

## Резюме проекта, выполняемого

в рамках ФЦП

### «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»

по этапу № 1

Номер Соглашения о предоставлении субсидии: 14.604.21.0200

Тема: «Разработка инновационного радиоспектроскопического приборного комплекса и его применение для исследования и неразрушающего контроля конденсированных материалов, включая наноструктурные и биологические объекты»

Приоритетное направление: Индустрия наносистем (ИН)

Критическая технология: Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии

Период выполнения: 26.09.2017 - 30.06.2020

Плановое финансирование проекта: 55.80 млн. руб.

Бюджетные средства 27.90 млн. руб.,

Внебюджетные средства 27.90 млн. руб.

Получатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Индустриальный партнер: Общество с ограниченной ответственностью "НТ-МДТ"

Ключевые слова: Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), оптически детектируемый магнитный резонанс (ОДМР), электронное спиновое эхо (ЭСЭ), двойной электронно-ядерный резонанс (ДЭЯР), оптически детектируемый циклотронный резонанс (ОДЦР), спин, спектрометр магнитного резонанса, атомно-силовой микроскоп, конфокальный микроскоп, магнито-оптический криостат, полупроводник, диэлектрик, наноструктура, одиночный квантовый объект, наноразмерный сенсор

## 1. Цель проекта

1. Разработка макета радиоспектроскопического приборного комплекса (в дальнейшем РПК) для его применения при исследованиях и диагностике материалов, с целью повышения чувствительности, спектрального и пространственного разрешения. Макет включает в себя:
  - линейку сверхвысокочастотных (СВЧ) спектрометров ЭПР-ОДМР, построенных на единой технологической платформе и с единой магнитооптической автономной криогенной системой замкнутого цикла, не имеющих мировых аналогов и работающих в непрерывном и импульсном режимах в диапазонах СВЧ 94 ГГц и 130 ГГц, диапазоне магнитных полей 0-7 Тл и диапазоне температур 1.5-300 К.
  - сканирующий спектрометр магнитного резонанса с использованием атомно-силового и конфокального микроскопов, перекрывающих видимый и ближний ИК оптические диапазоны, совместимые с волоконной оптикой и полосой прозрачности биологических объектов, и микроволновые диапазоны от 1 МГц до 4 ГГц.
2. Изучение потенциальных возможностей макета РПК, предельных характеристик для последующей опытно-конструкторской разработки и коммерциализации.
3. Проведение на созданном оборудовании прорывных исследований мирового уровня, а по ряду направлений определяющих мировой уровень.

## 2. Основные результаты проекта

В рамках ПНИ на первом этапе был проведен аналитический обзор литературы и патентный поиск, позволяющие более детально провести комплексный анализ проблемной области проекта, обосновать и выбрать оптимальное направление проведения ПНИ. В ходе первого этапа были разработаны методики регистрации электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на частоте 94 ГГц в режиме электронного спинового эха (ЭСЭ) и выработаны технические требования к формирователю импульсной последовательности. Данный метод позволяет исследовать объекты различной природы: конденсированные материалы, включая наноструктурные объекты, биологические системы. Была создана программа управления работой макета спектрометра и регистрации высокочастотного ЭПР в непрерывном режиме на частоте 94 ГГц, а также управления магнитным полем и длиной волны. Программа предполагает возможность расширения, подключения дополнительной аппаратуры и введения разных режимов работы. Была разработана методика регистрации оптически детектируемого магнитного резонанса

(ОДМР) с использованием оптического конфокального микроскопа, совмещенного с атомно-силовым микроскопом (АСМ). Такая комбинация позволяет определять пространственное распределение спиновых центров по изучаемой поверхности с конфокальным оптическим разрешением (порядка 250 нм). Применение методов высокочастотного ЭПР, ЭСЭ, ОДМР, низкочастотного ОДМР, совмещенного с конфокальным и атомно-силовым микроскопами, является перспективным и эффективным для изучения и контроля дефектов и примесей в широкозонных полупроводниках и диэлектриках, наноструктурах на их основе и биоматериалах, для исследования влияния окружения, воздействия нагрузок и деформаций, электрических и магнитных полей, оптического возбуждения. Определены требования к экспериментальным образцам для калибровки радиоспектроскопического приборного комплекса. Предложено использовать широкозонные полупроводники (алмаз, карбид кремния, нитрид алюминия). Определены основные параметры высокочастотного моста (выходная мощность: менее 200 мВт, стабильность частоты: не более 0,5 МГц/град). Разработаны лабораторная методика подготовки экспериментальных образцов, блок-схемы элементов макета, программного обеспечения и технического задания для программ регистрации спектров. Были проведены работы по достижению показателей результативности предоставления субсидии, подведены итоги этапа ПНИ и разработана отчетная документация.

### **3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках прикладного научного исследования и экспериментальной разработки**

Патентование планируется на следующем втором этапе выполнения Проекта.

### **4. Назначение и область применения результатов проекта**

Разрабатываемый макет радиоспектроскопического приборного комплекса (РПК), как показали проведенные исследования рынка, коммерческого аналога не имеет. Разработка является новой и уникальной.

Этот прибор позволит исследовать вещества в экстремально малых объемах, что является принципиально важным для многих областей применений, таких как медицинская химия, структурная биология, онкология, молекулярные методы визуализации. Он предназначен для:

- анализа и неразрушающей диагностики полупроводниковых материалов и наноструктур на их основе, включая приборные структуры для микро- и оптоэлектроники;
- исследования и контроля материалов, перспективных для применений в фотовольтаике, процессов разделения зарядов в системах для солнечной энергетики, включая гибридные органические-неорганические устройства, а также био-неорганические структуры на основе интегрирования в твердотельные ячейки для фотовольтаики протеинов, участвующих в биологическом фотосинтезе;
- исследования спиновых свойств и манипуляций спинами в устройствах для спинтроники и квантовых системах для информационных технологий будущего, включая устройства на основе единичного квантового объекта: единичной молекулы, единичного дефекта, единичной квантовой точки;
- исследования природы фотосинтеза, процессов разделения заряда в биологических фотосистемах;
- исследования процессов в биологических системах, в протеинах, металло-протеинах, содержащих переходные металлы и их кластеры, динамики и направленности переноса вещества через мембраны в протеинах, изучение возможности контролируемой модификации протеинов для геномной инженерии; исследование свободных радикалов, играющих определяющую роль в биологических процессах;
- использования методов ЭПР для ранней диагностики раковых заболеваний;
- определения парциального давления кислорода внутри живых систем с использованием уникального свойства молекулярного кислорода - его парамагнетизма и клинические применения разработанных методик;
- применения в медицине и фармацевтике для разработки новых типов лекарств со свободными радикалами и без них, определение состава лекарственных веществ, определение срока годности веществ, устойчивости препаратов под действием внешних факторов, наличия вредных компонент;
- диагностики последствий воздействия облучения на организм (рентген и другие методы, в том числе методы антираковой терапии), использование ЭПР в дозиметрии и био-дозиметрии;
- анализа геологических пород в различных месторождениях (нефть, алмазы, металлические руды, минеральные удобрения и т.д.);
- исследования и неразрушающего контроля малых объемов вещества, вплоть до 10-10 мм<sup>3</sup> (кристаллов протеинов, тонких пленок, кожных поверхностей, живой материи и т.д.).

### **5. Эффекты от внедрения результатов проекта**

В дальнейшем на базе работ, выполненных в данном проекте можно будет создать общую технологическую схему, в рамках которой на единой платформе по блочному принципу будет создана линейка высокочастотных спектрометров, не имеющая мировых аналогов.

В результате проекта будут получены принципиально новые разработки и продукция, которые позволят значительно усилить конкурентные преимущества российской науки и бизнеса.

### **6. Формы и объемы коммерциализации результатов проекта**

Разрабатываемое оборудование ориентировано на широкое применение в научно-исследовательских организациях и фирмах производителях наукоемкой продукции и будет конкурентоспособным на мировом рынке, что позволит реализовать задачу по разработке современного аналитического оборудования для обеспечения развития отечественного производства в области наукоемкого приборостроения.

По окончании этапа ОКР возможен серийный выпуск радиоспектроскопического приборного комплекса для исследования и диагностики конденсированных материалов.

Возможна также разработка упрощенных вариантов приборов для ВУЗов и образовательных центров с целью демонстрации квантовых процессов и методов манипуляции спинами, а также адаптирование к процессу обучения программы и учебника для изучения методов спектроскопии ЭПР и ОДМР для ВУЗов, а также книги, написанной руководителем проекта по заказу издательства Шпрингер.

## 7. Наличие соисполнителей

К выполнению работ привлекался соисполнитель: «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (ФГАОУ ВО КФУ), Соисполнитель привлекался согласно договору о НИР «Исследование сверхтонких и квадрупольных взаимодействий парамагнитных дефектов в образцах допированных марганцем гранатов методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), электронного спинового эха (ЭСЭ) и двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР)» № 29 от 08 ноября 2017 г. между ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ФГАОУ ВО КФУ.

Часть работ, осуществляемых за счет внебюджетных средств в рамках первого этапа проекта, выполнялась индустриальным партнером ООО «НТ-МДТ» за счет собственных средств.

Часть работ, осуществляемых за счет внебюджетных собственных средств Получателя субсидии в рамках первого этапа проекта, выполнялась ООО "ДОК" в рамках Договора о научно-техническом сотрудничестве № НТ-1 от 24 октября 2017 г. между ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ООО "ДОК" за счет собственных средств.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской  
академии наук

Зам. директора

(должность)

(подпись)

Лебедев С.В.

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель работ по проекту

заведующий лабораторией

(должность)

(подпись)

Баранов П.Г.

(фамилия, имя, отчество)

