

# Индукцированные микроволновым излучением магнетополевые осцилляции ЭДС в двумерном электронном диске Корбино при больших факторах заполнения

А. А. Быков<sup>1)</sup>

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

Поступила в редакцию 6 февраля 2008 г.

В двумерных электронных дисках Корбино, изготовленных на основе GaAs/AlAs гетероструктур, обнаружены магнетополевые осцилляции ЭДС, возникающие под действием микроволнового излучения в области больших факторов заполнения. Показано, что обнаруженные осцилляции ЭДС периодичны в обратном магнитном поле и идут в противофазе осцилляциям микроволновой фотопроводимости. Полученные экспериментальные данные объясняются неоднородным распределением микроволнового поля между коаксиальными металлическими контактами к двумерной электронной системе.

PACS: 73.23.-b, 73.40.Gk

Многолетние экспериментальные исследования неравновесных явлений, возникающих в полупроводниковых структурах пониженной размерности в микроволновом поле, показали, что в таких мезоскопических системах под действием излучения изменяется не только проводимость [1–3], но, как правило, возникает еще и ЭДС [4–6]. К наиболее ярким явлениям, открытым в этой области в последние годы, относятся индуцированные микроволновым излучением гигантские осцилляции магнетосопротивления и состояния с нулевым сопротивлением в GaAs/AlGaAs гетероструктурах [7, 8]. Однако в ряде работ было установлено, что под действием микроволнового излучения в двумерных (2D) системах с высокой электронной подвижностью наряду с магнетополевыми осцилляциями сопротивления возникают и осцилляции ЭДС [9–12]. До сих пор причины возникновения осцилляций микроволновой ЭДС в таких системах при больших факторах заполнения остаются дискуссионными. В частности, не установлена роль геометрии 2D электронной системы и металлических контактов к ней в генерации фото-ЭДС. В настоящей работе представлены результаты исследования фото-ЭДС, возникающей под действием микроволнового поля в 2D электронной системе, выполненной в геометрии диска Корбино.

Фото-ЭДС в электронных системах возникает на этапе движения неравновесных носителей заряда от момента их фотовозбуждения до рассеяния. В общем случае причинами появления ЭДС могут быть асим-

метрия фотовозбуждения носителей заряда, асимметрия их рассеяния и неоднородность электромагнитного поля. Наиболее вероятной причиной, приводящей к появлению ЭДС в диске Корбино, представляется неоднородность распределения микроволнового поля в нем. Неоднородность микроволнового поля в этом случае обусловлена геометрией металлических контактов к 2D электронной системе, так как расстояние между контактами сравнимо с длиной волны излучения. Различие диаметров внутреннего и внешнего металлических электродов приводит к тому, что напряженность микроволнового поля между ними изменяется по радиусу и имеет максимальную величину на границе между внутренним электродом и 2D электронным газом. Такая неоднородность засветки должна приводить к ЭДС Дембера или вентильной ЭДС и является одной из физических причин возникновения ЭДС в 2D диске Корбино под действием микроволнового излучения.

Исследуемые в работе гетероструктуры с модулированным легированием представляли собой одиночные GaAs квантовые ямы с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами. Ширина GaAs квантовой ямы 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 методом ван-дер-Пау на образцах квадратной формы размером 4 × 4 мм с омическими контактами, расположенными в углах квадрата [13]. Контакты к 2D электронному газу изготавливались вжиганием индия. Стороны квад-

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

рата были ориентированы вдоль направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ , вдоль которых электронная подвижность в GaAs/AlAs гетероструктурах имеет минимальное и максимальное значения, соответственно, [14]. Концентрация 2D электронов в изучаемых образцах составляла  $n_e = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Подвижности  $\mu_x$  и  $\mu_y$ , соответствующие направлениям  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ , вычислялись из величин  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{yy}$  в нулевом магнитном поле и величины  $n_e$ , определенной из холловского сопротивления. При температуре  $T = 4.2 \text{ К}$  они составляли:  $\mu_x = 1.1 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ,  $\mu_y = 1.7 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$ .

Диски Корбино изготавливались методом вжигания индия. Так же как и для измерений методом ван-дер-Пау, исходные образцы имели форму квадрата размером  $4 \times 4 \text{ мм}$  со сторонами, ориентированными вдоль направлений  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ . 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.1а. Серые области соответствуют индиевым контактам к 2D электронному газу, который изображен белым цветом. Проводимость диска Корбино,  $G_{rr} = I_{ac}/V_{ac}$ , измерялась на переменном токе  $I_{ac}$  частотой  $(0.3\text{--}1) \text{ кГц}$ . Напряжение между контактами  $V_{ac}$  не превышало  $1 \text{ мВ}$ . Микроволновое излучение подавалось на образец по круглому волноводу с внутренним диаметром  $6 \text{ мм}$ , на конце которого находился линейный поляризатор. Он представлял собой плоскую периодическую решетку проводящих полосок. Образец размещался в  $2\text{--}3 \text{ мм}$  от поляризатора. Выходная мощность излучения используемого генератора составляла  $P_{out} \sim 2 \text{ мВт}$ . При изучении влияния микроволнового поля на проводимость 2D электронного газа использовался режим непрерывной генерации излучения, а при регистрации ЭДС – режим амплитудной модуляции. Сигнал ЭДС  $V_{ph}$  измерялся между внутренними и внешними контактами диска Корбино (в соответствии со схемой, изображенной на вставке к рис.1б) на частоте амплитудной модуляции микроволновой мощности, которая составляла  $(0.3\text{--}1) \text{ кГц}$ . Исследования проводились при температуре  $4.2 \text{ К}$  в магнитных полях  $B$  до  $0.5 \text{ Тл}$ .

На рис.1а приведены типичные магнетопольные зависимости проводимости 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктурах, измеренные на диске Корбино. Видно, что под действием микроволнового излучения в проводимости появляется осциллирующая составляющая. Проводимость 2D электронного газа при облучении его микроволновым полем частотой  $\omega/2\pi$  может быть выражена как  $G^\omega = G^0 + \Delta G^\omega$ , где  $G^0$  – проводимость в отсутствии облучения, а  $\Delta G^\omega$  – добавка к проводимости, обусловленная облу-

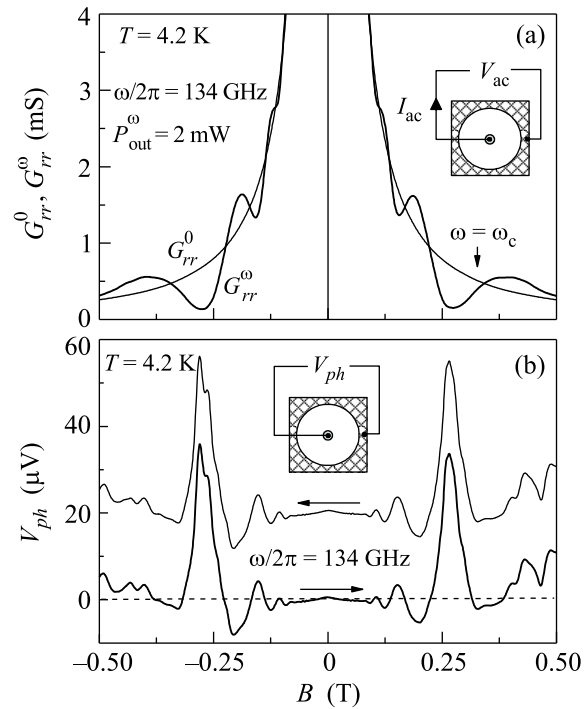


Рис.1. (а) Зависимости  $G_{rr}^0(B)$  и  $G_{rr}^\omega(B)$  2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при  $T = 4.2 \text{ К}$ , измеренные на диске Корбино без облучения (тонкая линия) и с облучением (толстая линия) на частоте  $134 \text{ ГГц}$ . Стрелкой указано положение циклотронного резонанса. На вставке изображена схема измерения проводимости в геометрии Корбино. (б) Зависимости  $V_{ph}(B)$ , измеренные при различных направлениях развертки магнитного поля. Кривая, изображенная тонкой линией, смещена для наглядности вверх по оси  $y$  на  $20 \text{ мкВ}$ . Стрелками указано направление развертки магнитного поля. На вставке изображена схема измерения ЭДС в геометрии Корбино

чением образца, которая и приводит к осцилляциям в зависимости  $G^\omega(B)$ . Анализ показал, что индуцированные микроволновым излучением осцилляции магнетопроводимости  $G^\omega$ , представленные на рис.1а, периодичны в обратном магнитном поле. Подобные осцилляции микроволновой фотопроводимости наблюдались ранее лишь в GaAs/AlGaAs гетероструктурах с существенно большей электронной подвижностью и меньшей концентрацией [15]. Эти осцилляции обусловлены тем, что  $\Delta G^\omega$  является осциллирующей знакопеременной функцией отношения  $j = \omega/\omega_c$  [16–22], где  $\omega_c$  – циклотронная частота в магнитном поле  $B$ .

На рис.1б представлены типичные магнетопольные зависимости ЭДС,  $V_{ph}(B)$ , измеренные на том же диске Корбино. Видно, что в зависимости  $V_{ph}(B)$ , так же как и в зависимости  $G_{rr}^\omega(B)$ , проявляется ос-

циллирующая компонента. Анализ показал, что индуцированные микроволновым излучением осцилляции ЭДС, представленные на рис.1b, периодичны в обратном магнитном поле и идут в противофазе осцилляциям фотопроводимости. Микроволновая ЭДС, осциллирующая в области больших факторов заполнения, наблюдалась ранее в GaAs/AlGaAs гетероструктурах на прямоугольных образцах с несколькими омическими контактами, расположенными по периметру образца, и одним контактом в его центре [10]. ЭДС возникала под действием микроволнового поля лишь между центральным контактом и контактами, расположенными по периметру образца. Авторы работы [10] объяснили возникновение микроволновой ЭДС токовой нестабильностью за счет локального отрицательного сопротивления. В этой работе было также обнаружено, что величина и знак ЭДС в области  $\omega/\omega_c \sim 1$ , где диссипативное сопротивление имеет значение, близкое к нулю, зависит от направления развертки магнитного поля. Рис.1b демонстрирует, что ЭДС, наблюдаемая в диске Корбино на основе GaAs/AlAs гетероструктур, не зависит от направления развертки магнитного поля. На рис.2 представлено поведение фотопроводимости и фото-ЭДС в магнитных полях от  $-0.1$  до  $+0.1$  Тл.

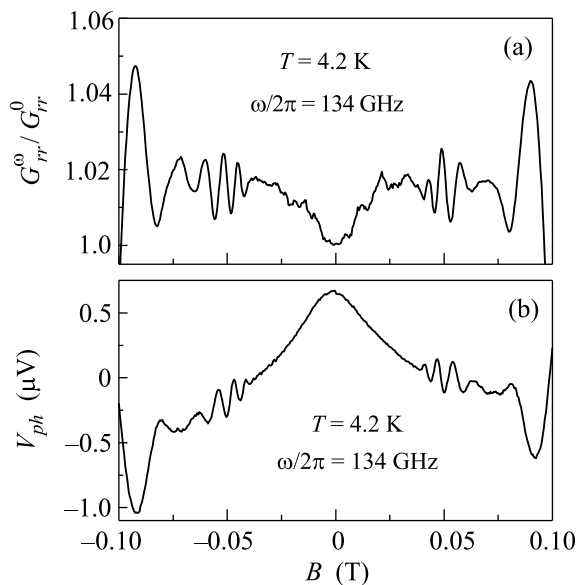


Рис.2. (а) Зависимости  $G_{rr}^{\omega}(B)/G_{rr}^0(B)$  2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре, измеренные на диске Корбино при  $T = 4.2$  К с облучением на частоте 134 ГГц в области слабых магнитных полей. (б) Зависимости  $V_{ph}(B)$ , измеренные в области слабых магнитных полей при  $T = 4.2$  К для частоты облучения 134 ГГц в GaAs/AlAs гетероструктуре, выполненной в геометрии диска Корбино.

Этот рисунок демонстрирует, что, как и для фотосопротивления в GaAs/AlGaAs гетероструктурах [23, 24], в зависимостях  $G_{rr}^{\omega}(B)$  и  $V_{ph}(B)$ , измеренных на GaAs/AlAs – дисках Корбино, наблюдаются биеения магнетопольных осцилляций фотопроводимости и фото-ЭДС.

Одной из причин возникновения осциллирующей в зависимости от  $1/B$  микроволновой ЭДС в 2D электронных системах в области больших факторов заполнения является асимметрия латерального модулирующего потенциала, которая приводит к так называемым фотогальваническим осцилляциям Вейса (Weiss-type oscillations) [25]. Анизотропия электронной подвижности в исследуемых полупроводниковых структурах указывает на присутствие в них анизотропного латерального рассеивающего потенциала [26]. Этот квазиодномерный рассеивающий потенциал может быть пространственно асимметричным и приводить к фотогальваническому эффекту и, соответственно, к фотогальваническим осцилляциям Вейса. Величина ЭДС в этом случае должна зависеть от взаимной ориентации вектора линейной поляризации излучения и кристаллографических осей в плоскости (100). Рис.3 демонстрирует, что такой зависимости нет как для микроволновой фотопроводимости, так и для ЭДС. Этот факт позволяет исключить роль пространственной асимметрии рассеивающего потенциала в возникновении ЭДС в исследуемых дисках Корбино.

На рис.4а и б представлены зависимости микроволновой фотопроводимости и ЭДС от величины обратного магнитного поля. Хорошо видно, что осцилляции фотопроводимости и ЭДС периодичны в обратном магнитном поле. Кроме того, для осцилляций ЭДС, так же как и для фотопроводимости, наблюдается сбой в области между осцилляциями, обозначенными номерами 4 и 6 [27]. Рис.4с показывает, что положения максимумов осцилляций ЭДС сдвинуты в обратном магнитном поле на полпериода относительно положения максимумов микроволновой проводимости. Такое поведение фото-ЭДС позволяет заключить, что ее осциллирующее поведение обусловлено изменением проводимости под действием микроволнового излучения. В рамках представлений о вентильной ЭДС в областях, где проводимость меньше, эффект выпрямления на контакте к 2D электронной системе должен быть больше. Так как, с одной стороны, площади внутреннего и внешнего контактов в диске Корбино существенно различаются, а с другой напряженность микроволнового поля выше у внутреннего контакта, то вентильные ЭДС, возникающие на этих контактах, не компенсируют друг

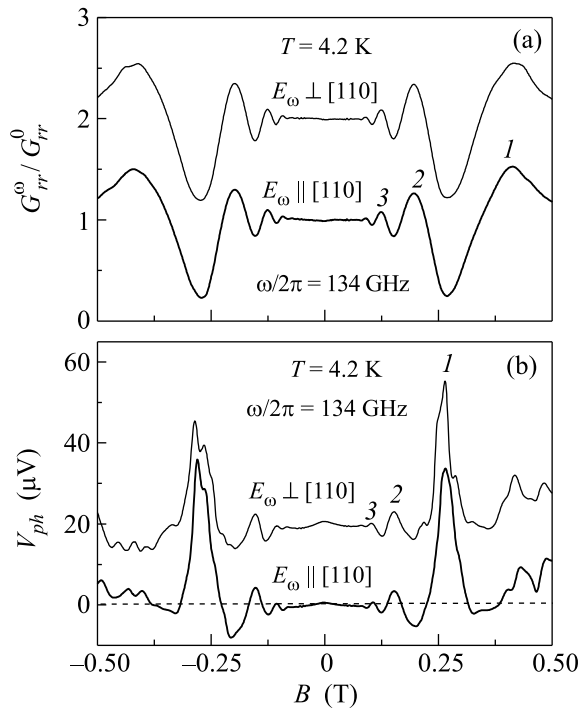


Рис.3. (а) Зависимости  $G_{rr}^{\omega}(B)/G_{rr}^0(B)$  2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при  $T = 4.2$  К, измеренные на диске Корбино для двух ориентаций вектора линейной поляризации микроволнового излучения  $E_{\omega}$  относительно кристаллографических осей в плоскости (100). Кривая, изображенная тонкой линией, смещена для наглядности вверх по оси  $y$  на одну единицу. Цифрами обозначены максимумы микроволновой фотопроводимости, начиная с основного. (б) Зависимости  $V_{ph}(B)$ , измеренные с металлических контактов к диску Корбино при  $T = 4.2$  К для двух ориентаций вектора линейной поляризации микроволнового излучения  $E_{\omega}$ . Кривая, изображенная тонкой линией, смещена для наглядности вверх по оси  $y$  на 20 мкВ. Цифрами обозначены максимумы микроволновой фото-ЭДС, начиная с основного.

друга. Разница вентиляльных ЭДС, возникающих на внутреннем и внешнем контактах в диске Корбино, регистрируется на частоте амплитудной модуляции микроволновой мощности.

Таким образом, в настоящей работе экспериментально изучен фотоотклик на микроволновое облучение в 2D дисках Корбино, изготовленных на основе 2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктурах. Показано, что под действием микроволнового излучения в изучаемых 2D дисках Корбино при больших факторах заполнения возникают как осцилляции фотопроводимости, так и ЭДС. Установлено, что эти осцилляции периодичны в обратном магнитном поле и идут в противофазе друг к другу. Фотогальвани-

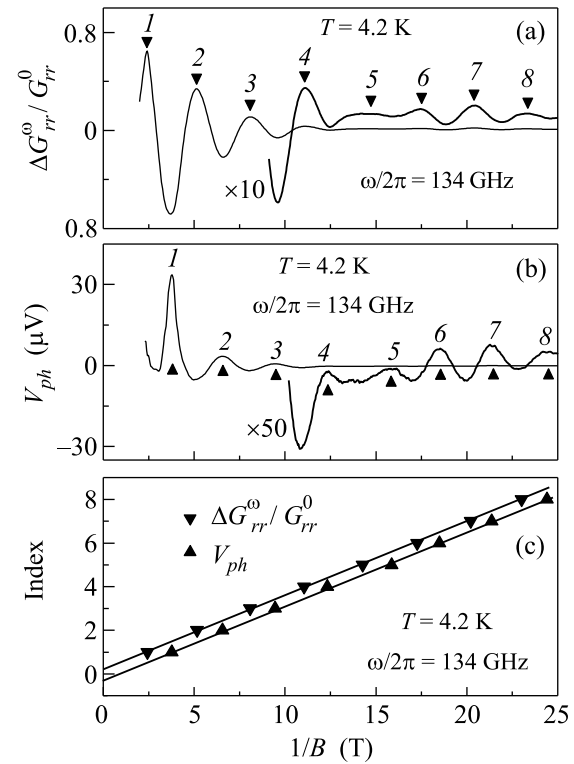


Рис.4. (а) Зависимости  $\Delta G_{rr}^{\omega}(1/B)/G_{rr}^0(1/B)$  2D электронного газа в GaAs/AlAs гетероструктуре при  $T = 4.2$  К, измеренные на диске Корбино с облучением на частоте микроволнового поля 134 ГГц. Цифрами обозначены максимумы микроволновой фотопроводимости, начиная с основного. (б) Зависимости  $V_{ph}(1/B)$ , измеренные с металлических контактов к диску Корбино при  $T = 4.2$  К для частоты микроволнового облучения 134 ГГц. Цифрами обозначены максимумы микроволновой фото-ЭДС, начиная с основного. (в) Зависимости положения номеров максимумов микроволновой фотопроводимости и ЭДС от величины обратного магнитного поля для частоты микроволнового излучения 134 ГГц

ческий эффект, обнаруженный в 2D дисках Корбино, может быть использован для построения на его основе приемников микроволнового и субмиллиметрового излучений. Полученные экспериментальные данные могут быть качественно объяснены неоднородным распределением микроволнового поля между коаксиальными металлическими электродами к 2D диску Корбино и вентиляльным эффектом на переходах между 2D электронным газом и индиевыми контактами к нему. Однако для строгой и однозначной интерпретации полученных экспериментальных данных требуется построение теории фотогальванического эффекта в 2D дисках Корбино при больших факторах заполнения.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проекты # 08-02-01051 и # 06-02-16869.

1. С. А. Виткалов, Г. М. Гусев, З. Д. Квон и др., *ЖЭТФ* **94**, 376 (1988).
2. А. А. Быков, Г. М. Гусев, З. Д. Квон, *ЖЭТФ* **97**, 1317 (1990).
3. А. А. Быков, Г. М. Гусев, З. Д. Квон и др., *Письма в ЖЭТФ* **53**, 407 (1991).
4. А. А. Быков, Г. М. Гусев, З. Д. Квон и др., *Письма в ЖЭТФ* **49**, 13 (1989).
5. А. А. Быков, З. Д. Квон, Л. В. Литвин и др., *Письма в ЖЭТФ* **58**, 538 (1993).
6. А. А. Быков, А. К. Бакаров, Л. В. Литвин и др., *Письма в ЖЭТФ* **72**, 300 (2000).
7. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons et al., *Phys. Rev. B* **64**, 201311(R) (2001).
8. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing et al., *Nature* **420**, 646 (2002).
9. I. V. Kukushkin, M. Yu. Akimov, J. H. Smet et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 235803 (2004).
10. R. L. Willett, L. N. Pfeiffer, and R. W. West, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 026804 (2004).
11. K. Stone, C. L. Yang, Z. Q. Yuan et al., *Phys. Rev. B* **76**, 153306 (2007).
12. А. А. Быков, Д. Р. Исламов, Д. В. Номоконов и др., *Письма в ЖЭТФ* **86**, 695 (2007).
13. А. А. Быков, Д. Р. Исламов, А. В. Горан и др., *Письма в ЖЭТФ* **86**, 891 (2007).
14. А. А. Быков, А. К. Бакаров, А. В. Горан и др., *Письма в ЖЭТФ* **74**, 182 (2001).
15. C. L. Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuttila et al., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 096803 (2003).
16. В. И. Рыжий, *ФТТ* **11**, 2577 (1969).
17. С. И. Дорожкин, *Письма в ЖЭТФ* **77**, 681 (2003).
18. X. L. Lei and S. Y. Liu, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 226805 (2003).
19. I. A. Dmitriev, M. D. Vavilov, I. L. Aleiner et al., *Phys. Rev. B* **71**, 115316 (2005).
20. J. Inarrea and G. Platero, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 016806 (2005).
21. В. А. Волков, Э. Е. Тахтамиров, *ЖЭТФ* **131**, 681 (2007).
22. A. D. Chepelianskii, A. S. Pikovsky, and D. L. Shepelyansky, *Eur. Phys. J. B* **60**, 225 (2007).
23. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 046807 (2003).
24. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing et al., *Phys. Rev. B* **69**, 193304 (2004).
25. L. I. Magarill, *Physica E* **9**, 652 (2001).
26. А. К. Бакаров, А. А. Быков, Н. Д. Аксёнова и др., *Письма в ЖЭТФ* **77**, 794 (2003).
27. А. А. Быков, А. К. Бакаров, Д. Р. Исламов и др., *Письма в ЖЭТФ* **84**, 466 (2006).