

Анизотропия магнетотранспорта и самоорганизация корругированных гетерограниц в селективно легированных структурах на (100) GaAs подложках

А. А. Быков¹⁾, А. К. Бакаров, А. В. Горан, А. В. Латышев, А. И. Торопов

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

Поступила в редакцию 28 июня 2001 г.

Обнаружена анизотропия продольного магнетосопротивления двумерного электронного газа с высокими подвижностью и концентрацией в GaAs квантовых ямах, выращенных при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии на (100) GaAs подложках. Полученные экспериментальные данные объясняются самоорганизацией пространственно-модулированных гетерограниц и согласуются с результатами атомно-силовой микроскопии ростовых поверхностей.

PACS: 73.23.-b

Одной из физических причин анизотропии магнетотранспорта высокоподвижного двумерного электронного газа (ДЭГ) в селективно легированных структурах является рассеяние на шероховатостях гетерограниц. Этот механизм наиболее ярко проявляется в GaAs/AlGaAs гетеропереходах, выращенных при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на высокоиндексных поверхностях GaAs подложек, в которых при увеличении концентрации анизотропное рассеяние носителей заряда, обусловленное морфологией гетерограниц, становится доминирующим [1].

В традиционных GaAs/AlGaAs гетеропереходах, выращенных на (100) GaAs подложках, рассеяние ДЭГ на шероховатостях гетерограниц является несущественным по сравнению с рассеянием на случайном потенциале легирующей примеси. Это связано с методом подавления рассеяния на случайном потенциале, основанном на увеличении расстояния между проводящим каналом и легирующей примесью. Высокая подвижность ДЭГ при использовании этого метода может быть получена лишь при сравнительно низкой концентрации, порядка $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и меньше. Для таких концентраций влияние морфологии гетерограниц на транспорт ДЭГ мало. При больших концентрациях, когда рассеяние на шероховатостях становится существенным, возрастает и рассеяние на случайном потенциале, которое и остается доминирующим.

Недавно была предложена новая концепция подавления рассеяния на случайном потенциале удаленной легирующей примеси, в рамках которой удается по-

лучать высокие подвижность и концентрацию ДЭГ одновременно [2]. В предложенной МЛЭ структуре ДЭГ находится в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами. X-электроны, возникающие в короткопериодных AlAs/GaAs сверхрешеточных барьерах, сглаживают флуктуационный потенциал легирующей примеси, что дает возможность без уменьшения подвижности существенно увеличить концентрацию ДЭГ в GaAs квантовой яме с AlAs/GaAs сверхрешеточными барьерами по сравнению с традиционными GaAs/AlGaAs гетеропереходами.

В настоящей работе показано, что анизотропия магнетосопротивления ДЭГ с высокими подвижностью и концентрацией, обусловленная шероховатостями гетерограниц в таких МЛЭ структурах, наблюдается и при выращивании их на (100) GaAs подложках. Установлено, что причиной анизотропии магнетотранспорта в этом случае является пространственная модуляция гетерограниц, возникающая в процессе самоорганизации ростовых поверхностей [3].

Исследуемые структуры выращивались на полуизолирующих (100) GaAs подложках методом МЛЭ. Активная часть структур представляла собой GaAs квантовую яму толщиной 10 нм. Квантовая яма ограничивалась с обеих сторон короткопериодными сверхрешетками, состоящими из чередующихся слоев AlAs и GaAs толщиной 1.1 и 2.3 нм, соответственно. Источниками носителей заряда служили два δ -слоя Si концентрацией $2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, расположенные в обкладках GaAs на расстоянии 9 и 12.5 нм от стенок квантовой ямы. Нижнюю сверхрешетку от подложки и выглаживающего слоя GaAs отделял слой $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 0.2 мкм. Рост GaAs осуществ-

¹⁾e-mail: bykov@thermo.isp.nsc.ru

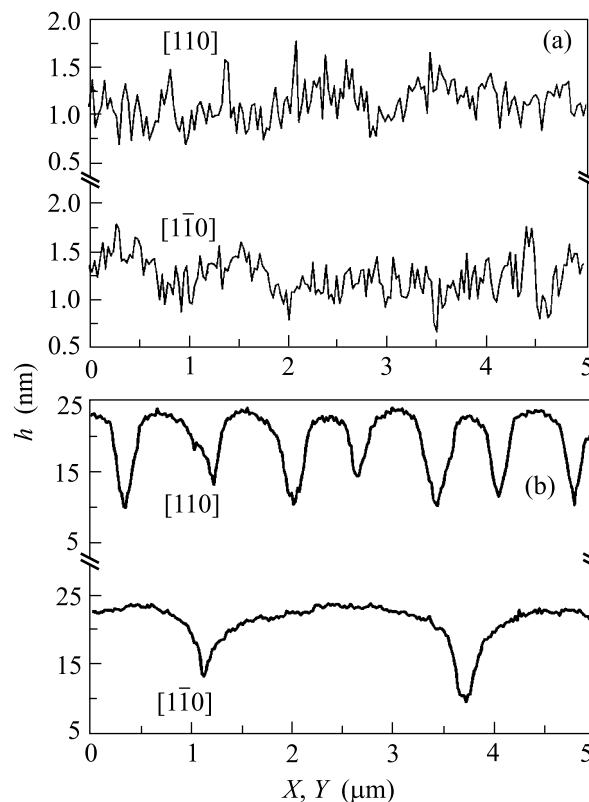
Рис.1. Вид АСМ: (а) “гладкой” и (б) “корругированной” МЛЭ структур

влялся при условиях, характеризующихся наличием поверхностной реконструкции (2×4) , стабилизированной As, а рост $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ – (3×1) .

Анализ ростовых поверхностей МЛЭ структур проводился при помощи атомно-силовой микроскопии (АСМ). На рис.1а представлен вид АСМ МЛЭ структуры с максимально гладкой поверхностью, которую нам удалось получить. Характерный вид МЛЭ структуры с корругированной поверхностью приведен на рис.1б. Хорошо проявляется волнообразный характер поверхности с преимущественным ориентированием гребней в направлении $[1\bar{1}0]$. На рис.2 приведены профили АСМ “гладкой” и “корругированной” поверхностей для направлений $[110]$ и $[1\bar{1}0]$, показывающие, что пространственная модуляция в первом случае мала и практически неразличима для выбранных направлений, а во втором – существенно большая, с периодом, зависящим от направления.

На основе выращенных структур при помощи оптической литографии и жидкостного травления были изготовлены холловские мостики длиной 100 мкм и шириной 50 мкм, ориентированные вдоль направлений $[1\bar{1}0]$ и $[110]$. Магнетотранспортные измерения проводились при $T = 4.2\text{ К}$ в параллельном и перпендикулярном подложке магнитных полях до 2 Тл. Исследовались транспортные свойства ДЭГ в квантовых ямах с различными величинами усредненной высоты пространственной модуляции гетерограниц h , которая изменялась в зависимости от условий роста от 0.5 до 15 нм. Латеральный период пространственной модуляции d в изучаемых МЛЭ структурах в направлении $[110]$ составлял $0.5 \div 1.5$ мкм. Концентрация ДЭГ в исходных структурах лежала в пределах $(1.1 \div 1.8) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а подвижность зависела от ори-

ентации измерительного тока и величин h и d и при $T = 4.2\text{ К}$ составляла $(1 \div 5) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Рис.2. Профили АСМ для направлений $[110]$ и $[1\bar{1}0]$: (а) “гладкой” и (б) “корругированной” МЛЭ структур

Магнетополевые зависимости продольного сопротивления R_{xx} вдоль направлений $[1\bar{1}0]$ и $[110]$ в магнитном поле B , перпендикулярном подложке, приве-

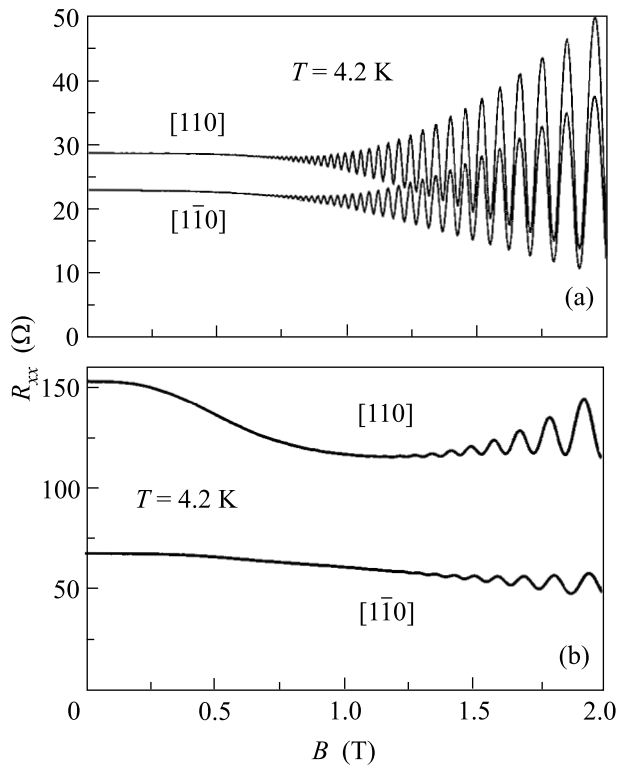


Рис.3. Продольное сопротивление ДЭГ в ортогональных направлениях в перпендикулярном магнитном поле: (а) “гладкой” и (б) “корругированной” МЛЭ структур

дены на рис.3. Видно, что величины R_{xx} в нулевом магнитном поле для тянущего тока, ориентированного вдоль различных направлений, отличаются как на “гладких” МЛЭ структурах, так и на пространственно модулированных. Величина анизотропии проводимости возрастала с увеличением высоты пространственной модуляции ростовых поверхностей. Однако нам не удалось получить анизотропию меньшую, чем приведена на рис.3а для условно “гладкой” МЛЭ структуры. Для МЛЭ структуры с максимальной величиной анизотропии магнетосопротивления (МС), в магнитных полях от 0 до 1 Тл наблюдается характерное отрицательное МС (направление $[110]$, рис.3б), наблюдавшееся ранее в МЛЭ структурах, выращенных на высокоиндексных поверхностях GaAs подложек [1] и на GaAs подложках с предварительно сформированным рельефом [4, 5].

На рис.4а приведены магнетополевые зависимости R_{xx} в магнитном поле B , параллельном подложке и направлению измерительного тока. Из рисунка видно, что величина МС для МЛЭ структуры с “гладкими” гетерограницами с точностью эксперимента остается постоянной во всем используемом интервале магнитных полей. Однако в “корругированной”

структуре наблюдается анизотропное положительное МС. Величина этого МС зависела от величины пространственной модуляции гетерограниц и была при прочих равных условиях тем больше, чем была больше h .

Ярко выраженная анизотропия продольного сопротивления R_{xx} в перпендикулярном магнитном поле позволяет заключить, что в исследуемых МЛЭ структурах проявляется механизм рассеяния на шероховатостях гетерограниц. Причина проявления этого механизма связана с тем, что поверхность гетерограниц GaAs квантовых ям формируется ступеня-

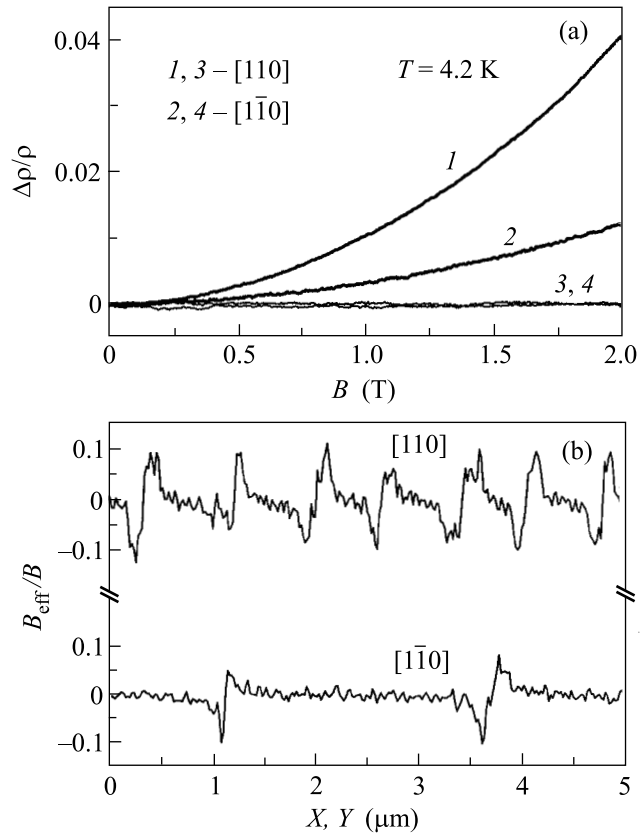


Рис.4. (а) Продольное сопротивление ДЭГ в ортогональных направлениях в параллельном магнитном поле: 1, 2 “корругированной” и 3, 4 “гладкой” МЛЭ структур; (б) профили эффективного магнитного поля в ортогональных направлениях для ДЭГ в “корругированной” МЛЭ структуре

ми, аналогично тому, как это происходит в гетеропереходах, выращиваемых на высокоиндексных GaAs подложках [1]. Такой вывод согласуется с профилями АСМ. Очевидно, что в направлении, в котором пространственная модуляция гетерограниц практически отсутствует, рассеяние на ступенях будет меньше, так как оно происходит преимущественно при “пре-

одоления” носителями заряда “хребтов”, то есть когда носители движутся перпендикулярно ступеням.

Пространственная модуляция гетерограниц GaAs квантовых ям (в соответствии с профилями АСМ) означает, что движение носителей заряда вдоль таких границ происходит в периодически изменяющихся условиях. Мы полагаем, что в соответствии с пространственной модуляцией гетерограниц периодически изменяются и геометрические параметры ступеней или фасеток, которыми формируется корругированная поверхность. Такое упрощенное рассмотрение позволяет сделать вывод о том, что в исследуемых МЛЭ структурах “большое” отрицательное МС имеет классическую природу и связано с соизмеримым движением носителей заряда в периодической решетке рассеивателей [6]. Рассеивателями, в рамках такого предположения в отличие от [6], являются не антиточки, а ступени или фасетки. Отсутствие соизмеримых максимумов в магнетопольевых зависимостях обусловлено в данном случае большой дисперсией периода рассеивателей [7].

Прямым доказательством пространственной модуляции ДЭГ в исследуемых образцах является то, что во внешнем однородном магнитном поле B , параллельном подложке, наблюдается положительное МС [8, 4, 9]. Носители заряда движутся в этом случае в эффективном неоднородном магнитном поле B_{eff} вдоль линий постоянного магнитного поля $B_{\text{eff}} = B_{\text{const}}$ или преодолевая магнитные барьеры [10, 11]. Профили B_{eff} , рассчитанные из профилей АСМ, для двух взаимно перпендикулярных направлений параллельного поля B , представлены на рис.4б. Как видно из рисунка, периоды пространственной модуляции B_{eff} и соответственно количество магнитных барьеров для B , направленного перпендикулярно и параллельно гребням “волн”, отличаются приблизительно в пять раз, что и является причиной анизотропии положительного МС.

Таким образом экспериментально показано, что ДЭГ в GaAs ямах с самоорганизованны-

ми корругированными гетерограницами является пространственно-модулированным. Его магнетотранспортные свойства в перпендикулярном магнитном поле обусловлены движением носителей заряда в анизотропной разупорядоченной решетке рассеивателей, а в параллельном – в эффективном неоднородном магнитном поле, пространственная модуляция которого может достигать 20% от величины внешнего однородного параллельного магнитного поля.

Авторы благодарят Г.М. Гусева за плодотворные обсуждения результатов работы.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты: # 01-02-16892; # 00-02-17896) и МНТП ФТНС (проект # 99-1132).

1. A. C. Churchill, G. H. Kim, A. Kurobe et al., J. Phys.: Condens. Matter **6**, 6131 (1994).
2. K.-J. Friedland, R. Hey, H. Kostial et al., Phys. Rev. Lett. **77**, 4616 (1996).
3. A. Ballestad, B. J. Ruck, M. Adamczyk et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 2377 (2001).
4. G. M. Gusev, J. R. Leite, A. A. Bykov et al., Phys. Rev. **B59**, 5711 (1999).
5. A. A. Bykov, G. M. Gusev, J. R. Leite et al., Phys. Rev. **B61**, 5505 (2000).
6. K. Ensslin and P. Petroff, Phys. Rev. **B41**, 12307 (1990).
7. Г. М. Гусев, З. Д. Квон, Л. В. Литвин и др., Письма в ЖЭТФ **56**, 173 (1992).
8. M. L. Leadbeater, C. L. Foden, J. H. Burroughes et al., Phys. Rev. **B52**, R8628 (1995).
9. A. A. Bykov, G. M. Gusev, J. R. Leite et al., Physica **B298**, 79 (2001).
10. J. E. Muller, Phys. Rev. Lett. **68**, 385 (1992).
11. I. S. Ibrahim, V. A. Schweigert, and F. M. Peeters, Phys. Rev. **B56**, 7508 (1997).