

**Индукрованные микроволновым излучением  
гигантские осцилляции магнетосопротивления и состояние  
с нулевым сопротивлением в двумерной электронной системе  
со средней величиной подвижности**

А. А. Быков<sup>1)</sup>, А. К. Бакаров, Д. Р. Исламов, А. И. Торопов

Институт физики полупроводников Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 17 августа 2006 г.

Исследовано влияние микроволнового поля в диапазоне частот от 54 до 140 ГГц на магнетотранспорт в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами, подвижность электронов в которой не превышала  $10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . В изучаемой двумерной системе обнаружены гигантские осцилляции сопротивления, возникающие под действием микроволнового излучения, положение которых в магнитном поле определяется отношением частоты излучения к циклотронной частоте, ранее наблюдавшиеся лишь в GaAs/AlGaAs гетероструктурах с существенно большей подвижностью. Установлено, что при облучении исследуемых образцов микроволновым полем на частоте 140 ГГц сопротивление в основном минимуме этих осцилляций, расположенному вблизи циклотронного резонанса, принимает значение, близкое к нулю. Полученные результаты указывают на то, что подвижность величиной менее  $10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$  не является фактором, препятствующим возникновению в двумерной системе под действием микроволнового излучения магнетополевых состояний с нулевым сопротивлением.

PACS: 73.23.–b, 73.40.Gk

В настоящее время значительный интерес к изучению транспорта в двумерных (2D) электронных системах обусловлен недавним открытием магнетополевых осцилляций сопротивления, возникающих в высокоподвижных GaAs/AlGaAs гетероструктурах под действием микроволнового излучения [1]. Было установлено, что обнаруженные осцилляции периодичны в обратном магнитном поле ( $1/B$ ), а их период определяется отношением частоты микроволнового излучения к циклотронной частоте. Осциллирующее в магнитном поле поведение фотоотклика в высокоподвижной 2D системе, как впоследствии выяснилось, предсказанное более 30 лет назад [2], принципиально отличалось от фотоотклика в GaAs/AlGaAs гетероструктурах с меньшей подвижностью [3]. Влияние микроволнового излучения на магнетотранспорт в GaAs/AlGaAs гетероструктурах среднего качества проявлялось лишь в виде пика фотосопротивления, обусловленного разогревом 2D электронного газа в условиях магнетоплазменного резонанса [4]. Более того, вскоре после экспериментального открытия магнетополевых осцилляций сопротивления, индуцированных микроволновым излучением в высокоподвижных GaAs/AlGaAs гетероструктурах, было показано, что сопротивление в минимумах обнаружен-

ных осцилляций может принимать значение, близкое к нулю [5–7].

Этот неожиданный экспериментальный факт инициировал интенсивное теоретическое изучение обнаруженного феномена [7–16]. Однако, несмотря на обилие теоретических работ, механизмы возникновения осцилляций сопротивления под действием микроволнового поля в 2D системах при больших факторах заполнения остаются до настоящего времени дискуссионными. Остается открытым вопрос и о роли подвижности носителей заряда в 2D системах для проявления в них индуцированных микроволновым излучением магнетополевых состояний с нулевым сопротивлением. Принято считать, что она должна превышать  $3 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$  [17]. Что касается экспериментального изучения фотоотклика на микроволновое излучение в 2D системах в классически сильных магнитных полях, то эти исследования, за исключением нескольких работ [18–20], до сих пор ограничиваются высокоподвижными GaAs/AlGaAs гетероструктурами с толстым спейсером и соответственно малой концентрацией электронов [21–23].

В настоящей работе мы сообщаем об обнаружении периодических в обратном магнитном поле осцилляций сопротивления, возникающих под действием излучения в миллиметровом диапазоне длин волн в GaAs квантовых ямах с существенно мень-

<sup>1)</sup>e-mail: bykov@thermo.isp.nsc.ru

шей подвижностью и значительно большей концентрацией 2D электронов, чем сообщалось ранее [1, 5–7]. Мы экспериментально показываем, что, несмотря на сравнительно невысокую подвижность, в изучаемой 2D системе под действием микроволнового излучения на частоте  $F = 140$  ГГц при температуре  $T = 1.7$  К возникает магнетополевое состояние с близким к нулю значением сопротивления.

Исследуемые гетероструктуры с модулированным легированием представляли собой GaAs квантовые ямы с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами [18–20]. Ширина GaAs квантовой ямы составляла 13 нм. Структуры выращивались методом молекуллярно-лучевой эпитаксии на GaAs подложках. Концентрация и подвижность 2D электронов в наших образцах при температуре  $T = 4.2$  К после кратковременной подсветки красным светодиодом составляли  $n_e = 8.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ,  $\mu = 560 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , соответственно. Измерения проводились при температурах 1.7 и 4.2 К в магнитных полях  $B$  до 0.6 Тл на холловских мостиках, имеющих ширину 50 мкм и расстояние между потенциометрическими выводами 250 мкм. Микроволновое излучение подавалось на образец по круглому волноводу с внутренним диаметром 6 мм. Выходная мощность микроволнового излучения используемых генераторов составляла  $P_{\text{out}} = (4–10)$  мВт. Сопротивление измерялось на переменном токе частотой (0.3–1) кГц, который имел величину  $(1–10) \cdot 10^{-7}$  А.

На рис.1 представлены зависимости  $\rho_{xx}(B)$  в отсутствии микроволнового излучения и при его наличии на частоте 140 ГГц при температуре 4.2 К. Хорошо видно, что микроволновое излучение приводит к возникновению гигантских осцилляций магнетосопротивления. Анализ положения первых четырех максимумов этих осцилляций показал, что они периодичны по обратному магнитному полю. Однако положения максимумов под номерами 5–10 отклоняются от линейной зависимости в обратном магнитном поле. Качественно похожее поведение наблюдалось ранее на высокоподвижных GaAs/AlGaAs гетероструктурах с существенно меньшей концентрацией [6] и было объяснено спиновым расщеплением [24]. Кроме того, хорошо видно, что существуют особые точки, в которых микроволновое излучение не влияет на сопротивление 2D электронного газа. Одна из таких точек, обозначенная на рисунке стрелкой, соответствует условию  $\omega = \omega_c$ , где  $\omega$  – частота микроволнового излучения, а  $\omega_c$  – циклотронная частота. Видно, что ближайший к этой точке минимум является наиболее глубоким.

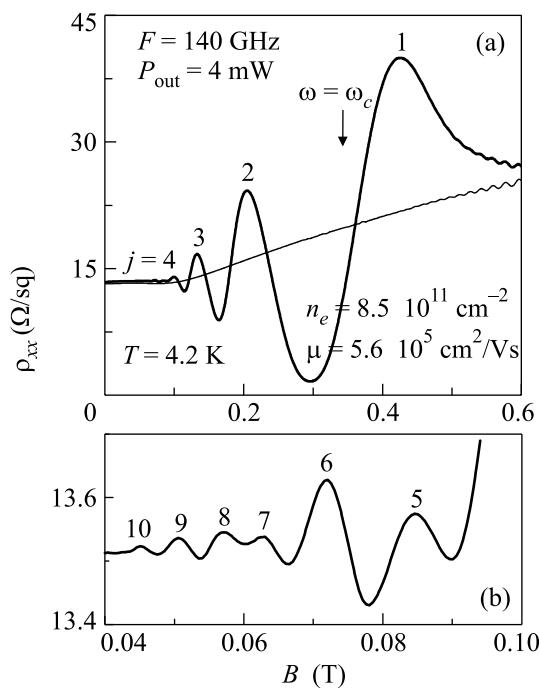


Рис.1. (а) Экспериментальные зависимости  $\rho_{xx}(B)$  2D электронного газа в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами при  $T = 4.2$  К в отсутствии (тонкая линия) и присутствии (толстая линия) микроволнового излучения частотой 140 ГГц. (б) Подробная зависимость  $\rho_{xx}(B)$  в присутствии микроволнового излучения в магнитном поле менее 0.1 Тл. Стрелкой обозначено положение циклотронного резонанса. Цифрами указаны номера максимумов, начиная с основного

Рис.2 демонстрирует влияние микроволнового излучения на магнетосопротивление 2D электронного газа в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами при температуре 1.7 К для трех различных частот: 54, 72 и 140 ГГц. Приведенные экспериментальные зависимости показывают, что точка пересечения кривых, соответствующая положению циклотронного резонанса, при изменении частоты смещается в магнитном поле. Кроме того, видно, что сопротивление в основном минимуме, расположенному вблизи этой точки, для частоты микроволнового излучения  $F = 140$  ГГц при температуре 1.7 К принимает значение, близкое к нулю.

Следует отметить, что при понижении температуры с 4.2 до 1.7 К существенно изменяется и зависимость  $\rho_{xx}(B)$  в отсутствии микроволнового излучения. С одной стороны, увеличивается амплитуда осцилляций Шубникова–де Гааза (ШдГ), а с другой, – положительное магнетосопротивление, характерное для исследуемых гетероструктур при  $T = 4.2$  К, сменяется при  $T = 1.7$  К на отрицательное. Анализ экс-

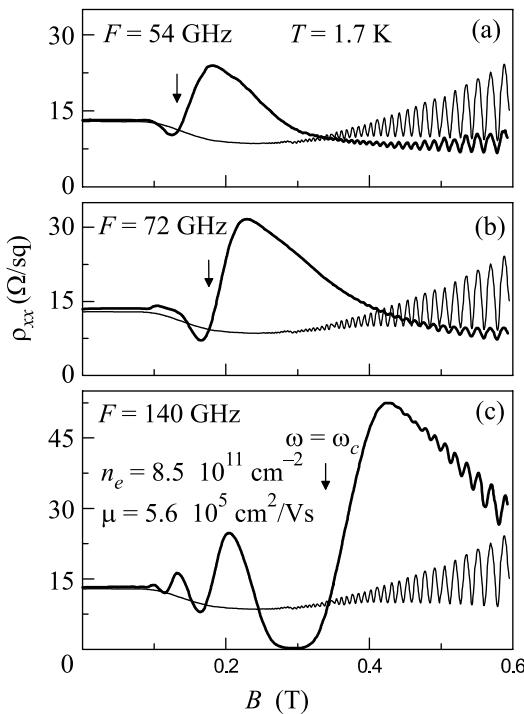


Рис.2. Экспериментальные зависимости  $\rho_{xx}(B)$  2D электронного газа в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьераами при  $T = 1.7$  К в отсутствии (тонкая линия) и присутствии (толстая линия) микроволнового излучения для различных частот: (a)  $F = 54$  ГГц; (b)  $F = 72$  ГГц и (c)  $F = 140$  ГГц. Стрелкой обозначено положение циклотронного резонанса.

perimentальных данных показал, что отрицательное магнетосопротивление, появившееся при понижении температуры, не описывается квадратичной зависимостью от  $B$ , имеется “полка” вблизи  $B = 0$ , и поэтому оно не может быть обусловлено только лишь одним электрон-электронным взаимодействием [25]. В связи с чем наблюдаемое в наших структурах в классически сильных магнитных полях отрицательное магнетосопротивление мы качественно объясняем совместным влиянием на процессы переноса носителей заряда электрон-электронного взаимодействия и классических эффектов “памяти” [26–28].

Для идентификации осцилляций сопротивления, индуцированных микроволновым излучением, принципиальное значение имеет положение особых точек этих осцилляций на оси  $B$  при заданной частоте излучения  $\omega$ . То есть положение максимумов, минимумов и точек, в которых отсутствует фотоотклик. Большинство теоретических работ позволяет точно определить положение лишь тех точек, в которых сопротивление не изменяется под действием микроволнового поля. Положение этих точек соответствует

положению циклотронного резонанса и его гармоник  $\omega = n\omega_c$ , где  $n$  – целое положительное число. Этот теоретический результат хорошо согласуется с экспериментальными данными [29], из которых следует, что наиболее точно определенной точкой магнетополевых осцилляций сопротивления является точка, соответствующая положению циклотронного резонанса. Она расположена между основным максимумом и основным минимумом и находится на пересечении зависимостей  $\rho_{xx}(B)$  в отсутствии и присутствии микроволнового излучения.

Такое пересечение наблюдается на наших зависимостях. Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что положение этого пересечения при изменении частоты смещается в магнитном поле в соответствии с положением циклотронного резонанса, рассчитанного из величины эффективной массы электронов в GaAs, равной  $0.067m_0$ . Этот факт указывает на то, что приведенные на рис.1 и 2 осцилляции, возникающие под действием микроволнового излучения в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьераами, имеют природу, аналогичную осцилляциям, открытым в работе [1], которые ранее были предсказаны в работе [2].

Необходимо отметить, что в наших экспериментальных зависимостях, в отличие от работ [6, 29], точка, расположенная вблизи циклотронного резонанса, в которой отсутствует влияние излучения на магнетосопротивление 2D электронного газа, смешена в сторону больших магнитных полей. Из рис.1 и 2 видно, что для частоты микроволнового излучения 140 ГГц это смещение более заметно для кривых, полученных при температуре 4.2 К. Одной из возможных причин такого смещения мы считаем ошибку в определении величины компоненты внешнего магнитного поля, перпендикулярной поверхности 2D электронного газа, которая могла достигать в наших экспериментах 10%. Задача прецизионного определения положения особых точек осцилляций магнетосопротивления, индуцированных микроволновым излучением в 2D электронных системах со средней величиной подвижности, пока остается нерешенной и будет предметом наших дальнейших экспериментальных исследований.

В настоящее время подавляющее число теоретических работ, объясняющих природу этих осцилляций, базируется, с одной стороны, на непрямых оптических переходах, сопровождающихся изменением импульса за счет рассеяния на примесях или фонах [2, 9–12], а с другой, – на неравновесном заполнении электронных состояний на уширенных уровнях Ландау [7, 14, 15]. На основе эксперименталь-

ных данных, имеющихся у нас к сегодняшнему дню, мы не можем отдать предпочтение какому-либо из предложенных теоретиками сценариев для объяснения осцилляций, проявляющихся в наших образцах под действием микроволнового поля миллиметрового диапазона длин волн. Однако мы считаем, что одной из возможных причин проявления состояния с близким к нулю значением сопротивления, индуцированного микроволновым излучением в исследуемых GaAs квантовых ямах со средней величиной подвижности и высокой концентрацией 2D электронов, является их упругое рассеяние с участием фотонов на шероховатостях гетерограниц. Такая точка зрения согласуется с ролью гетерограниц GaAs квантовой ямы с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами в проявлении магнетофононного резонанса в ней [30].

Таким образом, мы показали, что при увеличении концентрации 2D электронного газа индуцированные микроволновым излучением состояния с нулевым сопротивлением проявляются в GaAs квантовых ямах с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами при средней величине подвижности. Полученные экспериментальные данные делают реальным перенесение экспериментальных исследований природы индуцированных электромагнитным полем состояний с нулевым сопротивлением в 2D электронных системах в область субмиллиметровых длин волн и создание на основе этого эффекта инфракрасных приемников излучения.

Авторы выражают благодарность И.В. Марчишину за техническую помощь при проведении экспериментов.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 04-02-16789 и № 06-02-16869, и INTAS, проект № 03-51-6453.

1. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons et al., Phys. Rev. B **64**, 201311(R) (2001).
2. В. И. Рыжий, ФТТ **11**, 2577 (1969).
3. А. А. Быков, Г. М. Гусев, З. Д. Квон и др., Письма в ЖЭТФ **53**, 407 (1991).
4. E. Vasiliadou, G. Muller, D. Heitmann et al., Phys. Rev. B **48**, 17145 (1993).
5. R. G. Mani, J. H. Smet, K. v. Klitzing et al., Nature (London) **420**, 646 (2002).
6. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 046807 (2003).
7. S. I. Dorozhkin, Письма в ЖЭТФ **77**, 681 (2003).
8. A. V. Andreev, I. L. Aleiner, and A. J. Millis, Phys. Rev. Lett. **91**, 056803 (2003).
9. A. C. Durst, S. Sachdev, N. Read et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 086803 (2003).
10. V. Rizhii and V. Vurtkov, Phys. Rev. B **68**, 165406 (2003).
11. В. Шикин, Письма в ЖЭТФ **77**, 281 (2003).
12. V. Rizhii, A. Chaplik, and R. Suris, Письма в ЖЭТФ **80**, 412 (2004).
13. M. G. Vavilov and I. L. Aleiner, Phys. Rev. B **69**, 035303 (2004).
14. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, and D. G. Polyakov, Phys. Rev. B **70**, 165305 (2004).
15. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner et al., Phys. Rev. B **71**, 115316 (2005).
16. A. Kashuba, Письма в ЖЭТФ **83**, 351 (2006).
17. С. И. Дорожкин, УФН **175**, 213 (2005).
18. А. А. Быков, А. К. Бакаров, А. К. Калагин и др., Письма в ЖЭТФ **81**, 348 (2005).
19. A. A. Bykov, Jing-qiao Zhang, S. Vitkalov et al., Phys. Rev. B **72**, 245307 (2005).
20. A. A. Bykov, A. K. Bakarov, A. K. Kalagin et al., Physica E **34**, 97 (2006).
21. S. A. Studenikin, M. Potemski, A. Sachrajda et al., Phys. Rev. B **71**, 245313 (2005).
22. J. H. Smet, B. Gorshunov, C. Jiang et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 116804 (2005).
23. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 236804 (2006).
24. R. G. Mani, J. H. Smet, K. v. Klitzing et al., Phys. Rev. B **69**, 193304 (2004).
25. M. A. Paalanen, D. C. Tsui, and J. C. M. Hwang, Phys. Rev. Lett. **51**, 2226 (1983).
26. Э. М. Баскин, Л. И. Магарилл, М. В. Энтин, ЖЭТФ **75**, 723 (1978).
27. A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, F. Evers et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 126805 (2001).
28. А. А. Быков, А. К. Бакаров, А. В. Горан и др., Письма в ЖЭТФ **78**, 165 (2003).
29. R. G. Mani, J. H. Smet, K. v. Klitzing et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 146801 (2004).
30. А. А. Быков, А. К. Калагин, А. К. Бакаров, Письма в ЖЭТФ **81**, 646 (2005).