

Общероссийский математический портал

А. А. Быков, И. В. Марчишин, Гигантские осцилляции магнетопроводимости,
индуцированные микроволновым излучением в двумерных электронных дисках
Корбино с емкостными контактами,
Письма в ЖЭТФ, 2010, том 92, выпуск 1, 73–76

<https://www.mathnet.ru/jetpl769>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и
согласны с пользовательским соглашением
<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.84

24 мая 2025 г., 16:41:11



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

А. А. Быков¹⁾, 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 магнетопольных 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 ΔG^ω – микроволновая фотопроводимость, которая и приво-

дит к осцилляциям в зависимости $G^\omega(B)$. Эти осцилляции обусловлены тем, что ΔG^ω является осциллирующей знакопеременной функцией отношения $j = \omega/\omega_c$ [22–27], где ω_c – циклотронная частота, а $j=1,2,3,\dots$ – 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 магнетопроводимости, 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 5×5 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 $[\bar{1}\bar{1}0]$, вдоль которых электронная подвижность в гетероструктурах GaAs/AlAs имеет соответственно минимальное и максимальное значения [29, 30]. Концентрация электронов в изучаемых образцах составляла $n_e = 8 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. 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 $T = 4.2$ К они составляли: $\mu_x = 100 \text{ м}^2/\text{Вс}$, $\mu_y = 140 \text{ м}^2/\text{Вс}$.

Схематический вид диска Корбино с емкостными контактами представлен на рис.1а. Исходные об-

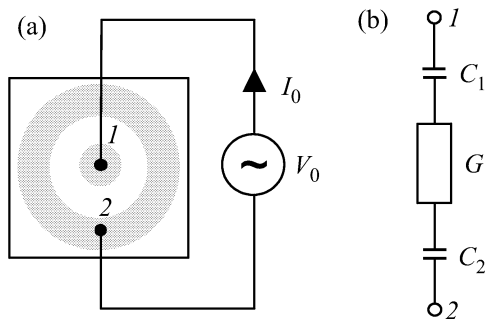


Рис.1. (а) Схема измерения проводимости в геометрии Корбино. Серым цветом изображены емкостные контакты 1 и 2. (б) Эквивалентная схема диска Корбино с емкостными контактами

разцы, как и для измерений методом ван дер Пау, имели форму квадрата размером 5×5 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.1а соответствуют емкостным контактам к 2D электронному газу, который изоб-

ражен 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.

На рис.1б 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 $C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$, 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:

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

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

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

При этом G определяется следующей формулой:

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

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.3а. 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 C принимается константой, и позволяет использовать формулу (3) для расчета проводимости G . Зависимости $G(B)$, рассчитанные по этой формуле,

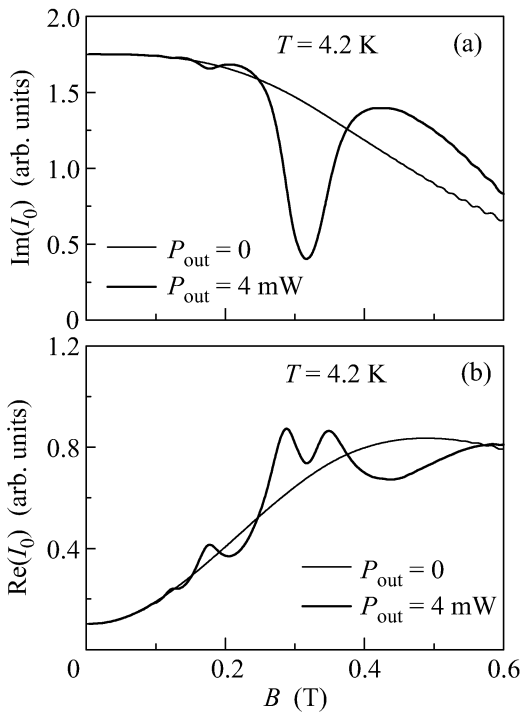


Рис.2. (а) Зависимости $\text{Im}(I_0)$ от B , измеренные на 2D электронном диске Корбино с емкостными контактами без облучения и с облучением на частоте микроволнового поля 145 ГГц. Тонкая линия – $P_{\text{out}} = 0$. Толстая линия – $P_{\text{out}} = 4$ мВт. (б) Зависимости $\text{Re}(I_0)$ от B ,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

приведены на рис.3б. 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.

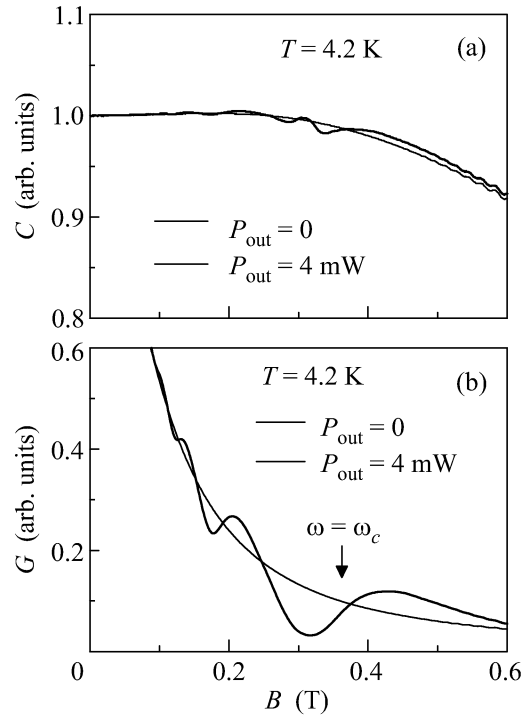


Рис.3. (а) Зависимости $C(B)$, измеренные на 2D электронном диске Корбино с емкостными контактами без облучения и с облучением на частоте микроволнового поля 145 ГГц. Тонкая линия – $P_{\text{out}} = 0$. Толстая линия – $P_{\text{out}} = 4$ мВт. (б) Зависимости $G(B)$, измеренные на 2D электронном диске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

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. Knuutila 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. Chelpianskii, 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. Chelpianskii 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).