

P13-2009-184

Р. А. Астабатьян^{1,2,*}, С. М. Лукьянов², Э. Р. Маркарян^{1,2},
В. А. Маслов², Ю. Э. Пенионжкевич², Р. В. Ревенко²,
В. И. Смирнов²

ПРОФИЛОМЕТР ВТОРИЧНЫХ ПУЧКОВ
НА ОСНОВЕ МНОГОПРОВОЛОЧНОЙ
ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Ереванский физический институт, Ереван

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

*E-mail: jacob_asa@mail.ru

Астабатьян Р. А. и др.

P13-2009-184

Профилومتر вторичных пучков
на основе многопроволочной пропорциональной камеры

Описан профилومتر для диагностики вторичных пучков ионов с $Z \geq 2$. Проведено сравнение двух методов измерения профиля пучков таким профилометром: счетного, когда регистрируются импульсы от каждой частицы, и токового с поканальным измерением интегрального тока. Проведены сравнение и оценка счетных характеристик и сроков времени службы профилометра для двух методов измерения профиля пучка.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Astabatyan R. A. et al.

P13-2009-184

Profilometer of the Secondary Beams Based
on the Multiwire Proportional Chamber

Profilometer for diagnostics of secondary beams of ions with $Z \geq 2$ is described. Two methods of beam profile measurement are considered: counting method when impulses are registered event by event, and current mode with measurement of integrated current of each channel. Comparison and an estimation of counting ability and life time of profilometer for two modes were carried out.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

ВВЕДЕНИЕ

Многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) были впервые предложены более 40 лет назад [1]. В настоящее время они находят широкое применение в качестве позиционно-чувствительных детекторов в экспериментальных установках как для регистрации продуктов реакций, так и для вывода и диагностики вторичных пучков, в том числе вторичных пучков радиоактивных ядер, где из-за их низкой интенсивности затруднено использование стандартных методов измерения интенсивности по току. Разнообразие существующих модификаций МПК не имеет аналогов по сравнению с другими широко распространенными детектирующими устройствами (например, сцинтилляционными годоскопами, стриповыми полупроводниками) в экспериментальной физике частиц. Это связано с относительной простотой их изготовления и использования, возможностью изготовления МПК большой площади и, соответственно, их низкой ценой. Основные варианты МПК, используемые в настоящее время, следующие:

- камеры с обычным анодным считыванием,
- гибридные и дрейфовые камеры [2],
- стриповые камеры с катодным считыванием [3],
- строу-камеры [4],
- плоскопараллельные лавинные счетчики [5],
- камеры, работающие при атмосферном давлении с содержанием двух и более компонент газовой смеси на основе Ne, Ar, Kr, Xe с добавлением многоатомных газов,
- камеры низкого давления.

Простота конструкции, мобильность рабочего вещества — газа — позволяют легко реализовывать их различные модификации для каждой конкретной экспериментальной задачи. По своим счетным характеристикам — временное разрешение $10 \div 20$ нс; размер независимой ячейки (pixel) до 1×1 мм; быстроедействие до $10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мм}^{-2}$ — МПК занимают промежуточное положение между сцинтилляционными годоскопами и полупроводниковыми стриповыми детекторами: они обладают большим быстроедействием по сравнению с последними и лучшим пространственным разрешением по

сравнению со сцинтилляционными годоскопами. МПК существенно превосходят указанные выше твердотельные детекторы по радиационной стойкости из-за периодического или постоянного обновления рабочего вещества — газового наполнения, а также малого количества вещества (до 1 мг/см^2) для камер низкого давления. Все указанные преимущества, счетные и эксплуатационные, весьма важны при использовании МПК в качестве диагностических детекторов (профилметров) на вторичных ионных пучках.

Между тем счетные характеристики МПК ограничены величиной $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$ для обычных размеров пучка $\sim 1 \text{ см}^2$, в то время как чувствительность широко практикуемых пучковых профилметров и мониторов — цилиндров Фарадея и мониторов вторичной эмиссии — едва ли позволяет надежно диагностировать пучки с интенсивностью $\leq 10^8 \text{ с}^{-1}$. Использование МПК в качестве профилметра в интегральном токовом режиме позволяет перекрыть этот проблемный диапазон интенсивностей ($10^6 - 10^9 \text{ с}^{-1}$). В области низких интенсивностей ($\leq 10^6 \text{ с}^{-1}$) диагностика и мониторинг пучков легко реализуются МПК в счетном режиме; при большей интенсивности (до 10^9 с^{-1}) возможно использовать токовый режим МПК. Ниже описываются характеристики МПК, созданные в Лаборатории ядерных реакций для диагностики вторичных пучков радиоактивных ядер с интенсивностью до 10^8 с^{-1} .

ПРОФИЛОМЕТР В СЧЕТНОМ РЕЖИМЕ

На вторичных пучках U-400M и радиоактивных пучках ускорительного комплекса DRIBs ЛЯР ОИЯИ нами были созданы и в настоящее время эффективно используются диагностические камеры разных модификаций [6]. Схематическое изображение единичного модуля камеры представлено на рис. 1:

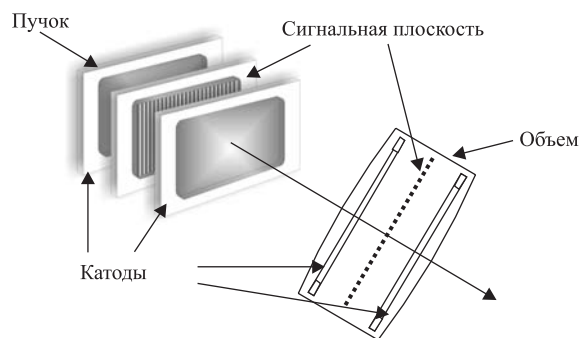


Рис. 1. Единичный модуль диагностической камеры

два катода из алюминизированного майлара или тонкой алюминиевой фольги, между ними проволочный сигнальный электрод с шагом между нитями 1 или 2 мм, диаметром сигнальных нитей 10, 20, 30 мкм, с варьируемым межэлектродным расстоянием $3 \div 6$ мм. Газовое наполнение $Ag + CH_4$ или $Ag +$ изобутан, или чистый изобутан при давлении от 5 торр до атмосферного давления.

На рис. 2 изображена такая диагностическая камера, состоящая из X, Y независимых модулей, собранных в единый вакуумный объем, установленный на пневмоприводе. Входное и выходное окна камеры — каптоновые пленки толщиной 8 мкм, выдерживающие перепад давления в 1 атмосферу. Камера работает при стационарном режиме наполнения рабочим газом, без постоянного продува. Сигналы с каждой проволоки поступают на вход быстрого токового предусилителя ($\tau_{rise} = \tau_{tail} = 8$ нс, $k = 70$ мВ/мкА), далее после формирования кодируются, считываются и отображаются на дисплее РС в режиме реального времени.



Рис. 2. Двухкоординатная диагностическая камера: 1 — предусилители; 2 — МПК

На рис. 3 представлен профиль пучка ${}^6\text{He}$ на канале DRIBs, сформированного и непрерывно контролируемого с помощью диагностической камеры [7]. Здесь и далее геометрические размеры пучка составляли $(10 \div 15) \times (10 \div 15)$ мм (ширина на полувысоте). Запускающим триггером служил сигнал быстрого X_i или Y_i от одной или обеих плоскостей камеры.

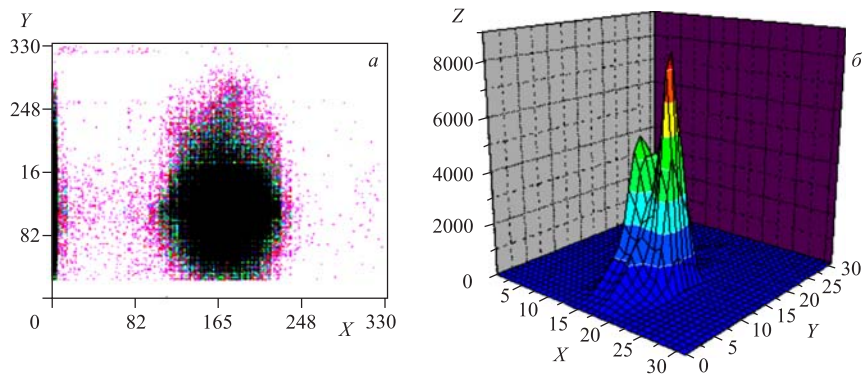


Рис. 3. Спектры ${}^6\text{He}$ при интенсивности $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$: а) двухмерный; б) трехмерный

Камера работала при стационарном режиме наполнения рабочим газом, изобутаном, при давлении $P = 400$ торр. В течение 10 сут непрерывного контроля и мониторингования пучка ${}^6\text{He}$ с интенсивностью до 10^6 с^{-1} не наблюдалось ухудшения основных, счетных и временных, характеристик камеры. Однако вопросы быстродействия (загрузочной способности) и срока службы МПК в качестве диагностических детекторов для вторичных пучков требуют дополнительного рассмотрения, так как они остаются актуальными до сих пор.

СЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОФИЛОМЕТРА

На приведенных спектрах рис. 3 уже при интенсивности $5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ наблюдались просчеты — наличие нулевых событий по X -координате при запуске от быстрого «или» Y -координаты. На трехмерном спектре эти просчеты наблюдаются в виде провала в пикселях, на которые падает максимум интенсивности пучка.

Быстродействие МПК ограничивается процессами экранирования положительными ионами электростатических полей, создающих лавинное умножение первичных электронов. Эффект от экранирования зависит от коэффициента газового усиления и скорости дрейфа ионов в областях лавинного умножения зарядов. Отметим, что быстродействие МПК как пучкового диагностического детектора не зависит от ионизационных потерь частиц в детекторе, так как выбором соответствующего коэффициента умножения зарядов можно обеспечить оптимальный и одинаковый интегральный вторичный заряд, необходимый для эффективной регистрации частиц независимо от (Z, A, E) . В то же время при использовании МПК для регистрации продуктов реакций в экспериментах обычно возникает необходимость одновременной регистрации разных по ионизирующей способности частиц и, как показано в [8], это обстоятельство существенно может ограничивать быстродействие МПК. В случае использования МПК как диагностической камеры и при регистрации моноизотопного пучка, номинальное значение его обычно составляет величину $\sim 10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мм}^{-2}$ при нормальном давлении, и это значение можно увеличить в несколько раз подбором режимов работы, газового наполнения и давления.

Из измеренных спектров, полученных при разных интенсивностях, восстанавливались средние значения эффективности регистрации профилометра (нижняя кривая рис. 4) в зависимости от абсолютной интенсивности пучка. Причем просчеты, подобные приведенным на рис. 3, восстанавливались нормированием их по неискаженным спектрам, набранным с интенсивностью 10^4 – 10^6 с^{-1} .

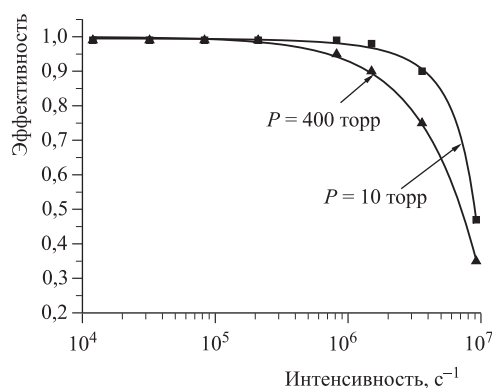


Рис. 4. Зависимость эффективности регистрации от интенсивности пучка в счетном режиме

Оптимизация конструкции камеры, переход на камеры низкого давления с двухступенчатым механизмом размножения зарядов позволили увеличить быстродействие камеры в несколько раз. На верхней кривой рис.4 представлена зависимость эффективности регистрации от интенсивности пучка в счетном режиме в случае такой оптимизации при газовом наполнении чистым изобутаном и давлении 10 торр. Дальнейшее увеличение быстродействия связано с возможностью использования еще более низких давлений (больших напряженностей, обеспечивающих большие скорости дрейфа ионов [9]) и уменьшением количества умноженных зарядов в камере. Однако это приводит к ухудшению отношения сигнал/шум и в итоге не позволяет выделять сигнал от единичной частицы на уровне шумов предусилителя.

ПРОФИЛОМЕТР В ИНТЕГРАЛЬНОМ ТОКОВОМ РЕЖИМЕ

Альтернативой счетному режиму регистрации каждой частицы пучка является интегральный режим счета числа частиц — измерения интегрального тока, при котором ведется суммирование сигналов. Такие измерения проводились нами одновременно с измерениями в счетном режиме. На рис. 5, а представлена зависимость интегрального тока, просуммированного по всем нитям от интенсивности пучка в счетном режиме, соответствующая рис. 4 при давлении 10 торр. Эта зависимость, как и ожидалось, оказалась нелинейной. Однако метод измерения интегрального тока позволяет осуществить переход в режим меньших газовых усилений, когда еще не сказывается существенно эффект экранирования электростатических полей вторично размноженными ионами. На рис. 5, б представлена такая зависимость, измеренная в токовом

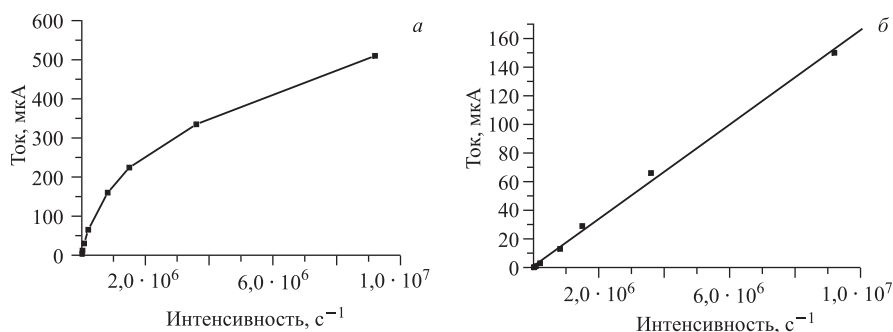


Рис. 5. Зависимость интегрального тока от интенсивности пучка: а) в счетном режиме; б) в токовом режиме

режиме. Видно, что эта зависимость уже линейная, что наглядно демонстрирует возможность улучшения характеристик диагностической камеры. Необходимо отметить, что зависимость, приведенная на рис. 5, б, получена в режиме малого газового усиления (несколько десятков), не позволяющего работать в счетном режиме с выделением сигнала от каждой частицы пучка. Очевидно, что при практической реализации диагностической камеры как профилометра для приведенного на рис. 5, б токового режима необходимо измерять интегральные токи от каждой нити МПК.

Для измерения профиля пучка в токовом режиме использовался специально разработанный для этой цели АЦП постоянного тока с мультиплексором. На рис. 6 представлена блок-схема такого мультиплексора, позволяющего последовательным переключением коммутатора измерять токи со всех сигнальных нитей.

На рис. 7 показан одномерный профиль α -частиц в счетном режиме и в режиме измерения интегральных токов с каждой проволоочки. Необходимо отметить тот факт, что эти два режима измерения профиля пучка существенно отличаются по коэффициенту размножения зарядов. Для счетного режима характерно сочетание высоких скоростей сбора вторичных ионов с большим коэффициентом газового умножения для формирования и регистрации сигналов от каждой частицы независимо от интенсивности пучка. Для токового же режима измеряемым параметром — откликом является величина интегрального тока — производная и от коэффициента размножения зарядов, и от интенсивности пучка.

В то же время сравнение профилей пучка на рис. 7 от α -частиц в двух указанных режимах свидетельствует об их идентичности. Более того, токовый режим измерения профиля пучка представляется более точным из-за двух факторов: более точного учета веса распределения зарядов (первичного — от

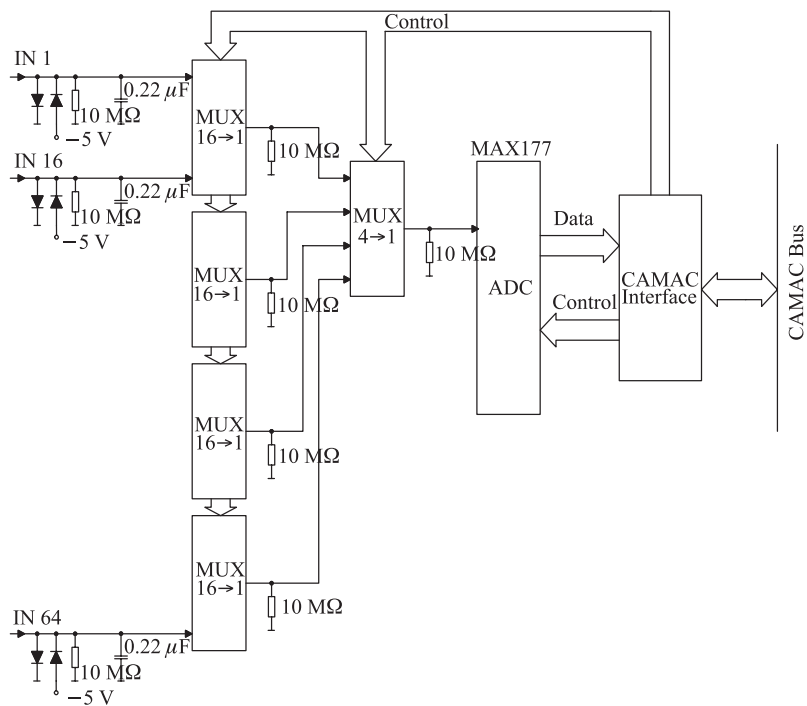


Рис. 6. Схема мультиплексора

геометрии и вторичного — от локализации лавины) на соседние сигнальные нити, а также одновременного попадания (в пределах микробанча) частиц в детектор, что существенно уже при интенсивностях 10^7 с^{-1} и более.

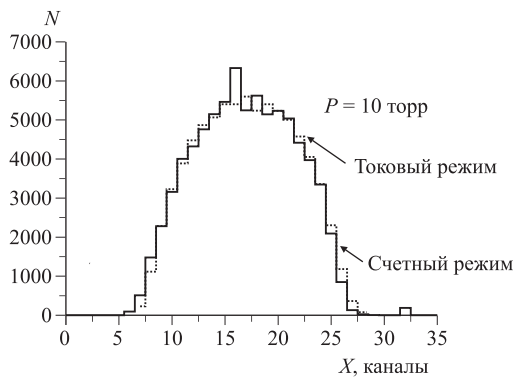


Рис. 7. Сравнение спектров в счетном (сплошная линия) и токовом режимах

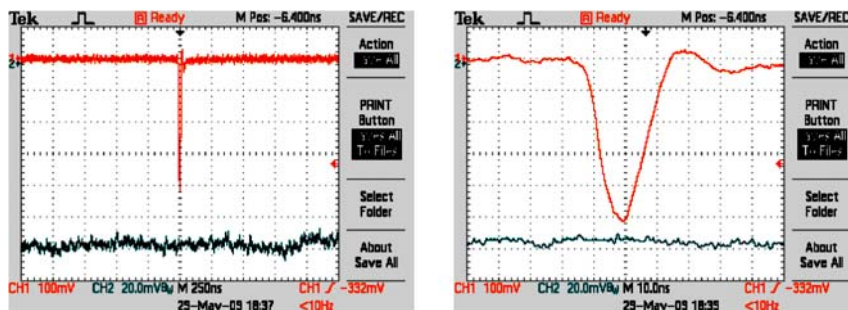


Рис. 8. Осциллограммы импульсного и токового сигналов для двух временных экспозиций

Для наглядной оценки чувствительности токового режима и сравнения его со счетным на рис. 8 представлены осциллограммы импульсного (верхняя осциллограмма — счетный режим) и токового (нижняя осциллограмма) сигналов для двух временных экспозиций. Интенсивность α -частиц при этом составляла $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ на единичный канал. Из рисунка можно оценить порог чувствительности для токового режима: $N_{\text{пор}} = (U_{\text{шум}}/U_{\text{сиг}}) \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \approx 0,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}/\text{канал}$.

МАКСИМАЛЬНОЕ ВРЕМЯ ЭКСПОЗИЦИИ — СРОК СЛУЖБЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ

Срок службы диагностической камеры мы оцениваем по эквивалентной величине максимально допустимого интегрального потока частиц, проходящих через диагностическую камеру. Эта величина определяется двумя составляющими:

- радиационной стойкостью детектора — входного и выходного окон и катодов,
- разрушениями катодов, обусловленными процессами умножения и сбора вторичных ионов.

Очевидно, что вторая составляющая срока службы МПК, в отличие от радиационной, не зависит от общего времени экспозиции профилометра, а определяется абсолютным интегральным потоком регистрируемого пучка.

Радиационные процессы не приводят к каким-либо заметным повреждениям профилометра при интегральных потоках частиц, существенно превосходящих срок службы, обусловленный процессами умножения зарядов. Поэтому рассмотрим только вторую — основную составляющую срока службы диагностической камеры. Очевидно, эта величина не зависит ни от (Z, A, E)

частиц пучка и их ионизирующей способности, ни от давления газа, а только от необходимого количества вторичных зарядов, достаточных для формирования и регистрации сигнала. Следственным фактором, определяющим срок службы детектора, является повреждение катодов из-за их бомбардировки вторичными ионами.

На рис. 9 изображен один из катодов после 15-суточного экспонирования диагностической камеры на пучке ${}^6\text{He}$ при интегральном потоке $\sim 10^{12}$. Как видно из фотографии, на катоде просматриваются разрушения проводящего слоя, вызванные сбором и бомбардировкой вторичных ионов, — повреждения с периодом, повторяющим периодическую структуру проволочек. Очевидно, что такая структура уже не обеспечивает однородного размножения и сбора зарядов по всей поверхности камеры. Диагностическая камера при этом работала в счетном режиме.

Приведенная величина $\sim 10^{12}$ суммарного потока является предельной для катодов, составленных из алюминизированного майлара. Замена алюминизированных майларовых катодов на эквивалентные по количеству вещества однородные алюминиевые фольги толщиной 1,5 мкм позволяет увеличить срок службы катодов, по крайней мере в 2–5 раз, пока такая же, образующаяся, как на рис. 9, структура, может стать непроводящей. Вторым и более эффективным фактором увеличения времени экспозиции МПК является радикальное уменьшение интегрального потока умноженного заряда в камере переходом на токовый интегральный метод измерения профиля пучка. Это увеличение равно отношению коэффициентов газового умножения в интегральном и счетном режимах регистрации. Последнее отношение оценивается величиной в 100 и более раз. Исходя из приведенных факторов, можно оценить срок службы диагностической камеры в токовом режиме величиной 10^{14} – 10^{15} потока частиц.

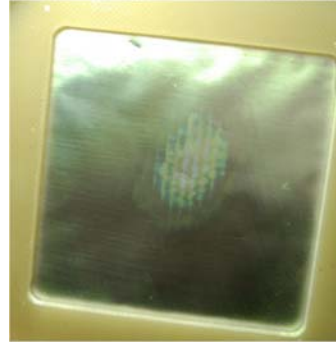


Рис. 9. Вид катода после непрерывного 15-суточного экспонирования на пучке

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА ПУЧКЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ В ТОКОВОМ РЕЖИМЕ

На основании вышеприведенных факторов нами выбран оптимизированный вариант диагностической камеры в токовом режиме измерения профиля пучка. Конструктивно двухкоординатная (X, Y) камера была составлена из

двух единичных модулей — катодов, состоящих из 1,5 мкм фольг, разделенных сигнальными плоскостями с 10 мкм нитями с шагом 1 мм, межэлектродными расстояниями 3,7 мм. Рабочий газ — изобутан — при давлении единицы торр. Чувствительная площадь камеры $32 \times 32 \text{ мм}^2$, входное и выходное окна — каптон толщиной 8 мкм. Испытания проведены на пучке ионов Хе ускорителя ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ с энергией ионов 1,26 МэВ/нуклон [10].

Для получения количественных измерений профиля пучка по интегральному току были проведены двухэтапные калибровочные измерения: на начальном этапе измерения профиля пучка в счетном режиме с абсолютным измерением интенсивности пучка; далее на втором этапе переход в режим измерения интегрального тока при опорном абсолютном значении интенсивности, полученной в счетном режиме. Затем поэтапным введением ослабителя интенсивности (так называемым *repper pot*) необходимо последовательно, пошагово увеличивать интенсивность в режиме измерения интегрального тока. Отметим, что для точных количественных измерений интенсивности пучка такую калибровку с привязкой к абсолютному значению интенсивности в счетном режиме необходимо проводить для каждого пучка (Z, A, E) иона, а точная калибровка возможна только при моноизотопном содержании пучка.

На рис. 10 приведена зависимость отклика (интеграла тока от всей плоскости) от интенсивности. Эта зависимость линейная и характеризует эффективность и возможности предложенной нами методики. Приведенное на рисунке максимальное значение интенсивности не является предельным для предложенной методики, и в дальнейшем предполагается цикл измерений с интенсивностями до 10^9 с^{-1} .

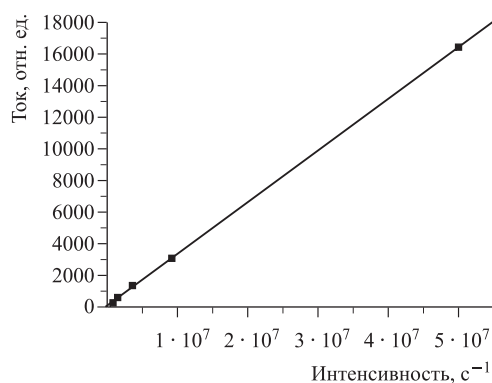


Рис. 10. Зависимость отклика (интеграла тока от всей плоскости) от интенсивности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная диагностическая камера на основе МПК для формирования выведенных пучков на ускорительном комплексе пучков радиоактивных ядер DRIBs и ускорителей тяжелых ионов может использоваться в качестве непрерывно экспонируемого мониторингового детектора на экспериментальных установках в процессе набора данных. В дополнение к счетному режиму метод интегрального измерения сигналов в МПК позволяет создавать профилометры для диагностики пучков в переходной области интенсивностей 10^6-10^9 с^{-1} . При низкой интенсивности диагностика и мониторинг пучков реализуются с помощью МПК в счетном режиме. При более высоких интенсивностях (10^6-10^9 с^{-1}) — в токовом режиме. Малое количество вещества предлагаемого детектора $\leq 0,5 \text{ мг/см}^2$ и относительно большое время экспозиции $\sim 10^{15}$ потока частиц позволяют также их использовать на экспериментальных установках для измерения профиля и мониторинга пучков на физической мишени. Метод токового интегрального измерения — аналоговый и предполагает тщательную настройку и калибровку МПК для каждого типа (Z, A, E) пучка при моноизотопном его составе.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 07-02-00251а и 09-02-91056 НЦНИИ. Авторы выражают благодарность персоналу ускорителей DRIBs и ИЦ-100 за содействие и сотрудничество.

ЛИТЕРАТУРА

1. Charpak G. *et al.* // NIM. 1968. V. 62. P. 262.
2. Charpak G., Rahm D., Steiner H. // NIM. 1970. V. 80. P. 13–34.
3. Breskin A. *et al.* // NIM. 1977. V. 143. P. 29.
4. Becker U. *et al.* // NIM. 1981. V. 180. P. 61.
5. Stelzer H. // NIM. 1976. V. 133. P. 409.
6. Astabatyanyan R. A. *et al.* JINR Preprint E13-2002-138. Dubna, 2002.
7. Penionzhkevich Yu. E. *et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2006. V. 3, No. 6. P. 38; Пенюнькевич Ю. Э. *и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 6(135). С. 38–46.
8. Asaturyan R. A. *et al.* // Instruments and Experimental Techniques. 1999. V. 42, No. 3. P. 342–346.
9. Breskin A. // NIM. 1982. V. 196. P. 11–21.
10. Гикал Б. Н. *и др.* Препринт ОИЯИ Р9-2007-20. Дубна, 2007.

Получено 27 ноября 2009 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 15.02.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 310 экз. Заказ № 56894.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/