

Резонансное микроволновое фотоспротивление в двухподзонной электронной системе при больших факторах заполнения

А. А. Быков¹⁾, Е. Г. Мозулев*, А. К. Калагин

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

*Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 4 августа 2010 г.

Исследовано микроволновое фотоспротивление в двойной GaAs квантовой яме с двумя заполненными подзонами размерного квантования E_1 и E_2 при температурах $T = 1.6\text{--}4.2\text{ К}$ в магнитных полях $B < 0.5\text{ Тл}$. Установлено, что микроволновое фотоспротивление в такой системе имеет максимальную амплитуду в условиях, когда максимум магнето-межподзонных осцилляций с номером $k = (E_2 - E_1)/\hbar\omega_c$ совпадает с максимумом или минимумом ω/ω_c -осцилляций, где ω – круговая частота микроволнового излучения, ω_c – циклотронная частота. Показано, что резонансное фотоспротивление, возникающее в максимумах магнето-межподзонных осцилляций с номером k , определяется условием: $\hbar\omega/(E_2 - E_1) = (j \pm 0.2)/k$, где k и j – целые положительные числа.

В двухподзонной электронной системе, помещенной в поперечное магнитное поле, при пересечении принадлежащих различным подзонам уровней Ландау возникает резонансное рассеяние носителей заряда, которое приводит к так называемым магнето-межподзонным (ММП) осцилляциям сопротивления и проводимости [1, 2]. Эти осцилляции периодичны в обратном магнитном поле, а положение их максимумов определяется соотношением $(E_2 - E_1)/\hbar\omega_c = k$, где $E_2 - E_1$ – энергетическое расстояние между подзонами размерного квантования, ω_c – циклотронная частота, k – целое положительное число. Недавно было обнаружено, что при больших факторах заполнения ММП осцилляции сопротивления интерферируют с ω/ω_c -осцилляциями [3, 4], индуцированными микроволновым излучением в системе с двумя заполненными подзонами размерного квантования [5]. В настоящей работе показано, что эта интерференция приводит к тому, что микроволновое фотоспротивление в двухподзонной электронной системе имеет максимальную амплитуду в условиях, когда максимум ММП осцилляций с номером k совпадает с максимумом или минимумом ω/ω_c -осцилляций.

Диссипативное сопротивление электронной системы ρ при облучении её микроволновым полем частотой $\omega/2\pi$ может быть выражено как $\rho = \rho^0 + \Delta\rho$, где ρ^0 – сопротивление в отсутствие облучения, $\Delta\rho$ – фотоспротивление, то есть добавка к сопротивлению, обусловленная облучением образца. Магнетопольные осцилляции сопротивления (ω/ω_c – осцилляции) возникают в высокоподвижном элек-

тронном газе под действием микроволнового излучения вследствие того, что $\Delta\rho$ является осциллирующей знакопеременной функцией отношения ω/ω_c . К настоящему времени предложено несколько механизмов осциллирующей микроволновой фотопроводимости (фотоспротивления) в высокоподвижных электронных системах при больших факторах заполнения [6–11]. Первая модель микроволновой фотопроводимости, рассматривающая основной причиной возникновения ω/ω_c -осцилляций упругое фотостимулированное рассеяние, приводящее к непрямым оптическим переходам между уровнями Ландау, была предложена более 30 лет назад [6]. Позднее была рассмотрена и роль неупругих процессов, то есть неравновесной функции распределения, в возникновении ω/ω_c -осцилляций [7, 8]. К настоящему времени разработана теория, включающая в себя оба этих механизма [10].

В рамках всех этих моделей $\Delta\rho$ является осциллирующей знакопеременной функцией отношения ω/ω_c . Причем $\Delta\rho = 0$ в условиях, когда ω/ω_c равно целому положительному числу j , что хорошо согласуется с экспериментальными данными [12]. При этом положение максимумов и минимумов ω/ω_c -осцилляций задается соотношениями $\omega/\omega_c = j - \alpha_{\max}$, $\omega/\omega_c = j + \alpha_{\min}$, где α_{\max} и α_{\min} – константы. В работе [12] было найдено, что $\alpha_{\max} = \alpha_{\min} = 1/4$, а в работе [13] для этих констант приводятся следующие величины: $\alpha_{\max} = 0$, $\alpha_{\min} = 1/2$. К настоящему времени величины α_{\max} и α_{\min} в двухподзонной системе не определены. В такой системе ω/ω_c -осцилляции “изрезаны” ММП осцилляциями [5], что затрудняет определение амплитуды и фазы осцилляций микро-

¹⁾ e-mail: bykov@thermo.isp.nsc.ru

волнового фотоспротивления. Однако было установлено, что изменение сопротивления в двухподзонных системах под действием микроволнового излучения или постоянного тока происходит в основном в максимумах ММП осцилляций [5, 14]. То есть микроволновое фотоспротивление $\Delta\rho$ должно иметь максимальную амплитуду при выполнении условий:

$$\hbar\omega/(E_2 - E_1) = (j - \alpha_{\max})/k, \quad (1)$$

$$\hbar\omega/(E_2 - E_1) = (j + \alpha_{\min})/k. \quad (2)$$

Исследуемые в работе гетероструктуры представляли собой симметрично легированные двойные GaAs квантовые ямы. Схематический вид двойной квантовой ямы с двумя заполненными подзонами размерного квантования представлен на вставке к рис.1. Ширина туннельно-связанных ям составляла

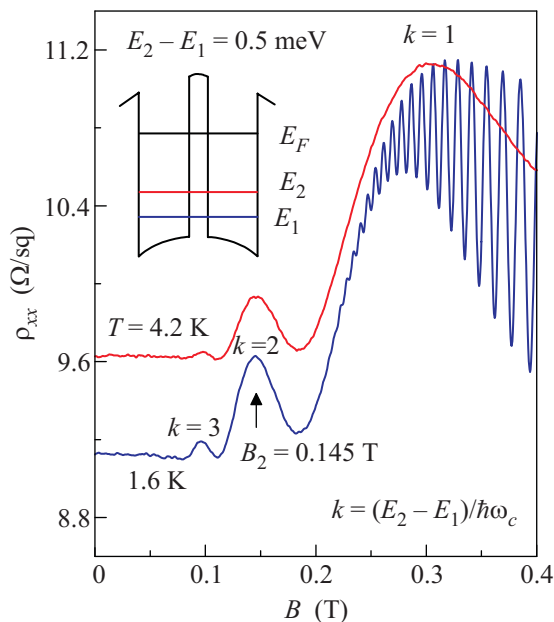


Рис.1. Зависимости $\rho_{xx}(B)$ в двойной квантовой яме при $T = 4.2$ К (толстая линия) и $T = 1.6$ К (тонкая линия). Цифрами обозначены номера ММП осцилляций. Стрелкой указано положение максимума под номером $k = 2$. На вставке приведено схематическое изображение двойной квантовой ямы

13 нм. В качестве боковых барьеров к GaAs квантовым ямам использовались AlAs/GaAs сверхрешетки, а в качестве туннельного барьера между ямами использовался слой AlAs толщиной 2 нм. Структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на (100) GaAs подложках. Исследования проводились при температурах $T = 1.6$ – 4.2 К в магнитных полях B до 0.5 Тл на мостиках Холла

длиной 250 мкм и шириной 50 мкм. Обе туннельно-связанные квантовые ямы были зашунтированы омическими контактами. Зависимости $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{xy}(B)$ измерялись на переменном электрическом токе величиной менее 1 мкА на частоте 886 Гц. Общая концентрация электронов n_H в двойной квантовой яме вычислялась из холловского сопротивления ρ_{xy} в магнитном поле 0.5 Тл. Величина n_H составляла $7.9 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Подвижность μ_x вычислялась из n_H и величины ρ_{xx} в нулевом магнитном поле. При температуре $T = 4.2$ К она составляла $82 \text{ м}^2/\text{Вс}$. Микроволновое излучение частотой $\omega/2\pi = 38$ – 78 ГГц подавалось на образец при помощи круглого волновода. Максимальная выходная мощность микроволнового излучения используемых генераторов составляла $P_{\text{out}} = 4$ мВт.

На рис.1 представлены типичные зависимости $\rho_{xx}(B)$ для исследуемой двойной GaAs квантовой ямы, измеренные при температурах 4.2 и 1.6 К. Как следует из экспериментальных зависимостей $\rho_{xx}(B)$, ММП осцилляции в исследуемой двойной квантовой яме при температурах 1.6 и 4.2 К начинают проявляться в полях $B > 0.1$ Тл. Положение максимумов этих осцилляций в магнитном поле определяется условием: $(E_2 - E_1) = k\hbar\omega_c$. Величина $E_2 - E_1$, определенная из их периода, составила 0.5 мэВ, что соответствует следующим электронным концентрациям в первой и второй подзонах: $n_1 = 4.02 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, $n_2 = 3.88 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$. Отсутствие положительного магнетосопротивления вблизи нулевого B указывает на то, что подвижности в подзонах равны. Видны три первые ММП осцилляции, обозначенные номерами 1, 2 и 3. Положение максимума под номером $k=2$ соответствует $B_2 \approx 0.145$ Тл. С понижением T наблюдается незначительный рост амплитуды ММП осцилляций, обусловленный в таких системах температурной зависимостью электрон-электронного рассеяния [15, 16]. Изменение амплитуды осцилляций Шубникова – де Гааза в этом диапазоне T обусловлено температурной зависимостью функции распределения электронов на поверхности Ферми.

Рис.2а демонстрирует влияние микроволнового излучения на зависимость $\rho_{xx}(B)$. В согласии с результатами работы [5] микроволновое поле наиболее существенно влияет на сопротивление в максимумах ММП осцилляций. Точка пересечения зависимостей $\rho_{xx}(B)$ в присутствии микроволнового облучения и без него, обозначенная на рис.2а стрелкой, соответствует циклотронному резонансу когда $\omega/\omega_c = 1$. В этой точке, как это изображено на рис.2б, микроволновое фотоспротивление $\Delta\rho_{xx} = 0$. На рис.3а представлена ситуация, когда узел B_c , со-

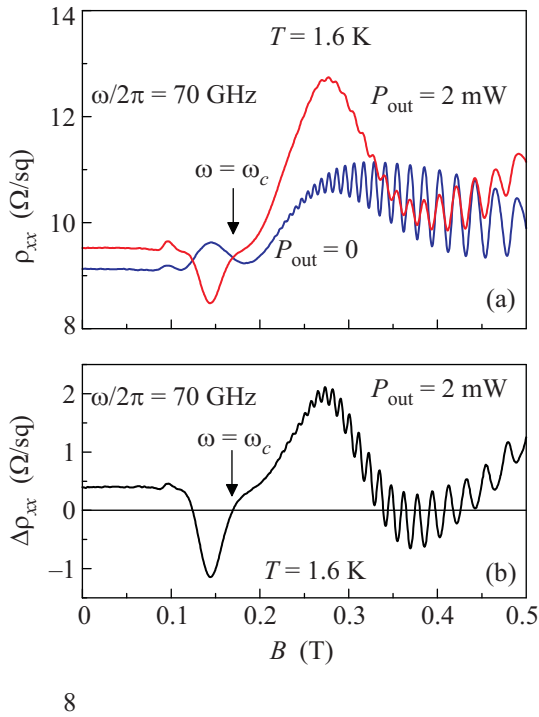


Рис.2. (а) Зависимости $\rho_{xx}(B)$ в двойной квантовой яме при $T = 1.6$ К без облучения (тонкая линия) и с облучением на частоте 70 ГГц (толстая линия). (б) Зависимость микроволнового фотосопротивления $\Delta\rho_{xx}(B)$ на частоте 70 ГГц. Стрелкой указано положение циклотронного резонанса

ответствующий положению циклотронного резонанса для частоты $\omega/2\pi = 58$ ГГц, совпадает с максимумом под номером $k = 2$, то есть когда $B_2 = B_c$. Фотосопротивление вблизи этого узла, в соответствии с теорией микроволновой фотопроводимости [6–11], в полях, меньших B_c является отрицательным, а в больших полях – положительным. В рамках теории, базирующейся на неравновесной функции распределения электронов по энергии, это означает, что производная от этой функции в магнитном поле $B = B_c$ изменяет свой знак [8]. На рис.3б показаны зависимости $\rho_{xx}(B)$ в условиях, когда максимум (минимум) осцилляций, индуцированных микроволновым излучением, совпадает с максимумом ММП осцилляций под номером $k = 2$.

Экспериментальные зависимости B_{\max} , B_c и B_{\min} от $\omega/2\pi$ представлены на рис.4а квадратами, окруженными и треугольниками, соответственно. Сплошными линиями изображены результаты линейной аппроксимации этих зависимостей. Положение циклотронного резонанса в магнитном поле аппроксимируется как $B_c = 2.57 \cdot 10^{-3}(\omega/2\pi)$, что с точностью 5% совпадает с выражением: $B_c = \omega m^*/e$, где $m^* = 0.068m_0$. Наблюдающееся отличие мы отно-

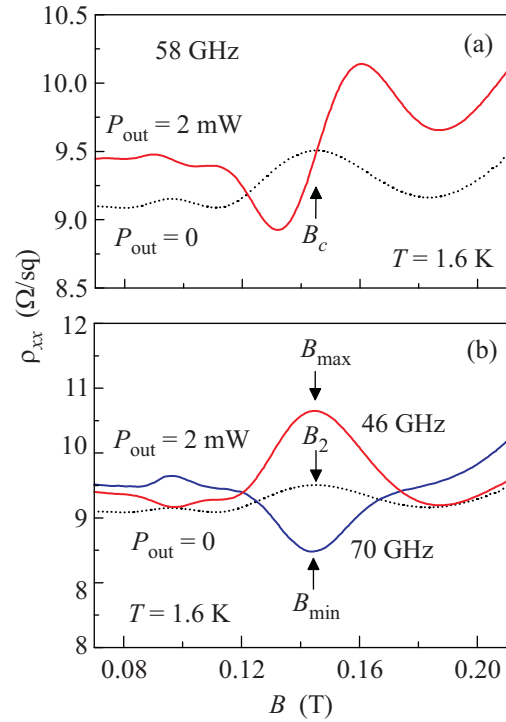


Рис.3. (а) Зависимости $\rho_{xx}(B)$ в двойной квантовой яме при $T = 1.6$ К без облучения (пунктирная линия) и с облучением на частоте 58 ГГц (толстая линия). Стрелкой указано положение циклотронного резонанса. (б) Зависимости $\rho_{xx}(B)$ в двойной квантовой яме при $T = 1.6$ К без облучения (пунктирная линия) и с облучением на частотах 46 ГГц (толстая линия) и 70 ГГц (тонкая линия). Стрелками указаны положения максимума под номером $k = 2$, а также максимума и минимума осцилляций, индуцированных микроволновым излучением

сим на ошибки в определении величины магнитного поля и частоты микроволнового излучения. Положение максимума и минимума в магнитном поле аппроксимируется как $B_{\max} = 0.1 + 9.4 \cdot 10^{-4}(\omega/2\pi)$ и $B_{\min} = 0.051 + 1.33 \cdot 10^{-3}(\omega/2\pi)$, соответственно. Смысл коэффициентов в этих линейных зависимостях нам пока неясен. Из пересечения зависимостей B_{\max} , B_c и B_{\min} от $\omega/2\pi$ с линией $B = B_2$ мы определили три частоты: $\omega_{\max}/2\pi = 46$ ГГц, $\omega_c/2\pi = 58$ ГГц и $\omega_{\min}/2\pi = 70$ ГГц. Зависимость амплитуды фотосопротивления от частоты микроволнового излучения в магнитном поле $B = B_2$ представлена на рис.4б. Положения экстремумов в этой зависимости совпадают по частоте с величинами $\omega_{\max}/2\pi$, $\omega_c/2\pi$ и $\omega_{\min}/2\pi$. Используя выражения (1) и (2) и величины $\omega_{\max}/2\pi$, $\omega_c/2\pi$ и $\omega_{\min}/2\pi$, мы определили константы α_{\max} и α_{\min} . В исследуемой электронной системе $\alpha_{\max} = \alpha_{\min} \approx 0.2$, что близко к величинам, полученным для одноподзонной системы в работах [17, 18].

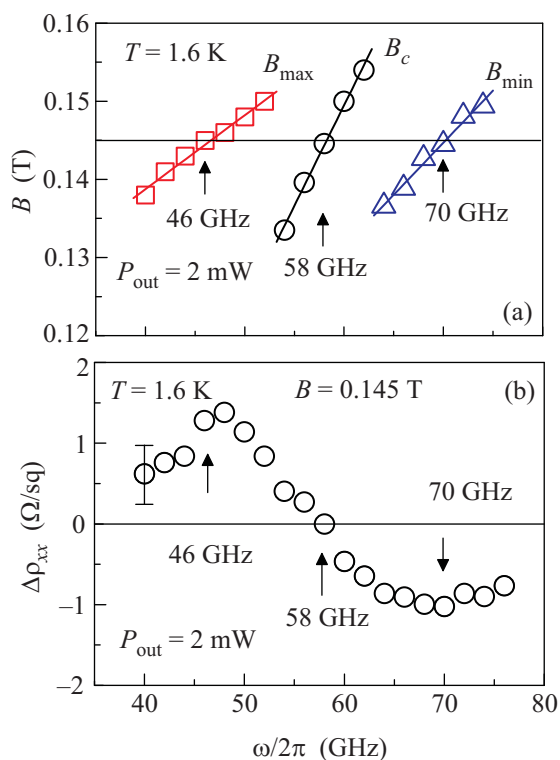


Рис.4. (а) Зависимости B_{\max} , B_c и B_{\min} от частоты микроволнового излучения при $T = 1.6$ К. Стрелками указаны точки пересечения зависимостей B_{\max} , B_c и B_{\min} от $\omega/2\pi$ с линией $B = B_2$. (б) Зависимость микроволнового фотосопротивления $\Delta\rho_{xx}$ от частоты микроволнового излучения. Стрелками указаны положения экстремумов зависимости $\Delta\rho_{xx}(\omega/2\pi)$

Таким образом экспериментально изучено резонансное микроволновое фотосопротивление в двухподзонной электронной системе при больших факторах заполнения, возникающее в максимумах ММП осцилляций. Установлено, что микроволновое фотосопротивление в такой системе имеет максимальную амплитуду в условиях, когда максимум ММП осцилляций совпадает с максимумом или минимумом ω/ω_c -осцилляций. Показано, что резонансное фо-

тосопротивление, возникающее в максимумах ММП осцилляций с номером k , определяется условием: $\hbar\omega/(E_2 - E_1) = (j \pm 0.2)/k$, где k и j – целые положительные числа.

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

1. В. М. Поляновский, ФТП **22**, 2230 (1988).
2. D. R. Leadley, R. Fletcher, R. J. Nicholas et al., Phys. Rev. B **46**, 12439 (1992).
3. M. A. Zudov, R. R. Du, J. A. Simmons, and J. L. Reno, Phys. Rev. B **64**, 201311(R) (2001).
4. P. D. Ye, L. W. Engel, D. C. Tsui et al., Appl. Phys. Lett. **79**, 2193 (2001).
5. А. А. Быков, Д. Р. Исламов, А. В. Горан, А. И. Торопов, Письма в ЖЭТФ **87**, 563 (2008).
6. В. И. Рыжий, ФТТ **11**, 2577 (1969).
7. S. I. Dorozhkin, Письма в ЖЭТФ **77**, 681 (2003).
8. I. A. Dmitriev, M. G. Vavilov, I. L. Aleiner et al., Phys. Rev. B **71**, 115316 (2005).
9. В. А. Волков, Э. Е. Тахтамиров, ЖЭТФ **131**, 681 (2007).
10. I. A. Dmitriev, M. Khodas, A. D. Mirlin et al., Phys. Rev. B **80**, 165327 (2009).
11. A. D. Chepelianskii and D. L. Shepelyansky, Phys. Rev. B **80**, 241308(R) (2009).
12. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing et al., Nature **420**, 646 (2002).
13. M. A. Zudov, R. R. Du, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev. Lett. **90**, 046807 (2003).
14. А. А. Быков, Письма в ЖЭТФ **88**, 70 (2008).
15. A. V. Goran, A. A. Bykov, A. I. Toropov, and S. A. Vitkalov, Phys. Rev. B **80**, 193305 (2009).
16. А. А. Быков, А. В. Горан, and S. A. Vitkalov, Phys. Rev. B **81**, 155322 (2010).
17. M. A. Zudov, Phys. Rev. B **69**, 041304(R) (2004).
18. R. G. Mani, J. H. Smet, K. von Klitzing et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 146801 (2004).