

Последние достижения в исследовании квазидвумерных и слоистых материалов

В постиндустриальном обществе, где дальнейшее развитие основано на творческом аспекте деятельности человека, на информации и знаниях, на наукоемких технологиях, поиск, производство и применение новых функциональных материалов не утратили своего значения. Прежде всего это необходимо для создания новых материалов с наперед заданными, усовершенствованными или неожиданными экстраординарными свойствами. Особенно это касается высокотехнологических материалов, которые создаются для применения в электронике, информационных технологиях, энергетике, медицине и т.п. Специфическое место в этом аспекте занимают твердотельные материалы со слоистой и квазидвумерной структурой, которые, кроме нетривиальных или характерных только для них свойств, легко поддаются масштабированию, в смысле уменьшения их размеров и, соответственно, размеров созданных на их основе устройств. Это ощутил каждый, наблюдая, например, за эволюцией мобильных телефонов (или другой электроники) с точки зрения увеличения производительности и появления новых функциональных возможностей.

Материалы со слоистой и/или квазидвумерной структурой находятся в центре внимания исследователей уже достаточно давно. Одним из недавних прорывов в данной области было получение одноатомного слоя углерода — графена, что вызвало настоящий бум исследований в области однослойных структур. Так, были получены неорганические одноатомной толщины пленки силицена — двумерного кристалла, состоящего из одного слоя атомов кремния; борофена — двумерного кристалла из одного слоя атомов бора; германена — двумерного кристалла из одного слоя атомов германия; станина — двумерного кристалла из одного слоя атомов олова и другие. Однослойные пленки из слоистых материалов получают в основном по технологии “top-down” (сверху вниз), когда слои отщепляются (отшелушиваются) от массивного материала, например с помощью скотча (липкой ленты), как в случае графена. Это происходит вследствие слабых (обычно ван-дер-ваальсовых) связей между слоями. Понятно, что таким образом можно легко осуществлять масштабирование слоистых материалов, создавая объект с определенным количеством слоев. Как было показано на примере графена, количество слоев не только влияет на геометрические размеры, но и может радикально изменять свойства материала. Так, свойства двуслойной системы на основе углерода зависят от

угла разориентации между плоскостями, причем существуют углы, при которых возникает даже сверхпроводящее состояние.

Другой пример, который ближе к тематике данного выпуска журнала, связан со слоистым материалом, относящимся к открытым около 10 лет назад так называемым железосодержащим сверхпроводникам, а именно с селенидом железа FeSe. Кроме сюрприза, который преподнесло данное соединение, оказавшееся сверхпроводником с критической температурой около 9 К, другой неожиданностью было повышение критической температуры более чем в 10 раз в слое FeSe атомной толщины.

Данный выпуск представляет читателю серию работ, посвященных исследованию ряда слоистых и квазидвумерных систем. Здесь затронуты исследования как ранее открытых, но не утративших актуальность высокотемпературных сверхпроводников с «магическими» слоями CuO₂, и их конкурентов — железосодержащих сверхпроводников. Такое смещение приоритетов к последним интерпретируют как смену «медного» века на «железный» в области сверхпроводимости.

В выпуске содержатся работы по двумерным системам и квазиодномерным вискерам, по взбудоражившему в начале века (или тысячелетия) научный мир ординарному, но не тривиальному сверхпроводнику — дибориду магния, помещенному в композит с наночастицами манганита, по особенностям двумерного транспорта в алмазе, поверхностно допированном за счет электрического поля затвора, и ряд других исследований.

Остановившись более подробно на представленной в журнале коллекции работ, отметим обзор E. Piatti с соавторами «Two-dimensional hole transport in ion-gated diamond surfaces», в котором рассмотрены результаты, достигнутые в управлении электрическими транспортными свойствами на поверхности алмаза за счет электрического поля с помощью метода ионного затвора. Авторами проведен анализ настройки проводимости, плотности и подвижности носителей. Также обсуждаются возможности индуцированной полем сверхпроводимости на поверхности, что предсказывается расчетами согласно теории функционала плотности.

А.И. Дяченко с соавторами обнаружили, что температурное поведение сопротивления объемных образцов нанокompозита сверхпроводник–ферромагнетик MgB₂:LSMO при переходе в сверхпроводящее состояние описывается моделью Березинского-Костерлица–

Таулеса для двумерных сверхпроводников. Наблюдаемые особенности электронных транспортных свойств таких наноконпозитов представляют большой фундаментальный интерес и делают их перспективными функциональными материалами для сверхпроводящей спинтроники.

В статье Кузьмичевых, используя данные спектроскопии многократного андреевского отражения, определяются физические параметры сверхпроводящих конденсатов в диборидах магния и оксипниктидах железа в рамках двухзонной модели Москаленко и Сула, обусловленные как внутризонным, так и межзонным взаимодействиями. В результате анализа показано, что внутризонная связь сильнее межзонной примерно в 15 раз для диборидов магния и в 10 раз для оксипниктидов железа, а также оценены собственные характеристические отношения для «сильных» зон, которые составляют 5,5 и 4,6, в то время как для «слабых» зон это отношение близко к 3,5, т.е. к пределу слабой связи БКШ.

Еще две работы касаются слоистых железосодержащих сверхпроводников на основе халькогенидов железа. Ю.В. Пустовит и А.А. Кордюк исследовали эволюцию зонной структуры соединения Fe(Se,Te) при изменении температуры и показали, что наблюдаемый сдвиг зон можно объяснить, только предположив наличие перераспределения электронной плотности между объемом и поверхностью сверхпроводящего образца. Учитывая то, что по мнению ряда исследователей данный материал является сверхпроводником с топологически нетривиальными поверхностными состояниями, где могут быть реализованы майорановские фермионы, обнаруженный эффект может быть использован для реализации температурного управления свойствами этих квазичастиц. В статье «Subkelvin Andreev reflection spectroscopy of superconducting gaps in FeSe» Д.Л. Башлаков с соавторами провели измерения и детальный анализ андреевских спектров при температуре 0,5 К и подтвердили наличие анизотропного двухзонного параметра порядка в этом соединении. В данном исследовании было продемонстрировано, что спектры, полученные при более низкой температуре, позволяют получать более детальную информацию о сверхпроводящем состоянии.

Систематическое исследование локальных электронных состояний на поверхности двухзонного сверхпроводника MgB₂ проведено в статье А. Sugimoto и др. с использованием низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии/спектроскопии с субнаноразрешающей способностью. Авторами получены как атомные изображения поверхности, так и распределения сверхпроводящих щелей. Им удалось наблюдать самый верхний слой Mg с однородным распределением щелей, которые связаны, скорее всего, с π -зоной.

Г.Я. Хаджай и соавторы исследовали влияние отжига на проводимость монокристаллов YBa₂Cu₃O_{7- δ} в базисной плоскости после их облучения высокоэнергетическими электронами.

На основе анализа избыточной проводимости обнаружен необычный эффект увеличения абсолютного значения величины псевдощели и уменьшения величины избыточной проводимости по сравнению с исходным необлученным образцом.

Исследованию избыточной проводимости в «магнитном» сверхпроводнике Dy_{0,6}Y_{0,4}Rh_{3,85}Ru_{0,15}B₄ посвящена статья А.Л. Соловьева и соавторов. Ими показано, что полученная температурная зависимость избыточной проводимости имеет вид, типичный для магнитных сверхпроводников, а также демонстрирует поведение, характерное для псевдощелевого состояния в купратах, что указывает на возможность реализации аналогичного состояния в данном соединении.

В работе И.Б. Беркутова и др. «Квантовые эффекты в германиевой квантовой яме со сверхвысокой подвижностью носителей заряда» приведены результаты экспериментального исследования проявления квантовых эффектов в зависимостях от температуры и внешнего магнитного поля электропроводности квазидвумерной системы «дырок» в гетероструктуре Si_{0,2}Ge_{0,8}/Ge/Si_{0,2}Ge_{0,8}. Авторы определили времена релаксации, эффективную массу, константу фермижидкостного взаимодействия и ряд других характеристик носителей заряда.

А. Дружинин и соавторы провели магниторезистивные исследования легированных вискером из германия *p*-типа вблизи перехода металл–изолятор в магнитном поле до 14 Тл при деформации сжатия для изучения механизма проводимости при низких температурах. В результате были определены эффективная масса и энергии спин-орбитального расщепления для легких и тяжелых дырок при деформации сжатия, фактор Ланде и параметр Рашбы спин-орбитального взаимодействия.

М. Tamaddonpur и соавторы рассчитали вклады тепловых и квантовых флуктуаций в обедненном квазидвумерном биполярном бозе-конденсате в присутствии дальнего $1/r$ -типа взаимодействия. Показано, что дальний характер $1/r$ -взаимодействия приводит к значительной модификации дисперсии квазичастиц.

В статье И.В. Золочевского и соавторов измерены вольт-амперные характеристики «вихревых» (широких) сверхпроводящих пленок под воздействием электромагнитного облучения в ранее не исследованном метровом диапазоне частот. В результате обнаружен эффект увеличения устойчивости вихревого состояния в отличие от ситуации подавления вихревой резистивности облучением в микроволновом диапазоне.

В целом представленные в выпуске статьи дают довольно широкий охват проблем физики слоистых и квазидвумерных систем, и мы надеемся, что они будут полезными для читателей журнала и интересными для широкого круга исследователей.

Ю.Г. Найдюк, А.А. Кордюк