

Программа научных исследований ЦКП ФИАН

I Физика высокотемпературных сверхпроводников.

В области высокотемпературной сверхпроводимости в последнее время ведутся интенсивные исследования, направленные на выяснение механизма сверхпроводимости, на поиски новых сверхпроводников и повышение критических параметров существующих ВТСП и на разработку технологий их практического применения. По мере повышения критической температуры сверхпроводников удешевляется техника и технология на их основе и, соответственно, расширяется область применений. К 2020 г., мировой рынок промышленных применений устройств на основе ВТСП материалов по прогнозам достигнет 38 млрд. долларов. Это, в соответствии с Целями Стратегии НТР РФ (п.28), определяет актуальность развития исследований, проводимых в ЦКП ФИАН.

1. Главной целью деятельности Центра является поиск и создание сверхпроводников с критической температурой порядка комнатной. Для достижения этой цели в Центре развиваются несколько направлений исследований: (а) инженерия электронной зонной структуры твердых тел с целью формирования плоских зон и подстройки сингулярности ван-Хова в окрестности уровня Ферми, (б) разработка путей реализации топологической сверхпроводимости, сверхпроводимости на интерфейсе материала с сильными фононными модами и в метал-оксидных гетероструктурах, (в) поиск сверхпроводимости в материалах с ковалентной связью в условиях высокого давления. Инженерия требуемой зонной структуры проводится путем выбора перспективного химического мотива, химического легирования материала, а тонкая подстройка спектра - путем электрического легирования, гидростатического давления и одноосного сжатия.

2. Для достижения поставленной цели в Центре ведутся работы по разработке технологий создания (а) новых объемных материалов, (б) метал-оксидных пленочных гетероструктур, (в) тонкопленочных эпитаксиальных структур и интерфейсов, в том числе интерфейсов с топологически нетривиальными квантовыми материалами. В области синтеза новых объемных ВТСП материалов для исследований и прикладных разработок предполагается получение поликристаллических и монокристаллических образцов сверхпроводящих слоистых оксидуридов, арсенидов и селенидов железа, теллуридов и халькогенидов переходных металлов, с использованием методики газового транспорта, расплавленными и раствор-расплавленными методами, а также методом Бриджмена (рост в температурном градиенте). Проводятся исследования взаимосвязи кристаллохимических параметров с физическими свойствами полученных материалов методами рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии и дифракции обратно-рассеянных электронов. Для создания гетероструктур планируется использование методов атомно-слоевого осаждения из газовой фазы, магнетронного напыления, электронно-лучевого осаждения, и импульсного лазерного осаждения эпитаксиальных слоев.

3. В последнее время выдающиеся успехи в получении материалов с критической температурой более 200К получены в результате сжатия гидридов до давлений Мб диапазона. Программа исследований Центра предполагает развитие методик измерений при Мб-давлениях в кооперации с Институтом кристаллографии РАН, который является ведущей организацией в РФ в этом направлении исследований.

4. Для изучения связи электронной структуры полученных сверхпроводниковых материалов с их сверхпроводящими характеристиками проводятся исследования их зонной структуры методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым и спиновым разрешением (SR ARPES).

5. Для построения адекватной модели нормального состояния и выяснения механизма сверхпроводимости в исследуемых ВТСП материалах необходимо иметь надежную совокупность данных измерений различными взаимодополняющими методами. С этой целью в Центре проводятся исследования магнитотранспортных (эффект Холла, магнитосопротивление, термоэдс) и термодинамических свойств (АС- и DC-

намагниченности, температурных зависимостей теплоемкости, анизотропии теплоемкости в магнитном поле, лондоновской глубины проникновения, критического магнитного поля, химического потенциала). Эти исследования, выполненные в комплексе, открывают возможности для определения типа и природы носителей заряда, многокомпонентности и типа симметрии параметра порядка, а также особенностей электронной структуры различных классов ВТСП и ее характерных энергетических масштабов.

6. Важное место среди планируемых исследований занимает оптическая спектроскопия ВТСП материалов, которая в свое время сыграла одну из ключевых ролей в развитии представлений о фундаментальных свойствах «классических», низкотемпературных сверхпроводников. Планируется проведение исследований по ИК-спектроскопии сверхпроводящих пниктидов железа семейств «122» и «1111» с различным замещением, а в дальнейшем – других перспективных материалов для определения параметров нормального и сверхпроводящего состояния (величины сверхпроводящих щелей, тип симметрии параметра порядка и др.). С целью выяснения типа симметрии сверхпроводящего параметра порядка в железосодержащих ВТСП предполагается методами ИК-спектроскопии провести измерения сверхпроводящих щелей в зависимости от концентрации немагнитных радиационных дефектов..

7. Планируется экспериментально изучить возможность изменения симметрии параметра порядка с ростом концентрации дефектов из анализа поведения температурной зависимости сверхтекучей плотности (или лондоновской глубины проникновения), которая согласно теории с ростом концентрации дефектов изменяется от экспоненциальной до степенной T^n с $1,6 < n < 2$.

8. Для выявления особенностей электронного спектра объемных сверхпроводников вблизи уровня Ферми, а также симметрии и структуры волновых функций квазичастиц (электронов, куперовских пар) в синтезированных ВТСП материалах проводятся исследования по спектроскопии многократных андреевских отражений в микроконтактах SnS.

9. Информацию о локальных поверхностных свойствах (нм- и суб-нм) планируется получить из измерений методом сверхвысоковакуумной низкотемпературной сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и спектроскопии (СТС). Предполагается подробно исследовать (а) локальную сверхпроводимость в топологически нетривиальных материалах, графеноподобных структурах, (б) интерфейсную сверхпроводимость, (в) пространственную структуру волновой функции квазичастиц. Эти измерения планируется провести в диапазоне температур до 0.4К и в магнитных полях до 15Тесла).

10. Планируется осуществить поиск сверхпроводимости в слоях атомной толщины, на интерфейсах, а также управление ею при помощи методов послойного дизайна структур и электрического легирования, провести исследования сверхпроводящих свойств наноструктур из таких слоев.

II Физика новых квантовых материалов.

Научная программа ЦКП ФИАН предполагает проведение исследований в области создания и исследования новых топологически нетривиальных материалов, называемых квантовыми (КМ). Актуальность данного направления обусловлена тем, что свойства этих материалов являются многообещающими для создания прототипов приборов, работа которых будет основана на новых физических принципах, с использованием уникальных свойств КМ: необычные «релятивистские» спектры электронов, поверхностные и краевые топологически защищенные состояния, необычную симметрию сверхпроводящего параметра порядка и т.д.

Наилучшими объектами для исследования новых физических эффектов в КМ, в силу ряда причин, являются наноструктуры на их основе. Поэтому для исследований КМ запланирована работа по трем направлениям: рост кристаллов, создание из них гетероструктур, наноструктурирование и исследование их электронных свойств.

Микро- и нано-структуры планируется создавать на основе топологических изоляторов (в том числе в форме эпитаксиальных пленочных), вейлевских и дираковских полуметаллов, графеноподобных материалов и сверхпроводников с возможной нетривиальной топологией или с сильным спин-орбитальным взаимодействием.

С этой целью планируется:

1. Выращивание монокристаллов топологических изоляторов, вейлевских и дираковских полуметаллов как платформы для создания пленочных и “чешуечных” наноструктур. Создание и исследование ван-дер Ваальсовых гибридных структур из топологически нетривиальных материалов в контакте со сверхпроводниками. Реализация и исследование топологической сверхпроводимости. Выявление майорановских квазичастиц.
2. Проведение ARPES исследований кандидатов в вейлевские и дираковские полуметаллы для выявления дираковских особенностей и Ферми-дуг в спектре, а также для оптимизации условий роста и состава материалов.
3. Применение ARPES методик для выявления в энергетическом спектре ветвей различной киральности и спиновой поляризации.
4. Изучение поверхностных электродинамических свойств КМ: измерение ИК спектров отражения и пропускания, а также эллипсометрические измерения (в диапазоне от ИК до УФ). Расчет оптических функций (проводимость, диэлектрическая проницаемость), разделение вкладов различных механизмов, формирующих спектры.
5. Реализация теневых микро и нано- контактов к химически чувствительным наночешуйкам топологических изоляторов и органических сверхпроводникам. Выявление новых транспортных свойств таких структур.

III. Физика сильных межэлектронных корреляций.

1. Выявление и изучение эффектов межэлектронного взаимодействия в двумерных и квазиодномерных электронных системах, включая селениды, халькогениды, органические кристаллы.
2. Выявление и изучение квантовых фазовых переходов в железосодержащих сверхпроводниках. Изменение химическим допированием положения на фазовой диаграмме сверхпроводящей фазы в железосодержащих сверхпроводниках с целью выявления квантовых критических точек; тонкая подгонка к критической точке методами зонной инженерии (давление, электронное легирование). Выявление особенностей вблизи критической точки в нормальной фазе в термодинамических характеристиках и особенностей (симметрия, наличие нулей) параметра порядка в сверхпроводящей фазе из вольт-амперных характеристик нано-сужений.
3. Исследование свойств, механизмов электропроводности и фазовых состояний в манганитах.
4. Исследование свойств гекса-, додэка- и гектоборидов.
5. Исследование эффектов взаимодействия спинового, зарядового упорядочения и сверхпроводящего спаривания в квазидвумерных и квазиодномерных материалах.

VI. Технологии создания ВТСП материалов и устройств для практического применения

1. Разработка технологии получения протяженных токонесущих элементов на основе железосодержащих сверхпроводников с изотропными свойствами методом криотермального механохимического активирования, а также методом экструзии (геометрия типа «порошок в трубе»). Оптимизация сверхпроводящих характеристик путем изменений условий синтеза, экструзии и введения связующих наночастиц.
2. Разработка и исследование ВТСП компактных токоограничивающих устройств.