

Абсолютное отрицательное сопротивление в неравновесной двумерной электронной системе в сильном магнитном поле

А. А. Быков¹⁾, Д. Р. Исламов, Д. В. Номоконов, А. К. Бакаров

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

Поступила в редакцию 4 октября 2007 г.

Исследовано влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн на сопротивление двумерного электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктурах в сильном магнитном поле. Показано, что в изучаемой двумерной электронной системе в неравновесных условиях, создаваемых микроволновым излучением, возникают гигантские магнетопольные осцилляции сопротивления. Установлено, что при малых плотностях измерительного тока увеличение микроволновой мощности приводит к абсолютному отрицательному сопротивлению в основном минимуме этих осцилляций, расположенном вблизи циклотронного резонанса. Полученные в работе экспериментальные данные качественно согласуются с теорией многофотонного фотостимулированного примесного рассеяния [J. Inagrea and G. Platero, Appl. Phys. Lett. **89**, 052109 (2006)].

PACS: 73.23.–b, 73.40.Gk

Наиболее ярким явлением, обусловленным особенностями поведения неравновесных электронов в магнитном поле, является абсолютная отрицательная проводимость. Отрицательный знак проводимости (или сопротивления) в этом случае означает, что ток в неравновесной электронной системе течет в направлении, противоположном электрическому полю. На такую возможность в трехмерной электронной системе указал Елесин в 1968 г. в работе [1]. Он теоретически показал, что поперечный ток в полупроводнике, помещенном в квантующее магнитное поле, становится отрицательным, если энергетическое распределение носителей заряда является неравновесным. Отрицательный вклад в проводимость в сильном магнитном поле, обусловленный искажением функции распределения фотоэлектронов, был впоследствии обнаружен экспериментально в *p*-InSb [2] и *p*-Ge [3]. Однако полной абсолютной отрицательной проводимости достичь не удалось из-за доминирующего вклада равновесных дырок и недостаточной интенсивности монохроматической межзонной подсветки.

Эффект абсолютной отрицательной проводимости в неравновесной двумерной (2D) электронной системе, помещенной в магнитное поле, был предсказан в работе [4]. В этой работе Рыжий теоретически показал, что в неравновесных условиях, создаваемых электромагнитным излучением, диссипативная проводимость 2D электронной системы на постоянном токе является осциллирующей знакоперемен-

ной функцией отношения частоты излучения к циклотронной частоте. Осциллирующий в зависимости от магнитного поля фотоотклик, возникающий под действием электромагнитного излучения в 2D электронной системе, был сравнительно недавно обнаружен в магнетосопротивлении GaAs/AlGaAs гетеропереходов с высокой электронной подвижностью при облучении их микроволновым полем [5]. Дальнейшие исследования этого явления на более совершенных GaAs/AlGaAs гетеропереходах показали, что сопротивление и проводимость в минимумах магнетопольных осцилляций, индуцированных микроволновым излучением, при понижении температуры стремятся к нулю [6–9], а не становятся отрицательными, как это предсказывает теория [4].

В настоящее время теоретические модели, объясняющие природу открытых магнетопольных осцилляций и состояний с нулевым сопротивлением и нулевой проводимостью, включают в себя индуцированное микроволновым полем рассеяние на примесях и фонах [10–13], учет неравновесности стационарной функции распределения электронов по энергии [8, 14] и плазменные эффекты [15, 16]. Для объяснения полученных к настоящему времени экспериментальных данных предложены и другие модели [6, 17–19]. Тем не менее, несмотря на обилие теоретических работ, механизмы возникновения магнетопольных состояний с нулевым сопротивлением и нулевой проводимостью в неравновесных электронных системах остаются до настоящего времени дискуссионными. Одна из точек зрения на их природу заключается в том, что состояния с нулевым сопротивлени-

¹⁾e-mail: bykov@thermo.isp.nsc.ru

ем, возникающие под действием микроволнового излучения в GaAs/AlGaAs гетеропереходах, являются пространственно неоднородными и обусловлены локальным отрицательным сопротивлением. Эта точка зрения базируется на том факте, что однородное состояние неравновесной электронной системы с абсолютной отрицательной проводимостью является неустойчивым [20–22]. Такая неустойчивость приводит к образованию доменов электрического поля и стратификации линий тока, что проявляется в экспериментах в виде состояний с нулевым сопротивлением [6–8, 23] или нулевой проводимостью [9].

Однако в некоторых магнетотранспортных экспериментах на GaAs/AlGaAs гетеропереходах, в минимумах магнетопольных осцилляций, индуцированных микроволновым полем, наблюдается абсолютное отрицательное сопротивление [24, 25]. Причины возникновения такого аномального фотоотклика в 2D электронной системе под действием микроволнового излучения пока не установлены. Остаются не до конца установленными и экспериментальные условия, при которых возникает абсолютное отрицательное сопротивление в неравновесных электронных системах на основе полупроводниковых гетероструктур в скрещенных электрическом и магнитном полях. В настоящей работе мы сообщаем об экспериментальном наблюдении абсолютного отрицательного сопротивления в основном минимуме магнетопольных осцилляций, индуцированных микроволновым излучением в GaAs/AlAs гетероструктурах. Мы показываем, что аномальный фотоотклик возникает в исследуемой 2D электронной системе при температуре жидкого гелия под действием излучения в миллиметровом диапазоне длин волн при плотностях измерительного тока менее 0.1 мА/см.

Исследуемые в работе гетероструктуры с модулированным легированием представляли собой GaAs квантовые ямы с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами. Ширина GaAs квантовой ямы составляла 13 нм. Структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaAs подложках. Концентрация и подвижность 2D электронов в наших образцах при температуре $T = 4.2$ К составляли $n_e = 7.4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 1.7 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$, соответственно. Измерения проводились при температуре 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. Максимальная выходная мощность излучения используемого генератора составляла

$P_{\text{out}} = 4$ мВт. Сопротивление измерялось на переменном токе I_{ac} частотой $F = (0.3\text{--}1)$ кГц, который имел величину $I_{\text{ac}} = (0.1\text{--}10)$ мкА. При изучении влияния микроволнового поля на сопротивление 2D электронного газа использовался режим непрерывной генерации излучения, а при регистрации фото-ЭДС – режим амплитудной модуляции. При этом сигнал ЭДС измерялся на частоте амплитудной модуляции микроволновой мощности, которая составляла $F = (0.3\text{--}1)$ кГц.

На рис.1 представлены зависимости сопротивления $R_{xx}(B)$ при температуре 4.2 К для измеритель-

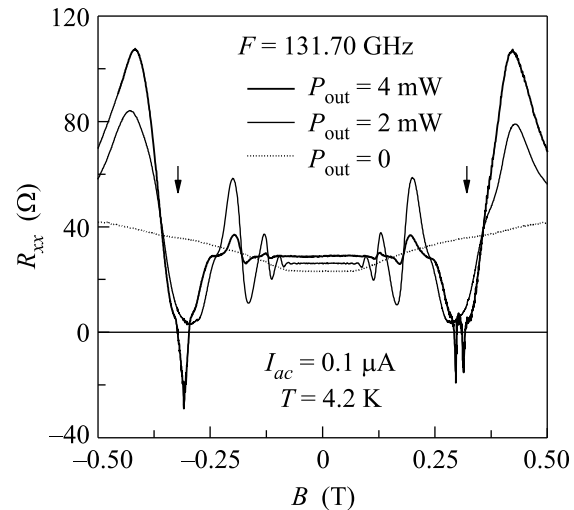


Рис.1. Зависимости $R_{xx}(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре, измеренные на холловском мостике длиной 250 мкм и шириной 50 мкм при различных величинах микроволновой мощности на выходе из генератора. Стрелками указано положение циклотронного резонанса

ного тока 0.1 мкА при микроволновом облучении холловского мостика и в отсутствие микроволнового облучения. Хорошо видно, что микроволновое излучение приводит к возникновению гигантских осцилляций магнетосопротивления. При этом для максимального уровня микроволновой мощности в основном минимуме магнетопольных осцилляций, расположенном вблизи циклотронного резонанса, наблюдается отрицательное сопротивление. Причем необходимо отметить, что зависимость $R_{xx}(B)$ в областях с отрицательными значениями сопротивления не является симметричной по знаку магнитного поля. Зависимости $R_{xx}(B)$ при неизменных условиях эксперимента воспроизводились, по меньшей мере, в течение нескольких часов и не зависели от направления развертки магнитного поля. Качественно похожее поведение наблюдалось для двух серий холловских мос-

тиков, изготовленных из двух различных GaAs/AlAs гетероструктур.

К настоящему дню, насколько нам известно, индуцированное микроволновым полем отрицательное сопротивление (точнее, отрицательное напряжение на потенциометрических выводах, измеренное на частоте переменного измерительного тока) наблюдалось только в высококачественных GaAs/AlGaAs гетероструктурах с электронной подвижностью более $10^7 \text{ см}^2/\text{Вс}$ [24, 25]. В работе [24] такое anomальное поведение сигнала в основном минимуме магнетопольных осцилляций сопротивления, индуцированных микроволновым излучением, было объяснено токовой нестабильностью, обусловленной локальным отрицательным сопротивлением. Было также установлено, что зависимости $R_{xx}(B)$, снятые в присутствии микроволнового поля с различных пар потенциометрических выводов существенно отличаются друг от друга, а на омических контактах к 2D электронному газу возникает ЭДС. При этом вопрос о роли этой ЭДС в формировании состояний с отрицательным сопротивлением в 2D электронной системе, помещенной в скрещенные магнитное и электрическое поля, остался открытым.

Рис.2а демонстрирует, что, в отличие от результатов работы [24], зависимости $R_{xx}(B)$, измеренные в наших структурах с двух различных пар потенциометрических выводов, практически неотличимы. На рис.2б представлены зависимости микроволновой ЭДС от магнитного поля, снятые с тех же потенциометрических выводов на частоте амплитудной модуляции микроволновой мощности. Хорошо видно, что зависимости ЭДС, измеренные с различных пар потенциометрических выводов, существенно отличаются друг от друга. Отличие есть и в областях магнитных полей, в которых наблюдается отрицательное сопротивление. Отсутствие корреляции между магнетопольными зависимостями ЭДС и R_{xx} позволяет заключить, что в наших экспериментах микроволновая ЭДС, возникающая на потенциометрических выводах, не влияет на величину и знак напряжения, регистрируемого с этих же выводов на частоте измерительного тока. То есть ток неравновесных носителей заряда, ответственный за отрицательное сопротивление в изучаемых структурах и направленный против тянущего электрического поля, индуцируется микроволновым излучением в 2D электронном газе и не связан с ЭДС, возникающей на контактах к нему.

По нашему мнению, то обстоятельство, что anomальный фотоотклик возникает в изучаемых структурах при увеличении микроволновой мощности, указывает на принципиальную роль многофотонных

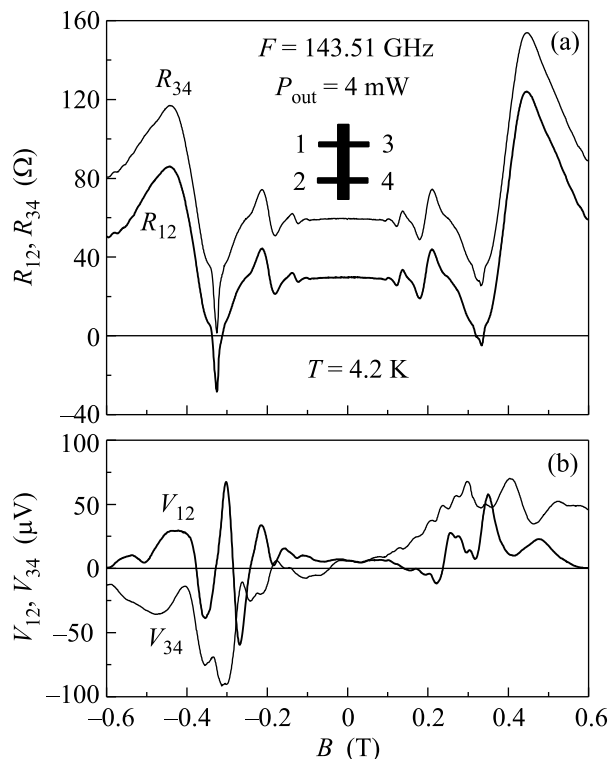


Рис.2. (а) Зависимости $R_{12}(B)$ и $R_{34}(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре, измеренные с различных потенциометрических выводов холловского мостика длиной 250 мкм и шириной 50 мкм при микроволновой мощности на выходе из генератора 4 мВт. Для наглядности кривая $R_{34}(B)$ смещена вверх по оси y на 30 Ом. На вставке изображена схема холловского мостика. (б) Зависимости ЭДС $V_{12}(B)$ и $V_{34}(B)$, измеренные с различных потенциометрических выводов холловского мостика при микроволновой мощности на выходе из генератора 4 мВт

переходов в возникновении абсолютного отрицательного сопротивления. Такое предположение полностью согласуется с результатами теоретической работы [26], в которой был предсказан переход при возрастании микроволновой мощности от состояний с нулевым сопротивлением к состояниям с абсолютным отрицательным сопротивлением. В рамках этой теории абсолютное отрицательное сопротивление возникает за счет многофотонного фотостимулированного примесного рассеяния. То есть абсолютное отрицательное сопротивление по своей сути есть результат дополнительной отрицательной добавки к нулевому сопротивлению. Состояния с нулевым сопротивлением в этом случае возникают за счет однофотонного фотостимулированного рассеяния на случайном потенциале.

Вероятность многофотонного примесного рассеяния зависит от степени наклона уровней Ландау под

действием электрического поля. При прочих равных условиях, чем меньше наклон, тем выше вероятность таких процессов рассеяния [26]. Наклон уровней Ландау можно изменять, варьируя величину измерительного тока. Поведение микроволнового фотосопротивления в основном минимуме магнетопольных осцилляций для различных величин измерительного тока представлено на рис.3. Как видно из этого

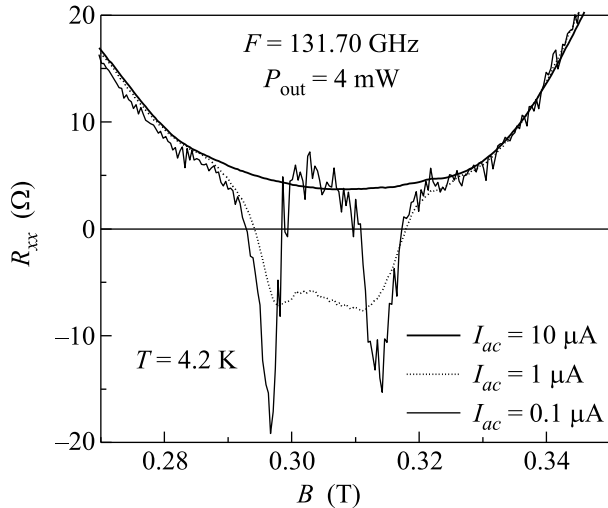


Рис.3. Зависимости $R_{xx}(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре, измеренные на холловском мостике длиной 250 мкм и шириной 50 мкм при различных величинах измерительного тока для микроволновой мощности на выходе из генератора 4 мВт

рис., в соответствии с предсказаниями теории [26], увеличение измерительного тока приводит к подавлению абсолютного отрицательного сопротивления.

Таким образом в GaAs/AlAs гетероструктурах мы обнаружили абсолютное отрицательное сопротивление, индуцированное микроволновым излучением в 2D электронной системе, помещенной в скрещенные электрическое и магнитное поля. Нами экспериментально установлено, что при прочих равных условиях абсолютное отрицательное сопротивление возникает при увеличении микроволновой мощности и исчезает при возрастании измерительного тока. Полученные в работе экспериментальные данные качественно согласуются с теорией фотостимулированного примесного рассеяния [26].

Авторы благодарны А.О. Минаеву за поддержку и техническую помощь.

1. В. Ф. Елесин, Письма в ЖЭТФ **7**, 229 (1968).
2. А. С. Александров, Ю. А. Быковский, В. Ф. Елесин и др., Письма в ЖЭТФ **12**, 57 (1970).
3. В. Ф. Гантмахер, В. Н. Зверев, Письма в ЖЭТФ **25**, 44 (1977).
4. В. И. Рыжий, ФТТ **11**, 2577 (1969).
5. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons et al., Phys. Rev. B **64**, 201311(R) (2001).
6. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing et al., Nature (London) **420**, 646 (2002).
7. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 046807 (2003).
8. S. I. Drogzhkin, Письма в ЖЭТФ **77**, 681 (2003).
9. C. L. Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuttila et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 096803 (2003).
10. В. И. Рыжий, Р. А. Сурис, Б. С. Шамхалова, ФТП **20**, 2078 (1986).
11. В. Шикин, Письма в ЖЭТФ **77**, 281 (2003).
12. A. C. Durst, S. Sachdev, N. Read et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 086803 (2003).
13. V. Ryzhii and V. Vyurkov, Phys. Rev. B **68**, 165406 (2003).
14. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner et al., Phys. Rev. B **71**, 115316 (2005).
15. S. A. Mikhailov, Phys. Rev. B **70**, 165311 (2004).
16. В. А. Волков, Э. Е. Тахтамиров, ЖЭТФ **131**, 681 (2007).
17. J. Iñarrea and G. Platero, Phys. Rev. Lett. **94**, 016806 (2005).
18. A. Kashuba, Письма в ЖЭТФ **83**, 351 (2006).
19. A. D. Chepelianskii, A. S. Pikovsky, and D. L. Shepelyansky, arXiv:0707.2694.
20. А. Л. Захаров, ЖЭТФ **38**, 665 (1960).
21. А. Ф. Волков, Ш. М. Коган, УФН **96**, 633 (1968).
22. A. V. Andreev, I. L. Aleiner, A. J. Millis, Phys. Rev. Lett. **91**, 056803 (2003).
23. А. А. Быков, А. К. Бакаров, Д. Р. Исламов и др., Письма в ЖЭТФ **84**, 466 (2006).
24. R. L. Willett, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **93**, 026804 (2004).
25. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer et al., Phys. Rev. B **73**, 041303 (2006).
26. J. Iñarrea and G. Platero, Appl. Phys. Lett. **89**, 052109 (2006).