

Термокатодная высокочастотная пушка и группирующий резонатор для инжектора синхротрона СКИФ

© В.Н. Волков,¹ М.В. Арсентьева,^{1,2,3} А.М. Барняков,¹ А.М. Батраков,¹ Е.А. Бехтенов,¹ Н.Г. Васильева,¹ С.М. Гуров,¹ С.Е. Карнаев,¹ А.А. Кондаков,¹ А.Н. Косарев,¹ С.А. Крутихин,¹ Г.Я. Куркин,¹ А.Е. Левичев,^{1,2,3} А.Ю. Мартыновский,¹ С.В. Мотыгин,¹ Д.А. Никифоров,^{1,3} В.К. Овчар,¹ А.В. Павленко,¹ О.А. Павлов,¹ М.В. Родякин,¹ Е.А. Ротов,¹ И.К. Седляров,¹ А.М. Семенов,¹ М.Г. Федотов,¹ К.Н. Чернов,¹

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера,
630090 Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

³Сибирский кольцевой источник фотонов СКИФ,
630559 Кольцово, Россия
e-mail: V.N.Volkov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 8 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 5 апреля 2024 г.

Принято к публикации 18 апреля 2024 г.

Представлена конструкция термокатодной сеточно-управляемой высокочастотной пушки и группирующего резонатора, входящих в систему начального участка инжектора (преинжектора), разрабатываемого в Институте ядерной физики (ИЯФ) им. Г.И. Будкера синхротрона четвертого поколения СКИФ. Описана технология их изготовления на экспериментальном производстве ИЯФ. Также описаны методы и результаты тестовых испытаний высокочастотной системы. Проанализированы расчетные и измеренные характеристики высокочастотных резонаторов и особенности их эксплуатации в преинжекторе.

Ключевые слова: резонатор высокочастотной пушки, технология изготовления высокочастотной системы, электронно-лучевая сварка, тестирование, высокочастотная тренировка.

DOI: 10.61011/JTF.2024.06.58133.33-24

Введение

Для получения электронного пучка в большинстве синхротронов в мировой практике используются статические пушки с термокатодом, управляемым с помощью сетки. В этих пушках импульс напряжения длительно-стью 1–2 нс на катоде отпирает электронный поток с термокатода, который, проходя сквозь сетку, ускоряется в электростатическом поле пушки. В дальнейшем полученные сгустки проходят сквозь высокочастотные (ВЧ) поля группирующих резонаторов и сокращаются по длине до 10 пс с тем, чтобы была возможность дальнейшего ускорения их в предускорителе и в линейных ускорителях на основе многоячеечных ускоряющих структур 2856 МГц, как правило, до энергии 100–200 МэВ. Чаще всего в инжекторах необходимо получить энергетический разброс пучка не хуже 1%. По такому же принципу работает инжектор разрабатываемого в Институте ядерной физики (ИЯФ) им. Г.И. Будкера синхротрона четвертого поколения СКИФ [1], только вместо электростатической пушки в нем применяется импульсная ВЧ пушка 175.5 МГц, аналогичная ВЧ пушке 90 МГц, работающей в непрерывном режиме [2].

Кроме возможности получения электронного пучка с высокой энергией, применение ВЧ пушки обосновано еще тем, что в ней ионная бомбардировка катода практически отсутствует [3], так как массивные ионы

не успевают разогнаться в ВЧ поле до энергий, способных повредить катод. Вследствие этого проблема срока службы катода снимается с повестки (без учета его старения) и существенно снижаются требования к вакууму в инжекторе. Термокатод с сеточным управлением в принципе такой же, как в обычных статических пушках, помещается в ВЧ поле в задней стенке специального ВЧ резонатора. Более подробное обоснование и детальное сравнение с подобного рода системами приведено в работе авторов [4].

В настоящей работе описывается ВЧ пушка и группирующий резонатор 535.5 МГц, входящие в ВЧ систему группировки сгустков преинжектора (рис. 1, *a, b*). Предускоритель и ускоряющая секция, основанные на широко применяемых в мировой практике многоячеечных структурах 2856 МГц [5], также используются в преинжекторе СКИФ.

1. Конструкция ВЧ пушки и группирующего резонатора

Резонатор ВЧ пушки коаксиальный (рис. 1, *c, d*) с диаметром 500 мм со сменным катодно-сеточным узлом *б*. Катодно-сеточный узел вмонтирован в центре задней стенки фокусирующего электрода *з* так, что сетка электрически соединена с данной стенкой, а катод

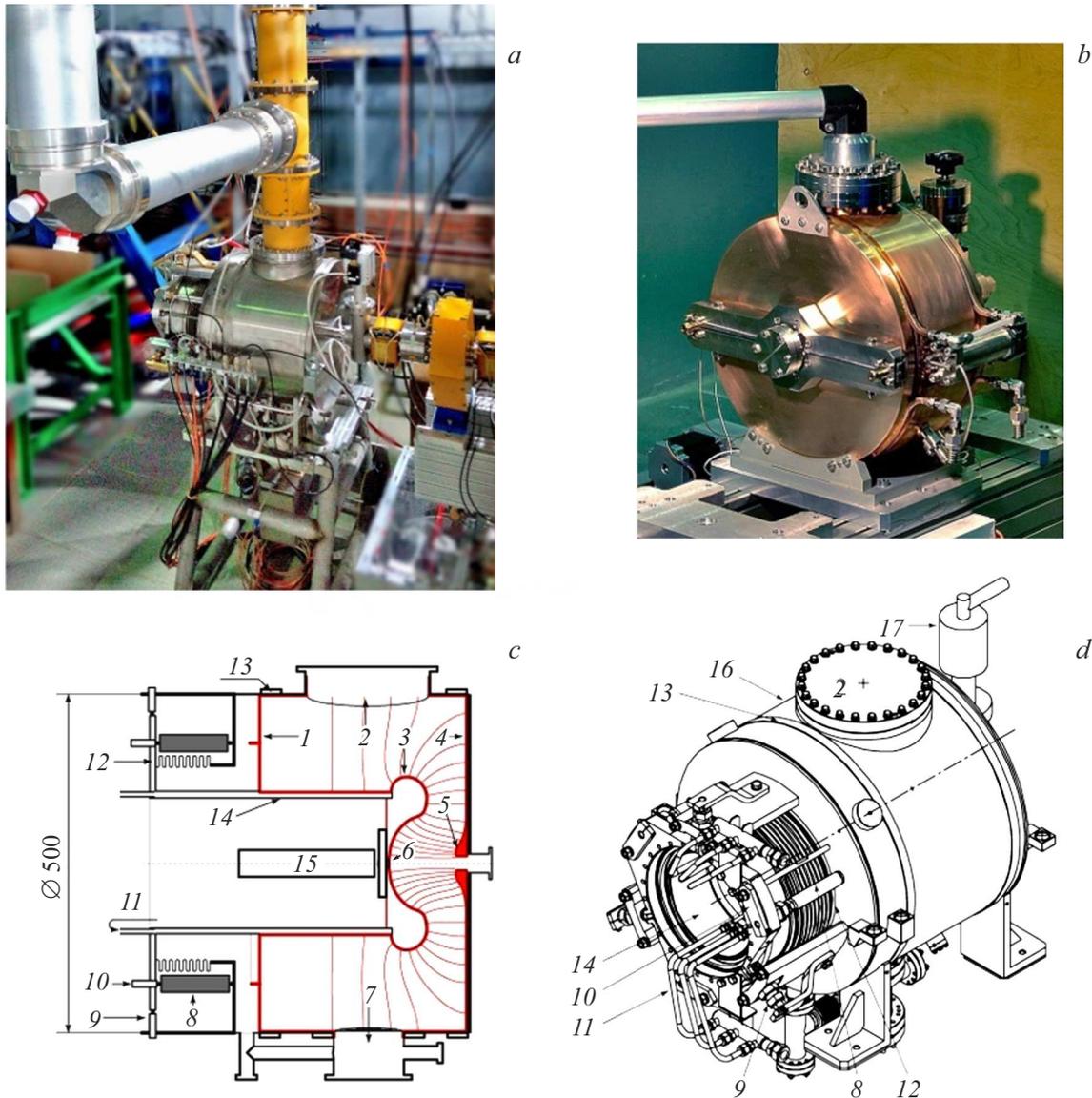


Рис. 1. *a* — ВЧ пушки; *b* — группирующего резонатора; *c* — эскиз резонатора ВЧ пушки с картиной силовых линий электрического ВЧ поля; *d* — трехмерный чертеж ВЧ пушки: 1 — задняя стенка, 2 — порт для ввода ВЧ мощности, 3 — электрод, 4 — передняя (торцевая) стенка, 5 — бобышка, 6 — катод, 7 — порт вакуумной откачки, 8 — пьезоактуатор, 9 — винт регулировки наклона вставки, 10 — винт ручной регулировки резонансной частоты, 11 — трубки водяного охлаждения вставки, 12 — сифон, 13 — каналы водяного охлаждения корпуса, 14 — вставка, 15 — модулятор катодно-сеточного узла, 16 — обечайка, 17 — вакуумный затвор.

на изоляторе расположен на расстоянии $80\ \mu\text{m}$ позади сетки.

На СКИФ применяются термокатоды из губчатого вольфрама, пропитанного смесью алюмината и покрытого слоем осмия толщиной $20\ \mu\text{m}$. В принципе, материал термокатода не имеет особого значения в данном случае, когда отсутствует ионная бомбардировка. Годятся также обычные оксидные термокатоды. Такие катоды (от ВЧ триодных керамических ламп ГС-34) испытаны в ВЧ пушках ИЯФ при среднем токе $40\text{--}100\ \text{mA}$ [2].

Катодно-сеточный узел вставляется с наружной стороны резонатора и подсоединяется с помощью фланцевого

вакуумного уплотнения типа ConFlat ДУ 40. Питание и управление катодно-сеточным узлом осуществляется с помощью блока модулятора 15, который вставляется внутрь цилиндрической полости вставки 14 позади резонатора и электрически подсоединяется при помощи цангового узла. Данная конструкция обеспечивает максимальную близость выходного ВЧ транзистора модулятора к катодно-сеточному узлу, генерирующего импульсы длительностью до $1\ \text{ns}$.

Сгустки электронов, эмитированные из катодно-сеточного узла, пролетают вдоль оси резонатора расстояние $0.08\ \text{m}$, ускоряясь в электрическом ВЧ поле,

и далее вылетают из ВЧ пушки через отверстие для пучка диаметром 23 mm. В ВЧ пушке применяется электрическая ВЧ фокусировка сгустков, которая отменяет применение сложной магнитной фокусировки. При помощи фокусирующего электрода 3 со сферической частью и выступающей бобышки 5 на противоположной стенке, создается распределение силовых линий поля с радиальной составляющей, направленной к оси (рис. 1, *с*). Таким образом, пучок фокусируется точно в расчетном месте, в 50 mm после вакуумного фланца пушки.

Одновременно с этим в резонаторе устанавливается необходимое продольное распределение напряженности электрического ВЧ поля — с минимумом 2 MV/m на сетке и максимум 11 MV/m в районе бобышки. Распределение электрического ВЧ поля крайне неоднородно по поверхности, имеет два максимума 20 MV/m, одно из них на бобышке и с противоположной стороны — на краях фокусирующего электрода.

При напряженности поля на сетке 2 MV/m обеспечивается возможность управления катодно-сеточным узлом импульсами с амплитудой не выше 100 V. При этом уровень запирающего напряжения, который эти импульсы должны по амплитуде превышать, достаточно низкий, чтобы предотвратить эмиссию с катода от проникающего сквозь сетку ВЧ поля. С другой стороны, при таком распределении обеспечивается высокий темп ускорения до энергии 1 MeV.

Перестройка резонансной частоты в интервале 100 kHz осуществляется изменением ширины ускоряющего зазора за счет продольного перемещения вставки 14 в пределах 100 μm . Это перемещение практически не влияет на динамику пучка, так как время появления пучка на выходе пушки (в единицах фазы ВЧ) изменяется не больше, чем на 0.02° при допустимом значении 1° . Перемещение осуществляется при помощи трех пьезо-актюаторов 8, расположенных азимутально-симметрично относительно оси снаружи резонатора. Для этого задняя плоская стенка 1 коаксиального резонатора сделана гибкой — из меди толщиной 8 mm, а центральный электрод резонатора 3 вместе со вставкой 14 механически развязан от корпуса при помощи сильфона 12. Используемые пьезоактюаторы механически устойчивы к перепаду давления, вызывающего действие на них силы порядка 10 kN. Кроме того, предусмотрена ручная механическая регулировка в пределах 0.5 mm при помощи трех винтов 10, вмонтированных последовательно с пьезоактюаторами. Также имеются еще три винта 9, направленных перпендикулярно к оси ВЧ пушки, изменяющие наклон вставки внутри резонатора. Эти винты предназначены для точной выставки катода в центр резонатора. Положение катода с высокой точностью контролируется с помощью системы геознаков, расположенных на корпусе ВЧ пушки и на вставке.

На корпусе ВЧ пушки и внутри вставки вмонтированы водяные каналы 11, 13 для термостабилизации резонатора при температуре $33 \pm 0.1^\circ\text{C}$. Вверху резонатора

на фланце ДУ200 расположен ввод ВЧ мощности 2, к которому подсоединяется коаксиальный 50 Ω фидер с наружным диаметром 100 mm. С боков резонатора установлены две петли связи. Внизу резонатора 7 подсоединяется магниторазрядный насос с производительностью 100 l/min через вакуумное уплотнение ДУ 100. В таблице перечислены механические и электрические характеристики ВЧ пушки и резонатора третьей гармоники с их номинальными режимами работы.

Группирующий ВЧ резонатор (рис. 1, *б*) сделан из бескислородной меди. Он состоит из трех частей, спаянных между собой — двух одинаковых торцевых стенок и обечайки между ними (рис. 2, *с*). В обечайке сделаны отверстия для ввода ВЧ мощности сверху, отверстия для вакуумной откачки снизу и два отверстия для петель связи по бокам. Торцевые стенки имеют толщину 5 mm с тем, чтобы их можно было деформировать в направлении вдоль оси без остаточных деформаций при помощи двух массивных рычагов, сделанных в виде коромысла. Одна из стенок деформируется рычагом, сдвигаемым двумя пьезоактюаторами на 100 μm . Пьезоактюаторы действуют на концы рычага и закреплены по обе стороны резонатора. Другая стенка аналогично сдвигается другим рычагом, но при помощи винтов для ручной регулировки. Пьезоактюаторы в группирующем резонаторе перестраивают резонансную частоту на 160 kHz.

Величина поперечного сечения рычагов и толщина стенок резонатора определялись численными расчетами программой ANSYS с таким условием, чтобы жесткость рычагов была выше механической жесткости пьезоактюаторов (80 N/ μm), при этом жесткость стенок, определяемая их толщиной (5 mm), должна быть на порядок ниже. Эти условия обеспечивают максимальную эффективность перестройки частоты без остаточных деформаций в стенках резонатора.

Для поддержания постоянства температуры резонатора $33 \pm 0.1^\circ\text{C}$, обеспечивающей необходимую для СКИФ стабильность фаз ВЧ, на корпусе припаяны две водяные трубки с фитингами типа „Dk-Lok“ на концах, подключаемые к блоку системы стабилизации температуры.

2. Изготовление ВЧ пушки и группирующего резонатора

ВЧ пушка и группирующий резонатор изготавливались на экспериментальном производстве ИЯФ. Корпус резонатора ВЧ пушки сделан биметаллическим, с внутренним слоем из бескислородной меди толщиной 6 mm и наружным слоем из нержавеющей стали 12X18H10T толщиной 7 mm (проверка на остаточную намагниченность не проводилась). Оба слоя по отдельности формовались цилиндрической обкаткой из 10 mm листов, сваривались аргоно-дуговой сваркой и точно протачивались изнутри и снаружи на карусельном станке. Затем после серебрения медного и омеднения нержавеющей

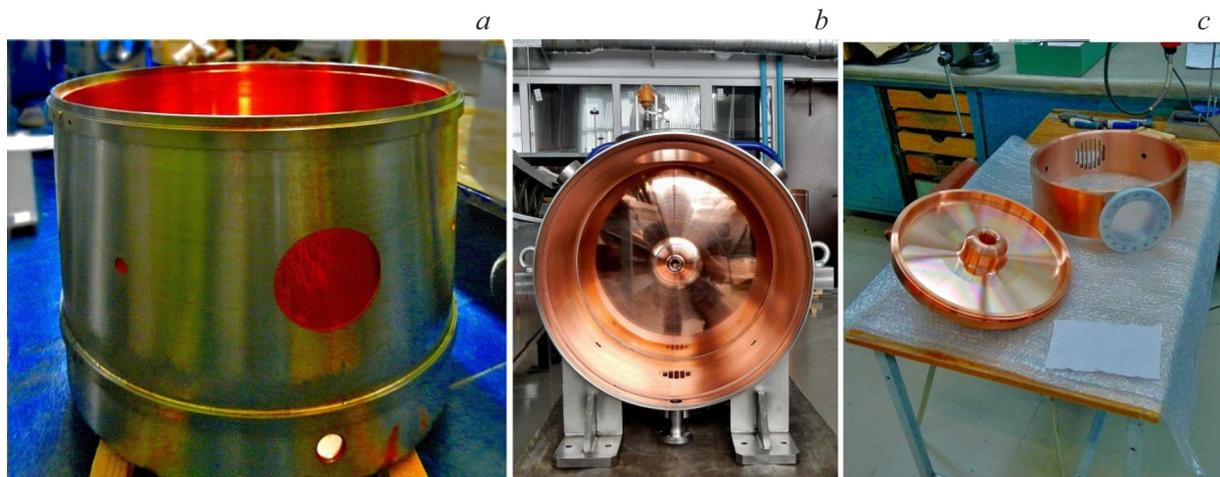


Рис. 2. *a* — биметаллический корпус ВЧ пушки после термодиффузионной сварки, *b* — вид ВЧ резонатора изнутри на переднюю стенку с бобышкой после ЭЛС, *c* — одна из боковых стенок и обечайка группирующего резонатора.

Характеристики ВЧ пушки и группирующего резонатора

Характеристика	ВЧ пушка	Группирователь
Резонансная частота, МГц	178.5	535.5
Импульсная ВЧ мощность, kW	325.2	5.3
Средняя ВЧ мощность (частота повторения 1 Hz), W	150	1.5
Полное напряжение на резонаторе, MV	0.74	0.151
Собственная добротность	14700	20200
Эффективный импеданс, Ω	56.6	148.2
Максимальная напряженность E поля на оси, MV/m	11.0	2.42
Максимальное ВЧ поле на поверхности, MV/m	19.6	4.4
ВЧ напряжение измерительных петель, V	20	20
Коэффициент связи ввода ВЧ мощности	1	1
Длительность ВЧ импульса, μ s	100	100
Диапазон перестройки частоты, μ m/kHz	100/100	100/160
Диапазон ручной перестройки, mm/kHz	0.5/500	0.5/800

цилиндров, они вставлялись один в другой (рис. 2, *a*). При этом медный цилиндр предварительно охлаждался в жидком азоте для того, чтобы образовался зазор между цилиндрами 0.5–1 mm за счет температурного отклонения размеров. После прогрева в вакуумной печи между слоями образовался теплопроводящий термодиффузионный спай.

Торцевая стенка диаметром 550 mm также сделана биметаллической, в которой медный 10 mm слой соединен с нержавеющей сталью (с толщиной 30 mm) при помощи термодиффузионной сварки в вакуумной печи. Центральная бобышка диаметром 100 mm изготавливалась отдельно. Чтобы не допустить высокой напряженности ВЧ поля из-за острых эффектов на поверхности бобышки, она протачивалась до минимально возможной шероховатости 1 μ m (зеркального блеска) алмазным резцом на станке с ЧПУ, обеспечивающим плавное перемещение резца. Затем она приваривалась электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) к медному слою торцевой стенки, предварительно проточенной на кару-

сельном станке до шероховатости 2 μ m. Шероховатости данного сварного шва разглаживались расфокусированным электронным лучом до зеркального блеска с тем, чтобы на нем не возникало превышения напряженности ВЧ поля на остриях, которое в этом месте достигает величины 20 MV/m (рис. 2, *b*).

Полученный цилиндрический корпус (обечайка) и передняя торцевая стенка сваривались аргоно-дуговой сваркой снаружи по нержавеющей стали вакуумноплотным швом. А изнутри по меди сваривались ЭЛС в вакуумной камере ЭЛС установки (рис. 2, *b*), обеспечивающей электрический ВЧ контакт. Для этого была изготовлена специальная оснастка для плавного вращения массивного корпуса в вакуумной камере с постоянной скоростью без биений. При этой сварке также применялась специальная оснастка для контроля над точным наведением луча на сварной стык (рис. 3, *a*).

Параллельно с этими работами изготавливалась вставка, состоящая из двухслойного медного цилиндрического корпуса диаметром 220 mm со спиральными

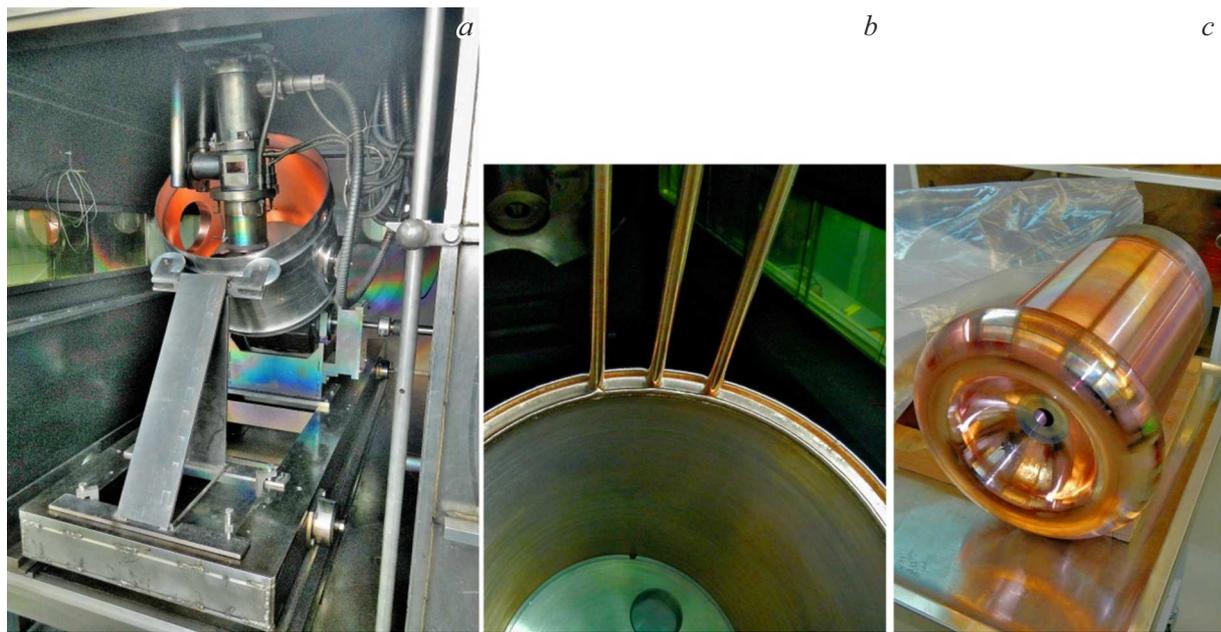


Рис. 3. *a* — оснастка для сварки передней стенки с обечайкой в вакуумной камере ЭЛС и с пушкой ЭЛС внутри, *b* — торцы вставки после ЭЛС, *c* — внешний вид вставки перед ЭЛС с задней стенкой ВЧ пушки.

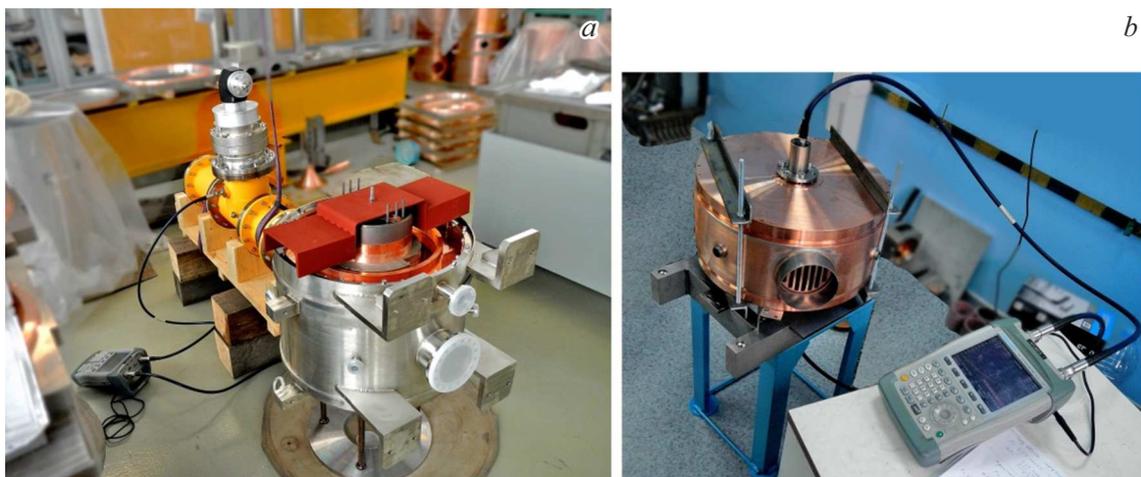


Рис. 4. *a* — измерение резонансной частоты ВЧ пушки перед ЭЛС вставки с задней стенкой, *b* — измерение резонансной частоты группирующего резонатора.

водяными каналами внутри вставки и из фокусирующего электрода с отверстием под вакуумное уплотнение, к которому впоследствии должен будет снаружи подсоединяться катодно-сеточный узел (рис. 3, *c*). Оба слоя цилиндрического корпуса вставки (внутренний и наружный) сваривались между собой по торцам электронным лучом (рис. 3, *b*). Фокусирующий электрод вставки был проточен алмазным резцом до зеркального блеска с шероховатостью $1 \mu\text{m}$. Этот электрод, а также бобышка на торцевой стенке корпуса, на все время нахождения в цеху закрывались специальными экранами, предохраняющими от попадания пыли и повреждений при случайном соприкосновении с окружающими предметами.

Особое внимание уделялось точному определению места на этой вставке для ЭЛС ее с задней медной стенкой резонатора, так как от этого зависит точность настройки резонансной частоты ВЧ пушки в требуемых пределах (до 10 kHz). Для этой цели перед сваркой была проведена предварительная сборка частей ВЧ пушки и проведены измерения резонансной частоты в зависимости от положения вставки. При этом ВЧ пушка располагалась вертикально. Вставка внутри отверстия в задней стенке подвешивалась грузоподъемным устройством вертикально. А сама стенка сверху притягивалась к корпусу для обеспечения электрического контакта. К корпусу в процессе измерения был подсоединен штат-

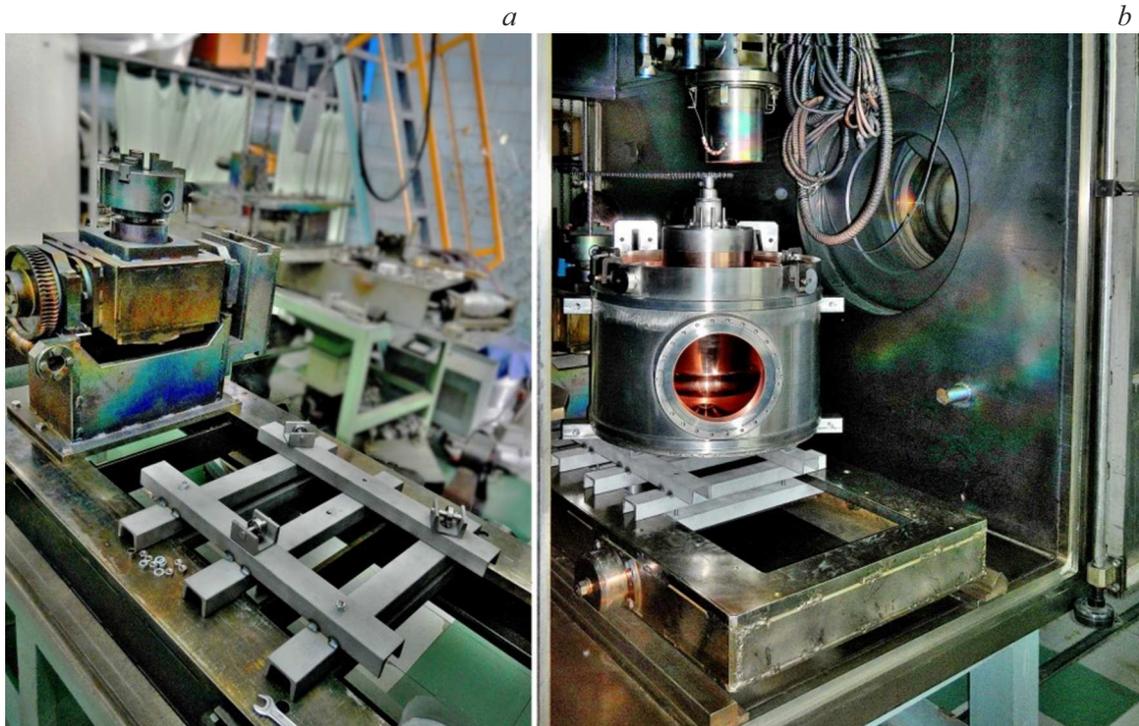


Рис. 5. *a* — оснастка для окончательной ЭСЛ задней стенки резонатора ВЧ пушки с обечайкой, *b* — ВЧ пушка в вакуумной камере ЭСЛ с этой оснасткой с цепью для привода вращения и электронной пушкой сверху.

ный ввод ВЧ мощности, что обеспечивало необходимую точность измерений (рис. 4, *a*). Аналогичные измерения для группирующего резонатора, описанные далее, изображены на рис. 4, *b*.

После определения места сварки вставки со стенкой была проведена ЭСЛ этого шва в вакуумной камере ЭСЛ. И уже после этого проводилась окончательная ЭСЛ данной стенки (с приваренной к ней вставкой) к медному внутреннему слою корпуса ВЧ пушки. Для этой сварки была изготовлена оригинальная оснастка с тремя роликами, устанавливаемая на полу вакуумной камеры (рис. 5, *a*). ВЧ пушка опиралась торцевой гладкой стенкой на эти ролики и вращалась вокруг вертикальной оси специальным приводом с применением цепи, соединенной наверху с устройством вакуумного ввода вращения в камере (рис. 5, *b*).

После изготовления ВЧ пушка прогревалась в вакуумной печи для обезгаживания при температуре 450°C в течение 6 ч. Перед этим отжигом вакуумная печь вместе с ВЧ пушкой откачивалась до минимально достигнутого значения давления (10^{-6} Па) в течение двух дней. Отжиг ВЧ пушки производился в горизонтальном положении со вставленными шпильками вместо пьезоактюаторов, для предохранения вставки от „проваливания“ во время прогрева. Скорость подъема температуры была $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. После прогрева вакуумная печь с ВЧ пушкой медленно остывала в течение двух дней до температуры 65°C .

Группирующий резонатор (рис. 1, *b*) имеет диаметр 360 мм и изготавливался на станке с ЧПУ для по-

лучения малой шероховатости, проточкой монолитных дисков из бескислородной меди — двух торцевых стенок и обечайки. Внутренняя часть торцевых стенок резонатора, особенно бобышки в центре, протачивались алмазным резцом до зеркального блеска (до шероховатости $1\ \mu\text{m}$) (рис. 2, *c*). Основное внимание уделялось точности настройки резонансной частоты. Для этого все три части резонатора собирались вместе перед окончательной пайкой и по измерениям резонансной частоты определялась точная ширина обечайки, предварительно изготовленная с припуском (рис. 4, *b*). При этих измерениях на резонатор устанавливался штатный ввод ВЧ мощности для обеспечения необходимой точности измерений.

3. Тестирование работы ВЧ пушки и группирователя без пучка

Включения ВЧ пушки на генератор в течение первых двух месяцев проводились по временной схеме, без включения автоматической системы обратной связи по уровню ВЧ (АРУ) и без фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ), а также без систем синхронизации и термостабилизации, которые в это время монтировались на стенде. Резонансная частота ВЧ пушки изменялась из-за нестабильных погодных условий летне-осеннего периода, но эти изменения не выходили за пределы интервала 16 kHz. Из этого следует, что

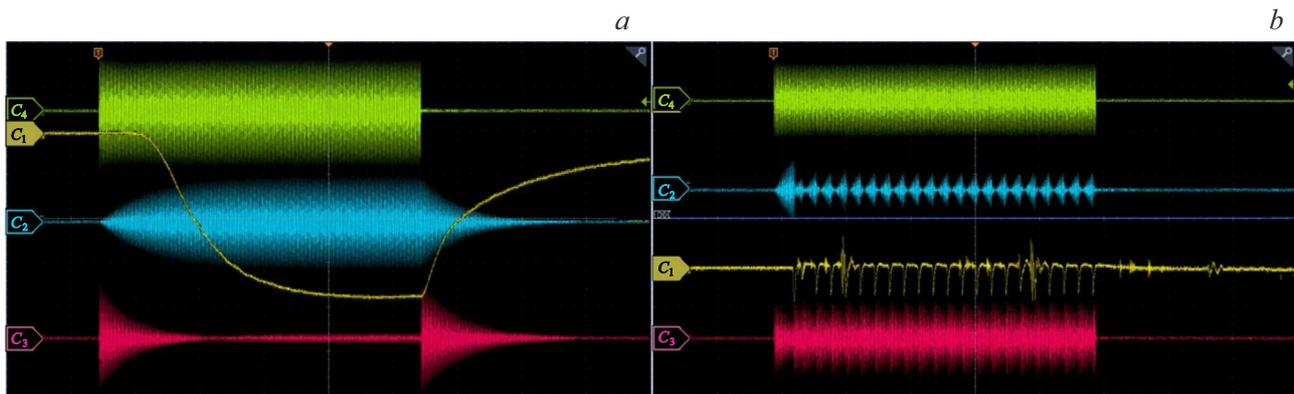


Рис. 6. Сигналы с направленного ответвителя и с дозиметра при высоком уровне ВЧ мощности (а) и при низком уровне (б). C_1 — сигнал с дозиметра, C_2 — сигнал прошедшей ВЧ мощности с петли резонатора, C_3 — сигнал отраженной ВЧ мощности с направленного ответвителя, C_4 — сигнал падающей ВЧ мощности.

заложенный при проектировании диапазон оперативной перестройки резонансной частоты ВЧ пушки 100 kHz, при помощи пьезоактюаторов, является по величине достаточным.

Предварительно, в начале тестирования, контролировались коэффициенты связи фидерных трактов (равные единице) как с ВЧ пушкой, так и с группирующим резонатором (когда при точной настройке в резонанс нет установившихся отражений ВЧ мощности от резонаторов). Точность установки этих коэффициентов контролировалась с помощью направленных ответвителей по сигналам падающей и отраженной волн, показанных на рис. 6, а. На рисунке видны штатные выбросы отраженной волны в моменты прихода переднего и заднего фронтов 100-мс импульса ВЧ мощности. Последующее после фронтов затухание происходит с постоянной времени резонаторов, определяемой их нагруженной добротностью. Измерения подтвердили наличие единичного коэффициента связи с хорошей точностью (отсутствие отраженной ВЧ мощности перед окончанием импульса).

Предварительные калибровки напряжения в ВЧ пушке и в группирующем резонаторе производились по измеренным коэффициентам связи измерительных петель, характеристик резонатора ВЧ пушки (добротность, характеристическое сопротивление) и по измеренной падающей ВЧ мощности с направленного ответвителя в тракте от генератора.

На рис. 6, а также показано изменение уровня радиации, измеренное импульсным дозиметром. Радиация возникает, как во всяком резонаторе, в результате тормозного излучения частиц темновых токов, эмитированных из поверхности и ускоренных под действием ВЧ поля с высокой напряженностью. Уровень радиации экспоненциально зависит от уровня ВЧ поля. Вплотную к резонатору уровень накопленной радиации составил 3 mSv за 2 h работы. На рис. 6, б представлены графики сигналов на низком уровне ВЧ мощности, причины изменения характеристик которых описаны ниже.

4. Тренировка ВЧ пушки и группирующего резонатора

Мультипакторный (МП) разряд, как правило, загорается в ВЧ резонаторах в областях с низкой напряженностью электрического ВЧ поля и с высокой напряженностью магнитного ВЧ поля, где низкоэнергетичные электроны с энергиями 10–1000 eV, попадая на стенку резонатора, выбивают из нее вторичные электроны. Те, в свою очередь, ускоряясь в этом поле, опять попадают на стенку и выбивают другие вторичные электроны. Этот процесс рождения новых частиц развивается лавинообразно, т.е. имеет инерционный характер, требующий определенного времени для своего развития [6].

Условием возникновения МП разряда, кроме наличия коэффициента вторичной эмиссии на поверхности большего единицы, является резонанс, когда траектории электронов между столкновениями с поверхностью укладываются по времени в один или несколько периодов ВЧ. Данные условия возникают при определенных уровнях ВЧ мощности в резонаторе, называемых зонами МП разряда. В процессе тренировки, из-за чистки поверхности падающими электронами, коэффициент вторичной эмиссии может понизиться до такой степени, что МП разряд больше не сможет развиваться в данной зоне. В таком случае считается, что МП разряд в данной зоне оттренирован и тренировка данной зоны прекращается.

Упомянутый выше эффект инерционности в развитии МП разряда наблюдался как в резонаторе ВЧ пушки на частоте 178.5 MHz, так и в резонаторе третьей гармоники 535.5 MHz, работающими в импульсном режиме с длительностью ВЧ импульсов 100 μ s и частотой повторения 1–10 Hz. В начале проводимых испытаний ВЧ резонаторы возбуждались по временной схеме от отдельных задающих генераторов с ВЧ импульсами, имеющими крутые фронты порядка 1–2 μ s. Из-за инерционности МП разряда при таких коротких фронтах любую из вышеупомянутых зон можно было проскочить

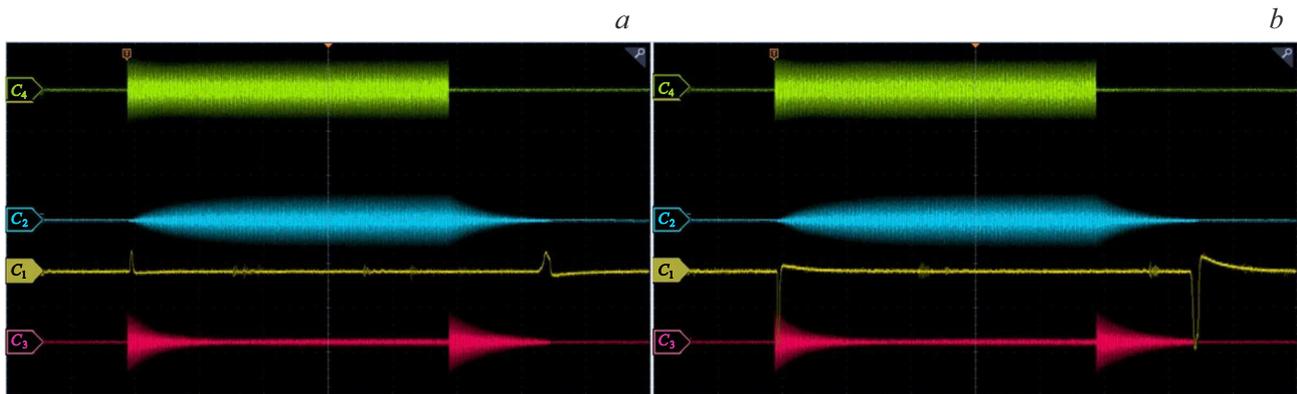


Рис. 7. Сигналы с катода (C_1): a — ионный ток, b — электронный ток. C_2 — прошедшая ВЧ мощность с петли резонатора, C_3 — отраженная ВЧ мощность и C_4 — падающая ВЧ мощность с направленного ответвителя.

и либо не тренировать их (как это было с первой зоной в резонаторе ВЧ пушки), либо приступить к тренировке любой из этих зон в любом порядке. Так, резонатор 535.5 MHz был оттренирован таким способом в течение трех суток, а ВЧ пушка — в течение одного рабочего дня.

Несмотря на это, в резонаторе ВЧ пушки оставалась не тренированной первая МП зона с низкой ВЧ мощностью до 1 kW. Для этой МП зоны с помощью постоянного магнита, который подносили к разным частям резонатора, было обнаружено, что МП разряд возникает на сетке катодно-сеточного узла в центре резонатора. За время $100\ \mu\text{s}$ ВЧ импульса МП разряд возникает дважды — на фронте импульса и на его спаде. На диаграмме отраженной и прошедшей ВЧ мощности второй МП разряд проявляется в виде резкого обрыва медленно затухающего напряжения в момент, когда это напряжение опускается до уровня зоны МП разряда. Для импульсов с низким уровнем мощности до 1 kW МП разряд загорается и гаснет периодически в течение всего импульса, как показано на рис. 6, b .

Другое проявление этого МП разряда, кроме ухудшения вакуума, наблюдалось по импульсам тока холодного катода, возникающим на фронте и на спаде ВЧ импульсов. Полярность импульсов тока зависела от полярности напряжения смещения на катоде, так как при этом до холодного катода сквозь сетку из области разряда доходил либо электронный ток при положительном смещении, либо ионный — при отрицательном смещении (рис. 7).

Данную зону МП на сетке невозможно было оттренировать, предположительно из-за большого коэффициента вторичной эмиссии с сетки, возникающей вследствие осаждения на ней паров бария, поступающего с катода, когда тот нагрет. Ожидается, что на практике данный МП разряд на сетке не опасен, так как он очень короткий и, действуя на фронте входного импульса ВЧ, быстро проскакивается, не развиваясь. Этот МП разряд не влияет на амплитудную и фазовую стабильность ВЧ в резонаторе в момент пролета ступков, происходящий

далеко после этого МП разряда, через $90\ \mu\text{s}$, когда напряжение на резонаторе уже сформировано без его участия.

Тем не менее проблемы с данным МП разрядом возникли, когда резонатор был включен в штатную систему управления ВЧ комплекса. В этой системе применяются специфические модуляторы, формирующие $100\ \mu\text{s}$ импульсы и одновременно участвующие в системах автоматической регулировки усиления (АРУ) и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Для надежного выполнения указанных функций, модулятор был сделан на основе $p-i-n$ -диодов, к сожалению, обладающих побочным эффектом затгивания фронта формируемых импульсов до $7-10\ \mu\text{s}$. При таких фронтах, как оказалось, МП разряд на сетке успевает развиться настолько сильно, что проскочить его и получить сколько-нибудь значительное напряжение в резонаторе не представляется возможным.

Данная проблема была решена схемотехнически, добавлением электронного ключа с коротким фронтом $1\ \mu\text{s}$ на входе модулятора, который включался с задержкой в несколько микросекунд после включения модулятора и обеспечивал тем самым ступеньку с крутым фронтом. Благодаря этому данная МП зона стала благополучно проскакиваться, и данный МП разряд больше не доставлял никаких проблем.

Кроме тренировки МП разряда, на стенде тренировались высоковольтные пробои. В резонаторе ВЧ пушки, где напряженность E поля достигает $20\ \text{MV/m}$ при входной номинальной ВЧ мощности 325 kW, электрический пробой сопровождается резким ухудшением степени вакуума вплоть до срабатывания вакуумной блокировки. Хотя операторы стремились не доводить ситуацию до возникновения пробоя, как этого требуют условия тренировки (медленный подъем напряжения и слежение за вакуумом), пробои вначале изредка случались. Тренировка резонатора ВЧ пушки продолжалась два дня, в течение которых при медленном подъеме входной

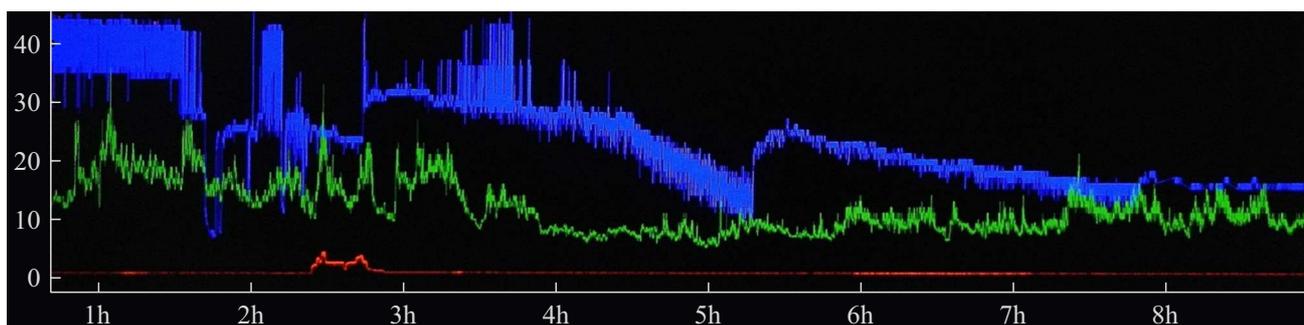


Рис. 8. Изменение степени вакуума при тренировке МП разряда в группирующем резонаторе на низких уровнях ВЧ мощности (синим цветом, верхняя кривая). Размытие кривой свидетельствует о том, что не каждый ВЧ импульс вызывает МП (шкала в μA тока магниторазрядного насоса, $1 \mu\text{A}$ соответствует 1.45 nPa).

мощности до 630 kW (до напряжения на резонаторе 1 MV) пробой в нем оттренировался полностью.

В случае с группирующим резонатором, как уже было сказано, имеющим несколько МП зон, тренировка МП была завершена в течение трех суток. Но после длительного простоя, в течение которого он находился при плохом вакууме, вызванном прогревом других частей установки, при неоднократном напуске атмосферы, потребовалась повторная его длительная тренировка. К сожалению, резонатор не был оснащен вакуумным затвором, отсекающим его от других частей установки, как это было сделано на ВЧ пушке.

Повторная тренировка протекала по другому сценарию, когда резонаторы работали в штатной системе ВЧ ускорительного комплекса с длинными фронтами ВЧ импульсов ($7\text{--}10 \mu\text{s}$). Как отмечалось ранее, из-за таких относительно длинных фронтов МП зоны разряда проскочить не удастся. Из-за этого тренировка резонатора 535.5 MHz во всем диапазоне до его максимальной мощности 12 kW должна была проводиться, начиная с первой мультипакторной зоны, от 400 W . Но решено было на первом этапе сразу подавать импульсную ВЧ мощность 7 kW , постепенно поднимаясь до 12 kW , хоть она при этом почти вся отражалась (в резонатор проходила мощность 400 W). Тренировка таким (быстрым) способом, как оказалось, не приводит к стабильной работе, так как при любом случайном снижении уровня ВЧ до уровня нижней, не оттренированной, МП зоны (400 W), иногда возникает устойчивый МП разряд, приводящий к почти полному отражению ВЧ мощности.

Процесс тренировки проводился по следующим правилам. Резонансная частота резонатора регулировалась вручную. Сам процесс тренировки контролировался по сигналам падающих и отраженных волн с направленного ответвителя, а также по уровню напряжения с петли на резонаторе и по показаниям вакуумметра. Была замечена связь интенсивности МП от направления расстройки резонансной частоты, что свидетельствует о том, что МП загорается во вводе мощности. В случае с ВЧ пушкой, где центральный стержень ввода мощности был покрыт нитридом титана, МП разряд во вводе мощности

ВЧ пушки отсутствовал. В случае с группирующим резонатором этого покрытия не было сделано. Из-за этого коэффициент вторичной эмиссии во вводе мощности группирующего резонатора оставался высоким, что постоянно приводило к возникновению МП в нем.

Таким образом, в начале процесса тренировки отражалась почти вся ВЧ мощность, в резонатор проходило только 400 W , которые никак не зависели от падающей ВЧ мощности, из-за этого напряжение на группирующем резонаторе тоже оставалось неизменным. Изменялась только степень вакуума — чем больше была падающая ВЧ мощность, тем хуже были показания вакуума. При 7 kW показания вакуумметра вначале достигали 10^{-7} Torr . В процессе тренировки проходящая в резонатор ВЧ мощность постепенно возрастала, ускоряя свой рост к концу. В результате через 4 h тренировки напряжение на резонаторе восстановилось, и отражение исчезло при существенном улучшении вакуума, и первый этап был закончен.

Как отмечалось выше, данная тренировка была недостаточно стабильной, так как самая нижняя МП зона не была оттренирована до конца. Поэтому потребовалась дополнительная тренировка на низком уровне ВЧ мощности около 400 W в течение двух суток, после которой показания степени вакуума улучшились (рис. 8), и только тогда стала возможной стабильная работа с пучком на установке.

Из данных испытаний сделан вывод об обязательности покрытия нитридом титана внутренней поверхности ввода ВЧ мощности для подавления МП разряда. Данное покрытие, широко распространенное в промышленности для различных целей, понижает коэффициент вторичной эмиссии электронов с поверхности, предотвращая развитие МП.

Высоковольтных пробоев в резонаторе 535.5 MHz не наблюдалось, что является нормальным фактом, так как максимальная напряженность электрического ВЧ поля в нем не превышает 5 MV/m , как в типовых резонаторах ИЯФ с непрерывным режимом работы.

Заключение

Главной особенностью предлагаемой конструкции ВЧ пушки, работоспособность которой подтвердилась при испытаниях, является применение специальной сферической геометрии задней стенки ускоряющего промежутка, позволяющей получать высокий темп ускорения при относительно низкой напряженности ВЧ поля на катоде и одновременно сфокусировать пучок. Первое дает возможность управления катодно-сеточным узлом импульсами амплитудой не выше 100 В, а второе — обходиться без системы сложной магнитной фокусировки. Конструкции ВЧ пушки и группирующего резонатора позволяют применить пьезоактюаторы для оперативной перестройки резонансной частоты. Кроме того, обеспечивается механическая регулировка положения катода внутри ВЧ пушки с применением системы позиционирования и контроля.

При изготовлении ВЧ пушки и оснастки высокую эффективность показали разработанные технологии и методы ЭЛС. Полученный опыт подтвердил особую важность применения алмазного точения для изготовления отдельных деталей, необходимость точной настройки резонансной частоты резонаторов с помощью электрических ВЧ измерений перед пайкой или сваркой, а также множество других технологических приемов и методов, которые целесообразно использовать для получения высоких ВЧ характеристик резонаторов.

Применяемые методы тренировки ускорительной системы подтвердили высокое качество изготовления, сборки и характеристик ВЧ пушки, а также позволили обнаружить наиболее уязвимую характеристику группирующего резонатора — возможность возникновения мультипакторного разряда во вводе ВЧ мощности. Применение покрытия типа нитрид титана на рабочих поверхностях ускорительной системы позволяет эффективно решить данную проблему, а оснащение резонатора индивидуальным вакуумным затвором, предотвращающим напуск атмосферы при ремонтных работах в канале пучка, — значительно снизить время высоковольтной и вакуумной тренировки системы, повысить ее надежность.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.M. Gurov, V.N. Volkov, K.V. Zolotarev, A.E. Levichev. *J. Surf. Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, **14** (4), 651 (2020).
- [2] V.N. Volkov, A.M. Batrakov, S.M. Gurov, S.E. Karnaeв, A.A. Kondakov, S.A. Krutikhin, G.Y. Kurkin, A.E. Levichev, O.I. Meshkov, V.K. Ovchar, A.V. Pavlenko, O.A. Pavlov, A.G. Tribendis, N.G. Vasileva. *The RF gun for the Siberian Circular Light Source SKIF* in Proc. IPAC'21 (Virtual Edition, Brazil, 2021), p. 2965–2967.
- [3] V.N. Volkov, V.S. Arbutov, E.K. Kenzhebulatov, E.I. Kolobanov, A.A. Kondakov, E.V. Kozyrev, S.A. Krutikhin, G.Ya. Kurkin, I.V. Kuptsov, S.V. Motygin, A.A. Murasev, V.K. Ovchar, V.M. Petrov, A.M. Pilan, V.V. Repkov, I.K. Sedlyarov, S.S. Serebnykov, O.A. Shevchenko, M.A. Sheglov, S.V. Tararyshkin, A.G. Tribendis, N.A. Vinokurov. *Test Stand Results of CW 100 mA RF gun for Novosibirsk ERL Based FEL* in Proc. RuPAC'18 (Protvino, Russia, 2018), p. 507–509.
- [4] В.Н. Волков, М.В. Арсентьева, А.М. Барняков, А.М. Батраков, Е.А. Бехтенов, Н.Г. Васильева, С.М. Гуров, С.Е. Карнаев, А.А. Кондаков, А.Н. Косарев, С.А. Крутихин, Г.Я. Куркин, А.Е. Левичев, А.Ю. Мартыновский, О.И. Мешков, С.В. Мотыгин, Д.А. Никифоров, В.К. Овчар, А.В. Павленко, О.А. Павлов, М.В. Родякин, Е.А. Ротов, И.К. Седляров, А.М. Семенов, Ма Сяочао, М.Г. Федотов. *ЖТФ*, **96** (6), (2024).
- [5] A. Levichev, K. Grishina, S. Samoilov, M. Arsentieva, D. Chekmenev, Ma Xiaochao, O. Meshkov, I. Pivovarov, D. Nikiforov, A. Barnyakov. *J. Instrumentation*, **18**, T07001 (2023). DOI: 10.1088/1748-0221/18/07/T07001
- [6] M. Borland. *A High-Brightness Thermionic Microwave Electron Gun* (SLAC-402, UC-41 4, (A), February 1991, Ph.D. Thesis)