
МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПУЧКА НА ВХОДЕ ГАЗОНАПЛНЕННОГО СОЛЕНОИДА GASSOL

С. В. Митрофанов^a, Ю. Г. Тетерев^{a, 1}, А. И. Крылов^a,
А. Т. Исатов^{a, b}, К. Д. Тимошенко^{a, b}, Е. А. Болатказыев^{a, b, 2}

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

^b Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, 010000, Казахстан

^a Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050, Россия

Создан и испытан измеритель профиля пучка, который будет использоваться на входе газонаполненного соленоида GASSOL при его запуске и настройке. Измеритель профиля изготовлен в виде мозаики из катодов, с каждого из которых измеряется ток, возникающий за счет вторичной эмиссии при бомбардировке его ускоренными ионами. Для измерения токов с катодов используется соответствующее число каналов усилителей тока. Создана программа для визуализации профиля пучка. В эксперименте на пучке ионов $^{40}\text{Ar}^{+16}$ энергией 4 МэВ/нуклон установлено, что нижняя граница чувствительности измерителя профиля меньше 0,001 нА частиц. Верхняя граница чувствительности была установлена путем проведения тепловых расчетов и составила 100 нА частиц. Критической является вероятность нарушения контактов сигнальных кабелей в результате нагрева. Точность определения центра пучка ± 1 мм находится в пределах заданного допуска на радиальное смещение оси пучка относительно магнитной оси соленоида. С помощью двух разнесенных в пространстве измерителей будет контролироваться совпадение осей пучка и соленоида. При нахождении такого измерителя профиля в газовой среде он может вдобавок к вторичной эмиссии работать и в режиме ионизационной камеры. Простота конструкции позволяет изготавливать измерители в широком диапазоне размеров и количества катодов.

A beam profilometer has been developed and tested for the use at the entrance of the gas-filled solenoid GASSOL during its commissioning and adjustment. The profilometer is constructed as a mosaic of cathodes, each measuring the current generated by the secondary emission during bombardment by accelerated ions being measured from each cathode. A corresponding number of current amplifier channels is used to measure the currents from the cathodes. A software program has been developed for visualizing the beam profile. During an experiment with an $^{40}\text{Ar}^{+16}$ ion beam at an energy of 4 MeV per nucleon, the lower sensitivity limit of the profilometer was found to be less than 0.001 pnA. The upper sensitivity limit, determined through thermal calculations, is 100 pnA. A critical factor is the risk of signal cable contact failures due to heating. The accuracy of beam centre determination, ± 1 mm, falls within the specified tolerance for radial displacement of the beam axis relative to the magnetic axis of the solenoid. Using two spatially separated profilometers enables control of the alignment between the beam and solenoid axes. When operating in a gas medium, the profilometer can also function as an ionization chamber in addition to working via secondary emission. The simplicity of the design enables the fabrication of profilometers in a wide range of sizes and with varying number of cathodes.

PACS: 29.40.Cs; 29.27.-a; 41.85.-p

¹E-mail: teterev@jinr.ru

²E-mail: bea@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

Установка GASSOL — это газонаполненный сепаратор ионов, работающий на базе сверхпроводящего магнитного соленоида. С его помощью продукты реакции полного слияния отделяют от ионов первичного и рассеянного пучка, а также от продуктов фоновых реакций. Он разработан в ЛЯР ОИЯИ в сотрудничестве с компанией «Нева-Магнит» (Санкт-Петербург). В ближайшее время планируется его установка в экспериментальном зале ускорителя циклотрона ДЦ-280.

В работе [1] приведены результаты численного моделирования ионной оптики в газонаполненном соленоиде GASSOL. Как указано в этой работе, источником фоновых событий являются следующие составляющие: атомы отдачи материала мишени, рассеянные ионы пучка, продукты реакций многонуклонных передач, продукты взаимодействия пучка со стенками ионопровода, коллиматорами, с держателем мишени, с наполняемым газом и т. д. Сечения всех этих процессов трудно оценить. Необходимо учесть все идущие процессы, а затем смоделировать для каждого фонового продукта динамику перезарядки в газе и, наконец, оценить вероятность достижения фокальной плоскости. Сложность расчета и ненадежность параметров, необходимых для его реализации, не позволяют получить обоснованную и достоверную оценку количества фоновых продуктов реакции в выходной камере. Реальные значения будут получены в результате экспериментов.

По сравнению с другими созданными в мире сепараторами на базе соленоида, в конструкцию GASSOL внесены существенные новые элементы, как, например, статическая турбина, расположенная в центре соленоида. С ее помощью планируется значительно повысить степень очистки исследуемых продуктов реакции от фона. Но и здесь возникает много неопределенностей, требующих экспериментального разрешения.

В работе [1] показано, что трансмиссия продуктов реакции полного слияния до фокальной плоскости на установке GASSOL может достигать 58 %. Как это и планировалось при принятии решения о создании GASSOL, столь высокое значение трансмиссии позволяет проводить экспериментальное изучение химических свойств сверхтяжелых элементов. С этой целью продукты реакции полного слияния, вылетающие из производящей мишени под действием импульса пучка, останавливают на выходе в среде инертного газа (обычно смеси He–Ar), а затем транспортируют в потоке газа через капилляр в хроматографическую систему детектирования. Схема соленоида показана на рис. 1.

Планируется, что при работе GASSOL в основном будут использоваться первичные пучки ионов ^{40}Ar или ^{48}Ca с энергией 4–5 МэВ/нуклон и максимальной интенсивностью 6,5 мкА частиц, которая к настоящему времени достигнута в экспериментах на ускорителе ДЦ-280.

На время экспериментального изучения эффективности применения статической турбины и выбора оптимальных условий работы планируется, что на выходе сепаратора будут размещены полупроводниковые детекторы. С их помощью возможно идентифицировать продукты реакции, прошедшие сепаратор, и экспериментально установить соотношение эффект–фон. К сожалению, в месте их размещения при проведении экспериментов создается интенсивный поток быстрых нейтронов, а радиационная стойкость полупроводниковых детекторов к ним невысокая. Для обеспечения работо-

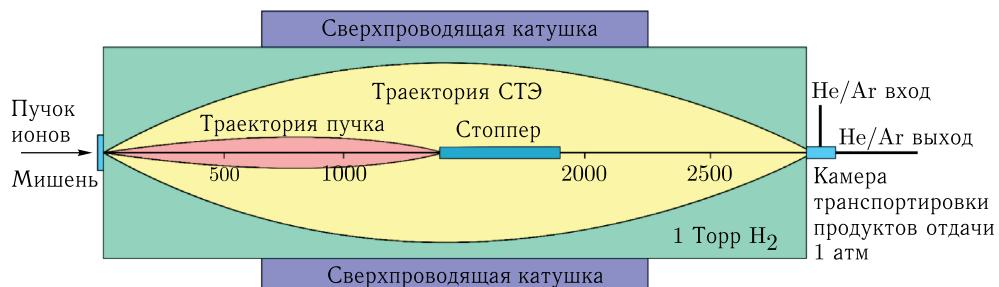


Рис. 1. Схема установки GASSOL

способности детекторов настройка сепаратора будет проводиться при токе первичного пучка в диапазоне 0,01–0,1 нА частиц.

Для того чтобы при работе газонаполненного соленоида добиться максимальной очистки продуктов реакции полного слияния, первичный пучок необходимо хорошо сфокусировать и тщательно центрировать с магнитной осью. Например, на установке SOLEROO [2] центровку пучка осуществляли, пропуская его через вводимый на время настройки коллиматор. Положение пучка настраивали так, чтобы показания цилиндра Фарадея (ЦФ), установленного на стоппере, достигали максимального значения. К сожалению, ток пучка в указанном диапазоне 0,01–0,1 нА частиц невозможно измерить с помощью ЦФ. Это обстоятельство не позволяет воспользоваться вышеупомянутым методом. Продуктивным решением для контроля совмещения оси пучка с магнитной осью соленоида при настройке сепаратора является использование чувствительного измерителя профиля пучка, который устанавливается перед мишенью. С его помощью возможен и контроль за непревышением допустимых размеров пучка.

Задачей измерителя профиля является и измерение относительной интенсивности первичного пучка. Это накладывает требование на диапазон значений интенсивности, в котором детектор должен работать. Начало этого диапазона должно быть как можно более низким, чтобы контролировать ток пучка во избежание порчи полупроводниковых детекторов. Верхнюю границу диапазона желательно иметь как можно выше, чтобы иметь возможность в более широком диапазоне сопоставлять показания измерителя профиля с показаниями приборов, которые будут использоваться в режиме эксплуатации установки GASSOL. Во всем своем диапазоне работы детектор должен обладать достаточной радиационной стойкостью.

Использование для создания измерителя профиля каких-либо видов детекторов ограничивается и другим условием. В этой установке пучок попадает на мишень, проходя через область дифференциальной откачки, где происходит разделение объема высокого вакуума ($> 10^{-4}$ Па) с объемом, заполненным газом водорода или гелия при давлении около 1 Торр (100 Па). Детектор должен надежно работать в этой среде.

Для создания измерителя профиля пучка наиболее подходящим является детектор, основанный на вторичной эмиссии. Как показано в работе [3], такого типа детектор, по сравнению, например, с люминофорами, имеет лучшую чувствительность, линейность, радиационную стойкость и стабильность показаний в процессе длительной эксплуатации.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПРОФИЛЯ ПУЧКА

Измеритель профиля изготовлен в виде мозаики из катодов, с каждого из которых измеряется ток вторичной эмиссии, возникающий при бомбардировке его ускоренными ионами. Известно, что коэффициент вторичной эмиссии пропорционален дифференциальным ионизационным потерям в веществе. Чтобы иметь высокие значения радиационной стойкости и коэффициента вторичной эмиссии, в качестве материала для таких катодов может быть выбран графит или алюминий. Для изготовления графитового катода использована наиболее доступная его форма в виде грифельного стержня. Выбор конструкции облегчает большое разнообразие диаметров имеющихся в продаже грифелей и наличие алюминиевой проволоки со стандартными сечениями 1,5, 2, 2,5, 4 мм^2 и т. д.

Для выбора диаметра катодов руководствовались результатами расчетов [4], выполненных для проведения экспериментов на газонаполненных сепараторах ускорителя ДЦ-280 ЛЯР ОИЯИ. Из расчетов следует, что система транспортировки ускоренных ионов позволяет сформировать на мишени пучок диаметром 10 мм (4σ). Дополнительно к этому руководствовались выдержкой из технического задания на изготовление и размещение газонаполненного соленоида GASSOL, в котором указано, что диаметр ионопровода перед мишенью равен 14,5 мм, а допуск на радиальное смещение оси пучка относительно магнитной оси соленоида составляет ± 1 мм. Возможность достижения большей чувствительности измерителя профиля тоже принималась во внимание. Чувствительность пропорциональна квадрату диаметра катода.

Пучок попадает на мозаику из некоторого количества катодов, обращенных торцом к направлению пучка. В качестве разделяющих изоляторов и держателей катодов выбраны керамические трубы из оксида алюминия Al_2O_3 , которые собраны в некую конструкцию. Противоположные пучку концы катодов протачиваются и вставляются в трубы и в отверстия, образующиеся между трубками. С противоположного конца в трубы и отверстия вставляются медные проводники. Чтобы обеспечить механическую жесткость контактов, проводники имеют диаметр не менее 1 мм. К этим контактам припаиваются гибкие кабели, идущие к многоканальному измерителю тока. Электрические контакты между медными проводниками и катодами дублируются тонкими проводниками, проложенными вдоль их боковых поверхностей. Сборка трубок для лучшей теплоотдачи обрамлена рубашкой, изготовленной из меди.

Было собрано два варианта измерителей профиля на базе керамических трубок внешним диаметром 3 и 4 мм. В качестве катодов были использованы грифели диаметром 1,8 и 2,7 мм или алюминиевый провод сечением 2,5 и 4 мм^2 . Расстояние между центрами катодов в собранных конструкциях составляло 2,1 и 2,8 мм. На рис. 2 показана схема размещения катодов в сборке из трубок, изготовленных из оксида алюминия.

С помощью измерителей профиля, имеющих расстояния между центрами катодов 2,1 и 2,8 мм, контролируются области диаметрами 15 и 20 мм соответственно. Первый из них устанавливается вблизи мишени, а второй — выше по пучку, где размер пучка и диаметр ионопровода больше. С помощью двух разнесенных в пространстве измерителей будет контролироваться соосность пучка ионопровода, ось которого, в свою очередь, при сборке установки должна совпадать с осью соленоида.

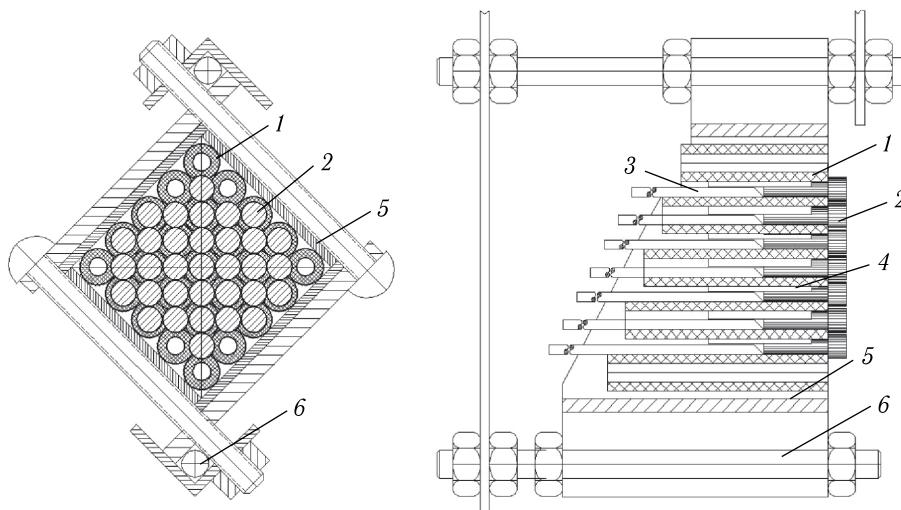


Рис. 2. Схема размещения катодов в сборке из трубок, изготовленных из оксида алюминия Al_2O_3 . Слева: в плане; справа: в разрезе. 1 — 25 трубок; 2 — 31 катод; 3 — медные проводники; 4 — дублирующие проводники; 5 — рубашка из меди; 6 — винты для крепления на приводе

Перед катодами установлена сетка-анод, разделяющая в горизонтальном направлении ряды катодов, она изготовлена из полосок тантала толщиной 0,1 мм. Плоскость полосок параллельна оси пучка. Местоположение сетки относительно катодов центрируется с использованием незанятых катодами трубок. Такая конструкция выбрана для достижения большей радиационной стойкости. Сетка изолирована, и на нее подано положительное напряжение для сбора электронов вторичной эмиссии.

Вся эта конструкция закрепляется на приводе, с помощью которого она вводится в пучок на время измерений. Для измерения токов с катодов решено воспользоваться 16-канальными усилителями. Было решено, что профиль пучка будет достаточно хорошо определен при измерении значений интенсивности на поперечном сечении пучка в 31 точке с помощью соответствующего числа катодов. В этом случае для измерения токов достаточно воспользоваться двумя усилителями.

При нахождении такого измерителя профиля в газовой среде вдобавок к току вторичной эмиссии будет регистрироваться ток, возникающий от ионизации газа. Это приведет к повышению чувствительности.

Измерение тока с графитовых или алюминиевых катодов осуществляется с помощью модульной системы ввода/вывода SMARTBOX-6 [5]. Система состоит из двух модулей измерения тока: П16-04 и модуля с интерфейсом Ethernet MCPU-02.

Модуль П16-04 имеет 16 измерительных входов и предназначен для измерения тока в диапазоне ± 1 нА. Общее время измерения по всем 16 каналам составляет 267 мс, разрешение АЦП — 16 бит, тип АЦП — «сигма-дельта».

Модуль MCPU-02 обеспечивает функционирование системы ввода/вывода SMARTBOX-6 и ее связь с системой управления ускорителя через Ethernet по протоколу TCP/IP. На компьютере установлена программа, созданная для визуализации профиля пучка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПРОФИЛЯ ПУЧКА

Исследования характеристик измерителя профиля проводили, вводя его с помощью пневматического привода в пучок ионов $^{40}\text{Ar}^{+16}$ энергией 4 МэВ/нуклон, полученных на ускорителе У-400 ЛЯР ОИЯИ. Исследования проводились в условиях вакуума 10^{-4} Па. Для эксперимента взят измеритель с расстоянием между центрами грифелей 2,1 мм. Фотография измерителя приведена на рис. 3.

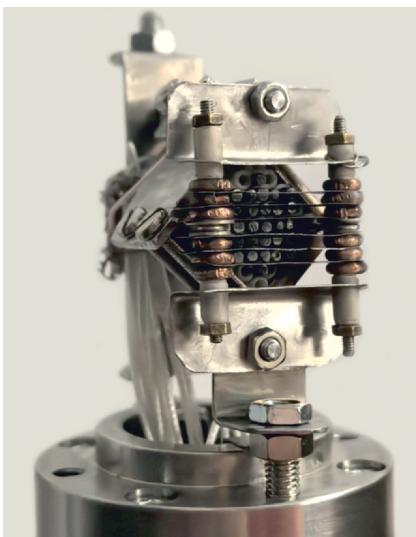


Рис. 3. Измеритель профиля пучка с расстоянием между центрами грифелей 2,1 мм

гих факторов, например, вида и энергии пучка ускоренных ионов, материала, из которого изготовлены катоды, и состояния их поверхности. Поэтому определение экспериментальным путем нижней границы диапазона тока пучка, в котором он может использоваться для относительных измерений, может быть сделано только качественное. Одной из сложностей, с которой пришлось столкнуться для разрешения этой задачи, является отсутствие в нашем распоряжении каких-либо приборов, способных напрямую адекватно измерять ток пучка в требуемом диапазоне 0,01–0,1 нА частиц. Нижняя граница диапазона, в котором имеющиеся цилиндры Фарадея измеряют ток пучка, составляет 2 нА. Экстракция пучка из ускорителя У-400 осуществляется с помощью перезарядной фольги. Выведенный пучок ^{40}Ar с энергией 4 МэВ/нуклон имеет зарядность +16. Это означает, что с помощью цилиндра Фарадея невозможно проводить измерения тока пучка в диапазоне интенсивности ниже 0,125 нА частиц. В то же время такой интенсивности соответствует поток частиц $0,75 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, а для детекторов, например сцинтилляторов или полупроводниковых, такой поток уже губителен. Эти детекторы могут быть использованы для определения нижней границы диапазона тока пучка, если этот поток каким-либо способом снизить и найти коэф-

Профиль пучка в реальном времени можно рассмотреть в виде значений тока, измеренных с каждого катода. Индикаторы на изображениях профиля указаны в соответствии с расположением катодов в измерителе. Профиль пучка представлен в виде 3D-графика с цветовой передачей значений тока. На рис. 4 приведены изображения профиля сфокусированного пучка при токе 0,625 нА частиц, падающего на графитовые катоды. Значения тока с катодов в отсутствие пучка в тех же единицах, что и на рис. 4, не превышают $5 \cdot 10^{-5}$. Имея вблизи мишени профиль пучка, состоящий из 31 значения интенсивности пучка с шагом 2,1 мм, путем экстраполяции, которая заложена в программу визуализации, можно обеспечить точность определения центра пучка ± 1 мм. Это значение находится в пределах заданного допуска на радиальное смещение оси пучка относительно магнитной оси соленоида.

Измеритель профиля может быть использован только для относительного измерения тока пучка. Ток вторичной эмиссии зависит от

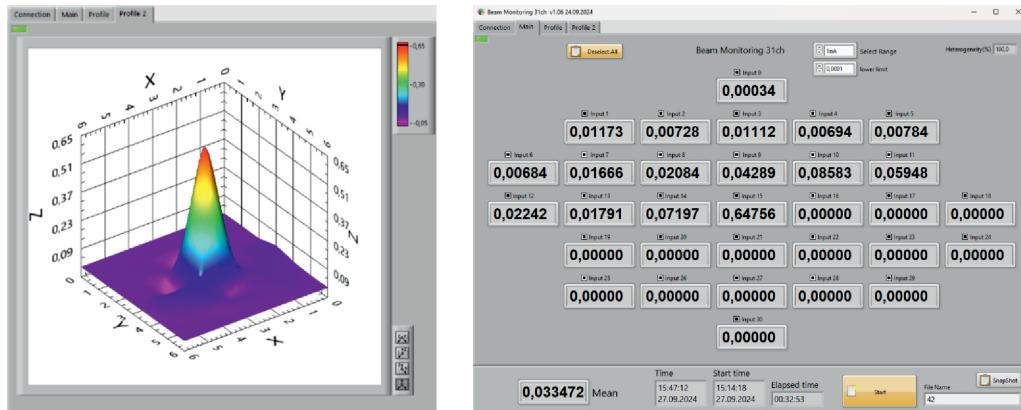


Рис. 4. Изображения профиля (в графическом и индикаторном видах) при токе пучка 0,625 нА частиц, падающего на графитовые катоды

фициенты соответствия между показанием ЦФ, средним током с катодов монитора профиля пучка и скоростью счета, например, сцинтилляционного детектора в сниженном потоке. А затем, снижая интенсивность пучка, находить соответствия между средним током с катодов монитора и скоростью счета сцинтиллятора.

Для проведения такого эксперимента была использована установка на ускорителе У-400, предназначенная для испытания электронных схем [6]. На заднем фланце бокса, предназначенного для размещения тестируемой электроники, установлено девять органических сцинтилляционных детекторов в порядке 3×3 . Монитор профиля пучка, для которого определялась нижняя граница диапазона, размещался в блоке диагностики для ЦФ, установленном ближе к ускорителю на расстоянии 5,6 м от бокса сцинтилляторов. Перед монитором мог быть введен цилиндр Фарадея, с помощью которого измерялся ток пучка. Сразу за монитором размещалась фольга из тантала толщиной 5 мкм. Пучок после вывода из него ЦФ и монитора попадал на фольгу и с ее помощью рассеивался. За счет рассеяния плотность потока пучка, доходящего до области размещения сцинтилляционных детекторов, значительно снижалась. Максимальный счет при токе пучка на ЦФ 10 нА (0,625 нА частиц) не превышал $5 \cdot 10^5$ имп. \cdot с $^{-1}$ для каждого из сцинтилляторов. Калибровка монитора осуществлялась путем сопоставления средней скорости счета по всем девяти детекторам и по среднему току со всех катодов монитора пучка. Это позволяло минимизировать ошибку, особенно в области малых токов пучка. Измерения тока пучка проводились последовательно: сначала с помощью монитора профиля, а после его вывода с помощью сцинтилляторов. На рис. 5 показан пример измерений при токе пучка 0,2 нА частиц.

На рис. 6 приведен результат проведенной калибровки, начиная от максимального тока пучка 0,8 нА частиц. Статистическая ошибка измерений не превышает размеров точек. По точкам с результатами измерений проведена линейная экстраполяция. Основная часть отклонений результатов измерений от линии связана с колебаниями тока пучка во время последовательных измерений. Отклонения при низких токах обусловлены фоновыми токами в мониторе, связанными с некоторым загрязнением

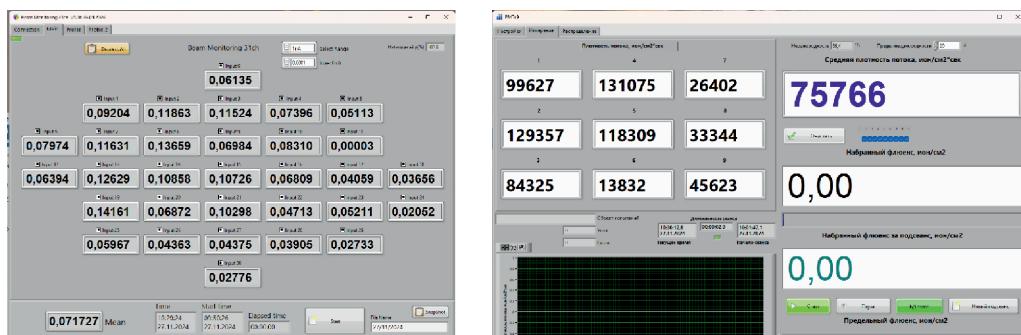


Рис. 5. Пример измерений при токе пучка 0,2 нА частиц. Слева — результат измерения с помощью монитора профиля, а справа — девяти сцинтилляторов

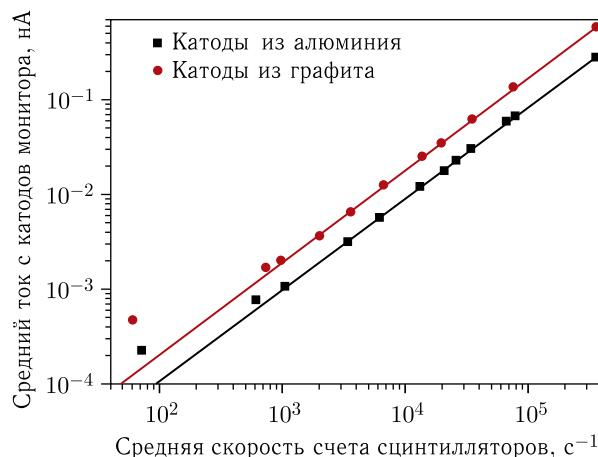


Рис. 6. Результат калибровки монитора профиля пучка, проведенной при остаточном давлении 10^{-4} Па с помощью сцинтилляторов

изоляторов. Из результатов, приведенных на рисунке, видно, что при снижении интенсивности пучка, начиная от 0,8 нА частиц, измерения с помощью монитора профиля, как с графитовыми, так и с алюминиевыми катодами, линейны в диапазоне трех порядков. Чувствительность измерений монитора с графитовыми катодами в 1,7 раза выше. Исходя из результатов этих измерений, можно предположить, что при давлении 10^{-4} Па нижняя граница диапазона, в котором можно наблюдать профиль пучка с помощью созданного монитора, находится вблизи 0,001 нА частиц.

При расположении монитора вблизи мишени, где объем заполнен газом водорода или гелия при давлении около 1 Торр, к току вторичной эмиссии добавится ток от сбора пар ионов, образованных в газе проходящим пучком. Монитор дополнительно будет работать и в режиме ионизационной камеры.

Проверена возможность работы профилометра с потоком ускоренных ионов в режиме ионизационной камеры на воздухе, при атмосферном давлении. В этом эксперименте опять использовалась установка на ускорителе У-400, предназначенная

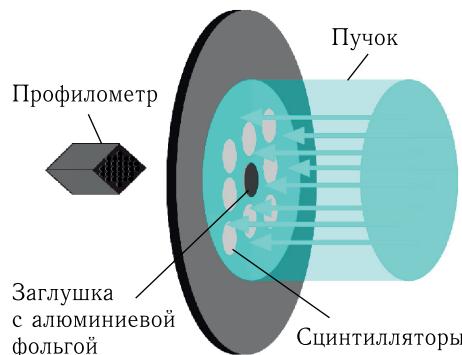


Рис. 7. Схема работы профилометра на пучке ускоренных ионов циклotronа У-400 в режиме ионизационной камеры при атмосферном давлении на воздухе

для испытания электронных схем. В боксе для размещения электронных схем было сформировано поле ускоренных ионов с равномерной плотностью потока на площади 10×10 см. Контроль и измерение плотности потока осуществлялись с помощью уже упоминавшихся девяти сцинтилляторов, размещенных в порядке 3×3 (рис. 7). Калибровка измерений плотности потока с помощью сцинтилляторов была сделана с использованием трековых детекторов. Затем на месте центрального сцинтиллятора была установлена заглушка с окном диаметром 4 мм, которое было закрыто алюминиевой фольгой толщиной 0,01 мм. Через это окно часть ионов выводилась из вакуумной камеры в атмосферу. На их пути был установлен монитор профиля пучка. Отклик профилометра наблюдался при плотности потока $2 \cdot 10^3$ частиц/ см^2 в секунду и выше. Данные измерения продемонстрировали потенциальную возможность использования измерителя профиля в режиме ионизационной камеры, что становится актуальным при таких низких значениях потока ионов, когда уровень тока вторичной эмиссии в стержнях ниже порога регистрации.

Здесь приведена только оценка ожидаемого увеличения тока с коллекторов за счет дополнительного сбора пар ионов в режиме ионизационной камеры. При прохождении ускоренных ионов аргона энергией 4 МэВ/нуклон и током пучка 0,2 нА частиц промежутка между сеткой и коллекторами, равного 2 мм, в среде гелия при давлении около 1 Торр теряется энергия $1,2 \cdot 10^6$ МэВ. Учитывая фактор Фано и то, что на образование одной пары в гелии затрачивается энергия 42,3 эВ, можно посчитать, что в промежутке образуется $1,4 \cdot 10^{10}$ пар ионов. За счет этого между сеткой и коллекторами может возникнуть добавочный ток, равный 2,2 нА. Таким образом, добавочный средний ток на один коллектор составит 0,07 нА. Эта величина при прочих равных условиях сравнима с величиной среднего тока на один коллектор за счет вторичной эмиссии, который составил 0,072 нА (см. рис. 5). Реальные значения добавочного тока за счет режима ионизационной камеры будут получены в эксперименте.

Радиационную стойкость конструкции созданного монитора в полной мере можно установить только при его постоянной эксплуатации. Тем не менее, за время проведения исследования его характеристик интегральный поток ионов, который попал на его поверхность, составил $2 \cdot 10^{16}$ частиц. При извлечении монитора профиля пучка не обнаружено никаких повреждений пучком ни катодов, ни сетки.

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ИЗМЕРИТЕЛЕ ПРОФИЛЯ ПУЧКА

Измеритель профиля пучка подвергается разрушающему воздействию бомбардирующих его ионов. И если радиационная стойкость материалов, которые используются для изготовления измерителей профиля, довольно высокая, то в результате поглощения энергии пучка возникает нагревание. Нагревание может привести к расплаву материала катода или нарушению контактов с сигнальными кабелями. Для нахождения слабых мест конкретной конструкции проведены тепловые расчеты, которые позволяют оценить верхнюю границу диапазона, в котором прибор может быть использован без повреждений. Расчет проведен для конструкции, в которой диаметр керамических трубок из оксида алюминия Al_2O_3 равен 3 мм; диаметры катодов как из графита, так и из алюминия равны 1,8 мм; длина проточенной части катода и вставленной в трубки — 7 мм, длина исходной и выступающей из трубок части — 2 мм (см. рис. 2).

Сигнальные кабели, идущие к измерителю профиля, для удобства подсоединения разнесены в пространстве. Для этого трубы имеют разную длину: в верхней части конструкции она равна 16 мм и, увеличиваясь с каждым следующим слоем трубок на 2 мм, достигает 28 мм в нижней.

Медные проводники со стороны катодов имеют косой срез. Это предотвращает непосредственную передачу тепла с катода на медный проводник, за счет чего снижается температура места пайки кабелей.

Характеристики материалов, используемые в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Графит	Алюминий	Оксид Al_2O_3	Медь
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$150 \cdot 300 \text{ К}/T$	237	35	400
Излучательная способность	0,8	0,2	0,4	0,8

Расчеты проведены для случая бомбардировки пучком ионов $^{48}\text{Ca}^{+4}$ энергией 5 МэВ/нуклон, имеющим двумерное нормальное распределение ($\sigma_x = \sigma_y = 2,5$ мм) плотности потока на поперечном сечении, перпендикулярном оси пучка. Для расчета использовалась программа COMSOL Multiphysics, версия 6.1. Коэффициент теплопроводности графита зависит от температуры и представлен в виде: $\lambda [\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}] = 150 \cdot 300 \text{ К}/T$, где T — температура [К]. В расчетах учитывалось, что измеритель профиля размещается в атмосфере гелия при давлении 1 Торр. В справочниках по теплотехнике найдены только оценочные значения коэффициента теплопередачи за счет конвекции для гелия при давлении 1 Торр: «Свободная конвекция: обычно в таких условиях она становится неэффективной, и коэффициент теплопередачи может составлять 0,1–1 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Вынужденная конвекция (если есть направленный поток гелия): при низких скоростях (< 1 м/с) — порядка 1–5 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ». При расчете по программе COMSOL рассеяния энергии пучка за счет конвекции взят коэффициент теплопередачи, равный 2 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Показано, что рассеяние поглощенной энергии пучка в основном происходит за счет излучения. За счет учета конвекции снижение температуры незначительно.

В результате расчета установлено, что слабым местом, которое определяет верхнюю границу диапазона измерения и работоспособность конкретной конструкции измерителя профиля, является температура контактов для подсоединения сигнальных кабелей. Здесь критической является температура плавления припоя. Результаты расчета распределений температур в измерителях профиля с графитовыми или алюминиевыми катодами приведены на рис. 8.

Из результатов расчета следует, что при использовании графитовых катодов довольно большая часть энергии рассеивается за счет излучения графита, нагревающегося до высокой температуры. Ток пучка 100 нА частиц можно считать верхней границей. Мощность пучка при заданном токе и энергии ионов составляет 25 Вт. В этом случае температура концов медных проводников, к которым припаиваются сигнальные кабели, близка к достижению температуры плавления припоя. При использовании алюминиевых катодов при той же мощности пучка эта температура за-

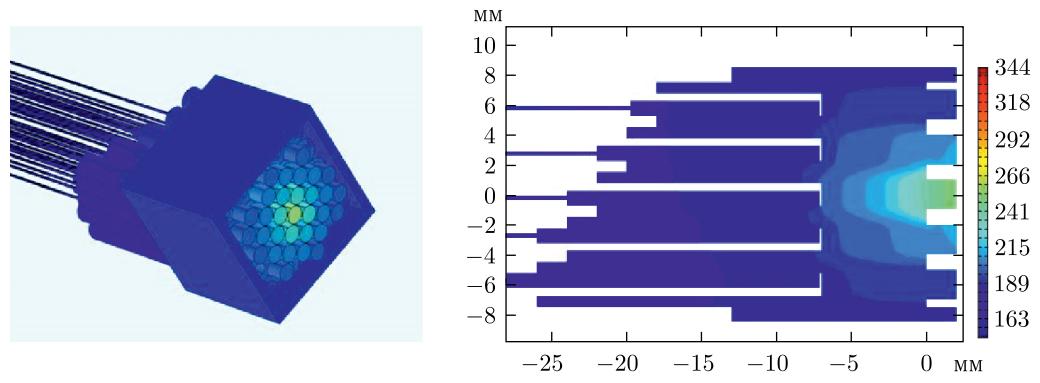
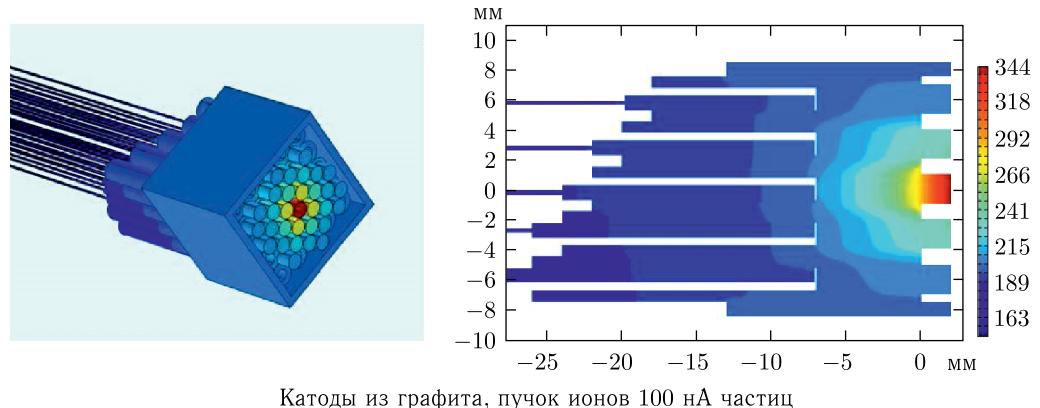


Рис. 8. Результаты расчета распределения температур в измерителе профиля с катодами, изготовленными из графита и алюминия, при бомбардировке пучком ионов ^{48}Ca с нормальным распределением ($\sigma_x = \sigma_y = 2,5$ мм) плотности потока, энергией 5 МэВ/нуклон. Слева показано распределение температур в 3D-геометрии, а справа — в центральном сечении

Таблица 2

Длина, мм	Катоды из графита (мощность пучка 25 Вт)		Катоды из алюминия (мощность пучка 20 Вт)	
	$T_{\text{пов}}$, °C	$T_{\text{пр}}$, °C	$T_{\text{пов}}$, °C	$T_{\text{пр}}$, °C
16	345	193	254	183
26	320	163	230	152
36	302	140	215	130
46	290	123	204	114

Примечание. $T_{\text{пов}}$ — температура передней поверхности центрального катода, $T_{\text{пр}}$ — температура конца одного из наиболее горячих медных проводников.

счет большей теплопроводности алюминия выше температуры плавления припоя. Как следует из результатов расчета, верхней границей применения таких измерителей профиля является ток 80 нА частиц, мощность пучка — 20 Вт.

В табл. 2 приведены значения температуры передней поверхности центрального катода ($T_{\text{пов}}$) и конца одного из наиболее горячих медных проводников ($T_{\text{пр}}$), к которым припаиваются гибкие сигнальные кабели. В колонке «Длина» приведена длина самой короткой трубы сборки. В следующих колонках приведены соответствующие изменения температуры при одной и той же мощности пучка для сборок разной длины. Можно отметить, что с увеличением длины сборок температура снижается. Результаты расчетов приведены для катодов как из графита, так и из алюминия.

Припой ПОС-25 имеет верхнее значение температуры плавления 260 °С. Верхнюю границу можно поднять и другим путем, например, пайку заменить на другой способ создания надежных контактов с сигнальными кабелями.

Температура передней поверхности катодов из алюминия или графита не критична для их целостности.

Результаты расчетов касаются только конкретной конструкции. Например, значение верхней границы мощности пучка, при которой температура концов медных проводников становится близка к достижению температуры плавления припоя, может быть увеличено, если все керамические трубы сборки из оксида алюминия Al_2O_3 и соответствующие медные проводники одинаково удлинить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан и испытан измеритель профиля пучка, который будет использоваться на входе газонаполненного соленоида GASSOL при его запуске и настройке. Измеритель профиля изготовлен в виде мозаики из катодов, с каждого из которых измеряется ток, возникающий за счет вторичной эмиссии при бомбардировке его ускоренными ионами. С помощью привода измеритель вводится в пучок. Для измерения токов с катодов используется соответствующее число каналов усилителей тока. Создана программа для визуализации профиля пучка. В эксперименте на пучке ионов ${}^{40}\text{Ar}^{+16}$ энергией 4 МэВ/нуклон в условиях вакуума 10^{-4} Па установлено, что нижняя граница чувствительности измерителя профиля $\sim 0,001$ нА частиц. Верхняя граница чувствительности была установлена путем проведения тепловых расчетов и соста-

вила 100 и 80 нА частиц для измерителей с графитовым и с алюминиевым катодом соответственно. Критической является вероятность нарушения контактов припаянных сигнальных кабелей в результате нагрева.

Точность определения центра пучка ± 1 мм находится в пределах заданного допуска на радиальное смещение оси пучка относительно магнитной оси соленоида. Планируется, что на GASSOL будет установлено два измерителя профиля: один — вблизи мишени, а второй — выше по пучку. С помощью двух разнесенных в пространстве измерителей будет контролироваться совпадение осей пучка и соленоида.

При проведении экспериментов не обнаружено никаких повреждений пучком, что демонстрирует радиационную стойкость конструкции в заданном диапазоне тока пучка. При нахождении такого измерителя профиля в газовой среде он может вдобавок к вторичной эмиссии работать и в режиме ионизационной камеры.

Простота конструкции позволяет изготавливать измерители в широком диапазоне размеров и количества катодов.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Объединенного института ядерных исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solov'yev D. I., Kovrizhnykh N. D., Gulbekyan G. G., Kazarinov N. Y., Gikal K. B., Lisov V. I., Papenkov K. V. // Nucl. Instr. Meth. A. 2023. V. 1052. P. 168263.
2. Rafiei R., Hinde D. J., Dasgupta M., Weisser D. C., Muirhead A. G., Harding A. B., Cooper A. K., Wallace H. J., Lobanov N. R., Wakhle A., Brown M. L., Lin C. J., Horsley A. J., du Rietz R., Luong D. H., Evers M. // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 631, No. 1. P. 12–21.
3. Тетерев Ю. Г., Крылов А. И., Исатов А. Т., Митрофанов С. В. // ПТЭ. 2020. № 3. С. 50–55.
4. Lisov V. I., Gulbekyan G. G., Bashevoy V. V., Eremin A. V., Ivanov G. N., Kalagin I. V., Kazacha V. I., Kazarinov N. Yu., Osipov N. F., Utenkov V. K. // Proc. RUPAC2018. Protvino, Russia, 2018. P. 272–275.
5. SMARTBOX-6: модульная система ввода/вывода. ОИЯИ. <http://smartbox.jinr.ru/smartbox6.php?select=2103#ii162>.
6. Bogomolov S. L., Gulbekyan G. G., Skuratov V. A., Kalagin I. V., Mitrofanov S. V., Teterев Yu. G., Fomichev A. S., Anashin V. S. // 15th Eur. Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, Russia, 2015; <https://doi.org/10.1109/RADECS.2015.7365618>.

Получено 21 января 2025 г.