

©1995 г.

ОСОБЕННОСТИ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЫ КВАНТОВЫХ ЯМ GaAs/AlGaAs С ШИРОКИМИ БАРЬЕРАМИ МЕЖДУ НИМИ

В.И.Кадушкин, В.В.Капаев, И.В.Кучеренко,* А.И.Подливаев,**
И.А.Руднев,** А.А.Синченко,** Е.Л.Шангина*

Научно-исследовательский технологический институт,
390011, Рязань, Россия

* Физический институт им.П.Н.Лебедева Российской академии наук,
117924, Москва, Россия

** Московский инженерно-физический институт,
115409, Москва, Россия

(Получена 6 апреля 1994 г. Принята к печати 31 октября 1994 г.)

В гетеросистеме GaAs/AlGaAs с тремя квантовыми ямами и широкими краевыми барьерами изучены вольт-амперные характеристики для вертикального транспорта. На характеристиках отмечаются особенности, связанные с резонансным туннелированием электронов.

Последнее время значительный интерес вызывают исследования асимметричных туннельно-связанных квантовых ям. В таких системах возможна передислокация электронных состояний внешним электрическим и(или) магнитным полем [1-4]. В нелегированной гетеросистеме GaAs/AlGaAs с тремя квантовыми ямами наблюдался фотогальванический эффект, индуцированный магнитным полем [5]. В настоящей работе изучены вольт-амперные характеристики туннельных квантовых ям с вертикальным (осевым) переносом электронов по направлению, перпендикулярному плоскости гетеропереходов.

Выбор структуры с тремя ямами обусловлен тем, что интерференционные эффекты в таком потенциале приводят к резкому изменению волновой функции электрона при небольших вариациях потенциала и к перемещению электронов из одной квантовой ямы в другую за счет сравнительно небольшого электрического поля. Исследованная нами наноструктура с точки зрения измерения эффектов резонансного туннелирования является не совсем оптимальной. Однако на такой системе трех квантовых ям, ограниченной широкими разделительными барьерами, удобно моделировать процессы перемещения электронов в условиях, близких к приборным (малые токи утечки при вертикальном транспорте). Более того, сильно легированные контактные слои

$n^+-GaAs, 5000 \text{ \AA}$
$i-Al_xGa_{1-x}As, 200 \text{ \AA}$
$i-GaAs, 90 \text{ \AA}$
$i-Al_xGa_{1-x}As, 45 \text{ \AA}$
$n^+-GaAs, 75 \text{ \AA}$
$i-Al_xGa_{1-x}As, 45 \text{ \AA}$
$i-GaAs, 68 \text{ \AA}$
$i-Al_xGa_{1-x}As, 200 \text{ \AA}$
$n^+-GaAs, 2000 \text{ \AA}$
$n-GaAs$

Рис. 1. Расположение и типы слоев в исследованных гетеросистемах $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$, $x = 0.09$.

n^+-GaAs из-за широких барьеров из $AlGaAs$ практически не влияют на энергетический спектр, что значительно упрощает его теоретический расчет и делает однозначным интерпретацию результатов. Для представленной структуры удалось подобрать максимально широкие краевые барьеры, позволяющие тем не менее получить информацию о спектре системы исходя из вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Экспериментально исследована структура, параметры и состав слоев которой представлены на рис. 1. Толщины слоев и качество поверхности во время роста контролировались по осцилляциям интенсивности нулевого рефлекса дифракции быстрых электронов. Уровень непреднамеренного легирования (фоновые примеси: углерод, кислород), определяемый по оже-спектрам относительно пика гелия, составлял менее $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Буферный и верхний контактный слой n^+-GaAs легировались кремнием до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а средняя квантовая яма — до уровня $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Совершенство структур непосредственно оценить по спектрам фотолуминесценции не представляется возможным: основной уровень размерного квантования в ямах маскируется излучением сильно легированных слоев n^+-GaAs . Однако измерение спектров фотолуминесценции и гальваномангнитных явлений на слоях-спутниках и сверхрешетках [6], выращенных по аналогичной технологии, показывает, что осевые флуктуации не превышают одного монослоя (2.81 \AA), а латеральные размеры островков — на уровне $(70-120) \text{ \AA}$. Полуширина спектров фотолуминесценции при $T = 4.2 \text{ К}$ составляла $(5-6) \text{ мэВ}$. Для измерения вертикального транспорта были изготовлены методом обычной и взрывной фотолитографии меза-структуры диаметром от 300 до 600 мкм. Контактные площадки диаметром несколько меньшим меза-структуры напылялись из эвтектики $AuGe$ или $AuGeNi$ с последующей термокомпрессией. В отдельных образцах контакты подвергались термообработке при пониженной температуре с выдержкой до 30 мин.

Измерение ВАХ на планарных наноструктурах мы производили резистивным методом в режимах генератора напряжения и генератора тока. Измерения проводились на двух различных экспериментальных стендах. В одном случае применялись припаянные контакты из золотой проволоки, в другом — прижимные контакты. Для формирования прижимных контактов к верхней площадке с помощью микровинта подводился индиевый щуп, к которому были подсоединены токовый и потенциальный электроды. Второй токовый и второй потенциальный электроды подсоединялись к подложке. После касания щупа производилась регистрация ВАХ $I(U)$ и производной dU/dI , причем регистрация производной осуществлялась стандартной модуляционной методикой в режиме генератора тока. Измерения проводились при температуре кипения жидкого азота в отсутствие света. Всего было исследовано десять образцов, которые показали одинаковые ВАХ и производные dU/dI . Характеристики были несимметричны относительно знака напряжения, что связано с асимметрией структуры. В то время как на ВАХ не заметно явно выраженных особенностей, на графике dU/dI наблюдались особенности при напряжениях: $U_0 = 18$ мэВ, $U_1 = (50-70)$ мэВ, $U_2 = \approx 100$ мэВ, $U_3 = [(-42) - (-50)]$ мэВ, $U_4 = -80$ мэВ, $U_5 = -150$ мэВ. Отметим, что измерения проводились в двух независимых лабораториях МИФИ и ФИ РАН, и особенности в районе указанных напряжений наблюдались на всех образцах данной серии наноструктур с различной степенью контрастности. На рис. 2 представлен характерный пример зависимости dU/dI для одного из образцов.

Отличительной особенностью исследуемой структуры являются широкие краевые барьеры. Большая толщина их обусловлена тем, что для управления концентрацией электронов в различных ямах предполагается использовать вертикальное электрическое поле. Ток утечки в этом случае должен быть минимальным. Широкие барьеры обеспечивают малый ток утечки, маскируя при этом пики резонансного туннелирования на ВАХ данной наноструктуры. Именно по этой причине для выявления особенностей исследовалась дифференциальная ВАХ, причем на нескольких идентичных образцах. Широкие барьеры вносят сложности и в теоретический расчет прохождения электронов через данную структуру. Исследование, проведенное авторами, показывает, что коэффициент прохождения электрона через структуру

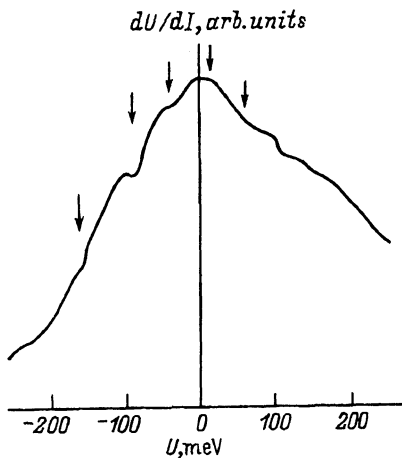


Рис. 2. Дифференциальная вольт-амперная характеристика гетеросистемы при вертикальном транспорте.

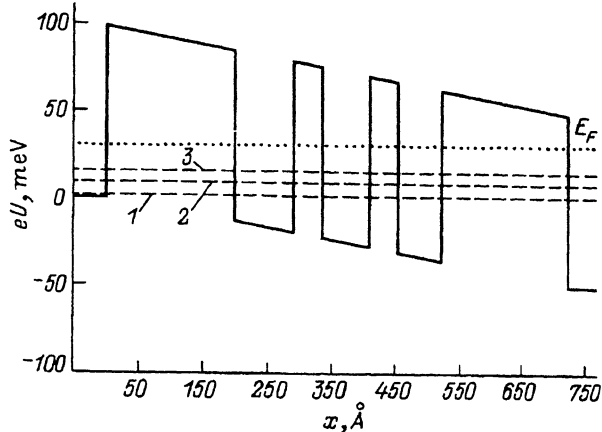


Рис. 3. Структура дна зоны проводимости и положение квазиуровневой системы трех квантовых ям при внешнем напряжении $U = 50$ мВ. Номерами 1, 2, 3 отмечены положения квазиуровней.

с широкими краевыми барьерами является величиной, сильно изменяемой при малых вариациях структуры. Учет взаимодействия электронов с фононами и друг с другом также принципиально изменяет коэффициент прохождения. В данной ситуации упрощенные теоретические модели типа приближения эффективной массы или сильной связи неадекватно описывают амплитуду протекающего тока. Существует, однако, характеристика системы, описывающая резонансные эффекты, не зависящая от толщины барьеров и хорошо воспроизводимая в рамках простейших приближений. Этой характеристикой является положение квазиуровней данной системы. При бесконечно широких краевых барьерах они совпадают с энергетическими уровнями структуры, состоящей из трех квантовых ям. Особенности ВАХ, связанные с резонансным туннелированием, возникают при тех напряжениях на образце, где какой-либо квазиуровень сравнивается с энергией Ферми контакта отрицательной полярности или опускается ниже дна зоны проводимости данного контакта (рис. 3). Энергия трех квазиуровней

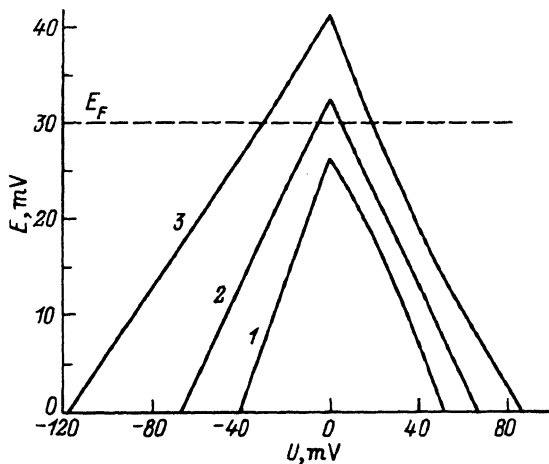


Рис. 4. Зависимость энергии квазиуровней от приложенного внешнего напряжения. Номера квазиуровней те же, что и на рис. 3.

системы, отсчитанная от дна зоны проводимости контакта с отрицательной полярностью (левый контакт на рис. 4 при $U > 0$ и правый контакт при $U < 0$), представлена на рис. 4. Кривые 1-3 пересекают уровни $E - E_F$ (энергия Ферми) и $E = 0$ при напряжениях на образце, равных (в мВ): -5, +5, -120, -70, -40, -35, 20, 70, 90. Последние семь особенностей хорошо коррелируют с особенностями, наблюдаемыми экспериментально.

Проведенное исследование позволяет утверждать, что энергетический спектр структуры, состоящей из трех квантовых ям, может быть восстановлен по измерениям ВАХ, несмотря на необходимые для прикладных целей широкие разделительные барьеры. Это особенно ценно вследствие того, что энергетические уровни данной структуры в спектрах фотолюминесценции не проявляются.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность Ю.В. Копаеву и В.Ф. Елесину за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена в рамках программы «Физика твердотельных наноструктур», проекты № 2-014, № 1-048 и № 1-007.

Список литературы

- [1] J.P. Eisenstein, L.N. Pfeiffer, K.W. West. Appl. Phys. Lett., **57**, 2324 (1990).
- [2] H.C. Liu, A.G. Steele, M. Buchanan, Z.R. Wasilewski. J. Appl. Phys., **70**, 7560 (1991).
- [3] А.А. Горбадевич, В.В. Капаев, Ю.В. Копаев. Письма ЖЭТФ, **57**, 565 (1993).
- [4] В.Ф. Елесин, Ю.В. Капаев, Л.А. Опенов, А.И. Подливаев. ФТП, **29** (1994).
- [5] Ю.А. Алещенко, И.Д. Воронова, С.П. Гришечкина и др. Письма ЖЭТФ, **58**, 377 (1993).
- [6] В.И. Кадушкин, Е.Л. Шангина. ФТП, **27**, 1311 (1993).

Редактор Т.А. Полянская

Peculiarities of $C - V$ characteristic in the case of an asymmetrical quantum-well GaAs/AlGaAs structure having boundary barriers

V.I.Kadushkin, V.V.Kapaev, I.V.Kucherenko,* F.I.Podlivaev,**
I.A.Rudnev,** A.A.Sinchenko,** E.L. Shangina*

Scientific Research & Technology Institute, 390011 Ryazan, Russia

* P.N.Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 117924, Moscow

** Voscov Engineering Physics Institute, 115409, Moscow

$C - V$ characteristics for vertical transport have been studied in a three-well GaAs/AlGaAs heterostructure having wide boundary barriers. Marks peculiar to resonance tunnelling were observed on these characteristics.