

УДК 539.1.074

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СТЕКЛЯННОЙ МНОГОЗАБОРНОЙ РЕЗИСТИВНОЙ ПЛОСКОЙ КАМЕРЫ ПРИ ПОВЫШЕНИИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2013 г. В. А. Гапиенко, О. П. Гавришук\*, А. А. Головин, А. А. Семак, С. Я. Сычков\*,  
Ю. М. Свиридов, Е. А. Усенко\*, М. Н. Уханов

*ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”*

*Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1*

*\*Объединенный институт ядерных исследований*

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

Поступила в редакцию 24.04.2012 г.

Показано, что многозаборная резистивная плоская камера из обычного промышленного стекла может выдерживать значительные загрузки при повышенной рабочей температуре. Приведены результаты испытания двух стеклянных камер на пучке в тестовой зоне ускорителя У-70 ИФВЭ. Необходимая радиационная нагрузка детектора создавалась при помощи радиоактивных источников. При загрузке  $\sim 20$  кГц/см<sup>2</sup> и рабочей температуре 45°С временное разрешение детектора было не хуже 80 пс.

DOI: 10.7868/S0032816213020055

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в физике высоких энергий стеклянная многозаборная резистивная плоская камера (м.р.п.к.) является наиболее подходящим кандидатом для создания больших по площади времяпролетных детекторов (в.п.д.). Преимуществами м.р.п.к. являются низкая стоимость, высокая эффективность регистрации заряженных частиц и нечувствительность к наличию магнитного поля. В качестве примеров можно привести строящиеся эксперименты СВМ [1, 2] и МРД [3], в которых решено использовать м.р.п.к. в составе времяпролетного детектора. При этом требуемое временное разрешение м.р.п.к. должно быть не хуже 80 пс. При лабораторных исследованиях получено временное разрешение м.р.п.к. около 50 пс [4–6]. Существуют работы, где показано, что эту величину можно существенно улучшить. Так в работе [7] было получено временное разрешение 20 пс для м.р.п.к. с 24 зазорами. Есть модельное предсказание [8], что м.р.п.к. с газовым промежутком 0.3 мм и 6 зазорами имеет предельное временное разрешение 25 пс.

Однако у стеклянной м.р.п.к. есть существенный недостаток — невысокая загрузочная способность. Поток заряженных частиц, пересекающий газовый зазор, порождает лавинные разряды между электродами. Ток от этих разрядов, проходящий через стеклянные электроды, вызывает падение напряжения внутри газового зазора. При высоких нагрузках снижение разности потенциалов приводит к существенному ухудшению всех

характеристик м.р.п.к.. При объемном сопротивлении обычного стекла  $10^{12}$ – $10^{13}$  Ом · см загрузочная способность м.р.п.к. ограничена на уровне 1 кГц/см<sup>2</sup>. Чтобы использовать м.р.п.к. в экспериментах с большими нагрузками, в таких как СВМ [1, 2], где ожидаемый поток частиц в в.п.д. около 20 кГц/см<sup>2</sup>, необходимо использовать низкорезистивные материалы для электродов.

В работе [9] приведены характеристики четырехзаборной м.р.п.к., изготовленной из специального полупроводящего силикатного стекла, которое по составу подобно стеклу Пестова. Это стекло включает оксиды щелочных элементов и обладает относительно низким объемным сопротивлением  $10^8$ – $10^9$  Ом · см. При загрузке 20 кГц/см<sup>2</sup> эта м.р.п.к. продемонстрировала эффективность  $\sim 95\%$  и временное разрешение 100 пс. Как альтернативу полупроводящему силикатному стеклу можно упомянуть низкорезистивную керамику [10], для которой получена загрузочная способность 80 кГц/см<sup>2</sup>. Однако по сравнению с обычным стеклом изготовление полупроводящих стекол и керамических пластин сопряжено с технологическими сложностями, что приводит к значительному удорожанию производства м.р.п.к.

Есть два способа снижения сопротивления электродов. Первый способ состоит в использовании очень тонких электродов. Уменьшение локального падения напряжения в камере при протекании тока от лавинного разряда пропорционально толщине электродов. Другой способ заключается в уменьшении объемного сопротивления стекла

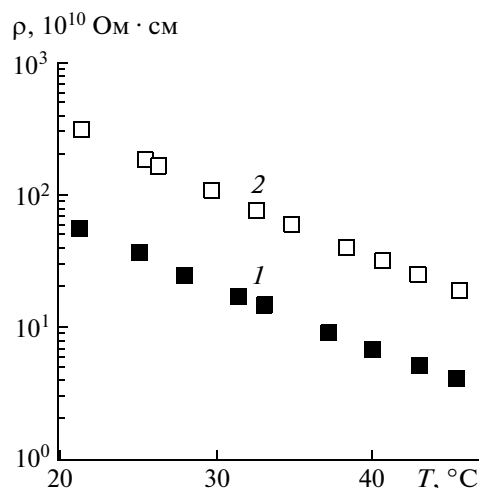


Рис. 1. Объемное сопротивление стекол компаний Glaverbel (1, толщина 0.55 мм) и Pearl (2, 0.16 мм) в зависимости от температуры.

путем увеличения рабочей температуры детектора. Идея использования сильной зависимости сопротивления стекла от температуры была высказана в работах [11, 12].

В данной работе был использован комбинированный подход — м.р.п.к. были изготовлены из очень тонких стекол и были подвергнуты небольшому нагреву во время измерений их характеристик.

#### КОНСТРУКЦИЯ М.Р.П.К. И СХЕМА УСТАНОВКИ

Объемное сопротивление промышленных стекол варьируется в широком диапазоне, поэтому был сделан предварительный отбор образцов. В результате, для сборки камер были выбраны два вида: стекло толщиной 0.55 мм, которое производится компанией Glaverbel (<http://www.agc-glass.eu/>), и покровные стекла для микроскопов толщиной 0.16 мм, производимые компанией Pearl (China, CN-Pearl Industry Co., Ltd.).

Температурная зависимость объемного сопротивления отобранных образцов приведена на рис. 1. При измерении сопротивления к стеклянным пластинам прикладывалась разность потенциалов 100 В. Несмотря на то, что при одинаковой температуре сопротивление стекла от компании Pearl примерно в 5 раз меньше, чем у стекла Glaverbel, оба образца имеют одинаковый наклон температурной зависимости: рост температуры на 25°C приводит к уменьшению объемного сопротивления стекла в 10 раз. Подобное поведение сопротивления стекол наблюдалось в работе [12].

Для исследований были собраны две шестизазорные м.р.п.к. Одна из них была изготовлена из семи стекол Glaverbel. Далее она будет называться

“толстая” камера. Вторая, “тонкая”, состояла из пяти внутренних пластин стекла Pearl, а внешние высоковольтные электроды этой камеры были сделаны из пластин Glaverbel для обеспечения механической жесткости сборки. Толщина газовых зазоров в обеих камерах была одинаковой и составляла 230 мкм. Размеры стеклянных пластинок также были одинаковыми —  $2.5 \times 2.5$  см. Активная площадь у обеих м.р.п.к. была  $1.9 \times 1.9$  см<sup>2</sup>. Ячейки таких размеров могут рассматриваться как прототип для центральной части в.п.д. в эксперименте СВМ. Расстояние между стеклянными пластинами задавалось полосками из лавсана (спейсеры). Сигнальный и высоковольтный электроды были изготовлены из медной фольги, приклеенной к внешним стеклянным электродам с помощью токопроводящего клея.

Обе тестируемые м.р.п.к. помещались в небольшую алюминиевую коробку ( $15 \times 12 \times 3$  см), которая представляла собой замкнутый газовый объем. В свою очередь, эта металлическая коробка помещалась в центр термостата, функции которого выполняла пластиковая коробка ( $30 \times 30 \times 6$  см). Внутри термостата располагались 16 нагревательных элементов, которые управлялись при помощи терморегулятора ТН-0502-N [13]. Необходимая температура внутри термостата поддерживалась с точностью  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Как алюминиевая коробка, так и термостат были снабжены температурными датчиками, отслеживающими температуру внутри соответствующих объемов. Газовая смесь для м.р.п.к. подавалась в алюминиевую коробку через медную трубку, которая находилась внутри термостата, выполняя роль теплообменника. Общая длина этой трубки составляла 6.7 м, ее внутренний диаметр — 4 мм. Поток газа был достаточно слабым, чтобы температура газа, подаваемого в м.р.п.к., была равна температуре термостата. Состав рабочего газа для м.р.п.к.: 90% тетрафторэтана ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ ), 5% изобутана ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) и 5% гексафторида серы ( $\text{SF}_6$ ).

Измерения с м.р.п.к. проводились в тестовой зоне ускорителя У-70 ИФВЭ. Пучок состоял из положительно заряженных частиц с импульсом  $\sim 3$  ГэВ/с. Для получения начальной временной отметки  $t_0$  использовались два временных счетчика. Каждый счетчик состоял из сцинтилляционной палочки размером  $1 \times 1 \times 10$  см и двух фотумножителей на ее концах. Точность измерения времени этими счетчиками была 70 пс (среднеквадратичное отклонение (с.к.о.)). В выработке триггерного сигнала участвовали два сцинтилляционных пучковых счетчика, которые позволяли отбирать из широкого в поперечном сечении пучка область размером  $1 \times 1$  см. Сигналы от м.р.п.к. подавались на усилитель-дискриминатор [14], который был разработан для м.р.п.к. в эксперименте FOPI. Выходные сигналы усилителя, а так-

же сигналы от сцинтилляционных счетчиков передавались по коаксиальным кабелям длиной 25 м на стойки электроники, где они оцифровывались при помощи модулей LeCroy 2228A (временицифровой преобразователь ВЦП, 50 пс/отсчет и LeCroy 2249A (зарядоцифровой преобразователь ЗЦП).

При использовании дискриминатора с постоянным порогом возникает зависимость времени его срабатывания от амплитуды входного сигнала. На рис. 2а показан пример зависимости времени появления цифрового сигнала м.р.п.к. ( $t_{\text{м.р.п.к.}}$ ) от заряда на входе дискриминатора. Поэтому временная отметка с камеры корректировалась с учетом этой зависимости. Пример распределения по времени отклика м.р.п.к. относительно начальной временной отметки ( $t_{\text{м.р.п.к.}} - t_0$ ) приведен на рис. 2б. Кривая на рис. 2б есть результат аппроксимации данных функцией Гаусса. Доля событий, которые находятся вне гауссовой кривой, составляет около 1%. Во всех наших измерениях доля не гауссовых “хвостов” в распределении по времени не превышала 2%. Среднеквадратичное отклонение для гауссовой аппроксимации, приведенной на рис. 2б, равно 77 пс (с.к.о.), что с учетом точности определения  $t_0$  показывает, что временное разрешение детектора равно 30 пс (с.к.о.). В эту величину входят временное разрешение усилителя-дискриминатора и ВЦП.

Интенсивность пучка в тестовой зоне была не более 100 Гц/см<sup>2</sup>. Для того чтобы получить большую загрузку детектора дополнительно применялись два радиоактивных источника: <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs. Активность <sup>90</sup>Sr источника была  $9.4 \cdot 10^8$  Бк, а <sup>137</sup>Cs —  $1.5 \cdot 10^8$  Бк. Источник <sup>90</sup>Sr имел диаметр активной зоны, равный 10 мм, источник <sup>137</sup>Cs — 6.1 мм. Вариация загрузки детектора обеспечивалась изменением расстояния между источниками и м.р.п.к. Во всех измерениях расстояние между <sup>90</sup>Sr и катодом м.р.п.к. было больше 1.5 см, а между <sup>137</sup>Cs и катодом — не менее 2.5 см. Так как активная площадь детектора достаточно мала, то можно быть уверенным в однородности его облучения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Перед началом работы оба образца м.р.п.к. прошли тренировку при радиационном облучении и повышенной температуре. Если при первом включении наилучшее временное разрешение “толстой” камеры было 74 пс, а “тонкой” — 68 пс, то после 10-часовой тренировки при температуре 35°C и при облучении <sup>90</sup>Sr источником их временное разрешение улучшилось до 30–40 пс.

Измерения были проведены при трех температурах: комнатной, которая равнялась 23°C, и при нагреве до 35 и 45°C. Из-за ограниченности по времени измерения для тонкой камеры не проводились при 23°C. На рис. 3 показано временное

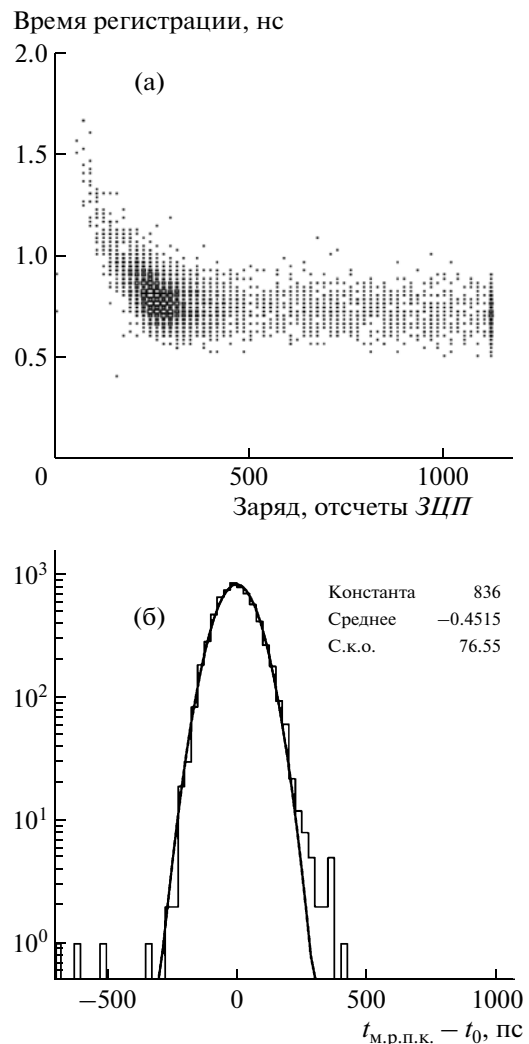
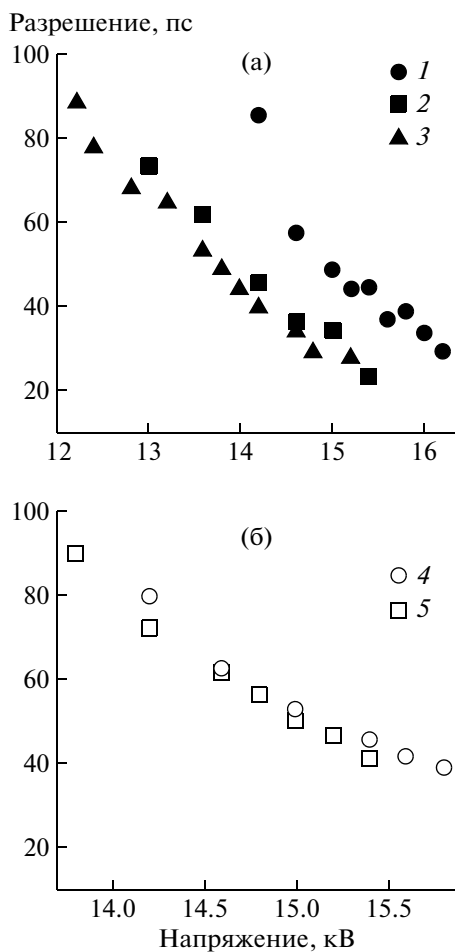


Рис. 2. а — зависимость времени регистрации цифрового сигнала от заряда аналогового сигнала; б — пример распределения по времени срабатывания м.р.п.к., определяемого относительно опорного времени (кривая представляет результат аппроксимации функцией Гаусса). Время отклика м.р.п.к. поправлено на корреляцию время—заряд.

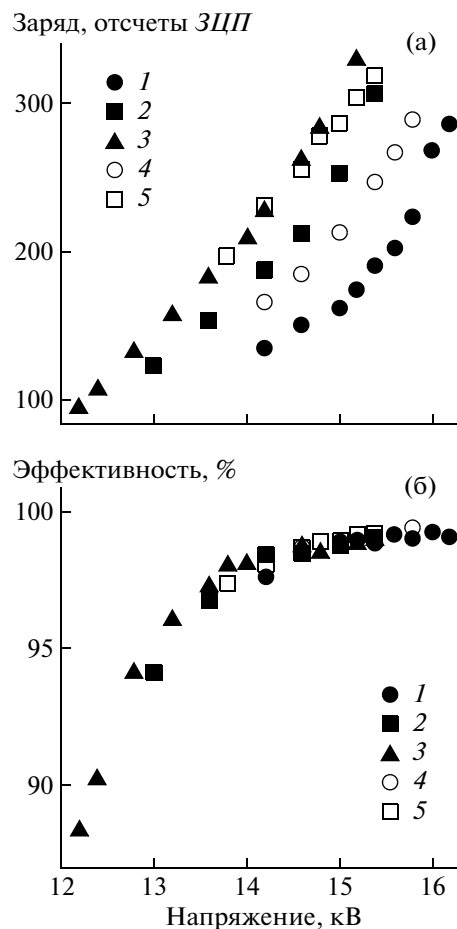
разрешение как функция приложенного напряжения для разных температур. Данные на рис. 3 получены в отсутствие радиоактивных источников. Из рисунка видно, что временное разрешение монотонно улучшается с увеличением напряжения. Однако зависимость временного разрешения от рабочей температуры заметно более сложная — данные, полученные при температурах 35 и 45°C, не имеют существенных различий при фиксированном напряжении, в то же время хорошо заметен сдвиг по напряжению, примерно в 1 кВ, между измерениями, проведенными при 35, 45 и 23°C. Чтобы убедиться в достоверности данных, проводились повторные серии измерений с интервалом примерно 8 ч. Разница в определении временного



**Рис. 3.** Зависимость временного разрешения при различных температурах от рабочего напряжения: **а** – “толстая” м.р.п.к. (1 – рабочая температура 23°C, 2 – 35°C, 3 – 45°C); **б** – “тонкая” м.р.п.к. (4 – 35°C, 5 – 45°C). Данные получены без загрузки от источника.

разрешения между разными сериями измерений обычно не превышала 3 пс. Величины газовых зазоров у камер одинаковые, поэтому можно было ожидать, что при малой загрузке временное разрешение у них тоже будет одинаковым. Но как следует из рис. 3, это ожидание не оправдывается.

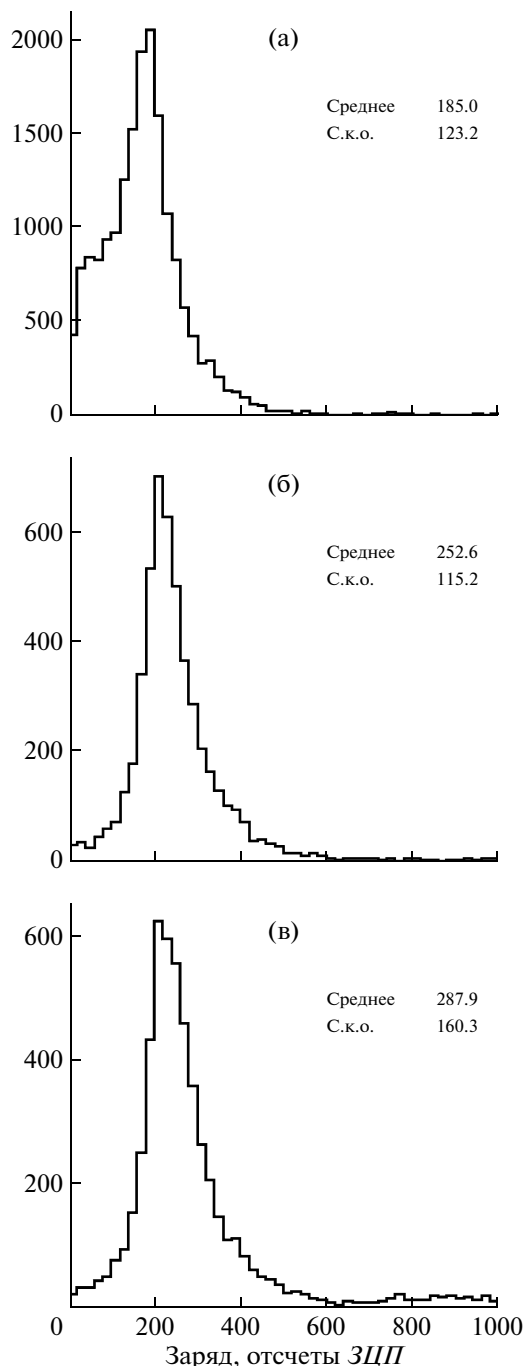
Для краткости мы будем называть частицу пучка минимально ионизирующей частицей (м.и.ч.). Поведение среднего заряда, производимого м.и.ч., и эффективности регистрации м.и.ч. в зависимости от напряжения показаны на рис. 4 для трех температур. Виден общий рост средних зарядов с увеличением температуры. При температуре 45°C средние заряды сигналов примерно одинаковы для “толстой” и “тонкой” камер и отличаются на 25% при 35°C. На рис. 4 можно видеть, что при напряжении >14 кВ эффективность для обеих м.р.п.к. при любой температуре превышает 97%. Данных при напряжении ниже выхода на плато по эффективности немного. Поэтому мы не можем



**Рис. 4.** Средние заряды, производимые м.и.ч. (а), и эффективность детектора (б) в зависимости от рабочего напряжения: 1–3 – “толстая” м.р.п.к. (соответственно 23, 35, 45°C), 4, 5 – “тонкая” (35, 45°C). Данные получены без загрузки от источника.

сделать каких-либо заключений о температурном поведении эффективности регистрации м.и.ч.

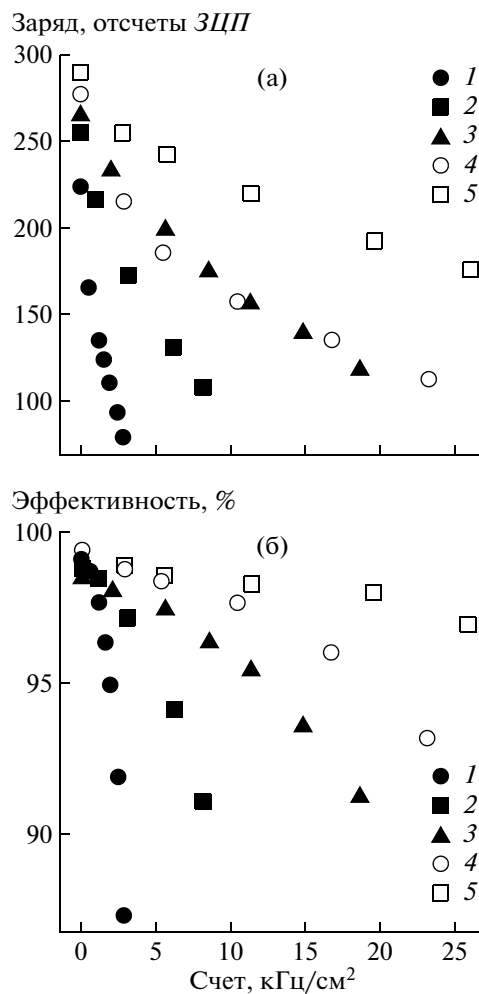
Распределение по заряду сигнала, производимого м.и.ч., отличается от производимого  $\gamma$ - или  $\beta$ -источником. Это отличие можно видеть на рис. 5, где показаны распределения по заряду для трех случаев: заряд, производимый только радиоактивным источником (рис. 5а); заряд, производимый частицей пучка при дополнительном облучении радиоактивным источником (рис. 5б); зарядовый спектр от м.и.ч. в отсутствие радиоактивного источника (рис. 5в). Для первого случая (рис. 5а) система сбора данных запускалась сигналами, поступающими с самой м.р.п.к. (“режим самозапуска”). В остальных случаях триггерный сигнал вырабатывался пучковыми счетчиками, через которые проходила частица. Представленные на рис. 5 данные относятся к “тонкой” м.р.п.к., работающей при напряжении 15 кВ. Низкий порог электроники, равный 13 фКл (он соответствует 30-му отсчету на



**Рис. 5.** Зарядовый спектр для “тонкой” м.р.п.к. при 35°C: **а** – от радиоактивного источника, **б** – от м.и.ч. в присутствии радиоактивного источника, **в** – в его отсутствие.

гистограммах рис. 5), позволяет хорошо отделять от пьедестала спектр заряда, вызываемого радиоактивными источниками.

Для рис. 5а и 5б счет с камеры составлял около 3 кГц/см<sup>2</sup>. Из сравнения этих рисунков следует, что средний заряд, производимый м.и.ч., в 1.4 раза больше, чем средний заряд от радиоактивного



**Рис. 6.** Средний заряд и эффективность для м.и.ч. в зависимости от счета м.р.п.к. (1–3 – “толстой”, 4 и 5 – “тонкой”). Данные соответствуют рабочему напряжению: 1 – 15.8 кВ при 23°C, 2 – 15.0 кВ при 35°C, 3 – 14.6 кВ при 45°C, 4 – 15.6 кВ при 35°C, 5 – 15.0 кВ при 45°C.

источника. Это соотношение сохраняется и для “толстой” м.р.п.к. Было замечено, что появление даже небольшой радиационной загрузки приводит к подавлению “хвоста” зарядового спектра от м.и.ч. (рис. 5б), который был при минимальном облучении (рис. 5в).

Зависимости среднего заряда и эффективности от загрузки детектора для всех температур и двух образцов м.р.п.к. приведены на рис. 6, откуда следует, что при увеличении рабочей температуры эффективность м.р.п.к. и средний заряд слабее зависят от загрузки. Из рис. 6 также видно, что “тонкая” м.р.п.к. менее чувствительна к большим нагрузкам, чем “толстая”.

Загрузочная способность м.р.п.к. зависит от тока, протекающего через камеру, т.е. она пропорциональна произведению среднего заряда на загрузку. Как было показано ранее (рис. 5), средний

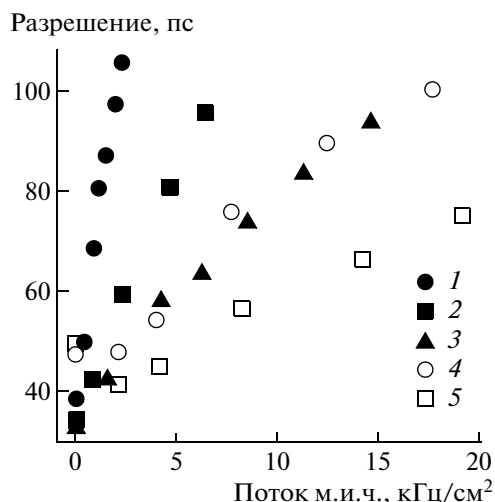


Рис. 7. Временное разрешение как функция потока м.и.ч. (1-3 – “толстая” м.р.п.к., 4 и 5 – “тонкая”). Данные соответствуют рабочему напряжению: 1 – 15.8 кВ при 23°C, 2 – 15.0 кВ при 35°C, 3 – 14.6 кВ при 45°C, 4 – 15.6 кВ при 35°C, 5 – 15.0 кВ при 45°C.

заряд от радиоактивного источника меньше, чем заряд от м.и.ч., в 1.4 раза. Чтобы характеристики м.р.п.к., измеренные с радиоактивным источником, перевести в поток м.и.ч., нужно преобразовать регистрируемый поток излучения с коэффициентом  $k = (1.4\epsilon)^{-1}$ , где  $\epsilon$  – эффективность, измеренная при данной нагрузке. Подобная процедура перенормирования потока использовалась, например, в [15].

Конечный результат – зависимость временно-го разрешения от плотности потока м.и.ч. – представлен на рис. 7. Из рисунка следует, что требование временного разрешения не хуже 80 пс “толстая” м.р.п.к. может обеспечить при 23°C для нагрузок до 1 кГц/см<sup>2</sup>, при 35°C – для потока до 5 кГц/см<sup>2</sup>, а при 45°C максимальный поток доходит до ~12 кГц/см<sup>2</sup>. Для “тонкой” м.р.п.к. эти величины примерно в 2 раза больше: 12 кГц/см<sup>2</sup> при 35°C и 20 кГц/см<sup>2</sup> при 45°C. Эффективность срабатывания камер во всех измерениях, приведенных на рис. 7, была выше 90%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе показано, что м.р.п.к., изготовленная из промышленного стекла, способна выдерживать относительно большие загрузки. Если шестизазорную м.р.п.к., сделанную из стекла толщиной 0.16 мм, нагреть до температуры 45°C, то при потоке м.и.ч. около 20 кГц/см<sup>2</sup> ее временное разрешение будет не хуже 80 пс. В дальнейших исследованиях стеклянной камеры с подогревом необходимо изучить как меняются со временем ее характеристики.

Мы очень благодарны D. Gonzalez-Dias за инициацию этой работы. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 09-02-13565).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CBM Technical Design Report. January 2005; [http://www.gsi.de/forschung/fair\\_experiments/CBM/](http://www.gsi.de/forschung/fair_experiments/CBM/)
2. Senger P. // J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 2002. V. 28. P. 186.
3. MPD Conceptual Design Report version 1.4; [http://nica.jinr.ru/files/CDR\\_MPD/MPD\\_CDR\\_1.4.pdf](http://nica.jinr.ru/files/CDR_MPD/MPD_CDR_1.4.pdf)
4. Fonte P., Smirnitcki A., Williams M.C.S. // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. V. A443. P. 201.
5. Akindinov A., Fonte P., Formenti F. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001. V. 48. P. 1658.
6. Akindinov A., Anselmo A., Basile M. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. V. A456. P. 16.
7. An S., Jo Y.K., Kim J.S. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2008. V. A594. P. 39.
8. Riegler W., Lippmann C., Veenhof R. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A500. P. 144.
9. Ammosov V., Ciobanu M., Dohrmann F. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A576. P. 331.
10. Lopes L., Ferrerira Marques R., Fonte P. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 2006. V. 158. P. 66.
11. Gustavino C., Candela A., De Deo M. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A527. P. 471.
12. Gonzalez-Dias D., Belver D., Blanco A. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A555. P. 72.
13. [http://www.king-ielec.com.tw/all/manuals/thermostat/th\\_0502n.pdf](http://www.king-ielec.com.tw/all/manuals/thermostat/th_0502n.pdf)
14. Schuttauf A. // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A533. P. 65.
15. Akindinov A., Alici A., Anselmo F. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A490. P. 58.