

ИОННЫЙ МОНИТОР ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОТОННОГО ПУЧКА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН

*П. Рейнгардт-Никулин¹, Ю. Калинин¹, С. Латушкин², А. Меньшов¹, А. Мирзоян¹,
Е. Никулин¹, В. Резвов², А. Фещенко¹*

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

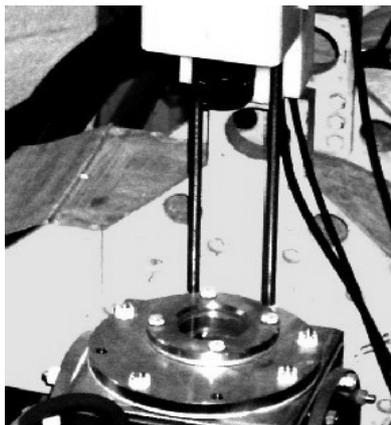
²РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

E-mail: petrrein@inr.ru

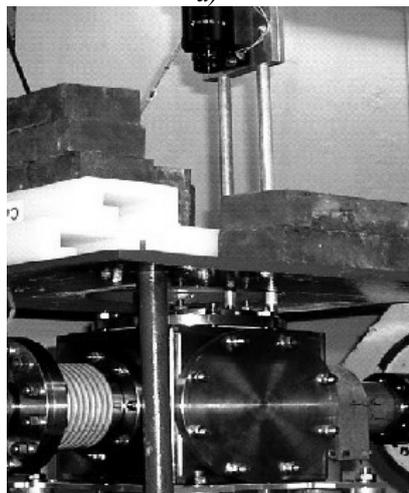
Для обеспечения прозрачных измерений поперечного сечения пучка ускоренных протонов в широком диапазоне энергий, амплитуд и длительностей разработан и установлен на выходе линейного ускорителя ИЯИ РАН специальный ионизационный монитор поперечного сечения на остаточном газе. Приводится описание датчика и системы регистрации и обработки изображений. Представлены результаты измерений импульсного тока протонов.

1. ВВЕДЕНИЕ

На выходе линейного ускорителя ИЯИ РАН импульсы протонов с энергией от 70 до 602 МэВ, амплитудой 0,1...10 мА, длительностью 0,3...200 нс и частотой посылок от 1 до 50 Гц используются для проведения физических экспериментов и прикладных работ.



а)



б)

Рис.1. ИМПС на канале инжекции протонов с энергией 400 кэВ а); ИМПС – 602 МэВ б)

Как и на других сильноточных ускорителях, на линейных ускорителях особое внимание уделяется прозрачности измерений параметров пучков, т.е. минимизации возмущений исследуемых пучков с целью исключения дополнительной (вызванной процессом измерений) активации установок.

Регистрация профилей пучка с помощью электронов, образовавшихся в остаточном газе вакуумной камеры ускорителя под воздействием ускоренных частиц [1,2], является именно таким прозрачным способом измерений, который часто используется как на синхротронах, так и на каналах транспортировки пучков.

Весьма желательным является создание универсальных измерителей, пригодных для разных типов излучений и регистрирующих максимальное число параметров пучка в максимальном диапазоне энергий и амплитуд токов ускоренных частиц. Устройством, отвечающим этим запросам, является многопараметрический ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС) [3, 4] пучков ускоренных частиц и ионизирующих излучений (ИИ).

Ионизационные мониторы поперечного сечения пучка ускоренных протонов линейного ускорителя (ЛУ) ИЯИ РАН предназначены для получения информации о пучках с энергиями от 400 кэВ в канале инжекции ЛУ до 602 МэВ на выходе ЛУ (Рис.1).

ИМПС позволяют в процессе настройки и эксплуатации ускорителя наблюдать и корректировать следующие параметры:

- реальную форму и размеры поперечного сечения пучка;
- временную форму импульсных токов протонов;
- положение пучка и его смещение относительно оси ЛУ.

Кроме того, за счет регистрации изображений поперечного сечения пучка с помощью телевизионной камеры и компьютерной обработки изображений ИМПС позволяет наблюдать:

- распределение плотности ускоренных частиц в поперечном сечении пучка;
- профили пучка.

Как известно, ионизационные датчики имеют высокую чувствительность и широкий динамический диапазон, что позволяет регистрировать поперечные сечения пучков с интенсивностью от нескольких наноампер на кв. мм до сотен миллиампер. В настоящее время ионизационные датчики испытаны и используются на следующих пучках ИЯИ РАН и РНЦ «Курчатовский институт» [5, 6]:

- пучок протонов и ионов циклотрона с энергией до 30 МэВ и средним током 50 нА;
- импульсный пучок протонов инжектора линейного ускорителя протонов длительностью до 200 мкс с энергией 400 кэВ и амплитудой до 115 мА;
- импульсный ускоренный пучок протонов линейного ускорителя протонов длительностью до 200 мкс с энергией 209 МэВ и амплитудой до 10 мА;
- пучки синхротронного излучения от накопителей электронов с энергией 450 МэВ и 2,5 ГэВ.

Ионизационный монитор может быть использован для наблюдения, диагностики и коррекции поперечных сечений и параметров непрерывных и импульсных пучков электронов, ионов, ультрафиолетового, рентгеновского и гаммаизлучения практически любых ускорителей и источников ИИ, оборудованных вакуумными каналами транспортировки пучков или лучей при $10^{-5} \dots 10^{-8}$ Торр.

2. ОПИСАНИЕ ИМПС

ИМПС использует в качестве материала детектора остаточный газ вакуумной камеры каналов транспортировки пучка, что и обеспечивает прозрачность измерений. А чувствительность датчика зависит, прежде всего, от давления остаточного газа в вакуумной камере и от ионизационных потерь ускоренных частиц в остаточном газе.

Двумерное распределение плотности частиц любой формы, регистрируемое ИМПС, является более информативной характеристикой пучка, чем профили поперечного сечения пучков ИИ. Так как по двум профилям, обычно получаемым с помощью проводочных сеток, сканеров или с традиционных ионизационных датчиков на электронной составляющей ионизированного газа, нельзя восстановить истинную картину поперечного распределения частиц пучка.

ИМПС состоит из ионизационного датчика в вакуумном боксе, высоковольтных источников питания, телевизионной камеры и персонального компьютера со специализированным аппаратным и программным обеспечением для обработки полученных изображений.

Как в канале инжекции, так и на выходе ЛУ ИЯИ РАН пучок имеет непрерывную структуру внутри импульсов тока.

2.1. ИОНИЗАЦИОННЫЙ ДАТЧИК ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ

Методика измерений основана на предварительном ускорении и последующем энергетическом анализе ионов остаточного газа вакуумной камеры. В работе [5] даны схема, подробный анализ и расчет

возможных искажений при регистрации поперечного сечения многопараметрическим датчиком.

ИМПС работает следующим образом. Электрическим полем двух электродов, образующих плоских конденсатор, ионы остаточного газа ускоряются к извлекающему электроду, имеющему щель, перпендикулярную оси пучка. Ионы, ускоренные вертикальным полем извлекающего конденсатора, проходят через щель и формируются в ленточный пучок.

Пространственное распределение частиц в этом пучке вдоль щели соответствует распределению исследуемого пучка по горизонтالي. Энергетическое распределение извлеченных ионов соответствует распределению исследуемого пучка по вертикали.

После прохождения ионов, ускоренных в извлекающем конденсаторе, в электрическом поле второго конденсатора, анализирующего по энергии ленточный пучок, на экране электронно-оптического преобразователя (ЭОП) формируется двумерное оптическое изображение, соответствующее поперечному распределению частиц в исследуемом пучке.

ЭОП состоит из двух микроканальных пластин (МКП) и люминесцентного экрана. Электронный умножитель на сборке из двух МКП усиливает заряд от иона в $10^3 \dots 10^8$ раз в зависимости от приложенного к сборке напряжения. Этот электронный заряд ускоряется в промежутке между сборкой и люминесцентным экраном и рождает вспышку люминесцентного излучения.

Анализирующий конденсатор размещен под углом 45° к направлению извлечения ионов и к плоскости извлекающего электрода и обеспечивает линейную связь размеров полученного изображения с размерами исследуемого ускоренного пучка. Расчет движения ионов в однородных электрических полях показывает, что координаты иона на МКП не зависят ни от его заряда, ни от массы, ни от их отношения и определяются только геометрией и отношением напряженностей извлекающего E_u и анализирующего E_a электрических полей. Т.е. все положительно заряженные ионы остаточного газа дают вклад в изображение.

Например, задав картину ускоренных протонов в поперечном сечении пучка (и, соответственно, для ионов остаточного газа) как двумерное распределение Гаусса:

$$f(x,y) = \text{Exp}[-((x/100)^2)] \text{Exp}[-((y/70)^2)], \\ x=\{-250, 250\}, y=\{-250, 250\}, 2\sigma_x=100, 2\sigma_y=70,$$

можно представить картину распределения ионов на плоскости, перпендикулярной пластинам извлекающего конденсатора, в виде, показанном на Рис.2,а.

Это распределение трансформируется на входе МКП и на люминесцентном экране к виду, показанному на Рис.2,б, при значениях полей $E_a / \sqrt{2} = E_u$. При наблюдении этой новой, растянутой по оси y картины под углом 45 градусов распределение Рис.2,б будет снова выглядеть по y практически так же, как на Рис.2,а.

Пространственное разрешение устройства, как легко видеть, определяется шириной щели извлекающего конденсатора.

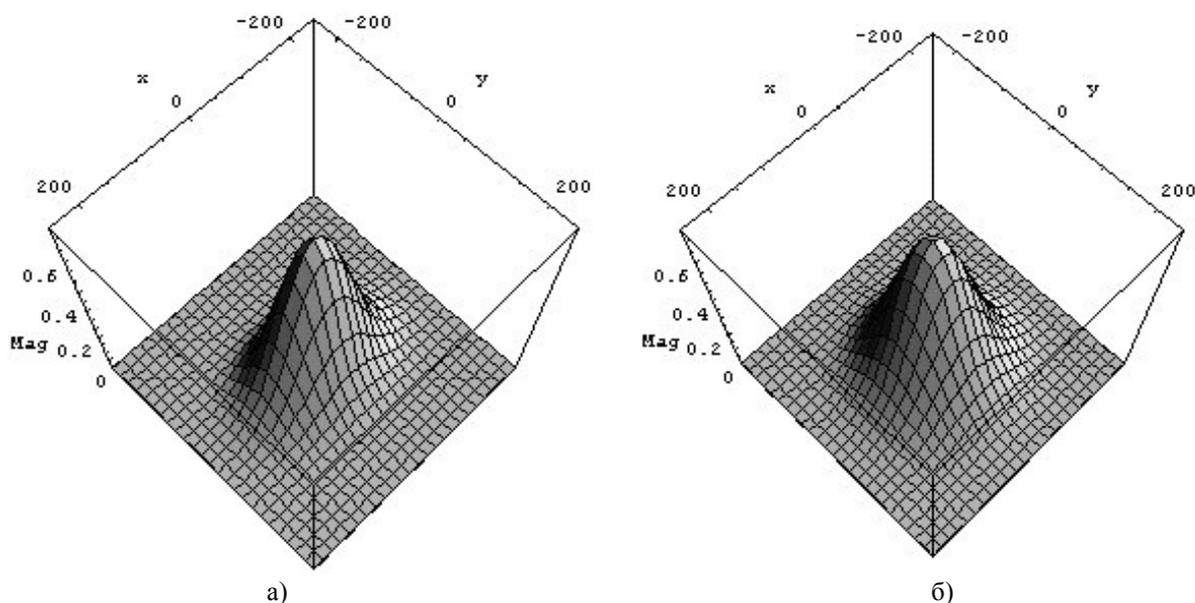


Рис. 2

2.2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ДАТЧИКА

Чувствительность датчика при заданном давлении зависит от ионизационных потерь энергии ускоренного пучка протонов dW/dz МэВ см²/г в остаточном газе. Зависимость dW/dz на энергиях выше 200 МэВ рассчитывается по стандартной формуле Бете-Блоха. При энергиях ниже 100 МэВ ионизационные потери можно найти, пользуясь справочными данными [7] или формулой [8]:

$$-dW/dz = (72q^2(A/W))\ln(160W/(AZ)), \quad (1)$$

где q – заряд ускоренной частицы, W – энергия частицы, A – массовое число частицы, Z – атомный номер среды.

Из сравнения потерь для пучков 400 кэВ и 209 МэВ следует, что число ионов, произведенных при этих энергиях протонным пучком, отличается примерно в 160 раз ($dW_{400 \text{ keV}}/dW_{209 \text{ MeV}} \approx 160$).

Опыт эксплуатации ИМПС на циклотроне РНЦ «Курчатовский институт» показал, что отношение сигнал/шум ≥ 3 обеспечивается при плотности среднего тока ионов остаточного газа 10^{-16} А/мм² или 600...700 частиц/мм²с.

Кроме того, пороговая чувствительность ИМПС повышается следующими известными средствами:

- использованием черно-белой ТВ-камеры с возможностью объединения сигналов группы пикселей ПЗС матрицы;
- охлаждением ПЗС матрицы;
- подбором рабочего режима МКП;
- выбором люминофора с длиной волны излучения, соответствующей максимальной чувствительности ПЗС матрицы, использованием режима накопления видеoinформации в компьютере;
- регулировкой напряжения между МКП и люминофором.

Дополнительным источником ложных сигналов с ЭОП могут служить гамма-кванты, ультрафиоле-

товые и рентгеновские фотоны, падающие на МКП или ПЗС матрицу.

3. РЕГИСТРАЦИЯ И ОБРАБОТКА ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Изображение поперечного сечения пучка протонов с энергией 209 МэВ ЛУ ИЯИ снимается с помощью цифровой телевизионной системы Видеоскан 285 [9]. Система состоит из цифровой ТВ-камеры на ПЗС матрице с электронным затвором, оптического кабеля с интерфейсными устройствами и платы захвата телевизионного кадра.

Обработка полученной информации производится с помощью специализированного программного обеспечения (ПО), поставляемого вместе с системой. ПО позволяет производить следующие действия по управлению ТВ-камерой:

- увеличивать чувствительность ТВ-камеры за счет аппаратного сложения сигналов с группы пикселей ПЗС матрицы;
- выбирать длительности экспозиции посредством электронного затвора в пределах 39 мкс... 132 с;
- запускать камеру от внешнего синхроимпульса, что дает возможность сдвигать импульс экспозиции электронного затвора вдоль импульса тока протонов, и наблюдать изменения поперечного сечения части импульса тока при сдвиге экспозиции от начала к концу импульса;
- изменять коэффициент усиления сигналов с ПЗС матрицы, регулируя яркость изображения на экране компьютера.

Кроме того, ПО позволяет обрабатывать изображения и получать из них профили, гистограммы и суммарные изображения поперечного сечения при сложении нескольких кадров, что также повышает чувствительность системы.

Для обеспечения максимальной чувствительности была выбрана ТВ-камера, имеющая черно-белую ПЗС матрицу. Эта матрица обладает макси-

мальной чувствительностью в зеленой области спектра, в которой и излучает люминофор ЭОП.

Для охлаждения матрицы используется термоэлектрический элемент Пельтье. Охлаждение ПЗС матрицы приводит к уменьшению темнового тока. Этот ток постоянно присутствует на ПЗС и мешает проведению измерений при больших экспозициях, поскольку заполняет пиксели матриц тепловыми электронами, которые не содержат полезной информации.

Применение оптоволоконного кабеля позволяет передавать сигналы изображения на значительное расстояние (до 15 км) без дополнительных искажений информации, которые неизбежно присутствуют при передаче по радиочастотному кабелю или витой паре.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Рабочее давление в каналах транспортировки ЛУ ИЯИ РАН не хуже 10^{-6} Торр, чего достаточно для нормальной работы МКП.

На Рис.3,а,б,в показаны изменения изображения поперечного сечения пучка протонов с энергией 209 МэВ ($dW/dz \approx 2,5$ МэВ см²/г) в процессе продольно – поперечной настройки линейного ускорителя

ИЯИ в виде последовательности кадров от состояния с большими потерями пучка до состояния с малыми потерями. Регистрировался полный кадр без сложения пикселей со средней частотой 7,7 Гц. На Рис.3 видны оси, нарисованные на люминофоре. Изображения были получены при токе 4,8...5 мА, длительности импульса 70 мкс, общем потенциале на детекторе 7 кВ, коэффициенте усиления камеры 120. Ширина щели извлекающего конденсатора равна 1 мм. (Минимальная ширина щели на пучке циклотрона была равна 0,1 мм). Т.е. пространственное разрешение для пучка с характерным размером 10 мм равно $\pm 0,5$ мм. При этих параметрах пучка и щели поток ионов, падающий на ЭОП, уменьшается примерно в 10^4 раз по сравнению с потоком, на котором был испытан ИМПС на канале инжекции (400 кэВ).

Следует отметить, что использование стандартного ПО позволяет не только увеличить пороговую чувствительность ИМПС, но и поднять среднюю частоту записи кадров в оперативную память от 7,7 до 25 Гц при использовании аппаратного сложения сигналов с пикселей ПЗС.



а)

б)

в)

Рис.3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени ИМПС для пучков как высокой, так и низкой энергии успешно испытаны и используются на ЛУ ИЯИ РАН.

ИМПС отличаются чрезвычайно высокой чувствительностью, высоким быстродействием и большим динамическим диапазоном: впервые удалось получить изображение поперечного сечения пучка протонов с энергией в сотни мегаэлектронвольт (209 МэВ) от *единичных* импульсов тока протонов линейного ускорителя (см. Рис.3). Учитывая, что со стандартных проволочных сканеров, которыми оборудован ЛУ, данные поступают за 180 секунд, локально увеличивая потери пучка, а с ИМПС за 140 мс без увеличения потерь, преимущества использования ИМПС при настройке пучков трудно недооценить.

Кроме того, следует особо подчеркнуть, что регистрация однократных импульсов пучка протонов с энергией 209 МэВ производилась без сложения сигналов с пикселей и без суммирования кадров. Это означает, что ИМПС на участке 602 МэВ, работая при потоке вторичных ионов примерно в

10000 раз меньшим, чем на пучке протонов с энергией 400 кэВ, перечисленные выше средства по увеличению пороговой чувствительности не использовал. И, следовательно, этот результат и возможность увеличивать чувствительность системы еще, по крайней мере, на два-три порядка позволяют надеяться на успешное применение ИМПС для регистрации характеристик пучка линейного ускорителя, как с существенно большей энергией, так и с существенно меньшей интенсивностью. Кроме того, ширина щели может быть уменьшена до 0,1 мм, что позволит применять ИМПС на пучках меньшего поперечного размера, причем яркость изображения не уменьшится, если плотность пучка увеличится соответствующим образом при уменьшении его размера.

В настоящее время в ИЯИ РАН, исходя из нужд экспериментов и прикладных исследований, планируется более интенсивное применение ИМПС в экспериментах по ядерной физике и физике элементарных частиц, а также в протонной терапии.

Работа выполнена в рамках и при поддержке Целевой научно-технической программы «Разработка

уникальных научно-исследовательских приборов и оборудования для учреждений РАН».

ЛИТЕРАТУРА

1. W.N. De Luca // *IEEE Trans: Nucl. Sci.* 1969, V.NS-16, p.813.
2. W. Hain, F. Horstra, A. Laros, et al. // *Proc. EPAC-90*. Nice, 1990, June 12-16, v.1, p.759-761.
3. В.А. Реззов, Л.И. Юдин А.с. 1392645 СССР // *Б.И.* 1988, №16, с.32.
4. В.Г. Михайлов, В.А. Реззов, В.И. Скляренко, Л.И. Юдин. А.с. 1962528 СССР // *Б.И.* 1989, №8, с.294.
5. В.Г. Михайлов, В.В. Леонов, В.А. Реззов, и др. Многопараметрические ионизационные датчики для контроля пучков ускоренных частиц // *ПТЭ.* 1995, №6, с.39-53.
6. S.K. Esin, E.S. Nikulin, V.A. Rezvov, O.T. Frolov, L.I. Ioudin, V.P. Yakushev, -Institute for Nuclear Research, RAS, *-RRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia. Non-interrupted beam cross-section detector on the MMF injector // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования» (42)*. 2004, №1, с.86-88.
7. А.И. Пучеров, С.В. Романовский, Т.Д. Чеснокова. *Таблицы массовой тормозной способности и пробегов частиц с энергией 1...100 МэВ*. Киев: «Наукова думка», 1972.
8. М.Н. Царегородцев. *Ядерная электроника. Часть 2*, Москва: «МИФИ», 1966, с.3.
9. <http://www.videoscan.ru/page/739>

ION TRANSVERSE SECTION MONITOR FOR INTERMEDIATE ENERGY BEAM OF INR PROTON LINAC

P. Reinhardt-Nickoulin, Yu. Kalinin, S. Latushkin, A. Menshov, A. Mirzozan, E. Nikulin, V. Rezvov, A. Feschenko

Residual gas ion transverse section monitor (ITSM) is developed and installed on output INR Proton LINAC to provide non-intercepting measurements of beam pulse transverse section for wide energy and amplitude range. The ITSM functioning details and TV image processing system are described. The available results of beam pulse measurements are presented.

ІОННИЙ МОНІТОР ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ПРОТОННОГО ПУЧКУ ПРОМІЖНИХ ЕНЕРГІЙ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЯД РАН

П. Рейнгардт-Нікулін, Ю. Калінін, С. Латушкін, А. Меньшов, А. Мірзоян, Є. Нікулін, В. Реззов, А. Фещенко

Для забезпечення прозорих вимірів поперечного перерізу пучка прискорених протонів у широкому діапазоні енергій, амплітуд і тривалостей розроблений і встановлений на виході лінійного прискорювача ІЯД РАН спеціальний іонізаційний монітор поперечного перерізу на залишковому газі. Наведено опис датчика і системи знімання і обробки зображень. Представлено результати вимірів імпульсного струму протонів.