

## Осцилляции магнетосопротивления двумерного электронного газа в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами в микроволновом поле

А. А. Быков<sup>1)</sup>, А. К. Бакаров, А. К. Калагин, А. И. Торопов

Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 24 февраля 2005 г.

Исследовано влияние СВЧ излучения в диапазоне частот от 1.2 до 10 ГГц на магнетосопротивление (МС) высокоподвижного двумерного электронного газа (2ДЭГ) в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами. Обнаружено, что под действием микроволнового поля в МС 2ДЭГ возникают осцилляции, периодичные по обратному магнитному полю ( $1/B$ ). Установлено, что в исследуемом диапазоне частот период обнаруженных осцилляций зависит от мощности СВЧ излучения.

PACS: 73.23.-b, 73.40.Gk

Недавно были открыты осцилляции магнетосопротивления (МС) высокоподвижного двумерного электронного газа (2ДЭГ) в GaAs/AlGaAs гетеропереходе, возникающие под действием микроволнового излучения в области магнитных полей, предшествующей области возникновения осцилляций Шубникова – де Гааза (ШдГ) [1]. Было установлено, что положение максимумов осцилляций по магнитному полю определяется соотношением  $\omega/\omega_c = N$ , где  $\omega/2\pi$  – частота микроволнового поля,  $\omega_c$  – циклотронная частота электронов в магнитном поле  $B$ , а  $N = 1, 2, 3 \dots$ . Эти осцилляции были предсказаны теоретически более 30 лет назад [2], и их экспериментальное обнаружение обусловлено в значительной мере успехами в технологии изготовления высококачественных полупроводниковых структур с модулированным легированием.

Вскоре после работы [1] было показано, что в области магнитных полей, предшествующей области осцилляций ШдГ, возникают осцилляции и под действием постоянного тянущего тока  $I_{dc}$  [3], то есть под действием электрического поля нулевой частоты. Эти осцилляции связаны с туннелированием носителей заряда между наклоненными под действием электрического поля уровнями Ландау. Их период зависит от отношения  $I_{dc}/B$ , в то время как положение максимумов осцилляций, обусловленных микроволновым излучением, определяется частотой, а от мощности не зависит [4].

Очевидно, что с понижением частоты микроволнового поля осцилляции, обусловленные вертикальными переходами между уровнями Ландау [5], долж-

ны смениться осцилляциями, связанными с “горизонтальным” туннелированием [3]. То есть ниже некоторой характерной частоты положение максимумов осцилляций по магнитному полю должно зависеть от мощности СВЧ излучения. Из общих соображений эта граничная частота должна зависеть от подвижности 2ДЭГ и величины  $kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура.

В настоящей работе мы изучили влияние микроволнового излучения на МС высокоподвижного 2ДЭГ в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами. В таких селективно-легированных структурах мы обнаружили осцилляции МС, возникающие под действием микроволнового излучения в области классически сильных магнитных полей. Мы экспериментально показали, что в изучаемом интервале микроволнового излучения положение максимумов этих осцилляций в магнитном поле зависит от величины мощности СВЧ поля.

Исследуемые структуры выращивались при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на (100) GaAs подложках. Ширина GaAs квантовой ямы составляла 13 нм. В качестве барьеров использовались AlAs/GaAs сверхрешетки второго рода, что позволяет получать высокоподвижный 2ДЭГ с высокой концентрацией [6, 7]. Подвижность 2ДЭГ в исследуемой МЛЭ структуре при температуре жидкого гелия и концентрации  $1.3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  составляла  $10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . Измерения проводились при  $T = 4.2 \text{ К}$  в магнитных полях до 2 Тл на холловских мостиках, имеющих ширину 50 мкм и расстояние между потенциометрическими выводами 100, 200, 300 и 400 мкм. Микроволновое излучение подводилось к образцу по коаксиальному кабелю и подавалось на 2ДЭГ через токовые

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

контакты холлового мостика. Сопротивление измерялось на переменном токе частотой 777 Гц, который имел величину  $10^{-6}$  А.

На рис.1а представлены зависимости относительного МС, когда постоянный ток  $I_{dc}$  равен нулю (кри-

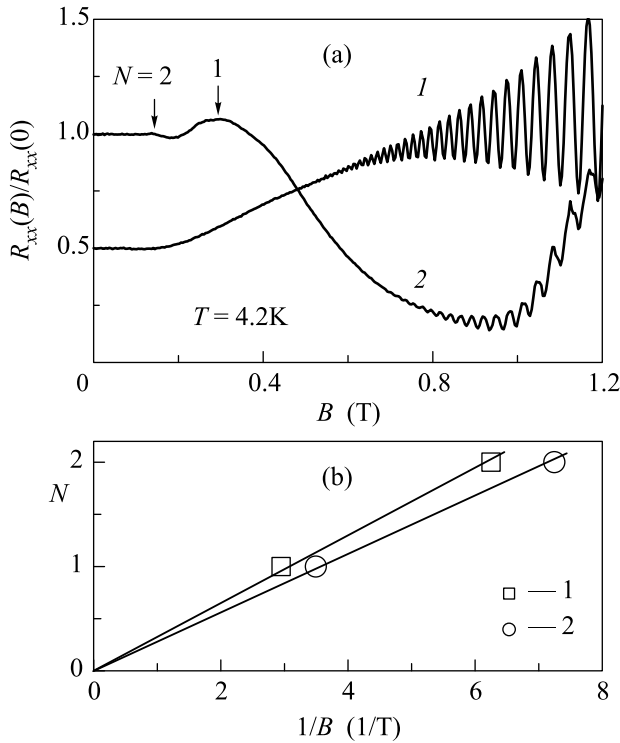


Рис.1. (а) Зависимости относительного МС при  $T = 4.2$  К: 1 –  $I_{dc} = 0$ , 2 –  $I_{dc} = 1.2 \cdot 10^{-4}$  А. На кривой 2 цифрами обозначены номера ( $N$ ) максимумов осцилляций. Кривая 1 для наглядности смещена вниз по оси  $y$ . (б) Зависимости положения максимумов осцилляций от величины  $1/B$  для различных величин  $I_{dc}$ : 1 –  $I_{dc} = 1.4 \cdot 10^{-4}$  А, 2 –  $I_{dc} = 1.2 \cdot 10^{-4}$  А

вая 1) и когда он имеет ненулевое значение (кривая 2). Хорошо видно, что по сравнению с кривой 1 постоянный ток подавил амплитуду осцилляций ШдГ в полях более 0.5 Тл, а в области менее 0.5 Тл появилось осциллирующее МС. Анализ кривых показал, что осцилляции МС, возникающие под действием тока  $I_{dc}$ , с экспериментальной точностью периодичны по обратному магнитному полю. Как показано на рис.1б, положение максимумов этих осцилляций зависит от величины  $I_{dc}$ , что полностью согласуется с результатами работы [3]. При этом положение наиболее яркого максимума на кривой 1 (рис.1а) соответствует целочисленному значению  $N = 1$ , что также согласуется с данными работы [3].

На рис.2 представлены кривые относительного МС для различных мощностей  $P$  микроволнового из-

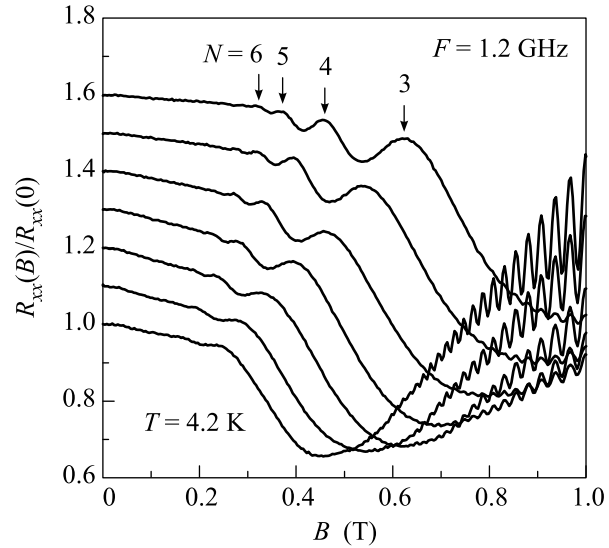


Рис.2. Зависимости относительного МС при  $T = 4.2$  К для частоты СВЧ поля  $F = 1.2$  ГГц при различных мощностях  $P$ . Нижняя кривая соответствует минимальной величине  $P$ , а верхняя – максимальной. Кривые для наглядности, начиная с нижней кривой, смещены вверх по оси  $y$ . Номерами  $N$  обозначены максимумы осцилляций

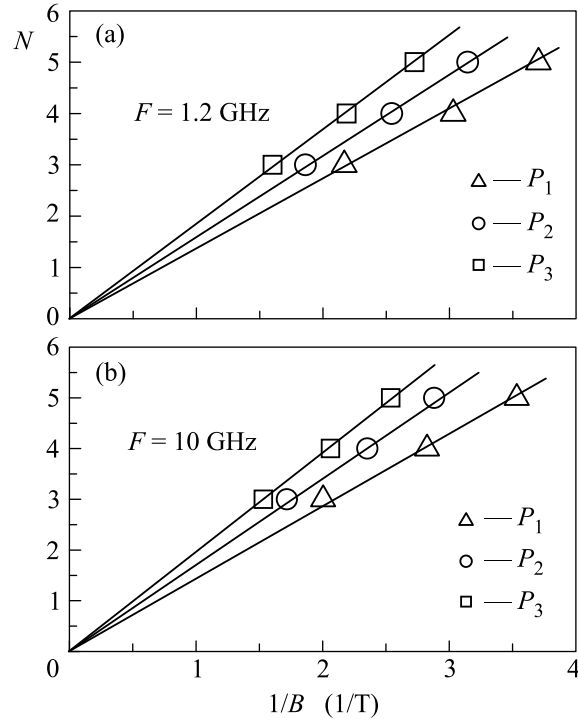


Рис.3. Зависимости положения максимумов осцилляций от величины  $1/B$  для различных мощностей  $P$ :  $P_1 > P_2 > P_3$ . (а)  $F = 1.2$  ГГц, (б)  $F = 10$  ГГц

лучения на частоте 1.2 ГГц. Видно, что под действием СВЧ излучения в области, предшествующей облас-

ти осцилляций ШдГ, появились осцилляции, положение которых по магнитному полю зависит от величины  $P$ . Результаты анализа положений максимумов этих осцилляций в магнитном поле для различных величин  $P$  на частотах 1.2 и 10 ГГц представлены на рис.3. Аналогично осцилляциям, возникающим под действием  $I_{dc}$ , эти осцилляции периодичны по  $1/B$ , что согласуется с работой [1], но положение первого максимума в магнитном поле соответствует целочисленному значению  $N = 3$ , а не  $N = 1$ .

Из экспериментальных данных, приведенных на рис.3, следует, что для частот 1.2 и 10 ГГц наблюдается качественно похожее поведение. Это означает, что зависимость положения максимумов по магнитному полю от частоты микроволнового поля при  $T = 4.2$  К в исследуемых образцах начинается в более высокочастотной области. Как показано в работе [4], на образцах с более высокой подвижностью и существенно меньшей концентрацией 2ДЭГ при температуре 280 мК заметная частотная зависимость положения максимумов осцилляций начинается выше 7.5 ГГц. Качественно наши результаты можно объяснить тем, что при  $T = 4.2$  К осцилляции МС 2ДЭГ в изучаемых образцах в диапазоне частот до 10 ГГц

обусловлены туннелированием между наклоненными в электрическом поле уровнями Ландау [3].

Таким образом, мы экспериментально обнаружили осцилляции МС 2ДЭГ в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами, возникающие под действием СВЧ излучения, и показали, что в диапазоне частот до 10 ГГц период осцилляций по обратному магнитному полю зависит от уровня микроволновой мощности.

Авторы благодарят М. В. Энтина за плодотворные обсуждения результатов работы.

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект # 04-02-16789 и INTAS, проект # 03-51-6453.

1. M. A. Zudov et al., Phys. Rev. **В64**, 201311(R) (2001).
2. V. I. Ryzhii, Sov. Phys. Solid State **11**, 2078 (1970).
3. C. L. Yang et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 076801 (2002).
4. R. L. Willett et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 026804 (2004).
5. V. Ryzhii, A. Chaplik, and R. Suris, Письма в ЖЭТФ **80**, 412 (2004).
6. K.-J. Friedland et al., Phys. Rev. Lett. **77**, 4616 (1996).
7. А. А. Быков и др., Письма в ЖЭТФ **72**, 300 (2000).