

# Анизотропная многокомпонентная терагерцовая фотопроводимость в системах с квантовым эффектом Холла

Н. Г. Калугин<sup>1)</sup>, Ю. Б. Васильев<sup>+</sup>, С. Д. Сучалкин<sup>+</sup>, Г. Нахтвай<sup>2)</sup>, Б. Э. Сагол<sup>2)</sup>, Г. Хайн\*<sup>2)</sup>, К. Эберл<sup>□2)</sup>

*Institut für Technische Physik, TU-Braunschweig, D-38106 Braunschweig, Germany*

<sup>+</sup> *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия*

*\* PTB-Braunschweig, D-38116 Braunschweig, Germany*

<sup>□</sup> *Max-Planck-Institute für Festkörperforschung, 70569 Stuttgart, Germany*

Поступила в редакцию 17 октября 2002 г.

Проведены исследования времен спада сигнала терагерцовой фотопроводимости в образцах с квантовым эффектом Холла. Сигнал фотопроводимости имеет как продольные, вызванные фотоиндуцированным изменением продольных компонент удельного сопротивления, так и поперечные компоненты, возникающие за счет фотоиндуцированного поперечного тока. Кинетика сигнала качественно различается для образцов с относительно низкой ( $500000 \text{ см}^2/\text{Vs}$  и менее) и относительно высокой ( $900000 \text{ см}^2/\text{Vs}$  и более) подвижностью носителей заряда.

PACS: 71.70.-d, 73.20.Dx, 76.40.+b

Исследования фотопроводимости и циклотронного поглощения электромагнитного излучения терагерцового диапазона в двумерных электронных системах (ДЭС) в условиях квантового эффекта Холла (КЭХ) привлекают к себе интерес исследователей практически с момента открытия самого КЭХ [1]. ДЭС эффективно взаимодействуют с терагерцовым излучением [2–17], поскольку характерный масштаб энергетических расстояний между уровнями Ландау в условиях КЭХ составляет порядка 10 мэВ. Уникальной особенностью терагерцовой спектроскопии является то, что в эксперименте не происходит межзонной генерации электронно-дырочных пар, поглощение излучения приводит к перераспределению электронов по энергиям без изменения общего числа электронов в ДЭС. В итоге появляется возможность для наиболее корректного исследования процессов возбуждения электронов и последующей их релаксации в условиях КЭХ. В настоящей работе представлены результаты исследования кинетики терагерцовой фотопроводимости в режиме КЭХ.

Использованные в данной работе образцы представляли собой гетероструктуры GaAs/AlGaAs с подвижностями квазидвумерных электронов  $\mu_{4.2\text{K}}$  и плотностями  $n_s$  соответственно: структура А –  $\mu_{4.2\text{K}} = 1.9 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Vs}$ ,  $n_s = 3.11 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; В –  $\mu_{4.2\text{K}} = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Vs}$ ,  $n_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; С –

$\mu_{4.2\text{K}} = 9 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Vs}$ ,  $n_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ; D –  $\mu_{4.2\text{K}} = 16 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{Vs}$ ,  $n_s = 3.57 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , из которых были изготовлены приборы в форме холловских мостиков (с шириной 270 мкм, длиной 2 мм) и приборы в форме меандра (с шириной 100 мкм и эффективной длиной 60 мм, в итоге площадь образцов составляла  $2 \times 3 \text{ мм}$ ). В качестве источника терагерцового излучения использовался *p*-Ge-импульсный лазер на циклотронном резонансе (ЦР) (длительность импульса менее 1 мкс), с перестраиваемой магнитным полем длиной волны в диапазоне 100–160 мкм [18–21]. Измерялось изменение падения напряжения между потенциальными контактами, вызванное импульсом терагерцового излучения, в магнитных полях, соответствующих факторам заполнения вблизи  $\nu = 2$ . На рис.1 показана зависимость фотоотклика (ФО) образца В в форме меандра от магнитного поля при разных положениях линии излучения *p*-Ge-лазера, которая демонстрирует наличие двух механизмов ФО. Наряду с двойным пиком ФО, обусловленным болометрическим откликом системы и “прикрепленным” к краям холловского плато, имеется одиночный пик, меняющий положение при перестройке энергии лазера. Положение этого пика меняется с полем линейно в соответствии со значением циклотронной массы  $m_c = 0.067m_0$  ( $m_0$  – масса свободного электрона), то есть мы наблюдаем в ФО пик циклотронного резонанса.

В ходе исследований выяснилось, что образцы с малыми и большими подвижностями демонстрируют не только разные транспортные характеристики, но и качественно разную динамику сигнала фотопро-

<sup>1)</sup> e-mail: n.kalugin@tu-bs.de Постоянный адрес: Институт физики микроструктур РАН, 603950 Н.-Новгород, Россия.

<sup>2)</sup> G. Nachtwei, B. E. Sagol, G. Hein, K. Eberl.

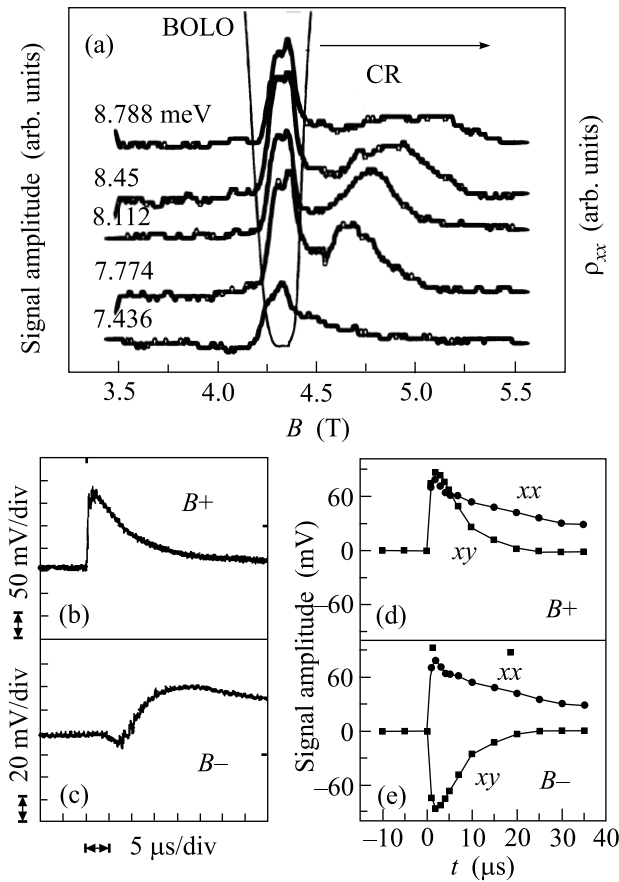


Рис.1. (а) Полевая зависимость ФО образца в форме меандра (структура В) при разных положениях линии лазера через 30 мкс после лазерного импульса. Максимальная интенсивность лазера  $J_{\max}$  (соответствует пиковой мощности порядка 1 Вт), ток смещения  $I_{\text{bias}} = 25$  мкА,  $T = 4.2$  К. В качестве пояснения приведена также зависимость продольного сопротивления исследуемого образца от поля в отсутствие излучения лазера. (б)–(е) Временные зависимости ФО образца в форме меандра (структура А). На (б) и (с) приведены зависимости ранней эволюции ФО для двух противоположных направлений магнитного поля образца,  $B = 5.9$  Тл,  $I_{\text{bias}} = 25$  мкА, энергия фотона лазерного излучения 10.92 мэВ, на (д) и (е) представлены результаты численного анализа и выделения Холловской ( $xy$ ) и продольной ( $xx$ ) компонент ФО из данных (б) и (с)

проводимости. Характерные для образцов, изготовленных из структур А и В, временные зависимости ФО представлены на рис.1 и рис.2а. Мы наблюдали две компоненты ФО с разными временами спада, причем начальная быстроспадающая (с временем спада  $t = 2-3$  мкс в случае холловских мостиков и  $6-8$  мкс в случае меандров) часть ФО меняет знак при изменении направления магнитного поля. Это объясняет-

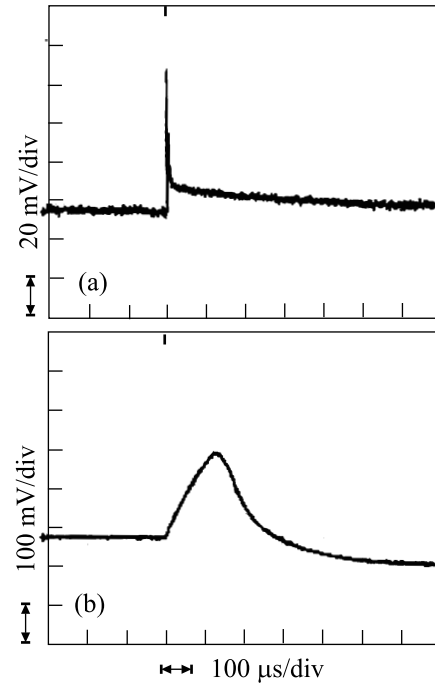


Рис.2. (а) – Временная зависимость ФО на циклотронном резонансе для образца в форме меандра с  $\mu_{4.2\text{К}} = 1.9 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/Вс,  $n_s = 3.11 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> (структура А). (б) – временная зависимость ЦР-фотоотклика меандра с  $\mu_{4.2\text{К}} = 5 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup>/Вс,  $n_s = 2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> (структура С).  $T = 4.2$  К,  $J_{\max}$ . Соответствующие величины магнитного поля, тока смещения, энергии лазерного излучения составляли: (а): 6.17 Тл, 60 мкА, 10.68 мэВ; (б): 5.25 Тл, 25 мкА, 9.126 мэВ

ся тем, что сигнал ФО в первые микросекунды после импульса терагерцового излучения является в основном результатом дрейфа фотовозбужденных электронов вдоль холловского электрического поля образца, то есть током, текущим поперек образца [20, 21]. Необходимо подчеркнуть, что компонента ФО, индуцированная поперечным током, дает вклад в изменение падения напряжения между потенциальными контактами. Этот вклад непосредственно связан с особенностью проводимости двумерного электронного газа в режиме квантового эффекта Холла. Уравнение, связывающее удельный ток и электрическое поле, имеет вид  $E_x = \rho_{xx}j_x + \rho_{xy}j_y$ , где  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{xy}$  – компоненты тензора удельного сопротивления. Отсюда видно, что вклад в продольное электрическое поле может давать и поперечный ток.

Кроме этой быстроспадающей компоненты, в образцах А и В наблюдаются не меняющие знака при смене направления магнитного поля продольные компоненты ФО, имеющие время спада 280–350 мкс.

Продольная компонента ФО как в меандрах (структуры А и В), так и в приборах в форме хол-

ловского мостика, содержит также очень медленные составляющие с временами спада в десятки и даже сотни миллисекунд. Можно предположить, что они связаны с разогревом кристаллической решетки или обусловлены упругой деформацией структуры, вызванной сопровождающим импульс терагерцового излучения звуковым импульсом, распространяющимся в жидком гелии от активного элемента лазера.

Мы не наблюдали существенных различий во временных постоянных для структур с относительно низкой подвижностью (образцы А и В с подвижностями 190000 и 500000 см<sup>2</sup>/Вс, соответственно), выполненных как в форме меандра, так и холловских мостиков. В то же время интенсивность сигнала, связанная с ЦР, была выше в образце с большей подвижностью.

Переход к образцам с высокими подвижностями (С и D) приводит к качественному изменению динамики образцов: в отличие от образцов А и В, которые демонстрировали динамику, подобную показанной на рис.2а, образцы С и D давали сигнал, показанный на рис.2б. Наблюдавшийся сигнал был нестабильным и менял форму от импульса к импульсу излучения лазера. Образцы работали не как линейные, а в режиме “ключа”. Рост подвижности образцов сопровождался снижением тока пробоя КЭХ, “сужением” плато КЭХ. Объяснение подобной тенденции известно [22]: в образцах с большей подвижностью размеры областей локализации становятся сравнимы (или больше) с шириной образцов, так как могут достигать величин в десятки (и даже сотни) микрон. В таких образцах переход системы в равновесное состояние требует значительно больше времени. Таким образом, различие кинетики фотопроводимости в образцах с различной подвижностью можно связать с различием в амплитуде и радиусе корреляции рассеивающего потенциала и связанных с этим различием механизмов проводимости в режиме КЭХ.

В заключение отметим, что мы наблюдали наличие двух механизмов ФО – болометрического и циклотронно-резонансного. В наблюдаемый эффект вносят вклад изменения как продольного, так поперечного удельного сопротивления под действием терагерцового излучения. При этом кинетика сигнала фотопроводимости качественно различается для образцов с низкой и высокой подвижностью носителей заряда.

Мы благодарим К. фон Клитцинга, Р. Хауга, Р. Герхардтса и У. Цайтлера за поддержку работы и полезные обсуждения результатов, И. В. Кукушкина – за содействие в усовершенствовании нашей экспериментальной установки. Работа проведена при поддержке немецкого научного сообщества

(DFG – программа “Квантово-холловские системы”, проект # Na235/10-1/2), работа Ю. В. и С. С. также поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований и программами “Низкоразмерные квантовые структуры” и “Физика твердотельных наноструктур”.

1. K. von Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 494 (1980).
2. J. C. Maan, Th. Englert, D. C. Tsui, and A. C. Gossard, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 609 (1982).
3. D. Stein, G. Ebert, K. von Klitzing et al., *Surf. Sci.* **142**, 406 (1984); D. Stein, *Diplomarbeit TU-Munich*, 1983.
4. R. E. Horstmann, E. J. v d Broek, J. Wolter et al., *Sol. St. Comm.* **50**, 753 (1984).
5. M. J. Chou, D. C. Tsui, and A. Y. Cho, *Proc. of 18th Int. Conf. Phys. of Semicond.*, World Scientific, Stockholm, 1986, p. 437.
6. Yu. B. Vasilyev, S. D. Suchalkin, Yu. L. Ivanov et al., *JETP Lett.* **56**, 377 (1992); S. Suchalkin, Yu. Vasilyev, Yu. Ivanov et al., *Solid State Elect.* **40**, 469 (1996).
7. R. Merz, F. Keilmann, R. J. Haug et al., *Phys. Rev. Lett.* **70**, 651 (1993).
8. R. J. F. van Haren, F. A. P. Blom, and J. H. Wolter, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 1198 (1994).
9. A. Lorke, J. P. Kotthaus, J. H. English et al., *Phys. Rev.* **B53**, 1054 (1996).
10. K. Hirakawa, M. Endo, K. Yamanaka et al., *Proc. of 23rd Int. Conf. Phys. of Semicond*, World Scientific, Berlin, 1996, p. 2543.
11. K. Hirakawa, K. Yamanaka, Y. Kawaguchi et al., *Phys. Rev.* **B63**, 085320 (2001).
12. B. G. L. Jager, S. Wimmer, A. Lorke et al., *Phys. Rev.* **B63**, 045315 (2001).
13. Y. Kawano, Y. Hisanaga, H. Takenouchi et al., *J. Appl. Phys.* **89**, 4037 (2001).
14. I. V. Erofeeva, V. I. Gavrilenko, and S. Komiyama, *Nanotechnology* **12**, 453 (2001).
15. Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, M. Saeki et al., *Appl. Phys. Lett.* **80**, 136 (2002).
16. Y. Kawaguchi, K. Hirakawa, and S. Komiyama, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3418 (2002).
17. R. J. Heron, R. A. Lewis, B. E. Kane et al., *Appl. Phys. Lett.* **75**, 3150 (1999).
18. Yu. L. Ivanov and Yu. B. Vasilyev, *Sov. Tech. Phys. Lett.* **9**, 264 (1983).
19. K. Unterrainer, C. Kremser, E. Gornik et al., *Sol. St. Electronics* **32**, 1527 (1989).
20. N. G. Kalugin, G. Nachtwei, Yu. B. Vasilyev et al., *Appl. Phys. Lett.* **81**, 382 (2002).
21. N. G. Kalugin, Yu. B. Vasilyev, S. D. Suchalkin et al., *Phys. Rev.* **B66**, 085308 (2002).
22. S. Koch, R. J. Haug, K. v. Klitzing et al., *Phys. Rev.* **B46**, 1596 (1992).