

Форинжектор ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-5. Состояние работ

А.В. Александров, М.С. Авилов, П.А. Бак, О.Ю. Баженов,
Ю.М. Боймельштейн, А.Г. Чупыра, Р.Х. Галимов, К.В. Губин,
Н.С. Диканский, И.В. Казарезов, О.В. Корозников, А.Н. Косарев,
Н.Х. Кот, Д.Е. Куклин, А.А. Кулаков, Н.А. Кузнецов,
П.В. Логачев, П.В. Мартышкин, Л.А. Мироненко, А.В. Новохатский,
В.М. Павлов, А.М. Резаков, Ю.И. Семенов, А.Н. Шарапа, А.В. Шемякин,
С.В. Шиянков, Б.А. Скарбо, А.Н. Скринский, Ю.Ф. Токарев, С.Б. Вассерман
Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера Новосибирск, Россия.

В настоящее время в ИЯФ им. Г.И.Будкера активно ведутся работы по созданию электрон-позитронных коллайдеров с рекордной светимостью. Для таких машин необходим высокопроизводительный инжекционный комплекс, который и создается в ИЯФ. Комплекс включает в себя форинжектор, производящий электронные и позитронные сгустки и ускоряющий их до энергии 510 МэВ, а также накопитель-охладитель. Данный доклад представляет общую схему форинжектора и состояние работ на нем.

Введение

Энергия пучков на выходе форинжектора соответствует рабочей энергии ϕ – фабрики (510 МэВ) [1]. Для обеспечения одновременной работы ϕ – фабрики и всего комплекса ВЭПП-5 с проектной светимостью требуется производить $(5 \div 10) \cdot 10^{10}$ электронов и позитронов в секунду. Важнейшие параметры форинжектора приведены в таблице 1.

Таблица 1: Важнейшие параметры форинжектора.

Энергия пучков	510 МэВ
Число электронов в сгустке	10^{11}
Число позитронов в сгустке	10^9
Частота следования сгустков	50 Гц
Разброс энергий	
в электронном сгустке	$\pm 1\%$
в позитронном сгустке	$\pm 3\%$
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	~ 63 МВт
Число клистронов	4
Полная потребляемая мощность	≈ 1 МВт

Общая схема

Основные компоненты форинжектора показаны на рис. 1. Это термоэмиссионная электронная пушка, субгармонический группирователь, электронный линейный ускоритель на 300 МэВ, 180-градусный изохронный поворот, конверсионная система, СВЧ-фотопушка и основной линейный ускоритель на энергию 510 МэВ [2, 3].

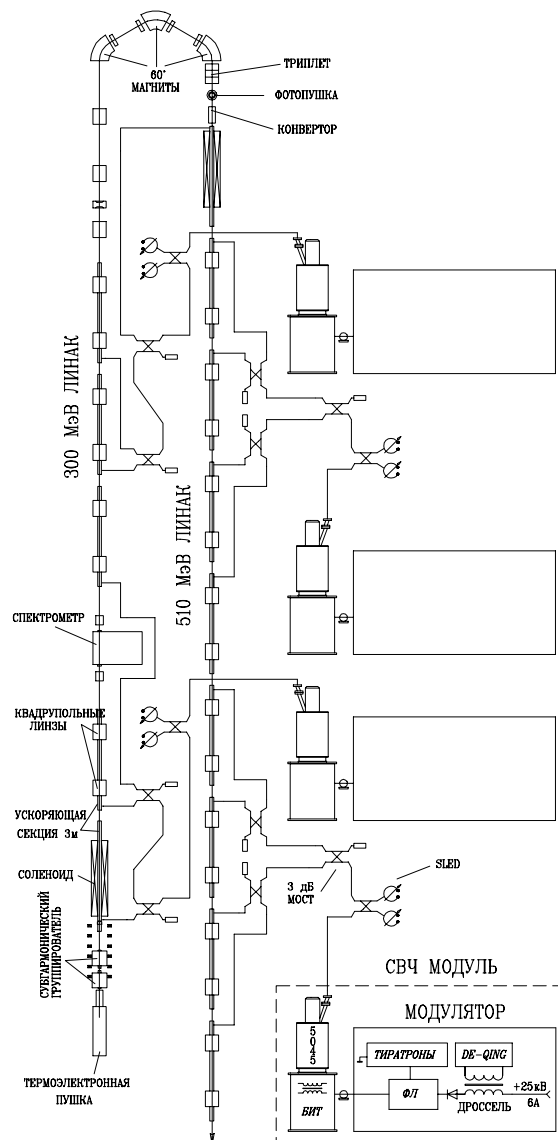


Рис. 1: Общая схема форинжектора.

Термоэмиссионная триодная пушка с напряжением в 200 кВ производит электронные сгустки длительностью 2 нс (ширина на полувысоте), импульсным током 10 А и эмиттансом не более чем 10^{-2} см·рад. Далее сгусток поступает в субгармонический группирователь, работающий на 16-й субгармонике основной частоты линейного ускорителя (178.5 МГц). В состав группирователя входят два четвертьволновых ре-

зонатора с промежутками дрейфа. Постоянство поперечных размеров пучка в процессе группировки обеспечивается нарастающим продольным магнитным полем. После субгармонического группирователя в 10 раз сжатый в продольном направлении сгусток поступает в короткую группирующую секцию [5], где он сжимается еще в 10 раз. Таким образом, система компрессии формирует на входе в ускоряющую секцию короткий интенсивный сгусток длительностью 20 пс с импульсным током в 1 кА. Такая длина сгустка необходима для обеспечения малого энергетического разброса ($\pm 1\%$) в процессе дальнейшего ускорения. К настоящему времени закончены производство и сборка 200 кВ пушки, резонаторов и генераторов субгармонического группирователя, ведется монтаж модулятора, системы задающего генератора и синхронизации.

Линейный ускоритель на 300 МэВ состоит из 5 ускоряющих секций и производит интенсивный электронный сгусток, необходимый для получения позитронов. Основной линейный ускоритель состоит из 9 секций, ускоряющих как позитронные, так и электронные сгустки до энергии 510 МэВ. Ускоряющая секция представляет собой 3-метровую структуру с постоянным импедансом, работающую на бегущей волне (мода $2\pi/3$). Фокусировка пучков осуществляется полем соленоидов для первых секций каждого ускорителя, и полями двух квадрупольных линз для каждой из остальных секций. Для обеспечения максимального захвата частиц в ускоряемый сгусток первые секции обоих ускорителей имеют больший темп ускорения (25 МэВ/м), при 18 МэВ/м в остальных секциях. В настоящий момент все магнитные элементы форинжектора находятся в производстве, причем половина из них уже изготовлена.

Электронный пучок на энергии 300 МэВ проходит 180-градусный изохронный поворот в горизонтальной плоскости, который состоит из трех 60-градусных поворотных магнитов и 4 квадрупольных линз. Эта система дает незначительное (около 10%) увеличение продольных размеров сгустка с энергетическим разбросом $\pm 2\%$ при прохождении поворота. Далее электронный сгусток фокусируется триплетом на конверсионную мишень. С учетом особенностей конверсионной мишени, согласующего устройства и первой ускоряющей секции выходной коэффициент конверсии может составить $3 \div 6\%$. Сейчас идет макетирование согласующего устройства и разрабатывается конструкция конверсионной мишени.

Источником электронов для линейного ускорителя на 510 МэВ станет СВЧ-фотопушка [6], расположенная между фокусирующим триплетом и конверсионной системой. Планируется получение с фотопушки поляризованных электронных пучков. К текущему моменту изготовлен прототип СВЧ-фотопушки с GaAs фотокатодом, успешно проведены вакуумные и СВЧ-испытания прототипа на большом уровне мощности. Поступавшая в ускоряющий резонатор мощность составляла 1 МВт, что соответствует амплитуде электрического поля в резонаторе 500 кВ/см. Величина давления остаточного газа, полученного в фотопушке, составила 10^{-11} мм рт. ст. В настоящее время готовятся полномасштабные испытания катодного узла с GaAs фотокатодом в ускоряющем поле СВЧ-резонатора.

СВЧ-питание 14 ускоряющих секций обеспечивают 4 клистронных поста, базирующихся на клистронах 5045 (СЛАК, США). Система умножения мощности позволяет получать необходимые темпы ускорения в нескольких секциях, запитанных от одного клистрона. При этом в секцию с высоким темпом ускорения направляется половина полной СВЧ-мощности клистронного поста, вторая же половина поровну делится между последующими двумя секциями. Распределение СВЧ-мощности осуществляет-

ся с помощью 3 дБ направленных ответвителей. Сейчас идет производство элементов вакуумного волноводного тракта, 4 систем умножения мощности и 14 ускоряющих секций.

Клистронный пост

Клистронный пост состоит из клистрона 5045 и высоковольтного импульсного модулятора. Высоковольтный импульс ($\simeq 24$ кВ) для импульсного (1:15) трансформатора клистрона производится модулятором, созданным в ИЯФ. Он состоит из высоковольтного выпрямителя, зарядного дросселя, формирующей линии и тиратронов [4]. К настоящему времени изготовлен и полностью прошел испытания в номинальном режиме один из четырех клистронных постов на базе американского клистрона 5045. Клистрон стабильно работает во всем доступном ему диапазоне частот. При испытаниях клистронного поста были проверены системы контроля и защиты клистрона. В данный момент идет сборка второго модулятора для клистрона 5045, испытаны его отдельные элементы.

Прототип форинжектора

Прототип форинжектора был создан для совместных испытаний его основных элементов на высоких значениях СВЧ-мощности (см. рис. 2).

Электронный пучок на энергии 100 кВ поступает из термоэмиссионной пушки в систему субгармонического группирователя, далее, проходя через короткую группирующую секцию, он попадает в ускоряющую структуру. Фокусировка пучка аналогична фокусировке в форинжекторе: набор токовых колец на группирующей системе и 2 кГц соленоид на секции. Ускоренный пучок фокусируется дублетом на вход 180-градусного спектрометра или на цилиндр Фарадея (при выключенном магните спектрометра).

Источником СВЧ-мощности прототипа является клистронный пост на базе отечественного клистрона КИУ-12 (рабочая частота 2797 МГц, длительность импульса 2,5 мкс, выходная импульсная мощность до 18 МВт). В СВЧ-тракте перед секцией расположена система умножения мощности, позволяющая достичь требуемого темпа ускорения в структуре. Необходимый фазовый сдвиг между ускоряющей структурой и группирователем осуществляется механическим фазовращателем, выполненным в виде отрезка волновода с изменяемой геометрией стенок. СВЧ-мощность поступает в группирователь из основного тракта через направленный ответвитель и перестраиваемый аттенуатор.

Отдельные элементы прототипа были испытаны перед сборкой. Так, электронная пушка способна производить сгустки длительностью 2,5 нс (ширина на полувысоте), пиковым током до 2,0 А и энергией до 100 кэВ. При этом эмиттанс пучка не превышал 10^{-2} см·рад. С помощью данного источника были испытаны мониторы положения и профиля пучка. Группирующая секция прототипа состоит из 4 ячеек и работает на обратной бегущей волне. Группирователь согласован с подводным волноводным трактом с КСВН лучше чем 1.1. Основная ускоряющая секция представляет собой 3-метровый диафрагмированный волновод с постоянным импедансом, работающий на бегущей волне (мода $2\pi/3$). Измеренное значение КСВН на рабочей частоте 2797 МГц

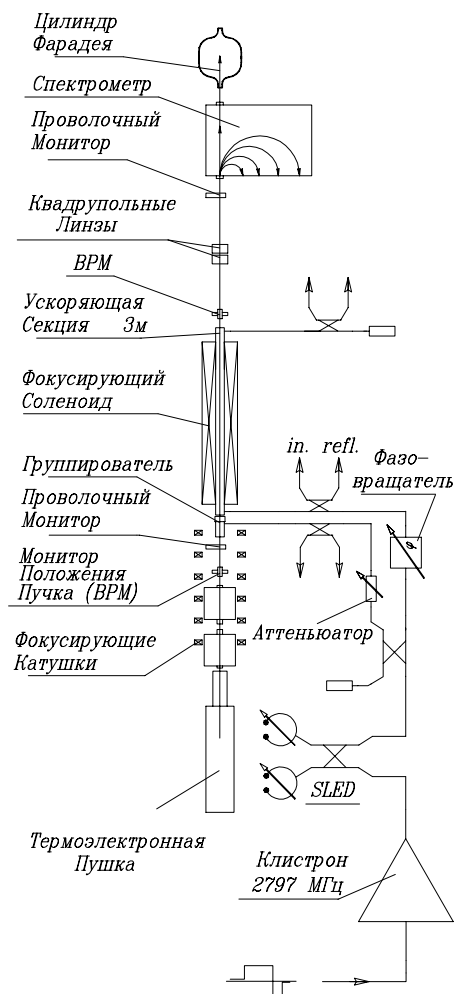


Рис. 2: Схема прототипа форинжектора.

не хуже 1,02 и менее 1,2 в диапазоне 2791 – 2803 МГц. Проведены испытания системы умножения мощности, которая состоит из 3 дБ моста и двух резонаторов с типом колебаний TM_{015} . В резонаторах предусмотрено устройство точной настройки. При длительности входного импульса СВЧ 2,5 мкс, мощности 10 МВт и на длительности выходного импульса 0,5 мкс выходная мощность составила 45 МВт.

По окончании испытаний отдельных элементов прототип был собран как единая установка. После частичного прогрева вакуумной системы в ускоряющей секции был получен вакуум на уровне 10^{-8} мм рт. ст. Затем была проведена тренировка ускоряющей структуры на средней мощности за импульс 25 МВт при длительности импульса 0,5 мкс и частоте повторения 50 Гц. При этом пиковое значение СВЧ-мощности сразу после переворота фазы составило 50 МВт. После суток тренировки в таком режиме СВЧ пробой в секции не наблюдались. В настоящее время идет проводка ускоренного в секции пучка до магнитного спектрометра.

Список литературы

- [1] N.S. Dikansky et al. "Status of the VEPP-5 Complex". Proc. 1994 Fourth European Part. Acc. Conf., London, June 27, p482.
- [2] A.V. Novokhatski et al. "Electron-positron Preinjector Complex at Novosibirsk". Proc. 1994 Int. Workshop SOURCES'94, Schwerin, Germany, Sept.29-Oct.4.
- [3] A.V. Alexandrov et al. "Preinjector for electron-positron factories". Proc. 1994 XIV Conf. on Charge Part. Acc., Protvino, Russia.
- [4] N.S. Dikansky et al. "Modulator for Klystron 5045". Proc. 1995 Part. Acc. Conf. on High-Energy Acc., Dallas, Texas, USA, May 1-5.
- [5] M.S. Avilov, A.V. Novokhatski. "A Single Bunch Compression in the Exponential Field". Proc. 1994 Fourth European Part. Acc. Conf., London, June 27, p971.
- [6] A.V. Aleksandrov et al. "A Prototype of RF Photogun for injector of VEPP-5". Presented at EPAC96, June 10-14, Sitges, Barcelona.