



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2000–6
ОПЛ ТИСПР

И.А. Звонарев, А.Д. Рябов, Л.М. Севрюкова

**РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ И ОСНОВНЫХ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СВЧ–СТРУКТУРЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ SVAAP**

Протвино 2000

Аннотация

Звонарев И.А., Рябов А.Д., Севрюкова Л.М. Расчет геометрических размеров и основных электродинамических параметров СВЧ – структуры для ускорителя SVAAP. Препринт ОПЛ ТИСПР 2000–6. –Протвино, 2000. 11 с., 9 рис., табл. 2, библиогр.: 21

Представлены результаты исследований по разработке сверхпроводящей ускоряющей структуры для ускорителя SVAAP (Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes). Первая часть работы посвящена выбору геометрических размеров ячейки типа "TESLA–shape", далее произведен расчет геометрии ускоряющей структуры из девяти ячеек. Расчет геометрии сверхпроводящей ускоряющей СВЧ – структуры выполнен с помощью программ URMEL и PRUD0.

Abstract

Zvonarev I.A. et al. Calculation of Geometric Sizes and Basic Electrodynamics Parameters of RF Cavity for SVAAP. Preprint FPL TSSC 2000–6. – Protvino, 2000, – p. 11, figs 9, tables 2, refs.: 21

The investigation results on the development of a superconducting accelerating cavity for the accelerator SVAAP (Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes) have been presented. The first part of the paper deals with choosing on geometric sizes of a "TESLA–shape" cell, and then the geometry of the accelerating cavity consisting of 9 cells is calculated. The geometry calculation of the superconducting accelerating RF structure was carried out with URMEL and PRUD0 programs.

Введение

В связи с интенсивным развитием исследований в области использования высокочастотной сверхпроводимости в ускорительной технике [1-2], а также в связи с развитием исследований по высокотемпературной сверхпроводимости [3-6]. Отраслевая проблемная лаборатория Минатома России при ГНЦ ИФВЭ получила заказ на разработку сверхпроводящего ускорителя для облучения ВТСП керамики [7,8]. Этот ускоритель известен за рубежом как сверхпроводящий вертикальный ускоритель для прикладных целей (SVAAP). [9,10]. Ускоритель должен будет использоваться для облучения ВТСП–керамики, для стабилизации ее стехиометрического состава и обеспечения стабильной работы ускоряющих резонаторов.

Планируется проводить изучение электрофизических параметров сверхпроводящих ускоряющих СВЧ–резонаторов на основе ниобия и пленок ниобия (или ВТСП–керамики), нанесенных на медные оболочки сложной формы без сварных швов [11]. Первоначально проект был рассчитан на энергию 5 МэВ с током пучка 10 μ А при энергии инжекции 40 кэВ. В процессе работы над проектом увеличена энергия инжекции до 650 кэВ в связи с возможным использованием сверхпроводящего инжектора на 650 кэВ, разработанного в НИИ ЭФА.

Ускоряющей структурой для линейного ускорителя электронов были выбраны сверхпроводящая ускоряющая СВЧ–структура типа “TESLA-shape” из девяти ячеек и группирующая секция из трех ячеек. Параметры ускорителя приведены в табл. 1.

Таблица 1.

№	Параметры ускорителя	Величина
1	Максимальная энергия электронов на выходе, МэВ	7.5
2	Энергетический разброс частиц в сгустке протяженностью 20°, %	0.5
3	Энергия инжекции, кэВ	650
4	Ток ускоренных частиц, μ А	10
5	Рабочая частота, ГГц	2.95
6	Длина ускоряющей структуры, мм	670
7	Ускоряющее поле, МВ/м	12
8	Число ячеек: <ul style="list-style-type: none">• Группирующая секция• Ускоряющая СВЧ –структура	3 9

Первая часть данной работы посвящена выбору геометрии ускоряющей ячейки. Известно, что геометрия отдельной ячейки ускоряющей структуры определяется следующими элементами, изображенными на рис. 1а. Как видно из рисунка, граница ячейки описывается дугами окружностей и касательными к ним отрезками.

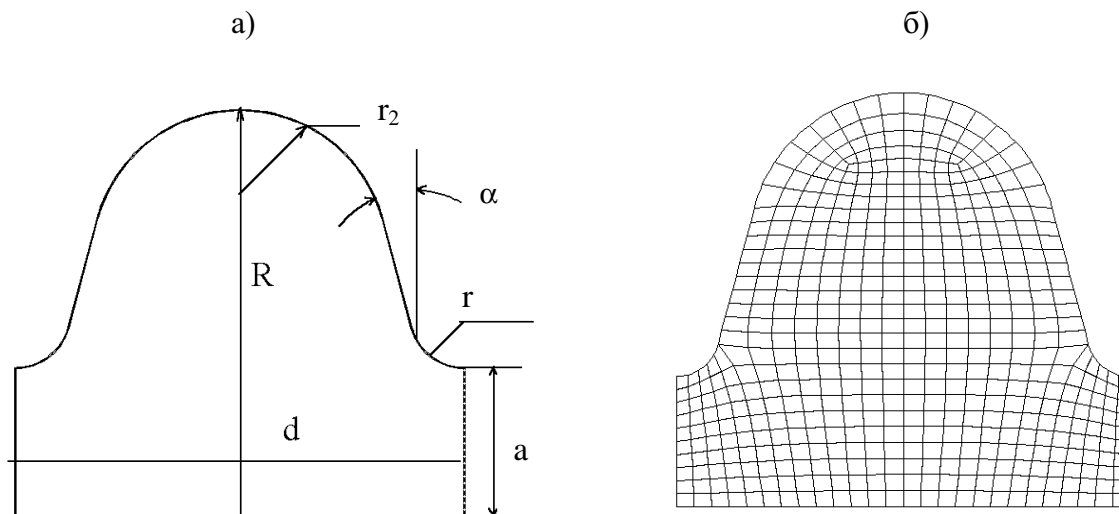


Рис. 1. Геометрия ячейки ускоряющей структуры (а) и ячейка с сеткой, используемой программой PRUD0 (б):
 a – радиус апертуры, r_1 – радиус скругления диафрагмы, r_2 – радиус скругления ячейки, R – внешний радиус ячейки, d – длина ячейки.

Для определения зависимостей электродинамических характеристик сверхпроводящей ускоряющей ячейки от геометрических размеров проведено численное моделирование электродинамических свойств ячеек. Расчеты выполнены в двумерном приближении с помощью комплекса эффективных вычислительных программ на основе метода конечных элементов PRUD0 и URMEL, позволяющих с высокой точностью рассчитать требуемые характеристики.

Комплекс программ URMEL, URMEL-T и PRUD-0 [12,13] предназначен для расчета азимутально-однородных мод в аксиально-симметричных резонаторах и периодических структурах, а также для расчета критических частот в продольно-однородных волноводах на IBM PC/AT. Расчет азимутально-однородных колебаний сводится к решению скалярной задачи на собственные значения. Для решения задачи на собственные колебания используется метод конечных элементов (МКЭ). Область решения покрывается конечноэлементной сеткой (в нашем случае используется генератор сетки, который строит регулярную сетку с четырехугольными квадратичными элементами (рис. 1.б)

1. Основные положения

Рассматриваемая конфигурация резонатора однозначно вычисляется из условия синхронизма для рабочего вида колебания (π -вид) $d = \beta\lambda/2$, где λ – длина волны рабочего вида колебания, β – относительная скорость ускоряемых частиц. Радиус внешнего скругления r_2 , следовательно, и радиус резонатора R определяются из условия настройки частоты рабочего колебания на заданную величину. Таким образом, независимыми параметрами являются: радиус апертурного окна, радиус скругления диафрагмы и угол наклона касательной. Выбор этих параметров отдельной ячейки проводился на основе численного анализа характеристик колебаний для различных соотношений размеров ячеек.

К наиболее важным электродинамическим характеристикам резонатора относятся:

Собственная добротность Q

$$Q = \frac{\omega W}{P},$$

где W – запасенная энергия; P – рассеянная мощность.

Эффективное шунтовое сопротивление ячейки $R_{ш.эф}$

$$R_{ш.эф} = \frac{\left[\int_0^L E_z(z) dz \right]^2 \cdot T^2}{P},$$

где T – коэффициент пролетного времени; P – мощность ВЧ потерь в ячейке; E(z) – распределение ускоряющего поля вдоль оси ячейки.

Коэффициенты перенапряжения:

$$\xi_e = \frac{E_{s\max}}{E_z \cdot T},$$

где $E_{s\max}$ – максимальная напряженность электрического поля на поверхности резонатора; $E_z T$ – темп ускорения

$$\xi_h = \frac{H_{s\max}}{E_z \cdot T},$$

где $H_{s\max}$ – максимальная напряженность магнитного поля.

2. Выбор значений независимых параметров для одной ячейки

Численный анализ характеристик колебаний в изображенной на рис.1 ячейке позволяет выбрать геометрию ячейки. Форма резонатора выбиралась из следующих условий:

минимума коэффициента перенапряженности по электрическому полю

ξ_e (понижение электронной эмиссии);

минимума коэффициента перенапряженности магнитного поля

ξ_h (условие термической стабильности);

максимума шунтового сопротивления;

технологии изготовления сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры на основе тонких пленок, напыленных на медные оболочки.

Радиус скругления диафрагмы (r_1) определяется выбором отношения величины ускоряющего промежутка к периоду ячейки (коэффициент зазора α). При исследовании электродинамических характеристик это соотношение изменялось в пределах от 0.1 до 0.9, причем остальные параметры (радиусы внутреннего скругления и радиус ячейки) изменялись в соответствии с поддержанием частоты основного вида колебаний равной 3 ГГц. На рис.2 представлен

внешний вид ячейки для разных соотношений ускоряющего промежутка к периоду ячейки, а на рис.3 – графики зависимостей коэффициентов перенапряжения от коэффициента зазора.

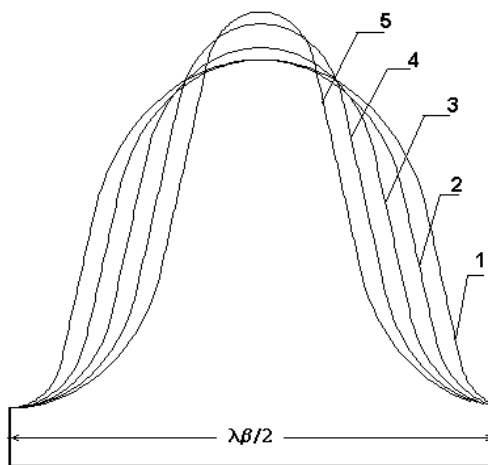


Рис. 2. Геометрия ячейки для различных коэффициентов зазора:
1) 0.8 2) 0.7 3) 0.6 4) 0.5 5) 0.4.

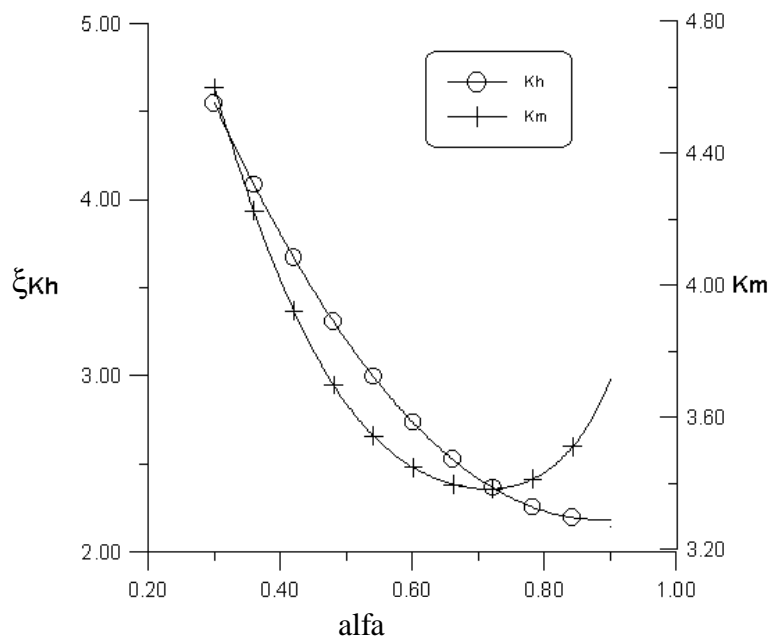


Рис. 3. Графики зависимостей коэффициентов перенапряжения от коэффициента зазора.

Из анализа зависимости основных электродинамических характеристик от параметра α видно, что условиям минимума коэффициентов перенапряженности отвечает значение $\alpha=0.74$, что соответствует значению $r_1=6.0$ мм.

Радиус апертурного окна (a) следует делать как можно меньше для повышения напряженности ускоряющего поля, но при этом будет расти затухание вводимой ВЧ-мощности, и

уменьшение радиуса апертуры приводит к уменьшению коэффициента связи рабочей полосы пропускания, что, в свою очередь, приведет к уменьшению разделения по частоте рабочего и ближайшего к нему колебаний.

Исходя из условий выбора геометрических размеров, можно сделать вывод, что радиус апертурного окна следует выбирать как можно меньше, так как при уменьшении a возрастает $R_{ш\cdot\epsilon\phi}$ и уменьшаются параметры перенапряжения ξ^e и ξ^h (рис. 4), но при этом наблюдается снижение добротности рабочего колебания. Кроме того, уменьшение радиуса приводит к понижению коэффициента связи рабочей полосы пропускания (k) и к уменьшению разделения по частоте рабочего и ближайшего к нему колебаний. Следовательно, компромиссом будет $a=16.6$ мм (рис. 4).

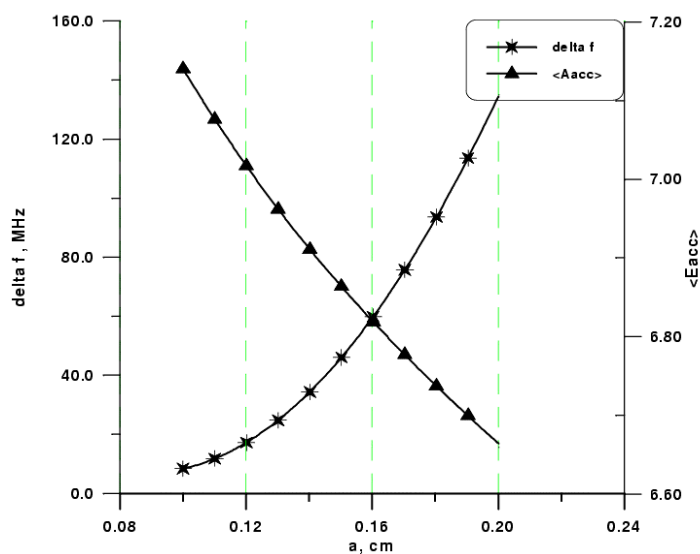


Рис. 4. Влияние изменения размера апертурного окна на ЭДХ ячейки.

Значение параметра α целесообразно выбирать небольшим, так как при этом происходит рост добротности рабочего колебания и эффективного характеристического сопротивления ячейки. Но очень малое значение угла наклона касательной не желательно в технологии изготовления СВЧ-структуры. Для ускоряющих ячеек ускорителя SVAAP этот параметр равен 15° .

3. Оценка влияния допусков изготовления на основные радиотехнические параметры ускоряющего волновода

Высокие требования к точности таких радиотехнических параметров ускоряющего резонатора линейного сверхпроводящего ускорителя, как частота рабочего вида колебаний и равномерность распределения ускоряющего поля по длине, ставят задачу определения влияния допусков изготовления ускоряющего резонатора на эти параметры.

Известно, что неточности изготовления приводят к двум нежелательным эффектам:

- изменяется скорость волны и появляется дополнительное скольжение сгустка относительно волны,
- уменьшается амплитуда ускоряющей волны.

Оба этих процесса приводят к уменьшению энергии на выходе ускоряющего волновода.

На рис.5 показано влияние погрешностей изготовления ячейки на резонансную частоту ячейки. Для расчета использовалась программа AZIMUT.

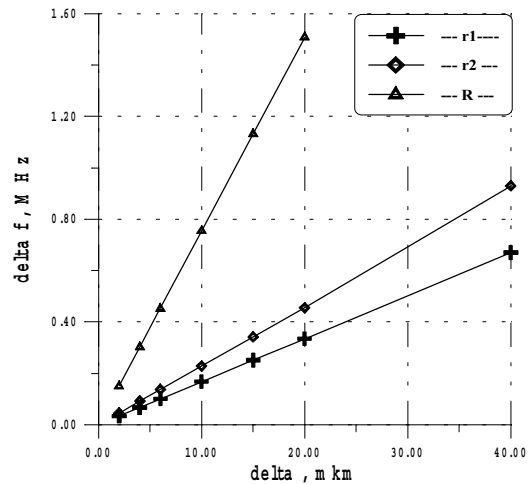


Рис. 5 Влияние погрешностей изготовления ячейки на изменение резонансной частоты.

Из графика видно, что основное влияние на изменение рабочей частоты оказывает значение радиуса резонатора, поэтому на этот параметр следует обратить особое внимание при изготовлении резонатора.

5. Расчет геометрических размеров ускоряющей структуры из девяти ячеек

Определение геометрических параметров основывалось на анализе результатов расчета динамики частиц [10] и сводится к определению радиусов ячеек и радиусов скругления диафрагм из условий настройки на заданную рабочую частоту и распределения электромагнитного поля на оси структуры.

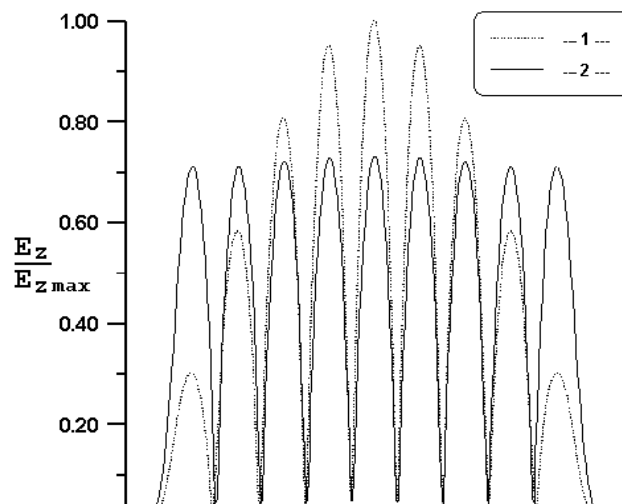


Рис.6. Распределение электромагнитного поля на оси ускоряющей структуры
1 — до настройки; 2 — после настройки.

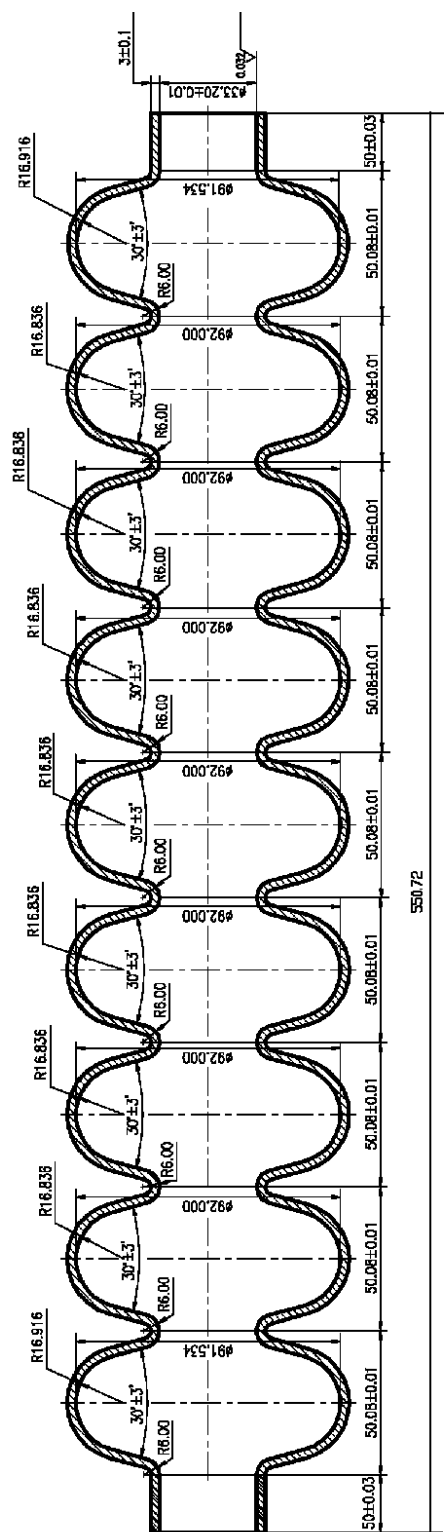


Рис.7. Геометрия ускоряющей СВЧ-структуры из 9 ячеек типа "TESLA-shape".

На рис.6 (кривая 1) показано распределение электрического поля на оси структуры из девяти одинаковых ячеек. Видно, что на распределение поля на оси структуры сильно влияет наличие запредельных волноводов на краях ускоряющей структуры. Настройка одинаковых амплитуд СВЧ-колебаний во всех ячейках проводилась изменением резонансных частот крайних ячеек.

Отличие реально существующего распределения электромагнитного поля от требуемого характеризуется величиной среднеквадратичного отклонения, которое не должно превышать $\sigma = 5\%$. Для обеспечения настройки распределения электромагнитного поля с точностью $\sigma = 5\%$ необходимо добиться настройки резонансных частот ячеек с точностью до 0.3 МГц. Геометрия ускоряющей структуры из девяти ячеек с точностью настройки $\sigma = 1\%$ показана на рис. 7.

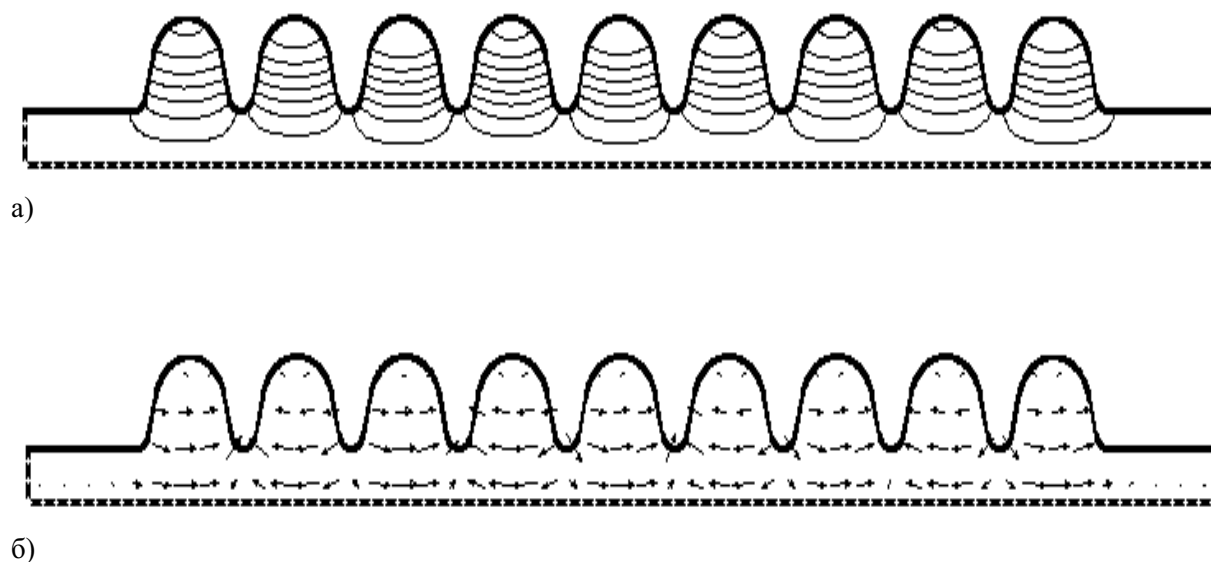


Рис. 8. Силовые линии электромагнитного поля для рабочего вида колебаний.

. Численный анализ характеристик колебаний без вариаций поля по азимуту произведен с помощью программы PRUD-0. Рабочая частота, соответствующая π -виду (рис. 8) колебаний, равна 2950 МГц. Электродинамические характеристики ускоряющей структуры сведены в табл. 2.

Результатом расчета стала изготовленная ускоряющая структура, показанная на рис.9. При разработке проекта ускорителя SVAAP [6–8] была обоснована технология изготовления сверхпроводящей СВЧ – структуры на основе Nb/Cu. Медная оболочка сложной формы без сварных швов изготавливается методом гальванопластического формообразования, разработанным в ОПЛ ТИСПР еще в 1993 году [9]. Сверхпроводящее покрытие наносится методом аксиального магнетронного распыления на специальном стенде [5,11], разработанном и изготовленном в указанной лаборатории. В настоящее время получена ускоряющая структура с толщиной медной оболочки 2.5–3 мм и сверхпроводящим покрытием толщиной 3–5 мкм.

таблица 2

№	Наименование	Значение
1	Число ячеек	9
2	Рабочий вид колебаний	π
3	Собственная добротность резонатора Q_0	$1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10}$
4	Рабочая частота, МГц	2950
5	Входная мощность, Вт, при номинальном уровне ускоряющего поля и токе пучка 10 мкА: при добротности $Q_0=1 \cdot 10^{10}$ при добротности $Q_0=1 \cdot 10^9$	51.7 67.2
6	Мощность потерь, Вт, при номинальном уровне ускоряющего поля без пучка: при добротности $Q_0=1 \cdot 10^{10}$ при добротности $Q_0=1 \cdot 10^9$	1.72 17.22
7	Коэффициент связи при токе пучка 10 мкА без пучка при $Q_0=1 \cdot 10^{10}$ без пучка при $Q_0=1 \cdot 10^9$	1..1.2 30.4 3.9
8	Отношение шунтового сопротивления к собственной добротности резонатора, $R_{ш}/Q_0$, Ом	187
9	Коэффициент пролетного времени T	.7445
10	Среднеквадратичное отклонение амплитуды электрического поля на оси структуры, σ , %	1

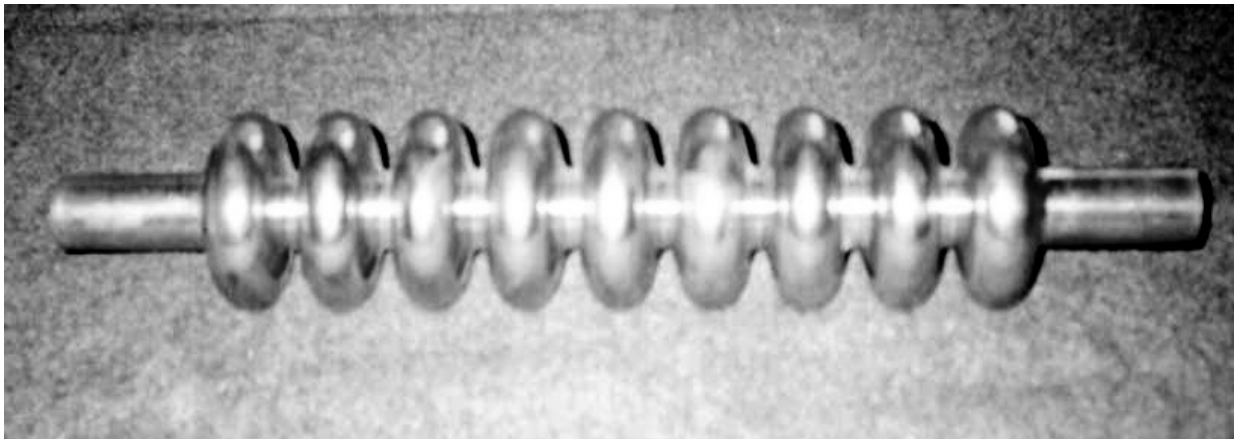


Рис.9. Ускоряющая СВЧ-структура из 9-и ячеек типа “TESLA-shape”.

Предварительные испытания, проведенные в Восточно-сибирском НИИ физико-технических и радиотехнических измерений, показали, что ускоряющая структура имеет резонансную частоту 2943 МГц и собственную добротность $2.3 \cdot 10^9$.

Список литературы

1. **Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А.** Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ- структуры., М., Энергоатомиздат, 1981, 208 с.
2. **Padamsee H., Knobloch J., Hays T.** RF Superconductivity for Accelerators. John Wiley & sons, inc. New York, NY 10158-0012, ISBN0471-15432-6.
3. **Michalke A.** Messungen zur Hochfrequenzsupraleitung an hochwarmeleitfähigem Niob und $YBa_2Cu_3O_7$. – Preprint Wuppertal University WU D-88-1, 48 p.
4. **Piel H., Hein M., Klein N., Michalke A., Muller G., Ponto L.** Superconducting Perovskites in Microwave Fields.- Preprint Wuppertal University WUB-88-3, 14 p.
5. **Chernov M., Kiselev V., Orlova L., Sevryukova L., Vasiliev A., Zvonarev I.** First Experimental Results for High Tc Magnetron Sputtering on the Working Surface RF Accelerating Cavities. - In: Proc. of the 7-th Workshop on RF Superconductivity.- Gif sur Yvette, France, 1995, v.2, p. 503-508.
6. **Васильев А.А., Войналович О.А., Глазков А.А., Звонарев И.А., Коляскин А.Д., и др.** Состояние работ по проекту сверхпроводящего линейного ускорителя электронов для прикладных целей. – В кн.: XV совещание по ускорителям заряженных частиц. – ИФВЭ, Протвино, 1990, т. 2, с. 401- 406.
7. **Vasiliev A.A., Voinalovich O.A., Clazkov A.A., Koliaskin A.D., Ponomarenko A.G., Sevryukova L.M., Zvonarev I.A.** Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes (SVAAP). – Proc. of the European Conference on Accelerator Linac. EPAC-96, Sitges (Barcelona), Spain, 1996, June 10-14, v. 1, p. 762-764.
8. **Komarova V.N., Sevryukova L.M., Tchernov M.P., Zvonarev I.A.** The Influence of the Injection Energy on the Accelerating RF Structure Geometry and Beam Dynamics SVAAP.- In: Proc. of the 8-th Workshop on RF Superconductivity. –Abano Terme (Padya), Italy, 6-10 Oct. 1997, v. 1, p. 269-275.
9. **Ageev A.I., Alimov V.V., Sevryukova L.M., Voinalovich O.A.** Development of Production Technology for Weldless Copper Shells of Superconducting Cavities. – In: Proc. of the 6-th Workshop on RF Superconductivity. – CEBAF, Newport News, USA, 6-10 Oct. 1993, v. 2, p. 802-808.
10. **Ageev A.I., Matveeva O.V., Sevryukova L.M., Voinalovich O.A.** Study of Contamination and Cleaning Kinetics of Nb Superconducting Cavity Working Surface by Means of Nuclear & Physical Methods. – In: Proc. of the Workshop for Fabrication and Accelerating Technology.- TJNAF, Newport News, USA, 26-27 March, 1997, 3/7.
11. **Philipov D.L., Sevryukova L.M., Shatokhin V.L., Tchernov M.P.** Superconducting Material Films Created by Means of the Axial and Planar Magnetron Sputtering Methods. – In: Proc. of 14-th International Vacuum Congress (VVC-14), Birmingham, UK, 31 Aug. – 4b Sept. 1998.
12. **Абрамов А.Г., Дайковский А.Г.** Пакет программ PRUD-0 для расчета ускоряющих структур. Препринт ИФВЭ 83-3, Серпухов, 1983.
13. **Абрамов А.Г., Дайковский А.Г., Португалов Ю.И.** и др. Модификация пакета программ PRUD-0 для расчета периодических структур. Препринт ИФВЭ 83-178, Серпухов, 1983.
14. **Бережной И.В., Гонин Н.Е.** Электродинамические характеристики рабочего колебания сверхпроводящего резонатора. Препринт ИЯИ, П-697, Москва, 1991.

Рукопись поступила 9 марта 2000 г.

И.А. Звонарев, А.Д. Рябов, Л.М. Севрюкова..
Расчет геометрических размеров и основных электродинамических параметров СВЧ-структуры
для ускорителя SVAAP.

Оригинал макета подготовлен с помощью системы Word.
Редактор Н.В. Ежела

Подписано к печати	09.03.2000	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 1.4.	Уч.– изд.л. 1.1.	Тираж 130.	Заказ 57.
Индекс 3649.			

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, 142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2000-6

ИФВЭ

2000
