

## **Впервые учеными Беларуси создан сверхпроводящий ниобиевый резонатор для ускорителей электронов и позитронов**

4 декабря 2014 г., после нескольких лет настойчивой работы сотрудников Физико-технического института и НПЦ по материаловедению НАН Беларуси, Национального центра физики частиц и высоких энергий (НЦ ФЧВЭ) Белорусского государственного университета (БГУ), НИИ ядерных проблем (ЯП) БГУ и Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), **в испытаниях первого сверхпроводящего ниобиевого резонатора отечественного производства достигнуто явление сверхпроводимости.**

Прямым аппаратурным методом исследован важнейший показатель резонатора - значение добротности на частоте 1,3 ГГц, и установлено, что она составляет  $1,49 \times 10^9$ .

Такой уникальный результат получен в Беларуси впервые. Ранее в Беларуси выпускались только т.н. «тёплые» резонаторы с добротностью до  $10^6$ . Сверхпроводящие резонаторы из особо чистого ниобия являются ключевым элементом ускорительных секций Международного линейного коллайдера (МЛК), как и многих других современных линейных ускорителей. Резонатор представляет собой полую металлическую камеру сложной формы, внутри которой возбуждается стоячая электромагнитная волна. До настоящего времени эти изделия выпускались только за рубежом хорошо зарекомендовавшими себя фирмами.



Исследования проводятся по заказу и в тесном сотрудничестве с Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Россия) в рамках НИР по обеспечению проектирования, изготовления, испытаний и поставки трех опытных образцов сверхпроводящего ниобиевого резонатора. В ней участвуют подразделения трех учреждений Беларуси: НАН Беларуси, БГУ

и БГУИР. По информации российских коллег, никогда ранее в контрактах с ОИЯИ не концентрировались такие силы: из задействованных 26 сотрудников - пять докторов наук и восемь кандидатов наук.

Организаторами и руководителями данного проекта являются со стороны ОИЯИ д.ф.-м.н. проф. Юлиан Будагов, со стороны Беларуси — заместитель директора по научной работе НЦ ФЧВЭ БГУ к.т.н. Михаил Батурицкий. Большую помощь в организации оказали член-корр. НАН Беларуси С.К. Рахманов и Полномочный представитель Республики Беларусь в ОИЯИ В.И. Недилько. Работа выполняется в рамках темы в ОИЯИ 02-0-1067-2007-2012 «Международный линейный коллайдер: ускорительная физика и техника» (с 2013 г. тема 02-0-1067-2007/2015 «Исследования в области  $e^+e^-$ -линейных ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей»), руководитель - главный инженер ОИЯИ член-корреспондент РАН д.ф.-м.н. Г.Д. Ширков.

Создание резонаторов, удовлетворяющих требованиям МЛК, является весьма непростой задачей, поскольку существует много факторов, приводящих к ухудшению их рабочих характеристик. Требуется механически изготовить с высокой степенью точности отдельные элементы резонатора из достаточно труднообрабатываемого сверхчистого ниобия. Кроме того, этот материал весьма дорог, цена сопоставима с ценой серебра. Другой технологической операцией, требующей особого внимания, является сварка отдельных элементов резонатора в единое целое, так как неудовлетворительное качество сварного соединения может привести к локальному нагреву и выводу резонатора из сверхпроводящего состояния. Соединение отдельных элементов резонатора может выполняться только с использованием электронно-лучевой сварки (ЭЛС). На каждом из упомянутых этапов в сверхчистый ниобий могут быть внесены примеси, которые непоправимо изменят его сверхпроводящие параметры. Этап ЭЛС является наиболее критичным с точки зрения возможности введения в зону сварного шва примесей. На тех немногих предприятиях в мире, которые взялись за решение проблемы изготовления таких резонаторов, предварительно создана современная инфраструктура стоимостью в десятки - сотни миллионов евро для проведения основных, подготовительных и промежуточных работ.

Задача коллектива сотрудников ФТИ НАН Беларуси в проекте – непосредственное изготовление экспериментальных образцов резонатора из исходных листовых заготовок и передача их на испытания. Чрезвычайно важно избежать загрязнения исходно чистого ниобия и, следовательно, ухудшения его свойств. Как оказалось в результате, эта задача успешно решена.

В лаборатории электрофизики НИЦ электронно-лучевых технологий и физики плазмы (д.т.н. Игорь Поболь) и лаборатории высоких давлений (к.т.н. Артур Покровский) ФТИ НАН Беларуси выполняются исследования структуры и механических свойств исходного особо чистого ниобия и материала, подвергнутого ЭЛС. Для придания сложной формы составным частям резонатора – полусферам с изменяемым по профилю радиусом в лаборатории высоких давлений для формообразования таких изделий использован метод гидроударной штамповки. К.т.н. Владимиром Петраковским и к.т.н. Александром Журавским разработаны технологии механической подготовки листового ниобия к штамповке, методики оценки штампуемости и собственно

изготовлены полусферы. При этом коэффициент выхода годного составил 100%, что является большим успехом, т.к. обычно при получении экспериментальных образцов допускается выход одной годной детали на 100 бракованных. Проблемой стала чрезвычайная сложность лезвийной механической обработки особо чистого ниобия, весьма вязкого материала, в процессах подрезки торцев и подготовки стыков под последующую сварку.

Отработаны методы ЭЛС деталей, а также очистки травлением наружной и внутренней поверхностей резонаторов, что также является непростой задачей (научный сотрудник Сергей Юревич). Все работы требовали создания и использования специально разработанных методик и технологических оснасток.

В БГУИР в рамках научного направления «Мощные вакуумные приборы СВЧ. Нелинейная теория и численная оптимизация» сформировался коллектив специалистов: проф., д.ф.-м.н. Александр Кураев, проф., д.ф.-м.н. Станислав Колосов, проф., д.ф.-м.н. Анатолий Сеницын, доц., к.ф.-м.н. Татьяна Попкова, к.ф.-м.н. Алексей Рак. Имеющийся научный задел используется для электродинамических расчетов формы и характеристик одиночного и 9-звенного резонаторов, влияния погрешностей формы и других факторов. Кроме того, ими предложены оригинальные методы измерения добротности, не требующие дорогой сверхпрецизионной аппаратуры, и формирования сгустков в пучках ускорителей электронов и позитронов.

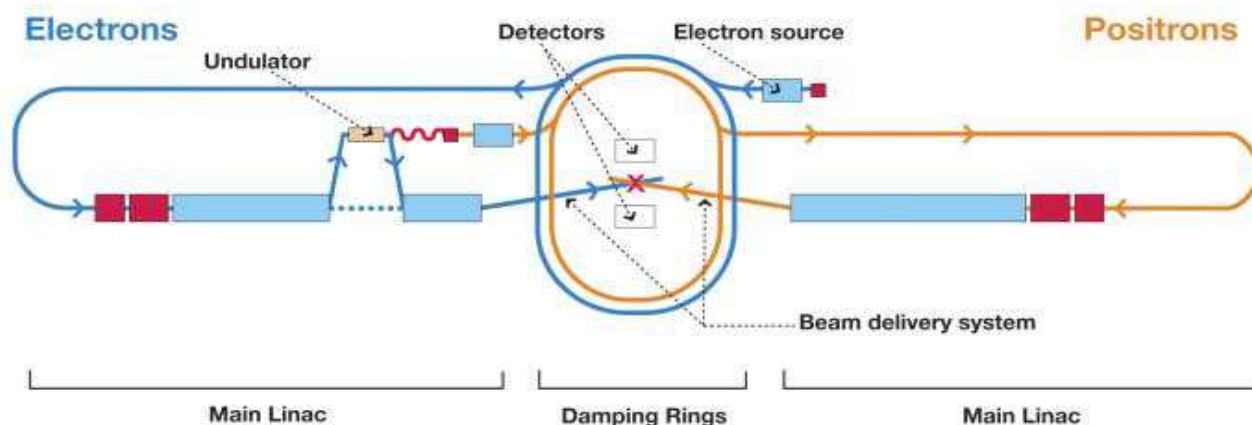
Апробация резонатора и измерение его параметров стали возможным благодаря созданному в НИИ ЯП БГУ измерительному стенду, над которым работали зав. лабораторией к.ф.-м.н. Виктор Карпович, к.ф.-м.н. Валентина Родионова, к.ф.-м.н. Сергей Максимов, к.ф.-м.н. Николай Любецкий. Инженерно-технические решения, положенные в основу стенда, предназначенного для измерения резонансной частоты  $f_0$  и добротности  $Q$  одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора, позволяют измерять эти параметры с высокой точностью. Точность установки отсчетной шкалы комплекса имеет порядок  $10^{-11}$  (в абсолютных единицах 0,01 Гц) на резонансной частоте 1,3 ГГц, что достигается стабилизацией шкалы векторного анализатора цепей Agilent E5061B внешним источником — стандартом частоты на парах рубидия. Такая точность отвечает предельному разрешению прибора Agilent E5061B (цена деления шкалы – 1 МГц). Тем самым, в полосе пропускания 0,1 Гц может быть гарантированно получено 10 отсчетных точек на амплитудно-частотной характеристике исследуемого резонатора для оценки его добротности. В свою очередь, такая полоса пропускания (характерная для резонаторов данного типа при охлаждении их жидким гелием) отвечает значению  $Q \sim 10^{10}$ . Дальнейшее повышение качества оценки добротности достигается статистической обработкой результатов многократных измерений. Уникальным техническим решением, обеспечивающим необходимую для точной оценки  $Q$  высокую степень симметрии АЧХ  $S_{11}$  относительно  $f_0$  при проведении измерений, является разработка устройства связи на основе механически настраиваемой петли связи, расположенной на торцевой крышке резонатора.

Криогенные испытания резонаторов проводятся в НПЦ НАН Беларуси по материаловедению. Под руководством зав. отделом д.ф.-м.н. Сергея Демьянова разработана вертикальная система криостатирования погружного типа с

гелиевым сосудом высотой 800 мм и диаметром более 300 мм. Криомодуль позволяет проводить СВЧ измерения при температуре 4,2 К и удовлетворяет всем предъявляемым к нему требованиям. Кроме того, в НПЦ по материаловедению налажено исследование швов, полученных методом ЭЛС в образцах ниобия. Показано высокое качество материала шва, полученного ЭЛС, параметры сверхпроводимости которого практически не отличаются от материала исходного ниобия.

Налажено сотрудничество с ведущими мировыми центрами, обладающими технологией изготовления и испытания ниобиевых резонаторов - FermiLab (Батавия, США), DESY (Дармштадт, Германия), которые заинтересованы в появлении новых производителей резонаторов, способных взять на себя часть этой тяжелой ноши (всего для Международного линейного коллайдера потребуется примерно 20 тыс. резонаторов, для Европейского лазера на свободных электронах 800 штук). Так, FermiLab передал в Беларусь через ОИЯИ действующий образец сверхпроводящего ниобиевого резонатора для предварительной отработки методик криогенных СВЧ измерений, DESY провел необходимые консультации.

Теперь можно сказать, что к исследовательским центрам по всему миру (FermiLab, США; DESY, Германия; INFN, Италия; КЕК, Япония и др.), где ведутся работы по созданию и совершенствованию таких резонаторов, присоединилась совместно с ОИЯИ и перспективная команда из Беларуси, показавшая хорошие результаты.



### Справка.

Международный линейный коллайдер (МЛК), – сложная машина-ускоритель длиной в несколько десятков километров будет способен разгонять заряженные элементарные частицы высокочастотным электромагнитным полем до субсветовых скоростей. Такие высокоэнергетические частицы необходимы физикам для более глубокого проникновения в объекты микромира с целью исследования его внутренней природы. На МЛК предполагается достичь энергии столкновений частиц порядка 1 TeV. Цель данного проекта заключается в попытке понять, из чего состоит Вселенная и как её составные блоки взаимодействуют друг с другом.

Предполагается, что ускоритель будет создан на территории Японии. На его создание потребуется по сегодняшним оценкам \$7.8 миллиардов, что почти вдвое превышает цену создания крупнейшего ускорителя - 27-километрового Большого адронного коллайдера.