

## ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

© 2011 г. Ю. Г. Тетерев, Г. А. Кононенко

*Объединенный институт ядерных исследований*

*Лаборатория ядерных реакций*

*Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

*E-mail: teterev@jinr.ru*

Поступила в редакцию 21.12.2010 г.

Описан пропорциональный счетчик, предназначенный для измерения потока тяжелых ионов. Рабочий газ счетчика – воздух. Счетчик представляет собой три параллельные рамки из стеклотекстолита, на которые намотаны проволочные электроды. На основе счетчиков разработано диагностическое устройство для измерения распределения плотности потока ускоренных ионов при тестировании радиоэлектронных изделий. Для исключения зависимости результатов измерений от погодных условий (атмосферного давления, температуры, влажности), а также от вида и энергии ионов применена методика автоматической коррекции. В процессе эксплуатации установлено, что счетчик имеет высокий радиационный ресурс, устойчивость к воздействию экстремальных нагрузок, достаточное быстродействие, до  $10^6$  ионов/с, не чувствителен ни к нейтронам, ни к  $\gamma$ -квантам, удобен в эксплуатации.

### ВВЕДЕНИЕ

Ускоренные тяжелые ионы находят широкое применение для решения различных прикладных задач. С их помощью проводятся исследования в области материаловедения, биологии, радиоэлектроники и т.п. В большинстве случаев при решении таких задач, особенно при изучении динамики какого-либо процесса, необходимо использовать пучки, в которых плотность потока ионов на изучаемый объект составляет от единиц до  $10^5$  ионов/(см<sup>2</sup> · с). Это могут быть ионы атома любого элемента, от Li до U, с энергией от 2–3 до десятков мегаэлектронвольт на нуклон. Для диагностики пучка, проводимой в счетном режиме, могут быть использованы детекторы ядерного излучения.

В данной работе описан пропорциональный счетчик, предназначенный для измерения потока тяжелых ионов.

### ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК

Рабочий газ счетчика – воздух. Счетчик представляет собой три параллельные рамки из стеклотекстолита толщиной 2 мм с круглым отверстием диаметром 20 мм внутри. На рамки с шагом 4 мм намотаны проволочные электроды: на среднюю – анодная вольфрамовая проволока толщиной 20 мкм, а на внешние – катодные танталовые проволоки толщиной 100 мкм. В этой конструкции каждая анодная проволочка окружена четырьмя катодными.

При постепенном повышении напряжения на аноде счетчика пропорциональный режим наступает при значении ~1200 В, далее амплитуда сигнала увеличивается примерно в 2 раза на каждые 100–130 В. При напряжении ~2300 В пропорциональный режим переходит в коронный.

В описываемой конструкции пропорционального счетчика расстояние между электродами составляет <3 мм, и сбор носителей зарядов обоих знаков происходит достаточно быстро. Для того чтобы повысить быстродействие пропорционального счетчика, можно отказаться от собирания положительных ионов, ограничившись полным собиранием электронов. На рис. 1а приведена осциллограмма импульса со счетчика при облучении его  $\alpha$ -частицами. Использован предусилитель с постоянной времени интегрирования 2 мкс. Видно, что длительность фронта, определяемая временем собирания электронов, составляет порядка 100 нс. При большой нагрузке счетчика ( $>10^6$  с<sup>-1</sup>) на осциллограмме в этом диапазоне времен “мертвого времени” не наблюдалось, импульсы накладывались друг на друга, но их амплитуда не снижалась (рис. 1б). Так как пропорциональный счетчик используется в счетном режиме, то сигналы далее укорачивались до значения полуширины импульса 0.5 мкс.

При создании установки для диагностики пучка на основе счетчиков с воздушным наполнением для исключения зависимости результатов измерений от погодных условий (атмосферного давления, температуры, влажности), а также от типа и

энергии ионов применена методика автоматической коррекции.

Методика заключается в том, что в точках контроля устанавливается не один, а два сопряженных счетчика, последовательно по ходу пучка. Ион, прошедший первый счетчик, попадет в следующий. Скорость счета первого счетчика  $n_1 = \varepsilon_1 n$ , где  $\varepsilon_1$  – эффективность регистрации ионов первым счетчиком, а  $n$  – поток ионов. Скорость счета второго счетчика  $n_2 = \varepsilon_2 n$ , где  $\varepsilon_2$  – эффективность регистрации ионов вторым счетчиком. Если при этом измерять скорость счета импульсов  $n_{12}$ , совпадающих во времени в первом и втором счетчике, то по теории вероятности  $n_{12} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 n$ . Используя эти три скорости счета, можно определить истинный поток ионов:

$$n = n_1 n_2 / n_{12} = \varepsilon_1 n \varepsilon_2 n / (\varepsilon_1 \varepsilon_2 n).$$

Каждый счетчик имеет свой измерительный тракт (предусилитель, усилитель, дискриминатор-формирователь и счетчик импульсов). Дискриминаторы-формирователи вырабатывают стандартные импульсы непродлевающегося типа длительностью 0.5 мкс с фронтом 20 нс.

Дополнительно пара сопряженных счетчиков обеспечена схемой совпадений и счетчиком числа совпадающих по времени импульсов. Истинный поток ионов ежесекундно рассчитывается с помощью Э.В.М.

### ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА ИОНОВ ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Установки для тестирования радиоэлектронных изделий созданы в мире на базе многих ускорителей тяжелых ионов, например [1]. Такие установки созданы и в ЛЯР ОИЯИ на базе ускорителей тяжелых ионов У-400 и У-400М. Облучение изделий по требованию пользователей проводится в вакууме. Другие основные требования, предъявленные пользователями к условиям облучения изделий, заключаются в следующем:

- однородный по плотности поток ионов на площади, большей, чем размер облучаемых изделий (150 × 130 мм), степень неоднородности не должна превышать ±15%;
- диапазон регулирования плотностей потока – от единиц до  $n \cdot 10^4$  ионов/(см<sup>2</sup> · с);
- диапазон атомов тяжелых ионов – от О до Vi;
- энергия ускоренных ионов 3–6 МэВ/нуклон.

Для контроля равномерности плотности облучения четыре сопряженные пары пропорциональных счетчиков устанавливаются по углам прямоугольной зоны облучения и одна – в центре, на пересечении диагоналей. Облучаемый объект не перекрывает поток ионов на счетчики, размещенные в углах, но может перекрывать поток на

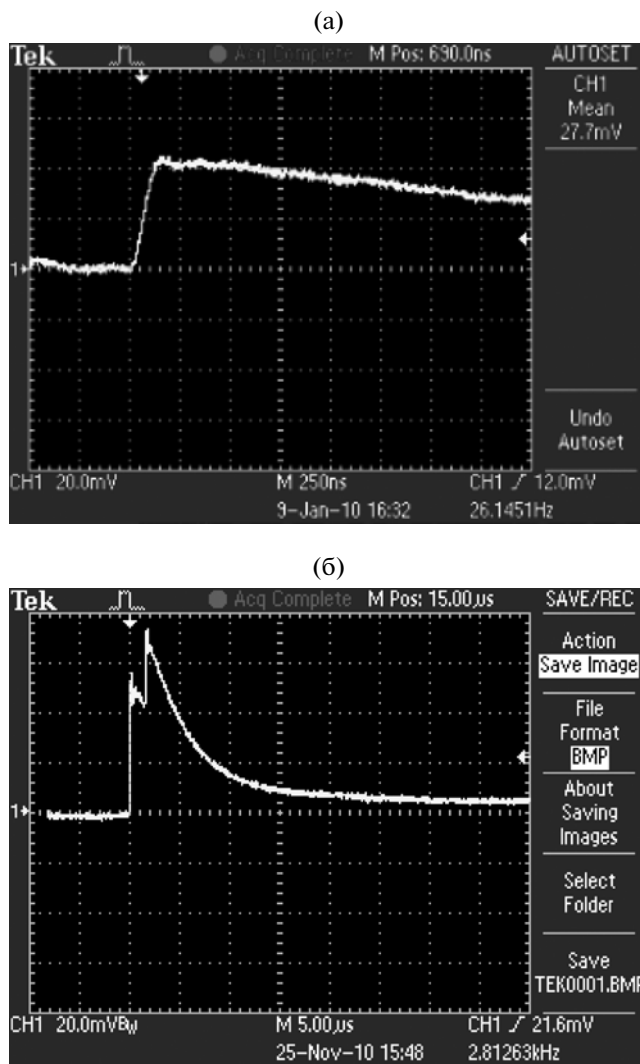
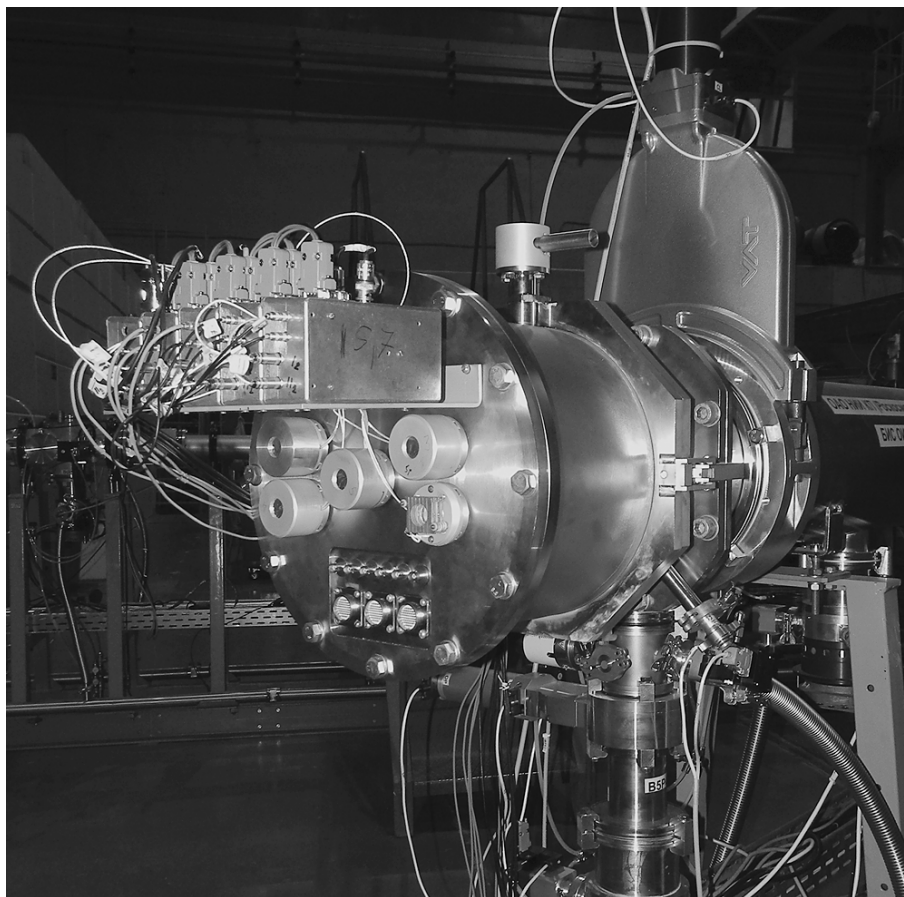


Рис. 1. Форма импульса с пропорционального счетчика: а – при регистрации α-частицы; б – при регистрации двух α-частиц, разнесенных по времени.

центральные счетчики. Последние, вкуче со счетчиками по углам, в основном служат для контроля однородности поля облучения во время настройки. Счетчики, размещенные в углах, служат для контроля и в процессе облучения. Кроме того, с их помощью измеряется набранный в процессе облучения интегральный поток ионов.

Счетчики расположены по ходу пучка на внешней (в воздушной среде) стенке бокса для облучения. В чувствительную область счетчиков контролируемые ионы проникают из вакуумного объема через проходные отверстия, заклеенные разделительной фольгой из алюминия толщиной 14 мкм. Толщина фольги выбрана из условия, чтобы ионы с энергией 3 МэВ/нуклон имели после прохождения через фольгу энергию, достаточную для дальнейшей однозначной регистрации этих ионов.



**Рис. 2.** Внешний вид установки для тестирования радиоэлектронных изделий с размещенными на ней счетчиками.

Для удобства принято, что площадь, через которую ионы попадают в сопряженную пару счетчиков, составляет  $1 \text{ см}^2$ , тогда измеренная скорость счета пропорциональна плотности потока ионов в единицах [ион/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ]. Чтобы снизить нагрузку атмосферного давления на тонкую фольгу, общая площадь  $1 \text{ см}^2$  разбита на семь закрытых фольгой проходных отверстий диаметром 4.3 мм. При такой конструкции можно не заботиться о счетчиках при откачке или напуске атмосферы в камеру облучения при ее вскрытии и смене тестируемого изделия и не беспокоиться о скорости изменения давления в камере. Внутренняя часть рамки в конструкции пропорционального счетчика в данном случае — отверстие диаметром 20 мм.

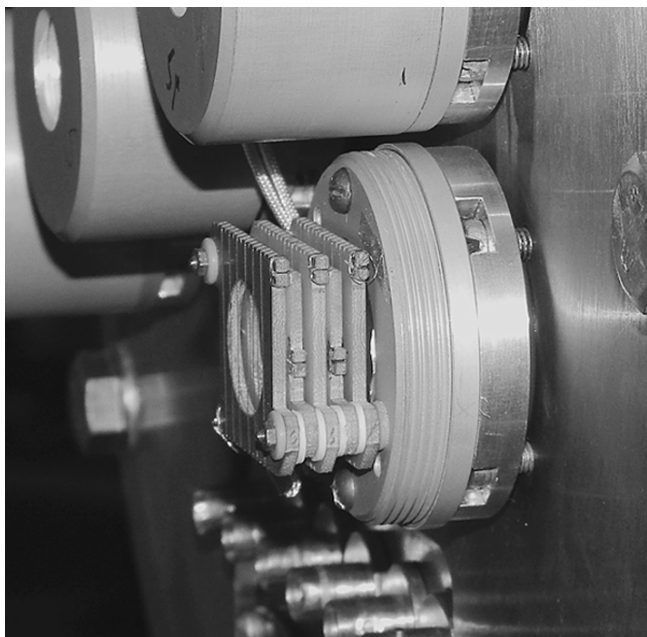
Создать поток ионов с требуемыми параметрами по однородности только с помощью фокусирующих и дефокусирующих магнитных элементов нереально, поэтому для его создания используют сканирование пучка, имеющего гауссово пространственное распределение, по горизонтали и вертикали. При таком способе обеспечения равномерности поля максимальная загрузка детекторов увеличивается не менее чем в 10 раз относительно средней. Временные свойства про-

порциональных счетчиков вполне удовлетворяют этим повышенным требованиям к быстродействию.

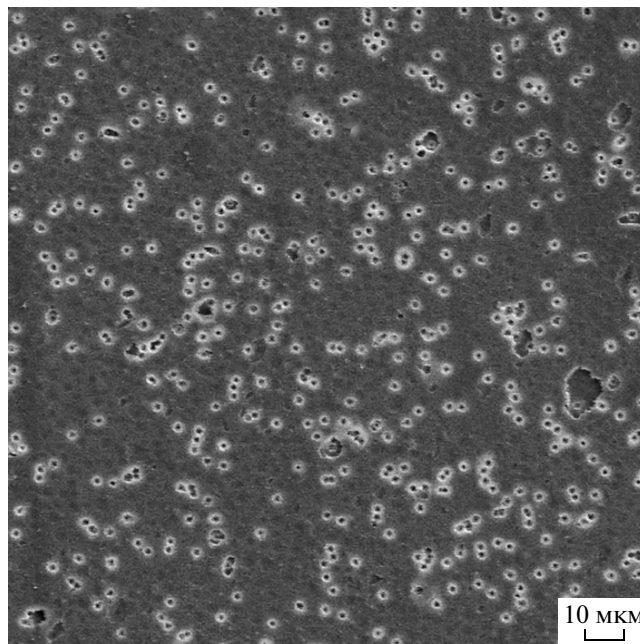
Внешний вид установки для тестирования радиоэлектронных изделий с размещенными на ней счетчиками и предусилителями приведен на рис. 2. Разъемы, которые видны под счетчиками, предназначены для подключения тестируемых изделий. С одной из пар сопряженных счетчиков снята защитная крышка. Вид этой пары в более крупном масштабе показан на рис. 3.

Система для измерения потока пучка ионов оснащена компьютерной программой, с помощью которой рассчитывают интенсивность счета каждой пары сопряженных счетчиков и набранный в процессе облучения интегральный поток ионов. Весь процесс облучения записывается в отдельный файл, что позволяет восстанавливать и отслеживать каждый этап облучения.

На данной стадии эксплуатации установки ведется двойной контроль интегрального потока ионов на исследуемое изделие. С помощью пропорциональных счетчиков проводится оперативный контроль интенсивности потока ионов и в процессе облучения измеряется набранный инте-



**Рис. 3.** Сопряженная пара пропорциональных счетчиков с воздушным наполнением.



**Рис. 4.** Изображение трекового детектора после экспозиции  $10^6$  ионов/см<sup>2</sup> и последующего химического травления.

гральный поток. Одновременно с этим измеряется поток ионов с помощью трековых детекторов [2], которые наклеиваются непосредственно на подложку исследуемого изделия, слева и справа. Двойной контроль позволил подобрать оптимальные параметры работы пропорциональных счетчиков и оценить эффективность их работы за четырехмесячный период эксплуатации.

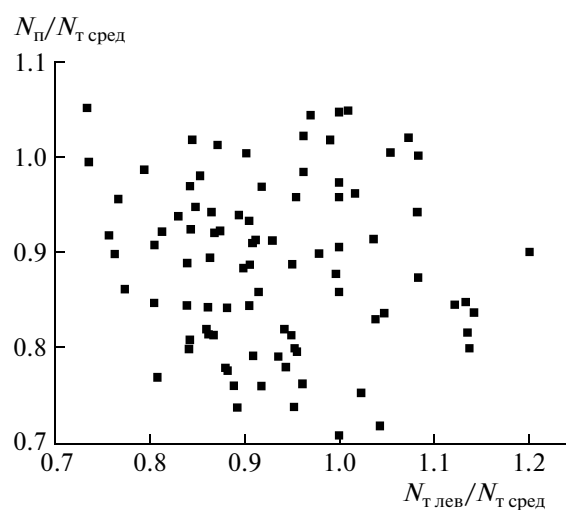
На рис. 4 в качестве примера приведена фотография, сделанная с помощью электронного микроскопа, на которой демонстрируется трековый детектор после химического травления. Экспозиция составляла  $\sim 10^6$  ионов/см<sup>2</sup>. Согласно методике [2], поток ионов определяется как среднее значение измеренных в нескольких областях плоскости детектора плотностей треков. Время от окончания экспозиции до получения результата занимает час-полтора.

В соответствии с расписанием работы ускорителя было сделано два захода — зимой и летом. При этом один месяц лета был довольно прохладным и дождливым, а другой — аномально жарким, когда температура в экспериментальном зале превышала 40°C. Несмотря на то что воздушная атмосфера, в которой работали детекторы за время проведения облучений, сильно менялась, это не повлияло на точность измерений.

В процессе тестирования радиоэлектронных изделий проводилось облучение ионами атомов O, Ne, Ar, Fe, Kr, Xe и Bi. В соответствии с программой экспериментов интенсивность потока ионов варьировалась от единиц до  $2 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>. Для

этих атомов в данном диапазоне интенсивностей наблюдалось линейное соответствие интегрального потока, измеренного с помощью трековых детекторов, и измерений, сделанных с помощью пропорциональных счетчиков.

На рис. 5 в качестве иллюстрации приведены данные, полученные при облучении ионами железа. Плотность потока ионов на изделие варь-



**Рис. 5.** Соответствие измерений потока ионов  $N_{п}$ , сделанных с помощью пропорциональных счетчиков, результатам измерений  $N_{т}$  с помощью трековых детекторов.

рвалась как от экспозиции к экспозиции, так и в процессе одной экспозиции.

По оси ординат отложено отношение потока  $N_n$  ионов, попавших на облучаемый объект, при измерении пропорциональными счетчиками, к потоку  $N_t$ , измеренному твердотельными трековыми детекторами. Под потоком ионов подразумевается среднее значение по результатам измерений с помощью четырех пропорциональных счетчиков, расположенных по углам, или двух трековых соответственно. По оси абсцисс отложено отношение потока ионов, зарегистрированного трековым детектором, расположенным слева  $N_{т\text{лев}}$ , к среднему потоку  $N_{т\text{сред}}$ . Эта величина характеризует степень неоднородности пучка. Хотя надо учитывать, что точность измерения с помощью трековых детекторов составляет  $\pm 15\%$ .

Анализ приведенных данных показал, что результаты измерения потока ионов с помощью пропорциональных счетчиков занижены в среднем в 0.88 раза по отношению к результатам измерения с помощью трековых. Занижение, скорее всего, связано с тем, что на облучаемый объект попадают все ионы, в том числе и рассеянные на стенках системы транспорта, а в пропорциональные счетчики из-за коллимации в проходных отверстиях — только ионы пучка. То есть в результаты измерений с помощью пропорциональных счетчиков внесена систематическая ошибка, на которую необходимо делать поправку.

Из положительных качеств пропорциональных счетчиков стоит отметить стабильность их характеристик за все время облучения.

Другим их достоинством является устойчивость к воздействию экстремальных загрузок. При настройке пучка скорость счета со счетчиков достигала  $10^6 \text{ с}^{-1}$ , после чего не увеличивалась, вероятно, из-за ограниченной скорости электронных счетчиков импульсов. Какова же была реальная загрузка — трудно сказать даже приблизительно. Но и после таких режимов счетчики оставались работоспособными в требуемом диапазоне ин-

тенсивностей. Для сцинтилляционных или полупроводниковых счетчиков такой режим был бы губительным.

Примерный интеграл потока ионов через один счетчик за все время работы составил  $10^{11} - 10^{12}$ .

Перекрытие пучка ионов непосредственно перед счетчиками показало, что они не чувствительны ни к нейтронам, ни к  $\gamma$ -квантам, сопутствующим процессу облучения, даже на той установке, которая расположена вблизи ускорителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение пропорциональных счетчиков с воздушным наполнением для измерения распределения плотности потока ускоренных ионов при тестировании радиоэлектронных изделий показало, что счетчики имеют высокий радиационный ресурс, достаточное для данной задачи быстроедействие, устойчивость к воздействию экстремальных загрузок. Счетчики не чувствительны ни к нейтронам, ни к  $\gamma$ -квантам и удобны в эксплуатации.

Авторы благодарны сотрудникам ЛЯР ОИЯИ О.М. Иванову, Н.С. Кирилкину, В.Г. Шмаровозу, участвовавшим в тестировании радиоэлектронных изделий и оперативно предоставлявшим подробную информацию о работе пропорциональных счетчиков, что позволило подобрать оптимальный режим их работы.

Авторы благодарны сотруднику ЛЯР ОИЯИ В.А. Скуратову за помощь при обсуждении результатов по подбору оптимального режима работы пропорциональных счетчиков, а также за ценные замечания, сделанные при написании статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://cyclotron.tamu.edu/ref/beams.php>
2. Митрофанов А.В., Апель П.Ю., Блонская И.В., Орелович О.Л. // ЖТФ. 2006. Т. 6. Вып. 9. С. 121.