

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРТЕЛЬНЫЕ НИОБИЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ TESLA-ТИПА ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ

Ю. А. Будагов¹, М. А. Батурицкий²,
С. Е. Демьянов^{3,*}, В. А. Карпович⁴, А. А. Кураев⁵,
И. Л. Поболь⁶, А. И. Покровский⁶, В. Н. Родионова⁴,
Г. В. Трубников¹, Г. Д. Ширков^{1,**}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Институт физики им. Б. И. Степанова

Национальной академии наук Беларуси, Минск

³ Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по материаловедению, Минск

⁴ Институт ядерных проблем Белорусского государственного
университета, Минск

⁵ Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск

⁶ Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск

Приведенные в статье результаты сконцентрированы преимущественно на прикладном аспекте, имеющем значение для разработки и создания международного линейного коллайдера электронов и позитронов. Большая часть работы выполнена белорусскими учеными из Национальной академии наук и вузов республики. В ГНУ «ФТИ НАН Беларуси» разработана технология гидроударной штамповки, изготовлены детали ниобиевого резонатора, методом электронно-лучевой сварки созданы медный, алюминиевый и сверхпроводящие ниобиевые резонаторы типа TESLA. В ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» разработан и создан гелиевый криостат погружного типа, обеспечивший полномасштабные СВЧ-испытания резонаторов, проведены исследования сверхпроводящих характеристик образцов исходного листового ниобия в области сварного шва, свидетельствующие всего лишь о 5%-м понижении критической температуры перехода, ширины сверхпроводящего перехода и критического магнитного поля. В НИУ «НИИЯП БГУ» разработана методика и создан измерительный комплекс для изучения СВЧ-параметров резонатора, совместно с ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» проведено изучение характеристик сверхпроводящих ниобиевых резонаторов (резонансной частоты резонатора, нагруженной добротности, коэффициента стоячей волны, относительного уровня потерь на центральной частоте).

* E-mail: sed52517@gmail.com

** E-mail: shirkov@jinr.ru

The results presented in the collective monograph are concentrated mainly on the applied aspect, which is important for the development and creation of the International Linear Electron and Positron Collider. Most of the work was done by Belarusian scientists from the National Academy of Sciences and universities of the Republic. A technology for hydropercussion stamping has been developed, parts of a niobium resonator were manufactured, and copper, aluminum and superconducting niobium TESLA-type resonators have been created by the electron beam welding at the Physical-Technical Institute of the NAS of Belarus. An immersion-type helium cryostat, which provided full-scale microwave testing of resonators has been developed and created at the Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus. The investigations of the superconducting characteristics of samples of the original sheet niobium in the area of the weld were carried out, indicating only a 5% decrease in the critical transition temperature, the width of the superconducting transition, and the critical magnetic field. A measuring complex for investigations of the microwave parameters of the resonator has been developed and created at the Institute for Nuclear Problems of the BSU. The characteristics of superconducting niobium resonators (resonant frequency of the resonator, loaded quality factor, standing wave coefficient, relative level of losses at the centre frequency) were studied, together with the Scientific-Practical Materials Research Centre of the NAS of Belarus.

PACS: 29.20.Ej

Памяти профессора Будагова Юлиана Арамовича

ВВЕДЕНИЕ

В 2003 г. более 2700 ученых из многих стран мира подписали меморандум «Понимание материи, энергии, пространства и времени: путь линейного коллайдера», в котором ясно выразили идею о том, что следующей после Большого адронного коллайдера (ЛHC) машиной для исследования природы микромира будет линейный коллайдер с энергией столкновений частиц порядка 1 ТэВ. В том же 2003 г. исполнительный комитет по будущим ускорителям (ICFA) поручил группе анализа мировых технологий выбрать из 10 конкурирующих технологий одну-единственную для организации целенаправленной эффективной международной кооперации по проекту создания международного линейного коллайдера (ILC). В качестве такой единой технологии была выбрана радиочастотная 1,3-ГГц технология с использованием эффекта сверхпроводимости для снижения потерь передачи энергии радиочастотного поля ускоряемым частицам. Такая технология была предложена научной коллекцией имени выдающегося радиопизика Н. Теслы, в честь которого сегодня принято называть и тип резонатора, лежащего в основе ускорительной системы ILC. Эта технология в 2004 г. и была рекомендована

ICFA в качестве базовой для создания международной кооперации по практической реализации проекта ILC.

Важность создания ILC очевидна для физиков, работающих в области физики частиц высоких энергий, новых материалов различного применения, так как без такого современного приборного комплекса трудно продвинуться в понимании всех проблем современной физики [44, 45].

Разрабатываемый в широкой международной кооперации ILC — сложная, длиной в несколько десятков километров машина-ускоритель, которая будет разгонять высокочастотным электромагнитным полем заряженные элементарные частицы до субсветовых скоростей. На сегодня строительство ILC наиболее вероятно в Японии с оценочной стоимостью проекта около 10 млрд долларов США. Установка будет представлять собой электрон-позитронный коллайдер с энергией 2×250 ГэВ. Она будет состоять из 2 линейных ускорителей, в которых пучки электронов и позитронов будут двигаться навстречу друг другу. Общая длина установки около 31 км. Впоследствии ILC предполагается дополнить новыми секциями разгонных резонаторных блоков (по 9 резонаторов-ячеек в каждом). При этом длина ILC возрастет до 50 км, а энергия — до 1 ТэВ.

Согласно расчетам для строительства ILC с энергией 1 ТэВ потребуется несколько десятков тысяч резонаторов типа TESLA. К такой серии предъявляются исключительно высокие требования по идентичности электромагнитных характеристик и параметров отдельных резонаторов. Сегодня технологией относительно массового (мелкосерийного) производства таких «идентичных» резонаторов располагают только США (FNAL), Германия (DESY) и Япония (KEK). Наряду с этим международным консорциумом по проекту ILC изучаются на конкурентной основе технологические возможности и ряда других стран, среди них и Беларусь. Ее участие в этой работе приветствуется научным сообществом крупнейших научных центров, занимающихся подготовкой ILC (FNAL, DESY, KEK и др.), вследствие высокого авторитета, завоеванного вкладом белорусских ученых, научных организаций и промышленных предприятий республики в крупнейшие международные проекты — D0 (FNAL), ATLAS и CMS на LHC (ЦЕРН, Женева). И это не должно казаться чем-то удивительным. На постсоветском пространстве Беларусь — едва ли не единственное государство, стремящееся в непростых условиях сохранить и укрепить свой научно-технический потенциал с опорой на фундаментальную науку.

Количество 9-ячеечных разгонных резонаторных блоков в ILC будет исчисляться тысячами. Над проектом ILC ведут работы крупные научные организации США (FNAL), Германии (DESY), Японии (KEK), ЦЕРН, ОИЯИ, Франции, Индии, Китая, к решению сложных научно-технических задач по проекту привлекаются ученые-физики и инженеры из многих стран. Одной из важных научных задач, стоящих перед физиками, которые будут экспериментировать на ILC, сталкивая друг с другом легкие заряженные частицы (электроны и позитроны), является задача

обнаружения так называемых суперсимметричных частиц, которые, как полагают, помогут понять природу темной материи и темной энергии.

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) присоединилась к проекту ILC в 2007 г., и тогда же по инициативе ОИЯИ в Национальном центре физики частиц и высоких энергий Белорусского государственного университета (НЦ ФЧВЭ БГУ) начата подготовка участия в этих работах Республики Беларусь. К работе были подключены ведущие научные учреждения республики: Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ФТИ НАН Беларуси), НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР), Институт ядерных проблем БГУ (НИИЯП БГУ). В 2010 г. было получено техническое задание на разработку и изготовление трех опытных образцов сверхпроводящих ниобиевых резонаторов — ключевых узлов ILC, в которых происходит передача энергии электромагнитного поля ускоряемым заряженным частицам. Для этого в ОИЯИ была организована доставка из FNAL действующего образца резонатора, необходимого для наладки измерительного оборудования, а также для использования его в качестве эталона. Работы белорусской стороны велись в соответствии с научной темой 02-0-1067-2007/2015 «Исследования в области e^+e^- -линейных ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей» (руководитель — член-корреспондент РАН главный инженер ОИЯИ Г. Д. Ширков) Проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ и международного сотрудничества ОИЯИ.

Среди достоинств сверхпроводящих резонаторов отметим следующие:

- поверхностное сопротивление сверхпроводников на СВЧ составляет несколько наном, что в 10^6 раз меньше, чем при нормальных условиях;
- высокий КПД передачи мощности от источника к пучку;
- работа в непрерывном режиме или в режиме с малой скважностью;
- низкая рабочая частота, что позволяет иметь большую апертуру для пролета пучка;
- высокий ускоряющий градиент.

Для сверхпроводящих ускоряющих резонаторов наиболее характерными параметрами являются напряженность ускоряющего поля (ускоряющий градиент) и собственная добротность резонатора.

1. РАСЧЕТ ОДНОЯЧЕЧНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО НИОБИЕВОГО РЕЗОНАТОРА

В рамках участия Объединенного института ядерных исследований в проекте международного линейного коллайдера [1, 2] в 2010 г. инициированы работы по созданию сверхпроводящих СВЧ-резонаторов из ниобия (резонатор типа TESLA) силами ведущих научно-исследовательских организаций Республики Беларусь [3]. Для компьютерного моделирова-

ния СВЧ-резонатора в этих работах задействован Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР).

1.1. Геометрия сопряжения резонатора типа TESLA с трубкой дрейфа и его характеристики. Общий вид одноячеечного ниобиевого сверхпроводящего резонатора типа TESLA представлен на рис. 1.

При изготовлении таких резонаторов предъявляются очень высокие требования к обеспечению его основных характеристик. Собственная добротность должна быть не меньше чем 10^{10} , чтобы обеспечить величину ускоряющего градиента на оси около $E_{acc} \approx 300\text{--}350$ кВ/см при ограничении на величину пробивного напряжения и величину магнитного поля на внутренней границе. Должна быть обеспечена возможность настройки заданной собственной частоты 1,3 ГГц всех резонаторов при неизбежном отклонении геометрических размеров резонаторов в процессе их изготовления. Обеспечение этих требований невозможно без выяснения основных закономерностей влияния различных факторов на важнейшие характеристики. Установление таких закономерностей возможно лишь на основе детального компьютерного моделирования электромагнитных полей в резонаторе при изменении его профиля, и в БГУИР имеется опыт таких расчетов [4]. В результате выполненных ранее в БГУИР исследований совместно с ОИЯИ были наработаны методики и созданы уникальные пакеты эффективных по сравнению с имеющимися программ расчета и оптимизации параметров рассматриваемых резонаторов [5–7]. Следует отметить, что разработанные программы хотя и являются эффективными, однако имеют существенные ограничения, связанные с невозможностью выполнения расчетов трехмерных задач для резонаторов с азимутальной неоднородностью границы. Эта особенность не позволяет, в частности, реализовать расчет резонатора с несимметричными элементами ввода–вывода СВЧ-мощности, элементами управления селекцией мод. Ввиду этого возникает необходимость разработки

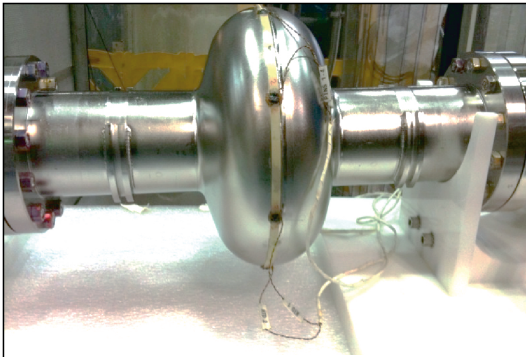


Рис. 1. Внешний вид одноячеечного сверхпроводящего резонатора

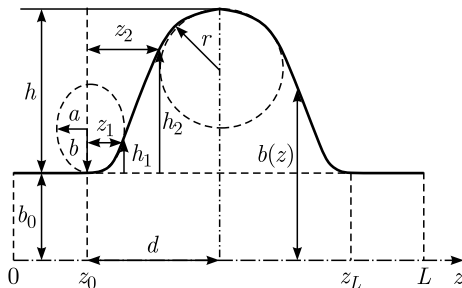


Рис. 2. Геометрия профиля резонатора

программы анализа характеристик резонатора с использованием одного из стандартных пакетов трехмерного моделирования электромагнитного поля.

Цель исследования — поиск на основе вычислительного эксперимента с применением современных профессиональных пакетов программ перспективных вариантов одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов в международном линейном коллайдере и разработка методики измерения его добротности.

Рассматриваемый резонатор представляет собой полость в круглом волноводе. Профиль продольного сечения и используемые для изготовления геометрические параметры резонатора представлены на рис. 2. Радиус регулярного волновода b_0 является закритическим для симметричной E_{01} -волны на заданной частоте. Поэтому в полости резонатора $z_0 < z < z_L$ запирается симметричная собственная E -мода, которая для частоты $f = 1,3$ ГГц является рабочей при использовании такого резонатора в составе ускорительной секции коллайдера. При этом размер пролетного интервала $2d$ определяется условиями максимума ускорения и равен $\lambda/2$. Детальная постановка электродинамической задачи для рассматриваемого резонатора, методы ее решения и описание основных рассчитываемых рабочих характеристик резонатора описаны в [4–7]. Здесь мы будем придерживаться обозначений, приведенных в этих источниках.

Как показали расчеты [7] по исследованию величины радиусов сопряжения окружностями ($a = b$), добротность повышается, если $a \rightarrow 0$ и $r \rightarrow d$. Однако при $a \rightarrow 0$ в области сопряжения с отрезком регулярного волновода (при $z \approx z_0 + 0,7a$) резко возрастает напряженность электрического поля на границе резонатора, в то же время при уменьшении a от $a < 0,35\lambda/2\pi$ выигрыш в добротности меньше 0,5%. Здесь и далее $\lambda = 230,8$ мм — длина волны, соответствующая рабочей частоте $f = 1,3$ ГГц.

Несколько больший выигрыш в добротности (до 5%) достигается при увеличении верхнего радиуса сопряжения $1,1 < r < d$. Однако при фиксированном радиусе сопряжения r добротность повышается, если $a \rightarrow 0$ и $d \rightarrow r$.

рованном a и приближении r к d возрастает тангенс наклона сопрягаемой прямой $\operatorname{tg} l$ на боковой границе и опять же наблюдается резкий рост напряженности электрического поля на границе вблизи $z \approx z_0 + 0,7a$. Исходя из компромисса между добротностью и значением поля на границе в [7] были выбраны рекомендованные для изготовления радиусы сопряжения: $a = 0,31$, $r = 1,1$, что согласуется с результатами [8]. В [8], однако, для нижнего сопряжения использована не окружность, а эллипс. Конечно, технологически и с точки зрения облегчения расчетов более просто выполнить сопряжения не эллипсом, а окружностью.

Для выявления целесообразности эллипсоидального сопряжения в настоящем исследовании были проведены расчеты с целью установления влияния параметров эллипсоидального сопряжения на величину значения поля на границе, которая характеризуется относительным параметром $E_g^{\max}/E_{\text{acc}}$. Для этого был разработан модуль расчета эллипсоидального сопряжения, усовершенствована оригинальная программа, описанная в [7], и выполнены расчеты резонатора с профилем, в котором нижнее сопряжение получается с помощью эллипса, как показано на рис. 2.

В табл. 1 приведены параметры варианта профиля резонатора с нижним сопряжением окружностью ($a = b$), близкого к образцу резонатора, полученному из FNAL в качестве эталона. В верхней строке таблицы приведены безразмерные (б/р) значения параметров (отнесенные к $\lambda/2\pi$), в нижней — их размерные значения в миллиметрах.

Таблица 1. Параметры резонатора, вариант 1 ($a = b$, $d = \pi/2$), окружность $W = 1$

b_0	h	d	a	b	r	z_1	h_1	z_2	h_2
1,063	1,764	1,5708	0,31	0,31	1,10	0,298	0,224	0,514	0,970
39,05	64,79	57,65	11,380	11,38	40,37	10,9	8,18	18,9	35,41

При такой геометрии получены следующие основные выходные характеристики (их описание приведено в [4–6]): $E_z^{\max} = 0,73683$ (б/р), $V_0 = 1,30264$ (б/р), $E_{\text{acc}} = 0,41464$ (б/р), $E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,77704$, $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,69638$, $B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00039$ Тл/(кВ/см), $A_Q Z_0 = 272,8$ Ом, $Q = 27186$, $Z_{\text{pez}} = R/Q = 418,1$ Ом.

В табл. 2 приведены параметры варианта профиля резонатора с эллипсоидальным сопряжением ($a \neq b$), соответствующего американскому образцу. Этот вариант предлагается для изготовления.

Таблица 2. Параметры резонатора, вариант 2 ($a < b$, $d = \pi/2$)

b_0	h	d	a	b	r	z_1	h_1	z_2	h_2
1,063	1,777	1,5708	0,245	0,349	1,098	0,2166	0,186	0,541	1,061
39,05	65,27	57,65	9,0	12,82	40,33	7,96	6,83	19,87	38,97

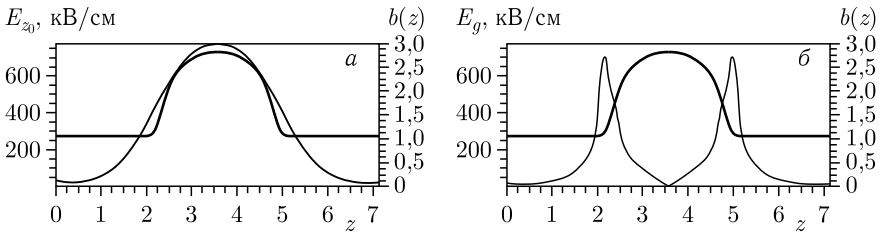


Рис. 3. Распределения полей при $A = 0,1$, $\sigma = 5,6 \cdot 10^7$ (медь): а) поле E_{z0} на оси резонатора; б) поле E_g на стенке резонатора. $b(z)$ — профиль резонатора

При такой геометрии получены следующие основные выходные характеристики: $E_z^{\max} = 5,96941$ (б/р), $V_0 = 10,62594$ (б/р), $E_{\text{acc}} = 3,38244$ (б/р), $E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,76482$, $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,57989$, $B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00038$ Тл/(кВ/см), $A_Q Z_0 = 278,1$ Ом, $Q = 27710$, $Z_{\text{pez}} = R/Q = 418$ Ом.

Из сравнения таблиц видно, что при изменении параметров сопряжения несколько изменилось расположение точек сопряжения.

На рис.3 представлено характерное распределение электрического поля на оси и на границе резонатора.

Как следует из сравнения характеристик этих двух вариантов резонаторов, при замене сопряжения окружностью на эллипсоидальное, даже несмотря на то, что средний радиус эллипса $(a + b)/2 = 0,29$ меньше, чем радиус окружности ($a = 0,31$), величина $E_g^{\max}/E_{\text{acc}}$ (т.е. максимальное значение поля на границе) получается на 7% меньше при использовании сопряжения эллипсом.

Ниже приведены результаты расчетов резонатора при изменении различных параметров (табл. 3).

У варианта 3 уменьшен радиус b_0 и немного увеличено d по сравнению с вариантом 2.

Основные входные характеристики: $E_z^{\max} = 5,84483$ (б/р), $V_0 = 10,53943$ (б/р), $E_{\text{acc}} = 3,24290$ (б/р), $E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,80235$, $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,54632$, $B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00039$ Тл/(кВ/см), $A_Q Z_0 = 286,6$ Ом, $Q = 28435$, $Z_{\text{pez}} = R/Q = 433,4$ Ом, $\text{tg } l = 2,5$.

Варианты 4 и 5 рассчитаны при сопряжении окружностями. У них выдержаны b_0 , h , d , как у варианта 3 (табл. 4).

Таблица 3. Параметры резонатора, вариант 3 ($a < b$, $d > \pi/2$), эллипс $W = 1,009$, $f = 1,31$

b_0	h	d	a	b	r	z_1	h_1	z_2	h_2
1,06128	1,7547	1,625	0,245	0,3484	1,143	0,2119	0,1736	0,5666	1,0433
39,00	64,45	59,7	9,0	12,8	42,00	7,78	6,376	20,81	38,32

Таблица 4. Параметры резонатора, вариант 4 ($a = b, d > \pi/2$), окружность $W = 1,0, f = 1,3$

b_0	h	d	a	b	r	z_1	h_1	z_2	h_2
1,06128	1,7547	1,625	0,31	0,31	1,186	0,299	0,227	0,4825	0,887
39,00	64,45	59,7	11,38	11,38	43,56	10,98	8,34	17,72	32,58

Основные входные характеристики: $E_z^{\max} = 5,47196$ (б/п), $V_0 = 9,73783$ (б/п), $E_{\text{acc}} = 2,99626$ (б/п), $E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,82626$, $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,71622$, $B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00039$ Тл/(кВ/см), $A_Q Z_0 = 281,7$ Ом, $Q = 28070$, $Z_{\text{pez}} = R/Q = 421$ Ом, $\text{tg} l = 3,5$.

Видно, что если выбирать скругление радиусом при фиксированной h , то крутизна боковых стенок получается больше, чем у исходного американского резонатора. За счет этого получается выше E_g^{\max} .

Если сделать высоту $h = 65,26$ чуть большей, то получаем при $r = 40,4$ мм значение $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,65$, т.е. оно уменьшается и приближается к значению в американском варианте, но при этом добротность также уменьшается: $A_Q Z_0 = 277$ Ом.

У следующего варианта 5 (табл. 5) радиус сопряжения приближен к меньшему значению полуоси эллипса у варианта 3. Это сразу приводит к увеличению $E_g^{\max}/E_{\text{acc}}$ на 10%.

Таблица 5. Параметры резонатора, вариант 5 ($a = b, d > \pi/2$), расчетные $W = 1,0, f = 1,3$

b_0	h	d	a	b	r	z_1	h_1	z_2	h_2
1,06128	1,7547	1,625	0,26	0,26	1,212	0,248	0,184	0,4656	0,896
39,00	64,45	59,7	9,54	9,54	44,52	9,11	6,76	17,10	32,91

Основные входные характеристики: $E_z^{\max} = 5,68714$ (б/п), $V_0 = 10,16337$ (б/п), $E_{\text{acc}} = 3,12719$ (б/п), $E_z^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,81861$, $E_g^{\max}/E_{\text{acc}} = 1,71800$, $B^{\max}/E_{\text{acc}} = 0,00038$ Тл/(кВ/см), $A_Q Z_0 = 285,65$ Ом, $Q = 28463,486$, $Z_{\text{pez}} = R/Q = 422,57333$ Ом, $\text{tg} l = 3,2$.

В результате проведенного исследования можно сделать следующий вывод: сопряжение резонатора с отрезком регулярного волновода является наиболее критическим местом для возможного электрического пробоя. Сравнение двух способов сопряжения — с помощью окружности и с помощью эллипса — показало, что использование эллипса позволяет на 7–10% снизить максимальную величину напряженности электрического поля на границе по сравнению с сопряжением окружностью.

1.2. Измерение ультравысокой собственной добротности путем возбуждения сверхпроводящего резонатора электронным потоком. Измерение ультравысоких собственных добротностей сверхпроводящих резонаторов линейных ускорителей в диапазоне $Q \sim 10^8 - 10^{10}$ является

трудноразрешимой проблемой традиционных СВЧ-методов [9–11]. Во-первых, требуется аппаратура с уникальными в настоящее время параметрами разрешения. Например, при резонансной частоте резонатора $f_0 = 1,3 \cdot 10^9$ Гц девиация частоты питающего генератора не должна превышать $n \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}$ Гц, где $n\%$ — допускаемая погрешность в определении добротности [9]. Во-вторых, при рассматриваемых величинах добротности порядка 10^{10} измеряемые добротности по инкременту затухания и по ширине резонансной кривой различаются по определению. В-третьих, вносимую внешнюю добротность, определяемую связью резонатора с внешними измерительными цепями, необходимо точно учесть для перерасчета собственной добротности по результатам измерений, что не всегда возможно.

Для решения этой проблемы нужно использовать методы, избавленные от необходимости введения в резонатор элементов связи. Таким методом может служить способ определения добротности по наблюдению возникновения генерации электронного потока, пронизывающего резонатор. В этом случае по измерению разности мощности входящего в резонатор и выходящего из него электронного пучка при наличии генерации можно определить добротность резонатора.

В предлагаемом методе эти проблемы снимаются, так как:

- 1) прецизионная СВЧ-аппаратура не требуется;
- 2) исследуемый резонатор полностью автономен, т. е. не связан с какими-либо внешними СВЧ-цепями;
- 3) добротность определяется по потере мощности электронным потоком и по пусковому току, которые могут быть измерены с высокой точностью.

Кроме того, определяемая добротность имеет тот же смысл, что и при работе резонатора в ускорителе, а электронный поток расположен точно так же, как ускоряемый поток электронов, т. е. связь потока с полем резонатора та же, что и в ускорителе.

Схема измерений представлена на рис. 4. На ней не показаны криогенная и фокусирующая электронный поток системы, а также вакуумная оболочка и изоляторы.

Будем исходить из «энергетического» определения добротности, соответствующего принципу использования резонатора в линейном ускорителе:

$$Q_\nu = \frac{\omega_\nu W_\nu(A)}{P_{\text{П}\nu}(A)}. \quad (1)$$

Здесь Q_ν — добротность резонатора на ν -типе колебаний; $\omega_\nu = 2\pi f_\nu$ — резонансная частота колебаний; $W_\nu(A)$ — запасенная энергия электромагнитного поля в резонаторе на ν -типе при заданной амплитуде колебаний A ; $P_{\text{П}\nu}(A)$ — мощность потерь в стенках (включая торцевые крышки) при той же амплитуде A .

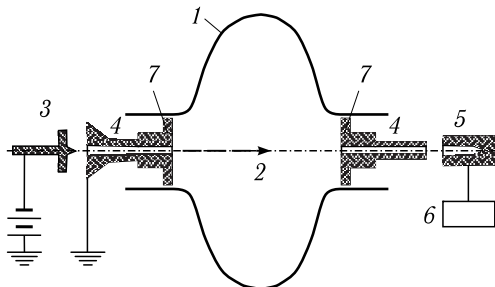


Рис. 4. Схема измерения добротности резонатора: 1 — сверхпроводящий резонатор кругового сечения; 2 — осевой игольчатый электронный поток; 3 — инжектор электронов; 4 — трубки дрейфа с диаметром, во много раз меньшим критического для волн E_{01} ; 5 — коллектор электронов; 6 — измеритель мощности электронного пучка; 7 — сверхпроводящие крышки резонатора

В свою очередь,

$$P_{\text{П}\nu}(A) = P_{c\nu} + P_{k\nu} = P_{c\nu}(1 + \alpha). \quad (2)$$

Здесь $P_{c\nu}$ — мощность потерь в стенках резонатора; $P_{k\nu}$ — мощность потерь в торцевых крышках; $\alpha = P_{k\nu}/P_{c\nu}$.

Из (1) и (2) следует определение собственной добротности резонатора:

$$Q_{\nu c} = Q_{\nu}(1 + \alpha). \quad (3)$$

Коэффициент α устанавливается при расчете полей в резонаторе с торцевыми крышками.

Рассмотрим резонатор с рабочим симметричным типом E_{0ij} колебания, который наиболее часто используется в ускорителях. В этом случае запасенная энергия может быть выражена через одну магнитную компоненту поля в виде [5, 7]

$$\omega_{\nu} W_{\nu} = 3,46 \cdot 10^8 A^2 \frac{W}{A_0^2} \int_{V_p} (\dot{B}_{\varphi}^0)^2 dV_p. \quad (4)$$

Здесь $A = \frac{e \max |E'_z|}{m_0 \omega_0 c}$ — безразмерная амплитуда поля, $E'_z(z)$ — распределение электрической компоненты поля на оси; $\dot{B}_{\varphi}^0(r, z) = (e \dot{B}_{\varphi}'^0) / (m_0 \omega_0)$ — распределение безразмерной магнитной компоненты поля, рассчитанной при некоторой амплитуде A_0 и резонансной частоте ω_{ν} , e и m_0 — заряд и масса электрона, ω_0 — базовая частота, выбранная при переходе к безразмерным переменным. Все геометрические размеры масштабированы как $(r, z, L) = (r', z', L') \omega_0 / c$ и $W = \omega / \omega_0$, где c — скорость света, ω — рабочая частота колебаний резонатора (обычно $\omega = \omega_0$); V_p —

объем резонатора в единицах c/ω_0 (штрихом помечены размерные переменные, имеющие одинаковое написание с безразмерными). Обозначим квадрат нормы собственного колебания как

$$\|\mathbf{E}^0\|^2 = \frac{W}{A_0^2} \int_{V_p} (\dot{E}_\varphi^0)^2 dV_p.$$

В результате такого перехода к безразмерным величинам получим выражение зависимости полной добротности от амплитуды в виде

$$Q_\nu = 3,46 \cdot 10^8 \|\mathbf{E}^0\|^2 \frac{A^2}{P_{П\nu}(A)}. \quad (5)$$

Но в соответствии со схемой измерений (см. рис. 4) резонатор автономен, и при возбуждении его электронным потоком в одной из зон монотронной генерации [14] вся теряемая потоком мощность расходуется только на потери в стенках резонатора с крышками, т. е.

$$P_{П\nu}(A) = \eta_e(A) I_0 V_0, \quad (6)$$

где η_e — электронный КПД монотрона; I_0 и V_0 — ток и ускоряющее напряжение пучка, причем амплитуда A определяется соотношением (5).

Величину η_e и связанное с ней напряжение пучка (здесь и далее — «ускоряющее напряжение» или просто «напряжение») V_0 несложно рассчитать при найденном предварительно по методике [5, 7] нормированном распределении поля на оси $E_z^0(z) = E_z(z)/A_0$, используя безразмерные одномерные уравнения движения электронов [6]:

$$\frac{d\beta_i}{dz} = -\frac{AE_z^0(z) \sin \theta_i}{\beta_i \gamma_i^3}, \quad \frac{d\theta_i}{dz} = \frac{W}{\beta_i}, \quad \beta_i(0) = \beta_0,$$

$$\theta_i(0) = 2\pi \cdot i - \varphi_0, \quad \eta_e(z) = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \frac{\gamma_0 - \gamma_i(z)}{\gamma_0 - 1}, \quad (7)$$

$$\gamma_i = 1/\sqrt{1 - \beta_i^2}, \quad \gamma_0 = 1/\sqrt{1 - \beta_0^2}, \quad i = 1, \dots, N_e.$$

Здесь $\beta_i = v_i/c$, v_i — скорости электронов; $\theta_i = \omega_0 t_i$ — угол пролета электроном сечения z , t_i — время пролета; N_e — количество крупных частиц (электронов), используемых при расчете, напряжение пучка связано с β_0 как $V_0 = (m_0 c^2)/e(\gamma_0 - 1)$, функция группировки определяется

по формуле

$$G_r(z) = \frac{1}{N_e} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_e} \cos \theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_e} \sin \theta_i \right)^2}.$$

Рассчитав по уравнениям (7) амплитуду A и напряжение V_0 , при которых достигается максимальное значение η_e в одной из зон монотонной генерации $\eta_e^{\max} = \max \eta_e(A, V_0)$, получим основное определяющее соотношение между добротностью резонатора и током пучка

$$Q_\nu = 3,46 \cdot 10^8 \|\mathbf{E}^0\|^2 \frac{A^2}{\eta_e^{\max}(A, V_0) V_0 I_{\max}} = \frac{\alpha_{IQ}}{I_{\max}}. \quad (8)$$

Итак, методика измерений Q_ν в соответствии со схемой (см. рис. 4) состоит в следующем: находится по предварительному расчетному значению V_0 рабочая зона генерации путем постепенного увеличения тока I_0 . При этом используется следующий факт: в измерителе мощности пучка будет регистрироваться линейная зависимость $P(I_0)/I_0 = V_0 = \text{const}$. При достижении зоны генерации обнаруживается, что $P(I_0) < I_0 V_0$. Затем подстраивается I_0 на $\max \eta_e$. Значение $I_0 = I_{\max}$ в точке, соответствующей η_e^{\max} , используется для определения Q_ν по формуле (8).

Еще одна важная характеристика генератора — пусковой ток I_{start} . Он рассчитывается из условия возникновения колебаний при $A \rightarrow 0$. Поэтому дополнительная проверка полученного значения Q_ν проводится по величине наблюдаемого пускового тока I_{start} . В этом случае предварительно рассчитывается значение $\alpha_{QI}^{\text{start}} = 3,46 \cdot 10^8 \|\mathbf{E}^0\|^2 \frac{A^2}{V_0 \eta_e(A)} \Big|_{A \rightarrow 0}$ и добротность пересчитывается по формуле $Q_\nu = \alpha_{QI}^{\text{start}} / I_{\text{start}}$.

При анализе зон генерации и расчета коэффициентов α_{IQ} и $\alpha_{QI}^{\text{start}}$ для определенности рассмотрим конкретный вид резонатора — одночечечный резонатор типа TESLA на частоту 1,3 ГГц. Профиль резонатора показан на рис. 5, а его безразмерные и размерные (в миллиметрах) параметры приведены в табл. 6 в первой и второй строках соответственно.

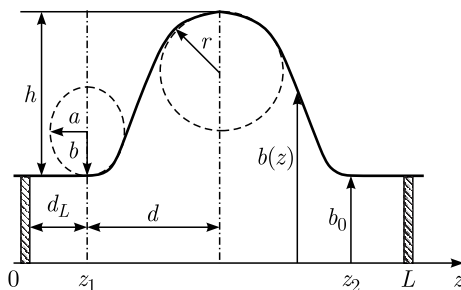


Рис. 5. Профиль внутренней поверхности резонатора

Таблица 6. Параметры профиля резонатора

b_0	h	d	a	b	r
1,06128	1,7547	1,5708	0,245	0,3484	1,143
39,00	64,45	5,7	9,0	12,8	42,00

Собственно сама ячейка резонатора, добротность которой нужно определить, расположена между сечениями z_1 , z_2 . В одноячейной конструкции резонатор эллипсоидально сопряжен с закритическими отрезками волновода радиусом b_0 . Когда крышки придвинуты вплотную, в резонаторе реализуется рабочий тип колебаний — E_{010} на резонансной частоте $f_\nu = 1,3$ ГГц. При отсутствии крышек поле проникает внутрь закритических волноводов, где экспоненциально затухает и при $d_L > d$ практически равно нулю. Как показано ниже, изменяя положение крышек, можно выбирать наиболее благоприятный для измерений режим генерации.

Расчет поля \dot{B}_φ^0 , нормы собственного колебания $\|\mathbf{E}^0\|^2$ и профиля амплитуды электрического поля вдоль оси $E_z^0(z)$ в рассматриваемом резонаторе производился с использованием методики, детально описанной в [12, 13].

На рис. 6–12 приведены рассчитанные по уравнениям (7) с использованием процедуры оптимизации характеристики монотрона при значениях A и V_0 , соответствующих максимуму реализуемой зоны генерации для различного положения крышек. Кривые 1–3 на рисунках соответствуют величинам $E_z^0(z)$, $\eta_e(z)$, $G_r(z)$. Кривая 4 представляет профиль $b(z)$.

Рис. 6–8 иллюстрируют характерные режимы генерации на первой, второй и третьей зонах, когда крышки придвинуты вплотную к резонатору ($d_L = 0$).

Как показывает анализ электронных траекторий на рис. 6, при генерации на первой зоне электроны группируются в сгусток, который перед выходом из резонатора проходит в тормозящем поле. В результате скорости большинства электронов уменьшаются, их кинетическая энергия передается полю (электронный КПД на выходе при $z = L$ положителен) и компенсирует потери в стенках резонатора. За время пролета электрона поле совершает одно полное колебание.

В этом варианте добротности $Q_\nu = 10^{10}$ соответствует ток $I_{\max} = \alpha_{IQ}/Q_\nu \approx 1,4 \cdot 10^{-6}$ А и мощность пучка на входе $P_0 = I_{\max} V_0 \approx 0,072$ Вт. На выходе пучок будет иметь мощность $P_{\text{out}} = P_0(1 - \eta_e^{\max}) \approx 0,059$ Вт, $I_{\text{start}} = (\alpha_{QI}^{\text{start}}/\alpha_{IQ}) I_{\max} \approx 0,62 I_{\max}$.

На рис. 7 приведены характеристики варианта с придвинутыми крышками для второй зоны генерации. Вторая зона генерации наблюдается при начальной скорости пучка примерно в два раза меньшей, чем первая, в результате за время пролета электрона поле совершает два полных колебания. Поэтому первая зона группирования и передачи энергии электронов полю наблюдается в среднем сечении резонатора, после чего

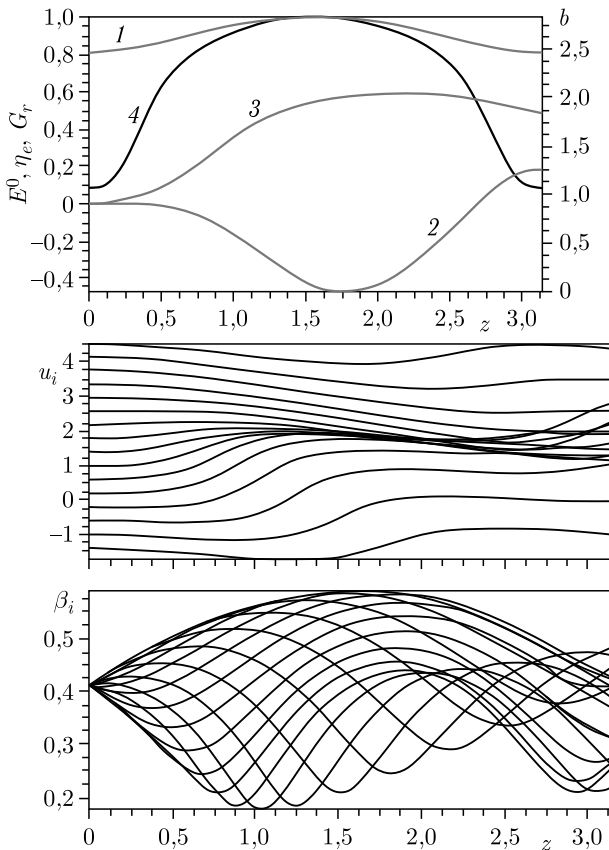


Рис. 6. Характеристики движения электронов на 1-й зоне генерации ($V_0 = 50\,186$ В, $\alpha_{IQ} = 14\,348$, $\alpha_{QI}^{\text{start}} = 8896$, $A = 0,15$, $\eta_e^{\text{max}} = 0,18$, $\|\mathbf{E}^0\|^2 = 16,2$)

происходит процесс ускорения электронов при возрастании функции группировки. На конечном участке сгусток электронов снова попадает в тормозящую фазу поля и отдает часть своей энергии. В результате в сечении $z = L$ электронный КПД положителен.

При переходе на вторую зону генерации коэффициент α_{IQ} уменьшается вдвое, $I_{\text{start}} = 0,48I_{\text{max}}$. Для измеряемой добротности $Q_\nu = 10^{10}$ теперь $I_{\text{max}} = \alpha_{IQ}/Q_\nu \approx 6,7 \cdot 10^{-7}$ А и мощность пучка на входе $P_0 = I_{\text{max}}V_0 \approx 0,009$ Вт. На выходе пучок будет иметь мощность $P_{\text{out}} = P_0(1 - \eta_e^{\text{max}}) \approx 0,008$ Вт. Значит, зафиксировать изменение мощности пучка при возникновении генерации на второй зоне становится сложнее.

На рис. 8 приведены характеристики варианта с придвинутыми крышками для третьей зоны генерации. При переходе на третью зону генера-

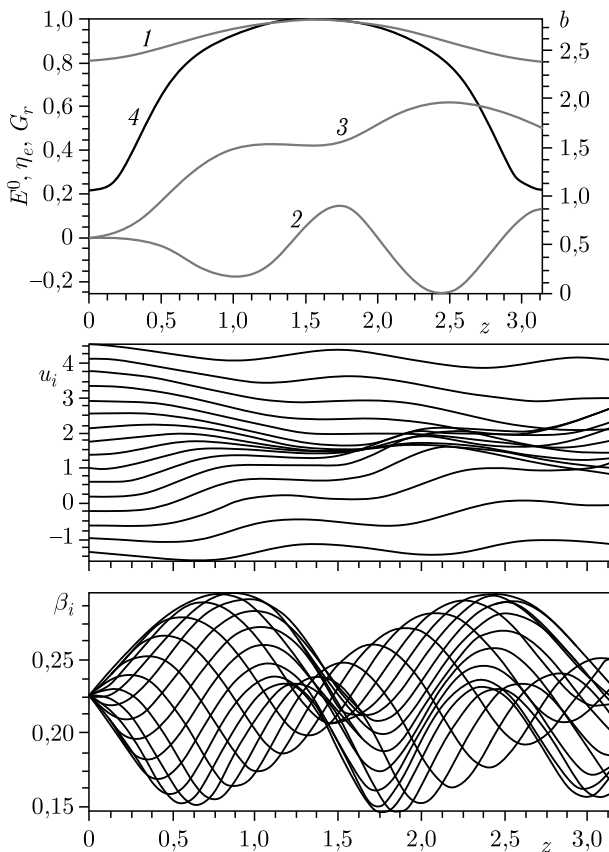


Рис. 7. Характеристики движения электронов на 2-й зоне генерации ($V_0 = 13\,466$ В, $\alpha_{IQ} = 6658$, $\alpha_{QI}^{\text{start}} = 3196$, $A = 0,046$, $\eta_e^{\text{max}} = 0,13$, $\|\mathbf{E}^0\|^2 = 16,2$)

ции коэффициент α_{IQ} становится еще меньше, $I_{\text{start}} = 0,48I_{\text{max}}$. Следовательно, еще проблематичней зафиксировать зону генерации.

Таким образом, при измерениях сверхвысоких добротностей для придвинутых вплотную крышек, по-видимому, наилучшей является первая зона генерации, однако величина напряжения пучка при этом довольно большая. При переходе на более низкие напряжения пучка электронов, реализуемые на второй и третьей зонах генерации, требуется более точная аппаратура для фиксации изменения мощности пучка на входе и выходе из резонатора.

Расчет показал, что величина коэффициента α в формуле (3) для варианта, в котором крышки придвинуты вплотную к резонатору, максимальна ($\alpha = 0,0018$). По мере отодвигания крышек этот коэффициент уменьшается до нуля уже при $d_L > 1,57$. Этот факт указывает на то, что

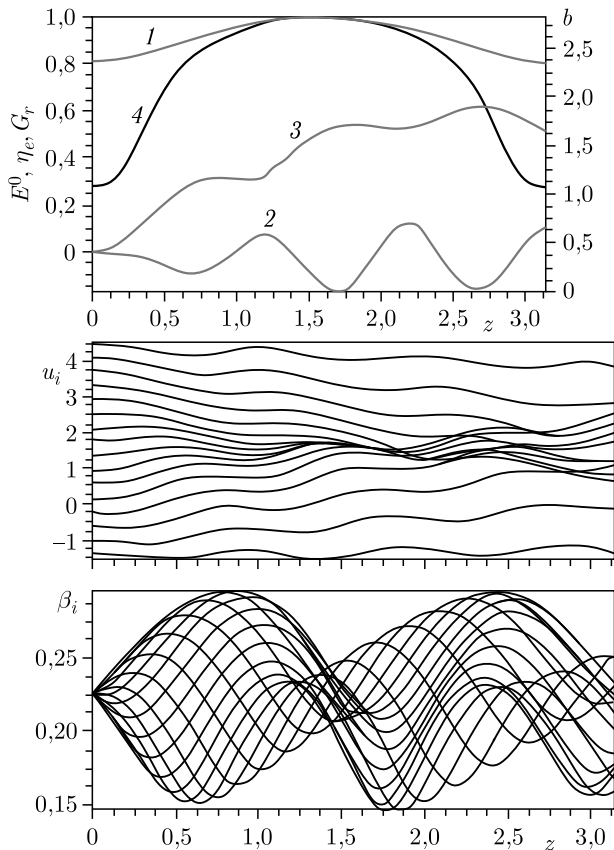


Рис. 8. Характеристики движения электронов на 3-й зоне генерации при $d_L = 0$ ($V_0 = 6194$ В, $\alpha_{IQ} = 4196$, $\alpha_{QI}^{\text{start}} = 2014$, $A = 0,021$, $\eta_e^{\text{max}} = 0,1$, $\|\mathbf{E}^0\|^2 = 16,2$)

неучет потерь в крышках приводит к погрешности в расчете добротности порядка 0,2%. Если отодвигать крышки от резонатора, то возрастает время пролета электронами области взаимодействия. Естественно, что зоны генерации будут наблюдаться при больших напряжениях. При этом существенно изменяется профиль $E_z^0(z)$ амплитуды поля, действующего на электроны. Для выяснения того, как это сказывается на величине коэффициента α_{IQ} , и выбора режима измерений были выполнены расчеты для двух значений d_L .

На рис. 9 приведены характеристики монотрона для первой зоны генерации, когда крышки отодвинуты на $d_L = 0,5$.

Напряжение пучка возросло в полтора раза, а значение коэффициента α_{IQ} — в 5 раз по сравнению с вариантом придвинутых вплотную крышек. Добротности $Q_\nu = 10^{10}$ теперь соответствует ток $I_{\text{max}} = 5,6 \cdot 10^{-6}$ А,

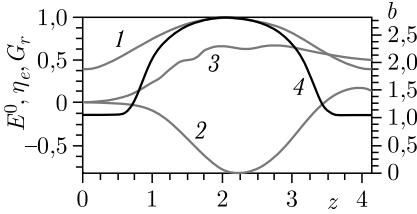


Рис. 9. Характеристики движения электронов на 3-й зоне генерации при $d_L = 0,5$ ($V_0 = 70\,505$ В, $\alpha_{IQ} = 55\,783$, $\alpha_{QI}^{\text{start}} = 48\,531$, $A = 0,30$, $\eta_e^{\text{max}} = 0,14$, $\|\mathbf{E}^0\|^2 = 17,5$)

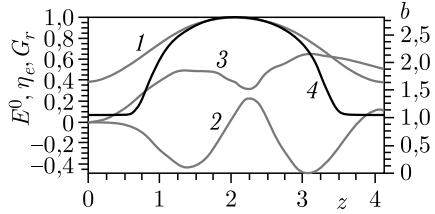


Рис. 10. Характеристики движения электронов на 2-й зоне генерации при $d_L = 0,5$ ($V_0 = 23\,398$ В, $\alpha_{IQ} = 45\,561$, $\alpha_{QI}^{\text{start}} = 27\,792$, $A = 0,14$, $\eta_e^{\text{max}} = 0,11$, $\|\mathbf{E}^0\|^2 = 17,5$)

а мощность пучка на входе и выходе $P_0 = 0,39$ Вт и $P_{\text{out}} = 0,33$ Вт. При этом $I_{\text{start}} = 0,87I_{\text{max}}$.

На рис. 10 приведены характеристики этого варианта для второй зоны генерации.

При переходе на вторую зону генерации коэффициент α_{IQ} уменьшается. Добротности $Q_\nu = 10^{10}$ теперь соответствует ток $I_{\text{max}} = 4,5 \times 10^{-6}$ А, а мощность пучка на входе и выходе $P_0 = 0,1$ Вт и $P_{\text{out}} = 0,09$ Вт. Третью зону генерации найти не удалось.

На рис. 11 приведены характеристики монотрона для первой зоны генерации, когда крышки отодвинуты на $d_L = 1$.

Коэффициент α_{IQ} значительно увеличился. Теперь добротности $Q_\nu = 10^{10}$ соответствует ток $I_{\text{max}} = 1,7 \cdot 10^{-6}$ А и мощность пучка на входе $P_0 = 1,25$ Вт. На выходе пучок будет иметь мощность $P_{\text{out}} = 1,17$ Вт. Однако при этих параметрах имеет место жесткий режим генерации, так как $A^2/\eta_e|_{A \rightarrow 0} \rightarrow \infty$. Анализ хода кривой $\eta_e(z)$ на рис. 10 показывает, что максимальное значение η_e^{max} реализуется на удалении от насыщения кривой $\eta_e(z)$, что, по-видимому, и приводит к жесткому режиму генерации, который неприемлем при измерениях.

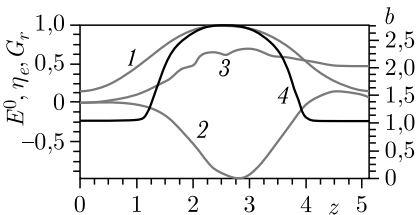


Рис. 11. Характеристики движения электронов на 1-й зоне генерации при $d_L = 1$ ($V_0 = 72\,596$ В, $\alpha_{IQ} = 172\,730$, $A = 0,37$, $\eta_e^{\text{max}} = 0,067$, $\|\mathbf{E}^0\|^2 = 17,5$)

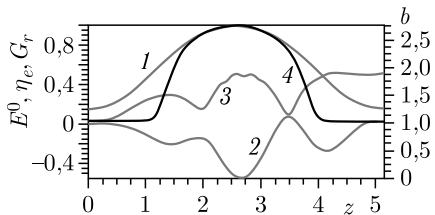


Рис. 12. Характеристики движения электронов на 2-й зоне генерации при $d_L = 1$ ($V_0 = 19\,061$ В, $\alpha_{IQ} = 216\,183$, $\alpha_{QI}^{\text{start}} = 134\,033$, $A = 0,16$, $\eta_e^{\text{max}} = 0,038$, $\|\mathbf{E}^0\|^2 = 17,5$)

На рис. 12 приведены характеристики этого же варианта для второй зоны генерации. Как видно, в этом случае величина коэффициента α_{IQ} возросла и теперь добротности $Q_{\nu} = 10^{10}$ соответствует ток $I_{\max} = 2,16 \times 10^{-6}$ А, мощность пучка на входе $P_0 = 0,41$ Вт. На выходе пучок будет иметь мощность $P_{\text{out}} = 0,39$ Вт. При этих параметрах реализуется мягкий режим генерации и $I_{\text{start}} = 0,62I_{\max}$.

Третья зона генерации отсутствует.

Таким образом, проведенные расчеты подтверждают реализуемость предложенной методики измерений сверхвысоких уровней добротности полых резонаторов на симметричных E -модах. Чем выше разрешающие возможности аппаратуры для фиксации изменения мощности электронного пучка на входе и выходе резонатора, тем меньшее напряжение электронного пучка можно использовать, переходя на вторую и третью зоны генерации и придвигая крышки к резонатору.

Предложенный в представленном разделе оригинальный способ позволяет проводить высокоточное измерение собственной добротности в диапазоне 10^8 – 10^{10} , в котором резонатор не связан с какими-либо внешними СВЧ-цепями, а его собственная добротность определяется по потере мощности электронным потоком и по пусковому току, которые могут быть измерены с высокой точностью. В результате выполненных расчетов по выявлению условий генерации найдены значения необходимой величины напряжения и тока электронного пучка и сформулированы требования к измерительной аппаратуре.

2. ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ НИОБИЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

2.1. Изготовление деталей ниобиевого резонатора методом гидроударной штамповки. Развитие техники всегда связано с повышением температур единичных агрегатов, что приводит к повышению коэффициента полезного действия, экономичности, экологичности машин и агрегатов. Это, в свою очередь, требует применения материалов, способных противостоять температурам в тысячи градусов. И здесь уже не обойтись без тугоплавких металлов, таких как вольфрам, тантал, молибден, ниобий, титан и др., температура плавления которых колеблется от 3380 °С для вольфрама до 1668 °С для титана [12]. Поэтому эти материалы получили широкое распространение в авиационной, ядерной, ракетно-космической отраслях промышленности, где они используются в качестве наиболее температурно-нагруженных элементов (экранов, сопел, отражателей, форсажных камер и т. д.) [13]. В то же время все тугоплавкие металлы обладают сверхпроводимостью [14], а это свойство является определяющим для их применения в ускорителях элементарных частиц. Но, к сожалению, сверхпроводимость в этих металлах возникает при сверхнизких температурах, близких к абсолютному нулю (титан —

0,53 К, цирконий — 0,7 К, молибден — 0,9 К). Самая высокая температура сверхпроводимости у ниобия (9,17 К), который к тому же обладает высокой пластичностью, что и определило его широкое применение для изготовления резонаторов — основных элементов ускорителей элементарных частиц (коллайдеров). Но и эта температура является весьма низкой и создает массу проблем при работе с этими устройствами, причем надо учесть еще и тот факт, что при критической температуре сверхпроводимости ниобия 9,17 К рабочая температура для ниобиевых резонаторов 4,2 К и часто даже 2 К. Однако и эти сверхнизкие температуры, как и остальные параметры резонаторов, очень сильно зависят от чистоты материала: даже содержание примесей в тысячные доли процента, а иногда и в миллионные доли процента может заметно ухудшить качество резонаторов. Поэтому к чистоте ниобия и его обработке предъявляются наивысшие требования на всех стадиях изготовления резонаторов.

Одной из основных операций по изготовлению резонатора является штамповка полукамеры резонатора. Ее выполняют или в инструментальном штампе, или гидроформовкой. Из-за требований к чистоте материала очевидно, что штамповка жидкостью предпочтительней, так как жидкость высокого давления как деформирующая среда значительно меньше (по сравнению с металлическим пуансоном) загрязняет ниобий. Кроме того, к полукамере резонатора предъявляются сверхвысокие требования и по точности профиля изделия, а высокую точность копирования матрицы может обеспечить только высокое давление штампующей жидкости.

Удовлетворить эти высокие требования в полной мере может гидроударный метод штамповки, который обеспечивает высокую точность штамповки, минимальное загрязнение ниобия материалом штамповой оснастки, так как контакт ниобия происходит только с поверхностью одного элемента оснастки — матрицы. Немаловажное значение имеют и такие достоинства гидроударной штамповки, как снижение стоимости штампов в несколько раз, а также резкое снижение сроков проектирования и подготовки производства. Только упомянутые преимущества метода позволяют получить значительный технический и экономический эффект при изготовлении ниобиевых резонаторов.

Однако в настоящее время полностью отсутствуют публикации по штампуемости не только особо чистого ниобия, но и ниобия любой чистоты при гидроударном нагружении. А имеющиеся сведения по штамповке ниобия и его сплавов в инструментальных штампах [13, 14] говорят о том, что это непростой материал для вытяжки, несмотря на то, что он самый пластичный из всех тугоплавких металлов. Именно высокая пластичность приводит к низкому деформационному упрочнению ниобия, т.е. высокие степени деформации не приводят к значительному упрочнению металла, а значит, и к снижению способности к вытяжке. И чем чище ниобий, тем выше его пластичность, тем выше отношение предела текучести к пределу прочности, что ухудшает способность материала к вытяжке. Кроме того, высокая пластичность материала приводит

к сильному схватыванию ниобия с материалом деформирующего инструмента и снижению степени вытяжки. Поэтому для вытяжки ниобия применяются матрицы из бронзы и специальные смазки [13]. А процесс гидроударной вытяжки значительно отличается от процесса вытяжки в инструментальных штампах, поэтому оценка штампуемости особо чистого ниобия при гидроударном нагружении является актуальной задачей.

Под штампуемостью листового металла понимают его способность к пластическому формоизменению, определяемую совокупностью механических и физических свойств. Вопрос надежной оценки штампуемости листового материала имеет важное производственное значение, поэтому исследованию штампуемости уделяется большое внимание как в области листовой штамповки, так и в области металлургического производства листовых материалов. Вследствие этого разработано множество методов оценки штампуемости, где ее оценивают по результатам физико-химических, механических и технологических испытаний. Но единого универсального критерия оценки штампуемости так и не выработали за долгую историю испытаний. И это все закономерно, так как в листовой штамповке существует множество технологических операций, и все они различаются между собой по напряженно-деформированному состоянию металла, виду деформации, условиям трения и массе других факторов. Поэтому единого универсального показателя, характеризующего штампуемость металла, не существует. При гидроударном нагружении задача оценки штампуемости еще более усложняется, так как при обычной штамповке независимо от мощности применяемого оборудования деформируемой заготовке нельзя передать энергию большую, чем необходимо для ее полного деформирования, а в условиях импульсного нагружения это происходит довольно часто. При гидроударном нагружении заготовку, которая полностью вытягивается при определенной энергии, можно довести до разрушения, увеличивая энергию удара, что невозможно сделать при вытяжке на обычных прессах. Таким образом, гидроударное нагружение создает своеобразное напряженно-деформированное состояние заготовки и оказывает существенное влияние на штампуемость металла. Следовательно, для определения штампуемости материалов при высокоскоростном деформировании необходима методика, которая бы учитывала особенности такого деформирования. Для оценки деформационных свойств различных металлов при гидроударном нагружении такая методика предложена в работе [15], где в качестве критерия штампуемости используется значение предельной степени вытяжки.

Таким образом, для оценки штампуемости особо чистого ниобия в условиях гидроударной вытяжки выбираем предельную степень вытяжки $K_{пр} = D_{заг. max}/d$, где $D_{заг. max}$ — максимальный диаметр заготовки, которую можно вытянуть за одно нагружение без разрушения; d — диаметр вытягиваемого изделия. Однако величина предельной степени вытяжки, помимо деформационных свойств материала, зависит еще и от конструктивных характеристик гидроударного оборудования и техноло-

гической оснастки. В связи с этим для определения истинной предельной степени вытяжки $K_{\text{пр.ист}}$ важно знать величину и характер влияния этих характеристик на предельную степень вытяжки. Как показано в работе [16], к таким характеристикам относятся: относительная масса бойка α — отношение массы жидкости в рабочей камере к массе бойка, величина радиуса закругления матрицы R_m , относительная толщина заготовки $S/D_{\text{заг}}$, наличие смазки и ее качество. Здесь же установлено, что перечисленные выше параметры однотипно влияют на весь диапазон применяемых в листовой штамповке материалов. Таким образом, имея значение предельных степеней различных материалов, полученных при определенных условиях построением графиков штампуемости ($K_{\text{пр.о}}$), и зная величину и характер влияния основных параметров на предельную степень вытяжки, которые приведены в работе [16], можно найти истинную предельную степень вытяжки ($K_{\text{пр.ист}}$) любого материала в любых условиях гидроударной вытяжки. Из вышеизложенного очевидно, что для оценки штампуемости особо чистого ниобия необходимо только построить график штампуемости ниобия, откуда получим $K_{\text{пр.о}}$, а значит, и истинную предельную степень вытяжки особо чистого ниобия в любых условиях гидроударной вытяжки. Однако следует отметить, что построение графика штампуемости любого металла — довольно трудоемкий процесс, требующий больших затрат времени и металла, а учитывая стоимость особо чистого ниобия (в 2 раза дороже серебра), необходимо минимизировать расход материала и затрат труда путем проведения испытания ниобия на растяжение и сравнения полученных результатов с аналогичными характеристиками других металлов, для которых уже существуют графики штампуемости.

Оказалось, что особо чистый ниобий по прочностным и деформационным характеристикам находится между алюминием и медью, для которых уже существуют графики штампуемости. Сопоставление этих данных позволит обойтись минимальным количеством экспериментов для построения графика штампуемости особо чистого ниобия, не потеряв точности полученных результатов. А если построение графика штампуемости для ниобия провести при тех же условиях, при которых получены данные для широкого ряда листовых материалов, то найденное значение $K_{\text{пр.о}}$ будет точно характеризовать штампуемость особо чистого ниобия по отношению к штампуемости других металлов. Это условие и было выполнено при проведении экспериментов.

Эксперименты проводились на лабораторной гидроударной установке ЛГУ-1 с максимальной энергией удара 1,13 кДж по схеме, представленной на рис. 13.

Лабораторная гидроударная установка представляет собой машину вертикального исполнения и предназначена главным образом для проведения экспериментальных работ по установлению общих закономерностей процесса гидроударной штамповки. Установка отличается просто-

той, что позволяет легко изменять форму и массу бойков, устанавливать рабочие камеры различных размеров и форм, применять различные датчики. При этом установка обладает хорошими энергетическими возможностями — удельная энергия установки (энергия, приходящаяся на единицу площади выходного сечения камеры) достигает $110 \cdot 10^4$ Дж/м², а уровень давления — $(4000-5000) \times 10^5$ Н/м², что превышает показатели промышленных гидроударных машин. В наших экспериментах использовалась цилиндрическая рабочая камера диаметром, равным диаметру бойка (50 мм). Объем воды в камере составлял $176 \cdot 10^{-6}$ м³. Масса бойка 1,471 кг, что соответствует параметру $\alpha = m_{ж}/m_{б} = 0,119$. Эти параметры, как и все последующие, полностью соответствуют параметрам, при которых строили графики штампуемости для других металлов, т. е. будет полная сравнимость результатов. Вытяжка цилиндрических стаканчиков производилась в матрицу диаметром $d_m = 30$ мм, радиус галтели матрицы был равен $4S_0$ (S_0 — исходная толщина вытягиваемой ниобиевой заготовки).

Для экспериментов использовались круглые заготовки из особо чистого ниобия толщиной 0,9 мм. Диаметры заготовок были равны 40, 45, 50, 55, 60, 65 и 70 мм, что соответствует относительной толщине $2,25 \geq S_0 \cdot 100\% \geq 1,0$ и степеням вытяжки K , равным 1,33, 1,5, 1,66, 1,83, 2,0, 2,16 и 2,33 соответственно. Учитывая низкое качество поверхности листов ниобия ($R_{a\text{ ср}} = 0,946$ мкм) и склонность ниобия к схватыванию с материалом матрицы, на заготовку наносили лаковое покрытие.

Партию заготовок одного диаметра, начиная с наименьшего, подвергали вытяжке, причем запас энергии, накопленной в ресивере гидроударной установки в виде сжатого воздуха, постепенно увеличивали. Давление воздуха контролировали по показаниям образцового манометра.

Ранее проведенные исследования по измерению максимальной скорости бойка показали, что показания образцового манометра довольно точно коррелируют с расчетными значениями энергии бойка. При этом погрешность в определении величины энергии не превышала 1,5% [17].

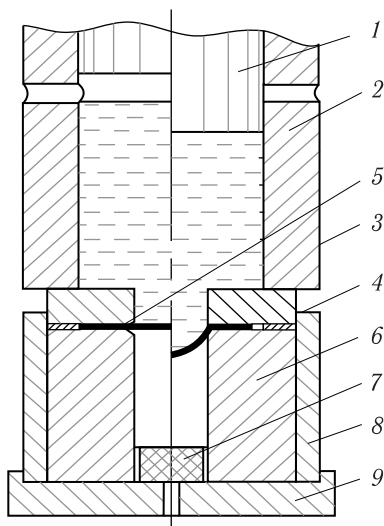


Рис. 13. Схема эксперимента: 1 — боек; 2 — рабочая камера; 3 — прижим; 4 — центрирующая шайба; 5 — заготовка; 6 — матрица; 7 — амортизатор; 8 — обойма; 9 — зажимная плита

В результате экспериментов устанавливались величина удельной энергии, при которой происходит полная вытяжка (если она возможна) или разрушение заготовки, предельный диаметр заготовки, которую можно полностью вытянуть за одно нагружение, и соответствующее ему значение предельной степени вытяжки $K_{пр.о}$. Естественно, что при выбранном шаге по диаметру заготовок предельная степень вытяжки с высокой вероятностью лежит в интервале между значениями степени вытяжки, когда заготовка полностью вытягивается, и степенью вытяжки, при которой полной вытяжки не происходит. Поэтому предельную степень вытяжки определяли путем графической интерполяции, что при выбранном шаге в диаметрах заготовок позволяет получить точный результат. Экспериментальные образцы и график штампуемости особо чистого ниобия представлены на рис. 14 и 15 соответственно.



Рис. 14. Экспериментальные образцы из ниобия

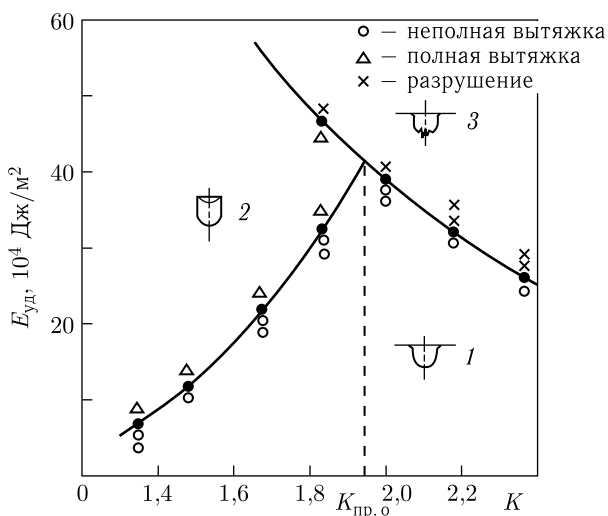


Рис. 15. График штампуемости особо чистого ниобия

Из представленного графика штампуемости видно, что кривые графика (кривые штампуемости) являются границами трех характерных областей. Область 1 определяет такие соотношения удельной энергии бояка $E_{уд}$ и начальных степеней вытяжки K , при которых можно получить только неполную вытяжку, т. е. деталь всегда будет с фланцем. Область 2 определяет соотношение этих величин, при которых происходит полная вытяжка заготовки (всегда без фланца), а область 3 характеризуется тем, что здесь при любых соотношениях энергии бояка и начальной степени вытяжки заготовка разрушается. Общая для всех трех областей точка на кривых штампуемости соответствует предельной степени вытяжки $K_{пр.о}$. Значению предельной степени вытяжки соответствует только одна определенная величина удельной энергии удара, обеспечивающая полную вытяжку заготовки, в то время как любой другой степени вытяжки (меньше предельной) соответствует определенный диапазон энергии бояка, в котором обеспечивается полная вытяжка заготовки. Этот диапазон уменьшается по мере увеличения степени вытяжки и приближения ее к предельной, следовательно, чувствительность ниобия к избыточной энергии возрастает с увеличением степени вытяжки. В результате построения кривых штампуемости установлено значение предельной степени вытяжки особо чистого ниобия, величина которой равна $K_{пр.о} = 1,92$. Эта величина является предельной степенью вытяжки заготовки при штамповке ниобия в условиях нашего эксперимента, т. е. в этих условиях максимальный диаметр заготовки $D_{заг. max}$, которую можно вытянуть без разрушения за одно нагружение, будет равным $d \times K_{пр.о} = 30 \text{ мм} \times 1,92 = 57,6 \text{ мм}$. При этом вытяжку такой заготовки можно осуществить только при единственном значении энергии $E_{уд}$, равном $41 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^2$. Очевидно, что так точно сдозировать энергию невозможно, да и другие факторы изменчивы, поэтому реально вытяжку всегда надо осуществлять при значениях степеней вытяжки меньше предельной. Тогда возникает диапазон энергий, при которых можно осуществить полную вытяжку заготовки и процесс становится легко осуществимым. Сравнив значение предельной степени вытяжки особо чистого ниобия $K_{пр.о} = 1,92$ с предельными степенями вытяжки других материалов при гидроударном нагружении в таких же условиях (например, для меди М1М, латуни Л62, сталей 08кп, Х18Н10Т, алюминиевых сплавов АМцМ, Д1АМ эти показатели, соответственно, равны: 1,91, 1,94, 1,95, 1,97, 1,94, 1,87), можно сделать вывод о хорошей штампуемости особо чистого ниобия при гидроударном нагружении.

Проведенные исследования штампуемости особо чистого ниобия позволили установить предельную степень вытяжки $K_{пр.о} = 1,92$, взаимосвязь между энергией удара, степенью вытяжки и результатом вытяжки. Полученные результаты исследований показали хорошую штампуемость ниобия, близкую к штампуемости таких материалов, как медь, латунь, алюминий, что позволяет использовать эти материалы в качестве модельных при отработке технологических процессов гидроударной вытяж-

ки ниобия. Результаты исследований позволяют с высокой степенью достоверности проектировать технологические процессы гидроударной вытяжки изделий из особо чистого ниобия, например, сверхпроводящих СВЧ-структур для ускорителей элементарных частиц.

Процесс вытяжки плоской заготовки является одной из наиболее сложных операций как при обычной, так и при импульсной штамповке. Этому процессу всегда уделялось наибольшее внимание исследователей, что объясняется сложностью процесса вытяжки и его зависимостью от огромного количества факторов. Процесс гидроударной вытяжки, как и другие импульсные методы вытяжки, осложняется также высокой скоростью деформации, а следовательно, и возникновением значительных инерционных сил, противодействующих перемещению фланца вытягиваемой заготовки. Это приводит к снижению основного показателя процесса — степени вытяжки. В ряде исследований показано, что с увеличением скорости деформирования степень вытяжки значительно снижается [18–20]. Отсюда следует, что для интенсификации процесса и повышения степеней вытяжки необходимо снижать скорость деформирования заготовки. При гидроударной вытяжке этого можно достичь двумя способами. Первый — это уменьшение относительной массы бойка $\alpha = m_{\text{ж}}/m_{\text{б}}$, где $m_{\text{ж}}$ — масса жидкости в рабочей камере, $m_{\text{б}}$ — масса бойка, однако следует отметить, что изменять относительную массу бойка в промышленных машинах практически невозможно по конструктивным соображениям. Поэтому более эффективно использовать второй способ уменьшения скорости деформирования заготовки — осуществлять процесс несколькими ударами (многоударная вытяжка).

При многоударной вытяжке деформирование заготовки происходит за 2–5 нагружений, что увеличивает предельную степень вытяжки материалов на 5–10%. При этом значения предельных степеней вытяжки возрастает прямо пропорционально количеству импульсов. Также при использовании многоударного нагружения уменьшается величина утонения в опасных сечениях готового изделия, снижение радиальных деформаций в центре образцов достигает 35%. Однако при всех достоинствах многоударной вытяжки такой процесс в разы снижает производительность труда и увеличивает расход энергии (пропорционально количеству ударов). Наличие этих факторов уменьшает положительный эффект от использования многоударной вытяжки, поэтому актуальной становится задача разработки методов и устройств, позволяющих исключить указанные недостатки. Одним из возможных решений поставленной задачи является осуществление многоударной вытяжки с использованием специального составного бойка, показанного на рис. 16. Целью данного исследования является изучение технологических возможностей предлагаемого устройства, включающее сравнительную оценку штампуемости сплава Д1АМ и особо чистого ниобия. В представленном устройстве боек выполнен в виде полого цилиндра 4

с закручивающейся крышкой 1, внутрь которого помещается подвижный вкладыш 3. Также конструкция бойка позволяет осуществлять изменение свободного хода H вкладыша с помощью регулировочного винта 2. Гидроударная вытяжка заготовки 7 в матрицу 8 осуществляется ударом бойка по жидкости в рабочей камере 5. При этом во время разгона бойка подвижный вкладыш прижат к крышке силами инерции, поэтому кинетическая энергия движущегося бойка передается заготовке в два этапа: сначала при ударе о жидкость пустотелого корпуса, а затем при ударе подвижного вкладыша о дно корпуса. Второй этап передачи энергии наступает через время, необходимое подвижному вкладышу для преодоления длины свободного хода H .

Из вышеописанного следует, что, изменяя величину свободного хода вкладыша, можно регулировать время начала второго этапа передачи энергии заготовке и, следовательно, регулировать длительность импульса давления. Увеличение длительности импульса давления рабочей жидкости на заготовку позволит увеличить степень вытяжки заготовки и при этом сохранить высокую производительность и энергоэффективность процесса, что было подтверждено последующими экспериментами по оценке штампуемости сплава Д1АМ и особо чистого ниобия при обычном гидроударном нагружении и при многоударном нагружении с использованием предлагаемого устройства.

Эксперименты проводились на установке, имеющей максимальную энергию удара 1,13 кДж, в соответствии со схемой, представленной на рис. 16. Полная масса бойка составила 0,614 кг, а относительная масса $\alpha = 0,286$. В качестве основного критерия оценки штампуемости использовалось значение предельной степени вытяжки, полученное путем экспериментального построения графиков штампуемости материалов Д1АМ и особо чистого ниобия. Предельная степень вытяжки определяется как $K_{пр} = D_{заг. max}/d$, где $D_{заг. max}$ — максимальный диаметр заготовки, которую можно вытянуть за одно нагружение без разрушения; d — диаметр

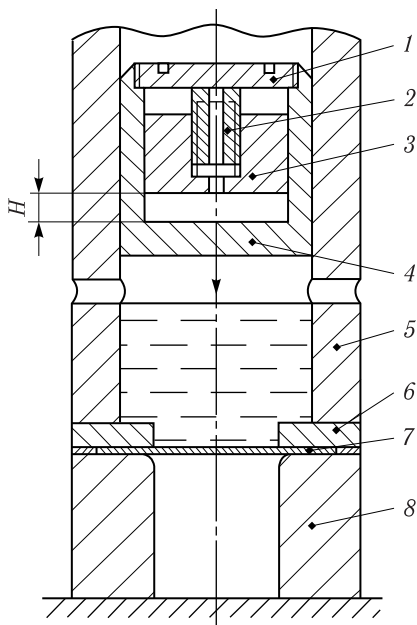


Рис. 16. Схема устройства для осуществления процесса многоударной вытяжки: 1 — крышка бойка; 2 — регулировочный винт; 3 — вкладыш; 4 — корпус бойка; 5 — рабочая камера; 6 — гидродинамический прижим; 7 — заготовка; 8 — матрица

вытягиваемого изделия. Партию заготовок одного диаметра подвергали вытяжке, при этом энергию удара для каждой последующей заготовки постепенно увеличивали. Сначала эксперименты были выполнены только с неподвижным зафиксированным вкладышем, затем последовательно с неподвижным зафиксированным вкладышем и с перемещающимся на величину свободного хода.

В результате выполнения экспериментов были построены графики штампуемости сплава Д1АМ и особо чистого ниобия (рис.17 и 18 соответственно) при обычной гидроударной вытяжке и при многоударной вытяжке с использованием составного бойка, а также определены предельные степени вытяжки этих материалов в обоих случаях.

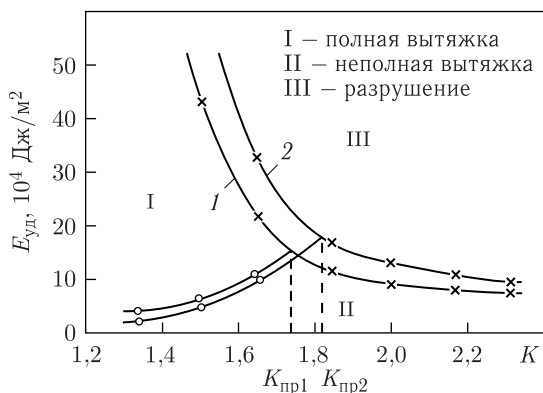


Рис. 17. График штампуемости сплава Д1АМ ($\alpha = 0,286$): 1 — при обычной гидроударной вытяжке; 2 — при многоударной вытяжке с использованием составного бойка

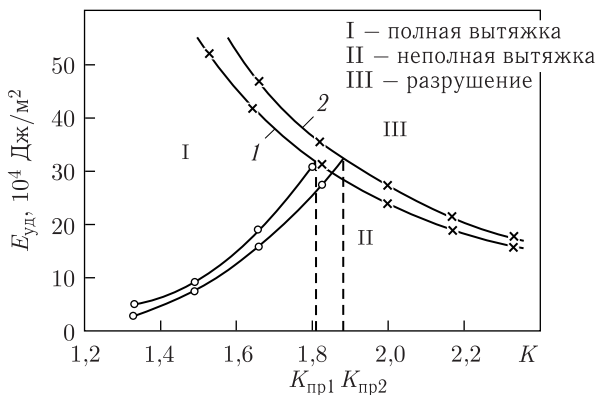


Рис. 18. График штампуемости особо чистого ниобия ($\alpha = 0,286$): 1 — при обычной гидроударной вытяжке; 2 — при многоударной вытяжке с использованием составного бойка

Как видно из представленных графиков, построенные кривые штампуемости являются границами трех характерных областей: область I соответствует полной вытяжке заготовки, область II — неполной вытяжке, а область III — разрушению заготовки. Точка пересечения кривых штампуемости, общая для всех трех областей, соответствует предельной степени вытяжки материала.

Из рис. 17 и 18 следует, что для обоих материалов использование многоударной вытяжки с применением составного бойка с подвижным вкладышем позволило увеличить предельную степень вытяжки примерно на 5%: для сплава Д1АМ от $K_{\text{пр1}} = 1,74$ до $K_{\text{пр2}} = 1,82$, для особо чистого ниобия от $K_{\text{пр1}} = 1,81$ до $K_{\text{пр2}} = 1,88$. Также при использовании многоударной вытяжки графики штампуемости материалов (кривая 2 на рис. 17 и 18) сдвинулись относительно графиков штампуемости при обычной гидроударной вытяжке (кривая 1 на рис. 17 и 18) вправо. Соответственно, энергия, необходимая для полной вытяжки заготовки какого-то конкретного диаметра при многоударном нагружении, меньше, чем при обычной гидроударной вытяжке. Это объясняется тем, что при многоударной вытяжке величина утонения стенок образцов меньше: например, при вытяжке образцов из сплава Д1АМ со степенью вытяжки 1,5 толщина образца в опасном сечении (центр доннышка) при обычной гидроударной вытяжке составила $S_1 = 0,78$ мм, а при многоударной вытяжке с использованием составного бойка — $S_2 = 0,82$ мм. Соответственно, относительное утонение ε при использовании предлагаемого устройства снизилось на 35%, что уменьшает работу деформации, необходимую для формирования донной части образца. В то же время величина энергии, необходимой для разрушения заготовки, значительно возросла, что объясняется более медленным нарастанием утонения заготовки в процессе вытяжки, а следовательно, большими энергетическими затратами, требующимися для ее разрыва. Такое смещение кривых штампуемости в совокупности расширяет диапазон энергий, в котором можно осуществлять вытяжку заготовок, и делает процесс более стабильным и легко осуществимым.

Преимуществом вышеописанного процесса является также то, что, несмотря на поэтапность и постепенность передачи энергии к заготовке, вытяжка заготовок с близкими к предельным степенями вытяжки осуществляется за один цикл работы оборудования, в то время как при обычной многоударной вытяжке такой же заготовки процесс требует нескольких циклов. Это позволяет повысить производительность труда и сократить расход энергии вдвое.

К сверхпроводящим ниобиевым резонаторам для ускорителей заряженных частиц предъявляются очень высокие требования относительно геометрии весьма сложной формы и очень жесткие допуски на размеры. Кроме того, при изготовлении изделия не допускается даже ничтожное загрязнение особо чистого ниобия материалом штамповой оснастки. Качество поверхности полужеек должно быть высочайшим, без царапин,

вмятин, следов инструмента. Невыполнение хотя бы одного из этих условий не позволит достичь требуемой добротности резонатора.

В настоящее время для изготовления резонаторов используют обычную инструментальную штамповку [21]. Инструментальные штампы имеют высокую производительность, что крайне важно при массовом производстве, но при этом имеют высокую стоимость, а с учетом сверхвысоких требований к геометрической точности сложнопрофильных резонаторов стоимость таких штампов дополнительно многократно возрастает. Кроме того, инструментальная штамповка не гарантирует защиты особо чистого ниобия от загрязнения материалом оснастки, так как штамповка осуществляется за счет жесткого контакта между заготовкой и пуансоном. Помимо этого имеются сложности, связанные с обеспечением точной геометрии, с неравномерным утонением, царапинами и задирами на изделиях.

Кроме инструментальных штампов существует относительно новая технология гидроформовки [22], которая отличается низкой стоимостью формообразующего инструмента и малыми сроками подготовки производства, но требует дорогостоящего гидравлического оборудования, сложных уплотняющих устройств на штампе, которые иногда дороже самого штампа. Процесс в силу этого обладает низкой производительностью, а так как толщина материала значительная (2,8–3,0 мм), то требуется высокое давление, чтобы обеспечить точное копирование матрицы, что весьма проблематично.

В этих условиях гидроударная штамповка, обладающая такими достоинствами, как низкая стоимость оснастки, отсутствие уплотнений, высокое и равномерное деформирующее усилие жидкости, которое гарантирует точное копирование матрицы, выглядит предпочтительней перед описанными методами штамповки. Кроме того, при гидроударной штамповке практически весь объем металла находится в пластическом состоянии, что приводит к отсутствию пружинения, а значит, к повышению точности изделий. Особо чистый ниобий — высокопластичный металл и поэтому обладает высокой схватываемостью с деформирующим инструментом, что приводит к снижению качества поверхности изделий, а гидроударная штамповка благодаря минимальному контакту инструмента с заготовкой устраняет этот недостаток [23]. Таким образом, гидроударная штамповка полужабер резонаторов представляется весьма перспективным направлением как при изготовлении опытных партий резонаторов, так и при массовом производстве сверхпроводящих ниобиевых резонаторов. Имеющееся гидроударное оборудование обладает следующими достоинствами (рис. 19):

- простота и низкая стоимость оснастки, так как роль пуансона выполняет жидкость;
- отсутствие уплотняющих устройств;
- высокое и равномерное деформирующее усилие;
- отсутствие пружинения;



Рис. 19. Гидроударный пресс СФТ-510

- короткие сроки подготовки производства;
- высокое качество поверхности отштампованных изделий;
- отсутствие средств повышенной опасности, так как роль энергоносителя выполняет сжатый воздух цеховой пневмосети с давлением до 0,63 МПа.

В связи с этим для определения истинной предельной степени вытяжки K_{act}^{lim} важно знать величину и характер влияния характеристик на предельную степень вытяжки. К таким характеристикам относятся:

- относительная масса бойка α (отношение массы жидкости в рабочей камере к массе бойка);
- величина радиуса закругления матрицы R_m ;
- относительная толщина заготовки S/D ;
- наличие смазки и ее качество;
- схема процесса гидроударной вытяжки.

Существует еще ряд конструктивных характеристик гидроударных прессов, которые оказывают некоторое влияние на предельную степень вытяжки, однако оно исключается путем однотипного проектирования (например, соотношение объемов ресивера и ствола) или не превосходит нескольких процентов и им можно пренебречь (например, влияние рода жидкости в рабочей камере).

Экспериментально установлено, что перечисленные выше параметры однотипно влияют на весь диапазон применяемых в листовой штамповке

материалов. Таким образом, имея значения предельных степеней вытяжки различных конструкционных листовых материалов, полученных при определенных условиях, — K_0^{lim} , и зная величину и характер влияния основных технологических параметров на предельную степень вытяжки, можно найти истинную предельную степень вытяжки $K_{\text{act}}^{\text{lim}}$ любого материала в любых условиях процесса гидроударной вытяжки. Параметрическое уравнение для определения истинной предельной степени вытяжки имеет вид

$$K_{\text{act}}^{\text{lim}} = K_0^{\text{lim}} K_1 K_2 K_3 K_4,$$

где K_0^{lim} — предельная степень вытяжки, полученная экспериментально путем построения кривых штампуемости для ряда конструкционных материалов при постоянных условиях процесса вытяжки; K_1 , K_2 , K_3 и K_4 — коэффициенты, учитывающие влияние относительной массы бойка α , величины радиуса закругления матрицы R_m , относительной толщины заготовки, а также наличие смазки на поверхности заготовки и матрицы и ее качество.

В настоящее время полностью отсутствуют исследования штампуемости не только особо чистого ниобия, но и ниобия любой чистоты при гидроударном нагружении. Поэтому оценка штампуемости путем определения K_0^{lim} является актуальной задачей. Методика оценки деформационных свойств различных металлов при гидроударном нагружении предложена в работе [24]. Здесь в качестве критерия штампуемости используется значение предельной степени вытяжки.

Полученные результаты позволили установить энергетические показатели процесса гидроударной вытяжки полувачек резонатора из особо чистого ниобия и разработать технологический процесс изготовления.



Рис. 20. Оснастка для гидроударной штамповки полувачек резонатора

По результатам проектирования была изготовлена оснастка и заготовки, которые штамповались в матрицу, показанную на рис. 20.

Отработка технологии гидроударной вытяжки, впрочем как и любой другой, требует больших затрат времени и материалов, а с учетом высокой стоимости заготовок из ниобия было принято решение обрабатывать технологию штамповки на материале АМцМ. Это позволило минимизировать количество экспериментов

на меди М1М и особо чистом ниобии, а значит, заметно уменьшить стоимость работ. Полученные результаты отработки технологии использовались для определения всех технологических показателей для других материалов в соответствии с их прочностными и пластическими свойст-



Рис. 21. Полулучейки из меди и алюминия (слева) и из ниобия (справа), изготовленные методом гидроударной штамповки на прессе СФТ-510

вами, полученными при испытаниях как на растяжение, так и на штампуемость. Таким образом, удалось получить готовые детали с первой заготовки как для меди, так и для особо чистого ниобия. Отштампованные полулучейки из меди и алюминия, а также особо чистого ниобия представлены на рис. 21.

Для определения точности изготовления полулучеек резонатора выбраны два размера: внутренний диаметр в области экватора резонатора D_{eq}^{in} и внутренний диаметр в области ириса (место стыковки резонатора с трубкой дрейфа) d_{iris}^{in} . Это главные размеры полулучеек, по которым они электронным лучом свариваются друг с другом и с трубками дрейфа. К этим размерам предъявляются самые высокие требования, так как разнотолщинность стенок даже в 0,1 мм уже вызывает проблемы при сварке и считается недопустимой. После штамповки эти изделия подвергаются механической обработке резанием, а с учетом того, что особо чистый ниобий очень плохо обрабатывается, допуски на механическую обработку должны быть минимальными как по линейным размерам, так и по эллипсности. В отштампованных полулучейках (по две из каждого материала) измерялись диаметры D_{eq}^{in} и d_{iris}^{in} с точностью до 0,05 мм в двух взаимно-перпендикулярных направлениях — вдоль и поперек прокатки. Результаты измерений приведены в табл. 7. Кроме диаметров D_{eq}^{in} и d_{iris}^{in} здесь приведены их отклонения от номинального значения ΔD_{eq}^{in} и Δd_{iris}^{in} соответственно, а так же толщина исходного листа S_0 .

Как видно из таблицы, точность гидроударной штамповки очень высокая, так как отклонение измеряемых диаметров не превышает 0,1 мм, что является недостижимым результатом для инструментальной штамповки, и фактически такие отклонения характерны для процессов обработки металлов резанием. Для деталей таких размеров в справочниках по холодной штамповке [26, 27] приводятся допускаемые отклонения по диаметру на порядок больше ($\pm 0,4$ – $0,9$ мм) полученных отклонений (0,05–0,1 мм) при гидроударной штамповке.

Таблица 7. Размеры изготовленных полуячеек

Номер образца	Материал	S_0 , мм	D_{eq}^{in} , мм	d_{iris}^{in} , мм	ΔD_{eq}^{in} , мм	Δd_{iris}^{in} , мм
1	АМцМ	2,84	206,5	78,0	-0,10	-0,10
			206,6	78,1	0	0
2	АМцМ	2,84	206,5	78,1	-0,10	0
			206,5	78,1	-0,10	0
1	Медь	2,9	206,6	78,1	0	0
			206,7	78,0	+0,10	-0,10
2	Медь	2,9	206,6	78,0	0	-0,10
			206,5	78,0	-0,10	-0,10
1	Ниобий	2,87	206,5	78,05	-0,10	-0,05
			206,6	78,0	0	-0,10
2	Ниобий	2,87	206,5	78,05	-0,10	-0,05
			206,6	78,0	0	-0,10

Что касается качества поверхности отштампованных гидроударным методом изделий, то оно определяется только качеством поверхности исходного материала. Шероховатость поверхности исходного листового особо чистого ниобия (Китай) измеряли цифровым профилометром 296. Измеренные значения шероховатости R_a составляли от 0,590 до 0,960 мкм, и эта шероховатость практически не изменилась на отштампованных изделиях. Визуальное исследование других материалов подтверждает вывод, что качество поверхности отштампованных гидроударным методом изделий определяется только состоянием исходной заготовки.

Проведенные исследования показали, что гидроударный метод штамповки полностью удовлетворяет требованиям по точности, качеству и экономичности, предъявляемым к методу изготовления сверхпроводящих ниобиевых резонаторов.

В процессе изготовления резонаторов необходимо обрабатывать резанием заготовки, отштампованные полуячейки, трубки дрейфа и фланцы. Заготовка для штамповки полуячеек изготавливалась из квадрата 290×290 мм — методом водоструйной резки вырезался круг $\varnothing 285$ мм. Процесс проходил в воде при комнатной температуре и не вызвал технических сложностей.

После штамповки полукамер необходима токарная обработка области экватора и ириса. Особо чистый ниобий относится к высокопластичным металлам, но труднообрабатываемым резанием подобно алюминию, меди, нержавеющей стали, платине, золоту, никелю и др. Однако обработка резанием особо чистого ниобия по сравнению с обработкой перечисленных металлов значительно сложнее. При резании всегда присутствует

тенденция к привариванию, налипанию ниобия на режущую пластину, интенсивный износ режущей кромки, задиры обрабатываемой детали, возрастание микротвердости в несколько раз на поверхности среза.

Особое внимание должно быть уделено геометрии резца и качеству заточки его граней — грани должны быть очень острые. Даже покрытия режущих пластинок увеличивают радиус режущей кромки, что ухудшает процесс резания ниобия. Передний угол резания выбирают большим, вплоть до 55° , задний угол в плане около 10° . Эти рекомендации легко выполнить, используя режущие пластины из быстрорежущей стали. Однако оказалось, что при обработке ниобия быстрорежущая сталь очень быстро истирается и за один проход отрезать фланец невозможно. Необходимо останавливать процесс и затачивать резец, а это крайне нежелательно, так как страдает точность выполняемой операции.

В нашем случае для выполнения операции резания были применены резцы с твердосплавными пластинками Т15К6, ВК8 и быстрорежущие резцы Р6М5. Испытания проведены в широком диапазоне скоростей — от 18 до 210 м/мин. Наилучшие результаты показали резцы с пластинками ВК8. При испытаниях выяснилось, что особо чистому ниобию свойственно образование очень прочного заусенца, с которым трудно справиться, и нужны индивидуальные приемы по его удалению, чтобы не повредить изготавливаемую деталь.

Для фиксации отштампованных полуячеек в токарном патроне было разработано специальное зажимное устройство (рис. 22), позволяющее обрабатывать экватор и ирис за одну установку на станке. Вначале это устройство зажимается в токарном патроне и проверяется биение базовых поверхностей. После этого обрабатываемая деталь зажимается прижимным кольцом и проверяется биение детали в местах обработки. При такой схеме обеспечивается параллельность обрабатываемых торцов и их перпендикулярность оси аксиальной симметрии детали.

Обработка резанием проводилась под постоянной струей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что предотвращало нагрев в зоне резания более 80°C . В качестве СОЖ использовали немецкую эмульсию DASCOOL-S44, которую растворяли водой в отношении 1:20. Использовали изолированную подачу СОЖ. Режимы резания были очень щадящими: небольшая глубина резания — не более 0,2 мм, минимальная ручная подача.



Рис. 22. Детали устройства механической обработки полуячеек



Рис. 23. Изготовленные детали одноячеечного резонатора

Предварительно в качестве начальной фазы освоения технологии изготовления высокочастотных сверхпроводящих резонаторов были разработаны и изготовлены несколько экспериментальных образцов одноячеечных резонаторов из модельных материалов (алюминий АМцМ и медь М1М). Отдельные детали резонатора представлены на рис. 23.

В результате выполненных исследований разработан полный производственный цикл изготовления деталей сверхпроводящих ниобиевых резонаторов и создана вся необходимая технологическая оснастка. Исследовано влияние высокоскоростной деформации на способность высокочистого ниобия к глубокой вытяжке. Экспериментально получена диаграмма штампуемости ниобия для гидроударной штамповки, и определены предельные степени вытяжки модельных материалов и особо чистого ниобия: 1,94 для Al (АМцМ), 1,91 для Cu (М1М), 1,92 для Nb. Впервые методом гидроударной штамповки из особо очищенного ниобия изготовлены ячейки сверхпроводящих резонаторов с отклонением размеров от номинала не более 0,1 мм. Определены параметры механической обработки отштампованных деталей ниобиевых резонаторов перед сваркой. Применение метода гидроударной штамповки представляется перспективной технологией для изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия.

2.2. Использование технологии электронно-лучевой сварки при изготовлении резонаторов. Основными компонентами резонаторов типа TESLA являются девять последовательно соединенных ячеек, для исследовательских целей изготавливаются варианты с одной ячейкой при полном соответствии остальных деталей с девятиячеечной конструкцией.

Изготовление ниобиевых СВЧ-резонаторов — весьма сложный и наукоемкий процесс, связанный с использованием дорогостоящего

и в большинстве своем уникального оборудования, большого комплекса исследований как на этапе подготовки производства, так и в его процессе. Вышеперечисленные обстоятельства обуславливают большие временные затраты производства данных компонентов ускорителей и, как следствие, высокую потребность в производителях подобных изделий.

При изготовлении СВЧ-резонаторов используется ниобий высокой чистоты (порядка 99,92%), содержание примесей в котором — менее 50 ppm для металлов и менее 20 ppm для легколетучих примесей (O, C, N). Достигается такая чистота материала путем многократного электронно-лучевого переплава в высоком вакууме. При изготовлении резонаторов ухудшение данных показателей чистоты металла недопустимо. Для этого исключаются все факторы, которые могут привести к попаданию в материал посторонних включений.

На рис. 24 показана принципиальная конструкция одноячеечного СВЧ-резонатора. Необходимой операцией при создании резонаторов является получение соединений отдельных элементов конструкции резонатора. Из существующих методов получения неразъемных соединений наиболее совершенным является электронно-лучевая сварка (ЭЛС), которая позволяет при строгом соблюдении всех требований чистоты получить свойства сварных соединений, равные аналогичным показателям основного металла [33].

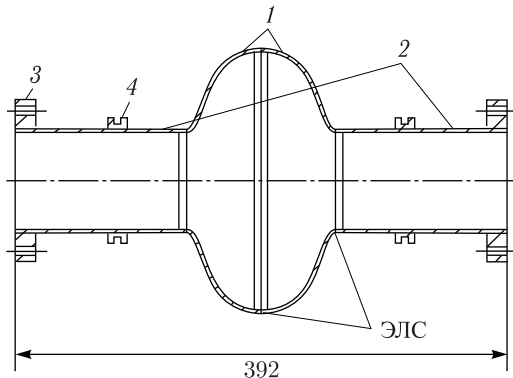


Рис. 24. Одноячеечный резонатор 1,3 ГГц: 1 — полукамеры; 2 — трубки дрейфа; 3 — фланец; 4 — крепежный элемент. Показаны места электронно-лучевой сварки

Контроль качества неразъемных соединений сверхпроводящих материалов принято проводить с помощью параметра RRR (Residual Resistance Ratio), который определяется как отношение удельного сопротивления материала при комнатной температуре (300 К) к этой величине при температуре кипения жидкого гелия (4,2 К). Для особо чистого ниобия, используемого при изготовлении СВЧ-резонаторов, значение RRR

должно быть не менее 300. При этом материал сварных соединений резонаторов также должен в полной мере отвечать этим требованиям. Достигаются такие результаты при изготовлении изделий за счет строгого соблюдения технологического регламента.

В процессе изготовления ниобиевых резонаторов особое внимание уделяется качеству поверхности. Предотвращение загрязнения поверхности материала высокой чистоты посторонними элементами в условиях механической обработки является невыполнимой задачей. Чистота обеспечивается удалением поверхностного слоя материала после каждого этапа обработки. Удалению также подлежит слой материала, толщина которого равна глубине возможного образования дефектов на данной операции изготовления. Так, изготовление ниобиевых листов с применением прокатки и последующая штамповка полуячеек резонаторов повреждают поверхностный слой на глубину порядка 100–200 мкм [30]. После шлифования (для удаления абразивных частиц и мелких царапин) и токарной обработки торцов полуячеек, для исправления дефектов, связанных с вырыванием металла и образующимися заусенцами, слой толщиной не менее 40 мкм подлежит снятию. В процессе проведения электронно-лучевой сварки пары расплавленного ниобия оседают на поверхность в виде покрытия толщиной порядка 25 мкм, которое также необходимо удалить.

В ходе процесса ЭЛС также возможно внесение загрязнений не только на поверхность заготовки, но и непосредственно в материал, что ухудшает сверхпроводящие свойства ниобия. Наиболее ответственными являются сварные соединения двух полукамер 1 (см. рис. 24) и соединения полукамер с трубками дрейфа 2. Для исключения попадания посторонних включений на поверхность материала перед сваркой сборки этих элементов должна осуществляться в чистом помещении 5-го класса по ИСО 14644.

Процесс изготовления резонаторов представлен по обобщенным этапам на рис. 25. После каждого этапа, включающего механическое или физическое воздействие на рабочую поверхность полукамер резонатора и предшествующего этапу ЭЛС, проводится процедура удаления слоя материала, на глубину которого теоретически возможно внесение загрязнений при подготовке деталей к сварке.

При изготовлении ниобиевых резонаторов для обработки поверхности наиболее широко применяются два процесса — химическое травление (buffered chemical polishing — BCP) и электролитическое полирование (electropolishing — EP). Процесс EP применяется как завершающая операция обработки рабочей поверхности резонаторов, целью которой является придание поверхности требуемой геометрии. С помощью процесса BCP удаляют дефектные слои материала и обеспечивают чистоту поверхности. В настоящее время общепринятым (так называемым стандартным) составом для BCP является смесь кислот HF (38%), HNO₃ (65%), H₃PO₄ (85%) в соотношении 1 : 1 : 2 [31].

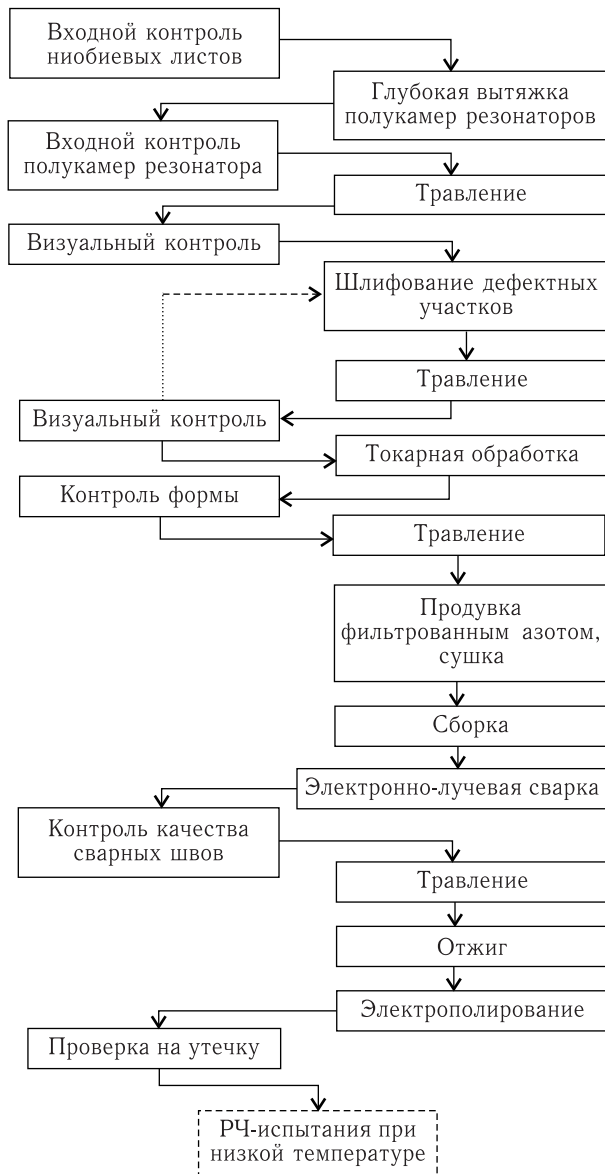


Рис. 25. Технологическая блок-схема процесса изготовления резонаторов

Для исследований и сварки ниобиевых резонаторов используется установка электронно-лучевой обработки (рис.26), созданная в ФТИ НАН Беларуси на базе энергоблока ЭЛА-15 (ускоряющее напряжение



Рис. 26. Установка электронно-лучевой обработки ФТИ НАН Беларуси

60 кВ, максимальная мощность луча 15 кВт при остаточном давлении 10^{-3} Па).

Объем вакуумной камеры ($3,5 \text{ м}^3$) позволяет при создании соответствующей сварочной оснастки, кроме сварки экспериментальных образцов одноячеечных резонаторов, проводить сварку девятиячеечной конструкции СВЧ ниобиевых резонаторов, которая будет использована при строительстве международного линейного коллайдера [28].

Выполнено проектирование оснастки для сварки элементов экспериментальных образцов одноячеечных резонаторов (рис. 27) [29]. Отработаны процесс предварительной обработки поверхности деталей резонаторов перед сваркой — травление в смеси кислот, режимы ЭЛС стыкового соединения ниобия толщиной 2,8 мм, изучены сверхпроводящие характеристики полученных сварных соединений листового ниобия.

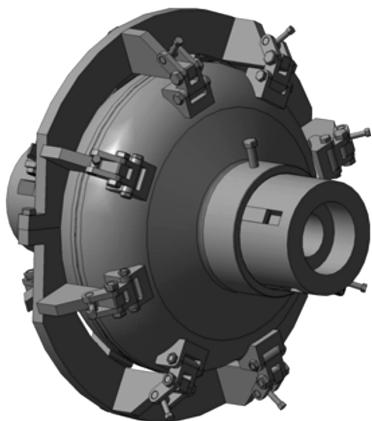


Рис. 27. Оснастка для сварки полукамер резонаторов

Для предотвращения попадания примесей в металл сварного соединения со свариваемых кромок удаляют загрязненный слой с помощью химического травления в смеси кислот. Время нахождения на воздухе между травлением и загрузкой в вакуумную камеру не должно превышать 8 ч. При большем времени на поверхности кромок образуются оксиды ниобия, влекущие попадание кислорода в металл шва при сварке. После травления возникает

опасность плохого удаления остатков химических реакций в труднодоступных для потока воды местах. Продукты реакции используемого состава смеси кислот хорошо растворяются в воде. Промывка осуществляется до тех пор, пока в воде не будут отсутствовать компоненты смеси и продукты реакции. Тем не менее полностью исключить вероятность попадания на свариваемые кромки посторонних элементов не представляется возможным. В этом случае относительно большой объем металла сварочной ванны должен обеспечить возможность равномерного распределения оставшихся примесей для повышения химической чистоты шва, что является залогом сохранения сверхпроводящих свойств ниобия (рис. 28).

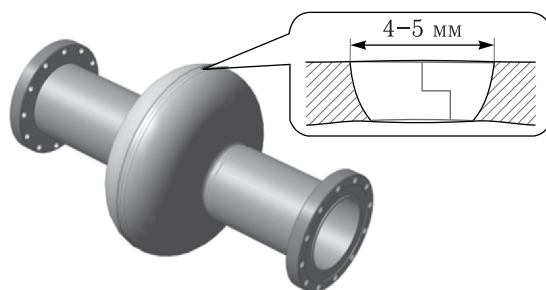


Рис. 28. Внешний вид одноячеечного СВЧ-резонатора 1,3 ГГц и требуемая геометрия сварного шва экватора

Провисание металла у корня сварного шва должно быть не более 0,5 мм. Впоследствии этот металл при окончательной обработке внутренней поверхности резонатора удаляется.

Для исследований использовались плоские образцы размерами $25 \times 50-100 \times 2,8$ мм. Образцы вырезались из исходных материалов в виде листов ниобия производства фирмы Tokyo Denkai (Япония) с габаритами в состоянии поставки $260 \times 260 \times 2,8$ мм и фирмы Ningxia OTIC (Китай) с габаритами $290 \times 290 \times 2,8$ мм.

Проведены исследования по химической обработке в смеси кислот стандартного состава особо чистого ниобия указанных производителей. Температура процесса поддерживалась в области $10-12$ °С. Для образцов с общей площадью поверхности $7,5$ см² объем смеси составлял 100 см³. Предварительно проведены исследования шероховатости поверхности листов и среднего размера зерна материалов, значения которых существенны для качества конечного изделия — резонатора.

В состоянии поставки листовая ниобий производства Tokyo Denkai имеет гладкую матовую поверхность без видимых следов обработки с шероховатостью $R_a = 0,350-0,400$ мкм. Ниобий производства Ningxia в состоянии поставки имеет различные невооруженным глазом следы обработки в виде мелких царапин. Значение шероховатости по R_a изме-

няется в зависимости от направления измерений от 0,590 до 0,960 мкм. В ниобии производства Токуо Denkaï присутствуют зерна размерами из диапазонов от 15–35 до 210–235 мкм, основную долю составляют зерна размерами от 35 до 145 мкм. При этом число зерен из диапазона 55–80 мкм составляет 27 % от общего количества. В ниобии производства Ningxia имеются зерна из диапазонов от 0–10 до 100–110 мкм, основная доля зерен — в диапазоне от 20 до 50 мкм.

Для партии образцов каждого производителя проведены по два этапа ВСП по 40 мин при повторном использовании смеси. Для ниобия производства Токуо Denkaï в течение первых 40 мин обработки был удален слой толщиной порядка 53 мкм, в последующие 40 мин — примерно 30 мкм. Для ниобия производства Ningxia — около 59 и 33 мкм соответственно. Скорость травления в процессе обработки существенно уменьшается. При этом значения скорости травления для ниобия двух производителей различны, что объясняется различием размеров зерен материалов. Процесс травления материала с более мелкозернистой структурой протекает быстрее, так как такой материал обладает большей протяженностью границ зерен, скорость удаления материала на которых выше скоростью удаления по поверхности зерна.

Согласно принятой последовательности химической обработки каждая полуячейка резонаторов подвергается четырем этапам травления с удалением с рабочей поверхности слоя толщиной в сумме не менее 200 мкм. С целью воспроизведения цикла химической обработки ниобия в процессе изготовления резонаторов по серии образцов каждого производителя подвергли четырем последовательным этапам травления. Время обработки на каждом этапе было одинаковым — 40 мин, смеси повторно не использовались.

Скорость травливания материала на первом этапе на 0,1 мкм/мин выше, чем на последующих этапах. Это объясняется качеством поверхности в состоянии поставки. На втором и последующих этапах скорость травления остается практически неизменной, порядка 1,2 мкм/мин для ниобия Токуо Denkaï и порядка 1,3 мкм/мин для ниобия Ningxia. Средний размер зерна ниобия существенно влияет на характеристики поверхности после химической обработки. Шероховатость ниобия Токуо Denkaï в процессе удаления материала увеличивалась и после четырех этапов обработки (удаление более 200 мкм) составила 1,15 мкм. Шероховатость поверхности ниобия производства Ningxia, в состоянии поставки имеющие различные значения в зависимости от направления измерения — вдоль и поперек следов обработки, после двух этапов ВСП (удаление примерно 100 мкм) составляет порядка 0,6 мкм и одинакова по всем направлениям. После четырех этапов ВСП шероховатость R_a находится в пределах 0,45–0,55 мкм. Шероховатость поверхности для обоих материалов после ВСП-обработки не соответствует требуемой, которая будет обеспечена последующей электролитической полировкой (EP).

3. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОСОБО ЧИСТОГО НИОБИЯ И КРИОГЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЧ-ИСПЫТАНИЙ РЕЗОНАТОРОВ

3.1. Сверхпроводящие характеристики сварных соединений особо чистого ниобия. Качество сварных соединений контролировалось путем изучения электро- и сверхпроводящих характеристик листового ниобия. Измерялся параметр RRR различных участков соединения (исследования проводились в научном центре DESY, Гамбург, Германия). Также измерялась температура окончания перехода в сверхпроводящее состояние T_c металла сварного соединения. Для изучения параметра RRR образцы вырезались из различных зон сварного соединения в продольном сварному шву направлении. Размеры образцов для обоих методов измерений сверхпроводящих характеристик $40 \times 2,5 \times 2,8$ мм.

Проведены исследования влияния энергетических параметров процесса ЭЛС на геометрию сварных соединений. Требуемая геометрия сварного шва (ширина сварного шва 4–5 мм, провисание металла у корня шва 0,3–0,4 мм) для листового ниобия достигается при мощности электронного луча 3,0–3,3 кВт, скорости сварки 7–10 мм/с.

На рис. 29 представлен общий вид сварного соединения ниобия фирмы Ningxia, полученного с помощью ЭЛС, после электроэрозионной резки, подготовки металлографического шлифа и травления в течение 20 мин. В сварном шве и зоне термического влияния наблюдается существенный рост размера зерна. Средний размер зерна возрастает от величины 30–40 мкм, характерной для основного металла в состоянии поставки, до 2000 мкм в металле сварного шва. Следует отметить, что для сверхпроводящих ускоряющих структур увеличение размера зерна ниобия при ЭЛС и других термических операциях является благоприятным фактором. Общая ширина зоны термического влияния по обе стороны шва порядка 12 мм.

На рис. 30 представлены данные по измерению RRR образцов из различных зон сварных соединений ниобия Токуо Denkai (Япония). По оси абсцисс отложено положение образца, где сварному шву соответствует значение 0. Исследованы два участка сварного соединения: участок 1 с гладким сварным швом и участок 2, где из-за перегрева сварочной ванны получено недопустимое провисание металла у корня сварного шва.

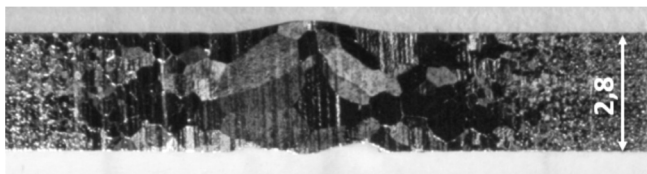


Рис. 29. Макрофотография сварного соединения особо чистого ниобия, шлиф протравлен ($\times 10$)

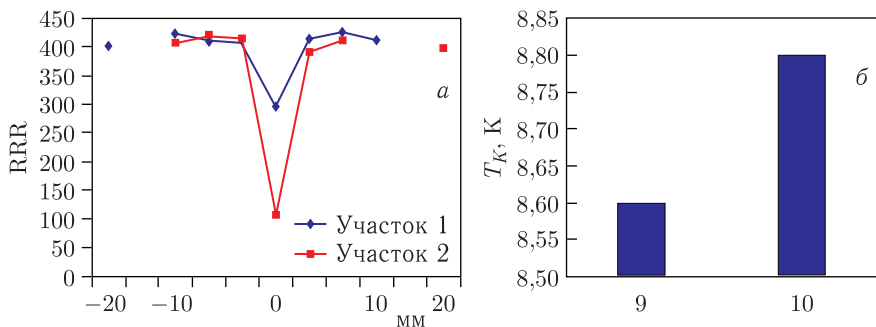


Рис. 30. Электрические и сверхпроводящие характеристики сварных соединений: а) значения параметра RRR в различных зонах сварного соединения ниобия Tokyo Denkai (0 соответствует оси шва); б) температура окончания перехода в сверхпроводящее состояние T_c сварного соединения (9) и основного металла (10). Данные представлены научным центром DESY

На первом участке наблюдается снижение параметра RRR со значения 400, характерного для ниобия Tokyo Denkai в состоянии поставки и контрольных образцов, до 300 в сварном шве. Перегрев металла в результате большего времени нахождения при высокой температуре приводит к уменьшению значения параметра RRR до 100 (участок 2), что объясняется поглощением металлом остаточных газов в сварочной камере.

При измерении температуры окончания перехода в сверхпроводящее состояние сварных соединений ниобия Ningxia (в состоянии поставки для ниобия данного производителя параметр RRR равен 300) установлено незначительное снижение T_c с 8,8 К для основного металла до 8,6 К для сварного соединения (рис. 30, б).

Исследование сверхпроводящих характеристик сварных соединений на ниобии свидетельствует о незначительном их снижении в области сварного соединения, что, в принципе, не должно оказать влияния на рабочие характеристики резонатора. Исследование свойств сварных соединений будет продолжено при реализации мер по достижению более низкого остаточного давления в сварочной камере, а также в условиях влияния магнитного поля на критические сверхпроводящие характеристики ниобия Ningxia.

Далее считаем необходимым дать комментарии по поводу результатов электрофизических исследований сварного соединения листового ниобия, проведенных в DESY.

При подготовке образцов сварное соединение было выполнено вдоль их длинной стороны. Вдоль продольного сварного соединения были смонтированы токовые и потенциальные электроды для измерения электросопротивления 4-контактным методом. Полученные результаты свидетельствуют, что в образцах со сварным соединением значения RRR меньше, чем для неразрезанных образцов. Это дает основание считать,

что понижение RRR связано с наличием сварного шва, являющегося дефектной областью образца.

В этом случае должна была понизиться температура сверхпроводящего перехода и увеличиться ширина перехода, однако такие данные отсутствуют. С нашей точки зрения, сама методика эксперимента была выбрана неправильно, что и привело к неверной интерпретации результатов. И вот почему.

При измерении однородных (несварных) образцов ток течет ламинарно, т. е. его плотность одинакова по всему сечению пластины и измеряемое падение напряжения U постоянно по всей ширине образца. При наличии продольного сварного шва плотность тока в этой области будет значительно меньше, и он будет протекать преимущественно вдоль боковых граней образца с меньшим удельным электросопротивлением. Это не отразится на результатах измерения R при 300 К из-за доминирования упругого рассеяния носителей тока на фононах. Однако при низких температурах, меньших 10% от температуры Дебая металла, электрон-фононное рассеяние имеет малоугловой характер (неупругое рассеяние). В этом случае увеличение U в сварных образцах из-за неоднородного распределения тока и уменьшения эффективного сечения пластины будет существенным, в результате чего величина RRR понизится. Этот эффект и наблюдали авторы, и он не дает однозначного ответа о влиянии области сварного шва на электрические характеристики ниобия.

Далее, обычно при измерении электросопротивления через образец пропускается «измерительный» ток — ток минимально необходимой величины для надежной регистрации падения напряжения. В данном эксперименте плотность тока велика и составляет в среднем $0,1 \text{ А/мм}^2$, что при низких температурах с учетом плохого теплоотвода через гелиевую газовую среду может приводить к перегреву образца, а значит, к ошибке при определении температуры сверхпроводящего перехода.

Авторы определяли значения RRR как отношение сопротивлений при комнатной (300 К) и гелиевой (4,2 К) температурах. При этом значение $R_{4,2\text{ К}}$ было получено экстраполяцией зависимости электросопротивления ниобия от температуры начала перехода в сверхпроводящее состояние $T_{н.п}$ в точку 4,2 К.

На наш взгляд, было бы корректнее определять RRR как отношение $R_{300\text{ К}}/R_{н.п.}$. Дело в том, что при температурах в интервале 2–40 К зависимость $R(T)$ является степенной функцией, но показатель степени может изменяться от 2 до 5 (закон Блоха) в зависимости от зонной структуры металла, его чистоты и степени дефектности. И только прямые измерения при 4,2 К могут определить истинное значение R , а значит, и RRR.

Ниже представлены наши предложения для последующих исследований.

Точно определить влияние сварного шва на электрические и сверхпроводящие характеристики ниобия можно только в том случае, когда

шов расположен *поперек* измеряемого образца, а токовые и потенциальные электроды находятся по обе стороны от него. Сравнение этих результатов с данными для однородного (несваренного) образца и даст единственно правильную информацию. И обязательно необходимы исследования в магнитном поле, так как его критическое значение наиболее чувствительно к дефектности ниобия в сверхпроводящем состоянии.

В продолжение исследований использовались листы особо чистого ниобия (Ningxia, Китай) толщиной 2,8 мм, имеющего поликристаллическую структуру с размером зерен 30–50 мкм, с содержанием примесей менее 100 ppm для металлов и менее 20 ppm для легколетучих компонентов O, C, N. Из исходных листов при помощи гильотины отрубались пластины размером 70 × 25 × 2,8 мм для сварки и 70 × 50 × 2,8 мм для исследования параметров исходного материала (контрольные образцы) и материала, подвергнутого электронно-лучевому воздействию с полным проплавлением.

Как проплавление, так и получение неразъемных соединений отдельных пластин ниобия проводились с применением электронно-лучевого нагрева и электронно-лучевой сварки в вакууме [32].

Образцы для изучения сверхпроводящих характеристик вырезались из пластин методом электроэрозии в поперечном зоне термического воздействия направлении таким образом, чтобы зона проплавления была посередине образца. Полученные образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов размерами 40 × 2 × 2,8 м. Для удаления образовавшихся в результате резки дефектов и загрязнений с их поверхности стравливался поверхностный слой толщиной ~40 мкм в смеси кислот HF, HNO₃, H₃PO₄. Подробно методика и результаты травления представлены в работе [34].

Анализ работ [35–37], в которых авторами были получены сварные соединения особо чистого ниобия с помощью электронно-лучевой сварки, свидетельствует о существовании зависимости между толщиной свариваемого металла S и вводимой при этом энергией, необходимой для получения требуемой геометрии и качества сварного шва. Приводимые в указанных литературных источниках параметры сварки сведены в табл. 8. Вводимое в процессе ЭЛС количество тепла приводится к погонной энергии сварки E_i , определяемой как количество энергии, которая вводится в единицу длины сварного шва (ГОСТ Р ИСО 857-1-2009):

$$E_i = U_{\text{уск}} (I_{\text{св}}/V_{\text{св}}).$$

Использование E_i благодаря включению в него основных параметров сварки — ускоряющего напряжения $U_{\text{уск}}$, тока $I_{\text{св}}$ и скорости сварки $V_{\text{св}}$ — позволяет сравнивать количество тепла, вводимого при электронно-лучевом воздействии на различных установках в разных лабораториях мира.

В работе [38] предлагается для предварительного подогрева материала и очистки места соединения за счет вытеснения примесей при зонной перекристаллизации перед сваркой проводить воздействие элек-

Таблица 8. Параметры ЭЛС особо чистого ниобия (литературные данные)

S , мм	Параметры режима ЭЛС				Источник
	$U_{\text{уск}}$, кВ	$I_{\text{св}}$, мА	$V_{\text{св}}$, см/мин	E_i , Вт·мин/см	
1,5	50	35	45	38,9	[35]
1,6	50	30	45	33,3	[36]
1,6	50	22	30	36,7	
1,6	50	37	46	40,2	[37]
1,7	150	13	36	43,3	[38]
2	50	46	30	76,7	[39]
2	120	19	30	76	[40]
2	60	40	30	80	
2,75	50	53	25	106	[41]
3	50	43	15	143,3	[42]

тронным лучом с меньшей энергией, чем при сварке. Так, используемые в работе энергетические параметры луча ($U_{\text{уск}} = 150$ кВ, $I_{\text{св}} = 7$ мА, $V_{\text{св}} = 36$ см/мин) позволили получить проплавление материала толщиной 1,7 мм на $\sim 50\%$, при этом E_i составляла 29,2 Вт·мин/см. Предварительный подогрев позволил несколько уменьшить количество вводимой при основном проходе энергии, однако полученные исследователями значения параметров режима ЭЛС, необходимого для полного проплавления материала толщиной 1,7 мм, не выпадают из общей тенденции. Зависимость вводимой погонной энергии E_i от толщины свариваемого материала S приведена на рис. 31.

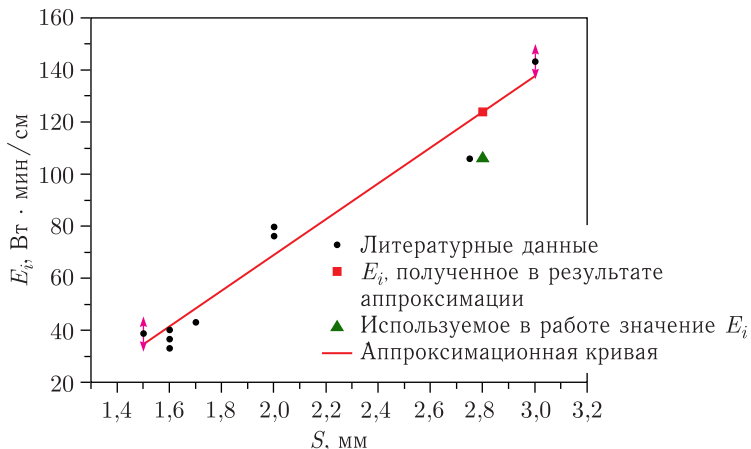


Рис. 31. Значение погонной энергии сварки, используемой для ЭЛС листового ниобия (составлено по данным табл. 8)

Аппроксимация литературных данных (рис. 31) для металла толщиной $S = 2,8$ мм дала значение $E_i \approx 124$ Вт·мин/см. Проведенная в последующем серия экспериментов для уменьшения зоны термического влияния позволила снизить E_i до 106 Вт·мин/см. Такая величина вводимой погонной энергии обеспечивалась при следующих режимах ЭЛС: ускоряющее напряжение 60 кВ, ток сварки 53–55 мА, скорость сварки 7–10 мм/с. Это давало возможность получения сварного шва шириной 4–5 мм у входа луча, 3–4 мм — у корня шва и провисание сварочной ванны 0,5 мм.

Изучение сверхпроводящих характеристик сварного соединения проводилось на трех сериях образцов: контрольных (серия 0, вырезались из материала, не подвергавшегося термическому воздействию),

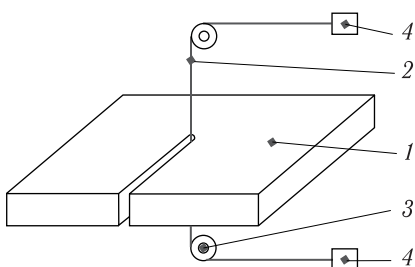


Рис. 32. Схема электроэрозионной проволоочной резки образцов: 1 — обрабатываемая заготовка; 2 — проволока; 3 — направляющие ролики; 4 — устройство для регулирования скорости натяжения проволоки

проплавленных электронным лучом на всю толщину сплошных пластин перпендикулярно их длинной стороне (серия 1) и двух сваренных посредством ЭЛС пластин (серия 2). Образцы вырезались с помощью электроэрозионной проволоочной резки (рис. 32) из частей листов листового ниобия, которые отрубались при помощи гильотины. Для обеспечения сверхпроводящего перехода между свариваемыми компонентами должны быть получены сварные соединения с полным проплавлением, отсутствием любых геометрических дефектов (пор, брызг металла, подрезов, наплывов и пр.) и соотношением ширины сварного шва к толщине металла порядка 1,5–2. Для фиксации взаимного расположения свариваемых частей образца использовалась специальная оснастка. Перед сваркой с образцов стравливался поверхностный слой толщиной 40 мкм для удаления возможных дефектов и загрязнений, привнесенных во время обработки свариваемых кромок. Для травления использовался состав смеси кислот HF (38%), HNO₃ (65%), H₃PO₄ (85%) в соотношении компонентов (по массе) 1:1:2, температура смеси поддерживалась в пределах 10–12 °С (емкость со смесью кислот и образцами помещалась в контейнер с проточной водой и льдом), время обработки составляло 40 мин [34].

Схематическое изображение и фотографии образцов представлены на рис. 33.

Оптическое изображение поверхности сварного соединения (рис. 34, а), полученного с помощью ЭЛС двух пластин ниобия, свидетельствует, что зона термического воздействия составляет ~10 мм

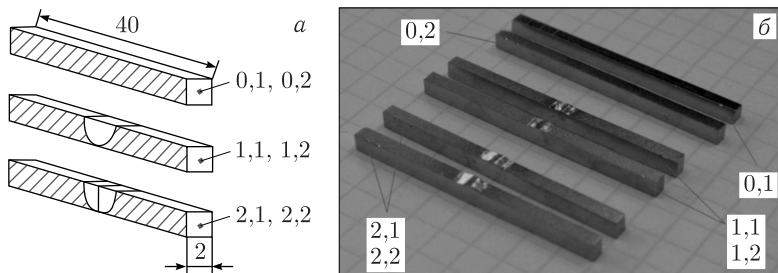


Рис. 33. Образцы для изучения сверхпроводящих характеристик: а) схематическое изображение; б) общий вид

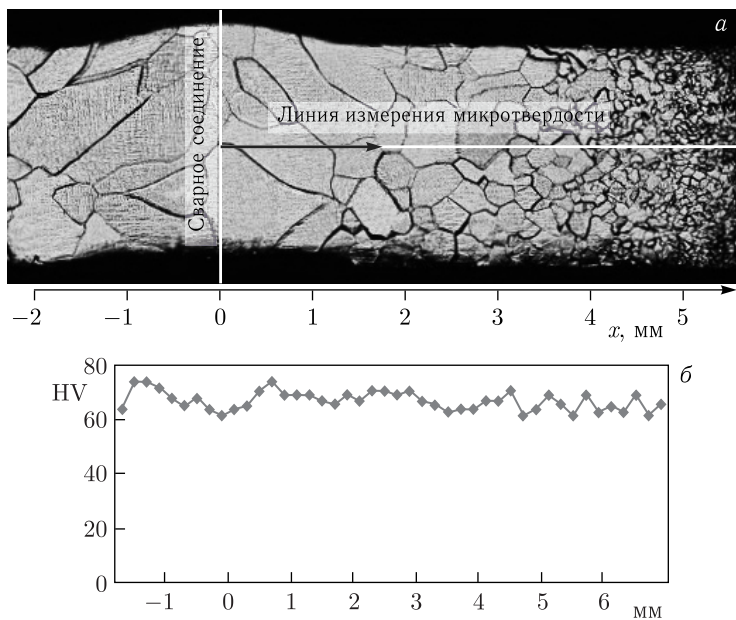


Рис. 34. а) Структура сварного соединения ЭЛС образца из ниобия в поперечном сечении; б) распределение микротвердости в соединении

и в ней наблюдается интенсивный рост зерна: 30–50 мкм в области, не подвергавшейся термическому воздействию (расстояние более 5 мм ортогонально шву), 100–200 мкм в зоне термического влияния (от 2 до 5 мм), до 1000 мкм в сварном шве (до 2 мм).

Измерение микротвердости сварных соединений проводилось на микротвердометре ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1 2007 «Измерение твердости по Виккерсу». Испытание заключается в нанесении на поверхность образца отпечатка под действием статической нагрузки, при-

ложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени. После удаления нагрузки измеряются параметры полученного отпечатка. Твердость по Виккерсу пропорциональна частному от деления нагрузки на площадь боковой поверхности отпечатка. В качестве наконечника используется алмазная правильная четырехгранная пирамида с углом 136° между противоположными гранями при вершине. Нагрузка составляла 100 г, время приложения 10 с. Анализ изменения микротвердости вдоль заданной линии не выявил существенных изменений твердости сварного соединения по отношению к не подвергавшемуся термическому воздействию металлу (рис. 34, б). Значения микротвердости в области, не подвергавшейся термическому воздействию, и в зоне термического воздействия находятся в пределах HV 60–70, для металла сварного шва — HV 60–75. Для сплошной пластины после воздействия электронным лучом до полного проплавления полученное распределение микротвердости имеет аналогичный характер. Подобные значения распределения микротвердости в сварном соединении были получены в работе [38] для листового ниобия толщиной 2 мм производства фирмы Tokyo Denkai (Япония) — колебания значений микротвердости металла сварного шва и основного металла находится в пределах HV 5–10.

Изучение критических сверхпроводящих характеристик всех образцов проводилось при измерении их резистивных характеристик, в том числе в магнитном поле. Для этого на поверхность ниобиевых образцов посредством ультразвуковой пайки индием наносились токовые и потенциальные контактные площадки размером $\sim 1 \text{ мм}^2$, к которым подводились медные электроды. Схема расположения контактов представлена на рис. 35. Такой способ подведения электродов обеспечивал механически прочный и омический контакт с образцом даже в условиях термоциклирования в интервале температур 4–300 К и при воздействии магнитного поля.

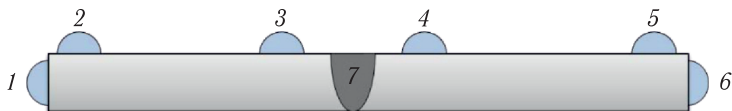


Рис. 35. Схема расположения контактов для изучения сверхпроводящих характеристик образцов: 1, 6 — токовые электроды; 2–5 — потенциальные контакты; 3, 4 — потенциальные контакты в области проплавки и сварного соединения; 7 — зона проплавления или сварного соединения

Измерение электрофизических характеристик в широком интервале значений температуры и магнитного поля проводилось на резистивной вставке универсальной измерительной системы Liquid Helium Free High Field Measurement System фирмы Cryogenic Ltd, содержащей криостат замкнутого цикла, представляющий собой вакуумную камеру, в которой находятся вставка с образцом и сверхпроводящий магнит соленоидально-го типа (рис. 36). Поле устанавливалось и стабилизировалось при помощи

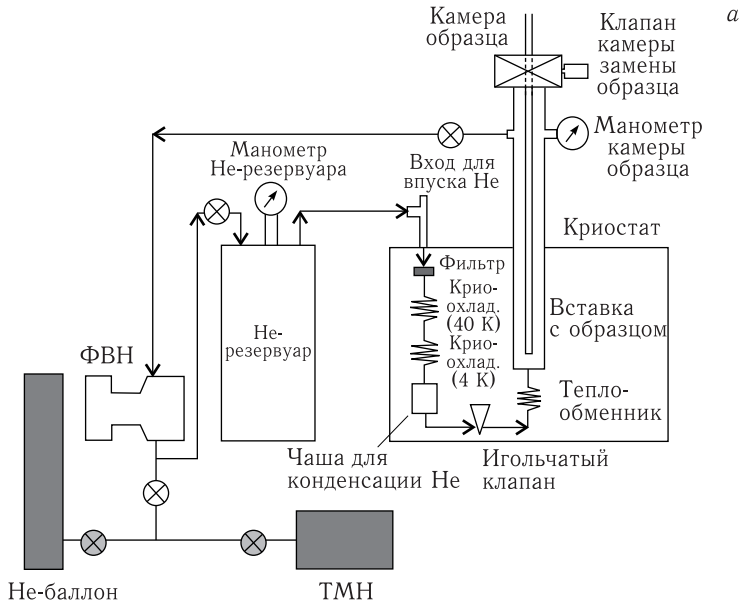


Рис. 36. Схема установки Liquid Helium Free High Field Measurement System для проведения электрофизических испытаний в интервале температур 4–300 К в поперечных магнитных полях до 14 Тл (а) и ее вид (б)

откалиброванного источника тока Cryogenic Power Supply с точностью до 10 мТл.

Охлаждение образцов проводилось при подаче гелия через игольчатый клапан в измерительную ячейку держателя. Для регулировки и стабилизации необходимой температуры использовались 2 нагревателя, один из которых располагался непосредственно в измерительной ячейке вблизи образца, а второй — в теплообменнике, находящемся между игольчатым клапаном и держателем. Температура контролировалась полупроводниковым GaAlAs-датчиком фирмы Lake Shore Cryogenics, имеющим стабильность ± 5 мК и калиброванным с точностью не хуже ± 15 мК при $T < 20$ К, ± 50 мК в интервале температур $T = 20\text{--}50$ К и ± 110 мК до температур $T = 310$ К. Эти калибровки выполнены с учетом индукции магнитного поля во всем диапазоне его изменения.

При проведении измерений постоянный ток на образец подавался при помощи измерительно-питающего устройства Keithley 2400, которое объединяет в каждом канале функции программируемого источника тока, цифрового амперметра и программируемой активной нагрузки. Оно обеспечивало возможность задавать токи от 1 нА с погрешностью 0,5% при максимальной выходной мощности 100 Вт. Для регистрации значений падения напряжения применялся электронный нановольтметр Keithley 2182A с высоким входным сопротивлением $R_{\text{вх}} > 20$ ГОм, позволяющий измерять напряжение от 1 нВ с погрешностью 0,5%.

Измерения электросопротивления в температурном интервале 4–300 К проводились четырехзондовым методом в режиме постоянного тока с коммутацией его направления для исключения влияния асимметричности контактного сопротивления и паразитных термо-ЭДС. Величина тока составляла $I = 0,2$ А. Температурные зависимости $R(T)$ исследовались в режиме непрерывного охлаждения со скоростью 1 К/мин, достаточной для того, чтобы отклонение температуры от задаваемой в момент измерения не превышало 0,1 К. Критические магнитные поля изучались при B до ± 2 Тл (шаг 0,05 Тл), ориентированном параллельно поверхности структуры и, соответственно, направлению тока при $T = 4,2$ К с термостатированием в течение получаса перед началом измерений. Перечень образцов и план проведения их испытаний приведены в табл. 9.

На рис. 37, а приведены характерные температурные зависимости электросопротивления в интервале 4–300 К для образцов всех серий. В области температур 40–300 К, где сопротивление определяется в основном рассеянием электронов на тепловых колебаниях атомов кристаллической решетки и на нарушающих периодичность потенциального поля кристалла статических дефектах структуры (например, примеси или межзеренные границы), наблюдается линейное уменьшение R с понижением температуры. Характерной особенностью зависимостей $R(T)$ в этой области температур является то, что электросопротивление материала проплавленных сплошных пластин несколько ниже, чем у контрольных

Таблица 9. Перечень и план проведения испытаний образцов, не подвергавшихся термическому воздействию (0.1, 0.2), проплавленных сплошных пластин (1.1, 1.2) и сварного соединения двух пластин (2.1, 2.2)

Номер образца	Измеряемая характеристика	Параметры измерений
0.1	$R(T)$	$T = 4-300$ К, $I = 0,2$ А, $B = 0$, $T = 2-12$ К, $I = 0,2$ А
	$R(B)$	$B = 0-2$ Тл, $T = 4$ К, $I = 0,2$ А, шаг 0,05 Тл
0.2	$R(T)$	$T = 4-300$ К, $I = 0,2$ А, $B = 0$, $T = 2-12$ К, $I = 0,2$ А
	$R(B)$	$B = 0-2$ Тл, $T = 4$ К, $I = 0,2$ А, шаг 0,05 Тл
1.1	$R(T)$	$T = 4-300$ К, $I = 0,2$ А, $B = 0$, $T = 2-12$ К, $I = 0,2$ А
	$R(B)$	$B = 0-2$ Тл, $T = 4$ К, $I = 0,2$ А, шаг 0,05 Тл
1.2	$R(T)$	$T = 4-300$ К, $I = 0,2$ А, $B = 0$, $T = 2-12$ К, $I = 0,2$ А
	$R(B)$	$B = 0-2$ Тл, $T = 4$ К, $I = 0,2$ А, шаг 0,05 Тл
2.1	$R(T)$	$T = 4-300$ К, $I = 0,2$ А, $T = 2-12$ К, $I = 0,2$ А
	$R(B)$	$B = 0-2$ Тл, $T = 4$ К, $I = 0,2$ А, шаг 0,05 Тл
2.2	$R(T)$	$T = 4-300$ К, $I = 0,2$ А, $B = 0$, $T = 2-12$ К, $I = 0,2$ А
	$R(B)$	$B = 0-2$ Тл, $T = 4$ К, $I = 0,2$ А, шаг 0,05 Тл

образцов, что может быть связано с увеличением размера зерен металла при тепловой обработке, а соответственно, с уменьшением их вклада в механизмы рассеяния носителей заряда.

В интервале температур ниже 40 К вплоть до температуры сверхпроводящего перехода (~ 9 К) зависимости $R(T)$ имеют степенной характер (закон Блоха–Грюнрайзера [43]) с минимальным различием в электросопротивлении образцов различных серий (вставка на рис. 37, а). Малое различие сопротивления образцов из различных серий является следствием того, что при данных температурах основной вклад в R вносится за счет малоуглового рассеяния электронов проводимости на длинноволновых фононах.

Для обеспечения высокой точности измерения критических параметров сверхпроводящего перехода дополнительно проводилось изучение $R(T)$ в области температур сверхпроводящего перехода (в интервале 2–11 К, рис. 37, б). Анализ зависимости позволил определить температуру окончания сверхпроводящего перехода $T_C \approx 8,8$ К и его ширину $\Delta T_C \approx 0,55-0,6$ К для образцов ниобия в исходном состоянии, не подвергавшихся термическому воздействию. Результаты измерения магни-

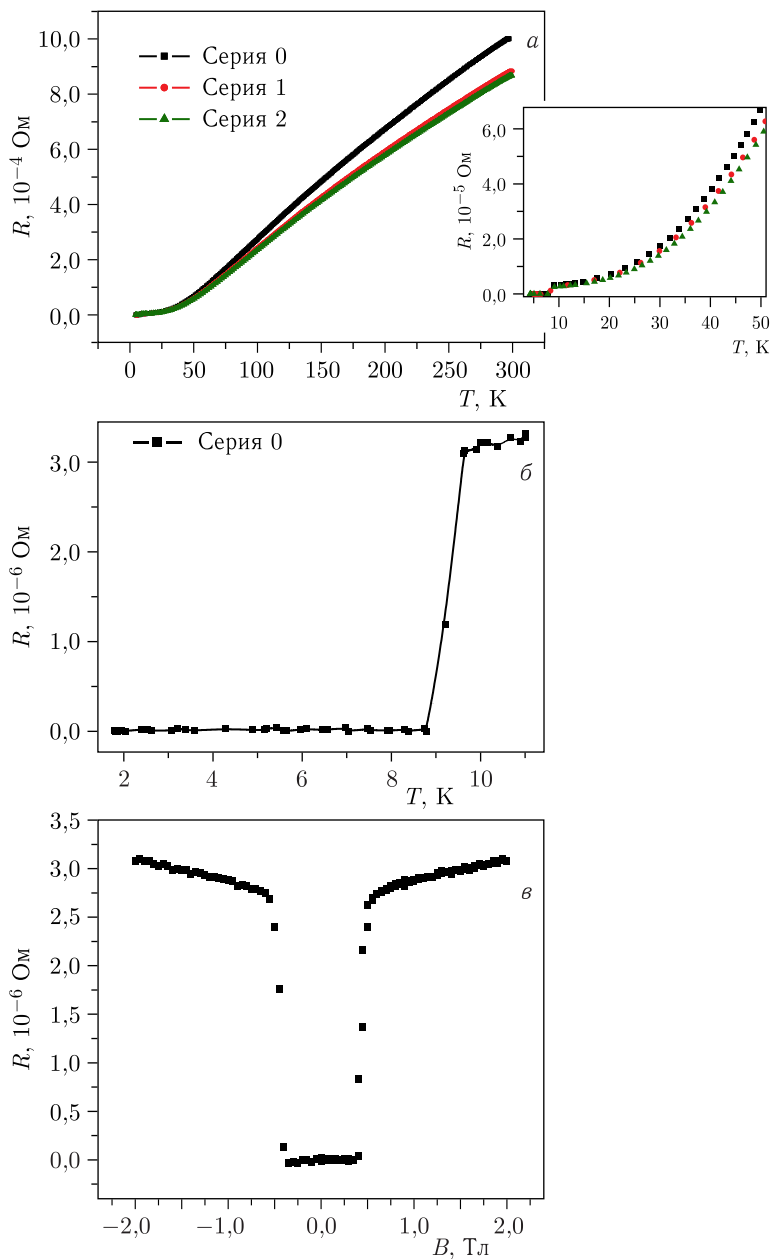


Рис. 37. Температурные зависимости электросопротивления контрольных образцов (серия 0) на контактах 2–5 в интервале температур 4–300 К (а), 2–11 К (б), магнитолевые зависимости электросопротивления (в)

тополовых зависимостей сопротивления $R(B)$ при $T = 4,2$ К (рис. 37, *в*) позволили определить влияние магнитного поля на критические характеристики сверхпроводника и установить величину магнитного поля, при котором металл переходит в нормальное состояние ($B_C \approx 0,5$ Тл) при гелиевой температуре, а также ширину данного перехода ($\Delta B_C \approx 0,15$ Тл).

Аналогичные измерения для образцов, проплавленных электронным лучом поперек пластины (серия 1), показали, что зависимости $R(T)$, измеренные на различных парах потенциальных контактов, имеют схожий характер (рис. 38, *а*). Идентичность критических сверхпроводящих параметров ($T_C \approx 8,6$ К, $\Delta T_C \approx 0,7$ К) свидетельствует, что проплавление электронным лучом не вносит ощутимых изменений в изучаемые характеристики ниобиевых образцов, приводя лишь к небольшому

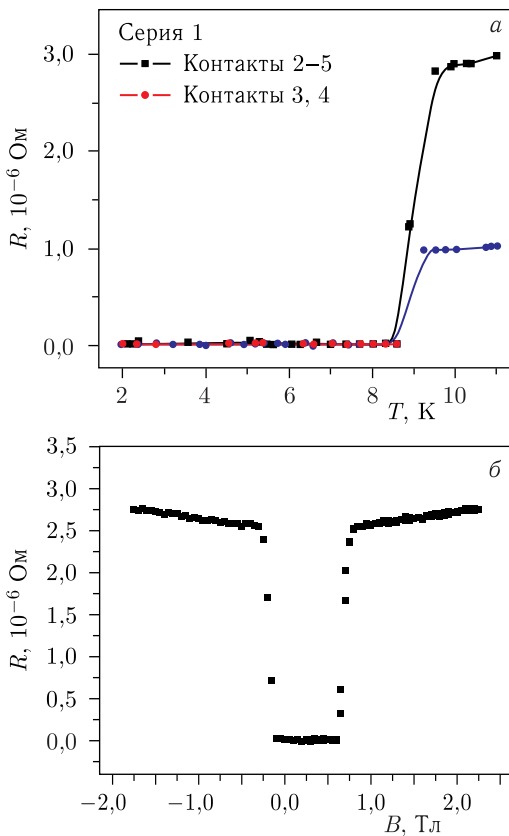


Рис. 38. *а*) Температурные зависимости электросопротивления проплавленных образцов (серия 1) на контактах 2–5 и 3, 4 (см. рис. 35); *б*) магнитополевые зависимости электросопротивления на контактах 2–5

понижению температуры окончания сверхпроводящего перехода и увеличению его ширины по отношению к контрольным образцам. Незначительное ухудшение характеристик имеет место также и в магнитных полях: критические значения B_C уменьшаются до 0,4 Тл, а ширина перехода ΔB_C возрастает до 0,25 Тл (рис. 38, б). Ухудшение критических сверхпроводящих свойств образцов, проплавленных электронным лучом, естественно, так как в области термообработки металл становится более дефектным за счет концентрации примесных элементов в зоне проплава.

На рис. 39 приведены результаты исследований образцов, представляющих собой неразъемное соединение двух пластин, полученное методом ЭЛС. Значения температуры перехода T_C как до зоны сварки отдельных частей, так и после нее соответствуют проплавленным образцам (рис. 38). Аналогичная ситуация имеет место и для критического магнитного поля B_C и ширины перехода этих образцов в магнитном поле.

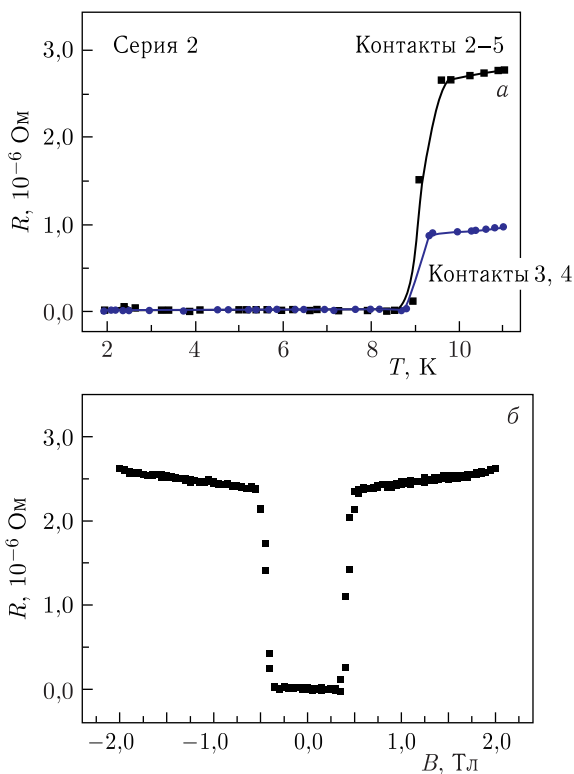


Рис. 39. а) Температурные зависимости электросопротивления сваренных образцов (серия 2) на контактах 2–5 и 3, 4 (см. рис. 35); б) магнитополевые зависимости электросопротивления на контактах 2–5

Идентичность электрофизических характеристик проплавленных и сваренных образцов свидетельствует о том, что сверхпроводящие свойства ниобиевых образцов зависят от условий термического воздействия, которое изменяет микроструктуру (в частности, приводит к увеличению размера зерен), и не зависят от параметров ЭЛС. Для большей наглядности сравнительные характеристики контрольного, проплавленного и сваренного образцов приведены в табл. 10.

Таблица 10. Критические характеристики сверхпроводящего перехода (температура окончания сверхпроводящего перехода (T_C), ширина температурного перехода (ΔT_C), критическое магнитное поле сверхпроводника (B_C), ширина магнитного перехода (ΔB_C)) образцов, не подвергавшихся термическому воздействию (серия 0), после проплавления пластины лучом (серия 1) и сварного соединения двух пластин (серия 2)

Параметр	Образец		
	Серия 0	Серия 1	Серия 2
T_C , К	~ 8,8	~ 8,6	~ 8,6
ΔT_C , К	~ 0,55–0,6	~ 0,65–0,7	~ 0,65–0,7
B_C , Тл	~ 0,5	~ 0,4	~ 0,4
ΔB_C , Тл	~ 0,15	~ 0,2–0,25	~ 0,2–0,25

Показано, что при выбранных режимах электронно-лучевой сварки особо чистого листового ниобия толщиной 2,8 мм (ускоряющее напряжение 60 кВ, ток сварки 53 мА, скорость сварки 10 мм/с, остаточное давление $5 \cdot 10^{-3}$ Па) полная зона термического воздействия, составляющая ~ 10 мкм, превосходит в 2,5 раза ширину зоны проплавления. Наблюдается увеличение среднего размера поликристаллического зерна от 30–50 мкм на границе зоны термического воздействия до 1000 мкм в зоне проплавления. Увеличение размеров зерен приводит к уменьшению электросопротивления ниобия в интервале температур 40–300 К, связанному с уменьшением электронного рассеяния на межзеренных границах. При температурах ниже 40 К это различие нивелируется, так как в этой области температур до сверхпроводящего перехода доминирует малоугловое рассеяние электронов проводимости на длинноволновых фононах.

Проведенные исследования критических параметров сверхпроводящего ниобия свидетельствуют о незначительном ухудшении сверхпроводящих свойств листового ниобия производства фирмы Ningxia при термической обработке. Ухудшение сверхпроводящих свойств проплавленных и сваренных образцов по сравнению с образцами, не подвергавшимися термическому воздействию, обусловлено повышением концентрации примесных элементов в зоне проплавления при ЭЛС. Судя по полученным результатам, незначительное понижение критических сверхпроводящих параметров не окажет существенного влияния на СВЧ-свойства ниобиевых резонаторов.

3.2. Криогенное обеспечение СВЧ-испытаний сверхпроводящих резонаторов. Основным конструктивным элементом линейного ускорителя является СВЧ-резонатор с максимально возможной добротностью. Каскад таких резонаторов должен формировать ускорительные системы из материалов с высокой проводимостью, причем очевидно, что глубокое охлаждение резонирующих систем вплоть до температур жидкого гелия (4,2 К) является безальтернативным методом достижения высокой добротности. Ключевой момент здесь — использование сверхпроводящих материалов как основы для достижения максимальной добротности, исходя из физической природы самого явления сверхпроводимости [46, 47].

Низкотемпературные испытания являются важным аспектом реализации идеи создания высокодобротных резонаторов из сверхпроводящих материалов. Технические и методические трудности подобных исследований связаны с необходимостью проведения испытаний изделий натуральных размеров, что требует нетривиальных подходов к созданию системы криостатирования. В данном случае стандартные, хотя и многообразные виды криостатов для проведения физических исследований материалов в условиях глубокого холода неприемлемы, так как они рассчитаны на испытания образцов материалов малого размера. Задача заключается в том, чтобы «гелиевый» объем криостатирующей системы был достаточен не только для размещения модуля резонатора, но и для обеспечения его СВЧ-испытаний.

Хорошо известно, что очень малая величина скрытой теплоты испарения жидкого гелия (2,72 кДж/л) предполагает необходимость использования систем криостатирования, максимально изолирующих гелиевый сосуд от внешних теплопритоков. Естественно, универсального криостата «на все случаи жизни» не существует. Несмотря на большое конструктивное многообразие, большинство из них построены по одному принципу: ванна с жидким гелием, как правило, охлаждается жидким азотом или имеет теплоизолирующий экран, а наружная оболочка вакуумирована, и вакуум должен быть не хуже 10^{-3} Па [48].

Кроме того, сами криостаты должны иметь вспомогательный адсорбционный насос в вакуумной полости, который в процессе заливки охлаждается, и вакуум улучшается за счет поглощения оставшихся молекул воздуха. В качественно изготовленных криостатах теплопритоки через боковые стенки криостата минимальны.

Одним из основных условий успешного проведения экспериментов является сведение к минимуму различного рода причин, способствующих испарению жидкого гелия. Поэтому при конструировании криостата необходимо, по возможности, уменьшить теплоприток к тем элементам, которые охлаждаются до температуры 4,2 К. Основными источниками теплопритока в криостат к жидкому гелию являются [49]:

— тепло, переносимое за счет теплопроводности по проводам и входным трубкам;

- лучистый теплообмен между верхним фланцем криостата и поверхностью гелия;
- выделение джоулева тепла;
- тепло, переносимое остаточным газом между стенками криостата;
- механические вибрации.

Выбор системы криостатирования единичного модуля резонатора основывается на необходимости выполнения следующих обязательных требований:

- температура испытаний (4,2 К) определяется необходимостью поддержания сверхпроводимости модуля резонатора, так как критическая температура перехода ниобия в сверхпроводящее состояние не превышает 9 К;
- тип системы криостатирования — погружной, что определяется необходимостью создания однородного температурного режима охлаждения резонатора по всему объему;
- диаметр гелиевой ванны должен обеспечивать свободное размещение резонатора в ней (максимальный диаметр резонатора составляет 310 мм);
- глубина гелиевой ванны должна быть достаточной для поддержания резонатора в сверхпроводящем состоянии на все время проведения СВЧ-испытаний (высота резонатора без верхнего и нижнего фланцев составляет 400 мм);
- конструкция верхней части системы криостатирования, находящейся в «теплой» зоне, должна предусматривать возможность свободного размещения систем ввода и вывода СВЧ-излучения с обязательной теплоизоляцией от поверхности жидкого гелия с помощью экрана.

Из-за этих требований криостат должен представлять собой широкогорловый сосуд. А это значит, что в условиях хранения жидкого гелия в таком криостате максимальный теплоприток будет связан с лучистым теплообменом между фланцем (капкой) криостата и поверхностью гелия. В этих условиях остальными факторами можно пренебречь. Несложный расчет тепла лучистого теплообмена для такой системы дает значение 0,4 Вт. Учитывая, что теплота испарения жидкого гелия равна 20,9 Дж/г, находим, что скорость испарения составляет 69,9 г/ч или 0,57 л/ч.

С учетом приведенных выше условий криостатирования, необходимых для СВЧ-испытаний единичного модуля сверхпроводящего ниобиевого резонатора, изготовлена система криостатирования, маркированная как СК-70.

Она представляет собой широкогорловый гелиевый сосуд с экраном, охлаждаемым парами испаряющегося гелия, погруженный в азотный дьюар таким образом, что вакуумный кожух гелиевого сосуда является экраном, охлаждаемым жидким азотом. Сам азотный сосуд имеет вакуумно-многослойную изоляцию. На рис. 40 схематически, без детализации показана конструкция криостата СК-70.

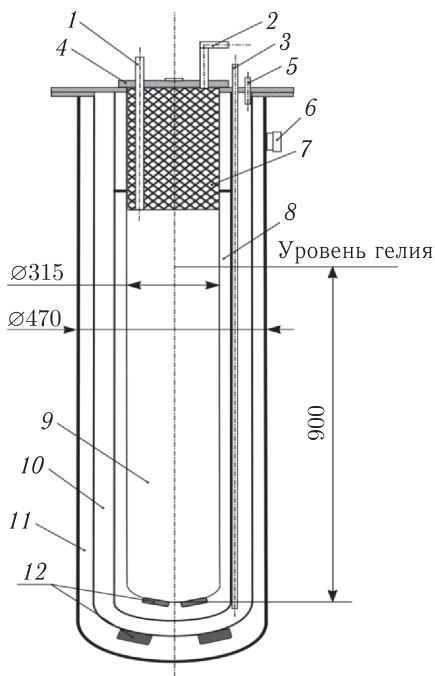


Рис. 40. Конструкция криостата СК-70: 1 — канал заливки жидкого гелия; 2 — канал выхода испаряющегося гелия; 3 — канал заливки жидкого азота; 4 — верхний фланец криостата; 5 — канал выхода испаряющегося азота; 6 — вакуумный клапан; 7 — теплоизолирующий экран; 8 — вакуумная полость гелиевого сосуда; 9 — сосуд с жидким гелием; 10 — сосуд с жидким азотом; 11 — вакуумная полость азотного сосуда; 12 — камеры адсорбента

Основные технические характеристики криостата:

- тип системы криогенного охлаждения погружной;
- объем гелиевого сосуда не менее 70 л;
- объем азотного сосуда не менее 25 л;
- расчетная испаряемость жидкого гелия не более 0,7 л/ч;
- расчетная испаряемость жидкого азота не более 1,5 л/ч;
- диаметр гелиевого сосуда 315 мм;
- высота гелиевой ванны 900 мм.

Для уменьшения теплопритока к жидкому гелию за счет излучения и конвекции в газовой полости сосуда установлена пенополиуретановая пробка, охлаждаемая азотом за счет контакта с горловиной. Это обеспечивает возможность поддержания в газовой полости температуры порядка 80–85 К независимо от уровня жидкого азота.

На верхнем фланце (капке) криостата размещены штуцеры заливки жидкого гелия, выхода испаряющегося газообразного гелия, а также заливки жидкого азота и выхода паров азота. Клапан для вакуумирования изоляционного пространства азотного сосуда установлен на боковой стенке кожуха криостата.

Данные об испаряемости жидких хладагентов из криостатирующей системы будут уточнены после ее испытаний. Очевидно, что в процессе проведения СВЧ-испытаний сверхпроводящего резонатора испаряемость

гелия значительно возрастет и будет определяться подводимой от генератора к резонатору СВЧ-мощностью. В принципе измерение резонансной кривой и определение добротности резонатора не является долговременным процессом, и даже при максимальных подводимых мощностях объема хладагента должно быть достаточно без дополнительной подливки жидкого гелия.

Таким образом, в соответствии с выбранными характеристиками изготовлена система криостатирования, позволяющая проводить низкотемпературные испытания единичного модуля резонатора. Длительность испытаний одного модуля и расход хладагента будут определяться подводимой от генератора к резонатору СВЧ-мощностью.

На основе принципов охлаждения при температуре жидкого гелия одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора определены конструктивные и геометрические особенности метода криостатирования, основанные на системе погружного типа, которые позволили задать основные характеристики криостатирующей системы для проведения испытаний резонатора заданной геометрии и размера. После проведения первых СВЧ-испытаний резонаторов, скорее всего, потребуется определенная модификация системы криостатирования.

Необходимость проведения СВЧ-измерений резонаторов, изготовленных из несверхпроводящих металлов (алюминия, меди), потребовала модернизации гелиевого криостата. Это обусловлено тем, что при испытании таких резонаторов выделение тепловой энергии, а значит, и расход жидкого гелия значительно увеличатся по сравнению с ниобиевым сверхпроводящим резонатором.

При большом расходе жидкого гелия недостаточно знать испаряемость жидкости (ранее это определялось по тягонапорометру). Необходим постоянный контроль уровня гелия в криостате. Для этого на верхнем фланце криостата смонтирован уровнемер, действующий по принципу гагсометра, т. е. определяется разность давлений в верхней и нижней точках гелиевой ванны (рис. 41). Его градуировка показала, что уровень жидкого гелия будет регистрироваться с точностью до 2 л.

Для исключения возможности поступления воздуха в гелиевую ванну и регулировки давления в криостате на штуцере газосброса испаряющегося гелия был смонтирован шаровой вентиль, позволяющий регулировать давление паров гелия от 0 до 0,3 бар (рис. 42).

Предварительные испытания металлических резонаторов из алюминия и меди показали, что над его верхним фланцем остается более чем достаточный объем гелиевой ванны для проведения длительных СВЧ-измерений. В связи с этим целесообразно было увеличить толщину пенополиуретановой теплоизолирующей пробки в газовой полости криостата, охлаждаемой жидким азотом, на 15% и соответственно уменьшить теплоприток из внешней среды в гелиевую ванну за счет излучения и конвекции. Для повышения вакуума и предварительного охлаждения гелиевого сосуда, как обычно, проводилась заливка жидкого

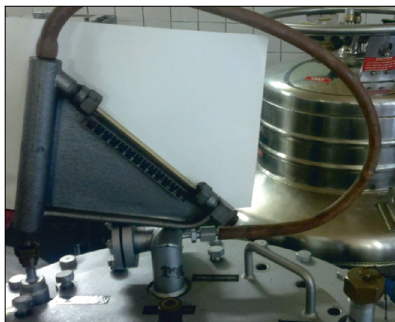


Рис. 41. Гапсометр на верхнем фланце криостата



Рис. 42. Шаровой вентиль для регулировки давления паров гелия от 0 до 0,3 бар в криостате

азота в соответствующую полость криостата. После 4-часовой выдержки проведена заливка жидкого гелия в криостат. Расход гелия на охлаждение гелиевой ванны до начала конденсации жидкости составил около 50 л, а общее количество с учетом заполнения криостата — 110 л. Расход жидкого гелия определялся по уровнемеру (гапсометру) и составил примерно 0,7 л/ч, что характерно для системы криостатирования, когда она находится в «закрытом» состоянии, т. е. в гелиевом объеме отсутствуют объекты исследования и внешние теплопритоки определяются лишь конструктивными особенностями криостата.

При выборе схемы ввода СВЧ-мощности в гелиевую область криостата и определении конструкции резонатора основными критериями являлись герметичность и минимизация теплопритока из внешней среды в гелиевую ванну.

Ввод СВЧ-мощности к резонатору осуществляется через центральное отверстие в верхнем фланце криостата. Линия подвода к верхнему фланцу резонатора, на котором расположен коаксиальный разъем (рис. 43), должна проходить через изолирующую пробку в верхней части криостата, минимизирующую теплоприток из теплой зоны. Для этого в отверстии пробки монтируется тонкостенная трубка из нержавеющей стали, закрепляемая на малом фланце криостата после монтажа коаксиального кабеля (рис. 44). На трубке, выходящей из нижней



Рис. 43. Линия ввода СВЧ-мощности через верхний фланец криостата



Рис. 44. Изолирующая пробка в верхней части криостата для минимизации теплопритока из теплой зоны

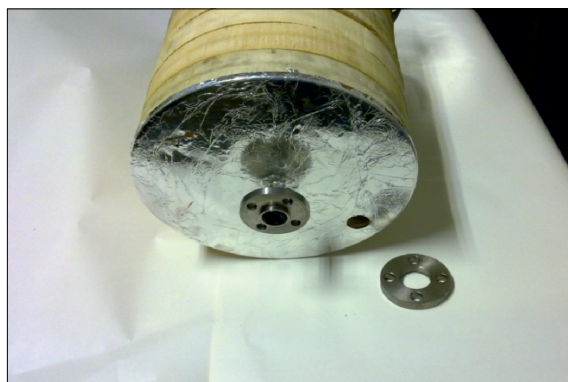


Рис. 45. Область подвеса резонатора к нижней части теплоизолирующей пробки

части теплоизолирующей пробки в гелиевую ванну, крепится фланец, необходимый для последующего подвеса резонатора (рис. 45). Его диаметр и положение отверстий соответствуют размерам фланца резонатора.

Для придания жесткости конструкции подвес резонатора осуществляется с помощью трех стержней (шпилек) из нержавеющей стали диаметром 8 мм. Их соединение с нижним фланцем криостата и верхним фланцем резонатора является резьбовым (M8), для чего в головках 3 болтов фланцев высверлены соответствующие резьбовые отверстия (рис. 46). Такой способ крепления обеспечивает не только жесткость конструкции, но и возможность регулировать высоту подвеса резонатора относительно дна гелиевой ванны и выдерживать вертикальность и соосность подвеса. При максимальном погружении резонатора его нижний фланец находится на расстоянии 3 см от дна гелиевой ванны, что позволяет максимально повысить эффективную высоту столба жидкого гелия над резонатором при испытаниях.

На рис. 47 показана конструкция в сборе.



Рис. 46. Крепление резонатора к съемному фланцу криостата

Гелиевая криостатирующая система СК-70 с помещенным в гелиевую ванну сверхпроводящим резонатором представляет собой «квазизакрытую» систему криостатирования, т. е. в гелиевом объеме находится объект испытаний, повышающий теплоприток, но к нему не подводится мощность извне (до проведения полномасштабных испытаний).

Для повышения вакуума и предварительного охлаждения гелиевого сосуда производится заливка жидкого азота в соответствующую полость криостата. После 4-часовой выдержки в криостат с размещенным в нем резонатором заливается жидкий гелий. Расход гелия на охлаждение гелиевой ванны и резонатора до начала конденсации жидкости составил около 100 л, а общее количество с учетом заполнения криостата — 160 л.

Испаряемость жидкого гелия определена по тягонапоромеру и измерению объема собранного газообразного гелия в единицу времени. Она составила примерно 1,2 л/ч, что на 40–50 % превышает испаряемость, когда криостат находится в «закрытом» состоянии, т. е. в гелиевом объеме отсутствуют объекты исследования и внешние теплопритоки определяются лишь конструктивными особенностями криостата.

Таким образом, при выборе схемы ввода СВЧ-мощности в гелиевую область криостата и определении конструкции крепления резонатора основными критериями являлись герметичность системы, минимизация теплопритока из внешней среды и жесткость крепления резонатора. Полученные значения испаряемости жидкого гелия в условиях, когда



Рис. 47. Конструкция в сборе перед помещением в криостат

криостатирующая система находится в «квазизакрытом» состоянии, свидетельствуют о ее пригодности и временной достаточности для проведения СВЧ-измерений сверхпроводящего модуля резонатора.

4. СВЧ-ПАРАМЕТРЫ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ TESLA-ТИПА ДЛЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Ключевым элементом электронного линейного коллайдера — ускорителя заряженных частиц высокочастотным электромагнитным полем — являются СВЧ ускорительные секции из цепочек высокодобротных сверхпроводящих резонаторов. Электромагнитная волна подается в резонаторы от мощного генератора СВЧ на резонансной частоте и возбуждает в каждом из них колебания большой амплитуды (энергии). Параметры накачки пучка частиц энергией поля подобраны так, что заряженные частицы пролетают каждый резонатор в промежуток времени, когда электрическое поле в нем имеет ускоряющую фазу электрической компоненты поля E_z . Пролетая в таком ускоряющем поле по оси очередного резонатора в течение отрезка времени, пока ускоряющая фаза не сменится тормозящей, пучок частиц каждый раз получает дополнительную порцию кинетической энергии и, таким образом, постепенно ускоряется до скорости, близкой к скорости света (рис. 48).

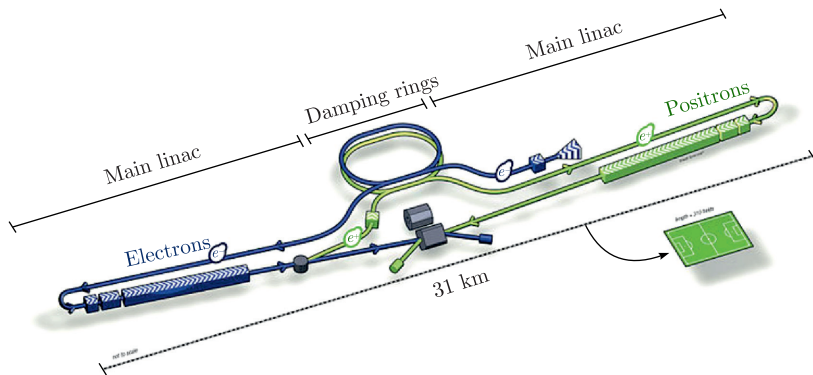


Рис. 48. Схема линейного коллайдера (первая фаза: $L = 31$ км, $E = 500$ ГэВ)

Различные модификации высокодобротных сверхпроводящих резонаторов разработаны в лаборатории FNAL (США). Глубокое охлаждение резонирующих систем вплоть до температур жидкого гелия является безальтернативным методом достижения высокой добротности. Как низкотемпературные испытания при температуре 4,2 К, так и испытания при нормальных условиях (293 К) являются важным аспектом реализации идеи создания высокодобротных резонаторов из сверхпроводящих материалов. Технические и методические трудности подобных исследований связаны с необходимостью проведения испытаний изделий натуральных размеров, что требует нетривиальных подходов к созданию системы способа ввода и вывода СВЧ-мощности. Резонансная система перспективного коллайдера, изготавливаемая из сверхпроводящих материалов, должна подвергаться контролю и диагностике в процессе производства. При этом добротность каждого резонатора должна быть не менее $Q = 10^9$, а резонансная частота $F_p = (1,3 \pm 10^9)$ Гц при температуре 4,2 К; соответствующие показатели при комнатной температуре $Q = 3 \cdot 10^4$, резонансная частота $F_p = (1,325 \pm 10^9)$ Гц [50–53].

Анализируя состояние фундаментальных и прикладных исследований измерения параметров сверхпроводящих резонаторов, необходимо отметить, что большинство разработок в этой области пока находится на уровне качественных экспериментальных исследований и еще не вышло за пределы исследований лабораторий [54–59].

4.1. Методика измерений и данные СВЧ-параметров резонатора, предоставленного лабораторией FNAL (США). Для измерения характеристик резонаторов существует набор методов, часть которых заимствована из традиционных методов измерения параметров высокодобротных резонаторов при комнатной температуре [60–62]. Как известно, непосредственные измерения контролируемых рабочих характеристик и параметров физических устройств являются предпочтительными,

поскольку учитывают влияние всех факторов геометрического, материального характера, внешних условий измерений. Это в полной мере касается и контроля (полного или выборочного) амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и добротности полых сверхпроводящих ниобиевых микроволновых резонаторов МЛК в процессе их массового производства. Поэтому разработка и совершенствование соответствующих методик измерений и автоматизированных измерительных комплексов (АИК) является весьма актуальной практической задачей для измерений сверхузкополосных АЧХ и, соответственно, сверхвысоких значений добротности ($\sim 10^{10}$).

Для отработки методики СВЧ-измерений Национальной ускорительной лабораторией им. Э. Ферми был любезно предоставлен ниобиевый резонатор с резонансной частотой 1,3 ГГц (рис. 49). Как видно на рисунке, резонатор имеет цилиндрические трубки дрейфа с обеих сторон. Насколько известно, добротность такой конструкции еще никогда не измерялась прямым СВЧ-методом. При этом есть три основные проблемы измерения как центральной частоты, так и добротности таких резонаторов. Во-первых, предоставленный резонатор не имел специального устройства для возбуждения СВЧ-колебаний в нем. Во-вторых, анализ рынка измерительной техники показал, что ни один стандартный ВЧ-измерительный прибор не позволяет проводить такие измерения с необходимой точностью из-за нестабильности частоты его частотной базы — для стабилизации частотной базы необходимо дополнительное оборудование. И, в-третьих, с самого начала было совершенно ясно, что проблему нельзя решить без применения обработки данных измерений

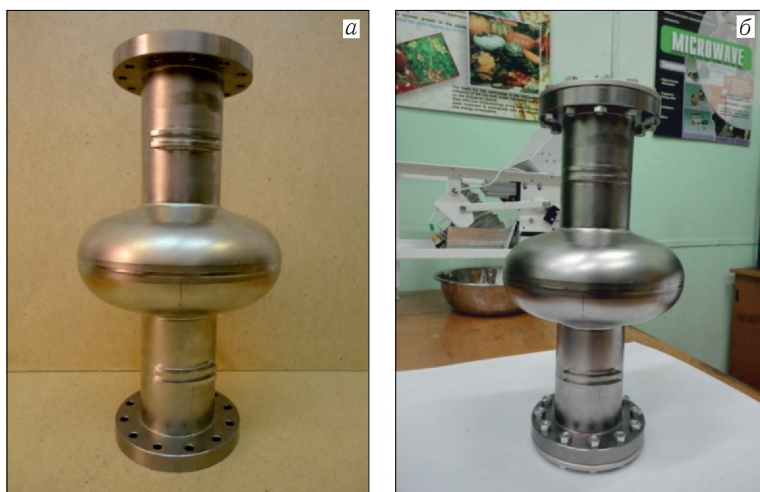


Рис. 49. Одноячеечный ниобиевый резонатор: а) без торцевых крышек; б) с торцевыми крышками

для фильтрации шума, который влияет на точность измерения амплитудно-частотных характеристик резонаторов.

Образец СВЧ-резонатора TESLA-типа, предоставленный лабораторией FNAL, моделирует одну стандартную ячейку высокодобротного 9-ячейечного резонатора и поэтому открыт с торцов. Для обеспечения измерений резонансной частоты и добротности данного образца требовалось закрыть резонатор торцевыми крышками, чтобы избежать потерь на излучение в окружающее пространство и обеспечить режим свободных колебаний. Для ввода/вывода измерительного высокочастотного сигнала в СВЧ-резонатор требовалось разработать устройство связи, предназначенное для возбуждения нужного (для эффективного ускорения заряженных элементарных частиц) типа колебания электромагнитного поля и одновременно обеспечивающее оптимальную величину связи для невозмущенного измерения резонансной частоты и добротности резонатора.

Изготовленные торцевые крышки для СВЧ-резонатора представляли собой круглые пластины из титана толщиной 8 мм с крепежными отверстиями для крепления крышек болтами к фланцам резонатора (на которых имеются ответные технологические отверстия для крепления); в одной из крышек имеется посадочное отверстие для монтажа и крепления устройства связи (рис. 50).

Расчет местоположения отверстия для монтажа и крепления устройства связи на крышке производился с учетом его типа и типа возбуждаемого колебания. Данный тип колебания обеспечивает осевое, вдоль направления ускорения элементарных частиц в линейном ускорителе, электрическое поле. При этом магнитное поле является азимутальным. Разработанное устройство ввода/вывода измерительного сигнала в СВЧ-резонатор (устройство связи) представляло собой токовую петлю, т. е. обеспечивало магнитную связь (по магнитной составляющей поля, рис. 51).

Для уменьшения силы связи и влияния устройства на истинные характеристики резонатора петля связи размещена на торцевой крышке со значительным смещением относительно центра крышки (оси резонатора). Магнитная связь со свободным полем в резонаторе создавалась



Рис. 50. Торцевые крышки

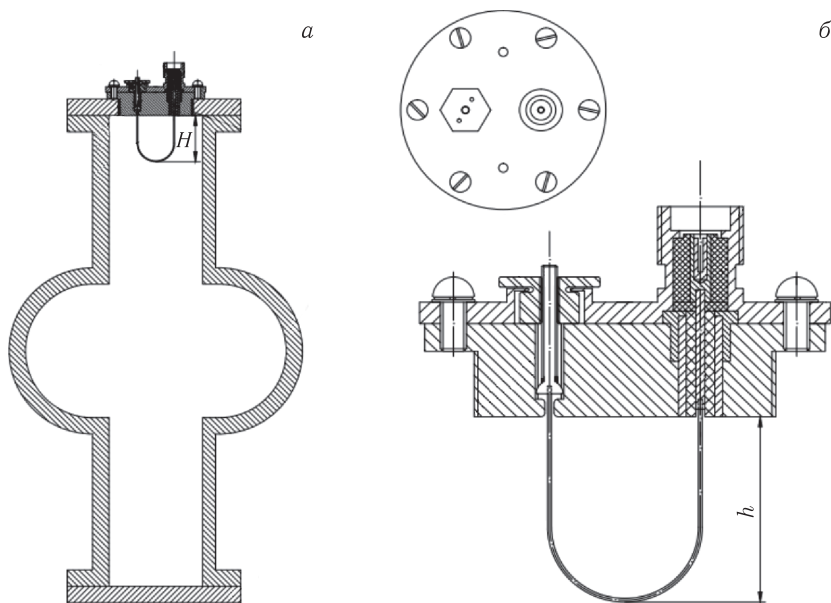


Рис. 51. а) Схема установки СВЧ согласующего устройства на верхней торцевой крышке резонансной полости; б) вращающаяся часть УВЧ согласующего устройства с механикой настройки длины петли через цилиндрическое отверстие в крышке

с помощью (плоского) витка проводника, введенного в резонатор так, чтобы плоскость витка была перпендикулярна линиям требуемого типа магнитного поля. Виток связи располагался в точке, соответствующей пучности магнитного поля в резонаторе. При этом величину связи можно регулировать глубиной введения витка в резонатор (изменением размера петли), а также поворотом плоскости витка при постоянной глубине его погружения. (Осуществить магнитную связь в чистом виде довольно трудно, так как электрические линии также замыкаются на виток и связь носит магнитно-электрический характер.) Сущность разработанного нами устройства связи заключается в том, что оно содержит радиочастотный коаксиальный разъем и петлю, изготовленную из металлического провода, первый конец которой соединен с центральным контактом разъема, а второй — с его корпусом. Этот конец крепится к вращающейся круглой металлической площадке, установленной в отверстии торцевой крышки полого цилиндрического резонатора. При этом металлическая площадка с закрепленным разъемом может поворачиваться в отверстии крышки резонатора на 360° вокруг своей оси, и дополнительно введено установленное на вращающейся площадке устройство регулировки высоты петли. Высота петли h выбиралась равной $\lambda/8$ (где λ — длина

волны электромагнитного СВЧ-колебания, соответствующая центральной частоте резонатора), она может изменяться на $\pm 10\%$ с помощью регулирующего устройства. Последнее состоит из вращающейся втулки, установленной на круглой вращающейся металлической площадке, и подвижного плунжера, головка которого соединена со вторым концом петли [63].

С помощью векторного анализатора цепей Agilent E5061B, работающего в частотном диапазоне от 0,1 МГц до 3,0 ГГц, были измерены S_{11} параметры контролируемых сверхпроводящих резонаторов с разработанным устройством связи при различных режимах настройки: 1) в режиме получения наибольшего значения добротности Q_n (вращения петли вокруг своей оси); 2) в режиме получения наибольшего значения добротности Q_n и оптимального согласования с линией передачи (вращения петли вокруг своей оси и изменения ее высоты h).

Как известно, добротность микроволнового резонатора типа TESLA — базового элемента ускорительной системы ИС — является ключевым фактором, определяющим энергию электрон-позитронных пучков на его выходе. В рабочем режиме ИС, т.е. при температурах жидкого гелия, добротность таких сверхпроводящих резонаторов, изготовленных из ниобия, достигает значений 10^{10} , что порождает проблему измерения сверхузкополосных АЧХ пропускания/поглощения энергии в них. Соответствующую информацию о характеристиках резонаторов TESLA-типа можно почерпнуть в [51]. Для резонаторов 1,3 ГГц это означает изменение полосы пропускания/поглощения порядка 1 Гц, что возможно при условии того, что разрешающая способность измерительного прибора по частоте составляет не менее 0,01 Гц. В свою очередь, такие значения добротности свидетельствуют о крайне низком уровне энергетических потерь в стенках резонаторов. Поэтому второй существенной проблемой является динамический диапазон измерений, который должен быть не менее 120–130 дБ. Третья проблема состоит в том, что комплект резонаторов должен характеризоваться высокой степенью идентичности их центральных частот. С точки зрения измерений последнее эквивалентно требованию высокой относительной стабильности частотной базы отсчетной шкалы измерительного прибора (по существу — не ниже обратного значения измеряемой добротности, т.е. $\sim 10^{-10}$ – 10^{-11}). Объединение этих трех требований делает задачу измерения добротности сверхпроводящего резонатора TESLA-типа в «холодном» режиме нетривиальной.

Физические ограничения и технические трудности подобных измерений амплитудно-частотных характеристик и добротности ниобиевых резонаторов в условиях рабочих (гелиевых) температур, когда расчетная добротность таких резонаторов достигает величины порядка 10^{10} , обусловлены тем, что измерения находятся на пределе характеристик современной стандартной измерительной аппаратуры.

Для достижения максимально возможной точности измерений и преодоления вышеотмеченных трудностей требуются нестандартные инже-

нерно-технические и научно-методические решения, улучшающие метрологические характеристики применяемой измерительной аппаратуры.

Для измерения амплитудно-частотных характеристик и добротности высокодобротных резонаторов при комнатной температуре применяются известные традиционные схемы и методы измерений [64–66]. Они же, как правило, применяются и для поточечных измерений АЧХ и расчета добротности резонаторов, находящихся в состоянии сверхпроводимости (и, соответственно, сверхмалых потерь). При этом дополнительно для стабилизации частоты измерительного СВЧ-генератора до уровня $\sim 10^{-11}$, определяемого сверхвысокой добротностью, применяются системы фазовой автоподстройки частоты. Альтернативой является стабилизация временной базы (сетки частот) измерительного прибора, в нашем случае — векторного анализатора, поточно измеряющего АЧХ резонатора в области резонанса. При этом теоретически и метрологически можно гарантировать точность измерительного комплекса, а наблюдаемые сверх поверочных значений отклонения отнести на счет измеряемого объекта — резонатора. Для этого был проведен анализ рынка и метрологических характеристик (сверх) высокостабильных источников частоты, осуществлен выбор, произведена закупка и встраивание в измерительный стенд прибора — генератора рубидиевого опорного LPFRS-01.

Приведенные в данном разделе сведения необходимы для оценки качества и объяснения получаемых в эксперименте результатов — измерений АЧХ и добротности ниобиевого резонатора 1,3 ГГц ILC TESLA-типа — в так называемом холодном режиме, т. е. при температуре жидкого гелия.

Добротность объемного сверхпроводящего резонатора зависит от его геометрии (так называемого фактора геометрии G), свойств сверхпроводящего материала, из которого он изготовлен, и внешних магнитных полей H_{ext} , в частности магнитного поля Земли, влияющих на суммарное поверхностное сопротивление резонаторной полости. Для сверхпроводников II рода (например ниобия) $R_s = R_{\text{BCS}} + R_{\text{res}}$, где R_{BCS} — сопротивление Бардина–Купера–Шиффера в теории сверхпроводимости, а R_{res} — так называемое остаточное сопротивление (материала), не зависящее от температуры.

Для вышеуказанных величин известны формулы [67]

$$G = \frac{\omega\mu_0 \int |\mathbf{H}|^2 dV}{\int |\mathbf{H}|^2 dS},$$

$$R_{\text{BCS}} \simeq 2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{f}{1,5 \cdot 10^9} \right)^2 \frac{e^{-17,67/T}}{T},$$

причем последняя величина является аппроксимацией, справедливой для ниобия при температурах $T < 4,65$ К (половинное значение критической температуры $T_c = 9,3$ К для ниобия). Что касается остаточного

сопротивления R_{res} , то оно определяется целым рядом факторов, среди которых для сверхпроводников II рода существенным является внешнее магнитное поле H_{ext} . Для таких материалов в электромагнитном поле частоты f

$$R_{\text{res}} \approx R_H = 9,49 \cdot 10^{-12} H_{\text{ext}} \sqrt{f}.$$

В идеальном случае для экранированного от магнитного поля Земли $H_{\text{ext}} = H_{\text{Earth}} = 40$ А/м до уровня $0,02H_{\text{Earth}} = 0,8$ А/м ниобиевого 1,3-ГГц резонатора TESLA-типа при $T < 4,65$ К получим следующие оценки вышеуказанных величин: $R_{\text{BCS}} = 4,55$ нОм, $R_{\text{res}} = R_H = 3,42$ нОм, $R_s = 7,97$ нОм, $G = 270$ Ом. При этом расчетная оценка добротности экранированного резонатора

$$Q_{0,02H_{\text{Earth}}} = \frac{G}{R_s} = 3,4 \cdot 10^{10}.$$

В отсутствие специальной магнитной экранировки, т. е. для условий нашего эксперимента в криогенной камере из нержавеющей стали (магнитная проницаемость 1,008) с влиянием магнитного поля Земли, получим оценку добротности

$$Q_{H_{\text{Earth}}} = \frac{G}{R_s} = 0,68 \cdot 10^9.$$

В подробном обзоре [68] также отмечено, что величина измеряемой добротности такого рода резонаторов, неэкранированных от магнитного поля Земли, не может существенно превышать 10^9 .

Эксперимент проводился в гелиевой камере в условиях вакуумирования резонатора, что, однако, не гарантировало требуемой чистоты эксперимента (в полости резонатора мог находиться жидкий гелий) и, как следствие, достижения высокой добротности. С другой стороны, жидкий гелий не является полярной жидкостью, его диэлектрическая проницаемость близка к вакууму, поэтому такая жидкость не оказывает существенного влияния на значение добротности. Испытуемый резонатор располагался вертикально в гелиевой камере из нержавеющей стали (рис. 52 и 53).

Измерительный комплекс реализован на базе векторного анализатора цепей (ВАЦ) Agilent E5061B с опцией 1E5 и внешнего источника сверхвысокостабильной временной базы измерений — генератора опорного рубидиевого LPFRS-01. Для регистрации результатов измерений использован внешний компьютер, подключенный к ВАЦ через USB-интерфейс. Результаты состояния ВАЦ и цифровых измерений модуля АЧХ в логарифмическом масштабе (дБ) импортируются из памяти ВАЦ в компьютер в виде таблиц и графиков MS Excel 2007. Методика измерений основана на измерении параметра S_{11} резонатора, подключенного к выходу ВАЦ через кабельный тракт, включающий развязывающий аттенюатор (6 дБ) и настраиваемый вручную шлейфовый согласующий



Рис. 52. Стенд для криогенных измерений



Рис. 53. Верхняя крышка криостата с выходным разъемом СВЧ-кабеля

трансформатор (комплексных сопротивлений). Последний используется для устранения мешающих отражений в кабельном тракте (разъемные ВЧ-соединения), соединяющем ВАЦ и исследуемый резонатор.

Таким образом, используемая методика измерений основана на оценке относительного уровня поглощения энергии в резонаторе. Такая оценка производится ВАЦ в цифровом виде — в форме линейно упорядоченных по частоте отсчетов отношений квадратов амплитуд (мощностей) отраженного от резонатора и направляемого в резонатор сигналов в заданной

(пользователем) полосе частот. Для удобства анализа это отношение отображается и регистрируется прибором Agilent E5061B в логарифмическом масштабе так, что уровень +3 дБ от минимума кривой поглощения (АЧХ) отвечает половинной мощности, на которой измеряется полоса пропускания при определении добротности. Измеряемая добротность оценивается двумя способами: 1) видеофотофиксацией экрана ВАЦ в непрерывном режиме (24 кадра/с), на котором отображаются значения полосы пропускания исследуемого объекта на уровне половины поглощенной мощности, с отметками нижней и верхней частотных границ и центра полосы пропускания, а также значение добротности, 2) по табличным данным АЧХ, импортируемым из памяти ВАЦ в память внешнего компьютера для их дальнейшей обработки. Прием видеофотофиксации использован нами для достоверного подтверждения факта измерения высоких значений добротности, импорт изображения экрана ВАЦ во внешний компьютер и/или его запоминание прибором также в принципе возможны, но занимают больше времени, чем видеофотофиксация. Таким образом, видеофотофиксация позволяет с большей долей вероятности зарегистрировать факты измерения ВАЦ высоких значений добротности исследуемого резонатора. Импорт данных измерений из ВАЦ в персональный компьютер измерительного комплекса осуществляется в 14-разрядном десятичном формате, т.е. с точностью, на порядок превышающей (индицируемую) разрядность отсчета частоты ВАЦ Agilent E5061B. Это позволяет осуществить дальнейшую обработку данных (по типу цифровой фильтрации) с целью, например, аналитической аппроксимации резонансной кривой и уточнения значений центральной частоты и добротности резонатора (так называемый теоретико-экспериментальный способ оценки). Структурная схема измерений АЧХ и добротности резонатора представлена на рис. 54.

При достижении режима сверхпроводимости (сверхвысокой добротности) с целью обнаружения/идентификации пика АЧХ рекомендуется отключить на ВАЦ режим «скользящее сглаживание», установить минимально возможное усреднение и максимально возможное количество точек измерения в полосе анализа. Все отмеченные процедуры можно в дальнейшем выполнить (при необходимости) на цифровых данных, зарегистрированных на внешнем компьютере.

Трудности прямого измерения f_0 и оценки добротности резонансных полостей на частоте 1,3 ГГц в состоянии сверхпроводимости обусловлены в основном их чрезвычайно узкой полосой пропускания в таком состоянии — полоса пропускания может составлять около 1 Гц или менее, тогда как динамический диапазон амплитудно-частотного отклика $|S_{11}|$ может быть больше -120 дБ. Таким образом, при таком измерении возникает проблема выделения сигнала из шума различной природы. Обработка сигналов является единственным эффективным методом решения такой проблемы, и поэтому используется метод накопления/хранения и статистической обработки данных о $|S_{11}|$ наряду с автоматизацией процесса

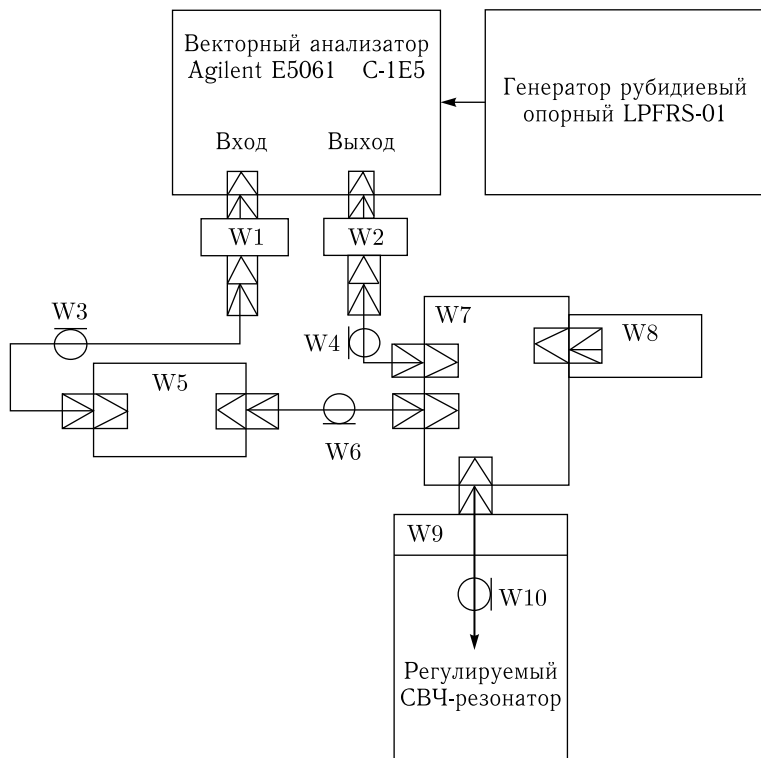


Рис. 54. Структурная схема настройки и измерения параметров резонатора при использовании векторного анализатора Agilent E5061 C-1E5 и опорного рубидиевого генератора LPFRS-01 для измерения параметров исследуемого резонатора при комнатной температуре и при температуре жидкого гелия: W1, W2 — переход коаксиальный ПК 50-22-06 СБЕД.430400.000 ТУ (2 шт.); W3, W4 — коаксиальный кабель сечением 7/3 (2 шт.); W5 — СВЧ-аттенюатор, диапазон 1,07–4,0 ГГц, $A = 6$ дБ; W6 — коаксиальный кабель сечением 7/3 (1 шт.); W7 — согласующий трансформатор; W8 — согласованная нагрузка; W9 — СВЧ-фланец (крышка) (2 шт.); W10 — СВЧ-термостойкий кабель (1 шт.)

измерения. Правильный выбор и установка оптимального режима измерения очень важны для получения надежных результатов. Режим измерения должен быть установлен таким образом, чтобы избежать эффекта искажения АЧХ с очень узкой полосой пропускания (табл. 11).

Имея цифровые данные с резонансными пиками, можно приблизить форму АЧХ в пределах пика с помощью процедуры подбора к кривой в форме колокола и затем рассчитать добротность. Использование формулы Лоренца в качестве математической модели для такой подгонки можно считать хорошим выбором, поскольку закон Лоренца пред-

Таблица 11. Данные $|S_{11}|$ (7 точек около резонансного пика) для ниобиевого резонатора при $T = 4,2$ К

Частота, ГГц	Амплитуда, дБ
1,274983363245	-100,7759788
1,274983382796	-102,3960799
1,274983402346	-104,1038561
1,274983421896	-128,7089532
1,274983441447	-102,4467944
1,274983460997	-101,7109461
1,274983480547	-102,5946921

ставляет собой стандартную математическую модель для узкополосных резонансных кривых и поэтому широко используется в спектральном анализе.

Ниже представлен график АЧХ (поглощения) (рис. 55).

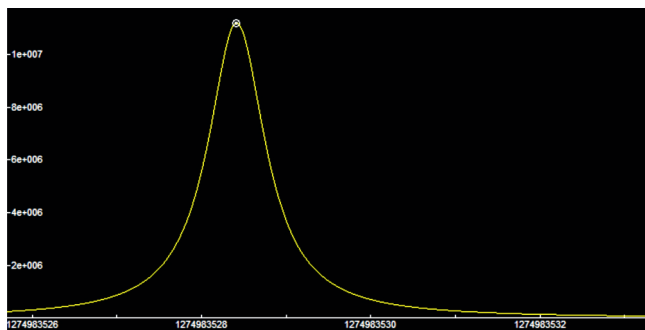


Рис. 55. Аппроксимация кривой Лоренца АЧХ сверхпроводящего резонатора

Найденные параметры аппроксимирующей кривой Лоренца имеют следующие значения: $f_0 = 1,274983403346$ ГГц, $\Delta f = 0,9$ Гц, так что мы получаем $Q = f_0/\Delta f = 1,41665 \cdot 10^9$ для оценки добротности 1,3-ГГц полости ниобия в состоянии сверхпроводимости, и это значение хорошо согласуется с известными теоретическими оценками.

По вышеуказанной методике проведен цикл «теплых» измерений резонансной частоты и добротности резонатора образца сверхпроводящего ниобиевого СВЧ-резонатора на рабочую частоту 1,3 ГГц, в ходе которых осуществлена настройка оптимального режима согласования резонатора с измерительной аппаратурой (достигнутый уровень согласования обеспечивает коэффициент стоячей волны КСВ = 1,003, что соответствует передаче в резонатор 99,9% подаваемой СВЧ-мощности). Результаты измерений резонансной частоты, КСВ, добротности и относительного

уровня потерь на резонансной частоте ниобиевого резонатора при комнатной температуре приведены на рис. 56 и 57.

Измерение резонансной частоты, КСВ, добротности и относительного уровня потерь на резонансной частоте проводились на векторном ана-

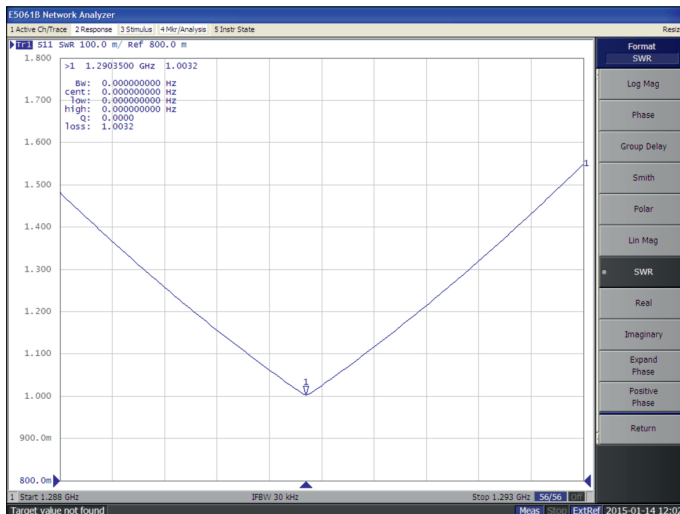


Рис. 56. Результаты измерений параметров ниобиевого резонатора при комнатной температуре (резонансная частота, КСВ)

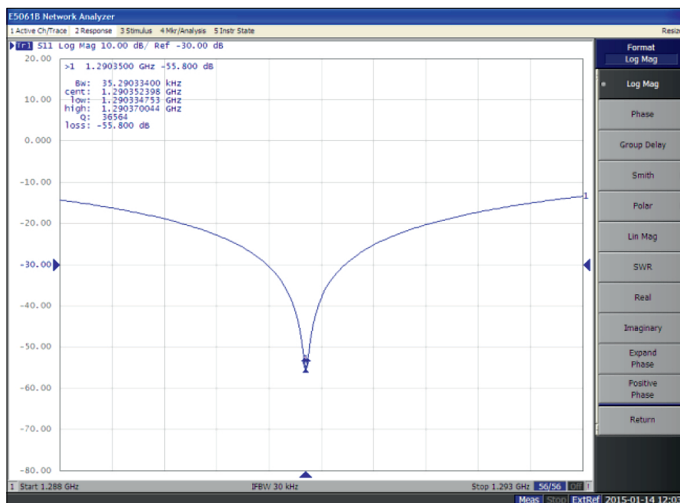


Рис. 57. Результаты измерений параметров ниобиевого резонатора при комнатной температуре (резонансная частота, добротность, относительный уровень потерь)

лизаторе цепей Agilent E5061B (плюс опция C-1E5), с подключением к измерительному стенду высокостабильного источника внешнего опорного сигнала генератора рубидиевого опорного LPFRS-01. Погрешность измерения модуля коэффициента передачи в диапазоне частот от 10 МГц до 3 ГГц при значении измеряемой величины от -30 до -70 дБ равна $\pm 0,37$ дБ. Получены следующие результаты: резонансная частота резонатора 1,2903500 ГГц, нагруженная добротность 36564, КСВ = 1,0032, относительный уровень потерь $-55,8$ дБ (на центральной частоте).

Для обеспечения криогенных СВЧ-испытаний сверхпроводящего ниобиевого резонатора сборная конструкция помещалась в гелиевую ванну, вакуумировалась и криостат заполнялся жидким гелием. Схема ввода СВЧ-мощности обеспечивала герметичность и минимизацию теплопритока из внешней среды.

Первоначально добротность резонатора измерялась в газовой гелиевой среде, охлажденной до температуры 100 К. Из рис. 58 видно, что величина добротности при этом не превышала $3,3 \cdot 10^4$, что соответствует подавлению -61 дБ. При этом величина добротности была, естественно, незначительно выше, чем при комнатной температуре (рис. 57).

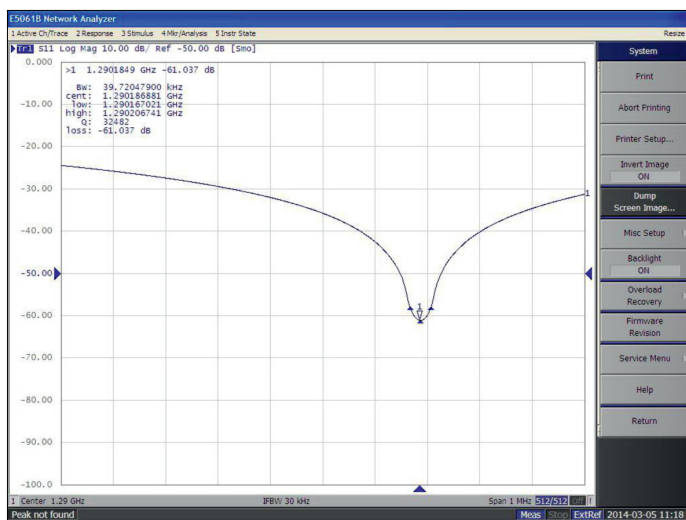


Рис. 58. Частотная зависимость подавления для ниобиевого резонатора при температуре 100 К

Проведен цикл криогенных измерений резонансной частоты и добротности сверхпроводящего ниобиевого резонатора. Полученные значения добротности резонатора (выше чем 10^9) подтвердили достижение в резонаторе явления сверхпроводимости и получение максимального значения нагруженной добротности. Результаты испытаний ниобиевого резонатора при температуре жидкого гелия следующие: резонансная час-

тота резонатора 1,3002027 ГГц, нагруженная добротность 1 316 700 000, КСВ = 1,0001, относительный уровень потерь -129,01 дБ (на центральной частоте). Данные с ВАЦ приведены на рис. 59 и 60.

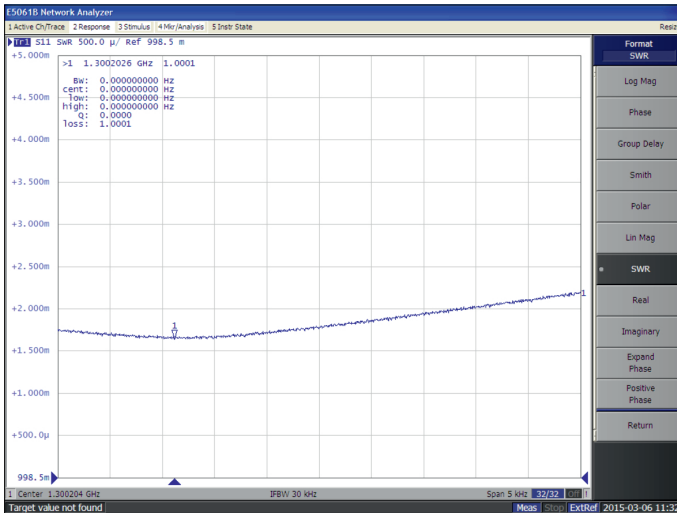


Рис. 59. Результаты измерений параметров ниобиевого резонатора при температуре жидкого гелия (резонансная частота, КСВ)

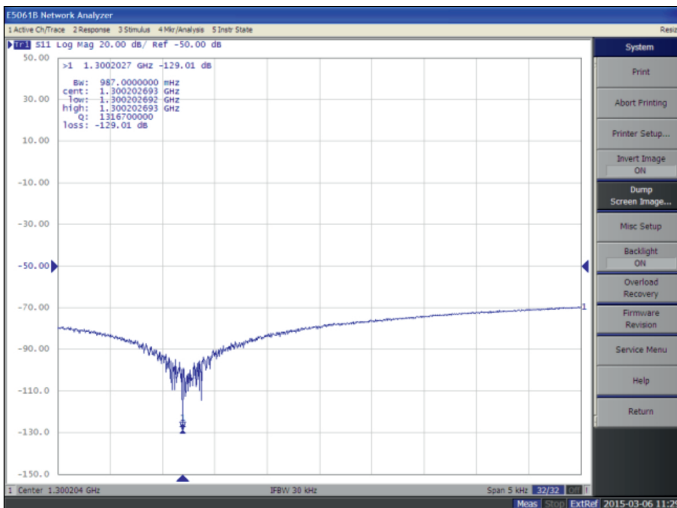


Рис. 60. Результаты измерений параметров ниобиевого резонатора при температуре жидкого гелия (резонансная частота, нагруженная добротность, относительный уровень потерь)

Таким образом, разработанный автоматизированный измерительный комплекс позволяет измерять высокие значения добротности и малые потери, характерные для сверхпроводящих резонаторов (в рабочем частотном диапазоне прибора Agilent E5061B). Применение в комплексе в качестве источника временной базы амплитудно-частотных измерений высокостабильного 10-МГц опорного генератора LPFRS-01 на парах рубидия позволило существенно снизить влияние частотных шумов аппаратуры при измерениях, о чем свидетельствуют зарегистрированные факты измерения ВАЦ Agilent E5061B добротности исследуемых объектов (1,3-ГГц ниобиевых резонаторов) на уровне не ниже $0,1 \cdot 10^9$ (с максимальным значением $\sim 1,2 \cdot 10^{10}$) и уровня относительных потерь ниже -130 дБ (с минимальным показателем $-139,7$ дБ) при температуре жидкого гелия.

Проведение испытаний с применением циклической процедуры для измерения амплитудно-частотных характеристик, добротности и потерь с предельным для прибора Agilent E5161B разрешением по частоте позволило с помощью исследований ниобиевого резонатора, предоставленного лабораторией FNAL, достоверно показать, что выбранная методика проведения СВЧ-исследований является оптимальной. Об этом свидетельствуют результаты испытаний и, в частности, обнаружение эффекта резкого возрастания добротности в ниобиевых резонаторах при переходе в режим сверхпроводимости.

4.2. СВЧ-характеристики экспериментальных образцов резонаторов из модельных материалов и сверхпроводящего ниобия. Для измерений параметров резонатора применяется метод передачи, в котором исследуемый резонатор используется как передающее устройство. Определяется зависимость выходного сигнала от частоты, получаемая в виде обычной резонансной кривой, по ширине полосы пропускания которой может быть вычислено значение Q . Несмотря на простоту этого метода, он требует вследствие ряда практических трудностей большого внимания к различным деталям, так как только в этом случае могут быть получены точные результаты. Но метод передачи в нашем проекте был совмещен с динамическим методом, который основывается на динамическом наблюдении характеристик резонатора. Такая методика очень удобна, так как при этом значения Q могут быть получены более быстро непосредственно путем отсчета по прибору ВАЦ.

Для отработки режимов штамповки, параметров электронно-лучевой сварки, выбора методик СВЧ-измерений, в том числе в криогенных условиях, были изготовлены алюминиевый и медный резонаторы TESLA-типа (рис. 61).

С использованием схемы на рис. 54 осуществлялась настройка петли связи с резонатором до уровня критической связи, производились измерения резонансных частот резонатора для различных типов колеба-



Рис. 61. Модельные медный и алюминиевый резонаторы

ний, определялись КСВ и нагруженная добротность Q_n по измерениям S -параметров.

Результаты измерений резонансной частоты, КСВ, нагруженной добротности и относительного уровня потерь на резонансной частоте алюминиевого резонатора при комнатной температуре приведены на рис. 62.

Полученные результаты измерений: резонансная частота алюминиевого резонатора 1,2901982 ГГц, нагруженная добротность 55 461, КСВ = 1,0016, относительный уровень потерь –62,135 дБ (на центральной частоте).

Криогенные измерения проводились на рабочем стенде в криостате погружного типа (см. рис. 52) с включением резонатора «на отражение» при температуре жидкого гелия.

Результаты измерений алюминиевого резонатора при температуре 4,2 К представлены на рис. 63.

Данные криогенных испытаний алюминиевого резонатора: резонансная частота резонатора 1,2902357 ГГц, КСВ = 1,0007, нагруженная добротность 123 540, относительный уровень потерь (на центральной частоте) –71,949 дБ.

Аналогичные исследования были проведены и для медного резонатора. Результаты измерений резонансной частоты, КСВ, нагруженной добротности и относительного уровня потерь на резонансной частоте резонатора при комнатной температуре приведены на рис. 64.

Полученные результаты измерений: резонансная частота резонатора 1,2651811 ГГц, нагруженная добротность 71 559, КСВ = 1,0005, относительный уровень потерь –69,422 дБ (на центральной частоте).

Результаты измерений медного резонатора при температуре 4,2 К представлены на рис. 65.

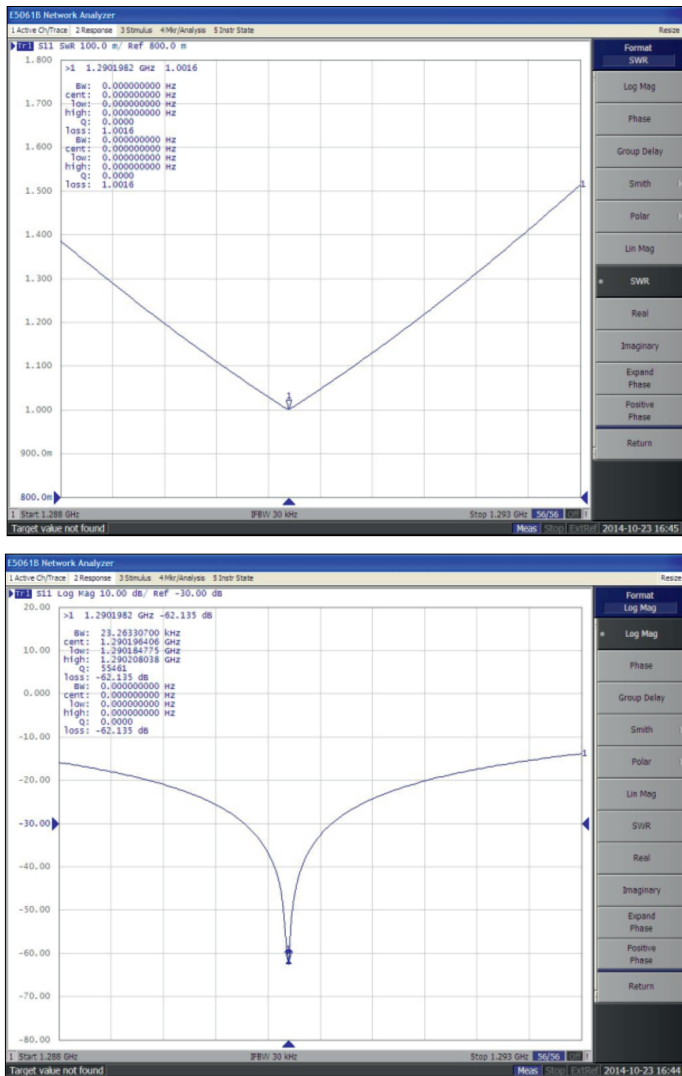


Рис. 62. Экспериментальные характеристики алюминиевого резонатора (резонансная частота, КСВ, добротность, относительный уровень потерь) при комнатной температуре

Данные криогенных испытаний медного резонатора: резонансная частота резонатора 1,2940755 ГГц, КСВ = 1,0007, нагруженная добротность 94 915, относительный уровень потерь (на центральной частоте) -70,727 дБ.

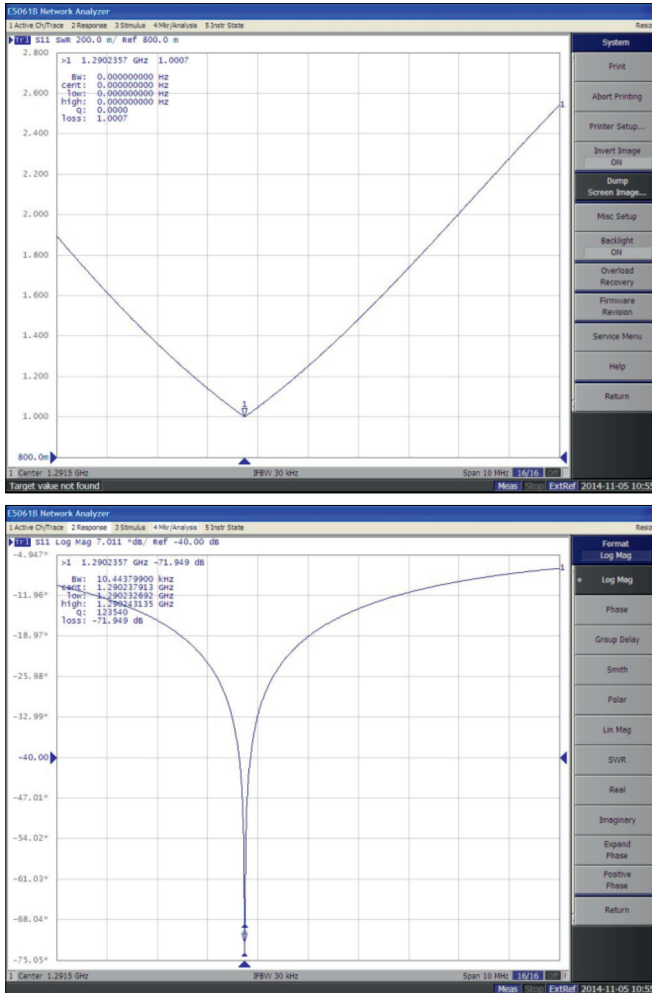


Рис. 63. Результаты измерений параметров алюминиевого резонатора при температуре жидкого гелия (резонансная частота, КСВ, нагруженная добротность, относительный уровень потерь)

Сравнение полученных данных свидетельствует о том, что при сохранении стабильности резонансной частоты добротность модельных резонаторов при гелиевых температурах увеличивается в 1,5–2 раза по сравнению с «теплыми» измерениями. Это позволяет говорить о высоком качестве изготовления и сборки резонаторов из несверхпроводящих металлов и дает уверенность в достижении сверхпроводимости и, соответственно, высокой добротности ниобиевых резонаторов.

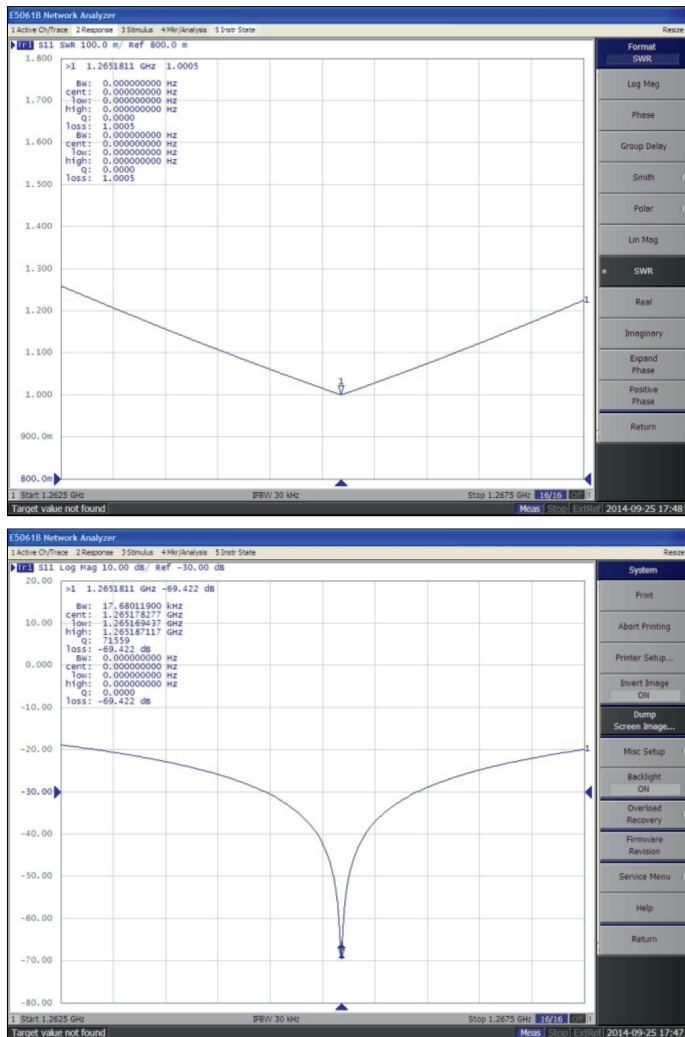


Рис. 64. Экспериментальные характеристики медного резонатора (резонансная частота, КСВ, добротность, относительный уровень потерь) при комнатной температуре

Впервые на постсоветском пространстве при прямом участии научных организаций Национальной академии наук Беларуси и Министерства образования Беларуси были созданы, изготовлены и прошли испытания сверхпроводящие ниобиевые резонаторы TESLA-типа. Изготовлены и прошли СВЧ-испытания 2 идентичных одноячеечных ниобиевых резонатора, один из которых представлен на рис. 66.

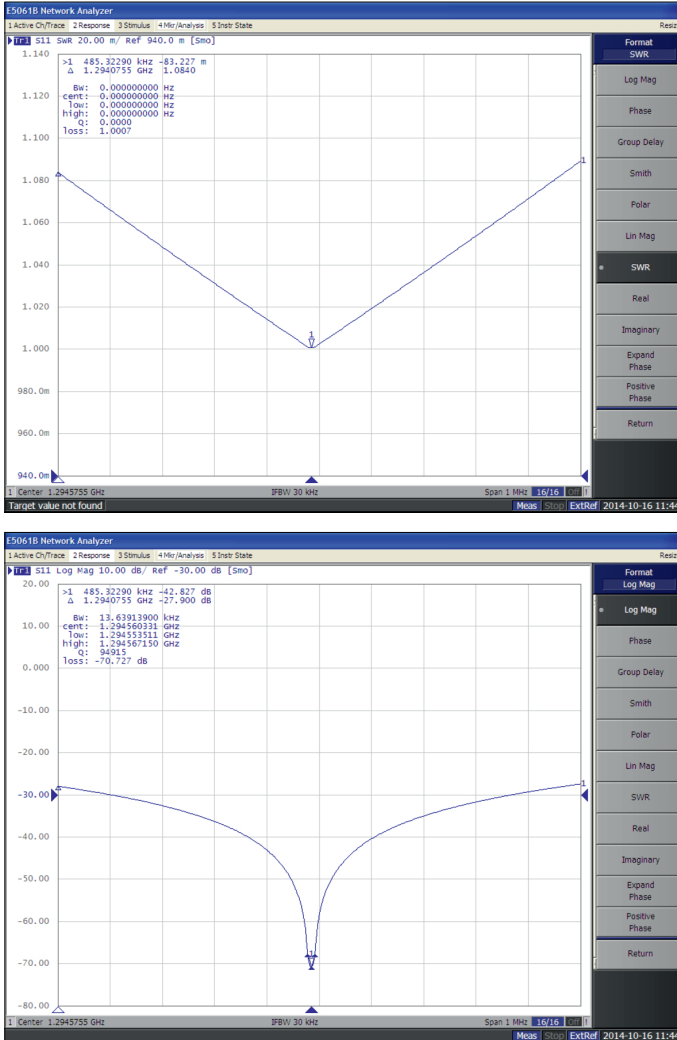


Рис. 65. Результаты измерений параметров медного резонатора при температуре жидкого гелия (резонансная частота, КСВ, нагруженная добротность, относительный уровень потерь)

На рис. 67 представлены экспериментальные характеристики ниобиевого резонатора № 1 при комнатной температуре.

Получены следующие результаты: резонансная частота резонатора 1,290197258 ГГц, нагруженная добротность 37 549, КСВ = 1,0030, относительный уровень потерь -56,358 дБ (на центральной частоте).

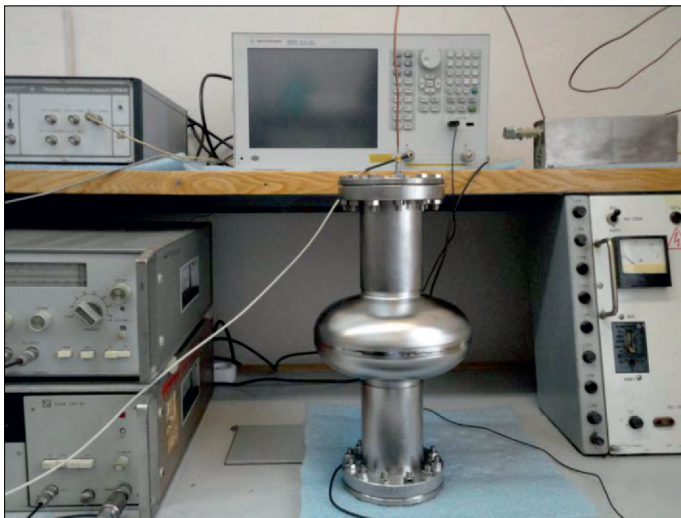


Рис. 66. Ниобиевый резонатор при комнатных испытаниях

Далее на рис. 68 представлены результаты комнатных испытаний резонатора № 2.

Результаты испытаний: резонансная частота резонатора 1,2903500 ГГц, нагруженная добротность 36 564, КСВ = 1,0032, относительный уровень потерь –55,8 дБ (на центральной частоте).

Таким образом, сравнение характеристик резонаторов № 1 и № 2 при «теплых» испытаниях показывает их полную идентичность с разбросом параметров не более 3%.

«Холодные» измерения ниобиевого резонатора № 2 производились в гелиевой камере криостата с вакуумированием внутренней полости резонатора. При этом эксперимент проводился в условиях сниженного уровня механических возмущений — при выключенном оборудовании ожижителя и подкачки гелия в гелиевую ванну, рис. 69.

Результаты испытаний ниобиевого резонатора № 2 следующие: резонансная частота резонатора 1,3002027 ГГц, нагруженная добротность 1 316 700 000, КСВ = 1,0001, относительный уровень потерь –129,01 дБ (на центральной частоте).

По итогам описанных в этом разделе испытаний в табл. 12 сведены экспериментальные данные параметров модельных резонаторов (медного и алюминиевого), а также двух отечественных ниобиевых резонаторов в теплом и холодном режимах. Для сравнения в таблице приведены параметры резонатора FNAL.

Впервые получено максимальное значение нагруженной добротности резонатора, равное 2 810 100 000 при абсолютном согласовании резонатора с СВЧ-трактом: КСВ = 1,0000.

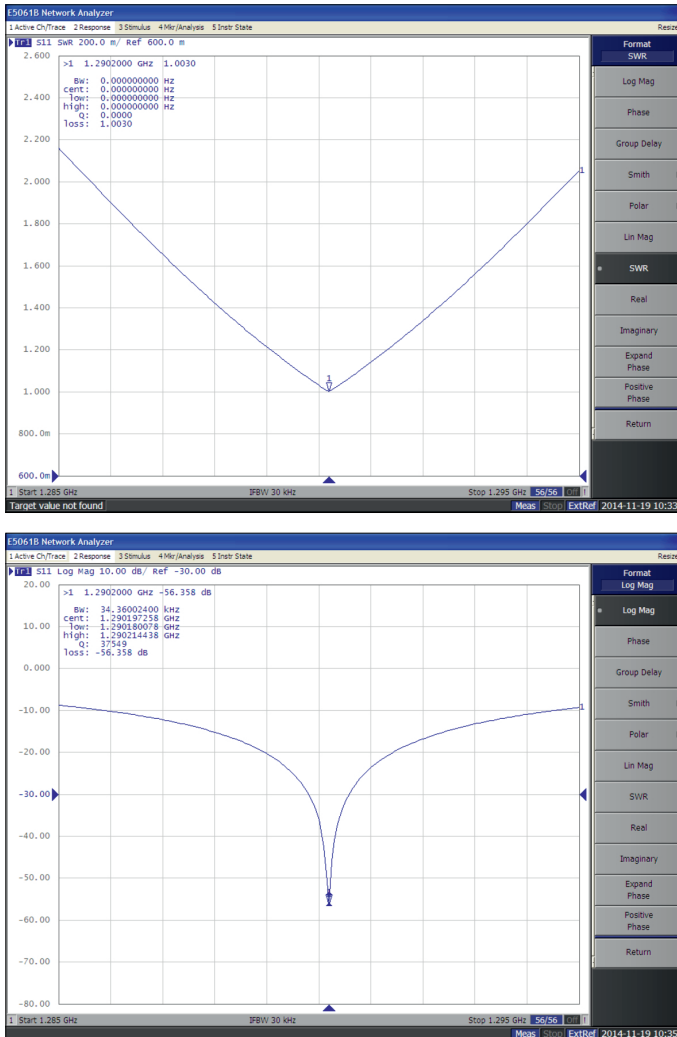


Рис. 67. Экспериментальные характеристики ниобиевого резонатора № 1 при комнатной температуре

Установлено, что полирование внутренней поверхности резонаторов должно являться необходимой и обязательной технологической операцией при производстве СВЧ-резонаторов.

Разработка и совершенствование соответствующих методик измерений и автоматизированных измерительных комплексов (АИК) является весьма актуальной практической задачей. АИК для измерений сверхкопосных АЧХ и соответственно сверхвысоких значений добротности

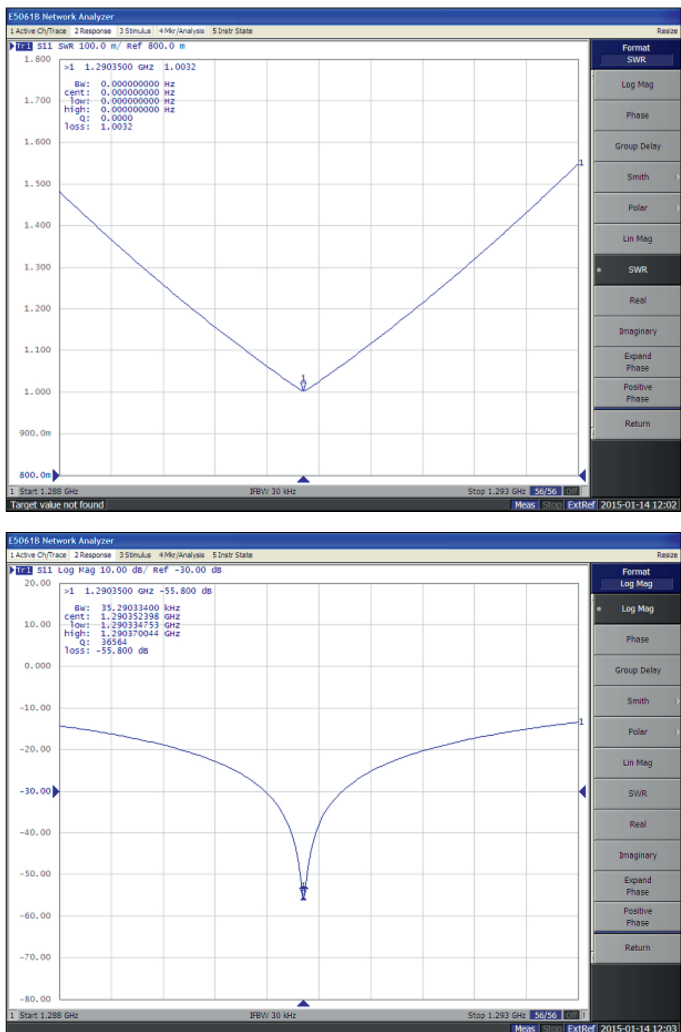


Рис. 68. Экспериментальные характеристики ниобиевого резонатора №2 при комнатной температуре

($\sim 10^{10}$), разработанный в рамках данной НИР, имеет относительно невысокую стоимость и высокие точностные характеристики, что позволяет рекомендовать его как АИК технологического уровня контроля.

Для дальнейшего повышения метрологических характеристик измерительного стенда и для создания технологического комплекса испытаний и аттестации опытных и серийных партий резонаторов необходимы:

- защита от механических вибраций;

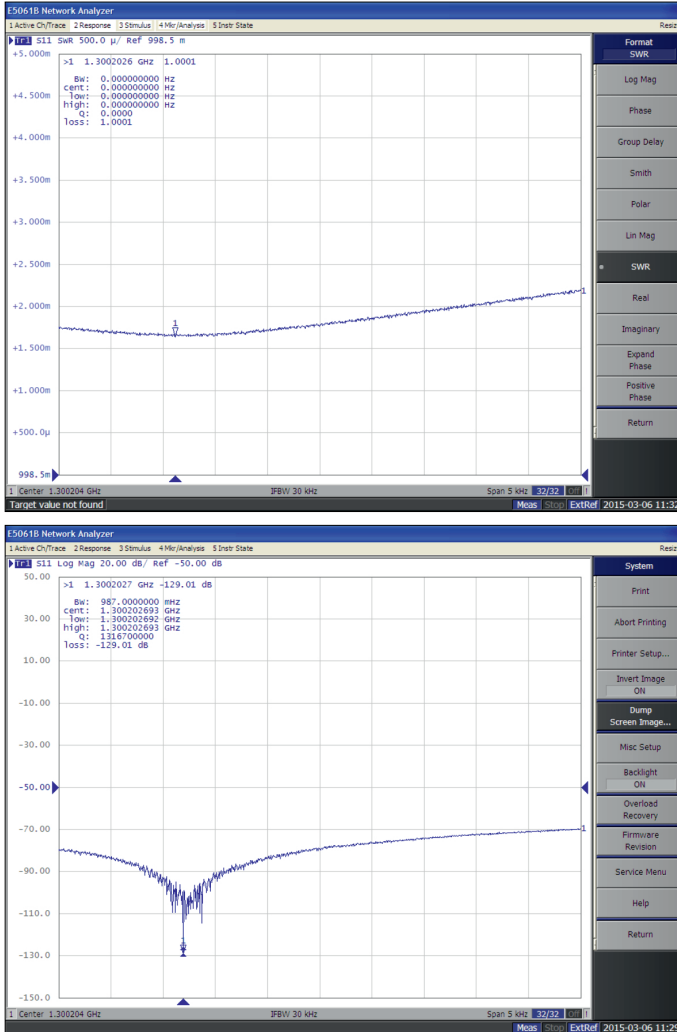


Рис. 69. Результаты измерений параметров ниобиевого резонатора № 2 при температуре жидкого гелия

- температурная стабилизация измерительного тракта;
- система видеофиксации.

Также необходимо применить в составе АИК

1) более совершенный векторный анализатор цепей R&S ZYA40, имеющий в своем составе ферритовые вентили, обеспечивающие развязку прибора с СВЧ-трактом, выходную СВЧ-мощность не менее 20 мВт, расширенный динамический диапазон (не менее 150 дБ);

Таблица 12. Тестовые характеристики резонаторов TESLA-типа

Параметр	M (Mинск)		C (C Минск)		N (Mинск), № 1		N (Mинск), № 2	
	Измерения при комнатной температуре							
Дата	20.08.2012	24.04.2014	23.10.14	25.09.2014	19.11.2014	14.01.2015		
f_0 , ГГц	1,272969689	1,290234336	1,2901982	1,2651811	1,290197258	1,2903500		
Q-фактор	28193	58291	55461	71559	37549	36564		
KCB	1,01	1,0016	1,0016	1,0005	1,003	1,0032		
Измерения при температуре жидкого гелия								
Дата	01.03.2013	05.03.2014	05.11.2014	16.10.2014	04.12.2014	06.03.2015		
f_0 , ГГц	1,274979678	1,274977156	1,2902357	1,2940755	1,290185765	1,3002077		
Q-фактор	$> 10^8$	$0,82 \cdot 10^9$	123540	94915	$1,494 \cdot 10^9$	$1,3167 \cdot 10^9$		
KCB			1,0007	1,0007	1,0000	1,0001		

2) согласующий трансформатор MAURY MICROWAVE 8045N, позволяющий уменьшить мешающие отражения в кабельном тракте (разъемные СВЧ-соединения), соединяющем векторный анализатор цепей и исследуемый резонатор;

3) схему стабилизации частоты на основе водородного стандарта частоты Ч1-1003М ЯКУР.411141.050 (с относительной нестабильностью частоты не менее 10^{-12}) для уменьшения шага дискретизации измеряемой АЧХ (увеличения разрешения) по частоте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы считают необходимым при завершении данного этапа работ привести итоговые результаты проведенных исследований с целью показать новизну, значимость и потенциальную необходимость их учета при создании сверхпроводящих резонаторов.

Проведенные теоретические расчеты показали, что сопряжение резонатора с отрезком регулярного волновода (трубки дрейфа) является наиболее критическим местом для возможного электрического пробоя. Сравнение двух способов сопряжения (с помощью окружности и с помощью эллипса) показало, что использование эллипса позволяет на 7–10% снизить максимальную величину напряженности электрического поля на границе по сравнению с сопряжением окружностью.

Предложен оригинальный способ, который позволяет проводить высокоточное измерение собственной добротности в диапазоне 10^8 – 10^{10} , в котором резонатор не связан с какими-либо внешними СВЧ-цепями, а его собственная добротность определяется по потере мощности электронным потоком и по пусковому току, которые могут быть измерены с высокой точностью. В результате выполненных расчетов по выявлению условий генерации найдены значения необходимой величины напряжения и тока электронного пучка и сформулированы требования к измерительной аппаратуре.

Технология изготовления резонаторов определяется следующими этапами: изготовление деталей корпуса резонатора методом гидроударной штамповки, электронно-лучевая сварка с обеспечением максимально высокой степени чистоты металла.

В результате выполненных исследований разработан полный производственный цикл изготовления деталей сверхпроводящих ниобиевых резонаторов и создана вся необходимая технологическая оснастка.

Исследовано влияние высокоскоростной деформации на способность высокочистого ниобия к глубокой вытяжке. Экспериментально получена диаграмма штампуемости ниобия при гидроударной штамповке, и определены предельные степени вытяжки модельных материалов и особо чистого ниобия: 1,94 для Al (АМцМ), 1,91 для Cu (М1М), 1,92 для Nb.

Впервые методом гидроударной штамповки из высокочистого ниобия изготовлены полужайчки сверхпроводящих резонаторов с отклонением размеров от номинала не более 0,1 мм.

Определены параметры механической обработки отштампованных деталей ниобиевых резонаторов перед сваркой.

Применение метода гидроударной штамповки представляется перспективной технологией для изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия.

Исследования процесса ЭЛС образцов ниобия проводились на соответствующей установке электронно-лучевой обработки. Объем вакуумной камеры (3,5 м³) позволяет при создании соответствующей сварочной оснастки проводить сварку как экспериментальных образцов одноячеечных резонаторов, так и девятиячеечной конструкции СВЧ-резонаторов. Важнейшим параметром, определяющим качество ЭЛС, является сохранение сверхпроводящих характеристик в области сварного соединения.

Проведенные исследования критических параметров сверхпроводящего ниобия свидетельствуют о незначительном ухудшении сверхпроводящих свойств листового ниобия производства фирмы Ningxia OTIC при термической обработке. Ухудшение сверхпроводящих свойств (критическая температура и магнитное поле и ширина их переходов) проплавленных и сваренных образцов по сравнению с образцами, не подвергавшимися термическому воздействию, обусловлено повышением концентрации примесных элементов в зоне электронно-лучевой сварки. Судя по полученным результатам, незначительное понижение (около 5%) критических сверхпроводящих параметров не окажет существенного влияния на СВЧ-свойства ниобиевых резонаторов, которые в целом будут находиться в сверхпроводящем состоянии.

Обязательным элементом выполнения работы стала разработка, изготовление и испытание гелиевой криостатирующей системы погружного типа, которая по геометрии и размерам гелиевой ванны позволила проводить необходимые по длительности испытания резонаторов при температуре 4,2 К.

При выборе схемы ввода СВЧ-мощности в гелиевую область криостата и определении конструкции крепления резонатора основными критериями являлись герметичность системы, минимизация теплопритока из внешней среды и жесткость крепления резонатора. Полученные значения испаряемости жидкого гелия в условиях, когда криостатирующая система находится в «квазизакрытом» состоянии, свидетельствуют о ее пригодности и временной достаточности для проведения полномасштабных СВЧ-измерений сверхпроводящего модуля резонатора.

В заключительной части комплексной работы, начавшейся с «нулевого» уровня, проведены испытания всех изготовленных одноячеечных резонаторов. Первоначальные исследования ниобиевого резонатора, предоставленного FNAL (США), показали возможность достижения добротности $0,8 \cdot 10^9$.

Изучение модельных, несверхпроводящих резонаторов из алюминия и меди показало, что при сохранении стабильности резонансной частоты добротность модельных резонаторов при гелиевых температурах увеличивается в 1,5–2 раза по сравнению с «теплыми» измерениями. Это позволяет говорить о высоком качестве изготовления и сборки резонаторов из несверхпроводящих металлов и дает уверенность в достижении сверхпроводимости и, соответственно, высокой добротности ниобиевых резонаторов.

Это было подтверждено результатами испытаний двух отечественных ниобиевых резонаторов, на одном из которых достигнута добротность $1,5 \cdot 10^9$. И это не предел, так как в технологии их изготовления не проводилась полировка внутреннего объема резонирующей камеры.

Таким образом, за весьма короткий срок и впервые в Республике Беларусь учеными и инженерами решена сложная научно-техническая задача — созданы и апробированы измерительные стенды и методики для аттестации изготовленных ниобиевых резонаторов типа TESLA на их идентичность и высокие электромагнитные параметры, близкие к теоретическим. Следует особо отметить следующее. Будучи прикладными, такого рода задачи очевидным образом стимулируются целями, задачами и достижениями фундаментальных наук, каковыми являются ядерная физика и физика частиц высоких энергий. Продвижение в фундаментальных областях знаний было и остается ключевым «движителем» научно-технических инноваций (рис. 70).



Рис. 70. Награды по итогам выполнения исследований

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Linear Collider. Reference Design Report. V. 3: Accelerator. 2007.
2. International Linear Collider. A Technical Progress Report. 2011.
3. Proc. of the 22nd Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2010), Protvino, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2010.
4. *Kolosov S. V., Kurayev A. A., Sinitsyn A. K., Aksenchik A. V., Senko A. V.* The Simulation Codes CEDR // 11th IEEE IVEC, Monterey, California, USA, 2010. P. 115–116.
5. *Колосов С. В., Кураев А. А., Сеницын А. К.* Расчет ячейки ускорителя электронов и позитронов на сверхпроводящем ниобиевом резонаторе // Тр. 21-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 12–16 сент. 2011 г. Севастополь, 2011. С. 285–286.
6. *Колосов С. В., Кураев А. А., Сеницын А. К.* Расчет девятисекционного резонатора линейного коллайдера // Там же. С. 267–268.
7. *Азарян Н. С. и др.* Расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 2(172). С. 247–268.
8. The Superconducting TESLA Cavities // Phys. Rev. ST. Accel. Beams. 2000. V. 3, Iss. 9. 25 p.
9. *Звонарев И. А., Севрюкова Л. М.* Измерение электрофизических параметров сверхпроводящих ускоряющих СВЧ-резонаторов. М.: ИФВЭ, 1999. 30 с.
10. *Диденко А. Н.* Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. М.: Сов. радио, 1973. С. 69–73.
11. *Диденко А. Н., Севрюкова Л. М., Ятис А. А.* Сверхпроводящие СВЧ-структуры. М.: Энергоатомиздат, 1981.
12. *Корнеев Н. И., Певзнер С. Б., Разуваев Е. И., Скуچارев И. Г.* Обработка давлением тугоплавких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1967. 267 с.
13. Машиностроение: Энцикл. Т. 11-3: Цветные металлы и сплавы. М.: Машиностроение, 2001. 880 с.
14. *Крупин А. В., Соловьев В. Я.* Пластическая деформация тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1971. 352 с.
15. *Петраковский В. С.* Оценка штампуемости листового металла при гидроударной вытяжке // Импульсные методы обработки материалов: Сб. ст. Минск: Наука и техника, 1979. С. 77–81.
16. *Петраковский В. С., Здор Г. Н., Журавский А. Ю.* Инженерный метод расчета процесса импульсной вытяжки листовых материалов // Тр. 6 МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 2011. 104Н.3. С. 126–130.
17. *Чачин В. Н., Петраковский В. С., Седяко Г. К.* Точность дозирования энергии на гидроударных прессах // Вест. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1985. № 1. С. 8–11.
18. *Здор Г. Н., Журавский А. Ю.* Влияние индуктивности разрядного контура на процесс вытяжки электровзрывным способом // Импульсные методы обработки материалов. Минск: Машиностроение, 1977. С. 66–69.

19. Штамповка взрывом. Основы теории / Под ред. А. М. Анучина. М.: Машиностроение, 1972. С. 152.
20. Хина Б. Б., Покровский А. И., Shi-Hong Zhang, Yong Xu, Da-Yong Chen, Марышева А. А. Влияние скорости деформации на микроструктуру и механические свойства алюминиевого сплава AA2B06-О системы Al-Cu-Mg // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2021. Т. 27, № 4. С. 59–69.
21. Aune B. et al. Superconducting TESLA Cavities // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2000. V. 3. P. 092001.
22. Singer W., Singer X., Jelezov I., Kneisel P. Hydroforming of Elliptical Cavities // Phys. Rev. ST. Accel. Beams. 2015. V. 18. 022001.
23. Петраковский В. С., Журавский А. Ю. Оценка штампуемости особо чистого ниобия при гидроударном нагружении // Тр. 8 МНТК «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». Минск, 2013. Н. 3. С. 147–156.
24. Hong Liang Zhu, Yong Xu, Wei Jin Chen, Shi Hong Zhang, Banabic D., Lăzărescu L., Pokrovsky A. I. Research on Hydroforming through Combination of Internal and External Pressures for Manufacturing the Structure of Double Layer Tube with Gap // Intern. J. Mater. Form. 2022. V. 15. Paper 55.
25. Wei-Jin Chen, Yong Xu, Hong-Wu Song, Shi-Hong Zhang, Shuai-Feng Chen, Liang-Liang Xia, Yong Wang, Khina B. B., Pokrovsky A. I. A Novel Hydroforming Process by Combining Internal and External Pressures for High-Strength Steel Wheel Rims // Materials. 2022. V. 15, No. 19. Paper 6820.
26. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
27. Зубцов М. Е. Листовая штамповка. М.; Л.: Машгиз, 1958. 459 с.
28. International Linear Collider. Reference Design Report. 2007.
29. Azaryan N., Boudagov J., Demin D., Shirkov G., Baturitsky M., Karpovich V., Liubetsky N., Maximov S., Rodionova V., Kolosov S., Kurayev A., Sinityn A., Petrakovsky V., Pobol I., Pokrovsky A., Yurevich S., Zhuravsky A., Demyanov S., Kanyukov E., Kephart B., Ristori L. Dubna-Minsk Activity on the Development of 1.3 GHz Superconducting Single-Cell RF-Cavity // Proc. of the 23rd Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC-2012), Saint Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012. С. 602–604.
30. Юревич С. В., Поболь И. Л., Паршута А. А., Азарян Н. И., Будагов Ю. А., Демин Д. Л., Ширков Г. Д., Батурицкий М. А., Шумейко Н. М., Ермаков А., Зингер К. Подготовка поверхности и электронно-лучевая сварка ниобия для СВЧ-резонаторов // Современные методы и технологии создания и обработки материалы. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. С. 557.
31. Padamsee H. RF Superconductivity: Science, Technology and Applications. John Wiley & Sons, 2009. P. 464.
32. Шипко А. А., Поболь И. Л., Урбан И. Г. Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева. Минск: Навука і тэхніка, 1995.
33. Алехнович В. Н., Алифанов А. В., Гордиенко А. И., Поболь И. Л. Электронно-лучевая обработка материалов. Минск: Белорус. наука, 2006.

34. *Азарян Н. И., Батурицкий М. А., Будагов Ю. А., Демин Д. Л., Ермаков А., Паршутто А. А., Поболь И. Л., Зингер К., Ширков Г. Д., Шумейко Н. М., Юревич С. В.* Исследование процесса химического травления ниобия при изготовлении СВЧ-резонаторов // XVII Науч. конф. молодых ученых и специалистов ОИЯИ к 100-летию В. П. Джелепова, 8–12 апреля 2013 г. Дубна, 2013. С. 116–119.
35. *Kirchgessner J. L.* Forming and Welding of Niobium for Superconducting Cavities // Proc. of the Third Workshop on RF Superconductivity, Argonne National Lab., Illinois, USA, Sept. 14–18, 1987. P. 533–544.
36. *Geng R. L., Knobloch J., Padamsee H.* Micro-Structures of RF Surfaces in the Electron-Beam-Weld Regions of Niobium // Proc. of the 1999 Workshop on RF Superconductivity, Santa Fe, New Mexico, Mexico, Nov. 1–5, 1999. P. 238–245.
37. *Padamsee H., Knobloch J., Hays T.* RF Superconductivity for Accelerators. New York: John Wiley & Sons, 1998.
38. *Schmidt A., Brinkmann A., Iversen J., Matheisen A., Reschke D., Schäfer M., Singer W., Sousa V., Tiessen J., Vermeulen D.* 1.3 GHz Niobium Single-Cell Fabrication Sequence. TTC Report No. 2010-01. 2010.
39. *Brawley J., Mammosser J., Phillips L.* Electron Beam Weld Parameter Set Development and Cavity Cost // Proc. of the 1997 Workshop on RF Superconductivity, Abano Terme, Padova, Italy, Oct. 6–10, 1997. P. 518–522.
40. *Jiang H., Bieler T. R., Compton C., Grimm T. L.* Mechanical Properties, Microstructure, and Texture of Electron Beam Butt Welds in High Purity Niobium // Proc. of the 2003 Part. Accel. Conf., Portland, USA, May 12–16, 2003. P. 1359–1361.
41. *Kubo T., Ajima Y., Hayano H., Inoue H., Kato S., Saeki T., Sawabe M., Umemori K., Watanabe Y., Yamaguchi S., Yamanaka M.* Electron Beam Welding for High Gradient Superconducting Cavity // Proc. of the Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2013), Shanghai, China, May 12–17, 2013. P. 2346–2348.
42. *Brawley J., Mammosser J., Phillips L.* Electron Beam Weld Parameter Set Development and Cavity Cost // Proc. of the 1997 Workshop on RF Superconductivity, Abano Terme, Padova, Italy, Oct. 6–10, 1997. P. 518–522.
43. *Блатт Ф.* Физика электронной проводимости в твердых телах. М.: Наука, 1971.
44. The International Linear Collider. Gateway to Quantum Universe. Draft. 2007. Global Design Effort. <http://www.linearcollider.org>.
45. *Trubnikov G. V., Budagov Yu. A., Denisov Yu. N., Kozlov G. A., Tokareva N. A., Vorozhtsov S. B., Ivanov V. V.* International Linear Collider / Under general editorship of A. N. Sissakian and G. D. Shirkov. Dubna, 2008.
46. *Болгов Р. О., Гусарова М. А., Костин Р. А., Петрушина И. И., Собенин Н. П., Звягинцев В. Л.* Исследование сверхпроводящего резонатора ускорителя e-LINAC // ВАИТ. 2012. № 4. С. 33–36.
47. *Gusarova M. A. et al.* Multipacting Simulation in Accelerator RF Structure // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 599. P. 100–105.
48. *Милошенко В. Е., Железный В. С.* Техника эксперимента в физике низких температур. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. С. 55.

49. Солнцев Ю. П., Степанов Г. А. Материалы в криогенной технике. Л.: Машиностроение, 1982. 312 с.
50. Wands B., Wong M. Pressure Vessel Engineering Note for the 1.3-GHz Helium Vessel, Dressed Cavity AES-008. Fermilab Technical Division. 2011.
51. Orr R. S. Measurements of High Gradient Superconducting RF Cavities: Review. Dep. of Phys., Univ. of Toronto, Canada. 2006.
52. Fong K., Laverty M., Zheng Q.W., Chojnacki E., Wang S. P. Self Excited Operation for a 1.3 GHz 5-Cell Superconducting Cavity // Proc. of Part. Accel. Conf., New York, NY, USA, 2011. P. 660–662.
53. Marhauser F. Jlab SRF Cavity Fabrication Errors, Consequences and Lessons Learned // Proc. of Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC 2011), San Sebastian, Spain, 2011. P. 346–348.
54. Khanna A. S., Garault Y. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1983. V. MTT 31. P. 261.
55. Wheless W. P., Kajfez D. IEEE MTT-S Symposium Digest. 1986. P. 681.
56. Sanchez M. C., Martin E., Zamarro J. // IEE Proc. H. 1989. V. 136. P. 145.
57. Hearn C. P., Bartley P. G., Bradshaw E. S. // Microwave J. 1993. V. 36. P. 108.
58. Azaryan N., Boudagov J., Demin D., Shirkov G., Baturitsky M., Shumeiko N., Karpovich V., Krivosheev R., Liubetsky N., Maximov S., Rodionova V. IEEE Xplore. 2013. <http://ieeexplore.ieee.org>.
59. Azaryan N., Boudagov J., Demin D., Shirkov G., Baturitsky M., Shumeiko N., Karpovich V., Krivosheev R., Liubetsky N., Maximov S., Rodionova V. Super-Conducting Single-Cell RF-Cavity for ILC Accelerator // MSMW'13. Kharkov, 2013. P. 664.
60. Nebendahl B., Peligrad D.-N., Požek M. // Rev. Sci. Instrum. 2011. V. 72. Vessel No. IND-148. Rev. No. 1.
61. Giergusiewicz W., Jalmuzna W., Pozniak K., Ignashin N., Grecki M., Makowski D., Jezynski T., Perkuszewski K., Czuba K., Simrock S., Romaniuk R. Low Latency Control Board for LLRF System: SIMCON 3.1.2005. P. 86.
62. Azaryan N. S., Baturitsky M. A., Boudagov Ju. A., Demin D. L., Demyanov S. E., Glagolev V. V., Kaniukov E. Yu., Karpovich V. A., Kephart R. D., Liubetsky N. V., Maximov S. I., Nagaitsev S., Ristori L., Rodionova V. N., Shirkov G. D., Shumeiko N. M. Creation and Testing of the Stands for RF Measurements of Niobium SC Cavities at Room Temperature and at the Liquid Helium Temperature // XVII науч. конф. «ОМУС-2013» к 100-летию В. П. Джеллепова, 8–12 апреля 2013 г. Дубна, 2013. С. 106.
63. Патент № 9583 РБ, МПК H01 P5/00, Опубл. 13.03.2013, Бюл. № 5. Устройство связи для цилиндрического резонатора СВЧ / Азарян Н. С., Будагов Ю. А., Ширков Г. Д., Демин Д. Л., Шумейко Н. М., Батурицкий М. А., Карпович В. А., Любецкий Н. В., Родионова В. Н., Максимов С. И., Кривошеев Р. М.
64. Collin R. E. Foundations for Microwave Engineering. New York: Wiley Intersci., 2001.

65. *Edwards T. C., Steer M. B.* Foundations of Interconnect and Microstrip Design. Chichester: John Wiley, Ltd, 2000.
66. *Гаевская Т. В., Карпович В. А., Родионова В. Н., Танана О. В.* Комплект измерительных СВЧ-резонаторов // ПТЭ. 2013. № 3. С. 47–52.
67. Superconducting Radio Frequency. http://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_RF.
68. *Kajfez D.* Q Factor Measurements, Analog and Digital. New York: McGraw-Hill, 1987. P. 218.