Письма в ЖЭТФ, том 92, вып. 1, с. 73 – 76 

# Гигантские осцилляции магнетопроводимости, индуцированные микроволновым излучением в двумерных электронных дисках Корбино с емкостными контактами

*А. А. Быков*[1)], *И. В. Марчишин*

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

Поступила в редакцию 3 июня 2010 г.

При помощи дисков Корбино с емкостными контактами изучена микроволновая фотопроводимость 2D электронного газа в селективно-легированных гетероструктурах GaAs/AlAs при температуре 4.2 К в магнитных полях до 0.6 Тл. Обнаружено, что в исследуемых образцах при больших факторах заполнения под действием микроволнового излучения возникают гигантские осцилляции магнетопроводимости, аналогичные открытым ранее в 2D дисках Корбино с омическими контактами. Полученные результаты показывают, что для наблюдения гигантских осцилляций магнетопроводимости, индуцированных микроволновым излучением в 2D электронной системе, наличие омических контактов к ней принципиальной роли не играет.

Гигантские осцилляции магнетосопротивления, возникающие под действием микроволнового излучения в 2D электронной системе при больших факторах заполнения, были открыты около 10 лет назад [1, 2]. До настоящего времени эти осцилляции остаются предметом всесторонних исследований [3 – 5], что обусловлено несколькими причинами. В частности, остается дискуссионной природа магнетополевых состояний с нулевым сопротивлением, возникающих в минимумах этих осцилляций [6 – 16]. Другая причина связана с тем, что до сегодняшнего дня не установлено, какой вклад в гигантские осцилляции магнетосопротивления дают омические контакты к двумерной электронной системе [17]. Дело в том, что во всех экспериментальных работах, кроме работы [2], микроволновое излучение падает не только на двумерный электронный газ, но и на омические контакты к нему, которые, строго говоря, не являются идеальными и могут приводить не только к фото ЭДС [10, 18 – 21], но и давать вклад в фотопроводимость.

Гигантские осцилляции магнетосопротивления и магнетопроводимости, индуцированные микроволновым излучением в 2D электронных системах, являются периодическими в обратном магнитном поле, а положение их максимумов приблизительно соответствует кратным гармоникам циклотронного резонанса. 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 $\Delta G^\omega$ – микроволновая фотопроводимость, которая и приводит к осцилляциям в зависимости $G^\omega(B)$. Эти осцилляции обусловлены тем, что $\Delta G^\omega$ является осциллирующей знакопеременной функцией отношения $j = \omega/\omega_c$ [22 – 27], где $\omega_c$ – циклотронная частота, а $j$=1,2,3... – целые положительные числа. До настоящего времени гигантские осцилляции, индуцированные микроволновым излучением в 2D электронных системах, наблюдались лишь в образцах с омическими контактами. Недавно было показано, что при использовании бесконтактной методики, основанной на измерении затухания высокочастотного сигнала, распространяющегося вдоль копланарного волновода, нанесенного на поверхность образца с высокоподвижным 2D электронным газом, гигантские осцилляции не проявляются [17].

В настоящей работе использованы емкостные контакты к диску Корбино для исследования проводимости двумерного электронного газа в селективно-легированных гетероструктурах GaAs/AlAs. Показано, что в дисках Корбино с емкостными контактами под действием микроволнового излучения возникают гигантские осцилляции магетопроводимости, аналогичные обнаруженным ранее в двумерных дисках Корбино с омическими контактами [9, 12]. То есть экспериментально установлено, что наличие омических контактов к двумерному электронному газу не является значимым для наблюдения, а соответственно, и для возникновения гигантских осцилляций магнетопроводимости, индуцированных микроволновым излучением в двумерных системах при больших факторах заполнения.

Исследуемые в работе гетероструктуры с модулированным легированием представляли собой оди-

[1)]e-mail: bykov@thermo.isp.nsc.ru

ночные GaAs квантовые ямы с боковыми сверхрешеточными барьерами AlAs/GaAs. Ширина GaAs квантовой ямы составляла 13 нм. Она располагалась на расстоянии 105 нм от поверхности гетероструктуры. Структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на (100) GaAs подложках. Концентрация и подвижность 2D электронов в изучаемых гетероструктурах вычислялись из результатов измерений методом ван дер Пау на образцах квадратной формы размером $5 \times 5$ мм с омическими контактами, расположенными в углах квадрата [28]. Омические контакты к 2D электронному газу изготавливались вжиганием индия. Стороны квадрата были ориентированы вдоль направлений [110] и $[1\overline{1}0]$, вдоль которых электронная подвижность в гетероструктурах GaAs/AlAs имеет соответственно минимальное и максимальное значения [29, 30]. Концентрация электронов в изучаемых образцах составляла $n_e = 8 \cdot 10^{15}$ м$^{-2}$. Подвижности $\mu_x$ и $\mu_y$, соответствующие направлениям [110] и $[1\overline{1}0]$, вычислялись из величин $\rho_{xx}$ и $\rho_{yy}$ в нулевом магнитном поле и величины $n_e$, определенной из холловского сопротивления. При температуре $T = 4.2$ К они составляли: $\mu_x = 100$ м$^2$/Вс, $\mu_y = 140$ м$^2$/Вс.

Схематический вид диска Корбино с емкостными контактами представлен на рис.1a. Исходные образцы, как и для измерений методом ван дер Пау, имели форму квадрата размером $5\times5$ мм. На планарную поверхность таких квадратных образцов наносились два металлических емкостных контакта. Сопротивление между емкостными контактами и 2D электронным газом на постоянном токе при $T = 4.2$ К превышало 40 МОм. Диаметр внутреннего емкостного контакта, ширина внешнего емкостного контакта и расстояние между ними составляли около 1 мм. Серые области на рис.1a соответствуют емкостным контактам к 2D электронному газу, который изображен на рисунке белым цветом. Проводимость измерялась на переменном токе $I_0$, напряжение между емкостными контактами в дисках Корбино $V_0$ не превышало 5 мВ. Микроволновое излучение частотой $F = 145$ ГГц 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 $P_{\text{out}} \sim 4$ мВт. Исследования проводились при $T = 4.2$ К в магнитных полях $B$ до 0.6 Тл на частоте измерительного тока $f = 100$ кГц.

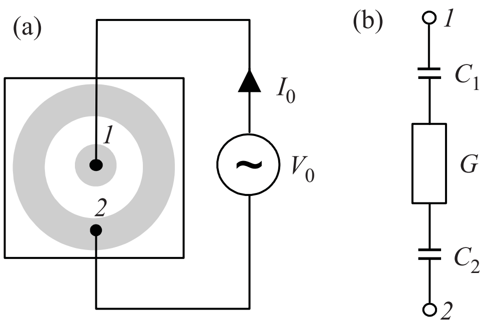


Рис.1. (a) Схема измерения проводимости в геометрии Корбино. Серым цветом изображены емкостные контакты *1* и *2*. (b) Эквивалентная схема диска Корбино с емкостными контактами

На рис.1b приведена эквивалентная схема диска Корбино с емкостными контактами. В соответствии с этой схемой тянущее напряжение $V_0$ подается на емкостные контакты *1* и *2*. Емкости этих контактов обозначены как $C_1$ и $C_2$, соответственно. Эти емкости можно заменить эквивалентной емкостью $C = C_1C_2/(C_1 + C_2)$, причем, поскольку $C_1 \ll C_2$, то $C \approx C_1$. Проводимость 2D электронного газа между емкостными контактами обозначена как $G$. Ток $I_0$, протекающий через диск Корбино с емкостными контактами на частоте тянущего напряжения $f$, выражается следующим соотношением:

$$I_0 = V_0/[1/G + 1/(i2\pi fC)] \qquad (1)$$

Используя соотношение (1) легко показать, что величина $C$ задается равенством

$$2\pi fC = [\mathrm{Re}^2(I_0) + \mathrm{Im}^2(I_0)]/[V_0 \mathrm{Im}(I_0)]. \qquad (2)$$

При этом $G$ определяется следующей формулой:

$$G = [\mathrm{Re}^2(I_0) + \mathrm{Im}^2(I_0)]/[V_0 \mathrm{Re}(I_0)]. \qquad (3)$$

На рис.2 представлены зависимости мнимых и действительных компонент измерительного тока $I_0$ от величины магнитного поля $B$, измеренные на диске Корбино с емкостными контактами. Видно, что под действием микроволнового излучения в зависимостях мнимой и действительной компонент $I_0$ от $B$ появились осциллирующие составляющие. Зависимости $C(B)$, рассчитанные по формуле (2), приведены на рис.3a. Эти зависимости показывают, что величина $C$ слабо зависит от магнитного поля в диапазоне $B < 0.6$ Тл (менее 10%) и практически не зависит от мощности микроволнового излучения. Такое поведение $C(B)$ делает правомерным использование эквивалентной схемы диска Корбино, в которой емкость С принимается константой, и позволяет использовать формулу (3) для расчета проводимости $G$. Зависимости $G(B)$, рассчитанные по этой формуле,

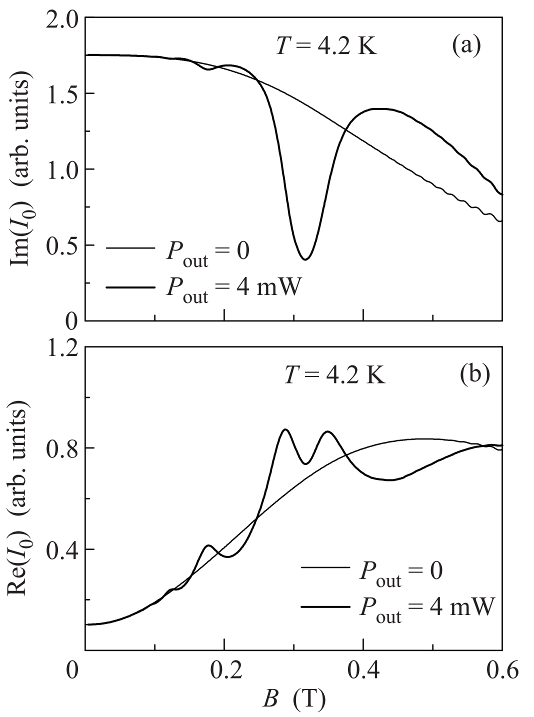


Рис.2. (a) Зависимости $\mathrm{Im}(I_0)$ от $B$, измеренные на 2D электронном диске Корбино с емкостными контактами без облучения и с облучением на частоте микроволнового поля 145 ГГц. Тонкая линия – $P_{\mathrm{out}} = 0$. Толстая линия – $P_{\mathrm{out}} = 4$ мВт. (b) Зависимости $\mathrm{Re}(I_0)$ от $B$, измеренные на 2D электронном диске Корбино с емкостными контактами без облучения и с облучением на частоте микроволнового поля 145 ГГц. Тонкая линия – $P_{\mathrm{out}} = 0$. Толстая линия – $P_{\mathrm{out}} = 4$ мВт

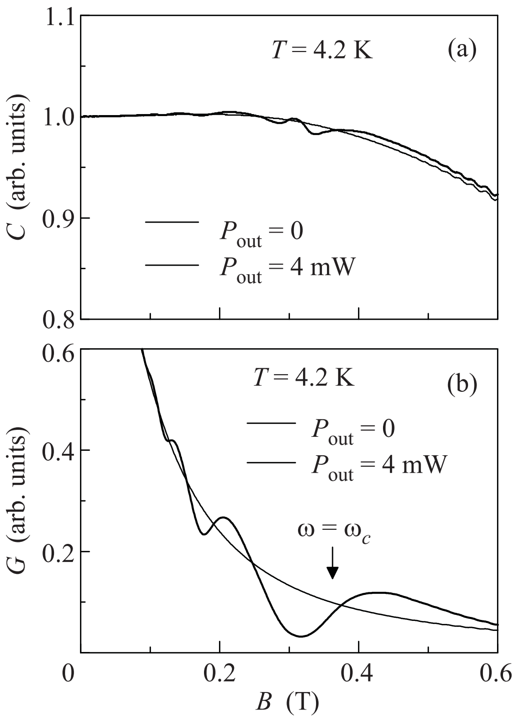


Рис.3. (a) Зависимости $C(B)$, измеренные на 2D электронном диске Корбино с емкостными контактами без облучения и с облучением на частоте микроволнового поля 145 ГГц. Тонкая линия – $P_{\mathrm{out}} = 0$. Толстая линия – $P_{\mathrm{out}} = 4$ мВт. (b) Зависимости $G(B)$, измеренные на 2D электронном диске Корбино с емкостными контактами без облучения и с облучением на частоте микроволнового поля 145 ГГц. Тонкая линия – $P_{\mathrm{out}} = 0$. Толстая линия – $P_{\mathrm{out}} = 4$ мВт. Стрелкой обозначено положение циклотронного резонанса

приведены на рис.3b. Видно, что в отсутствие микроволнового излучения величина $G$ монотонно падает с ростом магнитного поля, а под действием излучения в зависимости $G(B)$ появляется осциллирующая компонента. Анализ показал, что эта компонента полностью идентична гигантским осцилляциям магнетопроводимости, обнаруженным ранее в 2D электронных дисках Корбино с омическими контактами [9, 12].

Таким образом, в настоящей работе показана идентичность результатов измерений проводимости 2D электронного газа при больших факторах заполнения в присутствии микроволнового излучения при помощи дисков Корбино с омическими и емкостными контактами. То есть экспериментально установлено, что для наблюдения гигантских осцилляций магнетопроводимости, индуцированных микроволновым излучением в 2D электронной системе при больших факторах заполнения, наличие омических контактов к ней принципиальной роли не играет.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект # 08-02-01051.

1. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons et al., Phys. Rev. B **64**, 201311(R) (2001).
2. P. D. Ye, L. W. Engel, D. C. Tsui et al., Appl. Phys. Lett. **79**, 2193 (2001).
3. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **89**, 676 (2009).
4. O. M. Fedorych, M. Potemski, S. A. Studenikin et al., Phys. Rev. B **81**, 201302(R) (2010).
5. M. Khodas, H.-S. Chiang, A. T. Hatke et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 206801 (2010).
6. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing et al., Nature **420**, 646 (2002).
7. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 046807 (2003).
8. S. I. Dorozhkin, Письма в ЖЭТФ **77**, 681 (2003).
9. C. L. Yang, M. A. Zudov, T. A. Knuuttila et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 096803 (2003).

10. R. L. Willett, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **93**, 026804 (2004).
11. А. А. Быков, А. К. Бакаров, Д. Р. Исламов и др., Письма в ЖЭТФ **84**, 466 (2006).
12. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **87**, 638 (2008).
13. A. V. Andreev, I. L. Aleiner, and A. J. Millis, Phys. Rev. Lett. **91**, 056803 (2003).
14. A. D. Chepelianskii, A. S. Pikovsky, and D. L. Shepelyansky, Eur. Phys. J. B **60**, 225 (2007).
15. I. G. Finkler and B. I. Halperin, Phys. Rev. B **79**, 085315 (2009).
16. A. D. Chepelianskii and D. L. Shepelyansky, Phys. Rev. B **80**, 241308(R) (2009).
17. И. В. Андреев, В. М. Муравьев, И. В. Кукушкин и др., Письма в ЖЭТФ **88**, 707 (2008).
18. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **87**, 281 (2008).
19. S. I. Dorozhkin, I. V. Pechenezhskiy, L. N. Pfeiffer et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 036602 (2009).
20. I. A. Dmitriev, S. I. Dorozhkin, and A. D. Mirlin, Phys. Rev. B **80**, 125418 (2009).
21. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **91**, 390 (2010).
22. В. И. Рыжий, ФТТ **11**, 2577 (1969).
23. M. G. Vavilov and I. L. Aleiner, Phys. Rev. B **69**, 035303 (2004).
24. I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, and D. G. Polyakov, Phys. Rev. B **70**, 165305 (2004).
25. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner et al., Phys. Rev. B **71**, 115316 (2005).
26. В. А. Волков, Э. Е. Тахтамиров, ЖЭТФ **131**, 681 (2007).
27. I. A. Dmitriev, M. Khodas, A. D. Mirlin et al., Phys. Rev. B **80**, 165327 (2009).
28. O. Bierwagen, R. Pomraenke, S. Eilers et al., Phys. Rev. B **70**, 165307 (2004).
29. А. А. Быков, А. К. Бакаров, А. В. Горан и др., Письма в ЖЭТФ **74**, 182 (2001).
30. А. А. Быков, Д. Р. Исламов, А. В. Горан и др., Письма в ЖЭТФ **86**, 891 (2007).