

РАЗВИТИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО МОНИТОРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОТОННОГО ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

*П. Рейнгардт-Никулин, И. Васильев, С. Гаврилов, А. Фещенко
Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: petrrein@jnr.ru*

Для обеспечения прозрачных измерений поперечного сечения и профилей токовых импульсов в широком диапазоне энергий и амплитуд разработан и установлен на ускорителе специальный ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС) на остаточном газе. ИМПС оборудован зеркально-линзовым трактом для транспортировки изображения пучка от детектора до ТВ-камеры и защиты ПЗС-матрицы и электроники ТВ-камеры от бомбардировки нейтронами и γ -квантами. В работе приводится схема и описание датчика, а также некоторые детали программного и аппаратного обеспечения системы съема и обработки изображений. Представлены полученные результаты измерений импульсного тока протонов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС) пучка ускоренных протонов [1, 2] на выходе линейного ускорителя (ЛУ) ИЯИ РАН используется для обеспечения прозрачных измерений параметров пучка как при настройке ЛУ, так и при проведении пучковых сеансов для нужд экспериментального комплекса.

Напомним, что ИМПС позволяет в процессе настройки и эксплуатации ускорителя наблюдать и корректировать следующие параметры: реальную форму и размеры поперечного сечения пучка (ПСП); временную форму импульсных токов протонов; положение пучка и его смещение относительно оси ЛУ.

Кроме того, за счет регистрации изображений ПСП с помощью телевизионной камеры и компьютерной обработки изображений ИМПС позволяет наблюдать: распределение плотности ускоренных частиц в ПСП; профили пучка.

В настоящее время на ЛУ импульсы протонов могут иметь энергию 70...209 МэВ, амплитуду 0,1...10 мА, длительность 0,3...200 мкс и частоту посылок 1...50 Гц. Но в процессе настройки ускорителя даже на частоте 1 Гц возникают большие потери ускоренных частиц, приводящие к значительной активации элементов вакуумной камеры ускорителя и возникновению потоков вторичных γ -квантов и нейтронов, бомбардирующих оборудование и, в частности, измерительные диагностические приборы.

На Рис.1 показана картина пучка, регистрируемая ТВ-камерой ИМПС с ПЗС матрицей, на которой отчетливо видны поврежденные пиксели при экспозиции, равной 990 мс.

Для устранения проблем с повреждением ТВ-камеры и электроники интерфейса оптоволоконной линии связи дополнительно к существовавшей ранее системе регистрации [2] был разработан и установлен на ЛУ зеркально-линзовый тракт (ЗЛТ), собирающий и выводящий оптическое излучение с люминофора детектора ИМПС за бетонную защиту зала ЛУ на ТВ-камеру.

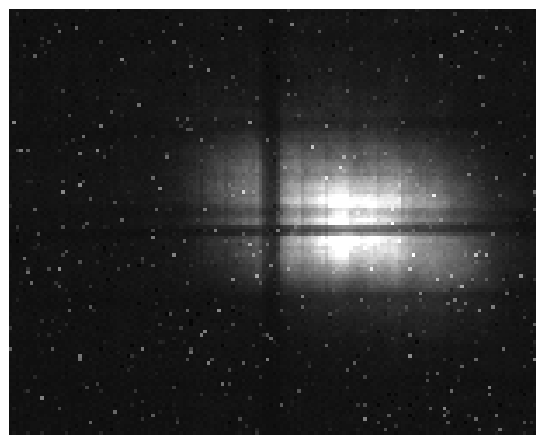


Рис.1. Картина поперечного сечения пучка и поврежденных пикселей, длительность экспозиции 990 мс

Кроме того, разработано новое программное обеспечение и дополнительный электронный интерфейс ИМПС, осуществляющие следующие операции: запуск импульса экспозиции затвора ТВ-камеры от внешнего импульса синхронизации ЛУ; регистрацию суммарной картины от нескольких импульсов в режиме накопления информации с вычитанием из нее фона; вывод гистограммы яркости кадра; медианную фильтрацию кадра; управление длительностью экспозиции; управление высоковольтным питанием детектора ИМПС.

Ниже приводятся описание общей организации ИМПС, обсуждение радиационной обстановки в зале ЛУ и за бетонной защитой, оценка потока нейтронов, падающего на ПЗС-матрицу, а также краткое описание зеркально-линзового тракта и программного обеспечения.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ИМПС

ИМПС состоит из извлекающего конденсатора со щелью в нижней пластине. Электрическое поле этого конденсатора подхватывает образовавшиеся ионы и ускоряет их в направлении нижней пластины. Таким образом, каждый ион, вышедший через щель, приобретает энергию, пропорциональную расстоянию от места его появления до нижней пластины.

От стандартных ионизационных мониторов пучка (ИМП) пучка ИМПС отличается наличием электростатического анализатора энергии ионов, которые образовались при взаимодействии ускоренных частиц с остаточным газом вакуумной камеры ЛУ. ИМПС дает двухмерное распределение частиц в поперечном сечении пучка, из которого можно извлечь сколько угодно профилей под каким угодно углом. Причем продольные размеры ИМПС такие же, как у ИМП. Пространственное разрешение ИМПС определяется шириной щели в пластине извлекающего ионы конденсатора, которая имеет ширину 1 мм в настоящее время, но может быть уменьшена до 0,1 мм. Поперечное сечение пучка регистрируется электронно-оптическим преобразователем (ЭОП), состоящим из двух микроканальных пластин (МКП) с люминесцентным экраном. ЭОП установлен под углом 45 градусов к оси пучка в вакуумном боксе. ИМПС использует в качестве материала детектора остаточный газ вакуумной камеры каналов транспортировки пучка, что и обеспечивает прозрачность измерений. Чувствительность датчика зависит от давления остаточного газа в вакуумной камере ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ Торр) и от ионизационных потерь ускоренных частиц в остаточном газе. Подробная схема и описание детектора ИМПС приводятся в [1,2].

Блок-схема ИМПС показана на Рис.2.

ИМПС состоит из следующих основных частей: ионизационного датчика в вакуумном боксе, зеркально-линзового тракта, высоковольтного источника питания, цифровой телевизионной камеры, интерфейсных блоков оптоволоконной линии связи, персонального компьютера с платой захвата кадра, платой с АЦП и ЦАП и специализированным программным обеспечением обработки полученных изображений и управления ИМПС.

На выходе ЛУ в месте установки ионизационного датчика пучок ускоренных протонов имеет в настоящее время непрерывную структуру импульсов тока.

3. ВЛИЯНИЕ БЕТОННОЙ ЗАЩИТЫ

Изображения поперечного сечения пучка протонов с ТВ-камеры должны регистрироваться при изменении интенсивности пучка в диапазоне от 120 мкА до 0,1 мкА среднего тока. Регистрация изображений производится, во-первых, во время настройки ЛУ и, во-вторых, на настроенном пучке. Из опыта известно, что потери протонов при токе пучка 100 мкА достигают примерно 1 нА/м после полной продольно-поперечной настройки ЛУ на частоте 50 Гц. В этом случае нейтронный поток образуется протяженным вдоль оси ЛУ источником. Однако усредненный уровень потерь во время настройки на частоте посылок 1 Гц может быть сравним и даже больше, чем потери на настроенном пучке. В этом случае можно приблизительно считать, что нейтронный поток образуется точечным источником, расположенным рядом с ИМПС. Взаимодействие потерянных частиц с элементами вакуумной камеры ЛУ приводит к возникновению потоков нейтронов и γ -квантов, вызывающих появление «горячих» пикселей и сбои в микросхемах памяти цифровой элек-

троники. Так как в процессе перенастройки ускорителя для различных экспериментов и прикладных работ возможно изменение интенсивности пучка в 10^3 раз, что приводит к пропорциональному изменению потерь в такое же число раз, необходимо защитить электронику при повышенной интенсивности, не теряя чувствительность при минимальной интенсивности. Для выполнения этих противоречивых требований ИМПС оборудован зеркально-линзовым трактом, который позволяет вывести излучение люминофора на расстояние несколько метров от датчика ИМПС под бетонный пол зала ускорителя без существенной потери потока оптического излучения люминофора.

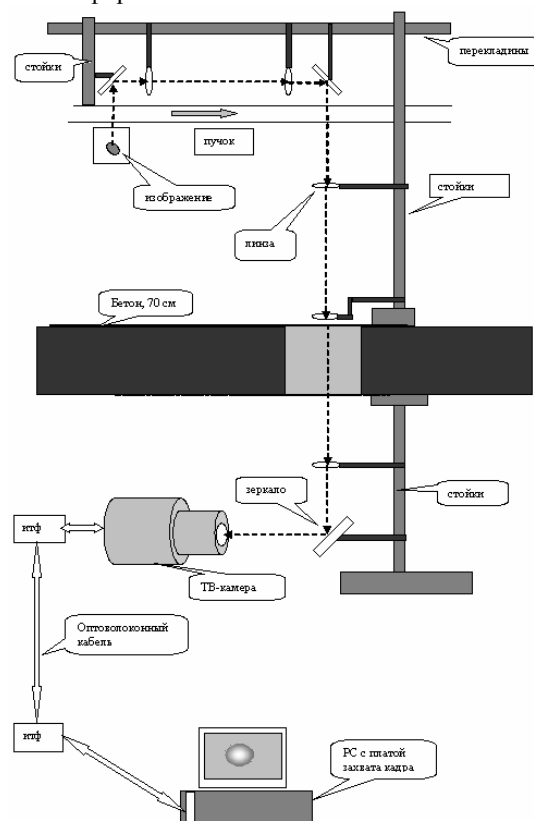


Рис.2. Упрощенная схема ИМПС с зеркально-линзовым трактом

Потери протонов трансформируются в нейтронный поток, который поглощается в бетоне защиты. Однако часть нейтронов все же проходит за бетон и может вызвать повреждения. При расчете уменьшения потока нейтронов настроенного пучка предполагается, что протоны гало-пучка с энергией 209 МэВ останавливаются в металле вакуумной камеры, падая под углом 1 мрад относительно поверхности камеры, а точки падения распределены равномерно по поверхности [3]. Если принять во внимание, что один 209 МэВ протон, пройдя до полной остановки, производит в среднем один нейтрон, легко вычислить, что нейтронный поток на расстоянии 1 м равен примерно 10^5 нейтрон/(см²·с). Спектр нейтронов с энергией больше 1 МэВ из медной мишени, в которой длина пробега протонов с энергией 209 МэВ до полной остановки меньше длины мишени, спадает как $1/E$, где E – энергия вылетевшего нейтрона.

3.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ЭЛЕКТРОНИКОЙ

Увеличение расстояния между камерой и протонным пучком и наличие бетонной защиты позволяют снизить эффекты бомбардировки ПЗС-матрицы (ПЗСМ) нейтронами и убрать ее засветку γ -квантами. Основную опасность для ПЗСМ за бетонным полом представляют нейтроны, вызывающие смещение атомов кремния в решетке, и ядерные реакции в пикселях кремниевой матрицы, создающие так называемые «битые» или «горячие» пиксели. Согласно [4] сечения ядерных взаимодействий в кремниевых микросхемах высокой плотности при увеличении энергии нейтронов выше 2...5 МэВ начинают быстро возрастать, достигая своего максимального значения $\Sigma \sim 1...2$ барн при 14 МэВ. Экспериментальное изучение зависимости поперечного сечения сбоев от энергии нейтронов для схем памяти меньшей плотности обнаруживает, что сечение ядерных взаимодействий носит пороговый характер, возникая при энергиях нейтронов около 10 МэВ. Для микросхем с меньшей степенью интеграции, т.е. с большим объемом элементов и с большим критическим зарядом, образующимся при ионизации кремния, сечение постепенно растет с увеличением энергии нейтронов и достигает насыщения или максимума при энергии нейтронов около 100 МэВ.

Критический заряд, приводящий к сбою электроники, оценивается величиной 10^{-13} Кл [5]. Ширина чувствительной области твердотельной схемы памяти равна примерно 2 мкм. Поэтому, ионизирующая частица должна терять на производство электронно-дырочных пар около 2 МэВ на пути 2 мкм (3,6 эВ тратится на 1 электронно-дырочную пару в кремнии). Из оценок критического заряда – $2 (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл } 10^6 \text{ эВ} / 3,6 \text{ эВ}) \approx 0,9 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$ - следует, что вероятнее всего ядерные фрагменты являются источником повреждения ПЗС-матрицы. Эти продукты ядерных реакций играют основную роль, так как их пробег в кремнии сравним с размерами полупроводниковых элементов высокой степени интеграции. И именно ядерные фрагменты производят очень большую ионизацию в кремнии на микронных дистанциях. Увеличение плотности твердотельных приборов, т.е. уменьшение их геометрических размеров, приводит к увеличению их чувствительности к радиации.

3.2. ОЦЕНКА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ЗА ЗАЩИТОЙ

Оценку ослабления потока [6] моноэнергетических нейтронов с энергией E бетонной защитой можно сделать либо программным путем с использованием метода Монте-Карло, либо используя феноменологическое уравнение:

$$N(d, E) = (N_0/R^2)B(E)\exp(-d/\lambda(E)),$$

где N_0 – выход нейтронов; R – расстояние от источника нейтронов до точки, в которой оценивается доза; $B(E)$ – фактор накопления нейтронов в защите; $\lambda(E)$ – длина ослабления потока нейтронов в защите из обычного бетона плотностью $2,35 \text{ г/см}^3$ при падении на неё нейтронов с энергией E . Используя среднее значение протонного тока потерь на линейном

ускорителе ИЯИ и данные об угловом распределении вторичных нейтронов, а также известный спектр распределения нейтронов по энергиям (1/МэВ/протон) [7], можно оценить ослабление потока за защитой. Для диапазона энергий нейтронов от 10 до 100 МэВ поток жестких нейтронов за защитой в месте установки ТВ-камеры на расстоянии $R = 3$ м заведомо меньше, примерно

$$\Delta N = K_{100} (\Delta\Phi/\Phi) (N_0/R) = 0,43 \cdot 10^{-2} \cdot 3,33 \cdot 10^4 \text{ н/(см}^2\text{с)} = 40 \text{ н/(см}^2\text{с)},$$

где K_{100} – коэффициент ослабления потока нейтронов в защите для нейтронов с энергией 100 МэВ; $(\Delta\Phi/\Phi)$ – доля нейтронов с энергией от 10 до 100 МэВ в выходе нейтронов Φ на один протон.

Площадь пикселя равна 40 мкм^2 . При толщине чувствительного слоя 2 мкм объем чувствительной области 80 мкм^3 . Примерное число атомов кремния в пикселе $N \approx 4 \cdot 10^{12}$ (1/пиксель). И можно для сечения в $1...2$ барн оценить вероятность взаимодействия нейтронного излучения в одном пикселе величиной $1,6...3,2 \cdot 10^{-10}$ (1/(с пиксель)). А для всей матрицы вероятность взаимодействия оценивается величиной $1,6...3,2 \cdot 10^{-4}$ (1/(с ПЗСМ)).

Для мягкой компоненты нейтронного потока суммарное сечение упругого и неупругого рассеяния нейтронов на ядрах кремния равно примерно 4,5 барн. Зная величину нейтронного потока, можно оценить вероятность одного такого взаимодействия в объеме пикселя за защитой величиной $4,4 \cdot 10^{-10}$ (1/(с пиксель)). Учитывая, что в бетонном полу проделано отверстие, влияние мягкой рассеянной компоненты нейтронного потока должно быть увеличено примерно на порядок [6].

Общий эффект взаимодействия нейтронного потока за защитой с электронной определяется как жесткой, так и мягкой компонентой нейтронного потока, которые и вызывают появление поврежденных пикселей и изменение параметров транзисторов и микросхем.

4. РАССТАНОВКА ОБОРУДОВАНИЯ И ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛА К ШУМУ

Регистрация изображения поперечного сечения пучка протонов с энергией 209 МэВ производится с помощью цифровой телевизионной системы «Видеоскан 285» [8].

Вакуумный бокс с детектором (ЭОП с люминофором) установлен примерно в 4 м за последним ускоряющим резонатором ЛУ ИЯИ. Зеркально-линзовый тракт (ЗЛТ), состоящий из пяти линз и трех зеркал, передает изображение за бетонную защиту по траектории, общая длина которой в настоящее время равна приблизительно 6 м. В первоначальном варианте камера устанавливалась на расстоянии 40 см от оси пучка и, соответственно, на камеру падали все типы излучений, существующие вокруг канала транспортировки пучка.

Отношение сигнала к шуму в измерительной системе определяется многими факторами, такими как свечение остаточного газа, бомбардировка сборки МКП γ -квантами и рентгеновскими фотонами, шум чтения ПЗСМ, среднеквадратичное отклонение заряда пикселя.

Кроме перечисленных выше источников шума, искажения картины поперечного сечения (см.Рис.1) вносят поврежденные пиксели, темновой ток которых значительно превышает темновой ток остальных пикселей. Действенными средствами устранения этих искажений являются, во-первых, охлаждение ПЗС-матрицы, которое приводит к уменьшению темнового тока всех пикселей, во-вторых, сокращение длительности экспозиции, и, в-третьих, программная обработка зарегистрированного цифрового изображения.

5. ОХЛАЖДЕНИЕ ПЗСМ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для выяснения влияния охлаждения производилось сравнение изображений матрицы при закрытом объективе и сокращении экспозиции от 1 с до 163 мкс при включенном, а затем выключенном охлаждении. Оказалось, что максимальная длительность экспозиции, обеспечивающая исчезновение в кадре всех горячих пикселей, при включенном охлаждении равна 7,5 мс, а при выключенном 1,8 мс. Т.е., охлаждение матрицы на 25 градусов снижает фон теплых и горячих пикселей примерно в 4 раза.

Из этих измерений также следует, что сокращение длительности позволяет убрать фон горячих пикселей при длительностях экспозиции много больших, чем длительность импульса ускоренных протонов (200 мкс). Т.е., фон поврежденных пикселей будет заведомо отсутствовать при длительностях экспозиции, сравнимых с длительностью импульса тока пучка.

Программа обработки разработана с использованием программного обеспечения системы «Видео-скан 285» и позволяет дополнительно осуществлять следующие операции:

- суммирование последовательности кадров;
- вычисление среднего значения;
- запоминание усредненного кадра;

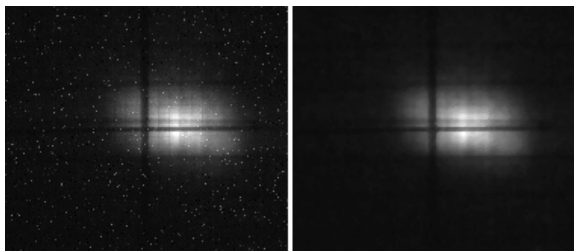


Рис.3. Медианная фильтрация кадра

- вычитание усредненного темнового кадра из изображения ПСП или обработку кадра методом медианной фильтрации с целью очистки изображения ПСП от горячих пикселей (Рис.3);

- вычисление и представление на экране горизонтального и вертикального профилей ПСП;

- анализ и представление количественных характеристик профилей.

Использование ПО позволяет существенно уменьшить влияние шумов системы и компенсировать искажения ПСП и профилей, вызванные горячими пикселями, даже при увеличении длительностей экспозиции до 1 с. Гистограмма яркости изображения ПСП, появляющаяся на панели управле-

ния одновременно с профилями позволяет оперативно контролировать качество изображения. На Рис.4 приведено окно программы приема и обработки изображения.

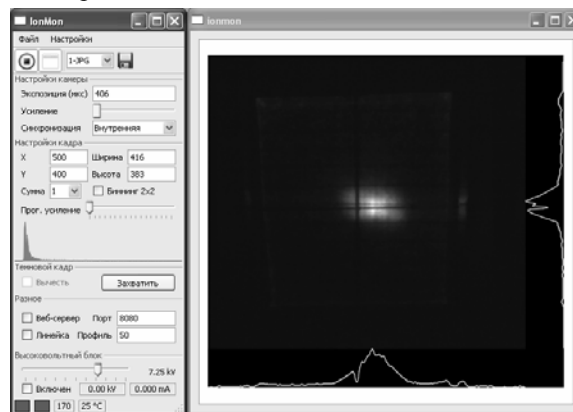


Рис.4. Окно ПСП с панелью управления средствами приема и обработки

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение потоков оптического излучения люминесцентного экрана продемонстрировало, что длительность экспозиции ТВ-камеры с ЗЛТ должна быть увеличена примерно в два раза по сравнению с длительностью экспозиции при установке ТВ-камеры в 40 см от оси пучка.

Повреждения ПЗСМ (см. Рис.1) были накоплены за 72 часа работы ЛУ. Однако за это время не наблюдалось ни одного сбоя при передаче сырых данных от ТВ-камеры в компьютер. Тем не менее, повреждение пикселей говорит о том, что ПЗСМ является наиболее уязвимым прибором, который необходимо защитить от воздействия радиации. Размещение местной защиты вокруг ТВ-камеры, находящейся в 40 см от оси пучка, мало изменило скорость набора повреждений, так как вторичные нейтроны, протоны и γ -кванты, направленные перпендикулярно оси ионопровода, попадали прямо на ПЗСМ. Следовательно, только перемещение ПЗСМ за массивную защиту позволяет использовать данную ТВ-камеру для диагностики параметров пучка.

Наблюдение последовательности изображений ПЗС-матрицы при экспозициях от 163 мкс до 1 с без пучка продемонстрировало, что пиксели, которые были горячими или теплыми при длинных экспозициях, становятся достаточно холодными при коротких. Т.е., за трое суток эксплуатации ПЗСМ при высоком уровне радиации ($\approx 10^6$ н/(см² *с)) ни один из пикселей не вышел из строя полностью. И, значит, матрицу можно использовать на коротких экспозициях (меньших 7,5 мс) без уничтожения информации, содержащейся в поврежденных пикселях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введение в оборудование ИМПС зеркально-линзового тракта, во-первых, позволяет проводить регистрацию ПСП на расстоянии ≈ 6 м от детектора без существенной потери оптического излучения ЭОП ИМПС, во-вторых, вывести это излучение за бетонную защиту ЛУ. И, таким образом, решить проблему наблюдения параметров пучка во всем

диапазоне интенсивности ускоренных протонов, несмотря на высокий радиационный фон в зале ускорителя как при настройке, так и повседневной эксплуатации ЛУ.

Бетонная защита между ТВ-камерой и детектором ИМПС снижает поток нейтронов, падающий на ТВ-камеру и электронику интерфейса, примерно в 10^4 раз, что продлевает срок службы электроники, так как резко снижается вероятность повреждения наиболее чувствительной к радиации части электроники ИМПС – ПЗС-матрицы.

Развитие нового программного обеспечения не только упрощает процедуру управления параметрами ИМПС, такими как высоковольтное питание и длительность экспозиции, но и улучшает отношение сигнала к шуму за счет операций накопления, усреднения, медианной фильтрации и вычитания фоновых кадров, что как раз и создает возможность использовать ИМПС для измерения параметров пучка малой интенсивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Г. Михайлов, В.В. Леонов, В.А. Резвов, и др. Многопараметрические ионизационные датчики для контроля пучков ускоренных частиц // *ПТЭ*. 1995, № 6, с.39-53.
2. П. Рейнгардт-Никулин, Ю. Калинин, С. Латушкин и др. Ионный монитор поперечного сечения протонного пучка промежуточных энергий линейного ускорителя ИЯИ РАН // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, № 3, (49), p.55-59.
3. E. Mustafin, G. Moritz, G. Walter, GSI, Darmstadt, Germany, L. Latycheva, N. Sobolevskiy. *INR RAS, Moscow, Russia. Radiation damage to the elements of the nuclotron-type dipole of SIS100 // Proceedings of EPAC 2004*, p.1408-1410.
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e04/default.htm>
4. Г.И. Зебрев. Презентация «Проблема оценки сечений мягких сбоев от нейтронов и протонов». http://micro.mephi.ru/groups/simulation/files/micro_zebrev_8_talk_Zebrev_neutr_NIIP_06.pdf
5. J. Blomgren. Nuclear data for single-event effects // *Proceedings of the enlargement workshop on neutron Measurements and Evaluations for Applications*. NEMEA. 5-8 November 2003, Budapest, Hungary, p.130-136.
6. В.Е. Алейников, В.П. Гердт, М.М. Комочков. *Некоторые закономерности формирования спектров нейтронов за защитой ускорителей протонов*. ОИЯИ, Дубна: P16 – 9870, 1976.
7. V.Ju. Shegolev, B.V. Florko. The biological shielding for storage rings of NICA project. *Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia*, p.371-373, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/>
8. <http://www.videoscan.ru/page/739>

Статья поступила в редакцию 08.09.2009 г.

DEVELOPMENT OF ION TRANSVERSE SECTION MONITOR FOR PROTON BEAM OF INR LINAC

P. Reinhardt-Nickoulin, I. Vasilyev, S. Gavrilov, A. Feschenko

To provide non-intercepting measurements of beam pulse transverse section and profile the special residual gas ion transverse section monitor (ITSM) for wide energy and amplitude range is developed and installed on the accelerator. ITSM is provided by lens-mirror line for transport beam image from the detector to TV camera and saving CCD and electronics of TV camera from neutron and γ hitting. The ITSM functioning details and image processing system are described. The available results of beam pulse measurements are presented.

РОЗВИТОК ІОНІЗАЦІЙНОГО МОНІТОРА ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗА ПРОТОННОГО ПУЧКА ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯІ РАН

П. Рейнгардт-Нікулін, І. Васильєв, С. Гаврилов, А. Фещенко

Для забезпечення прозорих вимірів поперечного перерізу й профілів струмових імпульсів у широкому діапазоні енергій і амплітуд розроблений і встановлений на прискорювачі спеціальний іонізаційний монітор поперечного перерізу (ІМПС) на залишковому газі. ІМПС обладнаний дзеркально-лінзовим трактом для транспортування зображення пучка від детектора до Тв-камери і захисту ПЗс-матриці й електроніки Тв-камери від бомбардування нейтронами і γ -квантами. У роботі приводиться схема й опис датчика, а також деякі деталі програмного й апаратного забезпечення системи знімання й обробки зображень. Представлено отримані результати вимірів імпульсного струму протонів.