

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИРОВАНИЯ ФОРМЫ, ПОЛОЖЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ИОНОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН-М ОИЯИ

*С. Е. Васильев, А. В. Вишнеvский¹, М. Г. Кадыков, А. М. Маканькин,
С. И. Тютюнников, А. А. Шурыгин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Описаны образцы детекторов и электроники к ним, созданные для мониторинга в режиме реального времени «интенсивных» выведенных пучков релятивистских ионов ускорителя комплекса нуклотрон-М. Система тестировалась в ряде ускорительных сеансов с пучками дейтронов с интенсивностью вплоть до 10^{10} с^{-1} и с пучками ядер углерода. Система позволяет многократно за время сброса измерять двумерное распределение интенсивности пучка в плоскости, перпендикулярной к нему, положение пучка в этой плоскости и двумерное распределение дозы облучения мишени после каждого сброса.

This work describes the samples of detectors and electronics for them which were developed for on-line monitoring of the «intensive» extracted beams of relativistic nuclei at the accelerator Nuclotron. The system has been tested in several acceleration runs with deuteron beams with the intensity up to 10^{10} s^{-1} and carbon ion beams. The system allows one to make multiple measurements of the two-dimensional beam intensity distribution during the beam spill and two-dimensional distribution of the exposed dose of target irradiation after each beam spill.

PACS: 29.20.dk; 29.27.Eg; 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

Типы ускоряемых ионов и энергии пучков нуклотрона и планируемого к созданию ускорительного комплекса NICA подходят для ряда прикладных исследований и практических приложений [1, 2] в таких областях, как:

- 1) ядерная энергетика;
- 2) исследования радиационной стойкости материалов;
- 3) радиационная биология и медицина.

¹E-mail: alex.vishnevskiy@mail.ru

Описанная в статье система мониторинга выведенных пучков была разработана в рамках темы по созданию медицинского канала, существовавшая до 2011 г. включительно.

Она должна быть частью более общего набора детекторов и систем, позволяющих решать ряд прикладных задач из списка, приведенного выше, и использовать исключительно электронные методики. За основу создания системы мониторинга пучка были взяты требования, исходящие из радиационной терапии. Поток ионов от дейтронов до углерода с интенсивностью от 10^5 до 10^{10} с⁻¹, диаметром пучка 3–4 мм и энергией до сотен МэВ на нуклон с помощью сканирующих магнитов должен засвечивать область порядка 200×200 мм. Система должна обеспечивать:

1) измерение положения отклоненного пучка по крайней мере один раз за 1 мс для контроля системы сканирующих магнитов;

2) измерение профиля отклоненного пучка в каждом его положении для контроля качества самого пучка;

3) измерение распределения дозы облучения мишени после каждого сброса пучка.

Для решения этих задач в отделении № 5 ЛФВЭ созданы образцы детекторов и электроники к ним. Для первых двух задач использованы проволочные камеры. Для третьей — пиксельная камера.

Уместно заметить, что регистрируются не отдельные частицы пучка, а усредненные токи ионизации, производимые пучковыми частицами в детекторах, и полные заряды ионизации.

Следует сказать, что близкую по содержанию систему мониторинга выведенных пучков [3] развивают в пучковом отделе ЛФВЭ. Она предназначена для работы со стационарными пучками и обходится ограниченным количеством каналов регистрации в одной станции. По техническим требованиям она не соответствует медицинскому каналу. Система мониторинга для медицинского канала разрабатывалась как часть более общей системы. Кроме того, предполагается постоянное развитие и совершенствование системы. Из этого следуют, в частности, требования к унификации управления многими блоками, их питания и т. д., что приводит, в свою очередь, к крейтовой организации всей системы, в отличие от упомянутой выше. Есть и другие важные отличия. В [3] и в настоящей работе использованы проволочные камеры одного и того же проекта. В [3] проволочные камеры не описаны, поэтому будет уместным привести их описание в данной статье.

Созданная система, работающая в режиме реального времени, нашла в настоящее время практическое применение в экспериментах по ядерной энергетике на пучках нуклотрона. Она дополнила используемую до последнего времени систему диагностики пучка, основанную на активационной методике (измерение интегрального сброса пучка за многочасовое облучение) и на засветке фотопластинки (измерение профиля пучка в районе мишени и его положения).

СИСТЕМА МОНИТОРНЫХ КАМЕР

В отделении № 5 ЛФВЭ разработаны и изготовлены действующие образцы детекторов и электроники к ним для мониторинга пучка ионов нуклотрона:

— проволочная камера с электроникой front-end и электроникой регистрации, расположенной в удаленном от пучкового канала крейте приема данных;

— пиксельная ионизационная камера. Применена электроника, разработанная в ЛЯП ОИЯИ [8].

Эта система предназначена для выполнения следующих функций:

- многократное за сброс определение профиля выводимого пучка и его положения в плоскости XU в широком диапазоне интенсивностей от 10^5 до 10^{10} c^{-1} ;
- определение суммарного потока частиц пучка за сброс;
- регистрация распределения дозы облучения на облучаемом объекте в плоскости XU с точностью не хуже 10 %.

Состав реализованной и описанной здесь системы показан на рис. 1. Она успешно эксплуатируется в сеансах начиная с декабря 2011 г.

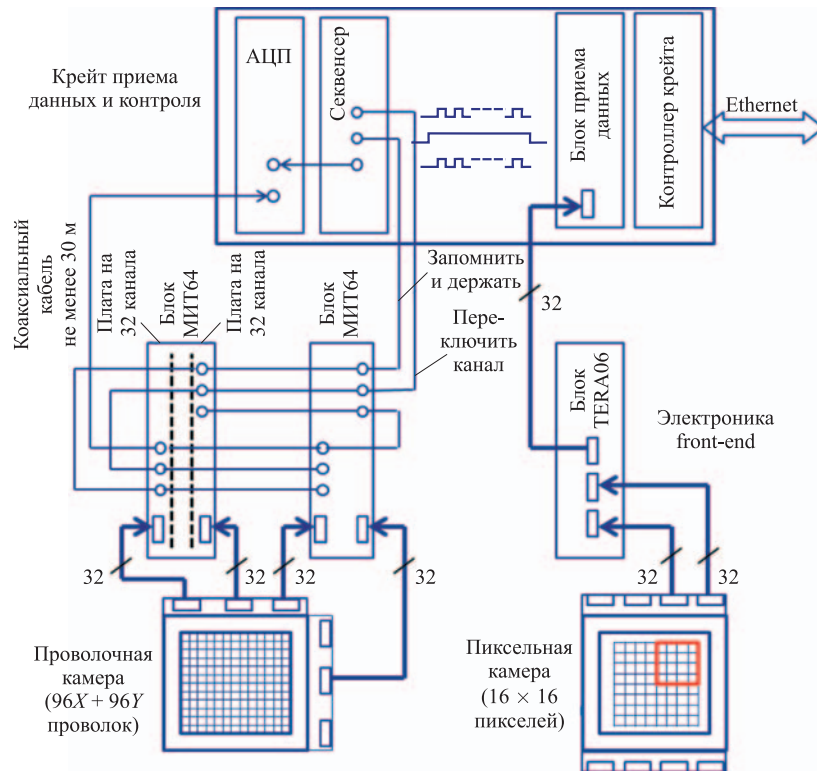


Рис. 1. Состав описываемой системы для мониторинга выведенного пучка ядер нуклотрона

Двухкоординатные проволочные пучковые камеры. Сечение камеры показано на рис. 2. Камера содержит две сигнальные плоскости для регистрации проекции распределения интенсивности пучка на координатные оси X и Y . Сигнальные анодные плоскости помещены между тремя высоковольтными катодными плоскостями. Каждая сигнальная плоскость представляет собой массив проволок из золоченого вольфрама диаметром 25 мкм, расположенных с шагом 2 мм. Каждая сигнальная плоскость содержит 96 проволок. Соответствующий размер чувствительной области 192×192 мм. Каждая проволока имеет выход на разъем для подсоединения к электронике регистра-

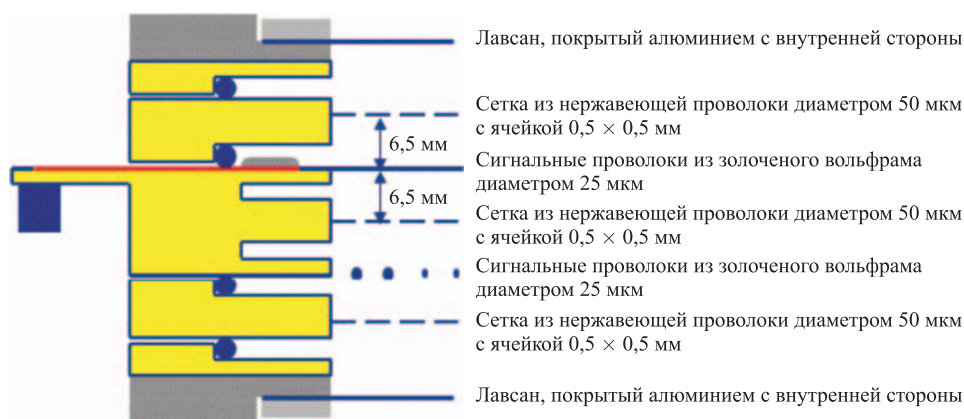


Рис. 2. Сечение проволочной камеры для измерения профиля пучка

ции. Высоковольтные плоскости выполнены из нержавеющей сетки. Диаметр проволок 50 мкм. Ячейка сетки $0,5 \times 0,5$ мм, межэлектродный зазор 6,5 мм. Камеры непрерывно продуваются газовой смесью на основе аргона и углекислого газа с добавлением паров пропанола. При «большой» интенсивности пучка камеры работают в режиме сбора зарядов ионизации, образующихся в межэлектродном зазоре. При «малой» интенсивности пучка камеры могут работать в режиме газового усиления вплоть до 10^4 .

Электроника проволочных камер. Электроника проволочных камер содержит электронику front-end, расположенную на расстоянии до 1,5 м от пучка, блок аналого-цифрового преобразователя (АЦП), находящийся в удаленном крейте приема данных на расстоянии не менее 30 м, и так называемый секвенсер, вырабатывающий серию управляющих импульсов для синхронизации работы системы, расположенный там же.

Блок-схема карты электроники front-end проволочных камер показана на рис. 3. Одна карта содержит 32 канала регистрации значений тока с проволок камеры в выделенные моменты времени. Карта по существу является многоканальной аналоговой памятью и аналоговым мультиплексором для последовательного подключения памяти канал за каналом к удаленному АЦП, расположенному в крейте приема данных. Каждая карта имеет один аналоговый выход, который активируется, если номер вызываемого канала соответствует данной карте. В ином случае аналоговый выход находится в отключенном состоянии. Все карты для считывания одним каналом АЦП могут быть объединены по выходу. Каждой карте присваивается номер с помощью переключателей, расположенных на ней. Таким образом, все каналы, объединенные для считывания на один канал АЦП, выстраиваются в одну очередь с общей нумерацией. Конструктивно карты установлены в ячейках NIM, по две штуки в одной, т. е. одна ячейка содержит 64 канала. По сигналу с секвенсера во всех каналах системы, состоящей из многих карт, одновременно запоминается текущее значение входного тока. Далее серией управляющих импульсов производится последовательное подключение одного канала за другим из общей очереди к АЦП.

В соответствии с техническими требованиями постоянная времени спада сигнала, формируемого в первом каскаде, выбрана 330 мкс. Это означает, что мы можем опрашивать информацию с циклом от 1 мс для получения корректной информации о динамике изменений, происходящих с пучком.

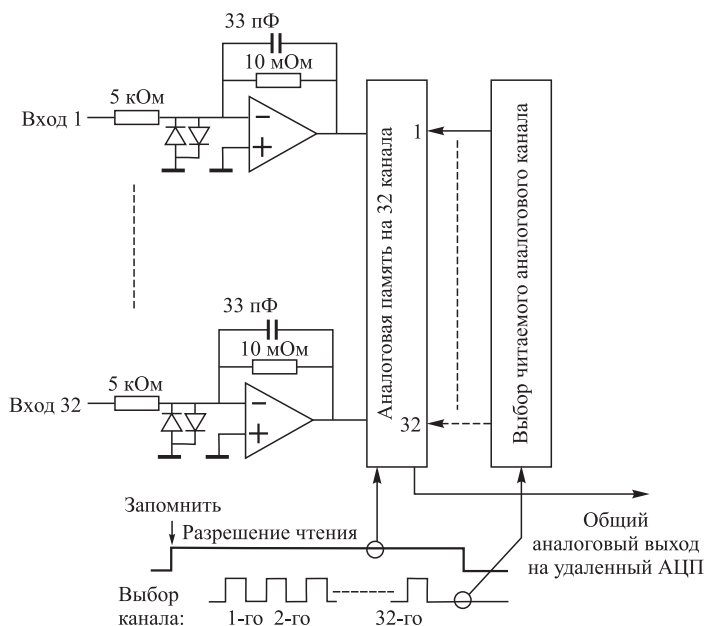


Рис. 3. Блок-схема карты электроники front-end проволочных камер

Секвенсер, расположенный в крейте сбора данных, обеспечивает выработку серии управляющих импульсов по команде от контроллера крейта или от внешнего стартового сигнала, необходимой для управления синхронной работой электроники front-end и АЦП. Выходные сигналы выведены на переднюю панель. В основе секвенсера использована память 2Кx8. Перед началом работы в сеансе секвенсер требует загрузки в память через магистраль крейта 2048 8-разрядных слов, обеспечивающих необходимую конфигурацию серии управляющих импульсов через выходные разъемы. Будучи запущенным от внешнего сигнала или по команде через магистраль крейта, внутренний генератор производит 2048 импульсов, после чего останавливается. Счетчик импульсов выдает последовательную серию адресов для чтения одного за другим 8-разрядных слов. Каждый бит очередного слова обеспечивает выработку сигнала через один из восьми выходных разъемов на передней панели.

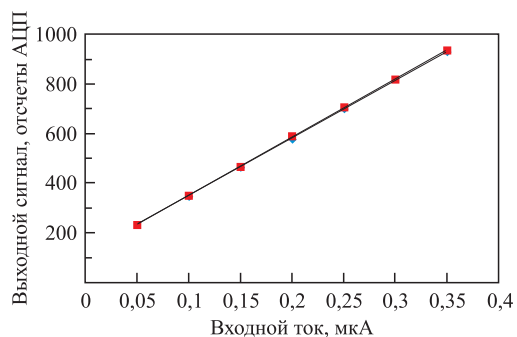


Рис. 4. Калибровочные зависимости для двух произвольно выбранных каналов электроники проволочных камер

Калибровочные зависимости для нескольких каналов регистрации, включающих электронику front-end и АЦП в крейте приема данных, показаны на рис.4. Получены они с тестовым источником тока.

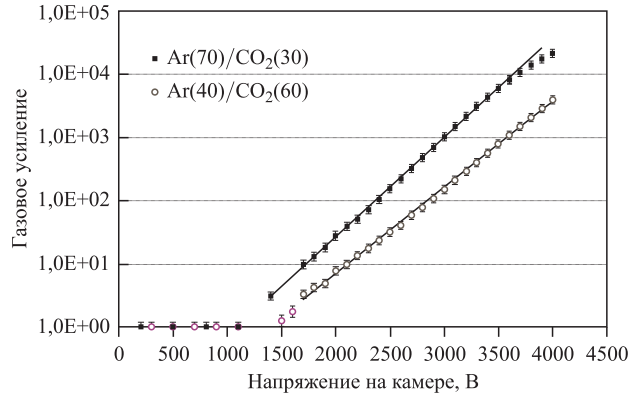


Рис. 5. Зависимость газового усиления проволочной камеры от напряжения

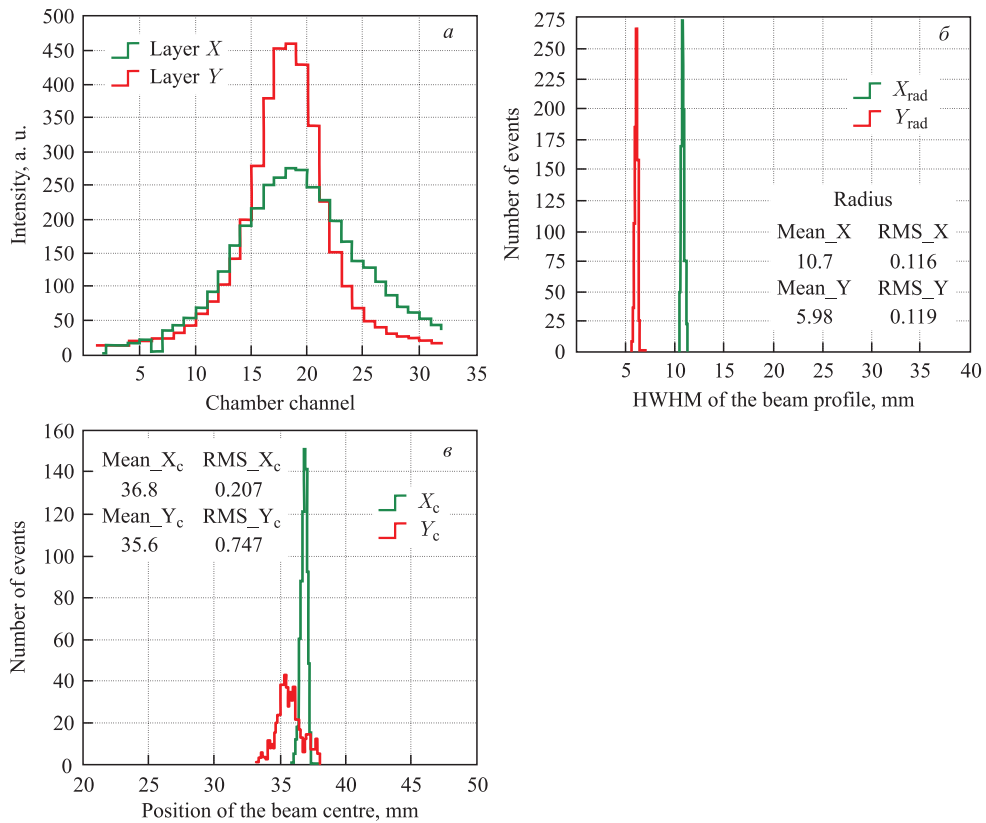


Рис. 6. Примеры визуальной информации с системы проволочных камер в процессе экспозиции на пучке

Зависимости газового усиления камеры от напряжения для двух газовых смесей на основе аргона и углекислого газа с добавлением паров пропанола приведены на рис. 5. Для измерения этих зависимостей использована электроника для пиксельных камер. О ней будет сказано ниже. Регистрировался заряд, проходящий между электродами камеры за единицу времени при ее облучении от радиоактивного источника Sr-90.

Комбинация возможности газового усиления и динамического диапазона электроники регистрации обеспечивают динамический диапазон системы не менее пяти порядков.

На рис. 6 показаны примеры визуальной информации с проволочных камер, выводимой на экран после каждого сброса в процессе набора данных:

- профили пучка в проекции на X - и Y -оси после очередного сброса;
- распределения полуширин на полувысоте профилей для проекций X и Y в процессе набора данных;
- распределения положений центра пучка в процессе набора данных в системе координат проволочной камеры.

Пиксельная ионизационная камера. Сечение пиксельной ионизационной камеры показано на рис. 7. За основу взят тот же механический конструктив, что и для проволочных камер. Катод выполнен на основе сетки из нержавеющей проволоки диаметром

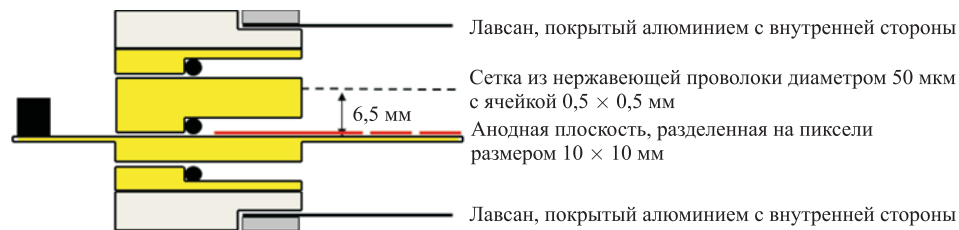


Рис. 7. Сечение пиксельной камеры

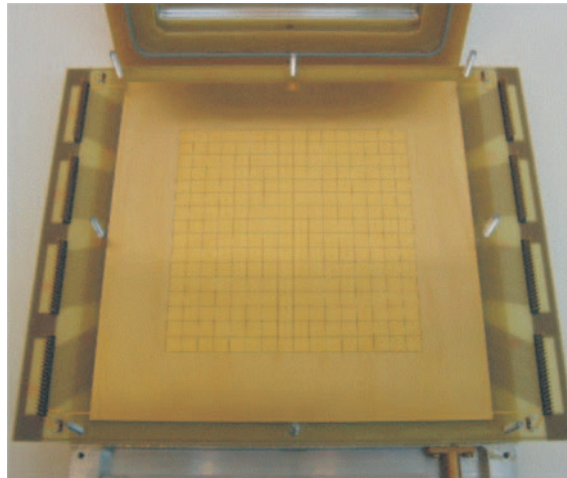


Рис. 8. Анодная плоскость педовой камеры, разделенной на отдельные сигнальные площадки с индивидуальным выходом на разъемы на периферии камеры

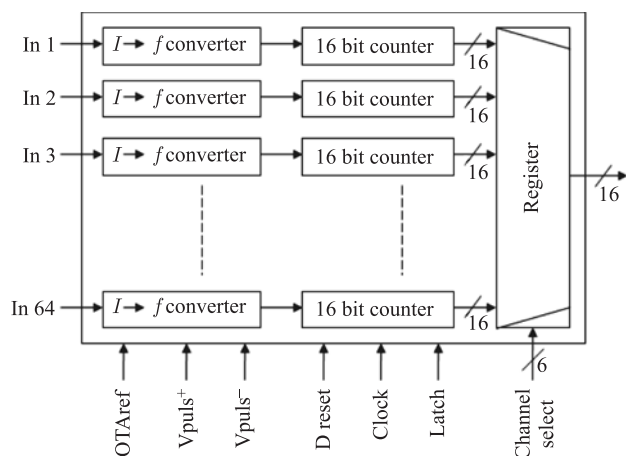


Рис. 9. Архитектура интегральной схемы TERA06 [5]

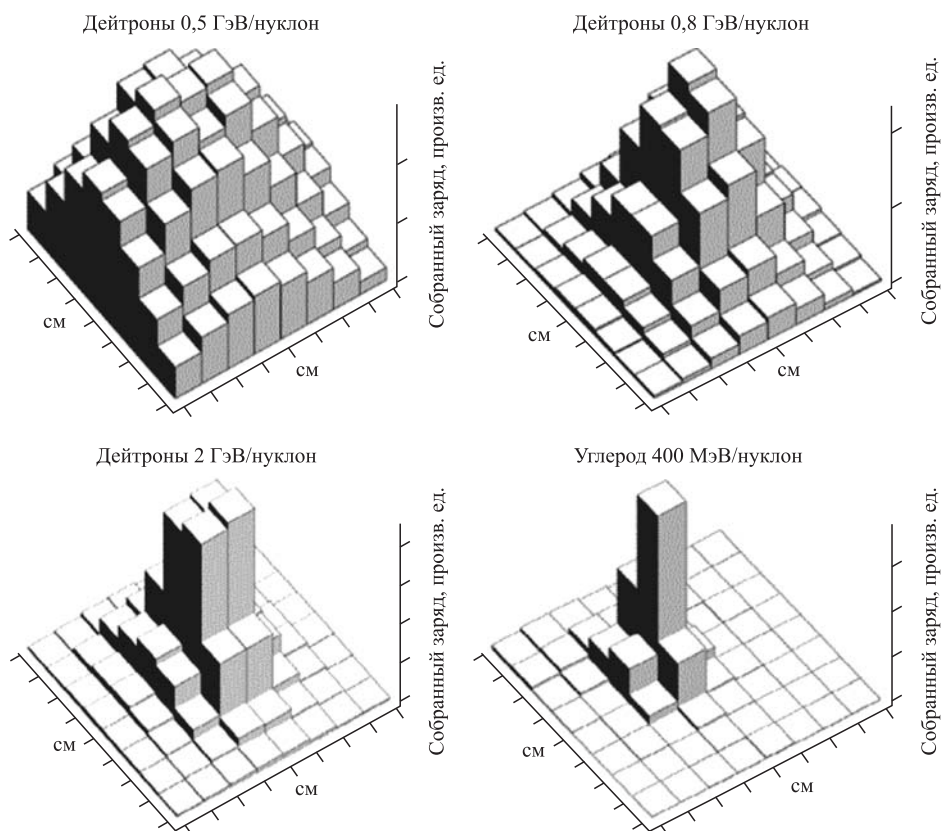


Рис. 10. Примеры визуальной информации, получаемой с пиксельной камеры после каждого сброса пучка

50 мкм. Размер ячейки $0,5 \times 0,5$ мм. Анодная плоскость является сменным элементом камеры. В описываемом случае применена анодная плоскость, выполненная из стеклотекстолита толщиной 1 мм. Чувствительная область 160×160 мм разделена на 256 отдельных чувствительных площадок — пикселей, каждая из которых выведена на разъем на периферии печатной платы. Размер пикселя 10×10 мм. Зазор между электродами может меняться в широких пределах, начиная с 6,5 мм, с помощью вставок. На рис. 8 показано фото анодной плоскости пиксельной камеры.

В сеансах на пучке пиксельная камера продувалась той же газовой смесью, что и проволочная камера, на основе аргона и углекислого газа с добавлением паров пропанола.

Электроника пиксельной камеры. Электроника состоит из двух типов блоков: электроники front-end возле камеры и блока приема данных, находящегося в удаленном от пучкового канала крейте приема данных.

Электроника front-end пиксельной камеры расположена на расстоянии от нее до 1,5 м. В ее основе использована итальянская микросхема TERA06 [4–7], архитектура построения которой показана на рис. 9. Некоторые основные особенности микросхемы следующие. Каждый из 64 каналов преобразует входной ток I в частоту импульсов f с непрерывным подсчитыванием количества импульсов 16-разрядным счетчиком. Содержимое счетчика в любой момент времени по команде из блока приема данных может быть сдвинуто в выходной регистр на 64 слова. Содержимое регистра считывается слово



Рис. 11. Система из проволочной и пиксельной ионизационной камер, установленных на пучке выведенных ионов нуклотрона, в одном из сеансов

за словом в блок приема данных, расположенный в удаленном от пучкового канала крейте. В это время счетчик работу не прерывает. Таким образом, система работает без мертвого времени. Квант преобразования входного тока в частоту меняется с помощью внешних потенциалов в пределах от 100 до 800 фК. Максимальная частота преобразования 5 мГц. Средний шум на канал порядка 1 с^{-1} . В описываемой системе использованы блок front-end и блок приема данных, разработанные в ЛЯП ОИЯИ [8]. Для установленных настроек квант преобразования входного тока в частоту около 600 фК. Всего применено 64 канала регистрации, что обеспечило размер чувствительной зоны пиксельной камеры $80 \times 80 \text{ мм}$.

На рис. 10 приведены примеры визуальной информации о двумерном распределении интегральной дозы, получаемой в реальном режиме времени, после каждого сброса пучка на мишень.

На рис. 11 показана система из проволочной камеры и пиксельной ионизационной камеры, установленных на пучке в одном из сеансов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы образцы систем:

— двухкоординатных проволочных камер с размером чувствительной зоны $192 \times 192 \text{ мм}$ и электроники к ним;

— пиксельной ионизационной камеры с размером чувствительной зоны $160 \times 160 \text{ мм}$ с размером одного пэда $10 \times 10 \text{ мм}$ и общим их количеством 256, работающей с электроникой регистрации на основе микросхемы TERA06.

Системы обеспечивают мониторинг выведенных пучков релятивистских ионов нуклотрона в режиме реального времени:

— многократное за время сброса пучка измерение его профиля, положения центра и интенсивности;

— измерение распределения интегральной засветки мишени после каждого сброса.

Система тестировалась в серии сеансов на ускорителе нуклотрон и показала работоспособность при интенсивностях пучка дейтронов вплоть до 10^{10} с^{-1} . Калибровки системы в пучках ионов разных типов и энергий являются предметом дальнейших исследований и публикаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agarov N. et al.* NICA Project at JINR // Proc. of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, 2012.
2. *Бабкин В. А. и др.* Пучок ионов углерода для радиотерапии на нуклотроне ОИЯИ. Препринт ОИЯИ P13-2008-38. Дубна, 2008.
3. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 42-го и 43-го сеансов нуклотрона. Препринт ОИЯИ P9-2011-72. Дубна, 2011.
4. *Bonazzola G. C. et al.* Performances of a VLSI Wide Dynamic Range Current-to-Frequency Converter for Strip Ionization Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 405. P. 111.

5. *Mazza G. et al.* A 64-Channel Wide Dynamic Range Charge Measurement ASIC for Strip and Pixel Ionization Detectors // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005. V. NS-52, No. 4. P. 847.
6. *Rivero F.* Characterization of Front-End Electronics Boards for Ionization Chambers Used to Monitor Hadrontherapy Beams.
<http://personalpages.to.infn.it/~rivero/tesi/Tesi%20triennale/Presentazione%20Tesi.pdf>. 2007.
7. *La Rosa A. et al.* Characterization of a Front-End Electronics for the Monitoring and Control of Hadron Therapy Beams // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 586. P. 270–275.
8. *Аганов А. В. и др.* Методика трехмерной конформной протонной лучевой терапии // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2, № 6(129). С. 80–86.

Получено 24 февраля 2014 г.