

На правах рукописи

Шевырин Андрей Анатольевич

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА
ПОДВЕШЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР**

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Погосов Артур Григорьевич

Официальные оппоненты:

Миньков Григорий Максович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт физики металлов Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией

Лавров Александр Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук

Защита состоится 10 июня 2014 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу:

630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук: http://www.isp.nsc.ru/comment.php?id_dissert=468

Автореферат разослан « » 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Погосов Артур Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В физике твердого тела, давно развивающейся и ставшей академической областью науки, относительно недавно появился новый объект исследования – так называемые наноэлектромеханические системы. Анализ существующих публикаций, посвященных этой тематике, позволяет сделать вывод о том, что эти системы интересны как для фундаментальной науки (в том числе и как искусственно созданные объекты, демонстрирующие квантово-механическое поведение), так и в плане перспективных практических приложений.

В работах, посвященных таким системам, как правило, исследуются наноразмерные механические резонаторы, колебания которых можно возбуждать и детектировать, используя электрофизические методы. Иными словами, помимо “электронных” степеней свободы наноэлектромеханические системы обладают также дополнительными, механическими степенями свободы. Как правило, между “электронными” и механическими степенями свободы в таких случаях существует “сцепка”, то есть физические механизмы, обеспечивающие взаимное влияние электронного транспорта и механических колебаний и перемещений.

Наноэлектромеханические системы создаются на основе различных материалов, таких как кремний и его соединения (SiN, SiC), металлы (золото, алюминий), углеродные нанотрубки, графен и единичные фуллерены. Наноэлектромеханические системы, создаваемые на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с двумерным электронным газом, хотя и исследуются в настоящее время лишь немногими научными группами, представляют особый интерес. Электронный транспорт в низкоразмерных системах является на сегодняшний день одним из магистральных направлений в физике полупроводников, однако, как правило, в работах, посвященных этой тематике, исследуются системы на основе двумерного электронного газа, находящегося в массиве полупроводника. В то же время следует ожидать, что такие эффекты, как кулоновская блокада, баллистический электронный транспорт в квантовых точечных контактах, слабая локализация, квантовый эффект Холла и другие транспортные явления в низкоразмерных системах будут демонстрировать интересные особенности, если их изучать в подвешенных, отделенных от подложки наноструктурах. С большой вероятностью такие подвешенные наноструктуры в дальнейшем можно будет использовать в качестве новых наноэлектромеханических устройств (и это уже было продемонстрировано на примере подвешенного одноэлектронного транзистора [1]). Вышеприведенные рассуждения показывают актуальность выбранной темы исследования. Однако, реализация прикладного потенциала таких устройств требует последовательного, детального изучения с фундаментальной точки зрения как особенностей электронного транспорта в подвешенных наноструктурах, так и их механических упругих свойств. На

настоящее время подвешенные наноструктуры на основе гетеропереходов GaAs/AlGaAs изучены слабо; существуют лишь единичные работы, посвященные таким структурам.

Цели и задачи исследования

Целью работы являлось изучение особенностей туннельного и баллистического электронного транспорта в наноэлектромеханических системах, создаваемых на основе полупроводниковых мембран, содержащих гетероструктуры GaAs/AlGaAs, а также влияния на электронный транспорт в таких системах механических смещений и колебаний.

Для достижения указанных целей были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Изучение влияния упругих напряжений на механические свойства наноразмерных резонаторов, изготавливаемых на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, а также условий их механической устойчивости;
- 2) Изучение туннельного транспорта, ограниченного эффектом кулоновской блокады, в подвешенном одноэлектронном транзисторе. Выявление особенностей электронного транспорта в подвешенном одноэлектронном транзисторе путем прямого экспериментального сравнения электрофизических характеристик подвешенных и неподвешенных экспериментальных образцов
- 3) Изучение баллистического транспорта в условиях квантования кондактанса в подвешенном квантовом точечном контакте. Выявление особенностей электронного транспорта в подвешенном квантовом точечном контакте путем прямого сравнительного эксперимента.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна полученных результатов обусловлена тем, что в ходе выполнения настоящей работы впервые:

- 1) продемонстрировано существенное влияние эйлеровской неустойчивости на высокоамплитудную, нелинейную динамику наноэлектромеханических систем, создаваемых на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs;
- 2) экспериментально показано, что отрыв квантовой точки одноэлектронного транзистора от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью, позволяет существенно увеличить его зарядовую энергию (до 170 К в температурных единицах);
- 3) экспериментально обнаружено явление упругой блокады туннелирования, обусловленной тем, что нанопроволока, содержащая квантовую точку подвешенного одноэлектронного транзистора, может изгибаться, причем туннелирование электронов сопровождается изменением величины изгиба;

4) экспериментально показано, что подвешенный квантовый точечный контакт является системой, демонстрирующей квантование кондактанса в условиях, когда электрон-электронное взаимодействие усилено за счет отделения подвешенной мембраны от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью. Показано, что такое усиление электрон-электронного взаимодействия приводит к появлению особенностей баллистического электронного транспорта в подвешенном квантовом точечном контакте и, в частности, усиливает «0,7-аномалию».

Теоретическая и практическая значимость работы

На момент написания настоящей работы создание и изучение наноэлектромеханических систем является новой областью научных исследований. Научная значимость работы определяется тем, что в ней детально и последовательно изучаются фундаментальные закономерности функционирования наноэлектромеханических систем, создаваемых на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs. Можно ожидать, что ряд изученных особенностей в будущем ляжет в основу новых наноэлектромеханических устройств, что определяет практическую значимость проведенных исследований.

Методология и методы исследования

Предметом исследования являлись наноэлектромеханические системы, представляющие собой подвешенные наноструктуры, создаваемые на основе тонких проводящих полупроводниковых мембран из гетероструктур GaAs/AlGaAs.

В качестве основных **методов исследования** использовались

- 1) прямое экспериментальное сравнение результатов измерения кондактанса подвешенных наноструктур как функции напряжений на затворах и напряжения исток-сток с результатами аналогичных измерений, проводимых на тех же самых экспериментальных образцах до операции селективного травления, приводящей к их подвешиванию;
- 2) определение величины механических напряжений в подвешенных наноструктурах по величине и характеру их деформаций, в свою очередь, определяемых с помощью сканирующего электронного и атомно-силового микроскопов;
- 3) определение количественных и качественных характеристик механических колебаний подвешенных наноструктур путем детектирования изменения их кондактанса, вызванного этими колебаниями.

Положения, выносимые на защиту:

1. Подвешенные нанопроволоки с двумерным электронным газом, создаваемые на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, теряют механическую устойчивость при длинах, превышающих определенную критическую величину, что приводит к их изгибу.

Критическая длина определяется исходными механическими напряжениями, обусловленными рассогласованием постоянных решетки арсенида галлия и твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$. В широких нанопроволоках возникают дополнительные механические напряжения, связанные с продуктами реакции селективного травления жертвенного слоя водным раствором плавиковой кислоты, приводящие к уменьшению критической длины. Для нанопроволок шириной порядка 450 нм при толщине 90 нм указанные дополнительные напряжения приводят к уменьшению критической длины приблизительно в 2,5 раза.

2. Подача переменного напряжения на планарный боковой затвор приводит к резонансному возбуждению механических колебаний подвешенных нанопроволок в направлении, перпендикулярном к поверхности подложки, причем такой способ допускает возбуждение высокоамплитудных, нелинейных колебаний. Механические колебания подвешенных нанопроволок приводят к многократному (как минимум, до 4 раз) изменению их кондактанса, что делает измерение кондактанса чувствительным способом детектирования колебаний. Подвешенные нанопроволоки, изогнутые вследствие потери ими механической устойчивости, демонстрируют нелинейный эффект уменьшения резонансной частоты при увеличении амплитуды их колебаний.

3. Отрыв квантовой точки одноэлектронного транзистора от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью позволяет существенно (как минимум, в 4 раза) увеличить его зарядовую энергию.

4. В одноэлектронном транзисторе с квантовой точкой, подвешенной на нанопроволоке, электронный транспорт ограничен не только эффектом кулоновской блокады, но также и дополнительной блокадой туннелирования («упругой блокадой»), возникающей вследствие того, что изменение числа электронов на квантовой точке сопровождается изменением величины изгиба нанопроволоки.

5. При подвешивании квантового точечного контакта сохраняется квантование его кондактанса и усиливается электрон-электронное взаимодействие в области сужения двумерного электронного газа вследствие отрыва от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью. В результате подвешивания становится более выраженным дополнительное, нецелочисленное плато квантования кондактанса при его значениях, близких к $0,7 \times 2e^2/h$ («0,7-аномалии»), где e - заряд электрона, h - постоянная Планка, что подтверждает теоретические представления о природе «0,7-аномалии», связанной с электрон-электронным взаимодействием.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК, а также 9 работ в сборниках тезисов российских и международных конференций. Полный список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора в работу заключался в участии в постановке целей и задач исследования, проектировании и контроле изготовления экспериментальных образцов, проведении экспериментов и подготовке экспериментальной установки (включая изготовление и проектирование некоторых из ее узлов и автоматизацию измерений), анализе и интерпретации экспериментальных данных, написании научных статей и тезисов конференций, а также представлении полученных результатов на научных семинарах и конференциях.

Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на лабораторных и институтских семинарах, на заседаниях Ученого совета ИФП СО РАН, а также на следующих российских и международных конференциях:

1. XI Российская конференция по физике полупроводников, приглашенный доклад (Санкт-Петербург, 2013)
2. 7th Russian-French workshop on Nanosciences and Nanotechnologies (Novosibirsk, 2013)
3. International conference on the physics of semiconductors, Seoul (Korea, Republic of), 25-30 Jul 2010
4. III Международный форум по нанотехнологиям (Москва, 2010)
5. XII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2010)
6. IX Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2009)
7. I Международный форум по нанотехнологиям (Москва, 2008)
8. Международная научная студенческая конференция “Студент и научно-технический прогресс” (Новосибирск, 2008)

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, изложены основные защищаемые положения, указаны их научная новизна и практическая ценность, дана краткая аннотация полученных результатов.

Первая глава посвящена краткому обзору литературы по тематике одноэлектронных транзисторов, квантовых точечных контактов, наноэлектромеханических систем и подвешенных наноструктур. На основе анализа существующей литературы сделан вывод о необходимости последовательного и детального изучения упругих свойств и особенностей

электронного транспорта в подвешенных наноструктурах, на основе которых изготавливаются наноэлектромеханические системы.

Во второй главе описывается технология изготовления экспериментальных образцов, а также методика проведения эксперимента. Экспериментальные образцы изготавливались на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, содержащих двумерный электронный газ и жертвенный слой $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ толщиной 400 нм. Латеральная геометрия образцов задавалась с помощью электронной литографии с последующим анизотропным плазмохимическим травлением. Подвешивание наноструктур производилось путем селективного вытравливания из-под них жертвенного слоя в водном растворе плавиковой кислоты.

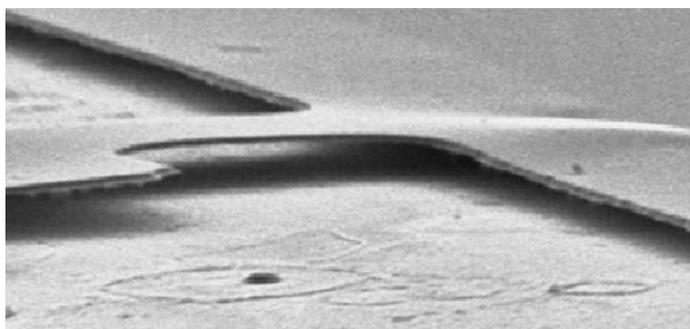


Рисунок 1. Изображение подвешенной мембраны, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа при падении электронного пучка под углом 10° к поверхности образца

Результаты, изложенные в работе, были получены с помощью двухточечных и четырехточечных измерений методом синхронного детектирования на низкой (12-700 Гц) частоте. Измерения производились при температурах 4,2 К и 500 мК.

В третьей главе изложены результаты исследования механических особенностей наноразмерных резонаторов, создаваемых на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, а также особенностей их использования в качестве функциональных элементов наноэлектромеханических систем на примере подвешенных нанопроволок.

В параграфе 3.1 приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о том, что подвешенные нанопроволоки, изготовленные на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, могут терять механическую устойчивость и изгибаться при длинах, превышающих некоторую критическую величину. Как известно, такое поведение является типичным для подвешенных наноструктур, содержащих намеренно введенные сжатые слои (что достигается, к примеру, введением индия в состав гетероструктур [2]). Однако, проявление этого эффекта, называемого эйлеровской неустойчивостью при продольном сжатии, в случае решеточно-согласованных гетероструктур GaAs/AlGaAs, которые принято считать почти свободными от механических напряжений, требует дополнительного изучения.

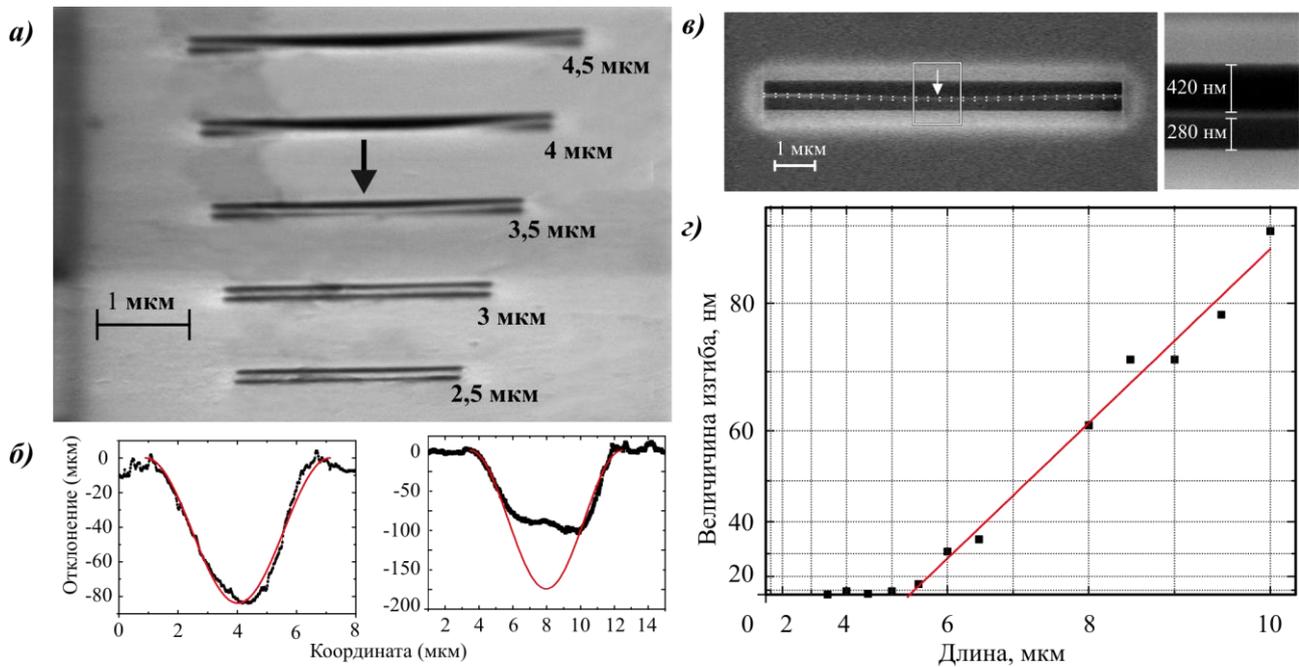


Рисунок 2. а) изображение, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа при падении электронного пучка под углом 10° к поверхности образца, демонстрирующее изгиб широких (450 нм) нанопроволок под действием упругих напряжений; б) примеры профилей изгиба широких нанопроволок, полученные с помощью атомно-силового микроскопа; в) пример изображения, полученного с помощью электронного микроскопа, демонстрирующего изгиб узких (50 нм) нанопроволок; г) величина изгиба узких нанопроволок как функция их длины. Масштаб квадратичный по обеим осям

Снимки, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, показывают (см. рисунок 2(а,б)), что широкие ($W = 450$ нм) нанопроволоки теряют механическую устойчивость и изгибаются в направлении, перпендикулярном плоскости поверхности образца (out-of-plane) при длинах, превышающих критическую величину (3,5 мкм). Экспериментально измеренное критическое значение составляет величину, почти втрое меньшую той, что предсказывает теория исходя из величин механических напряжений в слоях, составляющих нанопроволоку:

$$L_{cr} = 2\pi\sqrt{EI/T} \approx 9 \text{ мкм},$$

где $E = 8,6 \times 10^{10}$ Па – модуль Юнга, $I = t^3 W / 12$ – момент инерции поперечного сечения нанопроволоки, $T = EW \times 7t / 9 \times \Delta a / a$ – величина сжимающей силы, возникающей из-за механических напряжений в слоях $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$, составляющих $7/9$ толщины нанопроволоки, W – ширина нанопроволоки.

Экспериментально обнаруженное уменьшение критической длины по сравнению со своей теоретической оценкой свидетельствует о наличии дополнительных механических напряжений, существенно превосходящих те, что обусловлены несоответствием постоянных

решетки в гетероструктуре. Показано, что такие дополнительные механические напряжения могут возникать в результате химической модификации жертвенного слоя $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$, не полностью удаляемого с задней поверхности нанопроволок при селективном травлении.

В случае узких ($W = 50$ нм) нанопроволок критическая длина, начиная с которой они начинают изгибаться и терять устойчивость, совпадает со значением, предсказываемым теорией (5 мкм). Поскольку ширина нанопроволок в этом случае составляет величину меньшую их толщины ($t = 90$ нм), изгиб происходит в направлении, параллельном плоскости поверхности (in-plane) экспериментального образца (см. рисунок 2 (в)). Величина изгиба нанопроволок w как функция их длины L соответствует механическим напряжениям, обусловленным несоответствием постоянных решетки $\Delta a/a$ в слоях, составляющих нанопроволоки (см. рисунок 2 (г)).

$$w^2 = \frac{28}{9\pi^2} \frac{\Delta a}{a} L^2 - \frac{4}{3} W^2$$

Предположительно, в случае узких нанопроволок жертвенный слой более эффективно удаляется в процессе селективного травления, чем в случае широких нанопроволок, из-за улучшенного доступа травителя к материалу жертвенного слоя и, в результате, дополнительные механические напряжения в этом случае не индуцируются.

В параграфе 3.2 приведены экспериментальные результаты, демонстрирующие особенности использования подвешенных нанопроволок, изготовленных на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, в качестве наномеханических резонаторов. Показано, что колебания такого наномеханического резонатора можно возбуждать, подавая высокочастотный сигнал на боковой затвор, и детектировать, измеряя кондуктанс нанопроволоки на низкой (70 Гц) частоте (см. рисунок 3 (а)). Следует отметить, что обычно в работах [3] механические колебания детектируются путем измерения сигнала на частоте возбуждения, то есть на высокой частоте. Это требует использования таких громоздких приборов, как векторные анализаторы цепей, а также создает технологические сложности, связанные с кабельными электромагнитными резонансами. Предложенная же методика детектирования колебаний путем измерения сигнала на низкой частоте свободна от этих недостатков.

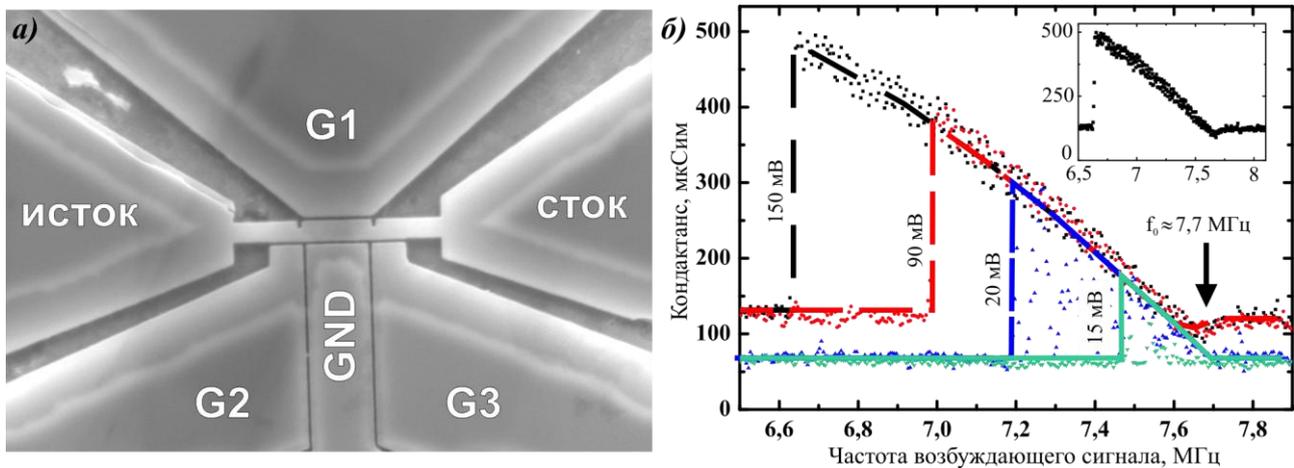


Рис. 3 а) Изображение подвешенной нанопроволоки – механического резонатора, полученное с помощью электронного микроскопа; механические колебания нанопроволоки возбуждались при приложении к затвору $G1$ высокочастотного сигнала б) механические резонансные колебания нанопроволоки, детектируемые путем измерения ее кондактанса; различные кривые соответствуют различной амплитуде высокочастотного возбуждающего сигнала (значение амплитуды указано рядом с кривыми).

Зависимость кондактанса нанопроволоки от частоты высокочастотного сигнала показана на рисунке. 3 (б). Различные кривые на графике соответствуют различным амплитудам возбуждающего сигнала. Сканирование по частоте производилось от больших частот к меньшим. Начиная с частоты 7,7 МГц, кондактанс начинает расти при уменьшении частоты, а затем резко падает до прежнего уровня. Такое поведение характерно для всех кривых, приведенных на рисунке, причем при увеличении амплитуды высокочастотного сигнала частота, при которой происходит резкое падение кондактанса (резонансная частота), уменьшается. Описанная ситуация соответствует высокоамплитудным, нелинейным механическим колебаниям резонатора. Однако, как правило, резонаторы с концами, оба из которых закреплены, напротив, демонстрируют увеличение резонансной частоты нелинейных колебаний при увеличении амплитуды возбуждающего их сигнала (“ужесточение” резонатора). Наблюдавшееся в нашем случае нелинейное уменьшение резонансной частоты с ростом амплитуды возбуждающегося сигнала можно объяснить тем, что нанопроволока была изначально изогнута вследствие потери механической устойчивости. Если описывать такой резонатор величиной отклонения центра нанопроволоки от положения равновесия, то эффективно такая система будет находиться в двукратном потенциале с локальным максимумом, соответствующим прямому положению. Изогнутость нанопроволоки подтверждается снимками, полученными с помощью электронного микроскопа. Величина изгиба нанопроволоки, оцененная с помощью снимков, составляет 50 нм. Зная величину изгиба и сдвиг резонансной частоты при увеличении амплитуды возбуждающего сигнала, можно оценить амплитуду механических колебаний из следующего соотношения [4]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = -\frac{3}{4} \frac{a^2}{x_0^2}$$

По этим оценкам, максимальная амплитуда колебаний в нашем случае составляла 20 нм, что, в сравнении с другими работами [5], является большой величиной.

Также следует отметить, что частота $f_0 = 7,7 \text{ МГц}$ (см. рисунок 3 (б)), равная собственной частоте малоамплитудных, линейных механических колебаний не соответствует оценке для случая ненапряженной нанопроволоки:

$$f_0 = 1,027 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 10 \text{ МГц}$$

Однако, экспериментально измеренная величина f_0 с хорошей точностью совпадает с результатом численного расчета собственной частоты линейных колебаний изогнутой нанопроволоки (алгоритм такого расчета приводится в работе [6]).

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению особенностей электронного транспорта, ограниченного эффектом кулоновской блокады, в подвешенном одноэлектронном транзисторе. Такие особенности были выявлены путем прямого сравнительного эксперимента, то есть, путем проведения идентичных серий измерений кондактанса квантовой точки как функции напряжений на затворах и постоянного напряжения исток-сток на экспериментальном образце до и после его подвешивания. Одноэлектронный транзистор представлял собой квантовую точку с линейными размерами около 600 нм, отделенную от областей истока и стока сужениями, размещенную в середине нанопроволоки длиной 2 мкм (см. рисунок 4 (а)). Образец оснащался двумя боковыми затворами, расположенными на расстоянии 300 нм от квантовой точки.

В параграфе 4.1 описаны экспериментальные результаты, полученные на неподвешенном одноэлектронном транзисторе (см. рисунок 4 (б)). Показано, что изготовленный экспериментальный образец действительно демонстрирует явление кулоновской блокады, выражающееся в понижении кондактанса при определенных значениях напряжений на затворах и напряжения исток-сток (темные области на рисунке 4 (б)). Зарядовая энергия, определяемая как диапазон напряжений исток-сток, в котором кондактанс понижен, составляет 3,5 мэВ (40 К в температурных единицах).

В параграфе 4.2 приведены результаты аналогичных измерений, проведенных после операции жидкостного селективного травления, т.е. после подвешивания одноэлектронного транзистора. Обнаружено, что экспериментальный образец также демонстрирует кулоновскую блокаду, но с ярко выраженными особенностями (см. рисунок 4 (в)). Во-первых, зарядовая энергия квантовой точки после подвешивания резко возрастает более чем в 4 раза до 170 К в температурных единицах. Во-вторых, зарядовая энергия становится

зависимой от числа электронов на квантовой точке, контролируемого затворными напряжениями, изменяясь в пределах от 4 до 15 мэВ. В-третьих, помимо кулоновской блокады наблюдается дополнительная блокада туннелирования, проявляющаяся в слипании темных областей, соответствующих режиму кулоновской блокады.

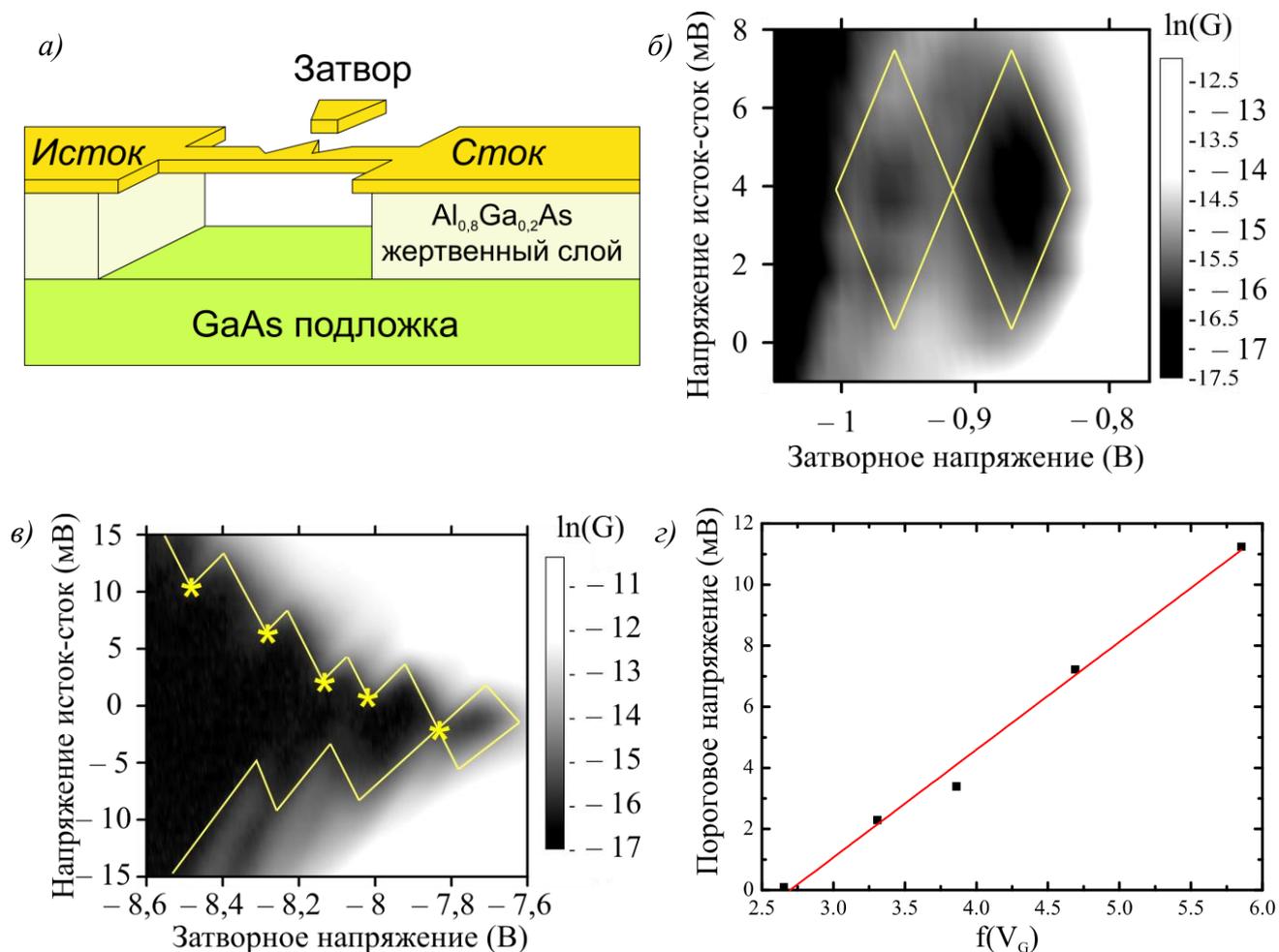


Рисунок 4. а) схематичное изображение подвешенного одноэлектронного транзистора (б,в) Кондактанс одноэлектронного транзистора до (б) и после (в) подвешивания как функция затворного напряжения и напряжения исток-сток. Темные области соответствуют блокаде туннелирования и близким к нулю величинам кондактанса. (г) величина порогового напряжения пробоя блокады туннелирования как функция затворного напряжения (см. пояснения в тексте), подтверждающая гипотезу об “упругой” блокаде туннелирования

Увеличение зарядовой энергии после подвешивания одноэлектронного транзистора может объясняться уменьшением емкости квантовой точки в результате отрыва от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью. Предположительно, тот факт, что величина зарядовой энергии после подвешивания становится зависимой от числа электронов на квантовой точке, объясняется изменением размера квантовой точки вместе с числом электронов.

Слипание ромбов кулоновской блокады и проявление дополнительной блокады туннелирования можно объяснить тем, что нанопроволока, на которой подвешена квантовая точка, может изгибаться, причем величина ее изгиба меняется дискретным образом вместе с числом электронов на квантовой точке. При этом, чтобы добавить к уже имеющимся на квантовой точке электронам еще один, необходимо затратить энергию не только на зарядку квантовой точки, но также и на изменение величины изгиба нанопроволоки. Это явление, предсказанное в теоретической работе [7], можно назвать “упругой” блокадой туннелирования. Также в работе [7] предсказывается функциональная зависимость порогового напряжения V_{th} , равного значениям напряжения исток-сток V_{SD} в точках, обозначенных символами “*” на рисунке 4 (в), от затворного напряжения V_G , от емкости квантовой точки $C(V_G)$, и от емкости между квантовой точкой и затвором $C_G(V_G)$:

$$V_{th} = \alpha f(V_g) = \alpha \left(\frac{C_G^2(V_G)}{C(V_G)C_{G0}} \right)^2 \frac{V_G^2}{\sqrt{1 - (V_G/V_{cr})^2}},$$

Где α, V_{cr} - подгоночные коэффициенты, а C_{G0} - емкость квантовой точки при нулевом изгибе нанопроволоки. Рисунок 4 (г) демонстрирует, что экспериментальные результаты действительно описываются предложенной зависимостью, что может рассматриваться как подтверждение гипотезы об “упругой” блокаде туннелирования.

Пятая глава посвящена исследованию баллистического электронного транспорта в подвешенном квантовом точечном контакте. Результаты, описываемые в этой главе, были получены в результате прямого экспериментального сравнения подвешенного квантового точечного контакта и того же самого образца до подвешивания (аналогично результатам, изложенным в четвертой главе). Квантовый точечный контакт представлял собой литографически заданное сужение двумерного электронного газа, имеющее ширину 450 нм, снабженное двумя боковыми затворами (см. рисунок 5 (а)).

Результаты, изложенные в **параграфе 5.1**, показывают, что до подвешивания кондактанс G изготовленного квантового точечного контакта как функция затворных напряжений V_{G1}, V_{G2} демонстрировал плато квантования при значениях кондактанса, равных целым числам квантов кондактанса (см. рисунок 5 (б))

$$G = N \times 2e^2 / h$$

Приложение различающихся по величине напряжений к затворам не приводило к существенному изменению этой картины.

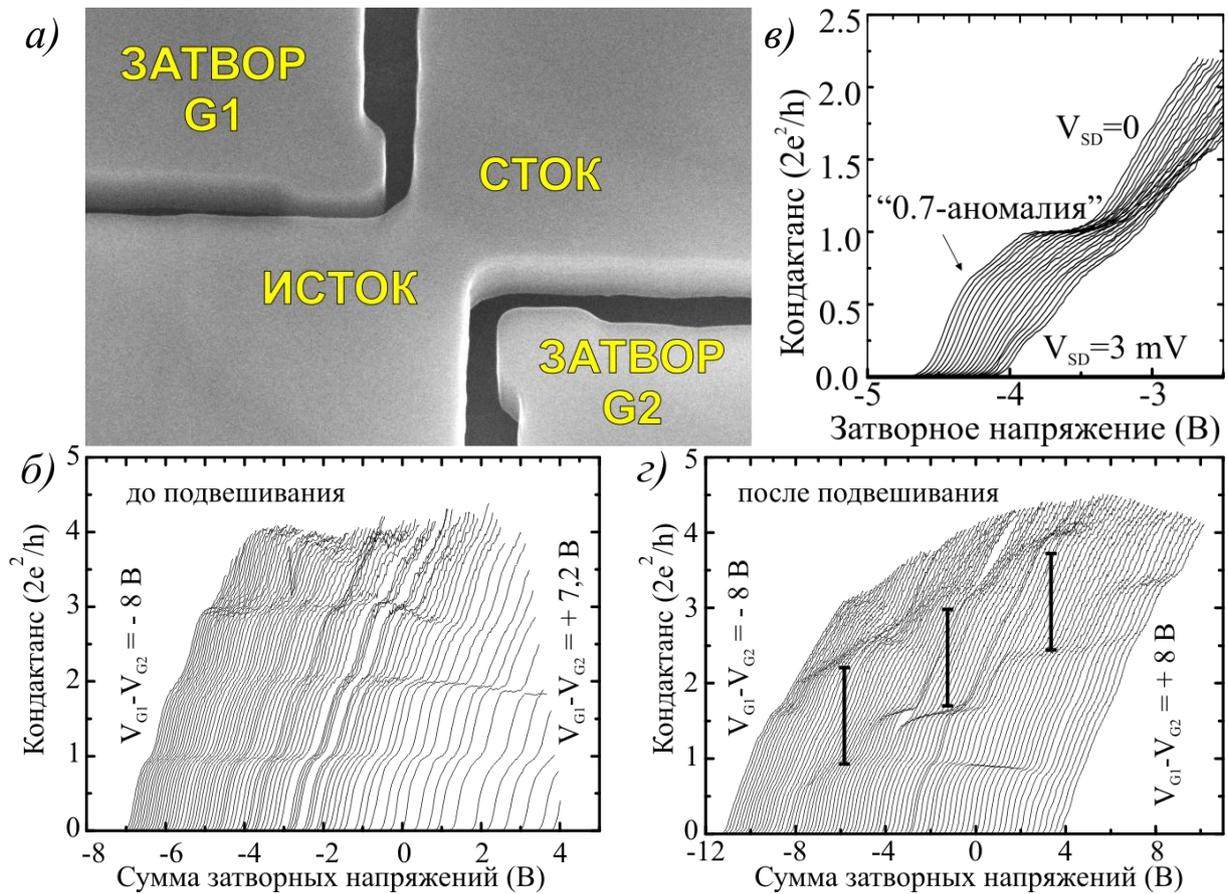


Рис. 5. а) изображение подвешенного квантового точечного контакта, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа при падении электронного пучка под углом 30° к поверхности образца; б) кондактанс квантового точечного контакта до подвешивания как функция суммы затворных напряжений. Различные кривые на графике соответствуют различным значениям разности затворных напряжений; в) дополнительное плато квантования кондактанса (“0,7-аномалия”), проявляющееся после подвешивания квантового точечного контакта; г) кондактанс подвешенного квантового точечного контакта как функция суммы затворных напряжений.

В параграфе 5.2 показано, что после подвешивания тот же самый экспериментальный образец также демонстрировал квантование кондактанса при изменении затворных напряжений, но наблюдались и ярко выраженные особенности. В частности, при приложении различающихся затворных напряжений становилось видно дополнительное плато – “0,7-аномалия” (см. рисунок 5 (в)). Влияние ассиметричного приложения затворных напряжений на зависимость $G(V_{G1} + V_{G2})$ иллюстрирует также рисунок 5 (г). В то время как на рисунке 5 (б), описывающем неподвешенный квантовый точечный контакт можно видеть горизонтальные линии, соответствующие целому числу квантов кондактанса, на рисунке 5 (г) видны ступенчатые кривые. Иными словами, в случае неподвешенного квантового точечного контакта зависимости $G(V_{G1} + V_{G2})$ демонстрируют как четные, так и нечетные плато независимо от $(V_{G1} - V_{G2})$, в то время как после подвешивания эти кривые

демонстрируют либо четные, либо нечетные плато, в зависимости от $(V_{G1} - V_{G2})$, причем при фиксированном значении $(V_{G1} - V_{G2})$ происходят двойные скачки (на рисунке 5 (г) эти двойные скачки изображены отрезками).

Как известно, физическая природа “0,7-аномалии” связана с электрон-электронным взаимодействием [8]. Поэтому тот факт, что эта аномалия не наблюдалась до подвешивания квантового точечного контакта и проявилась после его подвешивания, можно интерпретировать как усиление взаимодействия между электронами. Предположение о таком усилении разумно, поскольку после подвешивания электрическое поле, создаваемое каждым из электронов, преимущественно ограничено внутри мембраны, отделенной от подложки, и обладающей большой диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 13$. Грубую численную оценку для этого эффекта можно получить, сравнив энергию взаимодействия двух ближайших электронов до и после подвешивания в рамках простой электростатической модели. До подвешивания электрический потенциал каждого из электронов складывается с потенциалом единственного своего изображения, находящегося симметрично с исходным зарядом относительно поверхности, и энергию взаимодействия можно выразить как

$$U_{e-e} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \left(1 + \frac{\epsilon-1}{\epsilon+1} \frac{r}{\sqrt{r^2 + t^2}} \right)$$

После подвешивания потенциал электрона складывается с потенциалом бесконечного числа порожденных им изображений, расположенных с обеих сторон от подвешенной мембраны:

$$U_{e-e} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \left(1 + 2 \sum_{l=1}^{\infty} \left(\frac{\epsilon-1}{\epsilon+1} \right)^l \frac{r}{\sqrt{r^2 + (lt)^2}} \right)$$

Численные оценки показывают, что после подвешивания энергия взаимодействия ближайших электронов должна увеличиться приблизительно с 7 до 9 мэВ. Для более далеких соседей следует ожидать большего относительного увеличения энергии взаимодействия. Следует отметить, что расстояние между уровнями размерного квантования, которое можно извлечь из зависимостей кондактанса от напряжения исток-сток [9], составляет лишь 5 мэВ, то есть, величину, сравнимую с энергией электрон-электронного взаимодействия. Это делает систему существенно неодночастичной и, может приводить к смещению и переклассификации энергетических уровней.

Сравнивая полученные результаты с другими известными работами [10], посвященными вигнеровской кристаллизации и переходу зигзаг-струна в квантовых точечных контактах, можно предположить, что наблюдавшееся чередование четных и

нечетных плато может быть также связано с усиленным электрон-электронным взаимодействием.

Основные результаты и выводы работы:

1. Показано, что резонансные механические колебания подвешенных нанопроволок, создаваемых на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, можно эффективно возбуждать путем приложения высокочастотного сигнала к близлежащему боковому затвору, в том числе и в высокоамплитудном, существенно нелинейном режиме (с амплитудой до 20 нм). Продемонстрировано, что в случае широких нанопроволок (имеющих ширину 600 нм и толщину 90 нм) такие колебания возбуждаются в направлении, перпендикулярном подложке. Предложена физическая модель механизма возбуждения таких колебаний при приложении высокочастотного сигнала к боковому затвору за счет взаимодействия нанопроволоки и подложки. Продемонстрировано, что механические колебания подвешенных нанопроволок можно детектировать путем измерения их усредненного по времени кондактанса на частоте, много меньшей частоты колебаний, не проводя измерения сигналов на частоте возбуждения (то есть на высокой частоте).

2. Показано, что упругие напряжения в подвешенных наноструктурах, создаваемых на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs, оказывают существенное влияние на механические свойства этих наноструктур, приводя к их деформациям, изменению собственных частот механических колебаний и изменению характера высокоамплитудных, нелинейных колебаний, а потому требуют обязательного учета при изготовлении наноэлектромеханических систем.

3. Продемонстрировано, что подвешивание одноэлектронного транзистора приводит к существенному увеличению его зарядовой энергии до 170 К в температурных единицах, что связано с отрывом от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью. Также показано, что подвешивание приводит к появлению особенностей явлений кулоновской блокады и одноэлектронного туннелирования. В частности, появление у системы дополнительных степеней свободы приводит к тому, что в подвешенном одноэлектронном транзисторе, помимо кулоновской блокады, может наблюдаться дополнительная блокада туннелирования («упругая блокада»).

4. Показано, что при подвешивании квантового точечного контакта сохраняется квантование кондактанса, однако, подвешивание приводит также к проявлению особенностей баллистического электронного транспорта, свидетельствующих об усилении электрон-электронного взаимодействия из-за отрыва от подложки, обладающей высокой диэлектрической проницаемостью. В частности, подвешивание делает более выраженной «0,7-аномалию» кондактанса, а также приводит возникновению двойных скачков между плато квантования и к чередованию четных и нечетных плато при изменении разницы затворных напряжений.

Наноэлектромеханика является новым направлением в физике твердого тела, возникшим на стыке двух областей исследования – механики твердого тела и электронного транспорта в твердых телах. Закономерным образом синтез этих двух областей становится в настоящее время чем-то большим, чем их суммой, приводя к появлению новых объектов исследования – наноэлектромеханических систем, – в целом не являющихся аналогами своих более крупноразмерных предшественников – микроэлектромеханических систем, – поскольку электронный транспорт на наномасштабах требует квантового описания. Развитие этих систем приведет к тому, что они будут демонстрировать квантовую природу и с точки зрения своих механических свойств. Можно сделать прогноз, что в ближайшем будущем интенсивность исследований в области наноэлектромеханики существенно возрастет и это в дальнейшем приведет не только к формированию целостной картины фундаментальных физических закономерностей, описывающих наноэлектромеханические системы, но и к реализации их прикладного потенциала.

Результаты работы изложены в следующих публикациях:

[A1] A. A. Shevyrin, A. G. Pogosov, M. V. Budantsev, A. K. Bakarov, A. I. Toropov, S. V. Ishutkin, E. V. Shesterikov, A. S. Kozhukhov, S. S. Kosolobov and T. A. Gavrilova. The role of Euler buckling instability in the fabrication of nanoelectromechanical systems on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // Appl. Phys. Lett. – 2012 – vol. 101, p. 241916

[A2] A. A. Shevyrin, A. G. Pogosov, M. V. Budantsev, A. K. Bakarov, A. I. Toropov, S. V. Ishutkin, E. V. Shesterikov and A. S. Arakcheev. High-amplitude dynamics of nanoelectromechanical systems fabricated on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures // Appl. Phys. Lett. – 2013 – vol. 103, p. 131905

[A3] А. Г. Погосов, М. В. Буданцев, А. А. Шевырин, А. Е. Плотников, А. К. Бакаров и А. И. Торопов. Блокада туннелирования в подвешенном одноэлектронном транзисторе // Письма в ЖЭТФ – 2008 – т. 87, с. 176.

[A4] А. Г. Погосов, М. В. Буданцев, А. А. Шевырин, А. Е. Плотников, А. К. Бакаров и А. И. Торопов. Резонансный пробой кулоновской блокады механическими колебаниями квантовой точки // Письма в ЖЭТФ – 2009 – т. 90, с. 626

[A5] А. Г. Погосов, М. В. Буданцев, А. А. Шевырин, А. Е. Плотников, А. К. Бакаров и А. И. Торопов. Высокотемпературная кулоновская блокада // Вестник НГУ, серия Физика – 2009 – т. 4, с. 53

[A6] A. G. Pogosov, M. V. Budantsev, A. A. Shevyrin, A. E. Plotnikov, A. K. Bakarov, A. I. Toropov. Mechanical vibrations induced resonant breakdown of the Coulomb blockade // AIP Conf. Proc. – 2011 – vol. 1399, p. 395

[A7] А.А. Шевырин, А.Г. Погосов, М.В. Буданцев и др. Эйлеровская неустойчивость наноэлектромеханических систем, изготавливаемых на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs.

Сборник тезисов XI Российской конференции по физике полупроводников, с. 65 (2013)
(приглашенный доклад)

[A8] A. A. Shevyrin, A. G. Pogosov, M. V. Budantsev, A. K. Bakarov, A. I. Toropov, S. V. Ishutkin, E. V. Shesterikov, A. S. Kozhukhov, S. S. Kosolobov, and T. A. Gavrilova. Mechanical stresses and Euler buckling instability in nanoelectromechanical systems fabricated on the basis of GaAs/AlGaAs heterostructures. 7th Russian-French workshop on Nanosciences and Nanotechnologies Abstract Book, p. 71, Novosibirsk (2013)

[A9] А. А. Шевырин, А. Г. Погосов. Нанозлектромеханический одноэлектронный транзистор. 12 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и нанозлектронике. Тезисы докладов, с. 100. Санкт-Петербург (2010).

[A10] А. Г. Погосов, М. В. Буданцев, А. А. Шевырин, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, А. Е. Плотников. Нанозлектромеханический одноэлектронный транзистор. Международный конкурс работ молодых ученых в области нанотехнологий. Тезисы докладов. Москва, 2010.

[A11] A. G. Pogosov, M. V. Budantsev, A. A. Shevyrin, A. K. Bakarov, A. I. Toropov, A. E. Plotnikov. 30th International Conference on the Physics of Semiconductors Thesises. Seoul, Korea, 2010.

[A12] Резонансный пробой кулоновской блокады механическими колебаниями одноэлектронного транзистора. Шевырин А.А.. XLVIII Международная студенческая научная конференция «Студент и научно-технический прогресс»: Тезисы докладов, с. 227. Новосибирск (2010).

[A13] Пробой кулоновской блокады в одноэлектронном транзисторе, обусловленный возбуждением собственных мод его механических колебаний. А. Г. Погосов, М. В. Буданцев, А. А. Шевырин, А. Е. Плотников, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, Д. А. Насимов Сборник тезисов докладов участников IX Российской конференции по физике полупроводников, с. 126. Новосибирск (2009).

[A14] Высокотемпературный подвешенный одноэлектронный транзистор. А. А. Шевырин, А. Г. Погосов, М. В. Буданцев. Сборник тезисов докладов участников Международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий (Международный форум по нанотехнологиям), с. 37-38. Москва (2008).

[A15] Кулоновская блокада в подвешенном одноэлектронном транзисторе. А. А. Шевырин. Материалы XLVI Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Физика, с. 174-175. Новосибирск (2008).

Список цитируемой литературы:

- [1] G. A. Steele, A. K. Hüttel, B. Witkamp, M. Poot, H. B. Meerwaldt, L. P. Kouwenhoven, and H. S. J. van der Zant. Strong Coupling Between Single-Electron Tunneling and Nanomechanical Motion // *Science* – 2009 – vol. 325, no. 5944, pp. 1103-1107
- [2] S. Mendach, O. Schumacher, Ch. Heyn, S. Schnüll, H. Welsch and W. Hansen. Preparation of curved two-dimensional electron systems in InGaAs/GaAs-microtubes // *Physica E* – 2004 – vol. 23, pp. 274-279
- [3] H. X. Tang, X. M. H. Huang, M. L. Roukes, M. Bichler and W. Wegscheider. Two-dimensional electron-gas actuation and transduction for GaAs nanoelectromechanical systems // *Appl. Phys. Lett.* – 2002 – vol. 81, no. 20, pp. 3879-3881
- [4] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теоретическая физика. Том I. Механика. М.: Наука – 1988 – сс. 112-122
- [5] L. G. Villanueva, E. Kenig, R. B. Karabalin, M. H. Matheny, Ron Lifshitz, M. C. Cross, and M. L. Roukes. Surpassing Fundamental Limits of Oscillators Using Nonlinear Resonators // *Phys. Rev. Lett.* – 2013 – vol. 110, 177208 – 1 – 5.
- [6] L. Nicu and C. Bergaud. Experimental and theoretical investigations on nonlinear resonances of composite buckled microbridges // *J. Appl. Phys.* – 1999 – vol. 86, no. 10, pp. 5835-5840
- [7] N. Nishiguchi. Elastic deformation blockade in a single-electron transistor // *Phys. Rev. B* – 2003 – vol. **68**, 121305(R) – 1 – 4
- [8] A. P. Micolich. What lurks below the last plateau: experimental studies of the $0.7 \times 2e^2/h$ conductance anomaly in one-dimensional systems // *J. Phys.: Condens. Matter* – 2011 – vol. 23, pp. 443201 – 1 – 73
- [9] C Rossler, S Baer, E de Wiljes, P-L Ardel, T Ihn, K Ensslin, C Reichl and W Wegscheider. Transport properties of clean quantum point contacts // *New Journal of Physics* – 2011 – vol. 13 pp. 113006 – 1 – 16.
- [10] W. K. Hew, K. J. Thomas, M. Pepper, I. Farrer, D. Anderson, G. A. C. Jones, and D. A. Ritchie. Incipient Formation of an Electron Lattice in a Weakly Confined Quantum Wire // *Phys. Rev. Lett.* – 2009 – vol. 102, no. 5, pp. 056804 – 1 – 4
- [11] А. В. Чаплик. Неустойчивость квазиодномерной электронной цепочки и структурный переход “струна-зигзаг” // *Письма в ЖЭТФ* – 1980 – т. 31, вып. 5, сс. 275-278