

Программа научных исследований ЦКП ФИАН I Высокотемпературные сверхпроводники.

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 2023 г., мировой рынок промышленных применений устройств на основе ВТСП материалов по прогнозам достигнет 50 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, (г) синтез супергидридов металлов при высоких давлениях. В области синтеза новых объемных ВТСП материалов для исследований и прикладных разработок синтезируются образцы сверхпроводящих слоистых оксипупратов, 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 используются разнообразные методы вакуумного осаждения.

3. В последнее время выдающиеся успехи в получении материалов с критической температурой около комнатной 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. Продолжаются исследования механизмов комнатно-температурной сверхпроводимости.

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, температурные зависимости теплоемкости, анизотропия теплоемкости в

магнитном поле, глубина проникновения, критическое магнитное поле, химический потенциал). 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. Проводятся исследования 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, типа симметрии параметра порядка и др.).

7. Экспериментально изучается взаимная игра магнитного упорядочения и сверхпроводящего спаривания в высокотемпературных сверхпроводниках с магнитно-упорядоченной решеткой.

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 и мостиках типа 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, (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 Новые квантовые материалы.

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: необычных «релятивистских» спектров электронов, поверхностных и краевых топологически защищенных состояний, необычной симметрии 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 создаются 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 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 сверхпроводников. Выявление новых транспортных свойств таких структур.

III. Сильно коррелированные материалы

1. Выявление и изучение эффектов межэлектронного взаимодействия в двумерных и квазиодномерных электронных системах, включая селениды, арсениды, теллуриды.
2. Выявление и изучение квантовых фазовых переходов в 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 наносужений.
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.
3. Разработка источников сверхсильных магнитных полей на основе новых ВТСП материалов.