

Геометрия сверхпроводящей ускоряющей структуры и динамика пучка ускорителя SVAAP

И.А. Звонарев, В.В. Комарова, Л.М. Севрюкова,
Отраслевая Проблемная лаборатория ТИСПР при ГНЦ ИФВЭ, Протвино, Россия
В.М. Максимов,
Минатом РФ, Москва, Россия

Введение

В настоящее время в Отраслевой проблемной лаборатории разрабатывается проект ускорителя SVAAP. Ускоритель будет использоваться для облучения ВТСП керамики для стабилизации ее стехиометрических свойств.

Первоначально проект был рассчитан на энергию 5 МэВ с током пучка 10 мкА при энергии инжекции 40 кэВ [1, 2]. Впоследствии энергия инжекции повысилась до 250 кэВ [3] из-за технологических трудностей в изготовлении сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры на частоту 3 ГГц на основе сверхпроводящих пленок, напыленных на медные оболочки без сварных швов. Более того, возникла необходимость повысить энергию пучка на выходе ускорителя до 7.5 МэВ в непрерывном режиме.

1. Схема ускорителя SVAAP

Схема ускорителя SVAAP представлена на рис. 1. Авторы проекта SVAAP принимают участие в проекте “Демонстрационная модель сверхпроводящего электронного линейного ускорителя”, проводимом Институтом ядерной физики МГУ, Объединенным институтом ядерных исследований, Институтом физики высоких энергий и Московским радиотехническим институтом [2].

2. Система инжекции ускорителя SVAAP

Ускоритель SVAAP подразделяется на две части – горизонтальную и вертикальную. Горизонтальная часть ускорителя включает в себя инжектор, оптическую систему, призматический резонатор чоппера, коллимирующую щель и поворотный магнит, вертикальная – коллимирующие щели, оптическую систему и криостат со сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структурой из 14 ячеек с энергией на выходе 7.5 МэВ.

Инжектор ускорителя включает электронную пушку и электростатическую колонну. Электронная пушка дает непрерывный пучок электронов с энергией 40 кэВ и поперечным эмиттансом 6 мм · мрад. Электронная пушка планируется с длинным фокусом, кроссовер пушки может изменяться в пределах 1 м. Относительно низкая энергия позволяет упростить конструкцию и повысить стабильность работы и системы питания электронной пушки.

2.1. Инжектор

Для того чтобы ускорить пучок до требуемой энергии 250 кэВ было предложено использовать электростатическую колонну по типу TESLA Test Facility Injector [6].

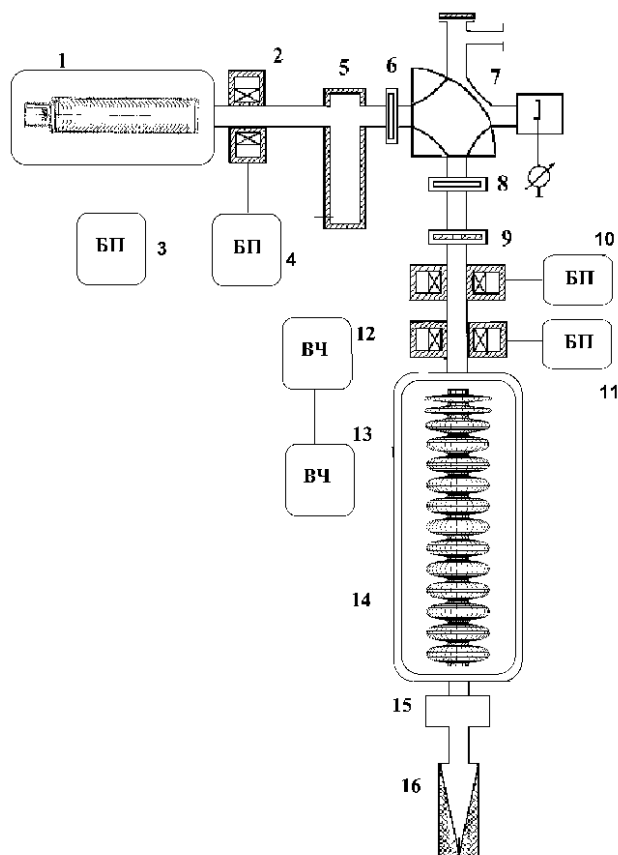


Рис. 1. Схема ускорителя SVAAP:
 1 – электронная пушка и электростатическая колонна; 2 – соленоид; 3 – призматический резонатор чоппера; 4 – коллимирующие щели; 5 – поворотный магнит; 6, 7 – коллимирующие щели; 8, 9 – соленоиды; 10 – криостат; 11 – сверхпроводящая ускоряющая СВЧ-структура; 12 – система диагностики пучка; 13 – коллектор.

Электронная пушка и электростатическая колонна разрабатываются совместно Московским радиотехническим институтом и Отраслевой проблемной лабораторией при ИФВЭ.

Предполагается использовать для питания пушки и колонны два источника питания – по 40 и 300 кэВ соответственно. Технические характеристики источников питания приведены в табл. 1. На выходе электростатической колонны ток пучка должен составлять приблизительно 2 мА для того, чтобы получить пучок с током 10 мкА на выходе из сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры.

Таблица 1. Технические характеристики источников питания для электронной пушки на энергию 40 кэВ.

№	Технические характеристики	Величина
1	Размер, мм	160×220×400
2	Рабочая мощность, Вт	30
3	Выходное напряжение, кВ	40
4	Ток нагрузки, мА	0.5
5	Пульсации выходного напряжения, %	0.1

2.2. Система формирования пучка

Система формирования пучка была выбрана на основе расчета динамики пучка на энергию инжекции 250 кэВ. Система включает в себя 3 фокусирующие линзы, резонатор чоппера, поворотный магнит и 3 коллимирующие щели. В первоначальной схеме системы инжекции в качестве фокусирующих элементов были выбраны электростатические линзы, но в результате повышения энергии инжекции они были заменены соленоидами из-за высокого (50 кВ) потенциала электростатических линз, необходимого для данной энергии. В процессе пуско-наладочных работ планируется использовать приборы диагностики пучка.

На выходе инжектора электронный пучок имеет диаметр приблизительно 1 мм и расходимость 10 мрад и фокусируется соленоидальной линзой перед резонатором чоппера. Резонатор чоппера формирует банчи (сгустки) фазовой протяженностью 20° из непрерывного пучка электронов с током 2 мА, для того чтобы захватить практически все частицы и ускорить их без потерь тока.

Описание резонатора чоппера и его система питания было представлено в [4]. Основные параметры призматического резонатора чоппера показаны в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры резонатора чоппера.

№	Параметр	Величина
1	Тип волны	H101
2	Длина стенок, мм	76
3	Угол расходимости пучка, рад	0.2
4	Мощность потерь, кВт	0.85
5	Электрическое поле в центре резонатора, кВ/см	20
6	Добротность	1.04×10^4

Перед чоппером пучок имеет азимутальную симметрию, после чоппера аксиальная симметрия нарушена и сгустки протяженностью 20° формируются из нижней части пучка.

После чоппера основная часть пучка попадает на вертикальную коллимирующую щель перед поворотным магнитом, параллельным оси X. Расстояние между коллиматором и поворотным магнитом составляет примерно 6 мм. Все коллиматоры имеют ширину по оси Y 2.5 мм, а по оси Z – около 5 мм. Оставшаяся часть пучка проходит через поворотный магнит, поворачивается на 90° и падает на горизонтальную коллимирующую щель в вертикальной части ускорителя. При расчетах канала инжекции поле поворотного магнита предполагалось равным 0.005 Т, размеры полюсов 200 мм и зазор 25 мм [7].

Поворотный магнит работает так же, как трубка дрейфа, и позволяет центрировать пучок с вертикальной осью канала. Коллиматоры в вертикальной части ускорителя расположены на расстоянии 65 и 130 мм от поворотного магнита соответственно. Вторая горизонтальная коллимирующая щель может быть заменена монитором положения пучка во время пуско-наладочных работ. Основная часть потерь частиц сосредоточена на этих коллиматорах. Две соленоидальные линзы в вертикальном канале согласуют эмиттанс пучка с каналом сверхпроводящей ускоряющей

СВЧ-структуры. Цилиндр Фарадея будет помещен между коллимирующей щелью и первым из двух соленоидов для измерения длины банча перед сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структурой. Вакуумная камера поворотного магнита с четырьмя окнами дает возможность исследовать работу всех элементов в горизонтальной части ускорителя в независимом режиме, проводить оптическую юстировку ускоряющей структуры, соленоидов и коллиматоров, а также проводить вакуумную откачку элементов формирования пучка.

3. Расчет фокусирующего канала

На рис. 2 представлена схема фокусирующего канала. При расчете траекторий принимались во внимания 3 соленоидальных линзы и поворотный магнит. Входные параметры канала инжекции показаны в табл. 3. Параметры фокусирующих элементов были выбраны в соответствии с результатами расчетов динамики пучка канала инжекции. На рис. 3 представлены графические результаты расчетов. X- и Y- пакеты пучка изображены на фоне фокусирующих элементов и апертуры. Фазовые портреты представлены на рис. 3 в плоскостях (X,X'), (Y,Y') и (X,Y).

Таблица 3. Параметры системы инжекции

№	Параметр	Величина
1	Энергия инжекции, кэВ	250
2	Эмиттанс пучка, мм×мрад	6
3	Апертура, м	0.02
4	Ток пучка, А	0.001
5	Длина канала, м	1.323
6	Расстояния вдоль канала, м	
	1-1	0.10
	2-2	0.17
	3-3	0.343
	4-4	0.10
	5-5	0.25

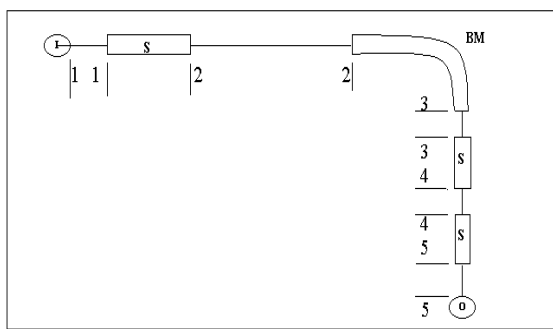


Рис 2. Схема фокусирующего канала ускорителя SVAAP (S - соленоиды, BM – поворотный магнит, I – входная точка, O – выходная точка, 1-1...5-5 – расстояния между элементами (см. табл. 1)).

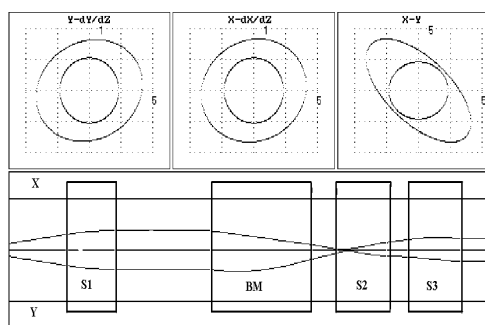


Рис 3. Фазовые эллипсы и огибающие пучка.

Основные параметры фокусирующих элементов, полученные как результат оптимизации фокусирующего канала, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры соленоидов.

№	Соленоид	Длина, м	Поле, Т
1	S1	0.12	0.0082
2	S2	0.12	-0.0181
3	S3	0.12	0.0084

4. Выбор геометрии сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры

В ходе оптимизации сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры принималось во внимание следующее:

- ◆ влияние энергии инжекции на геометрию и динамику пучка;
- ◆ влияние длины ускоряющего промежутка на коэффициент перенапряженности магнитного и электрического полей и динамику пучка;
- ◆ технология изготовления сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры на основе тонких пленок, напыленных на медные оболочки без сварных швов.

При разработке технологии сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры с энергией инжекции 40-50 кэВ [1, 2] мы столкнулись с трудностями из-за относительно малой величины зазора между ячейками для первых трех ячеек. После повышения энергии инжекции до 250 кэВ размеры ячеек увеличились на 51.4% [3], что позволило использовать технологию сверхпроводящей ускоряющей СВЧ структуры на основе сверхпроводящих пленок, напыленных на медные оболочки без сварных швов.

Оптимизация геометрических размеров отдельной ячейки проводилась на основе численного анализа характеристик колебаний для различных отношений размеров ускоряющего промежутка к периоду ячейки. В процессе исследования электродинамических характеристик этот параметр варьировался от 0.1 до 0.9, остальные параметры изменялись таким образом, чтобы частота 3 ГГц оставалась постоянной для основных типов колебаний. На рис. 4 показаны зависимости коэффициентов перенапряженности электрического (а) и магнитного (b) полей от параметра Gap/Period (зазор к периоду). Оптимальная величина параметра Gap/Period составляет 0.78.

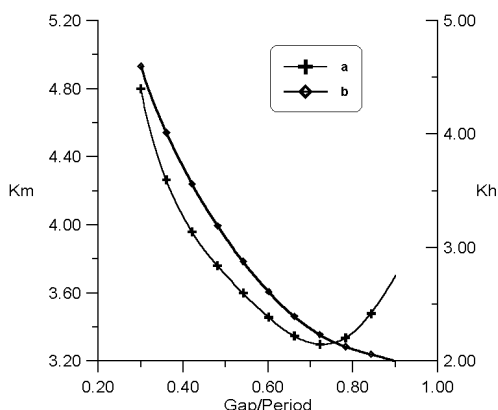


Рис. 4. Зависимость коэффициента перенапряженности электрического (а) и магнитного (b) полей от параметра Gap/Period.

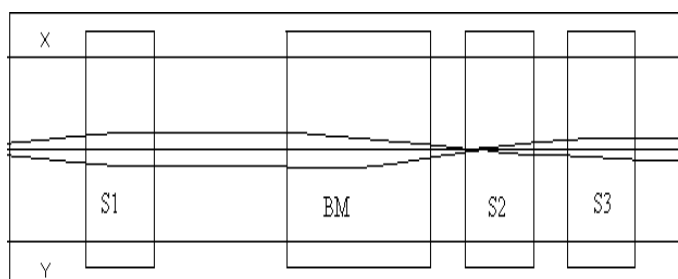


Рис. 5. Огибающие пучка электронов вдоль пещеры канала инжекции.

В результате выбора геометрии, энергии инжекции и параметра Gap/Period была получена оптимальная конфигурация ускоряющей СВЧ структуры, которая и обеспечивает необходимую динамику пучка.

5. Расчет динамики электронного пучка

Расчет динамики пучка ускорителя SVAAP проводился для канала инжекции, который включает 3 соленоида, поворотный магнит [5] и ускоряющую структуру в вертикальном криостате.

На рис. 5 показаны огибающие пучка вдоль канала инжекции для плоскостей X и Y.

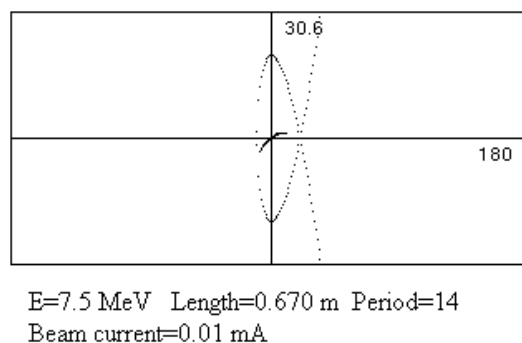
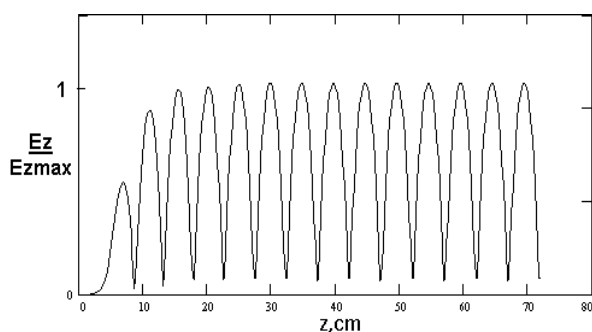


Рис. 6. Распределение ускоряющего поля вдоль сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры.

Рис. 7. Фазовые портреты пучка на выходе сверхпроводящей ускоряющей СВЧ-структуры.

Распределение амплитуд ускоряющего поля рассчитывалось вдоль канала структуры из 14 ячеек, в котором пучок ускоряется до 7.5 МэВ. Нормализованная зависимость электрического поля E_z вдоль ускоряющей структуры дана на рис. 6.

Ячейки ускоряющей структуры подразделяются на 2 типа: в первых трех ячейках частицы группируются и ускоряются до 0.7 МэВ, в последующих 11 ячейках пучок ускоряется до номинальной величины 7.5 МэВ. На рис. 7 показаны результаты продольного движения пучка на выходе 14-й ускоряющей ячейки при энергии инжекции 250 кэВ и оптимальной величины параметра Gap/Period 0.78.

Параметры ускоряющей СВЧ-структуры, полученные на основе расчетов динамики пучка, приведены в табл. 5.

Таблица 5. Параметры ускоряющей структуры.

№	Параметр	Величина
1	Максимальная энергия выхода электронов, МэВ	7.5
2	Энергетический разброс частиц в ступке протяженностью 20°, %	0.5
3	Энергия инжекции, кэВ	250
4	Ток ускоренных частиц, мкА	10
5	Рабочая частота, ГГц	3
6	Длина ускоряющей структуры, мм	670
7	Ускоряющее поле, МВ/м	12
8	Число ячеек	14

6. Технология СВЧ-структуры

Авторы проекта намереваются изготовить сверхпроводящую ускоряющую СВЧ-структуру, используя ресурсосберегающую технологию. Сложная конфигурация ускоряющей СВЧ-структуры из 14 ячеек и требование на изготовление этой структуры без сварных швов приводят к использованию метода гальванопластического формообразования медных оболочек, который разрабатывается в лаборатории с 1993 г. [6], а также аксиального магнетронного распыления и планарного магнетронного распыления пленочных материалов.

Наше оборудование для магнетронного распыления позволяет напылять сверхпроводящие пленки на структуру длиной до 720 мм.

Совместно с МИФИ мы разрабатываем технологию планарного магнетронного распыления. Оборудование позволяет напылять пленки на структуры длиной до 500 мм.

На рис. 8 представлена ускоряющая структура с оптимальной геометрией и структура из 14 ячеек, полученная описанным выше методом.

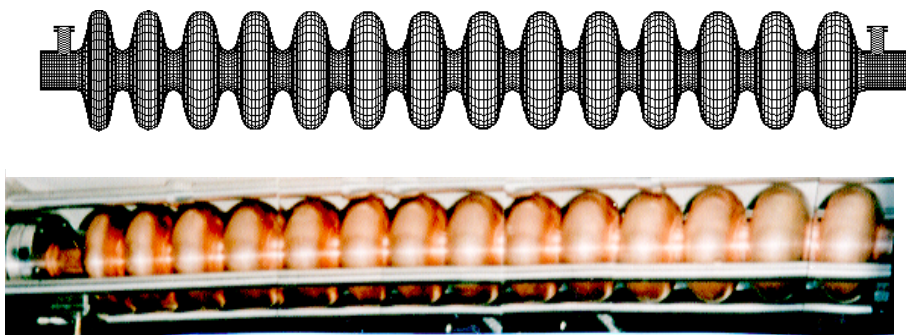


Рис. 8. Сверхпроводящая ускоряющая СВЧ-структура.

Авторы надеются в будущем получить ускоряющее поле до 12 МВ/м в такой структуре.

Список литературы

[1] A.A. Vasiliev et al. Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes (SVAAP) – In: Proc of the 7-th Workshop on RF Superconductivity, Gif sur Yvette, France, 1995, v.2, p. 683.

[2] A.A. Vasiliev et al. Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes (SVAAP). – In: Proc. of the European Conference on Accelerator Linac (EPAC-96), Sitges (Barcelona), Spain, 1996, v.1, p. 762-765.

[3] N.I. Balalykin, V.M. Belugin, L.M. Sevryukova, V.I. Shvedunov. Demonstration Model of the Superconducting Electron Linac. – In: Proc. of the European Conference on Accelerator Linac (EPAC-94), London, Great Britain, 1994, v.1, p. 796-771.

[4] A.A. Vasiliev, O.A. Voinalovich, A.A. Glazkov, A.D. Koliaskin, A.G. Ponomarenko, L.M. Sevryukova, I.A. Zvonarev. Superconducting Vertical Accelerator for Applied Purposes (SVAAP). – In: Proc. of the European Conference on Accelerator Linac (EPAC-96), Sitges (Barcelona), Spain, 1996, v.1, p. 762-765.

- [5] V. Komarova, L. Sevryukova, M. Tcheronv, I. Zvonarev. The Influence of the Injection energy on the Acceleration RF Structure Geometry and the beam Dynamics of SVAAP. – To be published in: Proc. of the 8th Workshop on RF Superconductivity, Abano-Terme (Padova), Italy, 1997.
- [6] V.V. Komarova, L.M. Sevryukova, I. A. Zvonarev, O.A. Voinalovich. The Superconducting Accelerating Structure Geometry and Beam Dynamics of SVAAP. To be published in Proc. of EPAC-98, Stockholm, Sweden, 1998.
- [7] J. Fusellier, M. Jablonka, J.M. Joly, Y. Lussignol, M. Bernard, J.C. Bourdon, T. Garvey, M. Omeich, J. Rodier, N. Solyak. First Tests of the 250 keV Electron Source and Beamline for the TESLA Test Facility Injector. - In: Proc. of the European Conference on Accelerator Linac (EPAC-96), Sitges (Barcelona), Spain, 1996 .
- [8] V. Komarova, L. Sevryukova, et al. The Influence of the Injection energy on the Acceleration RF Structure Geometry and the beam Dynamics of SVAAP. – To be published in: Proc. of the 8th Workshop on RF Superconductivity, Abano-Terme (Padova), Italy, 1997.
- [9] V. Komarova, L Sevryukova, et al. The Injection System Calculation for SVAAP.- In this conference.
- [10] A. Ageev et al. 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, oct. 1993, v.2, p. 802.