ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2021, том 85, № 5, с. 650–654

УДК 539.1.074+621.373.5

СИСТЕМА НИЗКОПОРОГОВЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЛЯ МОНИТОРИНГА В ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

© 2021 г. С. И. Поташев[1, *], С. В. Акулиничев[1], Ю. М. Бурмистров[1], А. И. Драчев[1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
"Институт ядерных исследований Российской академии наук", Москва, Россия

*E-mail: potashev@inr.ru

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.
После доработки 28.12.2020 г.
Принята к публикации 27.01.2021 г.

Создана система из двух низкопороговых воздушных ионизационных камер толщиной 3 мг · см$^{-2}$. Система включает новую двухзазорную камеру чувствительной площадью 113 см^2 с зазорами между электродами 1 мм, изготовленные из полиимидных пленок толщиной 3 мкм и многоканальную камеру. Исследуется вклад рекомбинации и вклады в дозу протонов низкой энергии и δ-электронов. Общая доза облучения системы составила 5 Мрад.

DOI: 10.31857/S0367676521050173

ВВЕДЕНИЕ

Качественный контроль всех параметров пучка является обязательной и важнейшей частью планирования облучения в канале адронной терапии [1]. Кроме того, необходимо точно измерять параметры заряженного пучка адронов для проведения большинства экспериментов на ускорителях. В частности, необходимо с высокой точностью определять ионизационные потери не хуже 5% и вклад различных типов излучения и частиц в эту величину до и во время облучения. Ионизационные камеры широко используются в системах контроля заряженных пучков и в радиотерапевтической дозиметрии [2, 3].

Ранее были предприняты попытки использовать другие приборы для измерения ионизационных потерь, однако все они имеют существенные недостатки. Например, гибрид ионизационной камеры и сцинтилляционного экрана, просматриваемый телекамерой, не позволяет достоверно определить максимум ионизационных потерь в зависимости от глубины в пике Брэгга [4], для которого соотношение между максимумом и минимумом не удается получить лучше 1.2 : 1. В тоже время, измеренное ионизационной камерой и кремниевым детектором это соотношение составляет около 2 : 1 [5]. Это связано с тем, что данный гибридный детектор неверно измеряет зависимость ионизационных потерь от глубины в водноэквивалентном фантоме.

Полупроводниковые детекторы на основе алмаза обладают достаточной радиационной стойкостью и даже позволяют регистрировать сигнал от отдельных частиц, но они имеют небольшие размеры и очень дорогие [6]. Использование камер, заполненных газовой смесью, требует наличия сложной системы смешения и продувки газа. Это вызывает дополнительные трудности [7]. Поэтому использование атмосферного воздуха в качестве рабочего вещества остается перспективным для камер с зазором между электродами не более 2 мм с малым вкладом рекомбинации ионов [8]. Любое вещество, помещенное перед пациентом, изменяет состав, размеры и энергию пучка и приводит к нежелательному облучению пациента вторичными частицами и наведенной активностью. Следовательно, общая толщина окон и электродов должна быть минимизирована. Ранее нами была разработана многоканальная ионизационная камера с толщиной в пучке 0.4 мг · см$^{-2}$ [5].

Однако для получения характеристик ионизационных детекторов и полной информации о свойствах заряженного пучка необходимо было выполнить эксперименты с использованием нескольких независимых ионизационных камер с различным чувствительным зазором [5, 9]. Для этого была создана тонкостенная узкозазорная воздушная ионизационная камера со следующими основными свойствами:

– величина зазора между анодом и катодом должна быть 1 мм;

– полная толщина анода, катодов и чувствительного воздуха не должна превышать 3 мг · см$^{-2}$;

– протоны с энергиями ниже пика Брэгга должны проникать через анод, разделяющий два воздушных чувствительных зазора.

КОНСТРУКЦИЯ УЗКОЗАЗОРНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

Узкозазорная ионизационная камера представлена на рис. 1. Она состоит из двух сигнальных катодов *1* и *5*, между которыми размещен высоковольтный анод *3*. Катоды и анод представляют собой полиимидные пленки толщиной 3 мкм, покрытые тонким слоем меди и золота, которая туго натянута на кольцах *2*, *4* и *6* из нержавеющей стали. Полиимид обладает высокой прочностью и малым удлинением при растяжении и обеспечивает постоянство свойств камеры в падающем протонном пучке с высокой интенсивностью. Первый катод и анод последовательно устанавливаются в пазы нижнего изолятора *7*. Второй катод устанавливают в паз верхнего изолятора *8*. Изолирующие прокладки *9* и *10* применяются для предотвращения электрического пробоя. Вся сборка детектора помещена в металлический корпус *11*. Катоды одновременно являются входным и выходным окнами камеры. Камера обеспечивает измерение суммарных ионизационных потерь в двух воздушных зазорах. Толщина деталей и некоторые другие геометрические размеры камеры представлены в табл. 1.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ В ВОЗДУШНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЕ

Ионизационная камера интегрирует заряд ионизации, образованный заряженными частицами во время сброса пучка ускорителя. Величина заряда в макроимпульсе пучка, форма гало и пространственное распределение плотности заряда в пучке меняются во времени. Система ионизационных камер обеспечивает непрерывное измерение как полной ионизации, так и ее пространственного распределения для каждого макроимпульса. В частности, необходимо контролировать накопление дозы в различных частях тела человека и оценивать величину суммарного вредного радиационного воздействия низкоэнергетических частиц для терапевтического пучка. Влияние вещества камеры и рекомбинация образовавшихся ионных пар в зазоре между электродами искажает результаты измерения. Коэффициент объемной рекомбинации ионов в воздухе зазора камеры можно оценить по формуле, приведенной в [3, 10]:

$$f = 2\frac{(-1+\sqrt{1+b}}{h}, \quad \text{где}: \; b = \frac{2\alpha q d^2}{3ek_1k_2E^2}, \qquad (1)$$

плотность ионизации, образованная в камере за секунду, находим по формуле

$$q = I\frac{\rho}{W}\frac{dE}{dx}\frac{d}{S}, \quad \text{где}: \; I = \hat{I}\frac{T}{\tau}, \qquad (2)$$

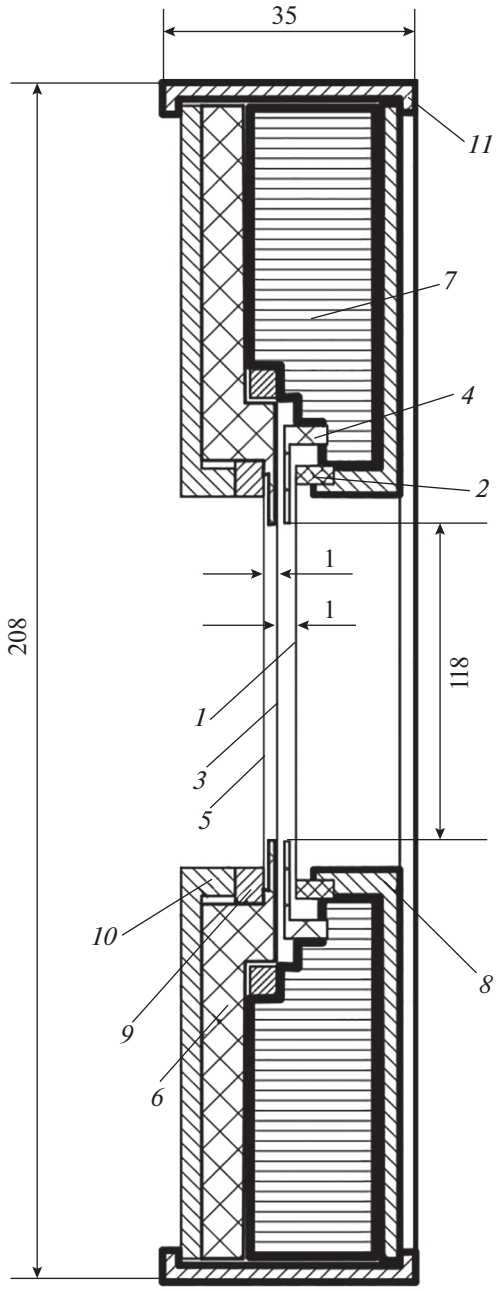

Рис. 1. Конструкция узкозазорной ионизационной камеры: *1* и *5* – сигнальные катоды и высоковольтный анод, *2*, *4* и *6* – кольца из нержавеющей стали, *7* – нижний изолятор, *8* – верхний изолятор, *9* и *10* – изолирующие козырьки, *11* – металлический корпус.

отсюда находим величину b

$$b = 2\hat{I}\frac{T}{\tau}\frac{\alpha}{W}\frac{\rho}{S}\frac{dE}{dx}\frac{d^3}{3k_1k_2E^2}, \qquad (3)$$

где: $\alpha = 1.01 \cdot 10^{-6}$ см$^3 \cdot$ с$^{-1}$ – коэффициент рекомбинации; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд; $\rho = 1.29$ г $\cdot$ см$^{-3}$– плотность воздуха; $k_1 = 1.3$ см$^2 \cdot$ В$^{-1} \cdot$ с$^{-1}$ и $k_2 = 1.9$ см$^2 \cdot$ В$^{-1} \cdot$ с$^{-1}$ – по-

Таблица 1. Толщина деталей и другие геометрические размеры

Толщина каждого электрода	3 мкм
Толщина внутреннего медного слоя	0.15 мкм
Толщина внешнего слоя золота	0.05 мкм
Полная толщина анода и катодов	2.14 мг · см$^{-2}$
Толщина чувствительного воздуха	0.26 мг · см$^{-2}$
Полная толщина, включая чувствительный воздух	2.4 мг · см$^{-2}$
Порог энергии проникновения протона через катод	0.4 МэВ
Порог энергии проникновения протона через анод	0.5 МэВ
Диаметр чувствительной площади	120 мм
Расстояние между анодом и катодом	1 мм

Таблица 2. Параметры для расчета ионизационного заряда и дозы

Параметр	Обозначение	Значение
Удельные ионизационные потери протонов при энергии 209 МэВ	dE/dx	3.8 кэВ · мг$^{-1}$ · см^2
Энергия ионизации, необходимая для образования одной пары ионов в возухе	W	34.5 эВ
Число пар ионов, производимых протоном в 1 мм воздуха	N	14.2
Коэффициент преобразования усилителя	K	12 мВ · нА$^{-1}$
Входное сопротивление усилителя	R	2 Ом
Площадь коллимированного падающего пучка	S	7 см^2
Масса воздуха в 1 мм коллимированного падающего пучка	dm/dS	0.91 мг · см$^{-2}$

движность соответственно положительных и отрицательных ионов в воздухе; dE/dx – удельные ионизационные потери; I и $\hat{I}$ – средний и мгновенный ток пучка; T – период повторения пучка ускорителя; S – площадь поперечного сечения пучка; τ – длительность макроимпульса; d (см) – расстояние между анодом и катодом, E – электрическое поле в зазоре между анодом и катодом. Зависимость величины f от среднего тока падающего пучка протонов для различных d и τ, рассчитанные по формуле (1) представлена на рис. 2.

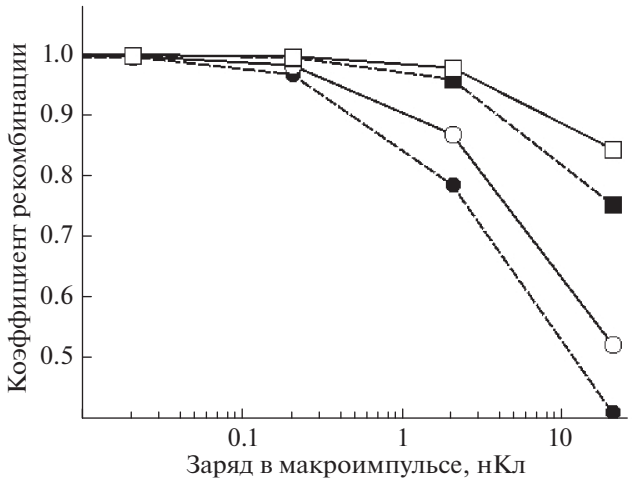

Рис. 2. Расчетный коэффициент объемной рекомбинации ионов в зависимости от среднего тока падающего пучка. Квадраты соответствуют ионизационной камере с зазором 1 мм, кружки – камере с зазором 2 мм. Сплошные линии соответствуют длительности импульса ускорителя 100 мкс, а штриховые линии соответствуют длительности импульса 50 мкс.

Мы можем сравнить заряды, измеренные двумя камерами с различным зазором между анодом и катодом в эксперименте. Соотношение этих зарядов можно рассчитать по формуле:

$$\frac{(Q_1 f_1)}{(Q_0 f_0)} = \frac{d_1}{d_0}\frac{a_0\left(-1+\sqrt{1+a_1}\right)}{\left(a_1\left(-1+\sqrt{1+a_0}\right)\right)}, \tag{4}$$

Заряд, создаваемый в зазоре камеры во время макроимпульса

$$Q = e\frac{U_{\exp}}{f}\frac{\tau}{K} = qdS\tau, \tag{5}$$

где K и R – коэффициент преобразования и входное сопротивление усилителя. Используя параметры, приведенные в табл. 2, можно рассчитать ионизационный заряд в воздушном зазоре камеры по формуле

$$Q = Ne\frac{\rho}{W}\frac{dE}{dx}d, \tag{6}$$

где: N – количество протонов в одном макроимпульсе пучка, которое можно определить из уравнений (5) и (6) по формуле

$$N = \frac{U_{exp}}{f}\frac{\tau}{K}\frac{W}{dE/dx}\frac{1}{d\rho}. \tag{7}$$

Зная заряд ионизационных потерь в зазоре камеры за один макроимпульс, можно определить дозу на единицу массы воздуха в Дж · кг$^{-1}$ (Гр) по формуле

$$D = \frac{WQ}{(\rho dS)} = 3.74\cdot 10^{-11}Q \ \text{[Кл]}. \tag{8}$$

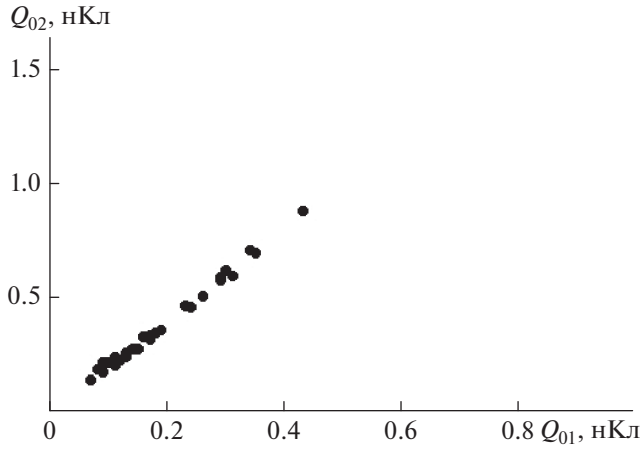

Рис. 3. Корреляция между зарядами, измеренными двумя соседними зазорами узкозазорной камеры. По оси абсцисс отложены значения заряда, измеренные первым зазором, по оси ординат – вторым.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ

Измерения проводились на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН при энергии 209 МэВ. Диаметр пучка определялся коллиматорами и составлял около 10 мм. Длительность импульса составляла 70 мкс при частоте пучка 50 Гц. Время нарастания сигнала в узкозазорной камере с зазором 1 мм составляет около 17 мкс, что вдвое меньше значения для многоканальной камеры с зазором 2 мм.

Корреляции сигналов, полученных от двух зазоров узкозазорной камеры, показаны на рис. 3. Точки измеренных зарядов образуют линейную зависимость, что свидетельствует о правильной работе камеры. Для половины макроимпульсов протоны не преодолели анод в этом эксперименте. Поэтому во втором зазоре сигналов не было.

Качественный анализ состава пучка можно провести, используя данные, полученные при одновременном измерении ионизационных потерь соседними зазорами двух независимых камер. Каждая точка на рис. 4*а* представляет собой дозу ионизации, измеренную двумя соседними зазорами двух камер для одного макроимпульса. Точки на графике локализованы в характерных областях, так называемых локусах. Результаты экспериментов, в которых между камерами помещали пластину из полистирола толщиной 1 или 3 мм, показаны на рис. 4*б* и 4*в* соответственно. В следующей таблице 3 показаны распределения по локусам для нескольких условий эксперимента.

В табл. 3 величины D_0 и D_1 обозначают дозы, измеренные двумя соседними чувствительными зазорами двух независимых камер. Мы отнесли события к локусу “Высокая энергия”, для которых протоны проходят через слой полистирола почти без искажений. На рис. 4*а*–4*в* эти локусы заключены внутри сплошного эллипса. События, которые регистрировались только в первом промежутке, были отнесены к локусу протонов “Низкая энергия”. На рис. 4*а*–4*в* эти локусы заключены

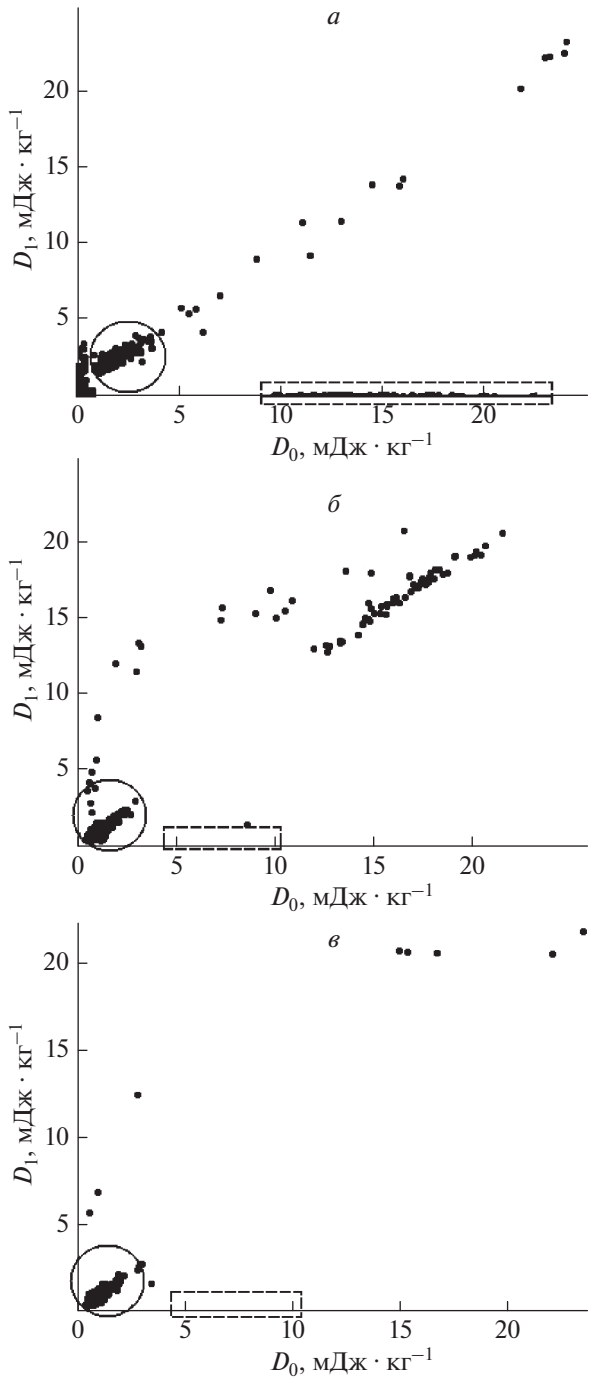

Рис. 4. Корреляция между дозами, измеренными ближайшими зазорами узкозазорной (по оси абсцисс) и многоканальной (по оси ординат) ионизационных камер: расстояние между зазорами составляло L = = 60 мм (*а*); между электродами камер установлен слой полистирола толщиной 1 мм. L = 59 мм (*б*); между электродами камер установлен слой полистирола толщиной 3 мм. L = 57 мм (*в*).

Таблица 3. Дозы, измеренные соседними зазорами двух камер

Вещество между соседними зазорами двух камер	Диапазон энергии	D_0, Дж/кг	D_1, Дж/кг
60 мм, воздух (7.7 мг/см^2)	Полная	2.23	0.5
	Высокая энергия	0.38 (17%)	0.38 (75%)
	Низкая энергия	1.4 (63%)	0
	Рассеянный фон	0.45 (20%)	0.12 (25%)
59 мм, воздух (7.6 мг/см^2) 1-мм полистирол (105 мг/см^2) $E_{e,\,пор} = 0.35$ МэВ, $E_{p,\,пор} = 9$ МэВ	Полная	4.83	3.58
	Высокая энергия	2.23 (46%)	2.45 (68%)
	Низкая энергия	1.53 (31%)	0
	Рассеянный фон	1.07 (22%)	1.13 (32%)
57 мм, воздух (7.5 мг/см^2) 3-мм полистирол (315 мг/см^2) $E_{e,\,пор} = 0.75$ МэВ, $E_{p,\,пор} = 20$ МэВ	Полная	4.68	2.65
	Высокая энергия	2.25 (48%)	2.46 (93%)
	Низкая энергия	2.2 (47%)	0
	Рассеянный фон	0.23 (5%)	0.19 (7%)

внутри пунктирного прямоугольника. Мы полагаем, что события рассеянного фона содержат частицы, в которых преобладают δ-электроны так как они проходят через слой полистирола толщиной 1 мм, но не проходят через слой 3 мм. Количество протонных сгустков, в которых преобладают частицы с низкой энергией, невелико, но их вклад в общие ионизационные потери может быть существенным из-за большой ионизации ими производимой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения полных ионизационных потерь разработана узкозазорная воздушная ионизационная камера с чувствительным зазором 1 мм между катодом и анодом на основе полиимидных пленок толщиной 3 мкм. Работа двух ионизационных камер исследовалась в пучке протонов при $E_p = 209$ МэВ. Анализ корреляций сигналов от узкозазорной и многоканальной камер дает возможность оценить вклад заряженных частиц с высокой и низкой энергией в общие ионизационные потери.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pedroni E., Bacher R., Blattmann H. et al.* // Med. Phys. 1995. V. 22. P. 37.
2. *Brusasco C., Cattai A., Cirio R. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1997. V. 389. P. 499.
3. *Зельчинский М., Шишкин А.Л.* Ионизационная камера для мониторирования тока выведенного пучка протонов на энергию 660 МэВ из Фазотрона ОИЯИ. Сообщение Р13-88-142. Дубна: ОИЯИ, 1988.
4. *Timmer J.H., van Vuure T.L., Bom V. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2002. V. 478. P. 98.
5. *Potashev S.I., Akulinichev S.V., Burmistrov Yu.M. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2004. V. 535. P. 115.
6. *Pernegger H., Frais-Kölbl H., Griesmayer E., Kagan H.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2004. V. 535. P. 108.
7. *Kotov A.A., Hansen K., Lundin M. et al.* Combined Bragg-PPAC ionization detector for light charged particles from photonuclear reactions. Preprint NP-19-1999 № 2304. Gatchina: SPbNPI, 1999.
8. *Воробьев С.И., Ивочкин В.Г., Косьяненко С.В.* Плоскопараллельная камера. Препринт ПИЯФ-2574. Гатчина: ПИЯФ, 2004.
9. *Brusasco C., Voss B., Schardt D. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2000. V. 168. P. 578.
10. *Вялов Г.Н.* Модель стационарного процесса в ионизационной камере с плоскопараллельными электродами. Препринт ИЯИ № 1086/2002. М.: ИЯИ, 2002.

Low threshold-energy ion-chamber system for proton therapy monitoring

S. I. Potashev[a, *], S. V. Akulinichev[a], Yu. M. Burmistrov[a], A. I. Drachev[a]

[a] *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

**e-mail: potashev@inr.ru*

A system of two low-threshold air ionization chambers with a thickness of 3 mg · cm^{-2} has been created. The system includes a new double-gap chamber with a sensitive area of 113 cm^2 with a gap between the electrodes of 1 mm, made of polyimide films with a thickness of 3 μm and a multi-channel chamber. The contribution of recombination and contributions to the dose of low-energy protons and δ-electrons are investigated. The total irradiation dose of the system was 5 Mrad.