

# Интерференция соизмеримых и индуцированных микроволновым излучением осцилляций магнетосопротивления двумерного электронного газа в одномерной латеральной сверхрешетке

Памяти В. Ф. Гантмахера посвящается

А. А. Быков<sup>\*×1)</sup>, И. С. Стрыгин<sup>\*</sup>, Е. Е. Родякина<sup>\*×</sup>, В. Майер<sup>+2)</sup>, С. А. Виткалов<sup>+2)</sup>

<sup>\*</sup>Институт физики полупроводников им. Ржанова СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>×</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>+</sup>Physics Department, City College of the City University of New York, 10031 New York, USA

Поступила в редакцию 16 апреля 2015 г.

Изучено влияние микроволнового излучения на низкотемпературный магнетотранспорт двумерных электронов в одномерной латеральной сверхрешетке, изготовленной на основе селективно-легированной гетероструктуры GaAs/AlAs. Обнаружено, что под действием микроволнового излучения сопротивление двумерного электронного газа в исследуемой сверхрешетке изменяется в минимумах соизмеримых осцилляций более существенно, чем в максимумах. Полученные экспериментальные данные демонстрируют “интерференцию” классических соизмеримых осцилляций магнетосопротивления и квантовых осцилляций, индуцированных микроволновым излучением.

DOI: 10.7868/S0370274X15100100

В последние годы исследования электронного транспорта в высококачественных полупроводниковых структурах привели к открытию ряда новых видов магнитных осцилляций проводимости, возникающих в двумерных (2D) системах при больших факторах заполнения [1]. К ним относятся магнетофонные осцилляции [2, 3], осцилляции, индуцированные микроволновым излучением [4, 5], и осцилляции, индуцированные постоянным электрическим полем [6–8]. Вскоре после обнаружения этих осцилляций было установлено, что они интерферируют друг с другом [9, 10]. Аналогичная интерференция была обнаружена и между различными типами квантовых осцилляций в двухподзонных электронных системах [11–15].

Причина интерференции квантовых осцилляций проводимости заключается в совместном действии различных механизмов электронных переходов между уровнями Ландау [16–18]. С теоретической точки зрения также возможна интерференция между классическими и квантовыми магнитными осцилляциями [19–22]. Однако до сих пор такой тип интерференции экспериментально не обнаружен [23]. Целью настоящей работы является экспериментальное обнаруже-

ние интерференции между классическими соизмеримыми и индуцированными микроволновым излучением квантовыми осцилляциями магнетосопротивления 2D-электронного газа в одномерной латеральной сверхрешетке.

В работе изучалось микроволновое фотосопротивление 2D-электронного газа в одномерной латеральной сверхрешетке, изготовленной на основе гетероструктуры GaAs/AlAs. Исходная селективно-легированная гетероструктура представляла собой квантовую яму GaAs с боковыми сверхрешеточными барьерами AlAs/GaAs [24, 25]. Ширина квантовой ямы составляла 13 нм. Гетероструктура выращивалась методом молекулярно-лучевой эпитаксии на (100) GaAs подложке. Исследования проводились при температуре  $T = 4.2$  К в магнитных полях  $B < 1$  Тл на мостиках шириной  $W = 50$  мкм и длиной  $L = 100$  мкм. Холловские мостики изготавливались с использованием оптической фотолитографии и жидкостного травления. На вставке к рис. 1а приведена упрощенная геометрия образца, на один сегмент которого наносилась латеральная сверхрешетка. Концентрация 2D-электронов после кратковременной подсветки красным светодиодом, измененная на сегменте без латеральной сверхрешетки, составляла  $n_e \approx 8.2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ , а их подвижность  $\mu \approx 200 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

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

<sup>2)</sup>W. Mayer, S.A. Vitkalov

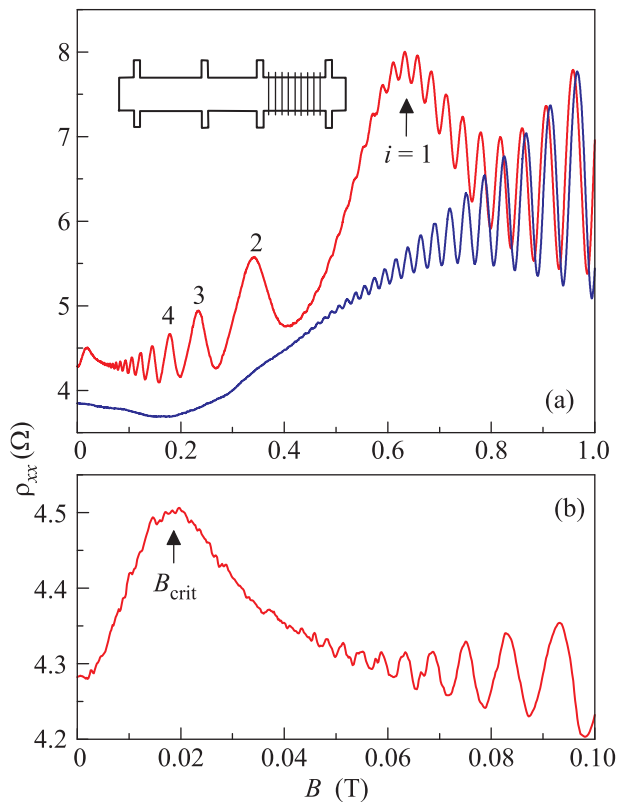


Рис. 1. (а) – Зависимости  $\rho_{xx}(B)$ , измеренные на мостике без решетки (тонкая линия) и на мостике с решеткой (толстая линия). Стрелкой указано положение основного соизмеримого максимума. На вставке – упрощенная геометрия образца, на один сегмент которого нанесена латеральная сверхрешетка. (б) – Зависимость  $\rho_{xx}(B)$ , измеренная на мостике с решеткой в области  $B < 0.1$  Тл. Стрелкой указано значение критического магнитного поля  $B_{\text{crit}}$ . Температура  $T = 4.2$  К

Одномерная латеральная сверхрешетка изготавливалась при помощи литографии остросфокусированным электронным пучком и метода “взрыва” двухслойной металлической пленки Au/Ti. Толщина слоя золота составляла 40 нм, а слоя титана – 5 нм. Решетка представляла собой набор металлических полосок длиной 60 мкм и шириной 180 нм. Период сверхрешетки  $a = 400$  нм. Концентрация 2D-электронов после кратковременной подсветки красным светодиодом, измеренная на сегменте образца с латеральной сверхрешеткой, составляла  $n_e \approx 8.1 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ , а их подвижность  $\mu \approx 180 \text{ м}^2/\text{Вс}$ . Длина свободного пробега электронов в сверхрешетке  $l_p \approx 27$  мкм. В исследуемой решетке период  $a$  был много меньше  $l_p$ , но много больше фермиевской длины волны электронов  $\lambda_F$ . Сопротивление 2D-электронного газа измерялось на переменном токе  $I_{ac} < 10^{-6}$  А. Микроволновое излучение на частоте

$\omega/2\pi = 1.5$  ГГц подавалось на образец при помощи коаксиального кабеля, а на частотах 75 и 142 ГГц – при помощи круглого волновода с внутренним диаметром 6 мм.

На рис. 1а представлены зависимости  $\rho_{xx}(B)$ , измеренные на различных частях образца после кратковременной подсветки. Сопротивление мостика без сверхрешетки в магнитных полях до 0.2 Тл слабо зависит от  $B$ , что указывает на классический характер электронного транспорта в этой области полей. В поле  $B > 0.2$  Тл в зависимости  $\rho_{xx}(B)$  наблюдается положительное магнетосопротивление, которое в исследуемых структурах является квантовым [26, 27]. Хорошо видно, что в изучаемой гетероструктуре осцилляции Шубникова–де Гааза возникают при температуре  $T = 4.2$  К в полях  $B > 0.4$  Тл. Для 2D-электронного газа в латеральной решетке наряду с осцилляциями Шубникова–де Гааза наблюдается еще одна серия осцилляций. Эти дополнительные осцилляции начинают проявляться в полях  $B > 0.05$  Тл. Подобное поведение  $\rho_{xx}(B)$  впервые наблюдалось в работе [28]. Оно было объяснено резонансом между орбитальным движением электронов в магнитном поле  $B$  и осциллирующим дрейфом, индуцированным статическим электрическим полем сверхрешетки [29].

Анализ показал, что возникающие в решетке дополнительные осцилляции, как и осцилляции Шубникова–де Гааза, периодичны по  $1/B$ . Положение максимумов этих осцилляций согласуется с соотношением [29]  $2R_c/a = i + 1/4$ , где  $R_c$  – циклотронный радиус, а  $i$  – целое положительное число. Такое согласие позволяет заключить, что в исследуемой решетке наблюдаются классические соизмеримые осцилляции магнетосопротивления. Для изготовления сверхрешеток использовалась структура, у которой  $n_e$  после кратковременной подсветки красным светодиодом при  $T = 4.2$  К увеличивалась с  $7.9 \cdot 10^{15}$  до  $8.2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ . Металлические полоски частично отражают свет. Поэтому под ними  $n_e$  после подсветки изменяется меньше, чем в открытых областях образца. Мы полагаем, что такая латеральная модуляция подсветки гетероструктуры и является основной причиной возникновения периодического потенциала в наших образцах. Положение максимума в зависимости  $\rho_{xx}(B)$  (рис. 1б), возникающего при  $B = B_{\text{crit}}$ , позволяет определить амплитуду периодического потенциала [30]:  $V_0 = a\nu_F B_{\text{crit}}/2\pi$ , где  $\nu_F$  – скорость Ферми. В исследуемой системе  $V_0 \approx 0.44$  мВ.

На рис. 2а приведены зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xx}^\omega(B)$  для 2D-электронного газа в исходной ге-

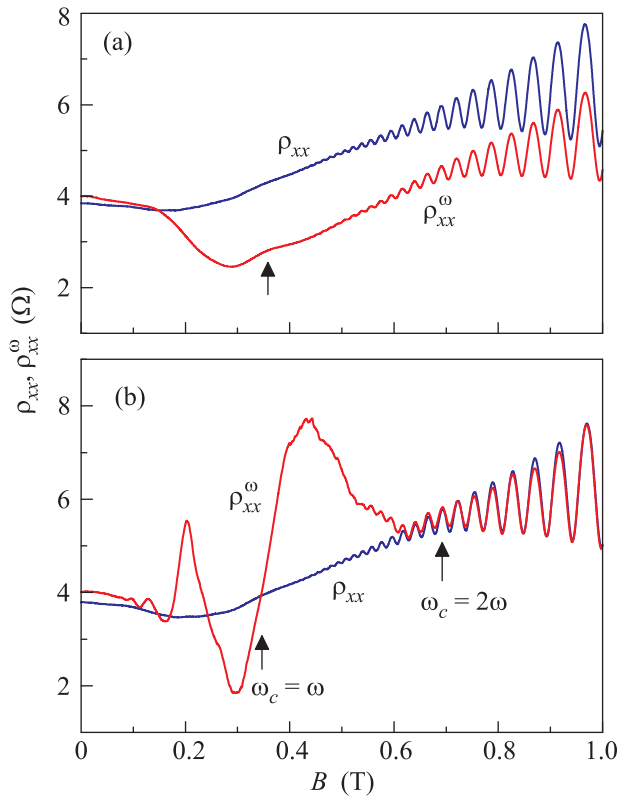


Рис. 2. Зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xx}^\omega(B)$ , измеренные при  $T = 4.2$  К для 2D-электронного газа в исходной гетероструктуре без облучения (тонкая линия) и с облучением (толстая линия). (a) –  $\omega/2\pi = 1.5$  ГГц. Стрелкой указано положение максимума, обусловленного резонансным рассеянием на объемных акустических фононах. (b) –  $\omega/2\pi = 142$  ГГц. Стрелками указаны значения магнитных полей, соответствующие условиям  $\omega_c = \omega$  и  $\omega_c = 2\omega$ .

тероструктуре без облучения и с облучением на частоте  $\omega/2\pi = 1.5$  ГГц. Кривая  $\rho_{xx}^\omega(B)$  в области  $B < 0.15$  Тл идет выше зависимости  $\rho_{xx}(B)$ , а затем пересекает ее. Слабо выраженный максимум, отмеченный на кривой  $\rho_{xx}^\omega(B)$  стрелкой, обусловлен резонансным рассеянием 2D-электронов на объемных акустических фононах [31–33]. Фотосопротивление  $\Delta\rho_{xx}^\omega(B) = \rho_{xx}^\omega(B) - \rho_{xx}(B)$  на частоте 1.5 ГГц в магнитных полях  $B < 0.15$  Тл имеет положительный знак, а в больших полях становится отрицательным. Уменьшение  $\rho_{xx}$  под действием излучения в полях  $B > 0.15$  Тл обусловлено, по нашему мнению, спектральной диффузией электронов, возникающей в 2D-системе в скрещенных электрическом и магнитном полях [34, 35]. К настоящему времени установлено, что влияние микроволнового излучения на транспорт 2D-электронов при больших факторах заполнения не может быть объяснено простым разогревом. Оказалось, что в

этом случае неравновесная функция распределения электронов по энергиям  $f(\varepsilon)$  имеет осциллирующую компоненту [34], период которой равен  $\hbar\omega_c$ , где  $\omega_c$  – циклотронная частота.

Микроволновое излучение малой мощности на частоте 1.5 ГГц в полях  $B > 0.15$  Тл, как и слабое постоянное электрическое поле [7, 35], может приводить лишь к электронным переходам внутри одного уровня Ландау [36]. Спектральная диффузия таких неравновесных электронов ведет к тому, что  $f(\varepsilon)$  в энергетических интервалах с повышенной плотностью состояний становится более пологой [37]. Указанная трансформация  $f(\varepsilon)$  и приводит к наблюдаемому в эксперименте отрицательному фотосопротивлению [34], так как в сильных магнитных полях  $\rho_{xx}^\omega \approx \rho_{xy}^2 \sigma_{xx}^\omega$ , где  $\sigma_{xx}^\omega = \int d\varepsilon \sigma_{xx}(\varepsilon) [-\partial f(\varepsilon)/\partial \varepsilon]$  – проводимость в присутствии излучения,  $\sigma_{xx}(\varepsilon)$  – вклад электронов с энергией  $\varepsilon$  в диссипативный транспорт, а  $\rho_{xy}$  – холловское сопротивление. Зависимость  $\rho_{xx}^\omega(B)$  для более высокой частоты излучения,  $\omega/2\pi = 142$  ГГц (рис. 2b), показывает, что фотопроводимость становится знакопеременной в области  $B$ , где  $\omega_c < 2\omega$ . Такое поведение также можно объяснить ролью неравновесной функции распределения в электронном транспорте [38], так как производная  $\partial f(\varepsilon)/\partial \varepsilon$  в области  $\omega > \omega_c/2$  становится знакопеременной.

На рис. 3а приведены зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xx}^\omega(B)$  для 2D-электронного газа в сверхрешетке. Видно, что  $\rho_{xx}$  образца при облучении с частотой  $\omega/2\pi = 1.5$  ГГц изменяется в минимумах соизмеримых осцилляций существеннее, чем в максимумах. Фотосопротивление на этой частоте вблизи нулевого магнитного поля имеет положительный знак, а в полях  $B > 0.1$  Тл становится отрицательным (рис. 3b). Положительное  $\Delta\rho_{xx}^\omega$  в этом случае можно объяснить разогревом 2D-электронного газа, т.е. уменьшением  $\sigma_{xx}$  с ростом температуры  $T_e$ . Увеличение амплитуды соизмеримых осцилляций под действием микроволнового излучения нельзя объяснить обычным ростом  $T_e$ , так как в этом случае амплитуда соизмеримых осцилляций сопротивления должна уменьшаться [23]. Наблюдаемое отрицательное фотосопротивление 2D-электронного газа в решетке, так же как и в обычной 2D-системе, можно качественно объяснить уменьшением наклона  $f(\varepsilon)$  в энергетических интервалах с повышенной плотностью энергетических состояний. В этом случае следует предположить, что вклад в формирование  $f(\varepsilon)$  в неравновесных условиях вносит не только модуляция плотности энергетических состояний, но и соизмеримый электронный транспорт.

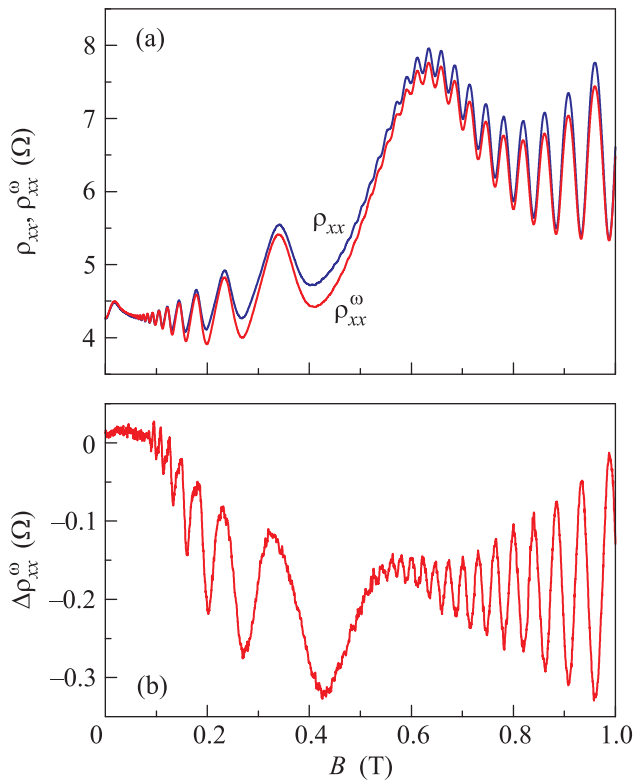


Рис. 3. (а) – Зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xx}^{\omega}(B)$ , измеренные на мостике с решеткой без облучения (тонкая линия) и с облучением (толстая линия). (б) – Зависимость от  $B$  микроволнового фотосопротивления 2D-электронного газа в латеральной сверхрешетке,  $\Delta\rho_{xx}^{\omega}(B) = \rho_{xx}^{\omega}(B) - \rho_{xx}(B)$ . Температура  $T = 4.2$  К. Частота микроволнового излучения  $\omega/2\pi = 1.5$  ГГц

Зависимости, приведенные на рис. 4, демонстрируют роль соизмеримого транспорта в знакопеременной фотопроводимости на частоте излучения  $\omega/2\pi = 142$  ГГц. Они подтверждают тот экспериментальный факт, что микроволновое излучение изменяет сопротивление 2D-электронного газа в сверхрешетке преимущественно в минимумах соизмеримых осцилляций. При этом в условиях циклотронного резонанса  $\Delta\rho_{xx}^{\omega}$  близко к нулю, как и в обычном 2D-электронном газе. Хорошо видно, что в областях положительного фотосопротивления  $\Delta\rho_{xx}^{\omega}(B)$  имеет острый всплеск в магнитных полях, соответствующих минимумам  $\rho_{xx}(B)$ . В областях отрицательного фотосопротивления наблюдается аналогичное поведение. Наиболее ярко обнаруженное поведение проявляется на частоте излучения  $\omega/2\pi = 75$  ГГц (рис. 5). В зависимости  $\Delta\rho_{xx}^{\omega}(B)$  в области  $\omega < \omega_c < 2\omega$  хорошо видны два максимума и два минимума, соответствующие минимумам и максимумам в зависимости  $\rho_{xx}(B)$ .

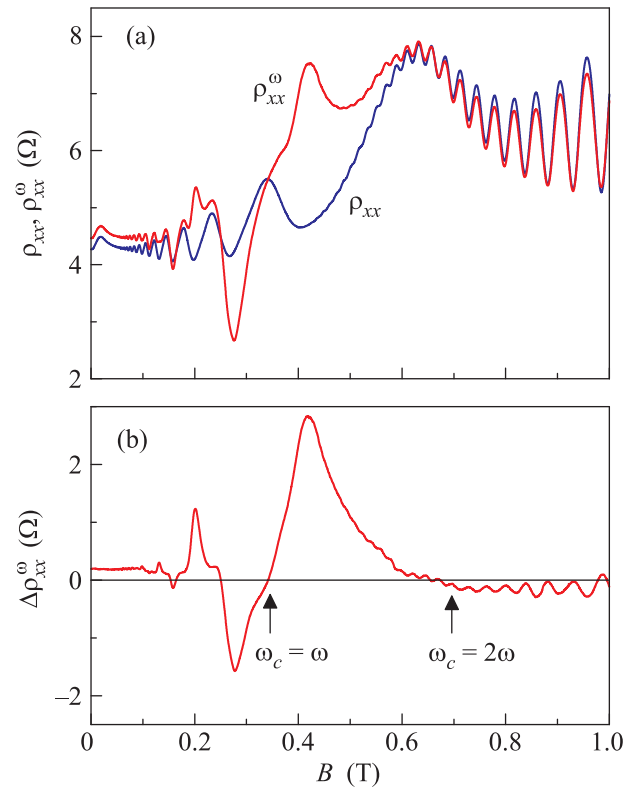


Рис. 4. (а) – Зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xx}^{\omega}(B)$ , измеренные на мостике с решеткой без облучения (тонкая линия) и с облучением (толстая линия). (б) – Зависимость от  $B$  микроволнового фотосопротивления 2D-электронного газа в латеральной сверхрешетке,  $\Delta\rho_{xx}^{\omega}(B) = \rho_{xx}^{\omega}(B) - \rho_{xx}(B)$ . Стрелками указаны значения магнитных полей, соответствующие условиям  $\omega_c = \omega$  и  $\omega_c = 2\omega$ . Температура  $T = 4.2$  К. Частота микроволнового излучения  $\omega/2\pi = 142$  ГГц

Обнаруженное поведение внешне похоже на интерференцию магнетомежподзонных осцилляций и осцилляций, индуцированных микроволновым излучением в двухподзонной системе [11, 13]. Однако при внешнем сходстве причина интерференции классических и квантовых осцилляций сопротивления 2D-электронного газа в сверхрешетке не может быть связана с совместным действием различных механизмов электронных переходов между уровнями Ландау [16–18]. Одной из возможных причин “интерференции” магнитных осцилляций микроволнового фотосопротивления в одномерной латеральной сверхрешетке может служить анизотропия электронного транспорта [39]. Последнее согласуется с ролью анизотропии подвижности в квантовом нелинейном магнетотранспорте 2D-электронов [40]. Другая возможная причина связана с ролью поверхностных акустических волн, возник-

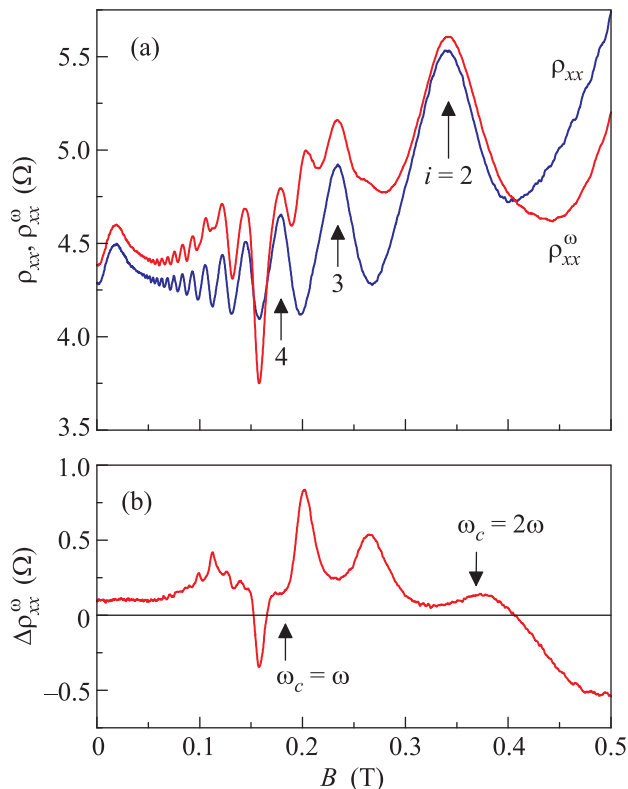


Рис. 5. (a) – Зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xx}^\omega(B)$ , измеренные на мостике с решеткой без облучения (тонкая линия) и с облучением (толстая линия). Стрелками указаны положения соизмеримых максимумов. (b) – Зависимость от  $B$  микроволнового фотосопротивления 2D-электронного газа в латеральной сверхрешетке,  $\Delta\rho_{xx}^\omega(B) = \rho_{xx}^\omega(B) - \rho_{xx}(B)$ . Стрелками указаны значения магнитных полей, соответствующие условиям  $\omega_c = \omega$  и  $\omega_c = 2\omega$ . Температура  $T = 4.2$  К. Частота микроволнового излучения  $\omega/2\pi = 75$  ГГц

кающих под действием микроволнового поля в 2D-системе [19, 20, 41].

Таким образом, в настоящей работе исследовано влияние микроволнового излучения из диапазона частот от 1.5 до 142 ГГц на низкотемпературный магнетотранспорт 2D-электронов в одномерной латеральной сверхрешетке, изготовленной на основе селективно-легированной гетероструктуры GaAs/AlAs. Установлено, что под действием микроволнового излучения сопротивление 2D-электронного газа в исследуемой сверхрешетке изменяется в минимумах соизмеримых осцилляций более существенно, чем в максимумах. Полученные экспериментальные данные показывают, что классические соизмеримые осцилляции магнетосопротивления и квантовые осцилляции, индуцированные мик-

роволновым излучением, в изучаемой системе не разделяются.

Работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП “Наноструктуры” при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, РФФИ (проект # 14-02-01158) и National Science Foundation (DMR 1104503).

1. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, and M. A. Zudov, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1709 (2012).
2. M. A. Zudov, I. V. Ponomarev, A. L. Efros, R. R. Du, J. A. Simmons, and J. L. Reno, *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3614 (2001).
3. А. А. Быков, А. К. Калагин, А. К. Бакаров, *Письма в ЖЭТФ* **81**, 646 (2005).
4. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons, and J. L. Reno, *Phys. Rev. B* **64**, 201311(R) (2001).
5. 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).
6. C. L. Yang, J. Zhang, R. R. Du, J. A. Simmons, and J. L. Reno, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 076801 (2002).
7. A. Bykov, J.-q. Zhang, S. Vitkalov, A. K. Kalagin, and A. K. Bakarov, *Phys. Rev. B* **72**, 245307 (2005).
8. А. А. Быков, D. V. Dmitriev, I. V. Marchishin, S. Byrnes, and S. A. Vitkalov, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 251602 (2012).
9. W. Zhang, M. A. Zudov, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 106804 (2007).
10. W. Zhang, M. A. Zudov, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 036805 (2008).
11. А. А. Быков, Д. Р. Исламов, А. В. Горан, А. И. Торпов, *Письма в ЖЭТФ* **87**, 563 (2008).
12. А. А. Быков, *Письма в ЖЭТФ* **88**, 450 (2008).
13. S. Wiedmann, G. M. Gusev, O. E. Raichev, T. E. Lamas, A. K. Bakarov, and J. C. Portal, *Phys. Rev. B* **78**, 121301(R) (2008).
14. А. А. Быков, А. В. Горан, and S. A. Vitkalov, *Phys. Rev. B* **81**, 155322 (2010).
15. А. А. Быков, Е. Г. Мозулев, А. К. Калагин, *Письма в ЖЭТФ* **92**, 420 (2010).
16. O. E. Raichev, *Phys. Rev. B* **81**, 165319 (2010).
17. O. E. Raichev, *Phys. Rev. B* **81**, 195301 (2010).
18. I. A. Dmitriev, R. Gellmann, and M. G. Vavilov, *Phys. Rev. B* **82**, 201311(R) (2010).
19. J. P. Robinson, M. P. Kennett, N. R. Cooper, and V. I. Fal'ko, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 036804 (2004).
20. M. P. Kennett, J. P. Robinson, N. R. Cooper, and V. I. Fal'ko, *Phys. Rev. B* **71**, 195420 (2005).
21. M. Torres and A. Kunold, *J. Phys.: Cond. Mat.* **18**, 4029 (2006).
22. J. Inarrea and G. Platero, *Europhys. Lett.* **109**, 67001 (2015).

23. Z. Q. Yuan, C. L. Yang, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. B* **74**, 075313 (2006).
24. K.-J. Friedland, R. Hey, H. Kostial, R. Klann, and K. Ploog, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4616 (1996).
25. Д. В. Дмитриев, И. С. Стрыгин, А. А. Быков, С. Дитрих, С. А. Виткалов, *Письма в ЖЭТФ* **95**, 467 (2012).
26. M. G. Vavilov and I. L. Aleiner, *Phys. Rev. B* **69**, 035303 (2004).
27. S. Dietrich, S. Vitkalov, D. V. Dmitriev, and A. A. Bykov, *Phys. Rev. B* **85**, 115312 (2012).
28. D. Weiss, K. v. Klitzing, K. Ploog, and G. Weimann, *Europhys. Lett.* **8**, 179 (1989).
29. C. W. J. Beenakker, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2020 (1989).
30. P. H. Beton, E. S. Alves, P. C. Main, L. Eaves, M. W. Dellow, M. Henini, O. H. Hughes, S. P. Beaumont, and C. D. W. Wilkinson, *Phys. Rev. B* **42**, 9229(R) (1990).
31. O. E. Raichev, *Phys. Rev. B* **80**, 075318 (2009).
32. А. А. Быков, А. В. Горан, *Письма в ЖЭТФ* **90**, 630 (2009).
33. A. T. Hatke, M. A. Zudov, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, *Phys. Rev. B* **84**, 121301(R) (2011).
34. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner, A. D. Mirlin, and D. G. Polyakov, *Phys. Rev. B* **71**, 115316 (2005).
35. J. Q. Zhang, S. Vitkalov, A. A. Bykov, A. K. Kalagin, and A. K. Bakarov, *Phys. Rev. B* **75**, 081305(R) (2007).
36. S. I. Dorozhkin, J. H. Smet, V. Umansky, and K. v. Klitzing, *Phys. Rev. B* **71**, 201306(R) (2005).
37. J. Q. Zhang, S. Vitkalov, and A. A. Bykov, *Phys. Rev. B* **80**, 045310 (2009).
38. S. I. Dorozhkin, *Письма в ЖЭТФ* **77**, 681 (2003).
39. J. Dietel, L. I. Glazman, F. W. J. Hekking, and F. v. Oppen, *Phys. Rev. B* **71**, 045329 (2005).
40. А. А. Быков, А. В. Горан, В. Майер, С. А. Виткалов, *Письма в ЖЭТФ* **98**, 811 (2013).
41. I. V. Kukushkin, J. H. Smet, V. I. Falko, K. von Klitzing, and K. Eberl, *Phys. Rev. B* **66**, 121306(R) (2002).