

УДК 621.38

*В. Г. Попов*Институт проблем технологии микроэлектроники РАН
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Обзор по тематике 5-й Всероссийской конференции молодых ученых «Микро-, нанотехнологии и их применение» им. Ю.В. Дубровского

1. Введение

Проблематика конференции затронула применение новых и стандартных микро- и нанотехнологий для развития методов диагностики, создания новых приборов микро- и наноэлектроники и исследования новых физических явлений в них, что актуально как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. В России данное направление достаточно активно развивается как в области полупроводниковых гетеро- и наноструктур, что было отражено в 17-ти из 53-х докладов, так и в области сверхпроводниковых структур (8 докладов). Необходимо отметить, что были представлены и новые наноматериалы, такие как нанотрубки, ZnO-наностержни, графен, фотонные резонаторы и кристаллы, топологические изоляторы. Кроме того, значительное число работ посвящено методам сканирующей микроскопии. Таким образом, условно доклады можно разделить по следующим группам.

2. Полупроводниковые наноструктуры

Фундаментальные исследования в этой области представлены в докладах, рассматривающих коллективные эффекты и эффекты локализации в двумерных системах носителей или наноструктурах, созданных на их основе. Необходимо отметить, что уровень докладов достаточно высок и отражает современную проблематику в данной области. Были затронуты вопросы о скачках химпотенциала двумерного электронного газа (ДЭГ) в режиме дробного квантового эффекта Холла (ДКЭХ) при факторе заполнения равном $2/3$, которые удалось описать в модели взаимодействующих композитных фермионов, при этом наряду со щелью в спектре композитных фермионов меняется также их спиновая поляризация. Оказалось, что магнитное поле данного перехода нелинейно зависит от затворного напряжения, что авторы связывают с эффектом изменения ширины волновой функции электронов и эффектами непараболичности в спектре (Тезисы докл. 5-й Всерос. конф., стр. 57 [1]). Исследование дробового шума в локализованной двумерной системе показало, что в режиме прыжковой проводимости шум в ней является дробовым с фактором Фано, близким к 1, это, по-видимому, одно из первых наблюдений дробового шума при сопротивлениях образца, близких к 10 МОм на квадрат (Тезисы докл., стр. 56 [1]). Интересный результат был получен на микросужениях высокоподвижного двумерного слоя (см. стр. 53 [1]). Обнаружено увеличение проводимости микросужения при повышении температуры от 0.5 до 4 К. Слабое магнитное поле (≈ 10 мТл), перпендикулярное гетеропереходу, также увеличивает проводимость микросужения. Обнаруженный эффект авторы связали с электрон-электронным взаимодействием. Важные результаты были представлены по спектроскопии квантовых ям и узкозонных полупроводников в сверхвысокочастотном (СВЧ) и терагерцовом диапазонах. В СВЧ-диапазоне исследовалось взаимодействие плазмонных и фотонных мод (см. стр. 22 [1]). Было обнаружено, что величина взаимодействия сравнима с энергией мод. В терагерцовом диапазоне исследовалась фотопроводимость квантовых ям, созданных на основе узкозонных полупроводников $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и гетероструктур типа $Hg_{1-x}Cd_xTe/Cd_{1-y}Hg_yTe/Hg_{1-x}Cd_xTe$ (см. стр. 24 [1]). Были выявлены особенности поглощения акцепторных примесей, фононные реплики. Спектр значительно изменялся в магнитном поле, что было связано с увеличением ширины запрещенной зоны из-за кван-

тования Ландау. В работе (см. стр. 62 [1]) теоретически исследовалось обменное усиление фактора Ландэ в узкозонных квантовых ямах. Оказалось, что из-за значительного спин-орбитального взаимодействия в таких структурах нарушается теорема Лармора, что означает усиление как циклотронных щелей, так и спиновых.

Из прикладных исследований представлены результаты по разработке дальнейшей миниатюризации транзисторов. Хорошо известно, что основные проблемы, которые возникают при дальнейшем уменьшении размеров транзисторов, — это размерное квантование в канале, туннелирование из затвора в канал и статистический разброс параметров из-за случайности распределения примесей. В работе (см. стр. 12 [1]) рассмотрены варианты использования резонансного туннелирования для решения этих проблем. Показано, что для дальнейшего повышения граничной частоты логических элементов целесообразнее использовать резонансно-туннельные диоды. Новые концепции энергонезависимой памяти обсуждались в работе (см. стр. 13 [1]). В качестве альтернативного подхода предложено использовать резистивную память на основе ионной миграции. В качестве основных достоинств таких элементов является возможность создания на их основе не просто бинарных элементов, но и элементов с большим числом промежуточных состояний, которые могут быть использованы в качестве твердотельного аналога синапсов для нейроморфных вычислительных систем.

3. Сверхпроводниковые микро- и наноструктуры

Значительное количество докладов было посвящено сверхпроводниковым наноструктурам. Из них в большинстве докладов рассматривались различные эффекты в сверхпроводниковых детекторах одиночных фотонов. В основе принципа работы детектора лежит уникальная чувствительность сверхпроводника при протекании через него тока, близкого к критическому току. Теоретические исследования, проведенные в докладе (см. стр. 46 Тезисов [1]), показали существенное влияние формы сверхпроводника на чувствительность к фотонам разной энергии. Было показано, что низкоэнергетичные фотоны эффективно поглощаются вблизи углов сверхпроводящей пленки, а высокоэнергетичные — в центральной части пленки. В докладе (см. стр. 47 Тезисов [1]) авторы экспериментально исследовали чувствительность сверхпроводящих однофотонных детекторов (СОД) и установили, что чувствительность определяется двумя параметрами — сопротивлением пленки в нормальном состоянии и критическим током. Данное исследование полезно для предварительной оценки чувствительности детекторов. В работе (см. стр. 48 [1]) представлены результаты по экспериментальному исследованию темного счета СОД. Было проведено сравнение с теорией, обнаруженное расхождение авторы связали с существенной неравновесностью в образцах, что может быть связано, например, с токовым шумом. Интересное исследование поглощения инфракрасного излучения гибридных металлических пленок Au-NbN было экспериментально проведено в работе (см. стр. 45 [1]). Было показано, что существует оптимальное соотношение ширины полосок Au на NbN, при котором поглощение максимально. Результат интересен тем, что, по-видимому, механизм поглощения не очевиден и требует дальнейших исследований. Интересный фундаментальный результат представлен в докладе (см. стр. 43 [1]). В предлагаемой работе рассчитан наведенный магнитный момент в контактах Джозефсона, слабой связью которых служат многослойные ферромагнитные структуры различного типа. Неколлинеарная намагниченность ферромагнитных слоев в такой структуре создает условия, необходимые для существования триплетной сверхпроводящей корреляции, которая, будучи дальнедействующей, приводит к возникновению соответствующей компоненты наведенной намагниченности, проникающей в сверхпроводник даже через толстый слой ферромагнетика с другим направлением намагниченности. В работе показано, что, изменяя джозефсоновский ток, можно управлять этой дальнедействующей наведенной намагниченностью. Или другим способом, прикладывая электрическое напряжение к контакту, можно создавать осциллирующий во времени наведенный магнитный момент.

4. Новые материалы, нанотехнологии и зондовая микроскопия

Несмотря на явно прикладной характер тематики, нужно понимать, что современные фундаментальные исследования в области физики конденсированного состояния не обходятся без нанотехнологий и вносят свои изменения в эти технологии. Значительное число работ связано с ферромагнитными материалами. Так, в докладе (см. стр. 55 [1]) исследовались тонкие пленки манганитов LaMnO_3 . Одним из свойств манганитов является тесная связь магнитной и электронной подсистем, которая проявляется, в частности, в наличии перехода металл–изолятор при температуре, близкой к температуре ферромагнитного перехода. Обнаружено, что эпитаксиальные пленки LaMnO_3 , выращенные на орторомбической подложке NdGaO_3 , имеют диэлектрический ход температурной зависимости удельного сопротивления, а в пленках на кубических подложках (SrTiO_3 , $\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{Al}_{0.65}\text{Ta}_{0.35}\text{O}_3$, LaAlO_3) присутствует переход металл–изолятор при $T_{MI} = 150\text{--}250$ К, причем при увеличении сжимающих деформаций в базовой плоскости наблюдается увеличение удельного сопротивления и понижение температуры перехода металл–изолятор. Исследование влияния подложки на свойства тонкой пленки LaMnO_3 также использовалось в докладе (см. стр. 56 [1]). Было проведено исследование бикристаллических контактов — мостиков из эпитаксиальных манганитных плёнок $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$, выращенных на бикристаллической подложке (110) NdGaO_3 с симметричным разворотом вокруг бикристаллической границы на углы $2\Theta = 12$ и 38 . Показано наличие двух ферромагнитно-упорядоченных спиновых подсистем с малоразличающимися (порядка 1 градуса) направлениями лёгких осей намагниченности. Оси направлены вдоль бикристаллической границы и практически не зависят от угла кристаллографической разориентации частей бикристаллической подложки. Магнитосопротивление $MR = R/R_{750\text{Э}}$ увеличивается с уменьшением температуры, при $T = 4,2$ К, когда в пленках поляризация близка к 100%, MR составляет 30% для контактов с разориентацией. С уменьшением угла разориентации MR сильно уменьшается и составляет доли процента. Показано, что малое MR может быть вызвано рассеянием спин-поляризованных носителей из-за сильного электрон-электронного взаимодействия в приграничном неупорядоченном слое при низких температурах и рассеянием на антиферромагнитных магнонах — при высоких. В докладе на странице 38 Тезисов [1] представлены результаты по теоретическому исследованию плазмон-плазмонного взаимодействия в плазмонных кристаллах. В работе рассмотрено временное изменение групповой скорости и огибающей пакета ППП малой интенсивности (сигнальный), следующего за импульсом ППП накачки (с большой интенсивностью), в плазмонном кристалле; исследованы случаи динамики сигнального пакета при различных центральных частотах каждого из импульсов, при различных временах задержки между ними. Продемонстрировано, что групповая скорость сигнального пакета увеличивается или уменьшается с течением времени, в зависимости от частот каждого из импульсов. Возможен случай, когда сигнальный пакет отражается от плазмонной структуры при наличии пакета накачки, а при его отсутствии проходит сквозь плазмонный кристалл. В работе (см. стр. 60 [1]) представлены результаты рассмотрения токового переноса спинового вращательного момента в магнитных туннельных переходах с вакуумным зазором, выполненных для проверки предлагаемой концепции организации памяти на магнитных наноточках путём передачи спин-туннельного тока через зазор с поверхности магнитного зондового наконечника. В работе (см. стр. 71 [1]) на основе диаграммной техники Келдыша рассчитаны транспортные свойства одиночной магнитной примеси со спином S , обладающей набором энергетических уровней. Применение неравновесной диаграммной техники позволило получить явные частотные зависимости для функций Грина. При учете этих зависимостей определено выражение для туннельного тока, учитывающего статистику электронов в контактах, а также флуктуационные ренормировки, индуцированные током. В результате суммирования всех порядков теории возмущения по туннельному гамильтониану найдено выражение для тока, удовлетворяющее необходимым симметричным и физическим требованиям.

5. Заключение

Необходимо отметить, что доложенные результаты соответствуют современному мировому уровню, о чем можно судить по публикациям авторов в таких передовых физических журналах, как *Physical Review B* и *Physical Review Letters*, также следует отметить широкое международное сотрудничество авторов с ведущими лабораториями мира. Данные направления поддержаны РФФИ.

Подводя итоги, можно сказать, что уровень докладов молодых ученых, принявших участие в работе конференции, весьма высок, причем их вклад в исследования является, как правило, основным, что говорит об активности молодых ученых в целом. Среди недостатков можно отметить то, что качество полупроводниковых гетероструктур и приборов на их основе, создаваемых в России, оставляет желать лучшего. Поэтому прикладные и фундаментальные задачи мирового значения в этой области решаются в тесном сотрудничестве с зарубежными лабораториями. Как правило, данное сотрудничество осложнено тем, что далеко не каждая задача вписывается в направления деятельности зарубежных соавторов. Поэтому, видимо, необходимо увеличение финансовой поддержки для того, чтобы дать возможность дополнительного приобретения гетероструктур у зарубежных партнеров. Кроме того, необходимо дальнейшее совершенствование и развитие разработок по молекулярно-лучевой эпитаксии в России с целью более активного и независимого подхода к исследованиям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-07-06833-моб_г, 13-02-01025-а).

Литература

1. Тезисы докладов 5-й Всероссийской конференции молодых ученых «Микро-, нанотехнологии и их применение», ИПТМ РАН, Черноголовка, 19–22 ноября 2012. — <http://purple.iptm.ru/sci-conf/text/tezis12.pdf>.

Поступила в редакцию 17.01.2014.