

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.66

ДИАГНОСТИКА ПУЧКА ДЛЯ СТЕНДА ОБЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО
УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ВОДОРОДА ИЯИ РАН¹

© 2024 г. С. А. Гаврилов^{a, b, *}, В. А. Гайдаш^a, А. И. Титов^{a, b}

^aИнститут ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

^bМосковский физико-технический институт

(Национальный исследовательский университет)

Россия, 141700, Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., 9

*e-mail: s.gavrilov@inr.ru

Поступила в редакцию 06.12.2023 г.

После доработки 27.03.2024 г.

Принята к публикации 23.04.2024 г.

Стенд облучения, действующий на линейном ускорителе протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН, используется не только для задач в области радиационной стойкости, но и для проведения других исследований по взаимодействию пучков заряженных частиц с веществом. Отличительной чертой стенда является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях в широком диапазоне энергий и интенсивностей пучка, для чего необходимо обеспечить соответствующую универсальную диагностику пучка. В работе описаны принципы проектирования, изготовления и использования различных диагностических устройств стенда для разных типов пучков, представлены особенности их эксплуатации в разных облучательных режимах, а также приведены примеры вспомогательных функций предусилительной и интегрирующей электроники.

Ключевые слова: диагностика пучка, стенд облучения, индукционный датчик тока, цилиндр Фарадея, многопроволочный профилометр, многоламельный профилометр

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН [1] на базе сильноточного линейного ускорителя (ЛУ) протонов и отрицательных ионов водорода включает в себя стенд облучения, используемый для широкого круга исследований, в том числе для задач оптимизации ускорения и транспортировки пучков отрицательных ионов водорода. Стенд [2] преимущественно предназначен для облучения мишеней пучками протонов, выведенных на воздух, когда облучаемый объект закрепляется на двухкоординатном позиционере, позволяющем обеспечить поле облучения около $300 \times 300 \text{ мм}^2$, однако также существует возможность облучения стационарных мишеней в вакууме как пучками H^-/H^+ , так и объединенным пучком частиц с разными зарядовыми состояниями.

В связи с этим стенд может работать в облучательных режимах, принципиально различающихся зарядом частиц, энергией, током и временной структурой ускоренного пучка (табл. 1).

Таблица 1. Параметры пучка на стенде облучения

Параметр	Значение
Тип частиц на входе в стенд	ионы H^-/H^+
Энергия пучка на входе в стенд (МэВ)	20–247
Максимальное число частиц в импульсе	10^{12}
Минимальное число частиц в импульсе	10^6
Длительность импульса тока (мкс)	0.3–120
Частота следования импульсов тока (Гц)	1–50

Таким образом, система диагностики пучка (СДП) должна обеспечивать измерения в широком динамическом диапазоне ключевых параметров, таких как амплитуда и длительность импульсов тока, амплитуда среднего тока, поперечный профиль и положение пучка в облучаемой зоне.

СДП стенда состоит из следующих датчиков.

- (1) Индукционный датчик тока (ИДТ) на основе ферритового сердечника.
- (2) Цилиндры Фарадея (ЦФ), совмещенные с контрольными 4-секционными датчиками ореола.
- (3) Многопроволочный профилометр (МПП) на основе вольфрамовых проволочек.

- (4) Многоламельный профилометр (МЛП) на основе керамических печатных плат.
- (5) Многоанодный газовый счетчик (МГС) с люминесцентным экраном [3] для контроля процесса облучения мишеней на воздухе.

2. ДАТЧИКИ ТОКА

2.1. Индукционный датчик тока

Индукционный датчик тока (рис. 1) установлен на входе стенда для контроля амплитуды и длительности импульса тока первичного пучка, пришедшего из ЛУ.

Рис. 1. ИДТ в собранном виде с магнитной защитой.

В качестве сердечника выбрано ферритовое кольцо без диэлектрического покрытия фирмы “FerroxCube” T107/65/25-3C11 с одновитковой индуктивностью при нормальных условиях равной примерно $(11000 \pm 25\%)$ нГн.

Выбор ферритового сердечника объясняется существенным снижением стоимости итоговой сборки ИДТ благодаря отказу от дорогостоящих ленточных сердечников из аморфных или нанокристаллических сплавов и металлокерамической вставки, необходимой для их использования в условиях высокого вакуума с остаточным давлением менее 10^{-7} мбар. Типичный уровень газовыделения изостатически спрессованных ферритов при комнатной температуре без предварительной термической дегазации поверхности составляет 10^{-11} – 10^{-10} мбар·л/(с·см²) [4].

В связи с высоким ожидаемым уровнем статических и низкочастотных магнитных полей от различных систем ускорителя предусмотрено использование многослойной магнитной защиты: внутренний и внешний экраны из магнитных сталей.

Установленный ИДТ обладает следующими рабочими характеристиками:

- суммарный диапазон измеряемой амплитуды импульса тока равен 0.02–10 мА на основе четырех переключаемых коэффициентов усиления электроники,
- суммарный диапазон измеряемой длительности импульса тока составляет 0.3–150 мкс,
- время нарастания фронта импульса в рабочем диапазоне равно примерно 0.1 мкс,
- спад вершины импульса в рабочем диапазоне составляет около 0.02%/мкс.

2.2. Цилиндр Фарадея с датчиком ореола

Для контроля пучков на выходе стенда после зоны облучения было разработано несколько конструкций ЦФ: ЦФ для пучков H^-/H^+ с прямым измерением тока заряженных частиц и ЦФ для пучка частиц с произвольным зарядом, включая смесь зарядовых состояний с дополнительной системой обдирки и последующей прямой регистрацией пучка H^+ .

ЦФ для пучков H^-/H^+ (рис. 2) выполнены на основе стандартных ниппелей CF63, которые играют роль вакуумных корпусов. Регистрирующий узел закреплен во внутреннем кожухе из нержавеющей стали через изолирующие полиимидные прокладки и состоит из медного (M1) электрода и графитовой вставки, выполненной из изостатического графита (С-48).

Рис. 2. ЦФ для пучков H^-/H^+ с датчиком ореола.

В случае работы с пучками отрицательных ионов водорода присутствует существенный канал утечки измеряемого тока: обратно рассеянные слабосвязанные электроны, которые обдираются в поверхностном слое электрода ЦФ. Для пучков с энергиями выше нескольких МэВ энергия таких электронов превышает 1 кэВ и их подавление высоковольтным потенциалом представляет существенную технологическую проблему, поэтому для данного случая необходимо использование магнитной системы и/или сильно вытянутой конусообразной конструкции. При этом известно, что для электронов с энергиями менее 1 МэВ доля обратно рассеянных электронов составляет примерно 10% для легких материалов (с малым Z , например углерод) и до 50% для тяжелых материалов (вольфрам, тантал).

Входная поверхность вставки представляет собой конус с высотой равной диаметру основания, тем самым обеспечивается более равномерное распределение ионизационных потерь на поверхности и снижение вероятности импульсной термоэмиссии электронов, а также дополнительно уменьшается эффект утечки тока через обратно рассеянные электроны обдирки и электроны вторичной эмиссии.

Толщина вставки (55 мм) позволяет поглощать ионы водорода с энергией менее 110 МэВ, таким образом, при работе с максимальной энергией начальной части ускорителя (около 100 МэВ) интенсивность нейтронных потоков и мощность дозы наведенной

радиоактивности будут снижены. Общая толщина ЦФ (95 мм) рассчитана на энергию пучка порядка 225 МэВ. При этом суммарный диапазон измеряемой амплитуды импульса тока равен 0.02–10 мА на основе четырех переключаемых коэффициентов усиления электроники по аналогии с предусилительной электроникой ИДТ.

Также для минимизации тока утечки обратно рассеянных электронов обдирки предусмотрено квазидипольное магнитное поле (около 100 мТл в центре апертуры ЦФ), создаваемое двумя сегментами кольцевого неодимового магнита.

Для эффективного подавления низкоэнергетической вторичной эмиссии предусмотрены 4 электрода в виде кольцевых сегментов, на которые подается потенциал смещения до -300 В. Помимо функции смещения, электроды формируют позиционно-чувствительный датчик ореола пучка, так как с них через трансимпедансные усилители снимаются токовые сигналы от попадания частиц ореола пучка и электронов вторичной эмиссии. Благодаря этой вспомогательной диагностической функции можно контролировать полное прохождение пучка в апертуру ЦФ и тем самым гарантировать корректность измерений без использования дополнительного профилометра. Предусилительная электроника этих датчиков регистрирует сигнал обеих полярностей, что позволяет использовать эту функцию и для отрицательных, и для положительных ионов водорода.

Универсальный цилиндр Фарадея (рис. 3) выполнен по аналогичному принципу на основе более длинного ниппеля CF63, для того чтобы можно было разместить дополнительную систему обдирки частиц смешанного многозарядного пучка до состояния H^+ , совмещенную с многоламельным профилометром, описанным ниже. Частицы пучка, проходя через металлокерамические пластины профилометра суммарной толщиной около 1.7 мм, обдираются со 100-процентной вероятностью до протонов, которые и создают сигнальный ток ЦФ. Поток вторичных электронов с выходной поверхности второй пластины МЛП подавлен потенциалом смещения на электродах датчика ореола пучка.

Рис. 3. ЦФ для произвольного зарядового состояния пучка с датчиком ореола и профилометром.

3. ПРОФИЛОМЕТРЫ

3.1. Многоламельный профилометр

Многоламельный профилометр, предназначенный для прямого контроля профиля и положения как пучка частиц с одинаковым зарядом, так и многозарядного пучка на входе в ЦФ, фактически является разновидностью многопроволочного профилометра, работая на тех же физических принципах. Однако благодаря эффекту обдирки в первой плоскости профилометра сигнал создается током электронов обдирки, а во второй плоскости – током электронов вторичной эмиссии, порождаемых уже перезаряженным пучком протонов. Профилометр изготовлен на основе двусторонних печатных плат из керамического ламината RO4003С толщиной 0.813 мм, покрытого с обеих сторон медной фольгой толщиной 35 мкм с иммерсионным золочением, на поверхности которых промышленным способом изготовлено с одной стороны 17 сигнальных дорожек шириной 1 мм с шагом 2 мм, с другой стороны – сплошной электрод размером $34 \times 34 \text{ мм}^2$ (рис. 4). На электрод первой платы подается потенциал смещения до +300 В, что подавляет вторичную электронную эмиссию с самого электрода и дорожек первой платы, но усиливает эмиссию с дорожек второй платы, что и требуется для ее режима работы. Сплошной электрод второй платы, являющийся выходной поверхностью МЛП, заземлен, для того чтобы выход вторичных электронов из него был эффективно подавлен потенциалом смещения на электродах датчика ореола пучка.

Рис. 4. Модель МЛП и фотография платы.

3.2. Многопроволочный профилометр

Для измерений профиля и положения пучка на входе стенда установлен классический многопроволочный профилометр в виде “сетки”, позволяющий проводить измерения профиля по обеим осям в единичном импульсе тока, что необходимо для одноимпульсного режима работы стенда.

При попадании частиц пучка на поверхность отдельной проволочки возникает вторичная электронная эмиссия, а проволочка приобретает заряд, равный сумме зарядов покинувших ее вторичных и δ -электронов, перехваченных ионов (в случае низких энергий) и оседающих электронов обдирки (в случае отрицательных ионов водорода).

Сетка МПП (рис. 5) образована 21 + 21 проволочками диаметром 100 мкм из позолоченного вольфрама, расположенными с переменным шагом 1–2 мм для достижения большего разрешения в центре апертуры.

Рис. 5. Фотография “сетки” профилометра.

Несущие рамки с контактами для проволочек так же изготовлены в виде печатных плат из керамического ламината. Для борьбы с кросс-токами, возникающими из-за попадания вторичных электронов с одной проволочки на другую, в конструкцию МПП добавлены промежуточные проволочки для формирования потенциала смещения, а также в интегрирующей электронике МПП предусмотрена возможность подавать потенциал смещения до + 300 В непосредственно на сигнальные проволочки.

Начиная с энергий примерно 3 МэВ коэффициент вторичной эмиссии для вольфрама становится меньше единицы, поэтому в случае пучка Н⁻ в электронике заложена возможность смены полярности сигнала для работы с током электронов обдирки, оседающих в проволочках.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе развития стенда облучения на линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН был разработан комплекс устройств диагностики ключевых параметров пучка для исследований по взаимодействию ускоренных пучков заряженных частиц с веществом. Отличительной чертой разработанной системы диагностики является возможность работы с пучками частиц в разных зарядовых состояниях во всем диапазоне энергий и интенсивностей пучков, подаваемых на стенд облучения. Индукционный датчик тока и многопроволочный профилометр установлены на входе в стенд и позволяют измерять ток и профили пучка частиц. На выходе стенда размещены цилиндры Фарадея. Для повышения точности и надежности проводимых измерений в разработанных устройствах реализован как набор классических методик для оптимизации их работы, так и нестандартные решения, например датчики ореола пучка на входах цилиндров Фарадея, позволяющие контролировать полное прохождение пучка в апертуру ЦФ и тем самым гарантировать корректность токовых измерений на длинных пролетных базах стенда без использования дополнительных профилометров. Также на входе одного из цилиндров

установлен многоламельный профилометр на основе печатных плат, выполняющий функцию перезарядной мишени для возможности регистрации тока многозарядного пучка, образующегося на стенде в некоторых режимах облучения. Пучок смешанных зарядовых состояний полностью обдирается в пластинах профилометра до протонов, создающих сигнальный ток ЦФ, при этом сам профилометр позволяет регистрировать профиль многозарядного пучка.

Для всех устройств СДП стенда разработан полный комплект электроники: предварительные усилители ЦФ и ИДТ, интеграторы и коммутаторы профилометров и датчиков ореола, источники напряжения смещения, а также платы контроля и управления нижнего уровня для считывания сигналов и ручного управления коэффициентами усиления, напряжениями смещения и сигналами калибровки.

Фотографии устройств, размещенных на стенде, и примеры рабочих окон программ с измеренными профилями и током пучка, а также сигналами датчиков ореола показаны на рис. 6.

Рис. 6. Фотографии элементов СДП, установленных на стенде облучения: **а** – сборка ИДТ и МПП; **б** – установленная сборка МГС и люминесцентного экрана для контроля пучка, выведенного на воздух при облучении мишеней, закрепленных на позиционере; **в** – установленная система из трех ЦФ с датчиками ореола и МЛП. Примеры рабочих окон программ с измеренными сигналами датчиков: **г** – профили пучка H^- на МПП, **д** – ток пучка на ЦФ для пучка H^- , **е** – разнополярные сигналы датчиков ореола пучка на входе в ЦФ для пучка H^- .

5. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.inr.ru/ckp-new/>
2. *Gavrilov S., Bragin S., Feschenko A., Gaidash V., Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Lebedev S., Melnikov A., Serov V., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P., Tsibryaev S.* Proton irradiation facility at INR RAS

linac // Proc. of RuPAC'18. Protvino: LACoW Publishing, 2018. P. 142.

<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-FRCAMH02>

3. *Gavrilov S., Melnikov A., Titov A.* Beam diagnostics and instrumentation for proton irradiation facility at INR RAS linac // Proc. of IBIC'18. Shanghai: JACoW Publishing, 2018. P. 40.

<https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2018-MOPA07>

4. *Barnes M., Ducimetiere L.* Ferrite materials for in-vacuum instruments // Proc. of ARIES workshop "Materials and engineering technologies for particle accelerator beam diagnostics instruments", 2021.

<https://indico.cern.ch/event/1031708/>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. ИДТ в собранном виде с магнитной защитой.

Рис. 2. ЦФ для пучков H^-/H^+ с датчиком ореола.

Рис. 3. ЦФ для произвольного зарядового состояния пучка с датчиком ореола и профилометром.

Рис. 4. Модель МЛП и фотография платы.

Рис. 5. Фотография “сетки” профилометра.

Рис. 6. Фотографии элементов СДП, установленных на стенде облучения: **а** – сборка ИДТ и МПП; **б** – установленная сборка МГС и люминесцентного экрана для контроля пучка, выведенного на воздух при облучении мишеней, закрепленных на позиционере; **в** – установленная система из трех ЦФ с датчиками ореола и МЛП. Примеры рабочих окон программ с измеренными сигналами датчиков: **г** – профили пучка H^- на МПП, **д** – ток пучка на ЦФ для пучка H^- , **е** – разнополярные сигналы датчиков ореола пучка на входе в ЦФ для пучка H^- .

РИСУНКИ

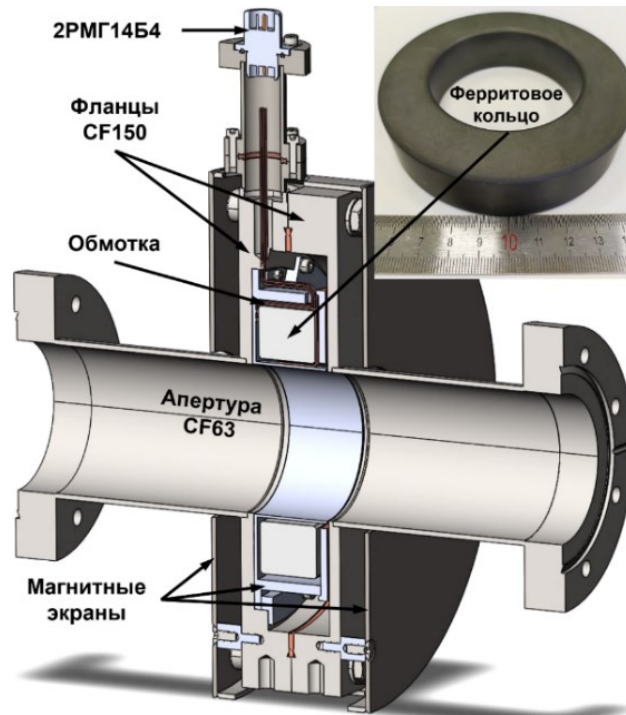


Рис. 1

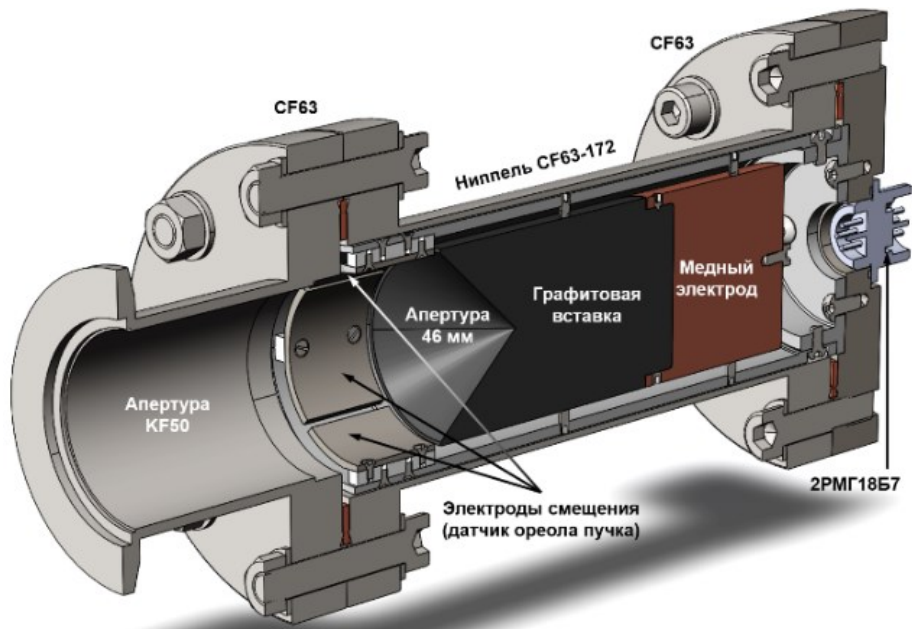


Рис. 2

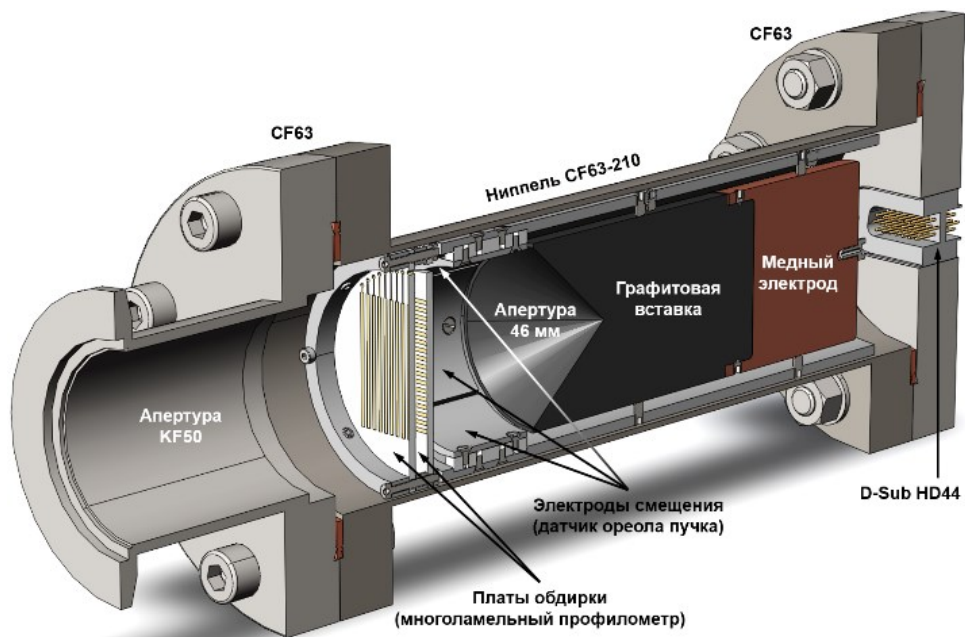


Рис. 3

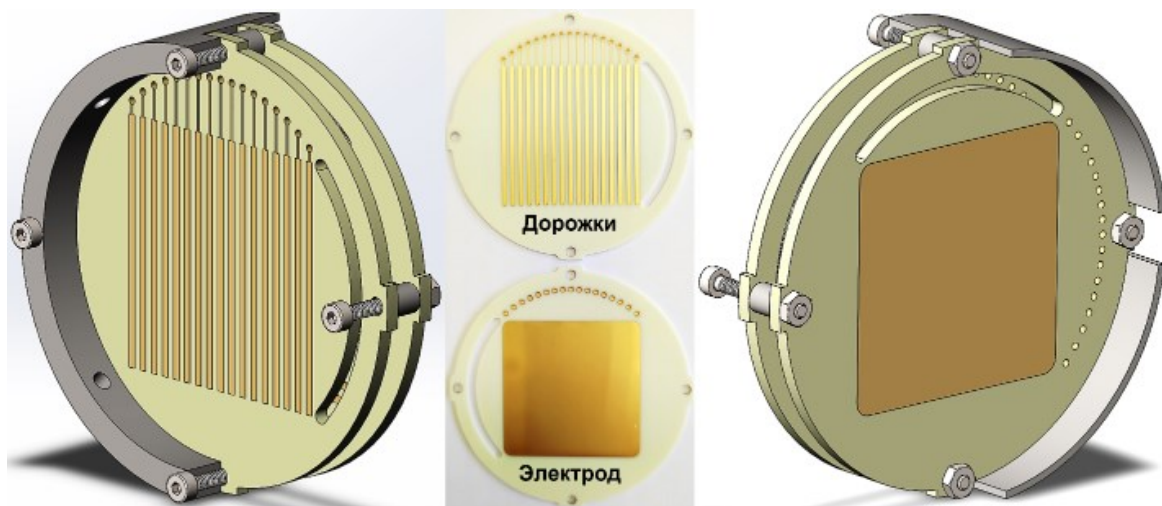


Рис. 4

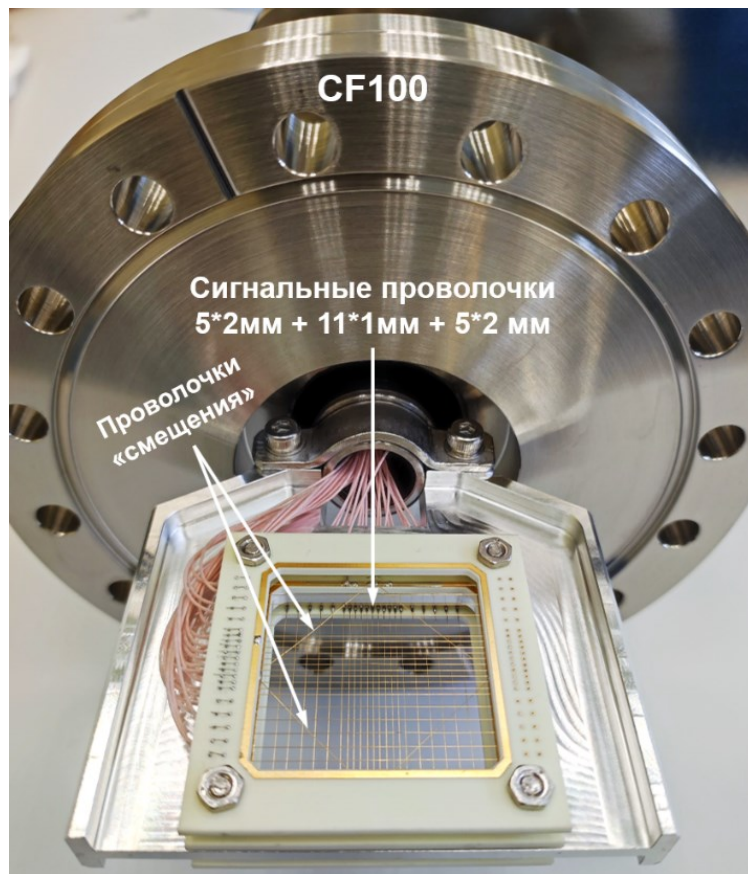


Рис. 5

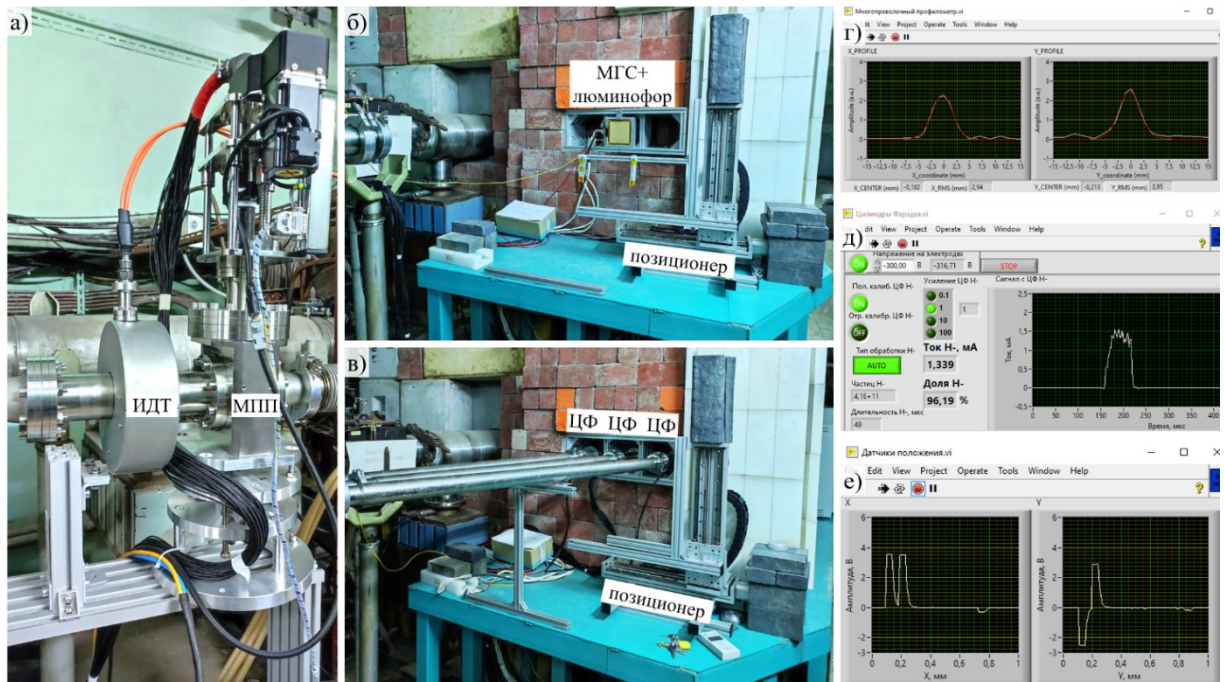


Рис. 6

Для связи с авторами:

Гаврилов Сергей Александрович

E-mail: s.gavrilov@inr.ru

Тел.: 8-919-770-81-53 (моб.)

Гайдаш Виктор Александрович

E-mail: gaidach@inr.ru

Титов Александр Иванович

E-mail: alexander.i.titov@yandex.ru

В помощь переводчику:

**BEAM INSTRUMENTATION FOR THE IRRADIATION FACILITY AT THE
HYDROGEN IONS LINAC OF INR RAS**

S. A. Gavrilov, V. A. Gaidash, A. I. Titov

The irradiation facility at the INR RAS linear accelerator of protons and negative ions of hydrogen is used not only for tasks in the field of a radiation resistance, but also for other research in the interaction of charged particles beams with matter. A distinctive feature of the facility is the ability to work with particle beams in different charge states, in a wide range of beam energy and intensity, that demands to provide appropriate universal beam diagnostics. The paper describes features of the design, manufacture and use of various diagnostic instrumentation at the facility for different types of beams, features of their operation in different irradiation modes are presented, and also examples of auxiliary functions of preamplifier and integrating electronics are provided.

ЛИТЕРАТУРА

2. Gavrilov S., Bragin S., Feschenko A., Gaidash V., Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Lebedev S., Melnikov A., Serov V., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P., Tsibryaev S. Proton irradiation facility at INR RAS linac // Proc. of RuPAC'18. Protvino: LACoW Publishing, 2018. P. 142.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-FRCAMH02>
3. Gavrilov S., Melnikov A., Titov A. Beam diagnostics and instrumentation for proton irradiation facility at INR RAS linac // Proc. of IBIC'18. Shanghai: JACoW Publishing, 2018. P. 40.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2018-MOPA07>
4. Barnes M., Ducimetiere L. Ferrite materials for in-vacuum instruments // Proc. of ARIES workshop "Materials and engineering technologies for particle accelerator beam diagnostics instruments", 2021.
<https://indico.cern.ch/event/1031708/>