

ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ПУЧКА НУКЛОТРОНА

А. А. Балдин^{а, б, 1}, А. И. Берлев^{а, 2}, И. В. Кудашкин^{а, б, 3}, А. Н. Федоров^{а, б, 4}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б ООО «Институт перспективных исследований ОМЕГА», Дубна

В рамках подготовки проекта NICA [1] и экспериментов с выведенными пучками нуклотрона представлена разработка перспективной системы диагностики циркулирующих пучков на основе микроканальных пластин (МКП). Разработанный, созданный и испытанный в четырех сеансах на пучках нуклотрона прототип детектора позволяет проводить измерения пространственно-временных характеристик пучка в диапазоне интенсивностей однозарядных ионов от 10^6 до 10^9 , который не покрывается существующими средствами измерений.

The advanced diagnostic system for the Nuclotron circulating beams based on microchannel plates (MCP) is presented in the framework of the NICA project [1] and experiments with extracted beams. The system, designed, developed and tested on the beams during the four last runs of the Nuclotron, provides measurements in the intensity range of 10^6 – 10^9 for singly charged ions which is not covered by existing measuring devices.

PACS: 29.20.dk; 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач эксплуатации ускорительного комплекса нуклотрон (ЛФВЭ ОИЯИ) является создание современных систем неразрушающего контроля пространственных и временных характеристик пучков тяжелых ионов в процессе ускорения и вывода из ускорителя.

Поскольку на нуклотроне планируется ускорение широкого спектра ионов вплоть до золота, существует проблема настройки и контроля вывода разнообразных пучков, в особенности с низкой интенсивностью (от единиц до 10^6 частиц за цикл ускорения) [1].

¹E-mail: an.baldin@mail.ru

²E-mail: berlev@inr.ru

³E-mail: ivan.kudashkin@gmail.com

⁴E-mail: andrei.fedorov.60@gmail.com

Создание систем диагностики, обеспечивающих работу с низкоинтенсивными пучками, актуально также и для прикладных исследований (радиационная стойкость электронных компонентов, радиобиологические исследования и т. п.).

В настоящее время положение пучка в ускорительной камере нуклотрона измеряется с помощью рискер-электродов. Данный тип детекторов не обладает достаточной чувствительностью при малых интенсивностях пучка (менее 10^8 однозарядных частиц, циркулирующих в камере ускорителя).

В период ввода в эксплуатацию ускорителя применялись также детекторы ионизионного типа на основе ВЭУ (вторично-электронный умножитель). С учетом того, что поперечные размеры пучка в нуклотроне на уровне нескольких миллиметров, а ширина входного окна ВЭУ 10 мм, данный детектор не дает возможности контролировать пространственные характеристики пучка [2].

Разработанная система мониторинга циркулирующего пучка на основе МКП относится к неразрушающим системам диагностики ионизионного типа (регистрируются ионы остаточного газа в камере ускорителя), она обладает достаточными для поставленной задачи чувствительностью и пространственно-временным разрешением [3].

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Идея метода регистрации пространственно-временных характеристик пучка состоит в следующем: пучок ускоряемых частиц ионизирует остаточный газ в камере ускорителя; образовавшиеся ионы движутся на поверхность микроканальной пластины под действием однородного электрического поля, создаваемого электростатической системой детектора; шевронная сборка из двух микроканальных пластин, расположенная вне области циркуляции пучка, обеспечивает пространственно-временную регистрацию иона. Сам детектор расположен в общем вакуумном объеме камеры ускорителя.

Детекторы на основе микроканальных пластин обладают рядом достоинств: высоким временным разрешением; эффективностью регистрации единичных заряженных ионов, близкой к 100%; возможностью измерения пространственных характеристик с точностью десятых долей миллиметра, микроканальные пластины обладают высокой радиационной стойкостью [4, 5]. При этом коэффициент усиления шевронной сборки из двух пластин составляет от 10^4 до 10^6 [6–8], что позволяет использовать широкий спектр стандартной электроники без применения специфических предусилителей сигналов.

Представленная система основывается на усовершенствовании разработок подобных систем, начатых на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ в работах [3, 9]. На рис. 1 представлена конструкция нового детектора для определения динамического профиля пучка в горизонтальной плоскости.

В детекторе используются микроканальные пластины ООО ВТЦ «Баспик» размером 96×33 мм с диаметром каналов 15 мкм. В качестве коллектора электронных лавин используются 32 электрически изолированные друг от друга контактные площадки, расположенные на печатной плате с шагом 3 мм. Расстояние между двумя микроканальными пластинами, а также между второй МКП и печатной платой составляет 150 мкм. Новизной данной конструкции является система отдельного высоковольтного питания каждой МКП, которая позволяет оптимизировать работу детектора для различных режимов ускорения пучка. Детектор работает в диапазоне интенсивностей от 10^6 до 10^8

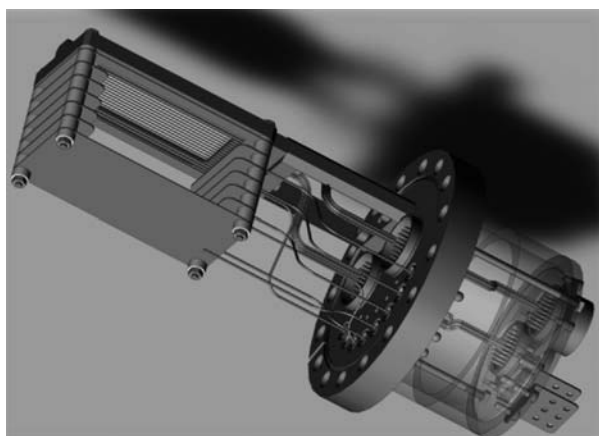


Рис. 1. Конструкция детектора для диагностики радиальной координаты пучка

однозарядных ионов, циркулирующих в камере ускорителя при характерной величине давления в вакуумной камере $2 \cdot 10^{-6}$ Па.

На рис. 2 показана принципиальная схема работы детектора. Ионы остаточного газа, образовавшиеся в месте прохождения пучка, движутся в однородном электрическом поле, которое создается электростатической системой. Величина рабочего электрического поля между микроканальной пластиной и ускоряющей пластиной анода составляет около 3 кВ. Для регулировки потока ионов, дрейфующих на МКП, используется запирающий сетчатый электрод, что позволяет избежать перегрузки детектора и тем самым расширить диапазон по интенсивностям до 10^9 однозарядных ионов.

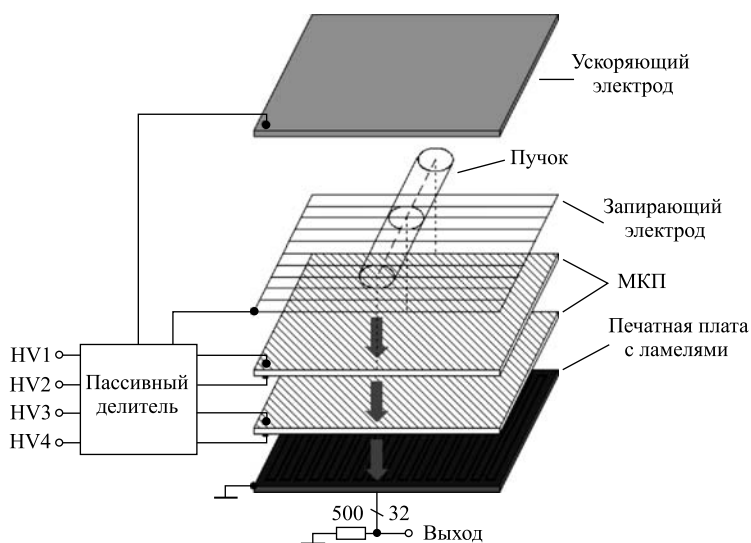


Рис. 2. Электростатическая схема детектора на основе МКП

2. ТЕСТИРОВАНИЕ И НАЛАДКА СИСТЕМЫ

Для изучения, испытания и настройки системы диагностики пучка был сконструирован и подготовлен специализированный вакуумный стенд. При испытании на стенде использовался α -источник ионов с энергией 4 МэВ, расположенный над сборкой на расстоянии 4 см внутри вакуумной камеры.

Изучены характеристики сигнала с детектора в зависимости от напряжения питания микроканальных пластин в диапазоне от -900×-900 В до -1150×-1150 В. При изменении напряжения в указанном диапазоне амплитуда сигнала увеличивается в 10 раз; ширина сигнала по основанию составляет 5–7 нс; длительность переднего фронта не зависит от напряжения и составляет менее 1 нс, что обеспечивает временное разрешение шевронной МКП-сборки на уровне 100 пс. На рис. 3 изображен сигнал с детектора при напряжении на пластинах -1080×-1080 В.

Были измерены интегральные спектры единичных сигналов при помощи зарядоцифрового преобразователя в зависимости от режимов питания шевронной сборки (рис. 4). Из рисунка видно, как увеличивается коэффициент усиления МКП-сборки с ростом напряжения, что позволяет подобрать оптимальный порог дискриминации сигналов.

Для определения шумового спектра проведены измерения без α -источника при максимальных напряжениях питания. Показано, что количество событий шумовой составляющей пренебрежимо мало по сравнению с сигналом от α -источника (менее 1%).

Очевидно, что условия, при которых детектор проходил испытания на вакуумном стенде, отличаются от условий работы детектора в камере ускорителя (уровень вакуума, состав остаточного газа, радиационная загрузка и др.). Загрузка детектора при работе на пучке как минимум в 10^3 раз больше, чем при работе от α -источника на вакуумном стенде.

Для работы детектора в кольце ускорителя была разработана специализированная электроника и программное обеспечение для удаленного контроля, отображения и записи информации с электронного блока. Блок имеет 32 входа, на которые подаются аналоговые сигналы с детектора. Каждый канал имеет свой дискриминатор с программно-

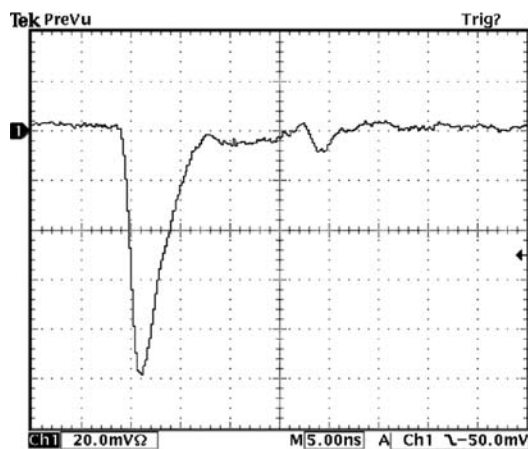


Рис. 3. Сигнал с детектора, полученный при помощи осциллографа с полосой пропускания 300 МГц. Напряжение питания пластин -1080×-1080 В

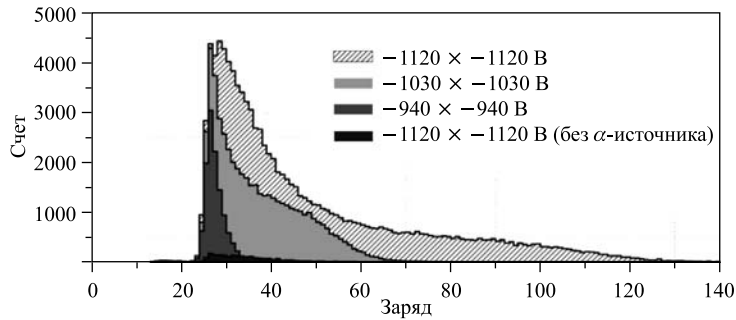


Рис. 4. Гистограмма площади сигнала (ЗЦП-спектры) для различных значений напряжения питания МКП-сборки. Время набора каждого спектра составляет 15 мин; порог дискриминатора –20 мВ

задаваемым порогом. Блок электроники считывания и передачи данных представляет собой многоканальный счетчик с буферной памятью, управляемый внешним стартовым сигналом, согласованным с циклом началом ускорения. Данная электроника позволяет регистрировать количество сигналов с детектора в заданном временном окне. Отрезок времени измерений задается программно с временным шагом (Gate) от 50 нс до 40 мс и общей длительностью 1024 временных шагов. Таким образом, на выходе получается матрица 32×1024 целых положительных чисел, которая передается по сети Ethernet для последующего отображения в удобном для принятия решений виде.

Используемая электроника позволяет дистанционно управлять системой высоковольтного питания детектора, порогами дискриминаторов аналоговых сигналов, регулировать временную задержку и параметры выбранного временного окна измерений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На рис. 5 изображена пространственно-временная структура пучка дейтронов. На рис. *a* вертикальная ось — координата горизонтального положения пучка (0 соответствует центру камеры ускорителя), по горизонтальной оси — время от момента инъек-

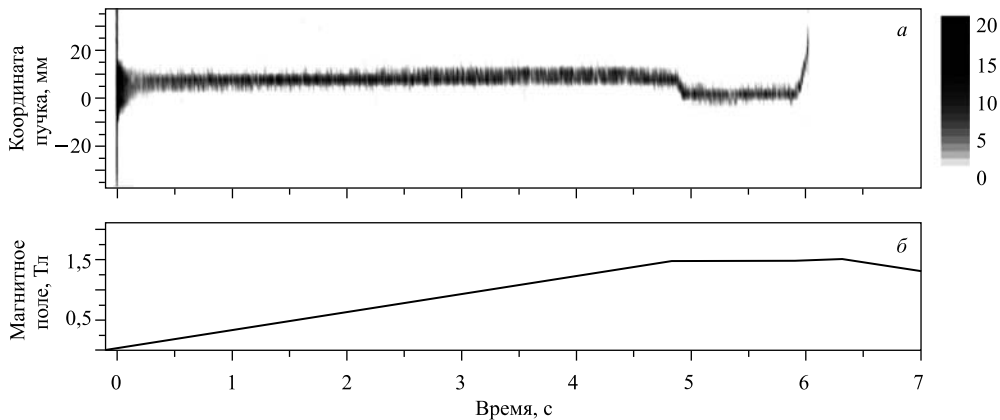


Рис. 5. Радиальный профиль пучка (*a*) и магнитное поле ускорителя (*b*). Дейтроны 4 ГэВ/нуклон

ции пучка в нуклотрон. На рис. 6 показана временная зависимость изменения магнитного поля. Представленные на графике результаты измерений соответствуют режиму ускорения (0–5 с) дейтронов до энергии 4 ГэВ/нуклон без вывода пучка из нуклотрона. В конце «стола» («стол» — постоянное магнитное поле, на рис. 5 соответствует временному интервалу 5–6 с) применялся режим нарастания поля для сбрасывания пучка на внутреннюю сторону камеры ускорителя. В данном режиме проводились работы по настройке положения орбиты ускоренного пучка (смещение орбиты пучка на «столе»). Такие измерения особенно важны для экспериментов с внутренними мишенями. Отметим, что станция внутренних мишеней расположена непосредственно за детектором, что позволяет настраивать и контролировать положение и размеры пучка при проведении таких экспериментов.

В момент инжекции пучка из линейного ускорителя ЛУ-20 в кольцо нуклотрона магнитное поле в кольце составляет 300 Гс. При повышении энергии пучок сжимается и за первые 500 мс его ширина уменьшается с 30 до 4 мм (FWHM). Ввиду того, что пространственное разрешение данной конструкции детектора 3 мм (ширина ламелей), детектор позволяет измерять смещение среднего положения пучка с точностью порядка 1 мм и ширины пучка с точностью 3 мм. На рис. 6 показаны измеренные зависимости ширины и положения среднего пучка для данного режима ускорения.

Количество ионизаций остаточного газа циркулирующим пучком зависит от уровня вакуума в камере ускорителя (порядка 10^{-6} Па на теплом участке ускорителя), типа и энергии ускоряемых частиц, а также от интенсивности пучка. Для оценки изменения интенсивности пучка в течение цикла ускорения необходимо ввести поправочную функцию на изменение энергии пучка. На рис. 7 в относительных единицах приведены графики ионизационных потерь, частоты обращения пучка и результирующей поправочной функции в зависимости от магнитного поля нуклотрона. Данные графики рассчитаны для

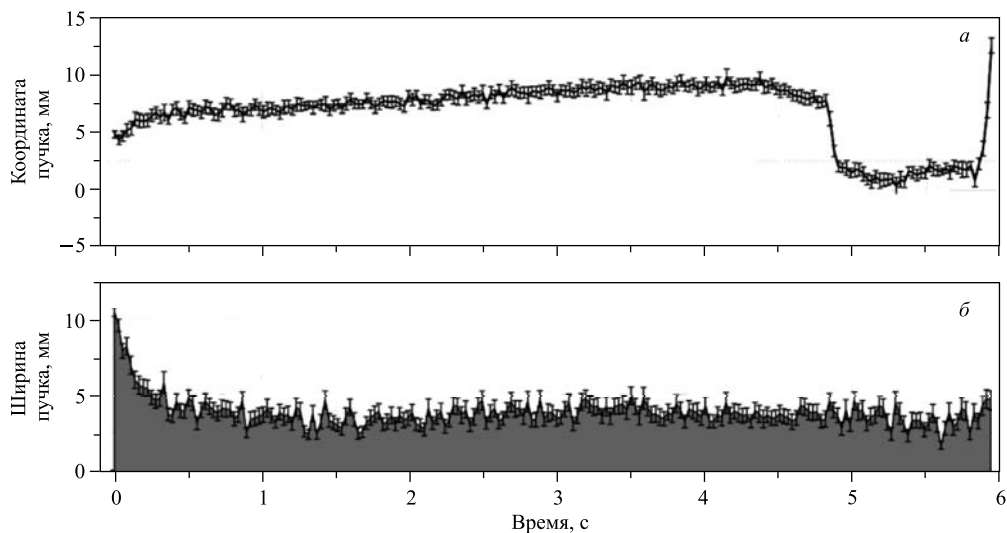


Рис. 6. Горизонтальная координата (а) и ширина пучка (б). Графики соответствуют циклу ускорения на рис. 5

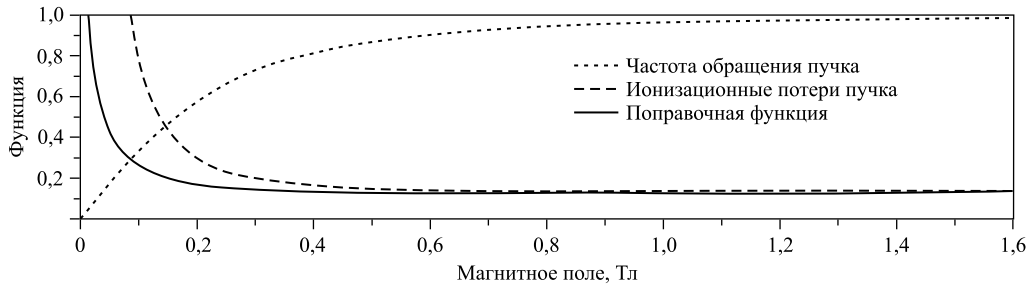


Рис. 7. Функция поправки счета с детектора (сплошная линия) на ионизационные потери частиц (штриховая) и частоту обращения пучка (пунктирная)

случая ускорения дейтронов. Отметим характерные времена одного оборота пучка дейтронов: при инъекции (энергия 5 МэВ/нуклон; поле 300 Гс) — 8 мкс, для ускоренного до 4 ГэВ/нуклон (поле 14,7 кГс) — 0,87 мкс.

Таким образом, детектор позволяет регистрировать изменение интенсивности пучка в процессе ускорения. Для каждого временного интервала (Gate) суммируются отсчеты с детектора по всем 32 каналам с нормировкой на функцию, показанную на рис. 7.

На рис. 8 приведены временные зависимости общего числа отсчетов с детектора (относительная интенсивность пучка) с учетом и без учета поправочной функции. Из данных графиков видно, что основные потери пучка происходят на его первых оборотах. При инъекции из линейного ускорителя в кольцо нуклотрона, а также на первых оборотах происходит до 90% потерь пучка. Таким образом, данный детектор полезен для решения важной задачи настройки ускорителя — минимизации потерь пучка от момента инъекции до вывода.

Известным недостатком детекторов на основе МКП является длительное время восстановления участка МКП (группы сработавших каналов) в точке попадания регистрируемого иона [9]. Каждый канал МКП работает как ФЭУ, поэтому происходит зарядовое обеднение области сработавших каналов, обеспечивающих режим электронного усиления сигнала. Изучение режимов работы детектора на пучках нуклотрона показало, что время восстановления детектора после перегрузок составляет ~ 100 мс. Поскольку число каналов 10^6 см^{-2} , можно оценить нагрузочные возможности детектора на основе МКП, полагая, что область обеднения шевронной сборки из двух МКП включает в себя порядка

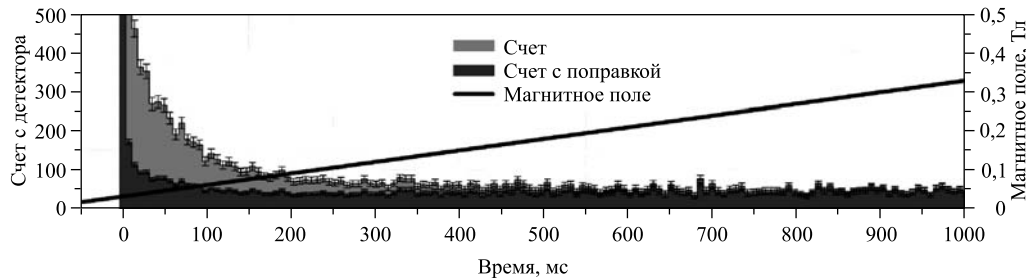


Рис. 8. Графики суммы событий с детектора по 32 каналам: область светло-серого цвета — без поправки на изменение энергии пучка; темно-серого — с поправкой

десяти соседних каналов для каждой зарегистрированной частицы. На практике, увеличения быстродействия детектора можно достичь, используя МКП с меньшим диаметром каналов (до 4 мкм) [10].

Таким образом, максимальное количество ионов, которое МКП-сборка данного детектора способна усилить без перегрузок, $\sim 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при условии равномерного облучения. Однако при использовании уникальных временных характеристик детектора на основе МКП есть возможность регистрации интенсивного пучка в коротком временном интервале на самом начальном этапе ускорения. Это дает возможность использовать детектор для регистрации пространственно-временных характеристик пучка на первых оборотах. Ввиду того, что на начальном этапе ускорения пучок совершает один оборот за 8 мкс, детектор позволяет адекватно регистрировать сотни первых оборотов пучка до момента перегрузки при интенсивностях, значительно превышающих многооборотный режим работы. Практика эксплуатации детектора на протяжении четырех сеансов в условиях перегрузки (сотни часов непрерывной работы) показала возможность длительного использования детектора в таком режиме работы.

В марте 2013 г. проводилось ускорение пучка α -частиц. На рис. 9 изображен профиль пучка в момент инжекции (первые десятки оборотов) на этапе настройки ускорителя. Пучок циркулировал в кольце нуклотрона около 0,5 мс. Заполнение орбиты кольца составляло 50% (половинная инжекция), что наблюдается в виде прерывистой структуры пучка на рис. 9. Фурье-анализ данного распределения пучка показал характерную частоту 120 кГц (обращение пучка в кольце ускорителя при поле инжекции) и 27 кГц (колебание центра тяжести пучка).

Однооборотные режимы регистрации пучка дейтронов от момента инжекции были изучены с использованием временных интервалов (Gate) от 100 до 800 нс, что соответствует 10–100 первым оборотам пучка. Очевидно, что число регистрируемых оборотов зависит от интенсивности пучка. Для используемого в настоящее время диапазона интенсивностей инжектируемого пучка дейтронов 10^8 – 10^{11} детектор дает возможность регистрации от тысячи до нескольких десятков первых оборотов пучка без перегрузки. Таким образом, показана возможность применения данного детектора для настройки и оптимизации начального этапа ускорения.

На рис. 10 изображен график цикла ускорения с быстрым (50 мс) выводом пучка из ускорителя при интенсивности, соответствующей верхней границе рабочего диапазона детектора (10^8 однозарядных ионов). В начале ускорения (первые 0,5 с от момента инжекции) видна перегрузка детектора, соответствующая центральной области пучка. После

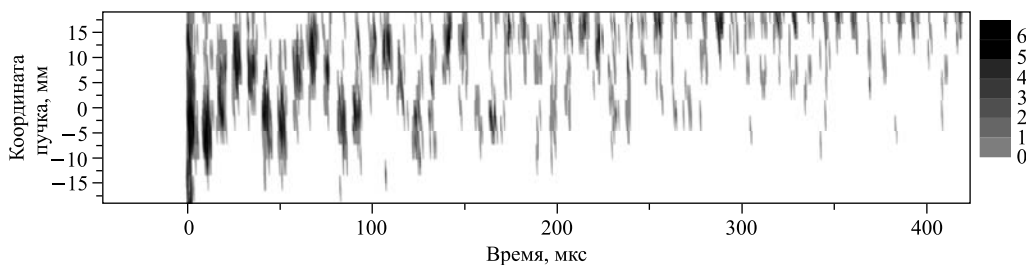


Рис. 9. Радиальный профиль инжектированного пучка α -частиц. Заполнение орбиты кольца — 50%

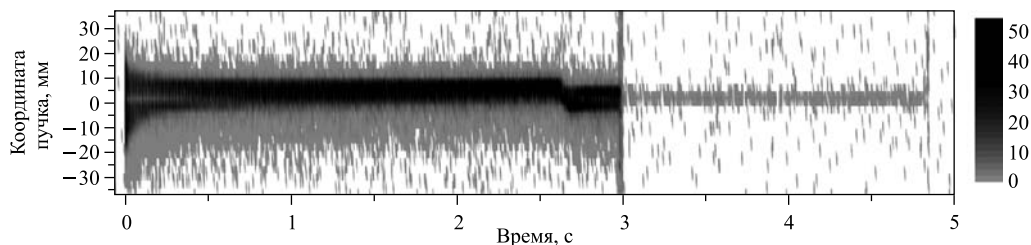


Рис. 10. Радиальный профиль пучка дейтронов, ускоренных до 2 ГэВ/нуклон

перехода на «стол» производился вывод пучка (момент времени 3 с после инжекции) и далее регистрировались остатки циркулирующего пучка. Отношение счета с детектора до вывода пучка к счету после вывода составляет 60, что определяет динамический диапазон работы детектора по интенсивности без применения запирающей сетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и испытан в четырех сеансах работы нуклотрона детектор на основе МКП, обеспечивающий возможность измерения пространственно-временных характеристик пучка в диапазоне интенсивностей от 10^6 до 10^9 однозарядных ионов с временным разрешением 100 нс и пространственным разрешением 3 мм. Чувствительная область детектора — 90 мм.

Показана возможность использования детектора для оптимизации начального этапа ускорения пучка на первых оборотах от момента инжекции, что особенно важно для настройки ускорения пучков тяжелых ионов. Полученные характеристики позволяют использовать детектор для оптимизации режимов ускорения и медленного вывода пучка, в особенности при работе с низкими интенсивностями, которые не регистрируются существующими штатными системами диагностики нуклотрона.

Разработанное программное обеспечение позволяет дистанционно управлять параметрами детектора и представлять цифровую и графическую информацию на пульт ускорителя в виде, удобном для оператора.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность А. В. Бутенко, Г. В. Трубникову, А. О. Сидорину, В. М. Слепневу, В. И. Волкову, С. В. Романову, А. В. Нестерову, А. И. Малахову за помощь в работе и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. et al.* NICA Project at JINR // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 521–526.
2. *Аверичев А. С. и др.* Итоги 40-го и 41-го сеансов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-2010-68. Дубна, 2010. 16 с.
3. *Балдин А. А. и др.* Система диагностики циркулирующего пучка нуклотрона на основе микроканальных пластин // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1997. № 2[82]. С. 15–22.
4. *Feofilov G. A. et al.* Position-Sensitive MCP-Based Detectors with High Timing Resolution: Some Results and Perspectives // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 402–407.

5. *Valiev F. F. et al.* Microchannel Plates as a Detector for 800 MeV/c Charged Pions and Protons // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1991. № 4[50]. С. 27–36.
6. *Грунтман М. А.* Координатно-чувствительные детекторы на основе микроканальных пластин (обзор) // ПТЭ. 1984. № 1. С. 14–29.
7. *Исханов Б. С., Капитонов И. М., Кэбин Э. И.* Частицы и ядра. Эксперимент. М.: Изд-во Моск. ун-га, 2005.
8. *Москалев В. А., Сергеев Г. И.* Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 101–105.
9. *Baldin A. A. et al.* Some Results of MCP Timing Resolution Measurements with Minimum Ionizing Particles // Краткие сообщ. ОИЯИ. 1994. № 2[65]. С. 33–39.
10. *Baldin A. A. et al.* Proposals for a New Type of Microchannel-Plate-Based Vertex Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 323. P. 439–444.

Получено 24 июня 2013 г.