

Индucedированное микроволновым излучением магнетополовое состояние с нулевой проводимостью в GaAs/AlAs дисках Корбино и мостиках Холла

А. А. Быков¹⁾

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

Поступила в редакцию 4 марта 2008 г.

После переработки 8 апреля 20078 г.

Исследована микроволновая фотопроводимость двумерного электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктурах при температуре 4.2 К в магнитных полях до 1.5 Тл. Обнаружено, что в GaAs/AlAs дисках Корбино под действием микроволнового излучения на частоте 130.70 ГГц возникает магнетополовое состояние с нулевой проводимостью, ранее наблюдавшееся только в GaAs/AlGaAs дисках Корбино с существенно большей электронной подвижностью и меньшей концентрацией. Показано, что микроволновая фотопроводимость в области сильных магнитных полей, измеренная на дисках Корбино и вычисленная из результатов измерения на мостиках Холла, может существенно отличаться. Обнаруженное различие объясняется тем, что условия возникновения магнетоплазмонов, влияющих на величину и характер микроволновой фотопроводимости (фотосопротивления), в дисках Корбино и мостиках Холла неэквивалентны.

PACS: 73.23.-b, 73.40.Gk

При изучении магнетотранспорта носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах широко используются две измерительные конфигурации: мостик Холла и диск Корбино. Мостик Холла позволяет непосредственно измерять компоненты тензора сопротивления $\hat{\rho}$ и вычислять, используя известные соотношения $\sigma_{xx} = \rho_{xx}/(\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2)$ и $\sigma_{xy} = \rho_{xy}/(\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2)$, компоненты тензора проводимости $\hat{\sigma}$. Геометрия диска Корбино менее универсальна, она позволяет непосредственно измерять лишь диагональные элементы тензора проводимости σ_{rr} в изотропной проводящей системе. Как правило, в изотропных проводниках, размеры которых существенно больше длины свободного пробега электронов по импульсу, результаты измерения σ_{xx} в геометрии диска Корбино и в конфигурации холловского мостика эквивалентны. Такая эквивалентность была недавно продемонстрирована и для проводимости в неравновесных условиях, создаваемых микроволновым излучением в GaAs/AlGaAs гетероструктурах [1]. Было показано, что магнетополовое состояние с нулевой проводимостью, возникающее под действием микроволнового излучения в двумерных (2D) дисках Корбино, эквивалентно аналогичному состоянию, возникающему в 2D электронном газе в мостиках Холла.

Однако в общем случае, как будет показано ниже, при измерении микроволновой фотопроводимости в

2D системах с высокой электронной подвижностью эти измерительные конфигурации неэквивалентны. Обусловлено это тем, что микроволновая фотопроводимость в 2D электронных системах определяется несколькими механизмами [2–6], в том числе и механизмами, связанными с магнетоплазменными колебаниями [7]. Роль этих колебаний в возникновении магнетополовых состояний с нулевым сопротивлением и нулевой проводимостью остается до сих пор неустановленной. В неравновесных условиях, создаваемых микроволновым излучением, условия для возникновения магнетоплазменных колебаний в дисках Корбино и мостиках Холла существенно отличаются. Связано это с тем, что в дисках Корбино границы 2D электронного газа задаются проводящими областями омических контактов, а в мостиках Холла – диэлектрическими областями. Как показано в настоящей работе, это различие приводит к различиям в магнетополовых зависимостях микроволновой фотопроводимости в мостиках Холла и дисках Корбино. В частности, продемонстрировано существенное различие в поведении микроволновой фотопроводимости в области основного минимума магнетополовых осцилляций, расположенном вблизи циклотронного резонанса.

Исследуемые в работе гетероструктуры с модулированным легированием представляли собой одиночные GaAs квантовые ямы с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами. Ширина GaAs квантовой ямы

¹⁾e-mail: bykov@thermo.isp.nsc.ru

составляла 13 нм. Структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaAs подложках, отклонение у которых от плоскости (100) не превышало 0.02° . Концентрация и подвижность 2D электронов в изучаемых гетероструктурах вычислялись из результатов измерений на холловских мостиках, имеющих ширину 50 мкм, а расстояние между потенциометрическими выводами 250 мкм. Мостики изготавливались с использованием оптической фотолитографии и жидкостного травления. Они были ориентированы вдоль направлений $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$, вдоль которых электронная подвижность в GaAs/AlAs гетероструктурах имеет минимальное и максимальное значения, соответственно [8, 9]. Концентрация 2D электронов в изучаемых образцах составляла $n_e = 7.9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Подвижности μ_x и μ_y , соответствующие направлениям $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$, вычислялись из величин ρ_{xx} и ρ_{yy} в нулевом магнитном поле и величины n_e , определенной из холловского сопротивления. При температуре $T = 4.2 \text{ К}$ они составляли: $\mu_x = 1.2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $\mu_y = 2.1 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$.

Диски Корбино изготавливались методом вжигания индия. Исходные образцы имели форму квадрата размером $4 \times 4 \text{ мм}$ со сторонами, ориентированными вдоль направлений $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$. Внутренний диаметр 2D электронного диска составлял $\sim 0.5 \text{ мм}$, а внешний $\sim 3 \text{ мм}$. Схематический вид диска Корбино представлен на вставке к рис.1. Серые области соответствуют индиевым контактам к 2D электронному га-

зу, который изображен белым цветом. Проводимость и сопротивление измерялись на переменном токе I_{ac} частотой (0.3–1) кГц. Напряжение между контактами в дисках Корбино V_{ac} не превышало 1 мВ. Измерительный ток в мостиках Холла не превышал 1 мкА. Микроволновое излучение подавалось на образец по круглому волноводу с внутренним диаметром 6 мм. Образцы располагались в нескольких миллиметрах от открытого конца волновода. Максимальная выходная мощность излучения используемого генератора составляла $P_{out} \sim 4 \text{ мВт}$. При изучении влияния микроволнового поля на проводимость 2D электронного газа использовался режим непрерывной генерации излучения. Исследования проводились при температуре $T = 4.2 \text{ К}$ в магнитных полях B до 1.5 Тл.

На рис.1 приведены экспериментальные магнетополовые зависимости проводимости 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктурах, измеренные на диске Корбино. Хорошо видно, что под действием микроволнового излучения в проводимости диска Корбино появляется осциллирующая составляющая, а в области основного минимума этих осцилляций, расположенного между максимумами, обозначенными номерами 1 и 2, возникает магнетополовое состояние с близкой к нулю проводимостью. Подобное состояние в 2D системе наблюдалось ранее лишь в GaAs/AlGaAs дисках Корбино с электронной подвижностью более чем $12 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$ и концентрацией порядка $3.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ [1]. Рис.1 показывает, что существенно меньшая подвижность не является препятствием для формирования индуцированных микроволновым излучением состояний с нулевой проводимостью. Аналогичный экспериментальный результат в GaAs/AlAs гетероструктурах был ранее получен для состояния с нулевым сопротивлением [10], откуда, применив формулы, связывающие $\hat{\rho}$ и $\hat{\sigma}$, должно следовать и зануление проводимости. Однако в данной работе мы получили это зануление экспериментально, что невозможно сделать в измерительной конфигурации мостика Холла или методом ван дер Пау. Кроме того, обоснованность прямого измерения проводимости 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктурах обусловлена тем, что результаты измерений на дисках Корбино и мостиках Холла в микроволновом поле, как будет показано ниже, могут существенно отличаться.

На рис.2 представлены зависимости сопротивления 2D электронного газа, измеренные на холловских мостиках, ориентированных вдоль направлений $[110]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$. Видно, что микроволновое излучение приводит к появлению гигантских осцилляций магнетосопротивления, а также состояний с близким к нулю со-

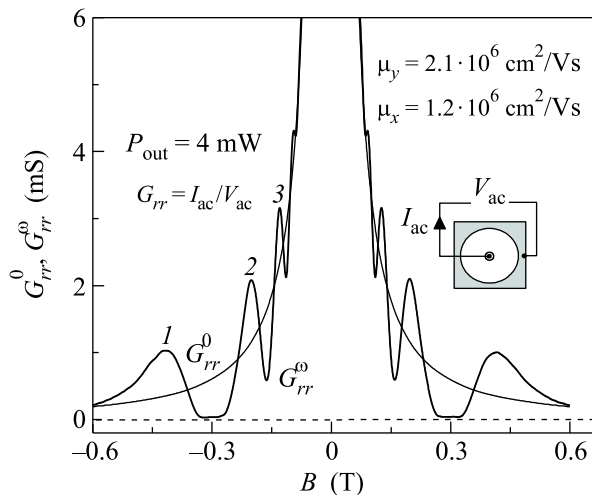


Рис.1. Зависимости $G^0_{rr}(B)$ и $G^{\omega}_{rr}(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при $T = 4.2 \text{ К}$, измеренные на диске Корбино без облучения (тонкая линия) и с облучением (толстая линия) на частоте 130.70 ГГц. На вставке изображена схема измерения проводимости в геометрии Корбино. Цифрами обозначены максимумы микроволновой фотопроводимости, начиная с основного. $n_e = 7.9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

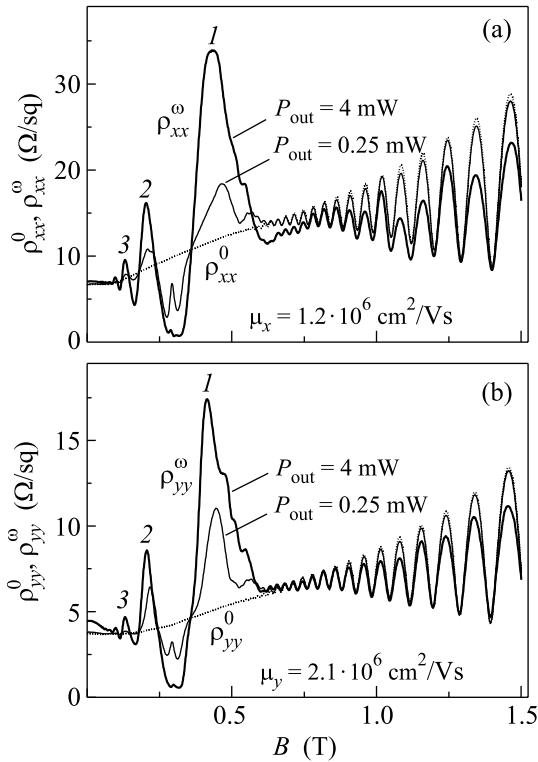


Рис. 2. (а) Зависимости $\rho_{xx}^0(B)$ и $\rho_{xx}^\omega(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при $T = 4.2$ К, измеренные на мостике Холла без облучения (пунктирная линия) и с облучением для различных мощностей (толстая и тонкая линии) на частоте 130.70 ГГц. (б) Зависимости $\rho_{yy}^0(B)$ и $\rho_{yy}^\omega(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при $T = 4.2$ К, измеренные на мостике Холла без облучения (пунктирная линия) и с облучением для различных мощностей (толстая и тонкая линии) на частоте 130.70 ГГц. Цифрами обозначены максимумы микроволнового фотосопротивления, начиная с основного. $n_e = 7.9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

противлением [10–12]. Уменьшение микроволновой мощности, с одной стороны, приводит к уменьшению амплитуды магнетополевых осцилляций, а с другой – к появлению пика сопротивления в области основного минимума этих осцилляций. Появление этого пика мы связываем с проявлением магнетоплазменных колебаний в холловских мостиках. Такой вывод согласуется с поведением микроволнового фотосопротивления в области магнитных полей, где возникают осцилляции Шубникова – де Гааза [13]. Влияние микроволнового излучения на амплитуду осцилляций Шубникова – де Гааза наиболее ярко проявляется в мостике с меньшей проводимостью, в котором также более отчетливо проявляется пик в области основного минимума. На рис. 3 представлено поведение сопротивления и проводимости в области основного минимума при различных мощностях микроволнового излучения.

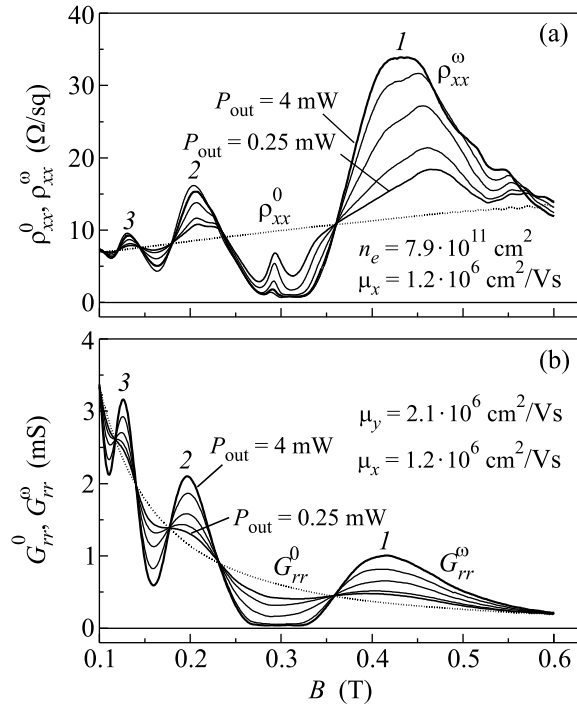


Рис. 3. (а) Зависимости $\rho_{xx}^0(B)$ и $\rho_{xx}^\omega(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при $T = 4.2$ К, измеренные на мостике Холла без облучения (пунктирная линия) и с облучением для различных мощностей (толстая и тонкая линии) на частоте 130.70 ГГц. (б) Зависимости $G_{rr}^0(B)$ и $G_{rr}^\omega(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при $T = 4.2$ К, измеренные на диске Корбино без облучения (пунктирная линия) и с облучением для различных мощностей (толстая и тонкая линии) на частоте 130.70 ГГц. Цифрами обозначены максимумы микроволнового фотосопротивления и микроволновой фотопроводимости, начиная с основного. $n_e = 7.9 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$

На рис. 4 приведены магнетополевые зависимости проводимости, вычисленные из результатов измерений на холловских мостиках. Видно, что и в этом случае проявляется индуцированное микроволновым излучением состояние с близкой к нулю проводимостью. Следует отметить, что это состояние возникает в холловских мостиках как с большей, так и с меньшей подвижностью. Однако при уменьшении мощности микроволнового излучения в области основного минимума магнетополевых осцилляций проводимости появляется пик, который отсутствует в зависимостях, измеренных на дисках Корбино. Такое поведение показывает, что результаты измерений на дисках Корбино и мостиках Холла не являются эквивалентными, что отличается от результатов, полученных в работе [1]. Обнаруженное различие результатов измерений на дисках Корбино и холловских мостиках, по всей видимости, обусловлено тем,

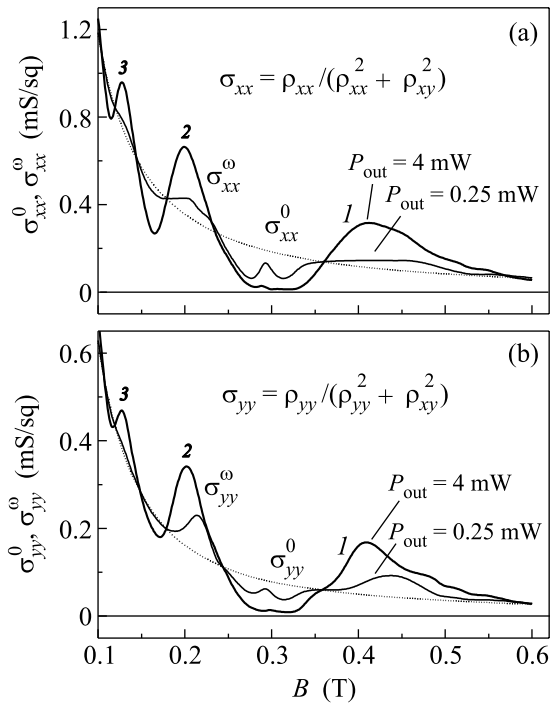


Рис.4. (а) Зависимости $\sigma_{xx}^0(B)$ и $\sigma_{xx}^\omega(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при $T = 4.2$ К, вычисленные из результатов измерений на мостике Холла без облучения (пунктирная линия) и с облучением для различных мощностей (толстая и тонкие линии) на частоте 130.70 ГГц. (б) Зависимости $\sigma_{yy}^0(B)$ и $\sigma_{yy}^\omega(B)$ 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при $T = 4.2$ К, вычисленные из результатов измерений на мостике Холла без облучения (пунктирная линия) и с облучением для различных мощностей (толстая и тонкая линии) на частоте 130.70 ГГц. Цифрами обозначены максимумы микроволновой фотопроводимости, начиная с основного

что условия возникновения магнетоплазменных колебаний в них различны. То есть в мостиках Холла эти колебания возникают и поэтому проявляются в фотопроводимости и фотосопротивлении, а в дисках Корбино нет.

Как отмечалось выше, индуцированные микроволновым излучением осцилляции магнетосопротивления и состояния с нулевым сопротивлением проявляются ярче в GaAs/AlAs мостиках, ориентированных в направлении с меньшей подвижностью. Аналогичный результат был ранее получен методом ван дер Пау на квадратных образцах [9]. Это кажущееся противоречие снимается при переходе от зависимостей $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{yy}(B)$ к зависимостям $\sigma_{xx}(B)$ и $\sigma_{yy}(B)$, так как в магнитных полях, где наблюдаются зануления, $\sigma_{xx} > \sigma_{yy}$. Таким образом, несмотря на то, что в нулевом магнитном поле проводимость 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетерострукту-

рах $\sigma_{yy} > \sigma_{xx}$, в сильных магнитных полях это неравенство изменяется на противоположное. То есть параметром, определяющим амплитуду магнетополовых осцилляций микроволновой фотопроводимости, является не величина проводимости 2D электронной системы в нулевом магнитном поле, а ее величина в области сильных магнитных полей.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально изучено влияние микроволнового излучения на проводимость 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктурах. Показано, что под действием микроволнового излучения в 2D дисках Корбино и мостиках Холла, изготовленных на основе GaAs/AlAs гетероструктур, в области сильных магнитных полей возникает состояние с нулевой проводимостью. Установлено, что магнетополовые зависимости микроволновой фотопроводимости, измеренные на дисках Корбино и мостиках Холла, не являются эквивалентными. Обнаруженное различие экспериментальных зависимостей объясняется тем, что в фотопроводимости мостиков Холла, в отличие от дисков Корбино, проявляются магнетоплазменные колебания.

Автор благодарит А.В. Горана за конструктивные замечания к статье. Работа была поддержана Российского фонда фундаментальных исследований, проект # 08-02-01051.

1. C. L. Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuttila et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 096803 (2003).
2. В. И. Рыжий, ФТТ **11**, 2577 (1969).
3. С. И. Дорожкин, Письма в ЖЭТФ **77**, 681 (2003).
4. X. L. Lei and S. Y. Liu, Phys. Rev. Lett. **91**, 226805 (2003).
5. I. A. Dmitriev, M. D. Vavilov, I. L. Aleiner et al., Phys. Rev. B **71**, 115316 (2005).
6. J. Inarrea and G. Platero, Phys. Rev. Lett. **94**, 016806 (2005).
7. В. А. Волков, Э. Е. Тахтамиров, ЖЭТФ **131**, 681 (2007).
8. А. А. Быков, А. К. Бакаров, А. В. Горан и др., Письма в ЖЭТФ **74**, 182 (2001).
9. А. А. Быков, Д. Р. Исламов, А. В. Горан и др., Письма в ЖЭТФ **86**, 891 (2007).
10. А. А. Быков, А. К. Бакаров, Д. Р. Исламов и др., Письма в ЖЭТФ **84**, 466 (2006).
11. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons et al., Phys. Rev. B **64**, 201311(R) (2001).
12. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing et al., Nature **420**, 646 (2002).
13. С. И. Дорожкин, А. А. Быков, И. В. Печенежский и др., Письма в ЖЭТФ **85**, 705 (2007).