

ТЕРМОКАТОДНАЯ ВЧ-ПУШКА ДЛЯ ЛСЭ ИЯФ СО РАН

*В. Н. Волков¹, Я. В. Гетманов, Е. К. Кенжебулатов, Е. И. Колобанов,
С. А. Крутихин, Г. Я. Куркин, В. К. Овчар, В. М. Петров, И. К. Седяров*

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Высокочастотная (ВЧ) пушка для инжектора разрезного микротрона-рекуператора, возбуждающего лазер на свободных электронах ИЯФ (ЛСЭ), проходит стендовые испытания. Электронные сгустки ВЧ-пушки имеют энергию до 300 кэВ, частоту повторения до 90 МГц. Средний ток электронного пучка может достигать 100 мА в непрерывном режиме работы. Достоинством нового инжектора является длительный срок эксплуатации катода при большом среднем токе пучка, простая схема продольной группировки сгустков, не требующая дополнительного группирующего резонатора в инжекторе, отсутствие примеси частиц темнового тока в пучке инжектора, удобная эксплуатация ВЧ-пушки из-за отсутствия высокого потенциала 300 кВ на управляющих цепях катода. В данной работе описана конструкция ВЧ-пушки, представлены основные характеристики нового инжектора с ВЧ-пушкой, результаты испытаний на стенде.

Testing of radio frequency (RF) gun for rice-track microtron-recuperator injector driving BINP FEL is being conducted on the special stand. RF gun electron beam has the energy of ≤ 300 keV, repetition frequency of up to 90 MHz. Average beam current can be reached of 100 mA in continuous working regime. The advantages of the RF gun are the long-life time of the cathode at a large average beam current, simple scheme of longitudinal beam bunching without special cavity, absence of dark current contamination in the beam, comfortable work with RF gun because of absence of high potential of 300 kV at cathode circuits. In the paper, the RF gun design is described; the main characteristics of new injector with the RF gun and test stand results are presented.

PACS: 42.55.Px; 41.85.Ag; 41.75.Ht

ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН разработана и изготовлена [1] электронная ВЧ-пушка на частоту 90 МГц для инжектора разрезного микротрона-рекуператора, возбуждающего лазер на свободных электронах непрерывного действия. ВЧ-пушка имеет источником электронов термокатод, расположенный внутри ускоряющего ВЧ-резонатора, и предназначена для непрерывного производства коротких электронных сгустков с энергией 240–300 кэВ, со средним током до 100 мА при частоте повторения сгустков до 90 МГц.

Преимущество ВЧ-пушек, по сравнению со статическими пушками, заключается в большем времени жизни катодов при высоком среднем токе пучка из-за отсутствия в них

¹E-mail: V.N.Volkov@inp.nsk.su

бомбардировки катода обратно ускоренными ионами остаточного газа, ионизированного самим электронным пучком. Из-за относительно большой массы ионов они не могут ускориться в ВЧ-поле резонатора достаточно сильно, чтобы повредить катод. Продолжительность работы катода в статических пушках обратно пропорциональна не только количеству ионов, т. е. значению вакуума в объеме пушки и величине тока пучка, но и напряжению на пушке. На практике длительная работа статической пушки с высоким качеством пучка при вакууме в 10^{-9} Торр и напряжении 240 кВ возможна только с током до 7 мА.

Задачей тестовых испытаний ВЧ-пушки является не только проверка долговечности катода, но и проверка качества пучка, которое должно быть очень высоким, как предсказывают расчеты. Причем качество пучка должно быть высоким после продольной группировки сгустков в инжекторе, перед входом их в ускоритель.

1. КОНСТРУКЦИЯ

В инжекторе используется принцип линейного ускорения. Электроны эмитируются из термокатодного узла с заземленной сеткой (рис. 1, 12), создающего короткие электронные сгустки. Электронные сгустки ускоряются ВЧ электрическим полем, создаваемым в зазоре высокочастотного резонатора. Электронные сгустки формируются импульсами отрицательного напряжения на катоде. Длительность импульсов 43° ($1,2$ нс) от периода ВЧ на полувысоте или 60° по основанию. Инжектор работает в непрерывном режиме. В таблице приводятся основные характеристики ВЧ-инжектора. Испытательный стенд показан на рис. 2.

Биметаллический (медь–нержавейка) резонатор 2 (рис. 1) описан в [2]. Резонатор будет установлен на расстоянии 1,2 м от входного отверстия предварительного ускорителя в инжекторе с напряжением 1,5 МэВ. Внутри резонатора расположены электроды, формирующие ускоряющее электрическое поле. На правом электроде (рис. 1, 3), установленном на выступающем конце коаксиальной линии (вставки, рис. 1, 6), смонтирован катодно-сеточный узел (рис. 1, 12), образующий источник электронов. Правый и левый (рис. 1, 4) электроды образуют высокочастотный ускоряющий зазор.

Управление резонансной частотой осуществляется изменением индуктивности резонатора путем вытеснения магнитного ВЧ-поля двумя плунжерами, расположенными на обечайке резонатора (рис. 1, 11). Перемещение плунжеров осуществляется шаговым двигателем (рис. 2, 12). Шаговый двигатель управляется системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Система ФАПЧ расположена в отдельной стойке, в помещении, защищенном от радиации. Сигналы для работы системы ФАПЧ снимаются с одной из

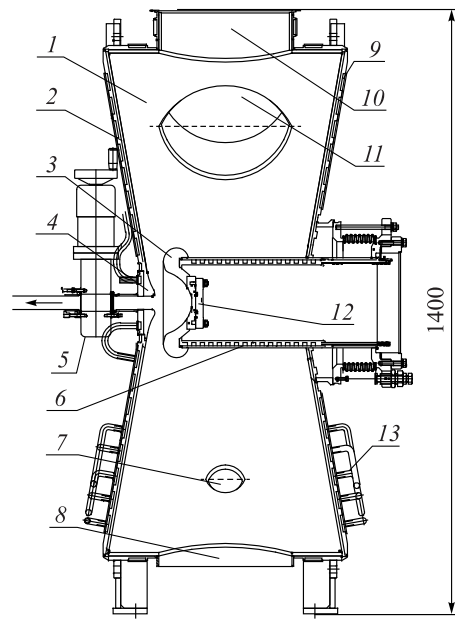


Рис. 1. Испытательный стенд с ВЧ-пушкой

Основные характеристики ВЧ-инжектора

| | |
|--|-------------|
| Средний ток ВЧ-пушки, мА | ≤ 100 |
| Энергия электронов, кэВ | 240–300 |
| Длительность сгустков, нс | 1,2 |
| Максимальная частота повторения, МГц | 90 |
| Мощность ВЧ-генератора, кВт | ≤ 50 |
| Допустимый рабочий вакуум, Торр | $< 10^{-6}$ |
| Эмиттанс 1,5-МэВ сгустков, мм · мрад * | 15–26 |
| Длина 1,5-МэВ сгустков, мм * | 25–8,5 |

* Расчетные характеристики пучка, ускоренного в инжекторе до 1,5 МэВ резонаторами [2].



Рис. 2. Схема ВЧ-пушки

измерительных петель, расположенных на боковой стороне резонатора (рис. 1, 7). Сигнал с другой петли, пропорциональный напряжению на зазоре резонатора, используется в системе управления мощностью ВЧ-генератора для стабилизации напряжения на резонаторе.

Катодно-сеточный узел является заменяемой деталью инжектора. Устанавливаются катодные узлы (рис. 1, 12) в инжектор с помощью фланца с вакуумным уплотнением типа «конфлэт». Конструкция крепления катодов на инжекторе допускает применение двух типов катодно-сеточных узлов, имеющих разные фланцы. Один из них — это отечественный катодно-сеточный узел от металлокерамической лампы-триода типа ГС-34 с оксидным катодом, изготавливаемый в холдинговой компании ОАО НЭВЗ-«Союз» (<http://gu.nevz.ru>). Данный катодный узел [3] приваривается к фланцу вакуумно-плотным швом. Перед установкой в резонатор катодно-сеточный узел должен быть активирован по специальной процедуре. Хранятся неактивированные катодно-сеточные узлы в замкнутом объеме, в атмосфере сухого азота. Другой катодно-сеточный узел, типа Y-824, изготавливаемый фирмой EIMAC, имеет собственный фланец.

Управление током ускоренного пучка электронов осуществляется системой, в которую входит блок модулятора и система блокировки по фазе. Блок модулятора [4–7] выполнен цилиндрическим, в съемном варианте. Блок по направляющей трубе (рис. 1, 6) в центральной части резонатора вставляется внутрь вставки (рис. 1, 6) и электрически подсоединяется к катодному узлу. Стойка управления блоком модулятора размещается в соседнем помещении, защищенном от радиации. Модулятор управляется от компьютера через интерфейс связи.

В канале пучка, между резонатором инжектора и ускорителем, на расстоянии 0,5 м от плоскости катода, должна быть установлена фокусирующая магнитная линза (рис. 2, 8), служащая для компенсации роста эмиттанса пучка, происходящего в процессе ускорения из-за действия пространственного заряда. Начальный эмиттанс пучка из катодно-сеточного узла, согласно расчетам [8], не превышает величину 4,0 мм·мрад. Причиной такой величины эмиттанса является небольшое нарушение ламинарности электронного потока, проходящего через управляющую сетку, имеющую перегородки в ячейках двух типов с разной толщиной (см. [8]).

Ввод ВЧ-мощности (рис. 2, 10) расположен в верхней части резонатора (рис. 1, 10). Вакуумную и электрическую изоляцию в нем обеспечивает керамический цилиндрический изолятор. К вводу мощности через коаксиальный фидер (рис. 2, 11) подключается генератор. Генератор высокой частоты 50 кВт, выполненный на промышленных тетрадах ГУ-92А и ГУ101А, описан в [9].

Рабочий вакуум в объеме резонатора обеспечивается магниторазрядным насосом производительностью 250 л/с, смонтированным на нижней части резонатора (рис. 1, 8). Откачка производится через щелевую решетку в нижней стенке резонатора, не искажающую распределение ВЧ-поля в резонаторе. В резонаторе с отключенным катодом обеспечивается вакуум 10^{-7} – 10^{-9} Па после прогрева резонатора. Развакуумирование резонатора следует проводить с заполнением его сухим азотом. В резонаторе с работающим катодом допускается понижение вакуума до 10^{-5} Па, не разрушающего катод.

К переднему фланцу резонатора через шиббер (рис. 1, 5) и сильфон подсоединяется выпускной канал для пучка. Выпускной канал обеспечивает вакуумно-плотное подключение к фланцам измерительного стенда. В его состав входит корректирующая катушка (рис. 2, 6), резистивный датчик пучка (рис. 2, 7), фокусирующий соленоид (рис. 2, 5). Мишень для пучка (рис. 2, 3) вдвинута внутрь вакуумной камеры с установленной снаружи видеокамерой (рис. 2, 4) для наблюдения переходного излучения с мишени. Далее установлен второй резистивный датчик пучка (рис. 2, 2), поглотитель пучка на 30 кВт (рис. 2, 1), охлаждаемый потоком воды и окруженный свинцовой защитой от радиации, толщиной 3–5 см. Резистивные датчики пучка позволяют наблюдать на экране осциллографа форму распределения заряда в сгустках и измерять длительность сгустков, а также энергию пучка по времени пролета между ними.

Резонатор оборудован водяным стендом (рис. 2, 12), служащим для распределения потока охлаждающей воды между охлаждающими каналами резонатора (рис. 1, 13). Водяной стенд представляет собой две одинаковые части, каждая в виде трубы, оснащенной оливками, съемными трубками, гидрореле и вентилями. Одна — для входного потока воды, другая — для выходного потока. Воздушное охлаждение катодно-сеточного узла и плат модулятора осуществляется сжатым воздухом. Сжатый воздух подается через воздушное реле, включенное в систему блокировок инжектора.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Регулирование среднего тока пучка производится как за счет изменения заряда в сгустках, так и за счет изменения частоты повторения сгустков. Длительность сгустков на выходе инжектора регулируется фазой эмиссии, изменяющей режим продольной группировки сгустков в инжекторе. Далее принято, что напряжение в резонаторе изменяется по синусоидальному закону, нулевая фаза которого соответствует моменту с нулевым напряжением в резонаторе.

Рабочий режим работы ВЧ-пушки занимает диапазон фаз эмиссии $30\text{--}65^\circ$. При фазах, меньших 30° , начинается ограничение заряда в сгустках из-за того, что головные частицы сгустка на 30° раньше середины попадают в отрицательную фазу ВЧ в пушке и не могут эмитироваться за сетку. На верхней границе диапазона рабочих фаз сгустки получают максимальное ускорение. При меньших фазах в сгустках формируется спадающее к головной части распределение энергий частиц, приводящее к сокращению общей длины сгустков на дрейфовом участке после ВЧ-пушки. Этот режим работы ВЧ-пушки называется «режимом группировки». При фазах выше рабочего диапазона сгустки получают меньшее ускорение и удлиняются на всем протяжении дрейфового участка. Опасными являются фазы эмиссии $100\text{--}180^\circ$, когда появляются обратно ускоренные электроны, мощность которых при попадании на катод может достигать 1 кВт. На этот случай в системе управления ВЧ-пушкой предусмотрена блокировка по фазе.

Эффект обратной бомбардировки катода электронами может происходить из-за того, что при больших фазах эмиссии сгустки не успевают полностью вылететь из ВЧ-пушки, пока ускоряющее ВЧ-поле не изменило знак. В этих случаях хвостовая, не вылетевшая из ВЧ-пушки часть сгустка, начинает замедляться в поле обратного знака и потом ускоряется в обратном направлении к катоду.

Сигнал управления катодно-сеточным узлом имеет джиттер не больше $\pm 0,1$ нс, или $\pm 3,3^\circ$ от фазы ВЧ 90 МГц. Режим продольной группировки пучка обеспечивает компенсацию джиттера. Механизм компенсации джиттера в режиме группировки (фаза эмиссии 31°) объясняется следующим образом: сгустки, вылетевшие позже 31° , получают большее ускорение в поле ВЧ-пушки и, в результате, прилетают раньше в определенную координату. И обратно, сгустки, вылетевшие раньше 31° , летят дольше из-за меньшей энергии и прилетают в данную координату одновременно со сгустками, вылетевшими позже. По расчетам, на расстоянии 1,8 м от катода, при фазе 31° , джиттер должен компенсироваться в 70 раз. Из-за действия пространственного заряда ($1,1$ нКл) в сгустках дрейфовое расстояние для минимальной длины сгустков больше на 0,3 м, т. е. 2,1 м.

Максимальное поверхностное электрическое ВЧ-поле (10 МВ/м) сосредоточено на краях фокусирующего электрода (см. 3 на рис. 1), вдали от оси резонатора. Из-за высокой напряженности края этого электрода служат источником темновых токов автоэмиссии, которые остаются внутри резонатора и не попадают в канал для пучка и в ускоритель. Напряженность ВЧ-поля в районе катода меньше в 10 раз, порядка 1 МВ/м, поэтому темновых токов автоэмиссии из этой области практически нет. Таким образом, сгустки из инжектора выходят без примеси посторонних частиц темнового тока автоэмиссии.

Напряженность ВЧ-поля в районе катода 1 МВ/м выбрана из соображений получения минимального эмиттанса пучка. В фазе эмиссии $\sim 30^\circ$ эта напряженность $\sim 0,5$ МВ/м. В области между катодом и управляющей сеткой, в момент отпираания катода, создается примерно такая же напряженность поля $\sim 0,5$ МВ/м. Из-за такого равенства полей до и

после сетки обеспечивается ламинарность электронного потока сквозь сетку, а значит, обеспечивается минимально возможный эмиттанс пучка. Расчеты динамики электронного пучка в катодно-сеточном узле описаны в [8]. Некоторые результаты этих расчетов представлены в таблице, маркированные знаком*.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В испытаниях на стенде (рис. 2) был получен максимальный средний ток 60 мА. При подъеме среднего тока выше 60 мА происходило ухудшение вакуума в ВЧ-пушке до величины $> 10^{-5}$ Па из-за повышенного газоотделения в поглотителе пучка и увеличение радиационного фона, превышающего допустимый уровень, из-за применения недостаточно мощной радиационной защиты поглотителя. Катод при испытаниях практически не изменил своих характеристик. После усовершенствования защиты, дополнительного прогрева вакуумной камеры поглотителя и применения другого, более надежного, варианта модулятора катодно-сеточного узла [10] испытания ВЧ-пушки будут продолжены.

Проведенные испытания доказали принципиальное преимущество ВЧ-пушек по сравнению со статическими — это беспрецедентно большое время жизни катода в условиях низкого вакуума 10^{-5} Па и высокого среднего тока пучка до 60 мА. Также в проведенных испытаниях подтвердилась принципиальная возможность группировки сгустков на дрейфовом участке в режиме фаз эмиссии $30-65^\circ$. Эмиттанс пучка оценен по размеру сфокусированного пятна на мишени 0,5 мм как ~ 10 мм·мрад, в соответствии с предсказаниями расчетов. В последующих испытаниях планируется измерение точных численных значений характеристик пучка, позволяющих сравнивать их с расчетами, а также получение устойчивой работы ВЧ-пушки со средним током пучка до 100 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана конструкция и принцип работы ВЧ-пушки. Приведены результаты испытаний, подтверждающие перспективы применения ВЧ-пушек в ускорительной технике и, в частности, в качестве инжектора разрезного микротрона-рекуператора ИЯФ. Намечены дальнейшие шаги по испытанию ВЧ-пушки на стенде.

Исследование ВЧ-пушки выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volkov V. N. et al. First Test Results of rf Gun for the Race-Track Microtron Recuperator of BINP SB RAS // Proc. of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012.
2. Gavrilov N. et al. Rf Cavity for the Novosibirsk Race-Track Microtron-Recuperator. Preprint BUDKERINP 94–92. 1994.
3. Sheglov M. A. et al. Thermal Balance in Plane Thermionic Cathodes of Radio-Frequency Tubes without Anodes // XII Intern. Conf. High-Power Particle Beams. Japan, 2000.
4. Винокуров Н. А. и др. Источник коротких электронных сгустков для инъекции в ускоритель // ПТЭ. 2008. № 6. С. 88–91.

1250 *Волков В. Н. и др.*

5. *Колобанов Е. И.* // ПТЭ. 1994. № 3. С. 126.
6. *Kolobanov E. I. et al.* // XII Intern. Conf. High-Power Particle Beams. Japan, 2000.
7. *Колобанов Е. И.* Патент 2148296 РФ. 2000. Кл. 7H05H5/00.
8. *Volkov V. et al.* Thermionic Cathode-Grid Assembly Simulations for rf Guns // Proc. of PAC2009, Vancouver, Canada, 2009.
9. *Арбузов В. С. и др.* ВЧ-генератор для резонансного ускорителя электронов на основе коаксиального резонатора // XII Харитоновские чтения: Проблемы физики высоких плотностей энергии, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 19–23 апр. 2010 г. С. 28–32.
10. *Kuper E. A. et al.* The System of Power Supplies, Control and Modulation of Electron Gun for Free Electron Laser FEL // Proc. of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012.