

Азарян Николай Сергеевич
НЭОМАП ЛЯП ОИЯИ

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ НИОБИЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛИНАКОВ

Специальность 01.04.20 – физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор

Григорий Дмитриевич ШИРКОВ

Научный консультант:
доктор технических наук, доцент
Физико-технический институт НАН Беларуси

Игорь Леонидович ПОБОЛЬ

ПТП ОИЯИ: 02-0-1067-2007/2015
02-0-1127-2016/2018

- 2003 *“Understanding Matter, Energy, Space and Time: the Case for the Linear Collider”*
- 2004 ICFA выбрал 1.3 ГГц резонаторы TESLA в основе будущего ускорителя
- 2005 сформирована команда GDE для выработки технического проекта ILC
- 2007 ОИЯИ официально присоединился к проекту ILC
- 2011 начало проекта ОИЯИ-Минск изготовления СП-резонаторов

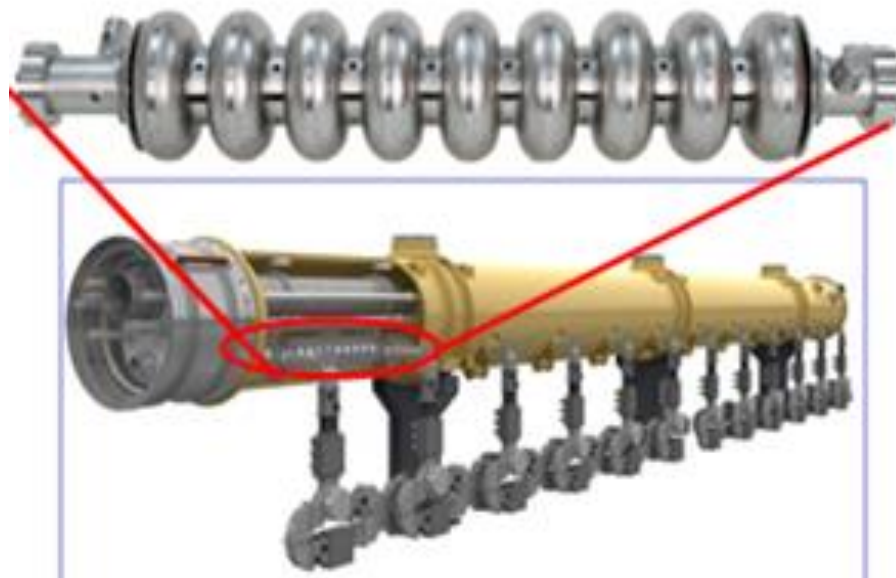
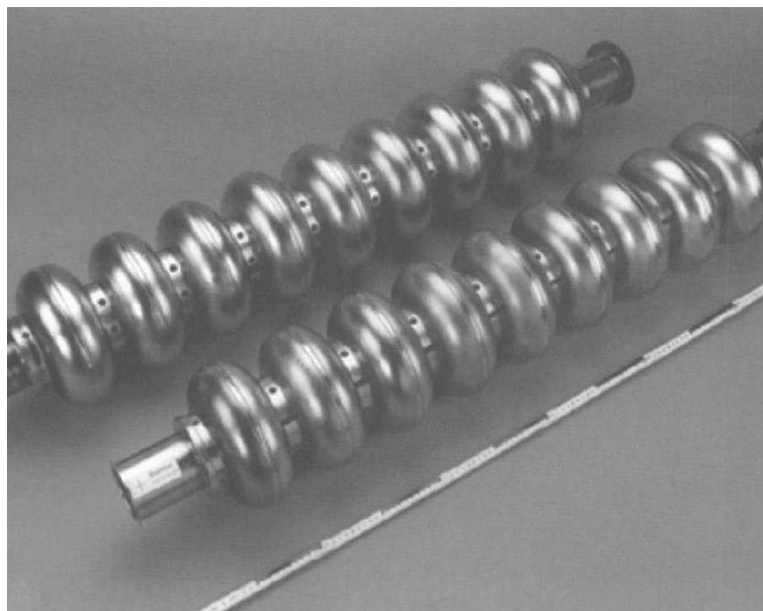


- 2015 Изготовлены 3 опытных образца резонатора из осочистого ниобия



СП-резонаторы типа TESLA:

- низкие энергетические потери
- высокая добротность
- высокая светимость



Применения:

- фундаментальная физика (ILC)
- ЛСЭ (FLASH, XFEL)
- подкритические реакторы (ADS)

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

- Определить геометрические параметры резонаторов, отвечающих проектным параметрам ускорителя ILC и разработать техническое задание для их изготовления.
- Создать экспериментальную базу, отвечающую современным критериям промышленного производства сверхпроводящих резонаторов, разработать технологию штамповки полуячеек, освоить технологию электронно-лучевой сварки высокочистого ниобия.
- Создать экспериментальную базу для СВЧ-испытаний резонаторов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия, измерить СВЧ-параметры первой опытной серии ниобиевых резонаторов, изготовленных по собственной технологии.

СТРУКТУРА ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Линейные электронные ускорители с нормально- и сверхпроводящими СВЧ-структурами
Современные технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов

Глава 1. Изготовление деталей сверхпроводящего одноячеечного резонатора на частоту 1,3 ГГц

1.1. Проектирование полужабок резонатора

1.2. Материал для изготовления сверхпроводящих резонаторов

1.3. Исследование листового материала и отработка технологии химического травления ниобия

1.4. Гидроударная штамповка ниобия

1.5. Механическая обработка деталей резонатора

Выводы Главы 1

Глава 2. Электронно-лучевая сварка ниобия

2.1. Отработка режимов ЭЛС на листовом ниобии

2.2. Анализ качества полученных сварных соединений

2.3. Сварка деталей резонатора

Выводы Главы 2

Глава 3. Испытания созданных одноячеечных резонаторов на частоту 1,3 ГГц

3.1. Методика проведения СВЧ-испытаний сверхпроводящих резонаторов

3.2. Устройство связи с СВЧ трактом для одноячеечного резонатора на частоту 1,3 ГГц

3.3. Стенд для испытаний резонаторов при температуре жидкого гелия

3.4. Результаты СВЧ-испытаний резонаторов

Выводы Главы 3

Заключение

Выводы диссертации

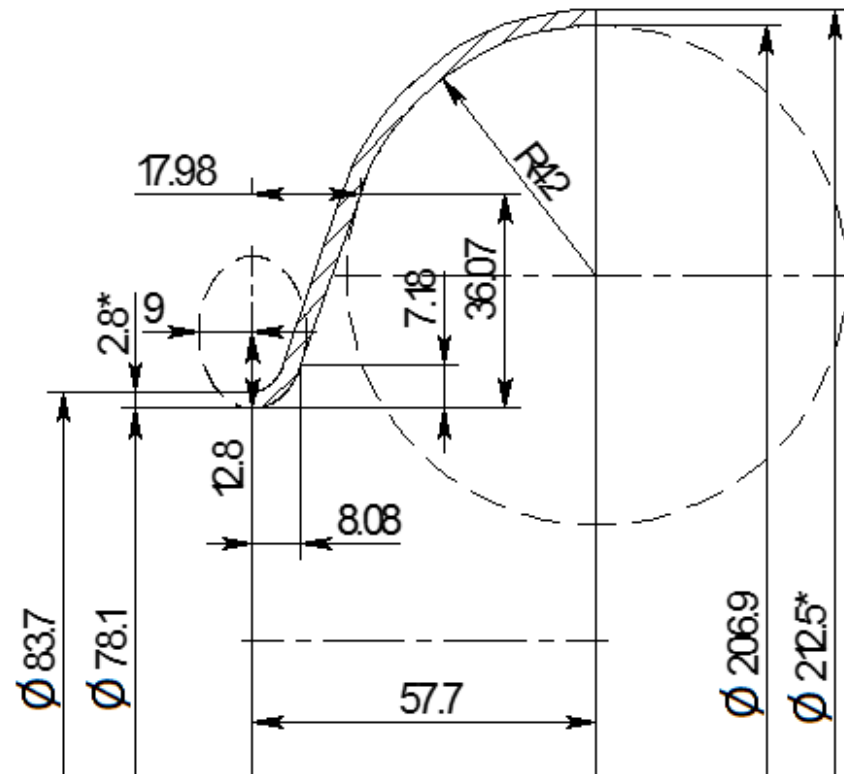
Список литературы

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛУЯЧЕЕК РЕЗОНАТОРА

Рассчитаны геометрические параметры одноячеечного резонатора, которые отвечают ключевому условию проекта ILC: добротность не менее 10^{10} на рабочей частоте 1,3 ГГц. **полученный профиль** резонатора обеспечивает минимальную напряжённость электрического поля на стенках резонатора и максимальную на его оси.

Найдена оптимальная геометрия **сопряжения резонатора с трубкой дрейфа**: эллиптическое сопряжение снижает максимальную напряжённость электрического поля на стенке, что повышает ускоряющее поле на оси резонатора до 10 %.

Исследована зависимость собственной частоты от отклонения геометрии профиля от проектных значений. Полученные зависимости связывают **производственные допуски** с рабочими параметрами резонатора. Заложенный допуск к точности изготовления ± 100 мкм.

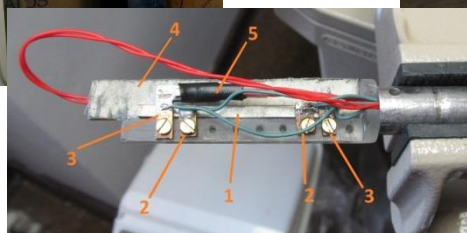


По результатам расчётов разработано **Техническое Задание**, ставшее основой изготовления одноячеечного резонатора

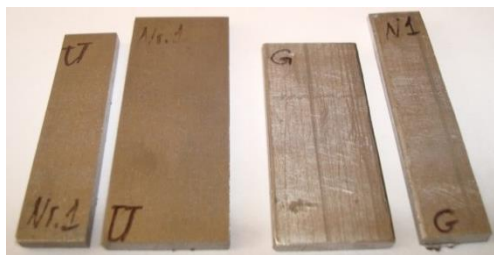
МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СП-РЕЗОНАТОРОВ

$$RRR = \frac{R_{300\text{ K}}}{R_{4.2\text{ K}}}$$

Поставщик	RRR
Россия	40
Казахстан	60
Китай	300-350
Япония	400

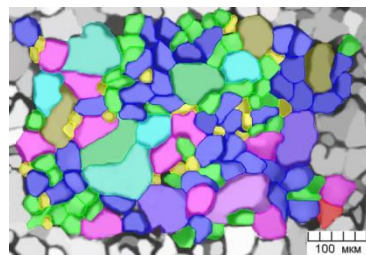


исследовано качество поверхности листового ниобия
выполнен микроструктурный анализ

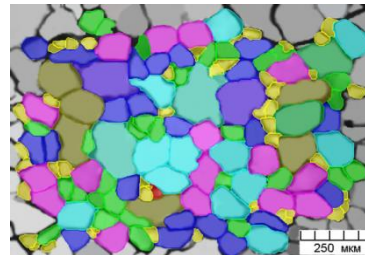


Казахстан

Россия



Китай



Япония

Элемент	Массовая доля примеси, %		
	Россия	Казахстан	ILC
Ta	0.06	0.05	0.05
Ti	< 0.003	< 0.001	0.005
Fe	0.0035	< 0.001	0.003
W	W+Mo	W+Mo	0.007
Mo	< 0.01	0.003	0.005
Ni			0.003
Si	< 0.003	< 0.001	
P	< 0.003		
H	0.0053	< 0.0002	0.0002
N	0.006	0.0051	0.001
O	0.0098	0.0073	0.001
C	0.0033	< 0.002	0.001

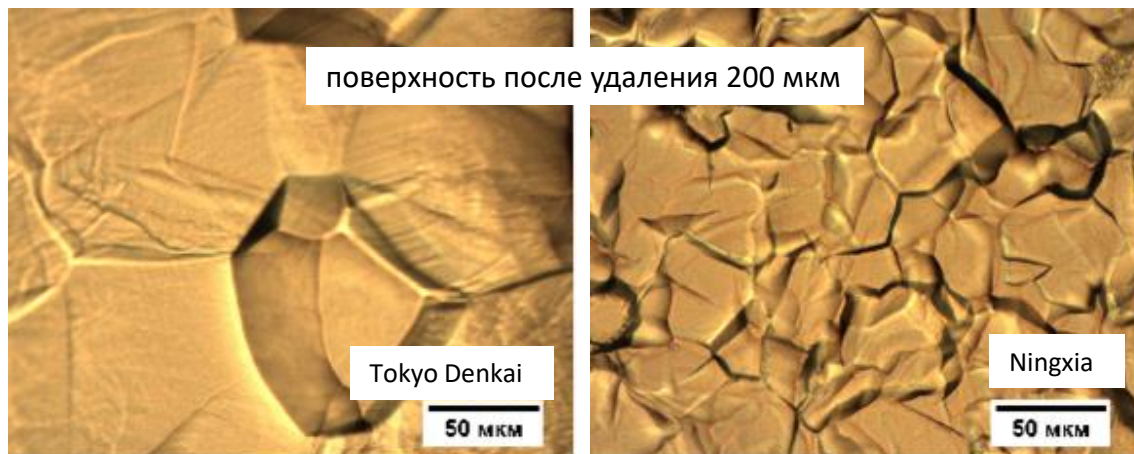
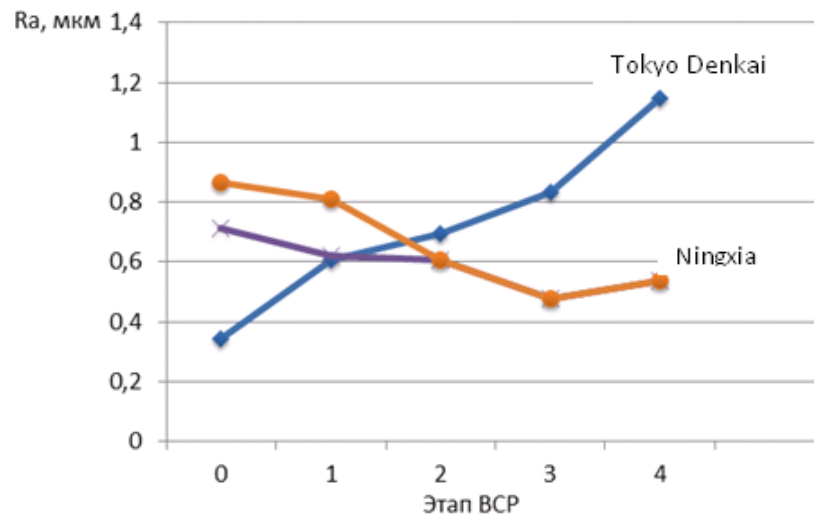
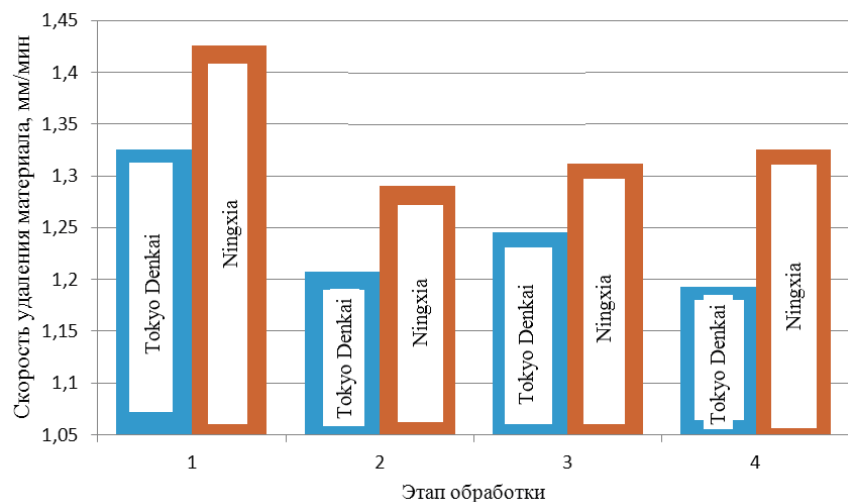
Выбранный поставщик - «Ningxia Orient
Tantalum Industry Co. Ltd.» (Китай)

ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ЛИСТОВОГО НИОБИЯ

Buffered Chemical Polishing (BCP) – смесь кислот

HF (38-49%) + HNO₃ (65-69,5%) + H₃PO₄ (85%)

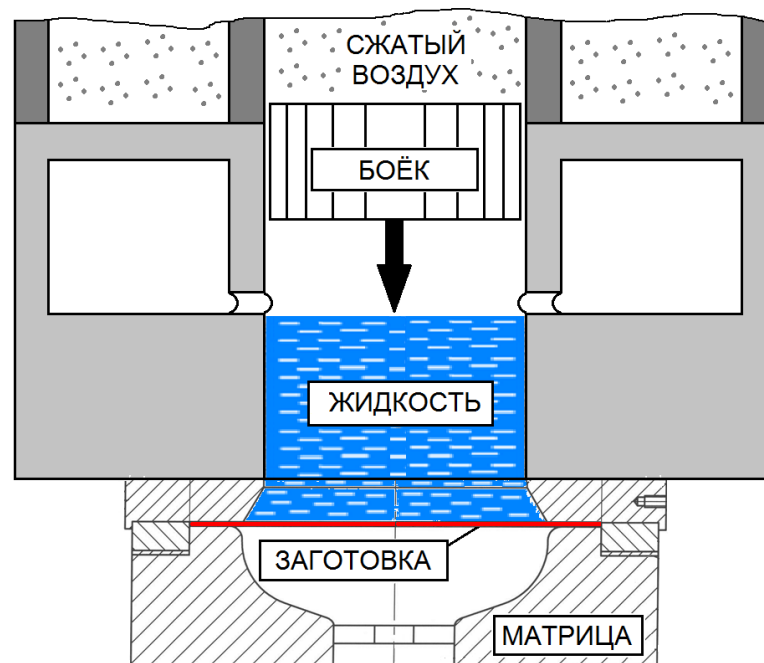
в соотношении 1:1:2



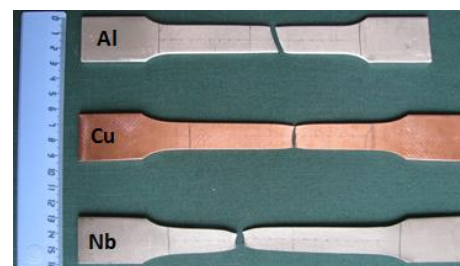
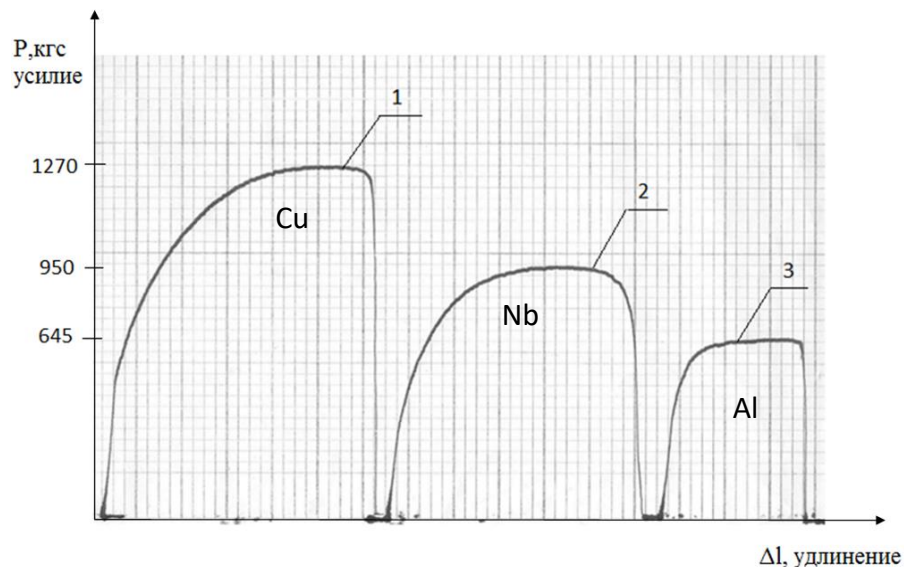
- отработаны режимы химической очистки поверхности ниобия для:
- удаления поверхностных поврежденных слоев
 - очистки поверхности после механической обработки деталей сваркой

ГИДРОУДАРНАЯ ШТАМПОВКА НИОБИЯ

- равномерное деформирующее усилие
- отсутствие пружинения
- высокое качество поверхности



Статические испытания



прочностные свойства ниобия находятся в интервалах между соответствующими характеристиками меди и алюминия

Динамические испытания

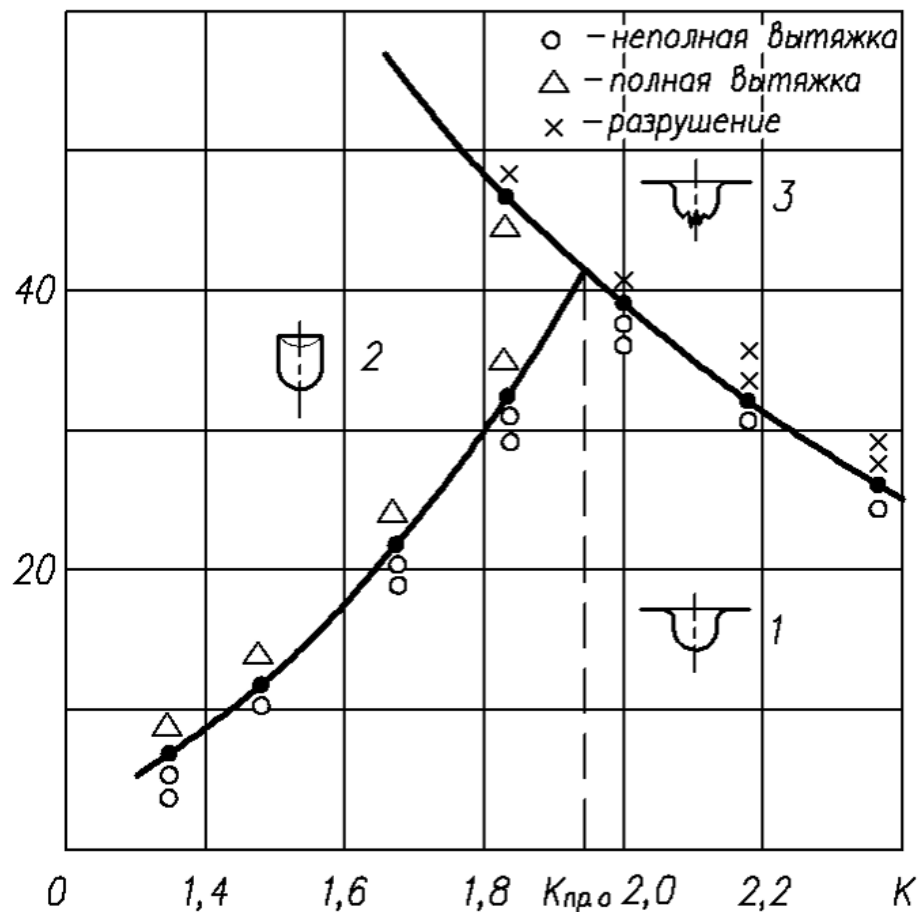
$$K_{\text{пр}} = \frac{\text{Ø заготовки}}{\text{Ø изделия}}$$



Экспериментально **впервые** получена диаграмма штампуемости особолистого ниобия и **установлено** значение предельной степени вытяжки при гидроударном нагружении

$$K_{\text{пр}}^{\text{Nb}} = 1,92 \quad (K_{\text{пр}}^{\text{Cu}} = 1,91; K_{\text{пр}}^{\text{Al}} = 1,94)$$

$$E_{\text{уд}} \times 10^4 \text{ Дж/м}^2$$



впервые в практике изготовления ниобиевых резонаторов методом гидроударной штамповки получены полноразмерные полуячейки с первой заготовки, как для модельных материалов, так и для сверхчистого ниобия



Cu



Al



применённый метод гидроударной штамповки обеспечил **высокую точность** изготовления: отклонение диаметров, по которым свариваются полуячейки не превысило 100 мкм



Nb

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ РЕЗОНАТОРА



- отработаны режимы механической обработки деталей резонатора из ниобия высокой чистоты
- создана вся необходимая технологическая оснастка

**отработаны все технологические процедуры
изготовления деталей резонаторов**

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА НИОБИЯ

ускоряющее напряжение	60 кВ
максимальная мощность луча	15 кВт
остаточное давление	$2 \cdot 10^{-3}$ Па
+ азотная ловушка ДУ-400	10^{-5} Па

Выбран режим ЭЛС листового Nb:

- ток сварки 53 мА,
- скорость сварки 10 мм/с.

ширина сварного шва:

- 4-5 мм у входа луча
- 3-4 мм у корня шва

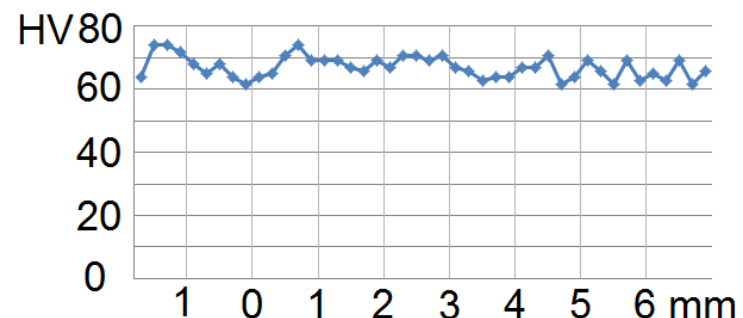
провисание сварочной ванны не более 0.3 мм

отсутствуют инородные включения;

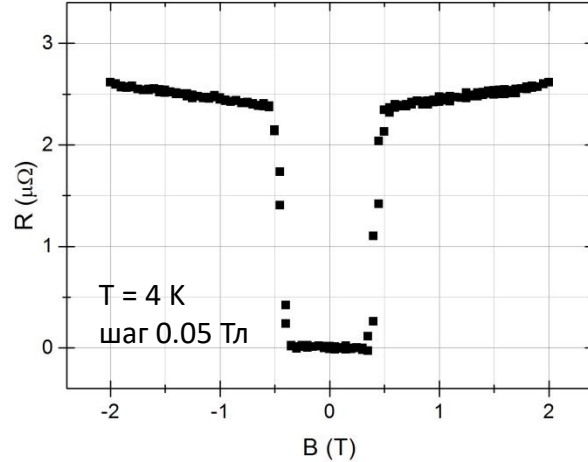
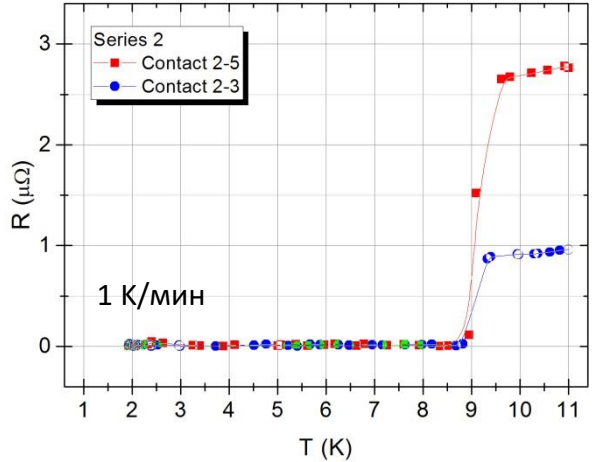
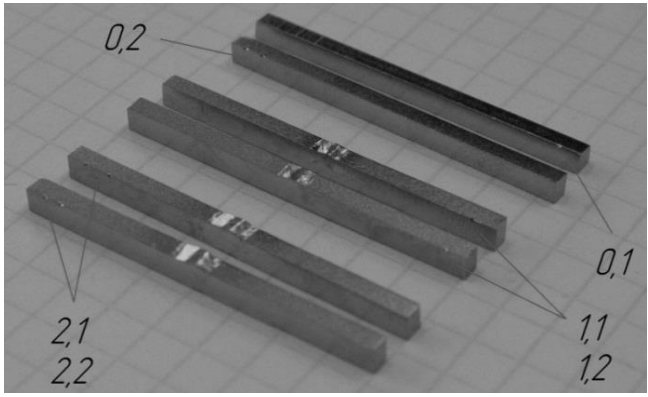
средней размер зерна:

- от 30-50 мкм на границе ЗТВ
- до 1000 мкм в зоне проплавления.

нет существенных изменений микротвердости в сварном соединении по отношению к металлу, не подвергавшемуся термическому воздействию



АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОЛУЧЕННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

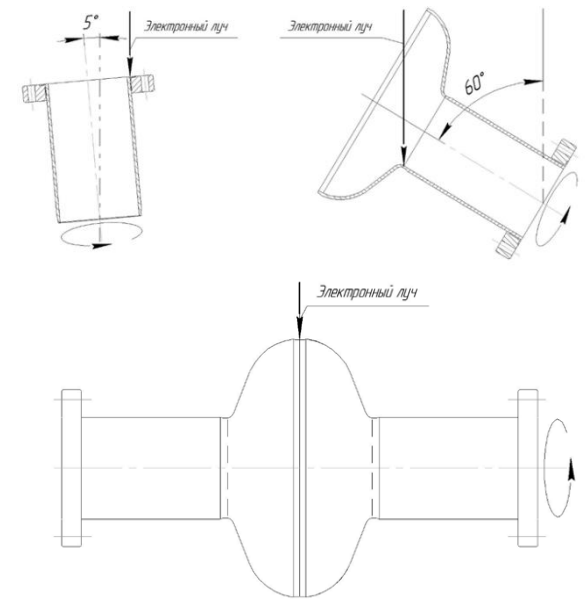


Параметр	Серия 0	Серия 1	Серия 2
$T_{кр}$	8.8 К	8.6 К	8.6 К
$\Delta T_{кр}$	0.55-0.6 К	0.65-0.7 К	0.65-0.7 К
$B_{кр}$	0.5 Тл	0.4 Тл	0.4 Тл
$\Delta B_{кр}$	0.15 Тл	0.2-0.25 Тл	0.2-0.25 Тл

- характеристики проплавленных и сваренных образцов идентичны
- незначительные отклонения от контрольных образцов носят естественный характер и не принципиальны для изготовления резонаторов

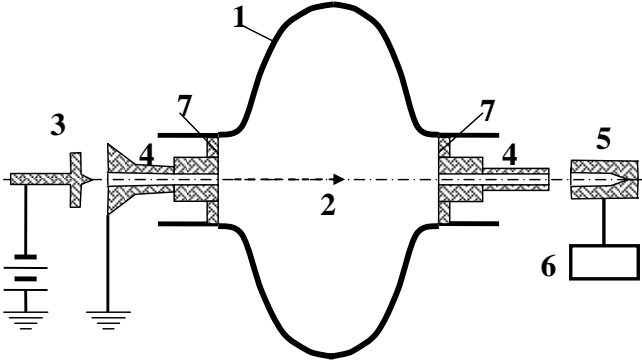
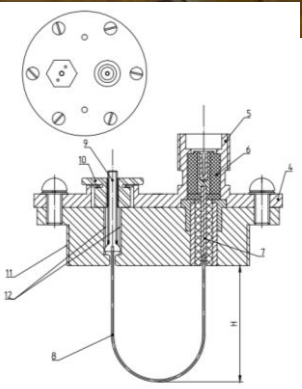
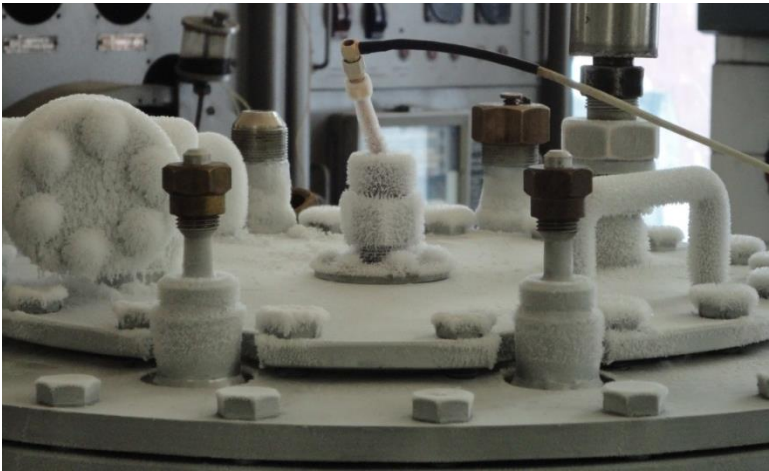
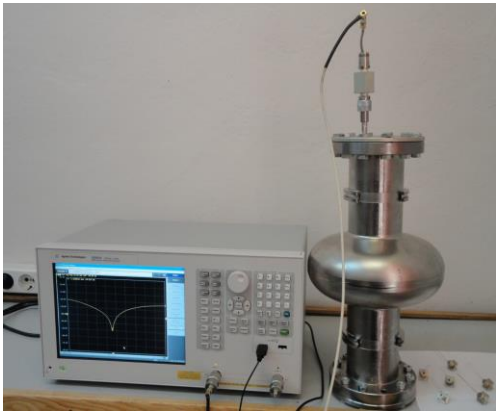
СВАРКА ДЕТАЛЕЙ РЕЗОНАТОРА

Свариваемое соединение	Параметр сварки	
	I_{CB} , МА	V_{CB} , ММ/С
Прихватка «трубка дрейфа – фланец»	15	6
Сварка трубка «дрейфа – фланец»	25	6
Прихватка «трубка дрейфа – полуячейка»	15	6
Сварка «трубка дрейфа – полуячейка»	28	6
Прихватка экватора полуячеек	15	5
Сварка экватора полуячеек	31	5



**ОТРАБОТАНЫ ВСЕ ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗОНАТОРОВ**

ИСПЫТАНИЯ СОЗДАННЫХ ОДНОЯЧЕЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРОВ



Разброс в измеренной резонансной частоте:

- 0,7 % для всех изготовленных резонаторов во всех проведённых экспериментах
- 0,5 % для Nb в криогенных испытаниях
- 0,009 % для Nb в испытаниях при комнатной температуре

высокая повторяемость частоты изготовленных резонаторов свидетельствует о реализации жестких требований и допусков.

Эксперимент	Частота	КСВ	Добротность
20.08.2012 Ниобий (Фермилаб) Комнатная температура	1.272969689	1.01	28193
01.03.2013 Ниобий (Фермилаб) Гелиевая температура Без стандарта частоты	1.274979678	-	$> 10^8$
05.03.2014 Ниобий (Фермилаб) Гелиевая температура	1.274977156	-	$0.82 \cdot 10^9$
25.09.2014 Медь Комнатная температура	1.2651811	1.0005	71559
16.10.2014 Медь Гелиевая температура	1.2940755	1.0007	94915
23.10.2014 Алюминий Комнатная температура	1.2901982	1.0016	55461
05.11.2014 Алюминий Гелиевая температура	1.2902357	1.0007	123540
19.11.2014 Ниобий (образец № 1) Комнатная температура	1.290197258	1.003	37549
04.12.2014 Ниобий (образец № 1) Гелиевая температура	1.290185765	1.0001	$1.5 \cdot 10^9$
10.02.2015 Ниобий (образец № 2) Комнатная температура	1.2903500	1.0032	36564
06.03.2015 Ниобий (образец № 2) Гелиевая температура	1.3002077	1.0001	$1.7 \cdot 10^9$
11.05.2015 Ниобий (образец № 3) Комнатная температура	1.2901429	1.0017	39552
08.06.2015 Ниобий (образец № 3) Гелиевая температура	1.2901127	1.0001	$2.5 \cdot 10^9$

ВЫВОДЫ

Завершён комплекс работ, обеспечивший создание оригинальной технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц.

В созданной партии одноячеечных резонаторов достигнута стабильная долговременная сверхпроводимости и получена высокая повторяемость частоты резонаторов.

Максимальное измеренное значение добротности изготовленного резонатора составило $2.5 \cdot 10^9$.

1. Определены геометрические параметры резонатора для частоты 1.3 ГГц в соответствии с проектными параметрами ускорителя ILC. По результатам расчётов разработано Техническое Задание, ставшее основой изготовления одноячеечного резонатора.

Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Кураев А.А., Ширков Г.Д. и др., «Расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов»

Письма в ЭЧАЯ, т. 9, № 2, с. 247-268, 2012.

2. Впервые в практике создания сверхпроводящих резонаторов предложен и реализован метод гидроударной штамповки ниобиевых полуячеек. Создана экспериментальная база для полного производственного цикла изготовления одноячеечных резонаторов, ранее отсутствовавшая в ОИЯИ и научных центрах стран-участниц. Экспериментальным путём впервые получена диаграмма штампуемости высокочистого ниобия для гидроударной штамповки и определены ключевые параметры процесса, обеспечившие полную вытяжку заготовки: предельная степень вытяжки сверхчистого ниобия составляет 1.92 при удельной энергии удара 0.42 МДж/м². Достигнута высокая точность изготовления полуячеек при серийном производстве резонаторов. Конкретно, обеспечена точность 100 мкм в контролируемых проектных диаметрах полуячеек (Ø 206.9 мм и Ø 78.1 мм).

Азарян Н.С., Ширков Г.Д., Журавский А.Ю., Петраковский В.С. и Батурицкий М.А., «Изготовление деталей сверхпроводящих резонаторов из ниобия методом гидроударной штамповки» Письма в ЭЧАЯ, т. 13, № 2, с. 345-353, 2016.

3. Реализованы режимы электронно-лучевой сварки особолистого ниобия, отвечающие современным критериям промышленного производства сверхпроводящих резонаторов . Анализ микроструктуры сварных швов свидетельствует о достижении соединения высокого качества по отсутствию инородных включений, размеру поликристаллического зерна, распределению микротвердости. Измерены критические температура $T_{кр} = 8.6$ К и магнитное поле $B_{кр} = 0.4$ Тл образцов сварного соединения: отклонение этих характеристик от цельнолистого ниобия не превышает 10 %, что является естественным следствием высоколокального термического воздействия электронным лучом и не существенно относительно сверхпроводящих свойств резонатора.

Demyanov S.E., Pobol I.L., Shirkov G.D., Budagov Yu.A., Azaryan N.S. u et al., «Superconducting properties of ultra-pure niobium welded joints»

Low Temperature Physics, V. 41, № 7, pp. 522-527, 2015.

4. Предложен и обоснован принципиально новый метод измерения ультравысоких ($10^8 - 10^{10}$) собственных добротностей резонаторов . Существенное преимущество метода – его «неинвазивность»: резонатор не связан с внешними СВЧ цепями, а его собственная добротность определяется по потере мощности электронным потоком и по пусковому току при монотронной генерации. В численном моделировании определены стартовые условия монотронной генерации в резонаторе на 1.3 ГГц, найдены значения необходимой величины тока пучка электронов.

Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Кураев А.А., Ширков Г.Д. и и др., «Измерение ультравысокой собственной добротности путём возбуждения сверхпроводящего резонатора электронным потоком»

Письма в ЭЧАЯ, т. 10, № 7, с. 1282-1291, 2013.

5. Разработано, запатентовано и изготовлено устройство связи, обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора – достигнутый уровень согласования составляет $KCB = 1.01$, что соответствует передаче в резонатор 99.9 % СВЧ мощности.

Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Ширков Г.Д., Карпович В.А., Родионова В.Н. и и др., «Устройство связи для цилиндрического резонатора СВЧ».

Патент ВУ 9583 U 2013.10.03, Республика Беларусь, Март 2013.

6. Создана экспериментальная база для исследований одноячеечных СВЧ-резонаторов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия. Выполнены СВЧ испытания опытной серии ниобиевых резонаторов, изготовленных впервые с применением технологии гидроударной штамповки. Измеренные значения добротности более 10^9 подтвердили стабильное достижение в резонаторах сверхпроводимости. Конкретно: максимальное измеренное значение добротности составило $2.5 \cdot 10^9$ на частоте 1.29 ГГц при достигнутом $KCB = 1.0001$.

Azaryan N.S., Budagov Yu.A., Karpovich V.A., Pobol I.L., Rodionova V.N., Shirkov G.D. u et al., «Measurement of Microwave Parameters of a Superconducting Niobium Cavity»

Journal of Engineering Physics and Thermophysics, V. 90, № 1, pp. 242-249, 2017.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ