

P1-2024-63

Ю. Н. Касумов¹, Н. Е. Пухаева^{1,2}, А. В. Березов¹,
В. О. Сабуров³, Е. И. Казаков³, Д. А. Джабиев¹

РАЗРАБОТКА ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР
ДЛЯ МОНИТОРИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ
ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

¹ Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова, Владикавказ, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

³ Медицинский радиологический научный центр им. А. Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Касумов Ю. Н. и др.

P1-2024-63

Разработка ионизационных камер для мониторингования интенсивных пучков тяжелых ионов высоких энергий

Разработаны и созданы две ионизационные камеры (ИК-1 и ИК-2) для прикладных исследований на комплексе NICA. В камере ИК-1 активная область имеет размер 160×160 мм, электроды изготовлены из фольгированного стеклотекстолита толщиной 140 мкм. Камера ИК-2 имеет активную область 100×100 мм, электроды изготовлены из фольгированного полиимида толщиной 110 мкм. Камеры предназначены для станции длительного облучения, которая была апробирована во время сеанса 2022–2023 гг., в зоне эксперимента BM@N. Станция дает возможность длительного облучения образцов параллельно с работой эксперимента BM@N и использует ионный пучок высоких энергий. Камеры прошли тестовые испытания на гамма-источнике ^{60}Co и протонном пучке с энергией 150 МэВ на ускорителе «Прометейс» в МРНЦ им. А. Ф. Цыба (Обнинск). Разработка подобных ионизационных камер актуальна в свете импортозамещения для работ в области прикладных исследований на комплексе NICA.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2024

Kasumov Yu. N. et al.

P1-2024-63

Development of Ionization Chambers for Monitoring High-Energy Heavy Ion Intense Beams

Two ionization chambers, IK-1 and IK-2, have been developed and manufactured for applied research at the NICA facility. The IK-1 chamber has an active area of 160×160 mm, the electrodes are made of $140 \mu\text{m}$ thick foil-clad fiberglass, the IK-2 chamber has an active area of 100×100 mm, the electrodes are made of $110 \mu\text{m}$ thick foil-clad polyimide. The chambers are intended for the long-term irradiation station, which was tested during the 2022–2023 data taking in the BM@N experiment area. The station enables long-term irradiation of samples in parallel with the BM@N experiment and uses a high-energy ion beam. The chambers have been tested on a ^{60}Co gamma source and a 150 MeV proton beam at the accelerator “Prometheus” at the Tsyb MRRC (Obninsk). The development of such ionization chambers is relevant in light of import substitution for work in the field of applied research at the NICA complex.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Помимо фундаментальных исследований на комплексе NICA ведутся и прикладные исследования в области наук о жизни (Life Sciences), а также в направлениях биомедицинских приложений, радиационного материаловедения, тестирования микроэлектроники, прикладных ядерных технологий и задач проекта ADSR (study of Accelerator Driven Subcritical Reactor systems).

Одна из станций, предназначенная для прикладных исследований на комплексе NICA, — это станция длительного облучения (Station Long-Term Exposure — SLTE). Она апробирована во время сеанса конца 2022 – начала 2023 г. [1]. Первые образцы были облучены во время тестирования станции. Первые результаты уже получены для облученных образцов в рамках прикладных исследований на комплексе NICA. Станция предоставляет возможность работы на пучках тяжелых ионов высоких энергий порядка 3–4 ГэВ/нуклон на протяжении нескольких месяцев, т. е. в течение всего сеанса.

Для проведения дальнейших успешных исследований по воздействию тяжелых ионов высоких энергий крайне важно точно знать распределение потока ионов по облучаемому образцу для дальнейшего пересчета в поглощенную дозу.

В преддверии ожидаемого в 2025 г. сеанса на комплексе NICA в области прикладных исследований ARIADNA [2] необходимо создание комплекса детекторов. Измерения должны опираться на надежные данные об интенсивности пучка, о координатах образцов относительно пучка, о длительности облучения для исследования воздействия ионов высоких энергий на различные объекты, в том числе биологические.

Поскольку предполагается проведение биологических исследований, то определенный интерес представляют данные из Технического отчета МАГАТЭ (TRS-277) [3]. В нем рекомендуется использовать метод определения поглощенной дозы в воде при дистанционной лучевой терапии с помощью ионизационной камеры. Другие международные рекомендации по дозиметрии в области лучевой терапии — «Применение плоскопараллельных ионизационных камер в пучках фотонов и электронов высоких энергий» (содержатся в Техническом отчете МАГАТЭ (TRS-381) [4]). Дальнейшее развитие данной тематики отражено в работе [5]. В работе даны рекомендации в систематизации и в единообразном международном подходе к калибровке ионизационных камер в единицах поглощенной дозы в воде и в пучках излучений, используемых в лучевой терапии, т. е. определения поглощенной дозы в воде для фотонов низких, средних и высоких энергий пучков электронов, протонов и тяжелых ионов, используемых в дистанционной лучевой терапии.

В настоящей работе представлены результаты тестирования мониторинговой плоскопараллельной и многофункциональной ионизационных камер, разработанных в лаборатории ядерных исследований Северо-Осетинского государственного университета, для дозиметрического контроля ионного пучка в сеансах на комплексе NICA ОИЯИ. Эти камеры предназначены для изучения влияния высокоэнергетических пучков ионов как на биологические объекты, такие как клеточные культуры и лабораторные мыши, так и на испытываемые новые материалы.

КОНСТРУКЦИЯ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР

Разработаны и собраны прототипы ионизационных камер для станции длительного облучения SLTE ARIADNA. Камеры разработаны в рамках импортозамещения. Поскольку предстоит работа с медленным выводом пучка и с ионами высоких энергий, что приведет к снижению количества создаваемых ионов на миллиметр пробега в камере, то использование камер с небольшим рабочим зазором, хорошо зарекомендовавших себя на протонных пучках с высокой интенсивностью и меньшей энергией [6], представляется нецелесообразным. Более привлекательной выглядит конструкция камер с двойным рабочим объемом, имеющих общий собирающий электрод, как у камер, изготавливаемых фирмой PYRAMID [7].

Камера ИК-1 представляет собой корпус, который изготовлен из алюминия. Наружные его размеры — $250 \times 250 \times 60$ мм. Внутри корпуса установлена ионизационная камера размером 160×160 мм. Электроды изготовлены из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита. Толщина стеклотекстолита — 100 мкм, толщина медного слоя — 18 мкм. Имеются два чувствительных зазора. Сигнальный электрод находится между двумя высоковольтными электродами. Величина зазора между высоковольтным электродом и сигнальным составляет 5 мм.

Общий вид камеры ИК-1 показан на рис. 1.

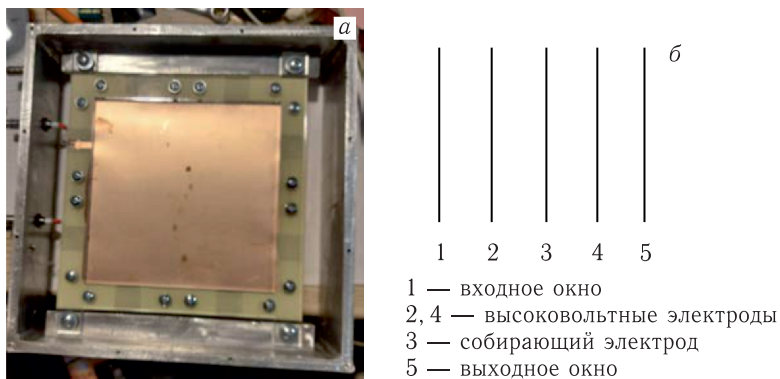


Рис. 1. а) Камера ИК-1; б) схема камеры

Такое расположение чувствительных зазоров позволило получить эквивалентную толщину 10 мм. С целью снижения токов утечки вокруг сигнального электрода методом фотолитографии вытравлен защитный зазор. Входное и выходное окна ионизационной камеры выполнены из алюминиевой фольги толщиной 12 мкм. Алюминиевая фольга вместе с корпусом образуют электромагнитный экран. Высокое напряжение подается коаксиальным кабелем типа RG-58 (PK-50-3). Сигнал снимается с помощью сигнального разъема на боковой части корпуса камеры и поступает на вход измерительного прибора через коаксиальный кабель.

Камера ИК-2 аналогична камере ИК-1, но уменьшенного размера. Габариты корпуса — 170 × 170 × 60 мм. Внутри установлена ионизационная камера размером 100 × 100 мм. Electroды изготовлены из фольгированного полиимида толщиной 50 мкм отечественного производства с адгезивным подслоем 12 мкм. Толщина медной фольги 18 мкм. Поверхность фольги для предотвращения окисления покрыта защитным слоем цинка толщиной 2–3 мкм. По сравнению с электродами из фольгированного текстолита электроды, изготовленные из фольгированного полиимида, меньше склонны к короблению после операции травления меди. Чувствительный зазор — 5 мм.

Общий вид камеры ИК-2 показан на рис. 2.



Рис. 2. Камера ИК-2

Конструкция деталей и сборочных единиц изделия такова, что может быть подвергнута эффективной теххимической обработке с целью удаления остаточных загрязнений (ультразвуковой промывке электродов в дистиллированной воде после травления меди и в изопропиловом спирте всех деталей перед сборкой). Это позволит минимизировать токи утечки в процессе проведения измерений.

Для уменьшения токов утечки в плоскости собирающего электрода сформировано заземленное охранное кольцо, предотвращающее попадание токов утечки на собирающий электрод. Оплетки кабелей объединены и припаяны к охранному кольцу для минимизации числа контуров заземления.

Конструкция камеры позволяет подавать высокое постоянное напряжение в диапазоне от 0 до 1000 В. Подаваемая разность потенциалов выбирается в зависимости от состава и давления рабочей газовой смеси.

ТЕСТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР

Тестирование на гамма-источнике. Предварительные тестовые испытания ионизационных камер были проведены с использованием гамма-источника ^{60}Co и ускоренного пучка протонов. В качестве газовой среды использовался воздух.

Особенности аппарата «Рокус-АМ» (АО «Равенство», Санкт-Петербург) и комплекса протонной терапии (КПТ) «Прометеус» (ЗАО «ПРОТОМ», Протвино) приведены в работах [8, 9], размещение исследуемых камер на аппаратах показано на рис. 3, 4.

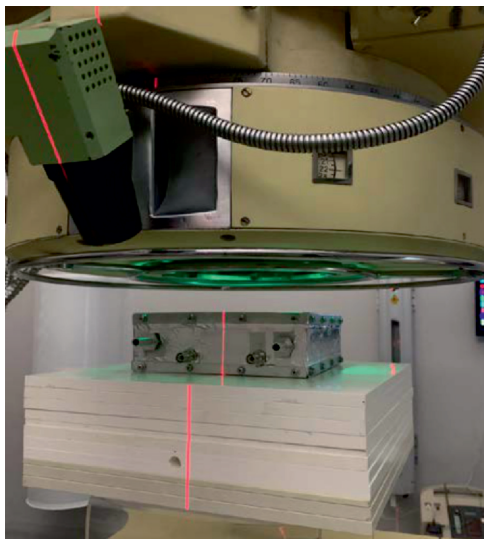


Рис. 3. Гамма-терапевтический аппарат «Рокус-АМ»

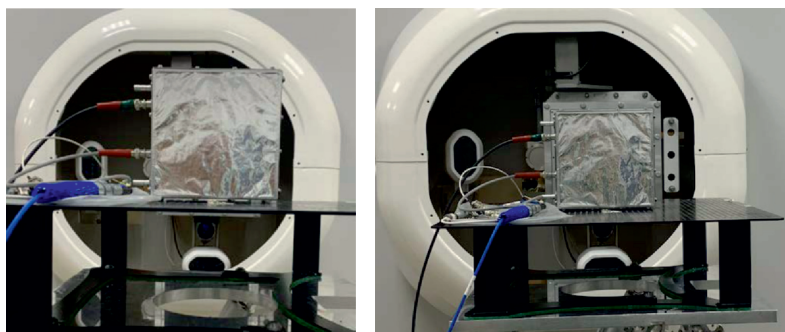


Рис. 4. Общий вид эксперимента на КПТ «Прометеус»

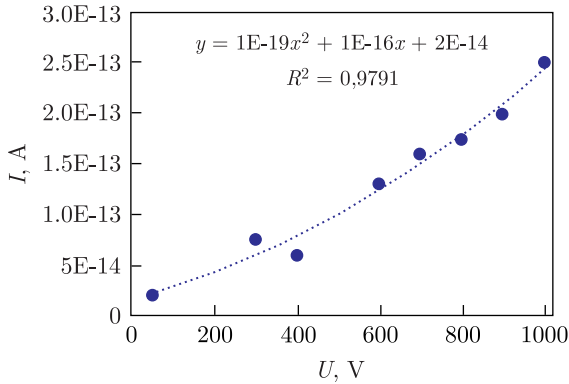


Рис. 5. Токи утечки камеры ИК-2

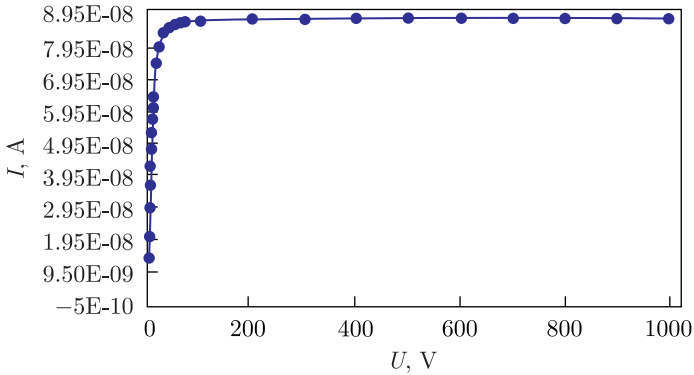


Рис. 6. ВАХ камеры ИК-2

Измерения проводились с помощью прибора Keysight B2987B, имеющего встроенный источник напряжения до 1000 В, с возможностью смены полярности прикладываемого напряжения. Прибор позволяет работать в режиме измерения как тока, так и заряда.

Токи утечки камеры ИК-2 для диапазона напряжения от 0 до 1000 В приведены на рис. 5 и доходят до величины 0,25 пА при 1000 В.

На рис. 6 показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) камеры при облучении ее гамма-квантами. ВАХ имеет хорошо выраженное плато.

Тестирование на протонном пучке. Для измерений на протонном пучке выбрано рабочее напряжение 700 В (соответствующее наиболее плоской части плато ВАХ камеры, см. рис. 6).

Испытание камер на протонном пучке проводилось при энергии протонов 150 МэВ на ускорителе «Прометеус» (см. рис. 4) в диапазоне интенсивности от 10^6 до 10^9 протонов/цикл. Размеры пучка — $\sigma_x = 3,0$ мм,

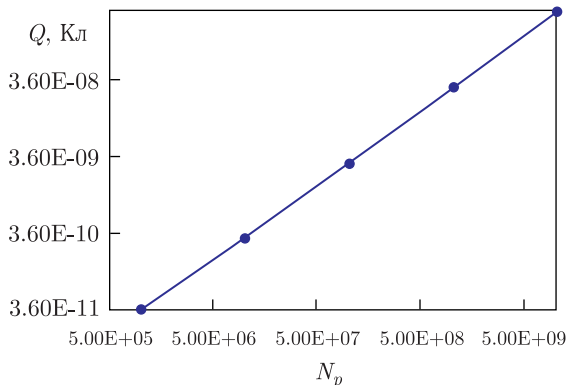


Рис. 7. Зависимость величины собранного заряда от числа прошедших протонов

$\sigma_y = 3,3$ мм. Длительность импульсов — 200 мс, частота — 1,8 с. Интегральный поток 10^{10} частиц набирался в течение почти 20 с (10–11 сбросов по $\sim 10^9$ частиц в каждом). По результатам измерений можно определить, что эффективность ионизации воздуха протонами составила величину порядка 20 пар ионов на миллиметр пробега, что совпадает с ожидаемым значением.

Зависимость собранного заряда от числа прошедших через камеру протонов показана на рис. 7. Заряд собирался Keysight B2978D в режиме сбора заряда. Видна хорошая линейность отклика камеры в исследованном диапазоне изменения числа прошедших протонов (N — число протонов, Q — заряд, собранный в камере при прохождении N протонов).

Данная зависимость была получена путем измерения собираемого камерой заряда при изменении интенсивности пучка в 10 раз (соответственно, ожидается в 10 раз изменение величины регистрируемого заряда).

Некоторое отклонение от линейности отклика камеры наблюдается при числе прошедших протонов менее 10^6 — порядка 25%, что, предположительно, обусловлено возможностями ускорителя по выводу пучков низкой интенсивности.

Обе камеры показали практически одинаковые характеристики при облучении протонами, отличия проявились при измерении неравномерности чувствительности камеры по краям по сравнению с центром. Так, камера с более жесткими электродами из фольгированного текстолита ИК-1 показала большую неравномерность сбора заряда по площади против камеры с электродами из фольгированного полиимида ИК-2. Сигнал по краям меньше, чем в центре, и в различных углах менялся от 2,2 до 22% у ИК-1 против 1,7–6,8% у ИК-2 (рис. 8) (точка измерения отстояла от угла к центру камеры на 15 мм по диагонали), что, возможно, сопоставимо с разбросом интенсивности пучка при смене положения камеры при облучении.

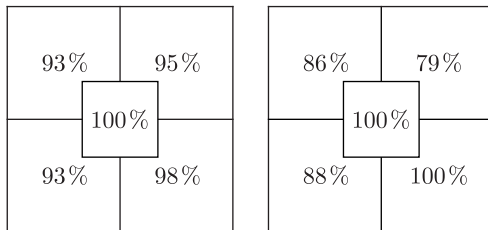


Рис. 8. Неоднородность камеры ИК-2 (слева) и ИК-1 (справа)

Калибровка разработанной и изготовленной ионизационной камеры при использовании других источников частиц высоких энергий может быть осуществлена с помощью образцовой поверочной камеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены разработанные и созданные две плоскопараллельные ионизационные камеры (ИК-1 и ИК-2) для станции облучения SLTE ARIADNA.

Тестовые испытания камер на гамма-источнике ^{60}Co и протонном пучке с энергией 150 МэВ на ускорителе «Прометейс» в МРНЦ (Обнинск) показали наличие плато шириной свыше 500 В.

Разработка подобных ионизационных камер крайне актуальна в свете импортозамещения и запуска в ОИЯИ нового ускорительного комплекса NICA, одним из важных направлений применения которого будет проведение работ в области прикладных исследований.

Работа выполнена в рамках исследований коллаборации ARIADNA.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FEFN-2024-006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://nica.jinr.ru/>; <https://www.jinr.ru/posts/pervye-prikladnye-issledovaniya-napuchkah-ionov-vysokih-energij-kompleksa-nica/>
2. Белов О. В. Стенд длительного облучения ARIADNA // Новости ОИЯИ. 2024. № 2. С. 21–23.
3. Review of Data and Methods Recommended in the International Code of Practice. IAEA Tech. Rep. Ser. No. 277. Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. IAEA, Austria, 1996.
4. Review of Data and Methods Recommended in the International Code of Practice for Dosimetry. IAEA Tech. Rep. Ser. No. 381. The Use of Plane Parallel Ionization Chambers in High Energy Electron and Photon Beams. IAEA, Austria, 2000.

5. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии. Сер. техн. докл. № 398. МАГАТЭ. Вена, 2004.
6. *Агапов А. В., Мицын Г. В., Шипулин К. Н.* Разработка ионизационных камер для мониторинга высокоинтенсивных пучков излучения. Сообщ. ОИЯИ Р13-2023-34. Дубна, 2023.
7. <https://www.ptcusa.com/category/ion-chambers>
8. *Гранин Д. И., Верзо С. Н., Пашков О. В.* Новый гамма-терапевтический комплекс «Рокус-Р» // Мед. физика. 2018. № 2. С. 29–38.
9. *Ульяненко С. Е., Лычагин А. А., Корякин С. Н., Галкин В. Н.* Комплекс протонной терапии сканирующим пучком «Прометеус»: радиологические основы и перспективы // Матер. I Всерос. конгресса РАТРО «Новые технологии в лучевой терапии и ядерной медицине. Перспективы развития», Сочи, 27–28 апр. 2017 г. С. 107.

Получено 28 декабря 2024 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 04.02.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,60. Тираж 105 экз. Заказ № 61031.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/