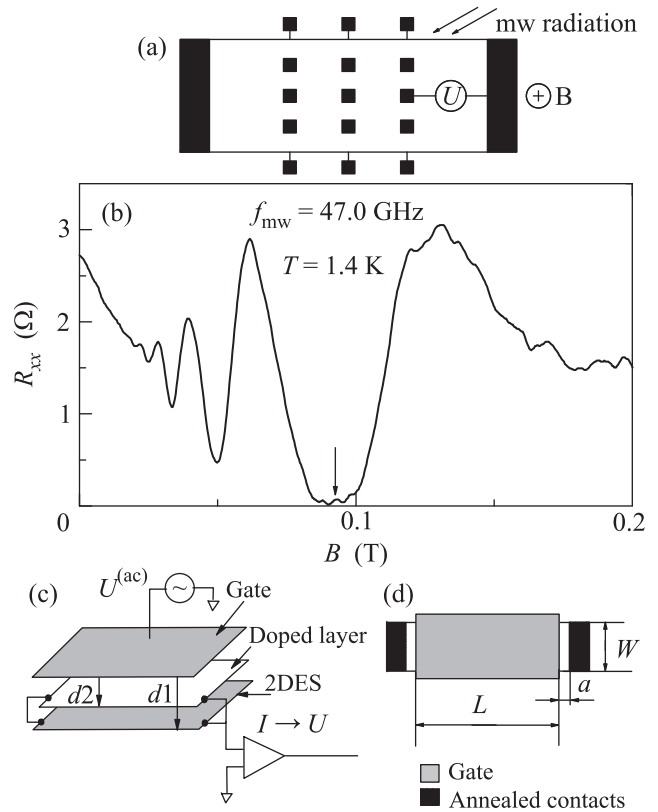


Рис. 1. (а) – Схема образца с внутренними потенциальными контактами, используемыми для исследований доменной структуры. ДЭС параллельна плоскости рисунка. Отмечена пара контактов, между которыми измерялась микроволновая фото-ЭДС U , временная зависимость которой показана на рис. 2. Направления магнитного поля и микроволнового излучения перпендикулярны плоскости рисунка. (b) – Магнетосопротивление образца при $T = 1.4$ K в условиях ($f_{mw} = 47.0$ ГГц, $P = -6$ дБм), при которых была измерена приводимая в статье температурная зависимость частоты переключений спонтанного электрического поля. Стрелкой отмечено значение магнитного поля $B = 0.092$ Тл, при котором проводились эти измерения. (с) – Схема слоев в исследованном полевом транзисторе и электрическая схема измерений его емкости. $d1 = 162$ нм, $d2 = 79$ нм. (d) – Латеральная геометрия полевого транзистора. $L = 2.8$ мм, $W = 0.5$ мм, $a = 0.14$ мм

нержавеющей стали, имевшего прямоугольное сечение размером 6×12 мм. В данных экспериментах образец находился в жидком ^3He , температура которого определялась степенью откачки внешней “одноградусной” камеры с жидким ^4He и измерялась калиброванным термометром. Магнитное поле, перпендикулярное плоскости ДЭС и параллельное оси волновода создавалось сверхпроводящим соленоидом. Непрерывное микроволновое излучение калиброван-

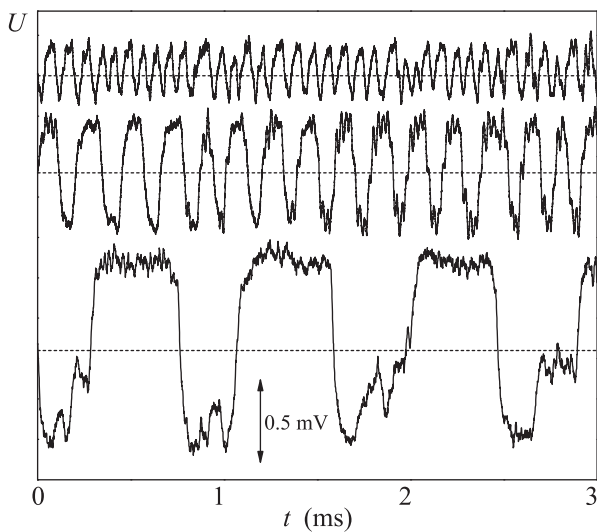


Рис. 2. Зависимости от времени микроволновой фото-ЭДС U , измеренной между внутренним и внешним контактами, в условиях непрерывного облучения частоты $f_{mw} = 47.0$ ГГц и мощности $P = -6$ дБм в магнитном поле $B = 0.092$ Тл. Кривые (сверху вниз) измерены при температурах 1.66, 1.50 и 1.16 К. Нулевой уровень сигнала для каждой из кривых показан пунктирной линией

ной мощности P от прецизионного генератора, работающего в диапазоне до 50 ГГц, подавалось на вход волновода. Микроволновая фото-ЭДС, возникающая между внутренними и внешними контактами, в общем случае является суммой стационарного значения и величины, меняющей свой знак во времени [15]. Стационарное значение существует при всех магнитных полях, в которых $\omega_c < 2\pi f_{mw}$, и осциллирует относительно нулевого уровня в функции обратного магнитного поля с периодом $|e|/(2\pi f_{mw} m^* c)$ [5, 6]. Зависящий от времени вклад в микроволновую фото-ЭДС возникает только в СМД, когда диссипативная проводимость ДЭС стремится к нулю. Он является проявлением спонтанного электрического поля доменов. Стационарная фото-ЭДС определяется загибом зон около легированных контактов [6, 23] (см. также недавнюю работу [7]) и может иметь различные значения на образцах, изготовленных при помощи разных технологических процессов. В этой работе приводятся результаты для образца, в котором величина стационарной микроволновой фото-ЭДС была значительно меньше спонтанной. При изучении доменных структур зависимость от времени сигнала микроволновой фото-ЭДС измерялась одновременно на нескольких различных внутренних контактах относительно произвольного контакта на периметре об-

разца, выбор которого не влиял на измеряемые величины. Сигналы усиливались усилителями с полосой пропускания до 100 кГц и регистрировались многоканальным цифровым запоминающим осциллографом. Сигналы с разных контактов оказывались синхронными, что является доказательством существования длиннопериодного профиля спонтанного электрического поля. Типичная зависимость от времени сигнала микроволновой фото-ЭДС в СМД для различных температур показана на рис. 2. Понижение температуры приводит к увеличению амплитуды изменений микроволновой фото-ЭДС и значительному уменьшению частоты переключений. Вторым из этих эффектов и являлся предметом детального исследования в данной работе. Временные зависимости сигналов обрабатывались численно, и на основе такой обработки, в частности, определялась средняя частота переключений f_{sw} . Ее зависимость от температуры приведена на рис. 3.

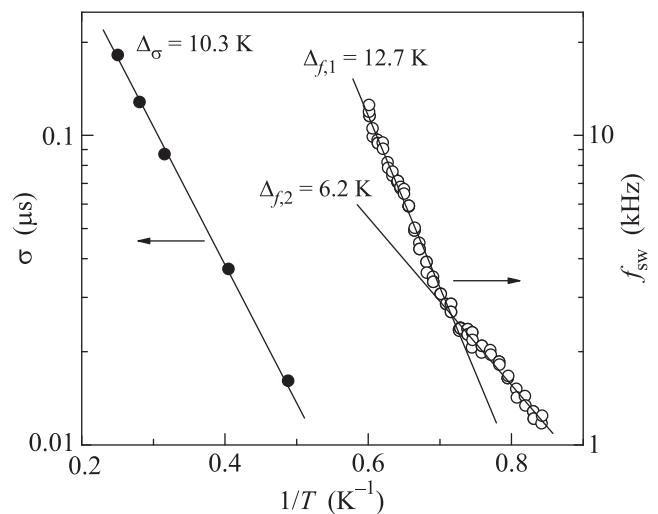


Рис. 3. Температурные зависимости средней частоты переключений микроволновой фото-ЭДС f_{sw} (открытые символы, правая ось) и проводимости легированного слоя $\sigma = 1/\rho$ (закрытые символы, левая ось). Прямые линии соответствуют термоактивационным температурным зависимостям с энергиями активации, указанными около линий

Для измерений проводимости СНП был изготовлен образец полевого транзистора, для чего на поверхность гетероструктуры была напылена тонкая металлическая пленка (затвор) (см. рис. 1с, d). В исследованной гетероструктуре легированные контакты к ДЭС одновременно являются и контактами к СНП, закорачивая эти слои, как это схематически показано на рис. 1с. Образец представляет из себя

плоский конденсатор, образованный тремя пластинами: двумерной электронной системой, затвором и слоем низкой проводимости. Для измерения емкости переменное напряжение $U^{(ac)}$ частоты f подавалось на затвор транзистора, а переменный ток, протекающий на ДЭС и СНП, преобразовывался в синфазное напряжение усилителем тока (см. рис. 1с). Это напряжение измерялось фазочувствительным усилителем. Значение емкости вычислялось из величины компоненты напряжения, сдвинутой на 90° относительно $U^{(ac)}$. В условиях эксперимента затвор и ДЭС можно рассматривать как эквипотенциалы и получить следующее выражение для измеряемой емкости [24]:

$$C = C_1 + (C_2 - C_1) \frac{2}{\xi L} \frac{A}{A^2 + B^2}, \quad (1)$$

Здесь

$$A = \frac{\sinh(\xi L) + \sin(\xi L)}{\cosh(\xi L) - \cos(\xi L)} + \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{1/2} \frac{\sinh(\zeta a) - \sin(\zeta a)}{\cosh(\zeta a) + \cos(\zeta a)},$$

$$B = \frac{\sinh(\xi L) - \sin(\xi L)}{\cosh(\xi L) - \cos(\xi L)} + \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^{1/2} \frac{\sinh(\zeta a) + \sin(\zeta a)}{\cosh(\zeta a) + \cos(\zeta a)}.$$

Параметры ξ и ζ зависят от сопротивления на квадрат СНП ρ и частоты f напряжения $U^{(ac)}$: $\xi = \sqrt{\pi f \rho C_2^2 / LW(C_2 - C_1)}$, $\zeta = \frac{2\sqrt{\pi f \rho C_1 C_2 / LW(C_2 - C_1)}}{2}$. Емкости $C_1 = \chi LW / 4\pi d_1$, $C_2 = \chi LW / 4\pi d_2$, где χ – диэлектрическая проницаемость материала между обкладками конденсатора (в нашем случае это средняя диэлектрическая проницаемость гетероструктуры GaAs/AlGaAs).

Зависимость емкости от частоты переменного напряжения $U^{(ac)}$ для нескольких температур показана на рис. 4. Она имеет характерную форму с двумя предельными значениями на высокой и низкой частотах и переходной областью между ними, положение которой по частоте сильно зависит от температуры [24, 25]. Описание экспериментальных результатов легко осуществляется (см. линии на рис. 4) на основании формулы (1) с использованием ρ в качестве фактически единственного подгоночного параметра. Емкости $C_1 = 715$ пФ и $C_2 = 1520$ пФ одинаковы для всех кривых и определяют предельные значения, на которые выходит измеряемая емкость в пределах высоких и низких частот соответственно. Отношение этих емкостей примерно равно отношению известных расстояний между слоями гетероструктуры: $C_1/C_2 \approx d_2/d_1$. Значение ρ определяет положение переходной области. Полученные из подгонки экспериментальных зависимостей $C(f)$ значения проводимости $\sigma \equiv \rho^{-1}$ для разных температур

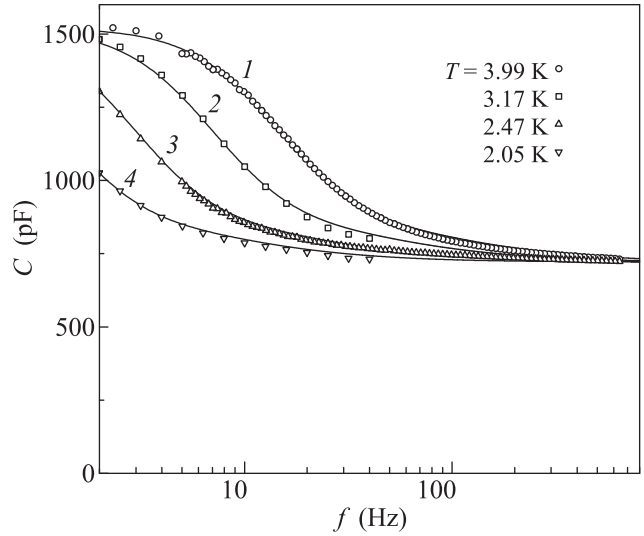


Рис. 4. Экспериментальные зависимости емкости полевого транзистора C от частоты измерительного сигнала f (символы) для различных температур. Сплошные кривые – результаты расчетов по формуле (1) с использованием следующих значений подгоночного параметра ρ : 5.5, 11.5, 27 и 62 МОм – соответственно для кривых 1–4. Значения параметров $C_1 = 715$ пФ и $C_2 = 1520$ пФ одинаковы для всех расчетных кривых

приведены на рис. 3. Из результатов, приведенных на рис. 4, ясно, что определение ρ при более низких температурах оказывается проблематичным из-за смещения переходной области в диапазон частот ниже 2 Гц, где точность измерений емкости значительно ухудшается.

Как видно из рис. 3, температурная зависимость σ в исследованной области температур является термоактивационной с энергией активации $\Delta_\sigma = 10.3$ К. Зависимость $f_{sw}(T)$ является более сложной. В двух разных диапазонах температур ее можно описать термоактивационными зависимостями с различными энергиями активации: $\Delta_{f,1} = 12.7$ К и $\Delta_{f,2} = 6.2$ К. Обращают на себя внимание близкие значения энергий активаций Δ_σ и $\Delta_{f,1}$, полученные в соседних диапазонах температур. Это наблюдение является основным результатом данной работы, который, на наш взгляд, свидетельствует о связи между проводимостью СНП и частотой переключений спонтанного электрического поля в доменной структуре, ожидаемой в рамках модели [20]. Тем самым получено экспериментальное свидетельство в пользу гипотезы об экранировании электрического поля доменов зарядом слоя низкой проводимости как основном механизме наблюдавшейся динамики доменной структуры.

Авторы благодарны И.А. Дмитриеву за возможность ознакомиться с результатами его расчетов

и полезные обсуждения. Работа была поддержана грантом Российского научного фонда (проект # 14-12-00599). В.У. и Ю.Х.С. благодарны GIF за поддержку.

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. 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).
4. R. L. Willett, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 026804 (2004).
5. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **87**, 281 (2008).
6. 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).
7. A. D. Levin, G. M. Gusev, O. E. Raichev, Z. S. Momtaz, and A. K. Bakarov, *Phys. Rev. B* **94**, 045313 (2016).
8. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing, V. Narayanamurti, W. B. Jonson, and V. Umansky, *Nature* **420**, 646 (2002).
9. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 046807 (2003).
10. S. I. Dorozhkin, Письма в ЖЭТФ **77**, 681 (2003).
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. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, and M. A. Zudov, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1709 (2012).
14. S. I. Dorozhkin, L. Pfeiffer, K. West, K. von Klitzing, and J. H. Smet, *Nature Physics* **7**, 336 (2011).
15. 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).
16. С. И. Дорожкин, Письма в ЖЭТФ **102**, 101 (2015).
17. С. И. Дорожкин, В. Уманский, К. фон Клитцинг, Ю. Х. Смет, Письма в ЖЭТФ **104**, 734 (2016).
18. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **91**, 390 (2010).
19. I. Finkler, B. I. Halperin, A. Auerbach, and A. Yacoby, *J. Stat. Phys.* **125**, 1093 (2006).
20. I. A. Dmitriev, *Intern. Workshop 'Recent Development in 2D Systems'*, Okinawa, Japan (2016).
21. K.-J. Friedland, R. Hey, H. Kostial, R. Klann, and K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4616 (1996).
22. V. Umansky, M. Heiblum, Y. Levinson, J. Smet, J. Nübler, and M. Dolev, *J. Cryst. Growth* **311**, 1658 (2009).
23. I. A. Dmitriev, S. I. Dorozhkin, and A. D. Mirlin, *Phys. Rev. B* **80**, 125418 (2009).
24. S. I. Dorozhkin, D. V. Sychev, and A. A. Kapustin, *J. Appl. Phys.* **116**, 203702 (2014).
25. С. И. Дорожкин, А. А. Капустин, Письма в ЖЭТФ **101**, 101 (2015).