

на правах рукописи

Ю. Юкчева

Юкчева Юлия Сергеевна

**Оболочки с двумерным электронным газом
и их магнитотранспортные свойства**

Специальность

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК

2009

Работа выполнена при Учреждении Российской академии наук Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Воробьев Александр Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Кибис Олег Васильевич

кандидат физико-математических наук
Буданцев Максим Владимирович

Ведущая организация:

Ордена Трудового Красного Знамени Институт физики металлов Уральского отделения Российской Академии Наук, г. Екатеринбург

Защита состоится 22 декабря 2009г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Учреждении Российской академии наук Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН по адресу: 630090 Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Институте физики полупроводников им. А.В.Ржанова Сибирского отделения РАН.

Автореферат разослан 21 ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, доцент



А. Г. Погосов

Введение

Прогресс полупроводниковой технологии, в частности, эпитаксиальных методов роста, во второй половине XX века сделал возможным получение высококачественных пленок толщиной порядка фермиевской длины волны, в которых проявляется размерное квантование, и приборов на их основе. Уменьшение влияния механизмов рассеяния на ионизованной примеси путем введения в структуры спейсеров привел к созданию структур с высокоподвижным двумерным электронным газом; к настоящему времени в гетероструктурах GaAs/AlGaAs достигнута подвижность порядка нескольких десятков миллионов $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [1], что соответствует длине свободного пробега электрона в несколько сотен микрон. Плоские структуры с двумерным электронным газом стали объектом интенсивных исследований и способствовали открытию новых физических эффектов, в т.ч. целочисленного и дробного квантового эффекта Холла [2, 3], квантования проводимости в квазиодномерных проводниках в баллистическом режиме и др. Полевые транзисторы на основе двумерного электронного газа в системе GaAs/AlGaAs широко используются в быстродействующих устройствах.

Создание трехмерных структур из двумерных гетеропленок [4] открывает новые возможности в разработке приборов и исследовании физических эффектов. Оболочки с двумерным электронным газом – новые физические объекты, в которых ожидается ряд уникальных свойств вследствие влияния нескольких факторов:

1. Геометрический. Баллистический электрон в изогнутой пленке может испытывать рассеяние и отражаться [5, 6].
2. Особое распределение механических напряжений и соответствующие изменения зонной структуры. Было показано, что областям сжатия и растяжения в гофрировке соответствуют потенциальные барьеры и ямы глубиной до 1 эВ [7], а в трубке ширина запрещенной зоны возрастает у внутренней поверхности и уменьшается у внешней [8].

3. «Изменение» внешних полей: помещение двумерного электронного газа на цилиндрической поверхности в магнитное поле таким образом, чтобы вектор напряженности поля был перпендикулярен оси цилиндра, приведет к пространственной неоднородности перпендикулярной поверхности компоненты магнитного поля [9].

По сравнению с известными методами создания неоднородного магнитного поля в двумерном газе [21-28], помещение его на цилиндрическую поверхность дает следующие преимущества: а) возможность создания больших градиентов магнитного поля ($>10^6$ Т/м), б) возможность менять величину градиента *in situ*.

Цель исследования

Целями данной диссертационной работы являлись изготовление нового физического объекта – двумерного газа носителей заряда на цилиндрической поверхности и исследование его магнитотранспортных свойств. Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Изготовление оболочек с двумерным газом носителей заряда на основе гетеропереходов GaAs/InGaAs, InAs/InGaAs, Si/SiGe с токовыми и потенциальными контактами;
2. Исследование гальваномагнитных эффектов в изготовленных оболочках в классических и квантующих магнитных полях;
3. Расчет зависимостей сопротивлений двумерного электронного газа на цилиндрической поверхности от магнитного поля и сравнение результатов расчета с наблюдениями.

Научная новизна

1. Изготовлены оболочки, содержащие высокоподвижный ($>10^5$ см²/(В·сек)) двумерный электронный газ на цилиндрической поверхности.
2. Экспериментально показано, что отношение сопротивлений двумерного электронного газа на цилиндрической поверхности, измеряемых

вдоль направления протекания тока (вдоль направляющей цилиндрической поверхности) при противоположных направлениях поперечного магнитного поля, достигает 10^4 , если градиент нормальной к поверхности компоненты магнитного поля не меняет знака между точками измерения сопротивлений.

Научная и практическая значимость

Предложены и реализованы методики:

- изготовления оболочек с высокоподвижным двумерным электронным газом,
- электрической изоляции оболочек от проводящих подложек и буферных слоев,
- контролируемого локального изменения кривизны оболочек путем нанесения на нее пленки диоксида кремния и последующего локального воздействия на нее электронным пучком.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На цилиндрической поверхности с радиусом кривизны порядка десятков микрон возможно формирование двумерного электронного газа высокой подвижности ($> 10^5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Это достигается контролируемым сворачиванием тонких свободных пленок под действием встроенных механических напряжений.
2. Магнитосопротивление двумерного электронного газа высокой подвижности на цилиндрической поверхности, измеренное при протекании тока вдоль направляющей этой поверхности, асимметрично по направлению магнитного поля, перпендикулярного образующей цилиндрической поверхности: отношение сопротивлений, измеренных при противоположных направлениях магнитного поля величиной 1 Тл и более, достигает 10^4 . Эта величина зависит от положения точек измерения сопротивления и максимальна, если градиент нормальной к

поверхности компоненты магнитного поля не меняет знака между этими точками.

3. В двумерном электронном газе на цилиндрической поверхности положение экстремумов сопротивления, измеряемого при протекании тока вдоль направляющей цилиндрической поверхности, определяется максимальным значением нормальной к поверхности компоненты магнитного поля между точками измерения сопротивления как для целочисленного, так и для дробного квантового эффекта Холла.
4. Реализуемо контролируемое локальное изменение диаметра оболочки, содержащей пленку диоксида кремния, локальным воздействием электронным пучком.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на:

14th, 15th, 16th International Symposiums "Nanostructures: Physics and Technology". Россия, Санкт-Петербург (2006), Новосибирск (2007), Владивосток (2008);

9^{ая} Российская конференция "Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V". Россия, Томск, 2006;

International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics. Japan, Atsugi, 2006;

7-я Российская конференция по физике полупроводников. Россия, Москва, 2005;

Autumn School on Materials Science and Electron Microscopy. Germany, Berlin, 2005.

Публикации

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 18 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 52 наименования. Общий объем диссертации – 109 страниц, включая 42 иллюстрации.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследования, приведены основные результаты работы и обоснована их научная новизна и практическая значимость, а так же положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященный целочисленному эффекту Холла, модели краевых состояний и расчету сопротивлений на ее основе для случая постоянного и переменного числа каналов. Сделан обзор экспериментальных и теоретических работ по транспорту носителей заряда в неоднородном магнитном поле.

Решение уравнения Шредингера для электрона в магнитном поле [14] дает энергетический спектр вида:

$$E = \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*} + \frac{\hbar e B_z}{m^*} \left(n + \frac{1}{2} \right) \pm \frac{1}{2} g \mu_B B_z;$$

Это выражение для полной энергии электрона включает в себя кинетическую энергию движения параллельно вектору индукции магнитного поля, дискретную составляющую, отвечающую за движение электрона в плоскости, перпендикулярной вектору индукции магнитного поля, и зеемановское расщепление по спину.

В случае двумерного газа носителей заряда энергетический спектр в магнитном поле становится полностью дискретным:

$$E = E_i + \frac{\hbar e B_z}{m^*} \left(n + \frac{1}{2} \right) \pm \frac{1}{2} g \mu_B B_z; \text{ где } E_i \text{ – энергия размерного квантования.}$$

Уровни энергии - уровни Ландау – эквидистантны, расстояние между ними пропорционально магнитному полю: $\Delta E = \hbar e V / m^*$. Учет конечных размеров образца приводит к конечному числу состояний на каждом уровне:

$N_L = eB/h$. При увеличении магнитного поля уровень Ферми последовательно пересекают уровни Ландау и локализованные состояния между ними, что является причиной осцилляций продольного сопротивления (осцилляции Шубникова - де Гааза) и ступенчатой зависимости холловского сопротивления (целочисленный квантовый эффект Холла), впервые экспериментально обнаруженной К. фон Клитцингом в 1980 году.

Учет конечных размеров образца привел Гальперина [15] к идее краевых состояний, существование которых также объясняет квантование холловского сопротивления. Эти состояния появляются в результате пересечения уровня Ферми и уровней Ландау у краев образца, где краевой потенциал поднимает их вверх по энергии. Классическим аналогом таких состояний является незавершенная циклотронная орбита, которая, отражаясь от края, смещается вдоль него. Направление движения электронов по краевым состояниям определяется только направлением внешнего магнитного поля и не зависит, в частности, от направления электрического поля. Бюттикер [16] продолжил идею Гальперина, модифицировав формулы Ландауэра для образца с произвольным количеством омических контактов:

$$I_i = \frac{e}{h} \left(n_i \mu_i + \sum_{j \neq i} T_{ij} \mu_j \right)$$

Формализм Ландауэра-Бюттикера дает возможность расчета транспортных характеристик образца с множеством контактов, каждый из которых может иметь свой электрохимический потенциал. Одной из таких ситуаций является случай отражения краевых каналов затвором, пересекающим образец [17].

Транспорт носителей заряда в двумерных системах при наличии градиента магнитного поля рассматривался теоретически и экспериментально. Экспериментально неоднородность магнитного поля создавалась несколькими путями: 1) напылением ферромагнетика либо сверхпроводника на часть образца [10, 11, 12], 2) геометрически: гетеропленка с ДЭГ выращивалась на фасетированной поверхности [13].

Локальная неоднородность магнитного поля приводила к появлению небольшой асимметрии продольного сопротивления по направлению магнитного поля ($R_{xx}(B)/R_{xx}(-B) < 10$), существующей как в классических, так и в квантовых магнитных полях. Причиной наблюдаемой асимметрии является неоднородность распределения поля и плотности тока в образцах с градиентом магнитного поля, показанная в расчетах [18, 19].

Обзор литературы по данному вопросу позволяет сделать следующие выводы: планарный двумерный электронный газ давно и активно исследуется; к настоящему времени физика гальваномагнитных явлений в нем хорошо изучена. Магнитотранспорт носителей заряда в неоднородных магнитных полях изучен существенно хуже, и совсем мало изучены эффекты, возникающие в плавно меняющемся в пространстве магнитном поле, что связано с трудностью реализации таких полей. Пробел в этой области знаний могли бы восполнить исследования магнитотранспорта в двумерном газе носителей заряда, помещенном на цилиндрическую поверхность; при этом требуется надежная методика изготовления таких объектов.

Во второй главе изложена методика изготовления GaAs/InGaAs оболочек с двумерным электронным газом на цилиндрической поверхности, предназначенных для гальваномагнитных измерений.

Технология изготовления цилиндрических оболочек из напряженных гетеропленок основана на использовании напряжения в пленках, имеющегося вследствие рассогласования по величине постоянных решеток слоев, составляющих гетеропленку [4]. В данной работе эта технология использована для изготовления оболочек с двумерным электронным газом. Используются гетероструктуры на основе GaAs/AlGaAs, выращенные методом МЛЭ (R. Hey, PDI, Berlin; А.И Торопов и А.К. Бакаров, ИФП СО РАН). Для изготовления свернутых холловских мостиков применялось двухэтапное селективное травление: первый этап определял стартовый край сворачивания, второй геометрию холловской полоски и изоляцию между

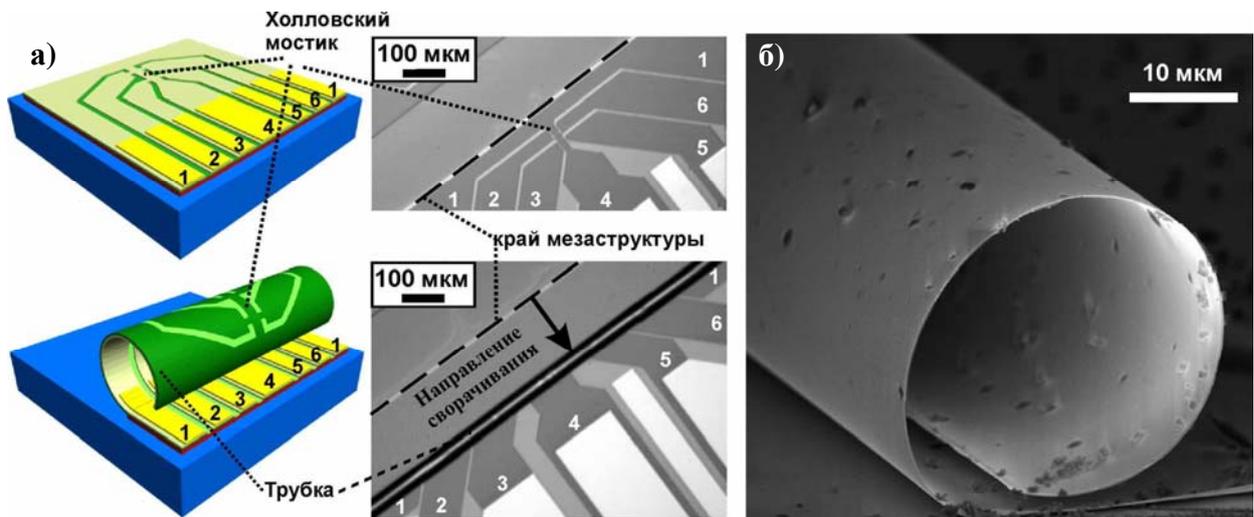


Рис. 1 Получение свернутых холловских мостиков: **а)** размещение контактов (слева – схематичные изображения, справа – фотографии образцов, сверху – исходная плоская структура, снизу – та же структура после сворачивания). Цифрами обозначены контакты: 1 и 4 – токовые, 2,3,5,6 – потенциальные; **б)** СЭМ изображение торца свертка, $R = 24$ мкм.

контактами. Мостики были ориентированы в направлениях $[100]$ или $[\bar{1}10]$. При селективном травлении жертвенного слоя формировался сектор цилиндра или виток спирали с контактами, соответственно. Рисунок 1 иллюстрирует получение свернутых холловских мостиков радиусом около 24 мкм.

В третьей главе представлены результаты гальваномагнитных измерений в плоских гетероструктурах и оболочках и их анализ.

§ 3.1 описывает результаты гальваномагнитных измерений в планарной гетероструктуре GaAs/InGaAs с одиночными модулировано легированными барьерами и двухконтактных цилиндрических оболочках с каналом, ориентированным вдоль образующей поверхности. Показано, что, по сравнению с плоской структурой, в оболочке осцилляции Шубникова-де Гааза подавлены, магнитосопротивление выросло.

§ 3.2 посвящен гальваномагнитным измерениям в планарной гетероструктуре с квантовой ямой и короткопериодной сверхрешеткой GaAs/AlAs, электроны в которой локализованы в X-минимумах зоны проводимости AlAs [21] (рис.2а). Результаты гальваномагнитных измерений в сильных магнитных полях, от -28 до 28 Тл при $T = 30$ мК показаны на рис

2б. Измерения выполнены в лаборатории сильных магнитных полей г. Гренобль совместно с D. Maude. Подвижность электронов в структурах составляла $434000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; линейная зависимость холловского сопротивления от магнитного поля и единственный период осцилляций Шубникова-де Гааза по обратному магнитному полю говорит об отсутствии шунтирующих каналов и дает концентрацию электронов, равную $5.54 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Температурная зависимость амплитуды осцилляций, снятая в диапазоне от 1 до 3,5 К, дает эффективную массу электронов $(0,074 \pm 0,008)m_0$, зависимость недиагональной компоненты тензора сопротивления от магнитного поля имеет постоянный наклон в этом температурном диапазоне. Все вместе это говорит о том, что при низких температурах в выращенных напряженных структурах имеется высокоподвижный двумерный газ Γ -электронов, и параллельная проводимость сверхрешетки либо слоя InGaAs отсутствует.

§ 3.3 описывает результаты гальваномагнитных измерений в оболочках с высокоподвижным ДЭГ. Показано, что в полученных оболочках имеется высокоподвижный ДЭГ; подвижность достигает $2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

По сравнению с исходными плоскими гетеропленками, концентрация

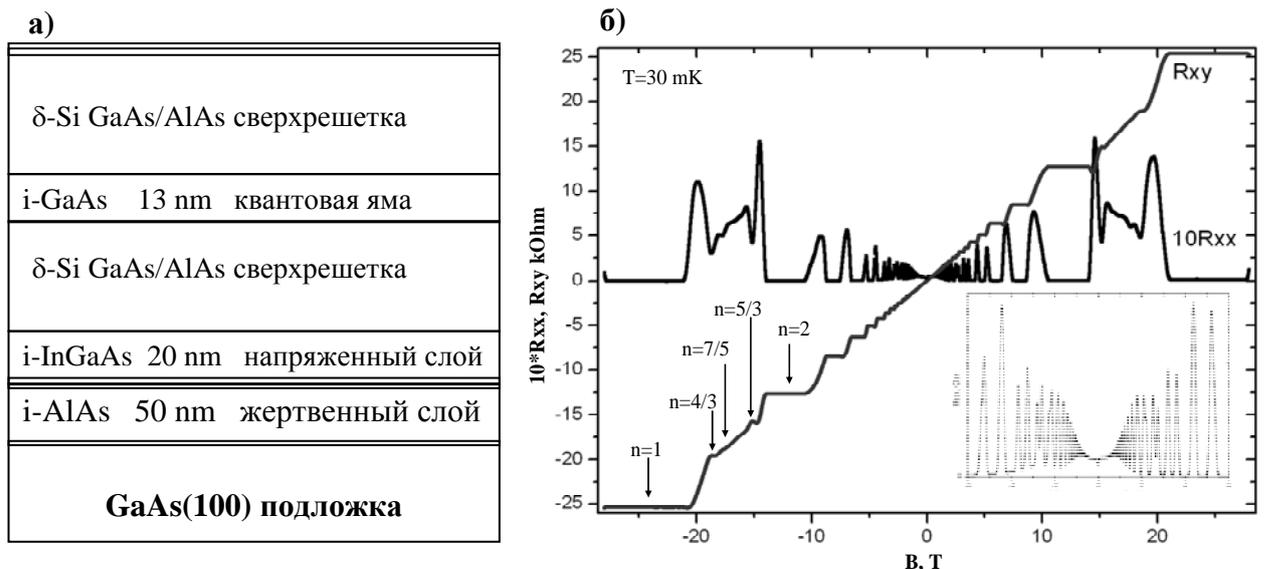


Рис. 2 а) Профиль гетероструктуры с высокоподвижным двумерным электронным газом; б) осцилляции Шубникова-де Гааза и квантовый эффект Холла в них. На вставке показаны осцилляции Шубникова-де Гааза в диапазоне магнитных полей от -6 до +6 Т.

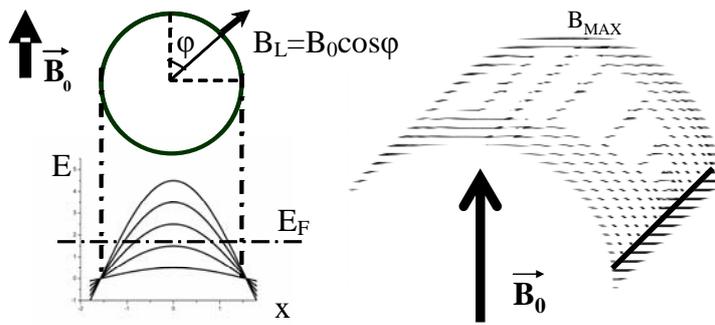


Рис. 4 Искривление уровней Ландау и формирование краевых состояний в ДЭГ на цилиндрической поверхности.

ДЭГ в оболочках не изменяется, подвижность падает в несколько раз. Продемонстрировано, что сопротивление ДЭГ на цилиндрической поверхности, измеряемое вдоль направляющей поверхности, асимметрично по направлению внешнего магнитного поля, перпендикулярного образующей поверхности, если ток протекает вдоль направляющей поверхности и градиент нормальной к поверхности компоненты магнитного поля не меняет знак между точками измерения сопротивления (рис. 3). Впервые наблюдалось, что при одном из направлений величина сопротивления близка к нулю (R_{56} при «+V» и R_{23} при «-V» на рис. 3а). Величина асимметрии определяется точностью измерения малого сигнала. Так, в поле 28 Тл она составляет $R_{xx}(B)/R_{xx}(-B) \approx 10^4$. Впервые показано, что положение экстремумов продольного сопротивления цилиндрической оболочки с ДЭГ, ток в которой протекает вдоль направляющей поверхности, во внешнем

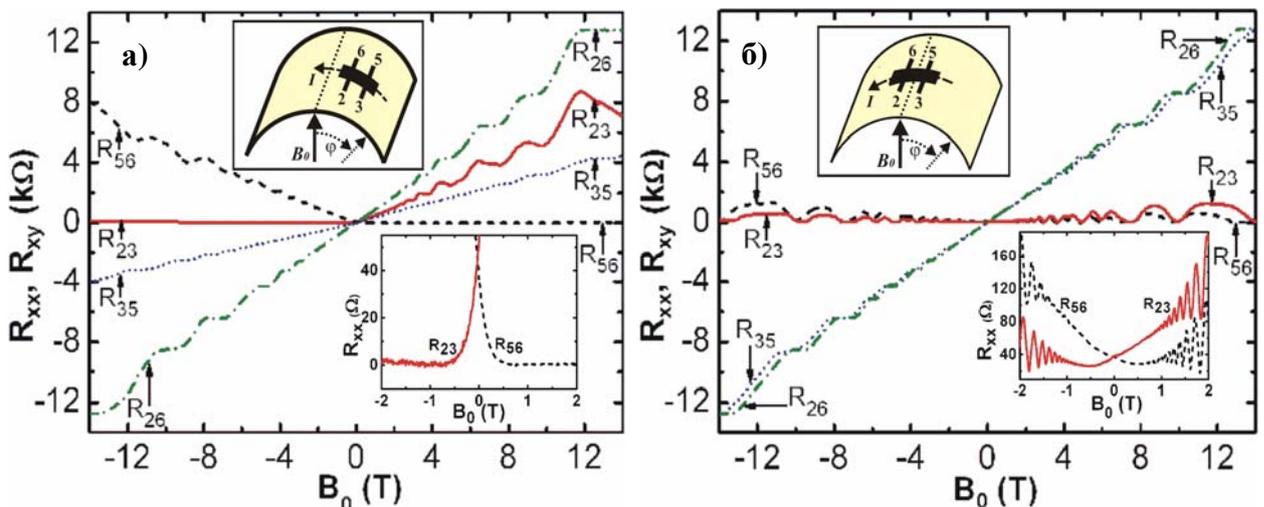


Рис. 3 Продольные и холловские сопротивления при различных положениях мостика относительно максимума нормальной к поверхности компоненты магнитного поля (показана на вставках): **а)** «асимметричное», продольные сопротивления обращаются в ноль при одном из направлений магнитного поля: R_{23} при «-V», R_{56} при «+V»; **б)** «симметричное».

магнитном поле, перпендикулярном образующей поверхности, как для целочисленного, так и для дробного квантового эффекта Холла определяется максимальным значением нормальной к поверхности компоненты магнитного поля.

§ 3.4 посвящен объяснению наблюдаемых в квантующих магнитных полях явлений, построенном на основе перераспределения краевых состояний в неоднородном магнитном поле. Поскольку направление нормали к цилиндрической поверхности меняется вдоль направляющей, то и величина проекции вектора индукции внешнего магнитного поля на нормаль изменяется, что в квантующих магнитных полях можно представить как пространственное искривление уровней Ландау [9]. Положение краевого канала задается пересечением уровня Ландау с уровнем Ферми, и, в отличие от плоского ДЭГ, уровень Ландау цилиндрического ДЭГ может пересекать уровень Ферми также и вдали от края образца [22]. Это приводит к появлению краевых каналов, текущих вдали от физического края образца (рис 4). Из рисунка видно, что вклад краевых каналов в измеряемые сопротивления будет определяться относительным положением контактов и направления градиента магнитного поля.

Рассмотрим, как перераспределение краевых каналов проявляется в различных геометриях эксперимента.

1. Канал ориентирован вдоль оси цилиндра.

В этом случае краевые каналы будут течь параллельно оси цилиндра от одного токового контакта до другого. Если продольное сопротивление измеряется двухточечным методом (с токовых контактов), то в него будут давать вклад все каналы. При этом величина амплитуды осцилляций будет задаваться центральными каналами, расположенными ближе к максимуму магнитного поля; вклад остальных каналов приведет к размытию осцилляций. Вклад области, расположенной в интервале классически слабых магнитных полей (сбоку цилиндра), приведет к росту магнитосопротивления, поскольку ее ширина будет уменьшаться с ростом магнитного поля [23]. При

измерениях четырехточечным методом картина будет более сложной: в этом случае большая часть каналов не заходит в потенциальные контакты, и их вклад в продольное сопротивление может отсутствовать.

2. Канал ориентирован вдоль направляющей цилиндрической поверхности.

а) Холловское сопротивление, как и в плоском ДЭГ, определяется числом краевых каналов, расположенных между холловскими контактами, и квантуется в единицах h/e^2 .

б) Зануление продольного сопротивления. При ориентации канала холловского мостика по дуге цилиндра возникают переходы каналов с одной стороны образца на противоположную. Если в такой ориентации максимум магнитного поля расположен за пределами области между парами потенциальных контактов, как на рис. 5 слева, то возникает асимметрия распределения потенциала: в сопротивление R_{56} дают вклад только каналы, вытекающие из правого токового контакта с потенциалом μ_4 , в то время как в сопротивление R_{23} дают вклад каналы, выходящие из обоих токовых контактов с потенциалами μ_1 и μ_4 . Поскольку вдоль краевого канала изменения потенциала нет, то падение напряжения U_{56} будет равно нулю. Так происходит в плоском ДЭГ в режиме КЭХ. Поскольку уровень Ферми изогнутого ДЭГ при любом внешнем (квантующем) поле магнитном поле всегда находится в щелях подвижности, зануление сопротивления должно

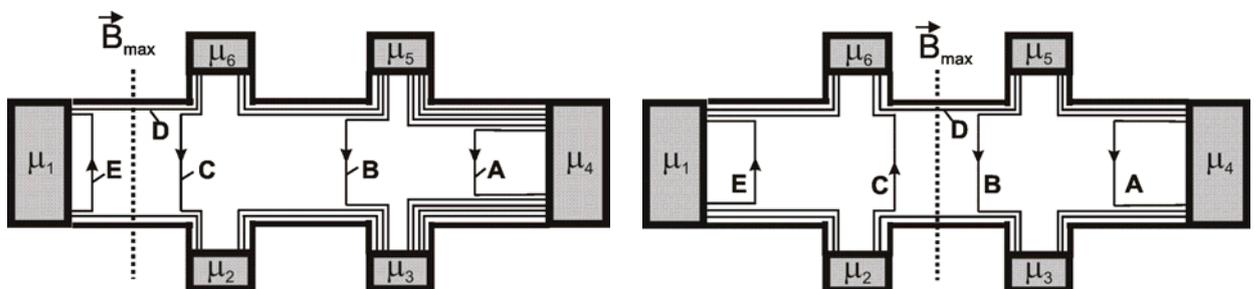


Рис. 5 Вклад краевых каналов в измеряемые сопротивления при различных положениях контактов относительно максимума перпендикулярной компоненты магнитного поля. А, В, С, D, Е – количества соответствующих каналов.

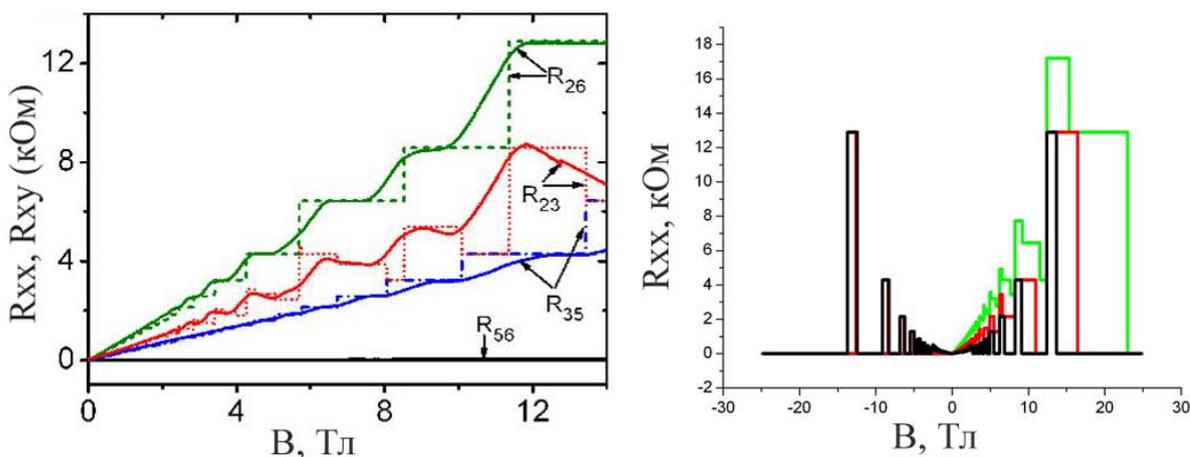


Рис. 6 Экспериментальные и расчетные зависимости сопротивлений ДЭГ на цилиндрической поверхности от внешнего магнитного поля.

иметь место во всем диапазоне магнитных полей. Вдоль другой грани образца ситуация иная: поскольку в контакты 2 и 3 заходят краевые каналы из обоих токовых контактов, имеющих разные потенциалы, то потенциалы μ_2 и μ_3 не будут одинаковыми и сопротивление R_{23} будет зависеть от числа каналов, приходящих из каждого токового контакта. Зависимости продольных и холловских сопротивлений от магнитного поля были рассчитаны с помощью формализма Ландауэра-Бюттикера для различных ориентаций образца с учетом его геометрии (задана литографически) и радиуса изгиба пленки (задан рассогласованием постоянных решеток и толщин слоев; проконтролирован СЭМ). Для симметричного положения образца относительно максимальной перпендикулярной компоненты магнитного поля расчеты сопротивлений на основе этой модели были сделаны независимо в [24]. Построенные зависимости воспроизводят: 1) эффект асимметрии по магнитному полю; 2) поведение экстремумов продольного сопротивления (рис. 6).

Полученное количественное согласие расчетов с экспериментальными данными говорит об удовлетворительности простой одноэлектронной картины для объяснения наблюдаемых в квантующих магнитных полях явлений.

В четвертой главе обсуждается изготовление субмикронных модулировано легированных оболочек на основе InAs/InGaAs и Si/SiGe для исследований магнитотранспорта и практических применений. Предложен и реализован способ изоляции оболочек от проводящих подложек. Продемонстрировано управление локальной кривизной созданных оболочек.

Разработана процедура создания оболочек из гетероструктур на основе InAs с ДЭГ, закрепленных на непроводящих подложках. Были использованы гетероструктуры, выращенные методом МЛЭ (группа В.В. Преображенского) на подложках Al₂O₃ (0001) и GaSb (100), высокоомной при гелиевых температурах ($\rho_{\text{subs}}/\rho_{\text{film}} \sim 1000$ при T=4.2 К). ДЭГ в плоских гетероструктурах, выращенных на GaSb, обладал подвижностью до 20000 см²/В*с при концентрации $5 \cdot 10^{11}$ см⁻². Наличие двумерного электронного газа подтверждено наблюдением осцилляций Шубникова-де Газа, исчезающих при повороте ДЭГ параллельно вектору индекции магнитного поля. Изготовлены свитки и спирали радиусом до 350 нм (рис. 7), монокристалличность их стенок подтверждена методом ВРЭМ (А.К. Гутаковский). Изготовлены свитки и спирали радиусом до 220 нм на основе модулировано легированной бором гетероструктуры Si/SiGe (рост выполнен в Г. Мюсслером в Институте Пауля Шеррера, Швейцария, и Исследовательском центре г. Юлих, Германия). Изготовление основано на селективном удалении Ge по отношению к остальным слоям гетероструктуры [25].

Разработан технологический маршрут, позволяющий электрически изолировать оболочки от подложки и буферных слоев:

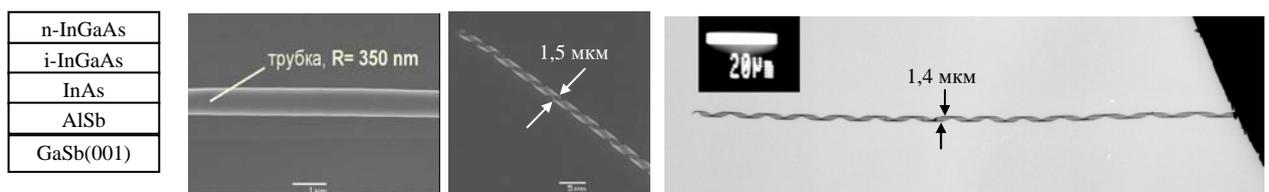


Рис. 7 Профиль гетероструктуры и СЭМ изображения InAs/InGaAs оболочек.

1) с помощью литографии и последующего травления в исходной структуре формируются канавки (рис. 8 а);

2) канавки заполняются изолятором (рис. 8 б).

3) на окисле и полупроводниковой пленке формируются металлические площадки, состоящие из больших полей, расположенных на окисле, и узких отводов от них, выходящих на слой полупроводниковой пленки и служащих поддерживающими "петлями" для будущей искривленной оболочки (рис. 8 в).

4) литографией, и травлением гетероструктуры определяется геометрия сворачиваемой пленки (рис. 8 г).

5) селективное травление жертвенного слоя, приводящее к сворачиванию Si/SiGe пленки и полному ее отсоединению от подложки (рис. 8 д).

В результате получается трубка или спираль, подвешенная на металлических дорожках, отделенных от подложки и буферных слоев толстым окислом (рис. 8 е). Металлические "петли" могут одновременно выполнять функцию омических контактов к оболочке. Разработанный метод может быть пригоден для обеспечения электрической изоляции изогнутых

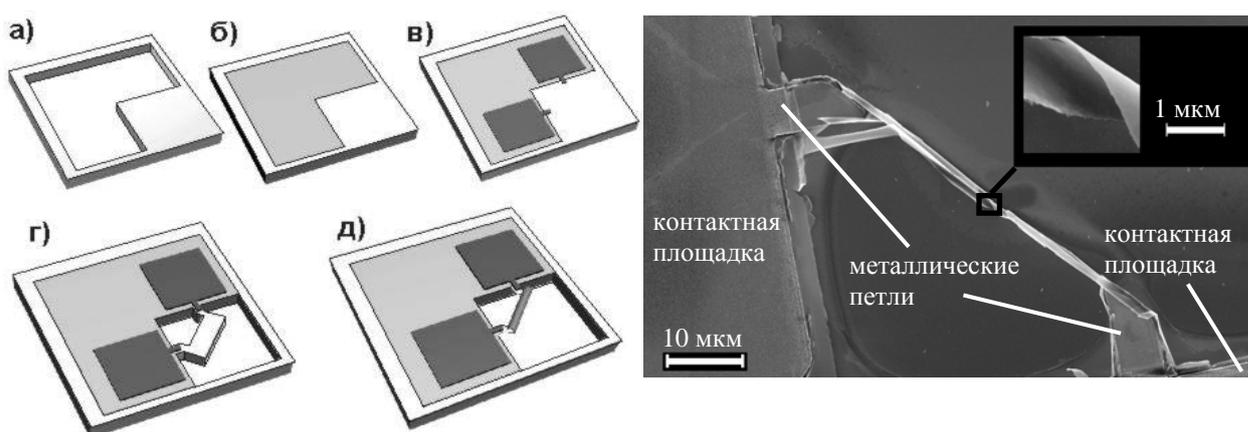


Рис. 8 Технологический маршрут, обеспечивающий изоляцию трубок и спиралей от проводящих подложки и буферных слоев: **а)** глубокое травление, **б)** заполнение полости изолятором, **в)** напыление металлических дорожек, **г)** травление мезаструктуры, определяющее форму сворачиваемой структуры, **д)** травление жертвенного слоя, приводящее к сворачиванию пленки в свиток, **е)** СЭМ изображение полученной структуры (SiGe/Si спираль, $d=1$ мкм).

оболочек, созданных не только на основе Si/SiGe, но и на базе любых других узкозонных материалов, например, InAs или InSb.

Предложен и реализован способ контролируемого локального изменения радиуса SiGe/Si/SiO₂ оболочек с помощью напыления SiO₂ и локального воздействия на него электронным пучком. Показано, что в области засветки радиус оболочек уменьшается вдвое (рис 9). Последовательным экспонированием продемонстрировано сворачивание подвешенной полоски в коническую структуру; созданы другие объекты переменной кривизны. Преимущество описанного метода состоит, во-первых, в полном визуальном контроле процесса, во-вторых, потенциальной малости размеров вносимых изменений (порядка диаметра электронного пучка). Способ является многообещающим для управления электронным транспортом в таких структурах за счет модификации зонной структуры вследствие перераспределения упругих напряжений в изогнутой оболочке [7, 8] и формирования магнитных барьеров во внешнем магнитном поле.

Изготовлены микрооболочки для электрических измерений на основе модулировано легированных гетероструктур Si/SiGe, выращенных на подложках КНИ. Использование кремния на изоляторе в качестве подложек для Si/SiGe оболочек изначально обеспечивает их электрическую изоляцию и дает возможность измерений транспорта в оболочках при любой температуре. На рис. 10 показаны СЭМ изображения различных оболочек, снабженных токовыми и потенциальными контактами.

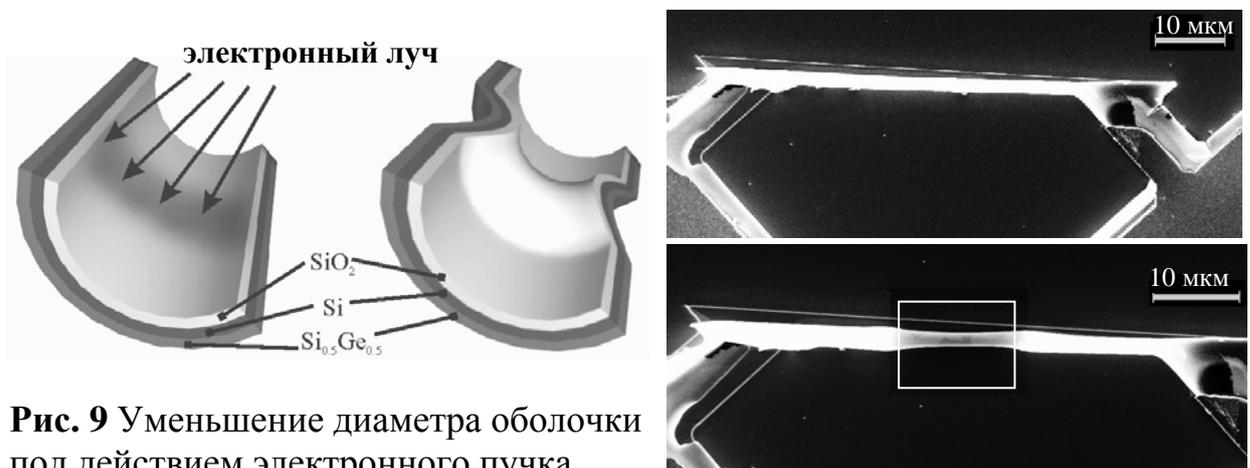


Рис. 9 Уменьшение диаметра оболочки под действием электронного пучка.

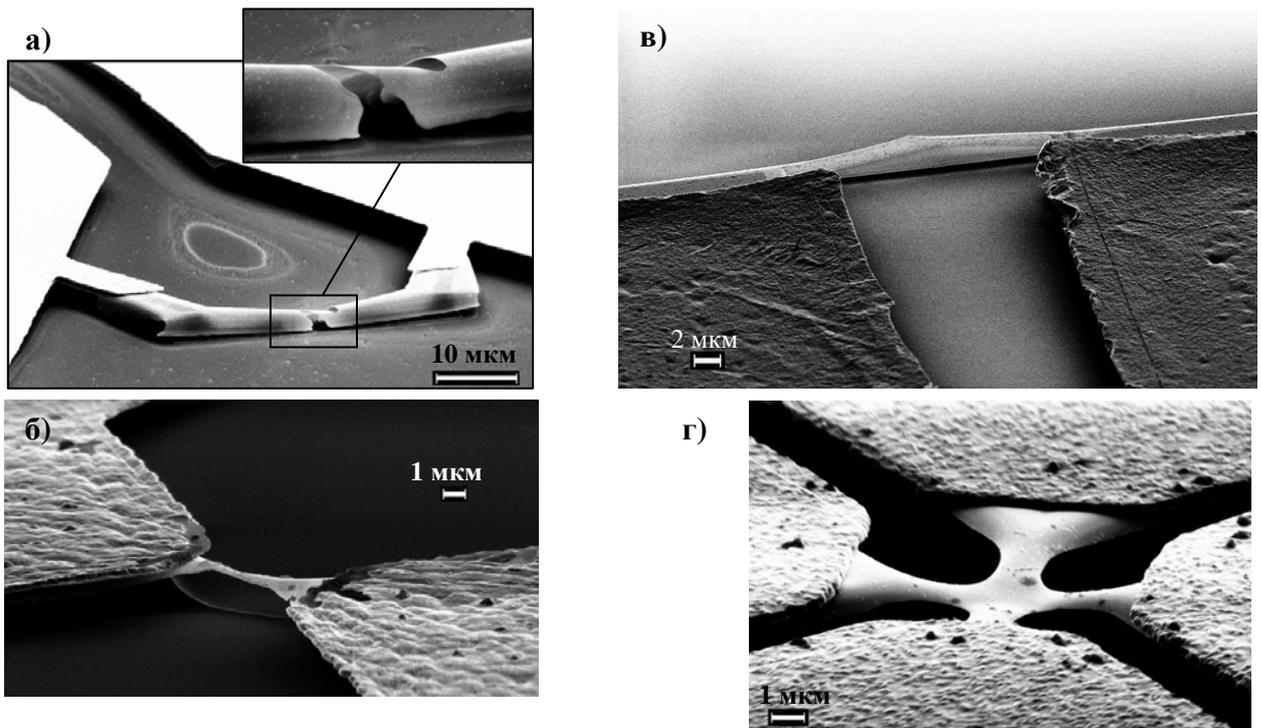


Рис. 10 Si/SiGe оболочки на SiO₂ для магнитотранспортных измерений: а) виток спирали с двумя контактами $d=1,8$ мкм, б), в) двухконтактные мостики, г) греческий крест.

Результаты и выводы диссертационной работы

1. Впервые изготовлены оболочки с электрическими контактами в холловской конфигурации, содержащие ДЭГ высокой подвижности ($2,5 \cdot 10^5$ см²/(В·с)) на цилиндрической поверхности в GaAs квантовой яме.

2. Впервые экспериментально показано, что отношение сопротивлений ДЭГ на цилиндрической поверхности, измеряемых вдоль направления тока (вдоль направляющей цилиндрической поверхности) при противоположных направлениях поперечного магнитного поля, достигает 10^4 .

3. Обнаружено, что сопротивление ДЭГ на цилиндрической поверхности, измеренное в направлении тока, с ростом поперечного магнитного поля зануляется и остается вблизи нуля при уменьшении фактора заполнения до 1 при следующих условиях:

- ток протекает вдоль направляющей цилиндрической поверхности,

- градиент нормальной к поверхности компоненты магнитного поля не меняет знак между точками измерения сопротивления,
- точки измерения сопротивления выбраны так, что направления тока краевых состояний между ними и градиента нормальной к поверхности компоненты магнитного поля составляют угол менее 90° .

4. Впервые в ДЭГ на цилиндрической поверхности наблюдался дробный квантовый эффект Холла. Экспериментально показано, что положение пиков продольного сопротивления как для целочисленного, так и для дробного квантового эффекта Холла определяется максимальным значением нормальной к поверхности компоненты магнитного поля.

5. Проведены расчеты зависимостей сопротивлений ДЭГ на цилиндрической поверхности от магнитного поля в рамках модели Ландауэра-Бюттикера. Согласие результатов расчета и эксперимента говорит о достаточности модели краевых состояний для объяснения наблюдаемых эффектов.

6. Впервые изготовлены субмикронные модулированно легированные оболочки на основе напряженного гетероперехода InAs/InGaAs.

7. Разработаны два способа получения оболочек на основе Si/SiGe, электрически изолированных от проводящих подложек; изготовлены модулированно легированные оболочки в форме свитков, спиралей и выпуклых греческих крестов, снабженные электрическими контактами.

8. Разработана методика локального изменения кривизны оболочек с помощью воздействия электронным пучком. Экспериментально показано уменьшение диаметра оболочки в 2 раза.

Список цитируемой литературы:

- [1] V. Umansky, R. de-Picciotto, and M. Heiblum. *Appl. Phys. Lett.* **71**, 683 (1997).
- [2] K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper. *Phys. Rev. Lett.* **45**, 494 (1980).
- [3] D. C. Tsui, H. L. Stoermer, A. C. Gossard. *Phys. Rev. Lett.* **48** 1559 (1982).
- [4] V. Ya. Prinz, V. A. Seleznev, A. K. Gutakovskiy, A. V. Chehovskiy, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato, and T. A. Gavrilova. *Physica E* **6**, 828 (2000).
- [5] R.C.T. da Costa. *Phys. Rev. A* **23**, 1982 (1981).
- [6] Zhen-Li Ji. *J. Appl. Phys.* **73**, 4468 (1993).
- [7] V. M. Osadchii and V. Ya. Prinz. *Phys. Rev. B* **72**, 033313 (2005).
- [8] В. М. Осадчий, В. Я. Принц. Письма в ЖЭТФ **72**, 451 (2000).
- [9] L. I. Magarill, D. A. Romanov, and A. V. Chaplik. *JETP* **86**, 771 (1998).
- [10] A. Nogaret, D. N. Lawton, D. K. Maude, J. C. Portal, M. Henini. *Phys. Rev. B* **67**, 165317 (2003).
- [11] M. Hara, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye. *Phys. Rev. B* **69**, 153304 (2004).
- [12] J. Rammer and A. L. Shelankov. *Phys. Rev. B* **36**, 3135 (1987).
- [13] M. L. Leadbeater et al. *Phys. Rev. B* **52**, R8629 (1995).
- [14] Л.Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Квантовая механика.
- [15] B. I. Halperin. *Phys. Rev. B* **25** 2185 (1982).
- [16] M. Büttiker. *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1761 (1986).
- [17] Э. В. Девятов. УФН **177**, 207 (2007).
- [18] I. S. Ibrahim, V. A. Schweigert, F. M. Peeters. *Phys. Rev. B* **56**, 7508 (1997).
- [19] A. V. Chaplik. *JETP Lett.* **72**, 503 (2000).
- [20] Y. C. Tsui and T. W. Clyne. *Thin Solid Films* **306** 23 (1997).
- [21] K.-J. Friedland R. Hey, H. Kostial, R. Klann, and K. Ploog. *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4616 (1996).
- [22] A. Lorke, S. Böhm, and W. Wegscheider. *Superlatt.& Microstruct.* **33**, 347 (2003).
- [23] М. В. Энтин, частное сообщение.

[24] Stefan Mendach. Dissertation, Fachbereichs Physik, Universität Hamburg (2005).

[25] O. G. Schmidt, N. Y. Jin-Phillipp. Appl. Phys. Lett. **78**, 3310 (2001).

Публикации по теме диссертации

Статьи

1. Yu.S. Yukecheva, G. Mussler, V. Shushunova, A. Weber, E. Deckardt, V.Ya. Prinz, and D. Gruetzmacher. Modulation-doped $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$ shells electrically isolated from conductive substrates. Semicond. Sci. Technol. **23** 105007 (2008)
2. A. Milekhin, S. Mutilin, J. Yukecheva, M. Putyato, A. Vorob'ev, V. Prinz, V. Kolchuzhin, J. Mehner, D. Zahn. Raman scattering on semiconductor microtubes. Physica status solidi (c) **6**, 2060 (2009).
3. A.B. Vorob'ev, K.-J. Friedland, H. Kostial, R. Hey, U. Jahn, E. Wiebicke, Ju. S. Yukecheva, V.Ya. Prinz. Giant asymmetry of the longitudinal magnetoresistance in cylindrical, high-mobility two-dimensional electron gas. Phys. Rev. B **75**, 205309 (2006).
4. A.B. Vorob'ev, V.Ya. Prinz, Yu.S. Yukecheva and A.I. Toropov. Magnetotransport properties of two-dimensional electron gas on cylindrical surface, Physica E **23** (1-2), 171-176 (2004).

Труды конференций и тезисы

1. Yu. S. Yukecheva, A. B. Vorob'ev, V. Ya. Prinz, A. I. Toropov, D. K. Maude “Observation of 2DEG transport in helical geometry at low filling factors” Proceedings of the 16th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, Vladivostok, Russia, July 15-19, 2008
2. Yu.S. Yukecheva, A. B. Vorob'ev, V. Ya. Prinz, G. Mussler, V. Shushunova, A. Weber, E. Deckardt, D. Gruetzmacher. SiGe/Si undoped and modulation-doped micrometer and submicrometer tubes and spirals, 15th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, Novosibirsk, Russia, June 25-29 2007.

3. *Yu. S. Yukecheva, A. B. Vorob'ev, V. Ya. Prinz, V. V. Preobrazhenskii, M. A. Putyato, A. K. Gutakovsky*, Fabrication of InGaAs/InAsSb micro- and submicron tubes with two-dimensional electron gas on Al₂O₃(0001) and GaSb(100) substrates, 14th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, St.Petersburg, Russia, June 26-30, 2006.
4. *J. Yukecheva*. EFM as a tool for characterization of free-standing micro-and nanoobjects. Autumn School on Materials Science and Electron Microscopy (Berlin, October 3^d - October 8th, 2005).
5. *Alexander G. Milekhin, Sergei Mutilin, Julia Yukecheva, Michael Putyato, Alexander Vorob'ev, Victor Prinz, Vladimir Kolchuzhin, Jan Mehner, Dietrich RT Zahn*. “Raman scattering on semiconductor microtubes” Presentation: Poster at E-MRS Fall Meeting 2008, Symposium J, by Alexander G. Milekhin.
6. *K.-J. Friedland, R. Hey, H. Kostial, U. Jahn, E. Wiebicke, K. H. Ploog, A. Vorob'ev, Ju. Yukecheva, and V. Prinz*. Magnetotransport in two-dimensional electron gases on cylindrical surfaces, Proceedings of the International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, Atsugi, Japan, 2006, edited by H. Takayanagi and J. Nitta (World Scientific, 2007).
7. *K.-J. Friedland, R. Hey, H. Kostial, U. Jahn, E. Wiebicke, K. H. Ploog, A. Vorob'ev, Ju. Yukecheva, and V. Prinz*. Magnetotransport in high mobility two-dimensional electron gases on cylindrical surfaces, 12th Advanced Heterostructure Workshop, Kohala Coast, Big Island of Hawai'i, December 3-8 2006.
8. *А. Воробьев, К.-J. Friedland, H. Kostial, R. Hey, U. Jahn, E. Wiebicke, Ю. Юкечева, В. Принц*. Гигантская асимметрия магнитосопротивления в высокоподвижном двумерном электронном газе на цилиндрической поверхности. 9^{ая} Российская конференция "Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V", Томск, 3-5 октября 2006.
9. *A.B. Vorob'ev, K.-J. Friedland, H. Kostial, R. Hey, Ju. S. Yukecheva, U. Jahn, E. Wiebicke, and V. Ya. Prinz*, Magnetotransport properties of high-mobility two-dimensional electron gas on cylindrical surface, 14th International Symposium

“Nanostructures: Physics and Technology”, St.Petersburg, Russia, June 26-30 2006.

10. *K.-J. Friedland, A. Vorob'ev, H. Kostial, U. Jahn, E. Wiebicke, R. Hey, Ju. Yukecheva, V. Prinz*, Ballistic transport in two-dimensional GaAs electron gases on cylindrical surfaces, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, Atsugi, Japan, 2006.

11. *А.Б. Воробьев, Ю.С. Юкечева, А.С. Майоров, В.М. Осадчий, В.Я. Принц, А.И. Торопов*, Двумерный электронный газ на цилиндрической поверхности: магнитотранспортные исследования в холловской геометрии, 7-я Российская конференция по физике полупроводников, Москва, 18-23 сентября 2005.

12. *А.Б. Воробьев, Ю.С. Юкечева, В.Я. Принц, В.В. Преображенский, Б.Р. Семягин*, Проводящие InAs/InGaAs микротрубки и микроспирали на InAs(100) и GaSb(100) подложках, 7-я Российская конференция по физике полупроводников, Москва, 18-23 сентября 2005.

13. *A. B. Vorob'ev, V. Ya. Prinz, Ju. S. Yukecheva, A. I. Toropov, V. V. Preobrazhenskii and B. R. Semyagin*, Two-dimensional electron gas in rolled-up quantum well: fabrication and magnetotransport properties, Proceedings of the Autumn School on Materials Science and Electron Microscopy (Berlin, September 27th - October 1st, 2003).

14. *A. B. Vorob'ev, v. Ya. Prinz, A. I. Toropov, Yu. S. Yukecheva*. Magnetotransport measurements in two-dimensional gas on cylindrical surface. The 26th International Conference on the Physics of Semiconductors Proceedings p. H 118 (July 29 - August 2, 2002, Edinburgh, United Kingdom.).

15. *A.B. Vorob'ev, V. Ya. Prinz, A. I. Toropov, Yu. S. Yukecheva*. Magnetotransport properties of two-dimensional gas on cylindrical surface. 2002 Siberian Russian Workshop on Electron Devices and Materials Proceedings, v.1 p. 64 (July 1-5, 2002, Novosibirsk, Russia).