

ВЛИЯНИЕ ГИБРИДИЗАЦИИ СОСТОЯНИЙ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В НЕГЛУБОКИХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ

И. С. Васильевский^{a,b}, В. А. Кульбачинский^a, Р. А. Лунин^a, Г. Б. Галиев^b, В. Г. Мокеров^b*

^a *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова
119992, Москва, Россия*

^b *Институт СВЧ-полупроводниковой электроники Российской академии наук
117105, Москва, Россия*

Исследован латеральный электронный транспорт при низких температурах в неглубоких псевдоморфных двусторонне дельта-легированных квантовых ямах GaAs/In_{0.12}Ga_{0.88}As/GaAs в зависимости от ширины, уровня легирования и наличия тонкого центрального барьера AlAs. Показано, что такой барьер изменяет зонную структуру и волновые функции электронов в квантовых ямах, что приводит к существенному изменению рассеяния электронов и изменению подвижности.

PACS: 73.21.-b, 73.21.Fg, 73.43.Qt, 73.63.Hs, 78.67.De

Квантовые ямы со сложным потенциальным профилем представляют большой интерес для исследователей. Тонкий барьер или дополнительная узкая квантовая яма внутри основной квантовой ямы могут изменить структуру подзон размерного квантования, а также нужным образом как оптические, так и транспортные свойства [1, 2]. Ряд исследований указывает на возможность изменять с помощью тонкого барьера рассеяние электронов на оптических фононах [3, 4]. Всего в нескольких противоречивых работах исследовано влияние барьера на электронный транспорт [5, 6].

В настоящей работе исследовались температурные зависимости сопротивления, магнитосопротивление в слабых и квантующих магнитных полях B в неглубоких (90 мэВ) псевдоморфных квантовых ямах различной ширины и с различным уровнем легирования. Сравнивались зонная структура и электронный транспорт в квантовых ямах с барьером AlAs в центре и без него.

Псевдоморфные квантовые ямы GaAs/In_{0.12}Ga_{0.88}As/GaAs выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующих подложках (001) GaAs. Вначале выращивался буфер GaAs размером 0.6 мкм. Далее дельта-слой

Параметры исследованных образцов

№	1	2	3	4	5	6
L_{QW} , нм	16	16	16	16	11	11
b , МС	0	3	0	3	0	3
N_d , 10^{12} см ⁻²	3.2	3.2	1	1	1	1
ρ_0 , Ω/\square	573	724	1586	5140	1338	8770
n_H , 10^{12} см ⁻²	2.86	2.61	0.52	0.57	0.59	0.47
μ_H , м ² /Вс	0.38	0.33	1.0	0.21	0.8	0.15

кремния, отделенный от квантовой ямы GaAs спейсером шириной 8.5 нм. Затем квантовая яма In_{0.12}Ga_{0.88}As с различной толщиной L_{QW} . Далее опять спейсер GaAs шириной 8.5 нм и верхний дельта-слой кремния для легирования ямы. Температура роста псевдоморфной ямы составляла 510 °С, все остальные слои выращивались при 590 °С. Центральный барьер состоял из $b = 3$ монослоев AlAs. Некоторые структурные параметры образцов приведены в таблице. Там же приведены сопротивление ρ_0 , холловские концентрации n_H и подвижности μ_H электронов при $T = 4.2$ К. Величина N_d есть суммарная поверхностная концентрация

*E-mail: ivasilevskii@mail.ru

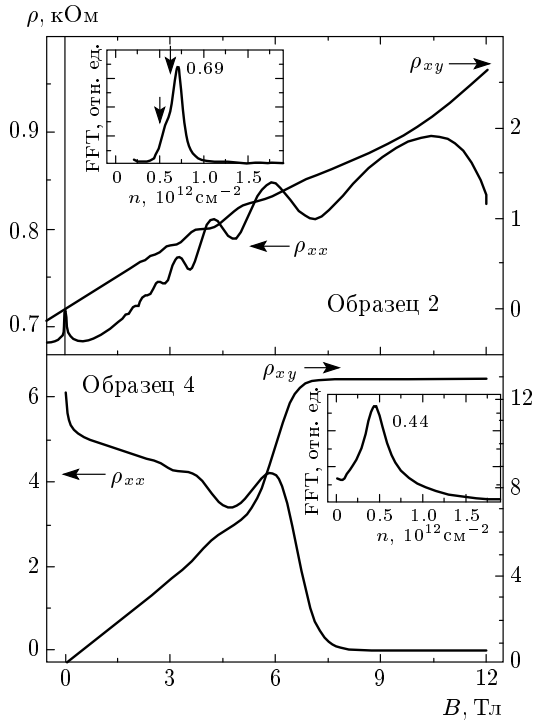


Рис. 1. Осцилляции $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{xy}(B)$ в образцах 2 и 4 при $T = 0.25$ К. На вставке: фурье-спектры осцилляций

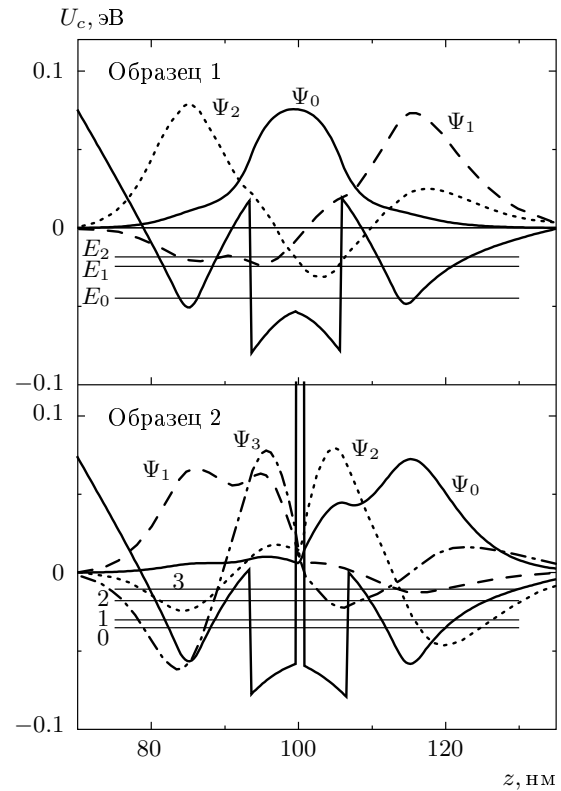


Рис. 2. Зонная структура и волновые функции электронов для образцов 1 и 2

кремния в дельта-слоях.

Температурные зависимости сопротивления $\rho(T)$ измерялись для всех образцов в интервале температур 0.25–300 К.

Образцы с одиночной квантовой ямой (1, 3 и 5) показали зависимости $\rho(T)$ металлического типа, т. е. сопротивление уменьшалось приблизительно линейно при уменьшении температуры. Сопротивление соответствующих образцов с центральным барьером AlAs (2, 4 и 6) увеличивалось при понижении температуры примерно в 3–7 раз.

Магнитосопротивление и эффект Холла измерялись при температурах 0.25–4.2 К. По этим данным определялись холловские концентрации n_H и подвижности μ_H электронов. Электронные концентрации n_{SDH} в подзоне размерного квантования с наивысшей подвижностью были определены по фурье-спектрам осцилляций Шубникова–де Гааза. Найдено, что в образцах 4 и 6 введение барьера незначительно уменьшает электронную концентрацию в подзонах размерного квантования, в то время как в сильно легированном образце 2 величина n_{SDH} существенно уменьшается. В качестве примера на рис. 1 приведены магнитосопротивление и холлов-

ское сопротивление для образцов 2 и 4. Вставка показывает фурье-спектры осцилляций (стрелками показаны концентрации в подзонах размерного квантования). В слабых магнитных полях B во всех образцах наблюдается отрицательное магнитосопротивление, связанное с подавлением слабой локализации. При увеличении B в умеренно легированных образцах 3–6 сопротивление с ростом B уменьшается почти линейно до начала осцилляций. В сильных магнитных полях появляется квантовый эффект Холла. В сильно легированных образцах 1 и 2 магнитосопротивление положительно в промежуточных магнитных полях B . Положительное магнитосопротивление объясняется проводимостью по нескольким подзонам.

Зонная структура рассчитывалась путем само согласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. В качестве примера на рис. 2 приводятся профили дна зоны проводимости и волновые функции электронов для образцов 1 и 2. В образцах 3–6 оказалась заполненной только одна подзона размерного квантования, в то время как в сильно легированных образцах 1 и 2 заполнено несколько подзон.

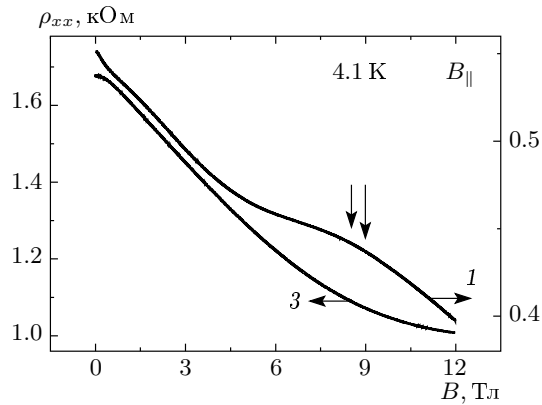


Рис. 3. Магнитосопротивление $\rho_{xx}(B)$ при $T = 4.1$ К в параллельном двумерном слое магнитном поле B в образцах 1 и 3. Стрелки соответствуют значению B , при котором верхняя подзона опустошается

Как показано на рис. 2, в образцах 1 и 2 имеются по две гибридных подзоны (в дельта-слое и в квантовой яме). Центральный барьер AlAs приводит к реконструкции волновых функций и к формированию гибридных состояний, когда волновая функция распространяется на дельта-слой и квантовую яму (Ψ_2 и Ψ_3). При этом изменяется механизм рассеяния электронов с фононного на рассеяние на ионизированных примесях. Тем не менее в образце 2 нижние подзоны (E_0 и E_1 на рис. 2) обеспечивают эффективное экранирование, и осцилляции наблюдаются от третьей подзоны (E_2), что соответствует сильному уменьшению частоты осцилляций Шубникова–де Гааза в образце 2 по сравнению с образцом 1.

В сильных параллельных магнитных полях B из-за диамагнитного сдвига подзон верхние подзоны опустошаются [7]. В образце 1 по сравнению с об-

разцом 3 проявляется особенность в магнитосопротивлении, связанная с опустошением подзон в дельта-слоях (E_1 и E_2), как показано на рис. 3. Стрелками отмечены расчетные значения магнитного поля, при котором подзоны E_1 и E_2 выходят за уровень Ферми.

Таким образом, введение тонкого барьера AlAs в центр неглубокой квантовой ямы с двусторонним дельта-легированием приводит к эффективной реконструкции энергетического спектра и волновых функций и изменению механизма рассеяния электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-02-17029-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Patanè, D. Sherwood, L. Eaves, T. M. Fromhold et al., *Appl. Phys. Lett.* **81**, 661 (2002).
2. Q. X. Zhao, S. Wongmanerod, M. Willander, P. O. Holtz et al., *Phys. Rev. B* **62**, 10984 (2000).
3. J. Požela, A. Namajunas, K. Požela, and V. Juciene, *J. Appl. Phys.* **81**, 1775 (1997).
4. J. Požela, V. Juciene, A. Namajunas, and K. Požela, *ФТП* **31**, 85 (1997).
5. X. T. Zhu, H. Goronkin, G. N. Maracas, R. Droopad, and M. Stroscio, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2141 (1992).
6. T. Noda, M. Tanaka, and H. Sakaki, *J. Cryst. Growth* **95**, 60 (1989).
7. В. А. Кульбачинский, В. Г. Кытин, Р. А. Лунин и др., *ФТП* **33**, 839 (1999).