

УДК 621.317.75: 681.335.2

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Д. В. Дорохов, Э. А. Купер

*Институт ядерной физики им. Г. И. Буджера СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
E-mail: ddvscis@yandex.ru*

Представлено устройство для измерения токов ионизационной камеры в диапазоне $5 \cdot 10^{-15}$ – $3 \cdot 10^{-6}$ А. Проведён анализ собственного шума, среднеквадратичное значение которого в полосе 1 Гц не превышает расчётного минимума — 5 фА. Устройство предназначено для экспериментов с синхротронным излучением, но может использоваться и в других приложениях, требующих измерения малых токов.

Ключевые слова: измеритель малых токов, сигма-дельта-АЦП, ионизационная камера.

Введение. Одним из основных инструментов для измерения параметров пучков синхротронного излучения (СИ) является ионизационная камера (ИК) [1, 2]. Простейшая камера представляет собой герметичный объём, наполненный газом, в котором закреплены два плоскопараллельных электрода. На один из электродов подаётся высокое напряжение (несколько сот вольт), а со второго снимается ток, возникающий в результате ионизации газа синхротронным излучением. Ток пропорционален интенсивности СИ и может находиться в достаточно широком диапазоне. При этом в большинстве случаев высокого быстродействия от камеры не требуется и полоса регистрируемого сигнала может занимать всего несколько герц.

Для работы с камерой необходимы усилители малого тока (в случае простейшей камеры достаточно одного [3, 4]), блок аналого-цифрового преобразования (АЦП), источник высокого напряжения и контроллер управления, позволяющий передавать данные в компьютер пользователя (ПК).

Современная элементная база позволяет объединить перечисленные электронные блоки в одном компактном устройстве. В качестве примера можно привести приборы из [5–7]. Однако эти изделия не всегда удобны, недостаточно функциональны и не имеют требуемого набора параметров для проведения экспериментов с синхротронным излучением. Восполнить указанный пробел призвана представленная разработка.

Предлагаемая система функционально объединяет в себе все перечисленные устройства и конструктивно связана с корпусом ИК (рис. 1, устройство представлено без кожуха). Аналоговые сигналы преобразуются в цифровой эквивалент непосредственно на месте их получения, что радикально повышает помехоустойчивость измерений.

Прибор оснащён двумя идентичными каналами измерения, работающими синхронно (рис. 2). Измерительный канал содержит 24-разрядный сигма-дельта-АЦП (АЦП1) и два преобразователя ток—напряжение, которые подключаются к камере с помощью релейных коммутаторов К1, К2.

Требуемый для измерения диапазон токов может значительно отличаться от эксперимента к эксперименту, поэтому в конструкции преобразователя предусмотрены два поддиапазона 1 В/мкА и 1 В/нА (резисторы 1 %, 50 ppm/°C [8]). Стандартная схема переключения диапазонов, основанная на двух резисторах, коммутируемых в цепи обратной связи

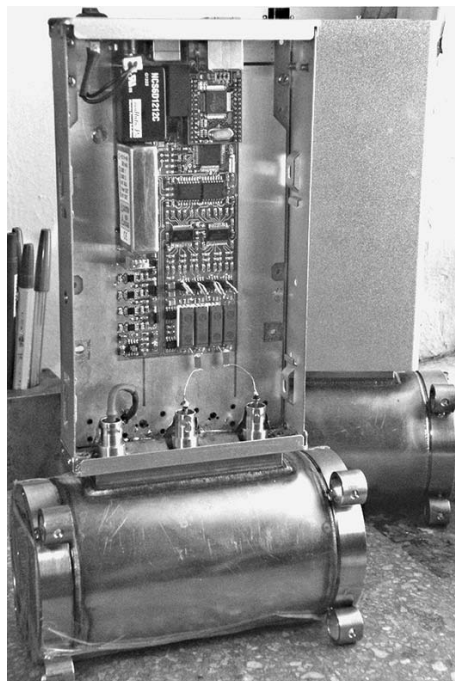


Рис. 1

операционного усилителя (A1–A4), не годится. При необходимом разрешении по току в единицы фемтоампер в качестве ключей нельзя использовать ни твердотельные коммутаторы на полевых транзисторах (ток утечки больше необходимого на 2–3 порядка), ни релейные переключатели, у которых сопротивление изоляции обычно гарантируется на уровне 10^{12} Ом. Поэтому для каждого измерительного диапазона применяется свой преобразователь ток—напряжение, основанный на операционном усилителе LMP7721 [9] (ток сдвига 3 фА, напряжение смещения 26 мкВ). При этом величина сопротивления изоляции реле К1 и К2 может быть на уровне 10^{11} Ом, что является рядовым показателем.

Высокое напряжение (0–1100 В) между электродами камеры создаётся источником С4900 фирмы "Hamamatsu" [10], управляемым цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) (см. рис. 2). Наличие «паразитной» ёмкости между электродами предъявляет достаточно высокие требования к низкочастотным шумам и кратковременной нестабильности высоковольтного источника. При величине этой ёмкости ≈ 1 пФ и принятом ограничении на паразитный ток на уровне 10^{-15} А в соответствии с формулой

$$i = CdU/dt \quad (1)$$

скорость изменения высокого напряжения на выходе источника не должна превышать 1 мВ/с. Таким образом, относительное изменение напряжения за 1 с при 1 кВ на выходе равно 10^{-6} .

С другой стороны, наличие ёмкости между электродами позволяет проверять работоспособность измерительных каналов прямо на рабочей установке, не прибегая к демонтажу устройства. Для этого достаточно перекрыть пучок СИ, задать между электродами требуемый наклон пилообразного напряжения (которое формируется микроконтроллером (МК) и ЦАП) и сравнить показания прибора с ожидаемой величиной тока, рассчитанной по формуле (1). В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена запись измерений вблизи границы чувствительности прибора (затенённый участок соответствует 16 с). Частота преобразования АЦП установлена равной 2,5 Гц, чувствительность 1 В/нА, наклон пилообразного напряжения изменялся ступенчатым образом от 0 до 0,229 В/с.

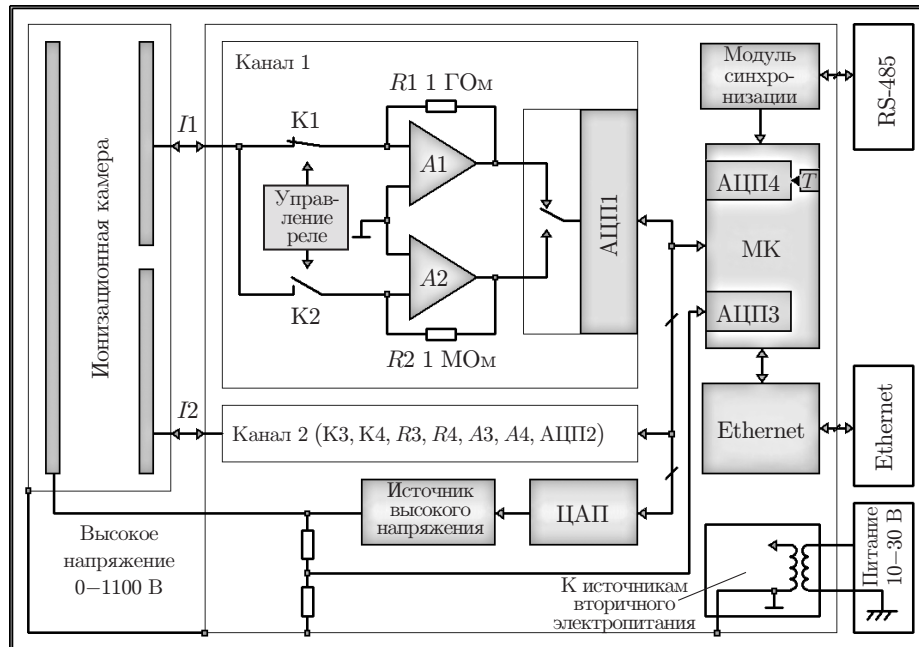


Рис. 2

Прибор функционирует под управлением микроконтроллера AduC845 [11]. Встроенные в него АЦП (АЦП3 и АЦП4 на рис. 2) используются для измерения высокого напряжения непосредственно на высоковольтном электроде камеры и для контроля температуры внутри корпуса устройства. Предусмотрена возможность синхронизации старта измерений с работой других узлов физической установки. Синхронизация производится через интерфейс RS-485. Связь с компьютером пользователя осуществляется по Ethernet с использованием протокола TCP/IP (модуль NM7010A [12]). Напряжение питания составляет 10–30 В, потребляемая мощность — 5 Вт. Подробно эти и другие характеристики даны в [13].

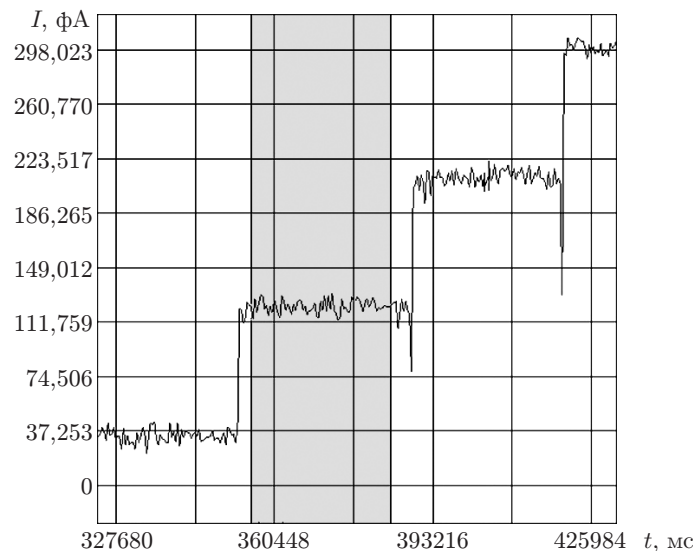


Рис. 3

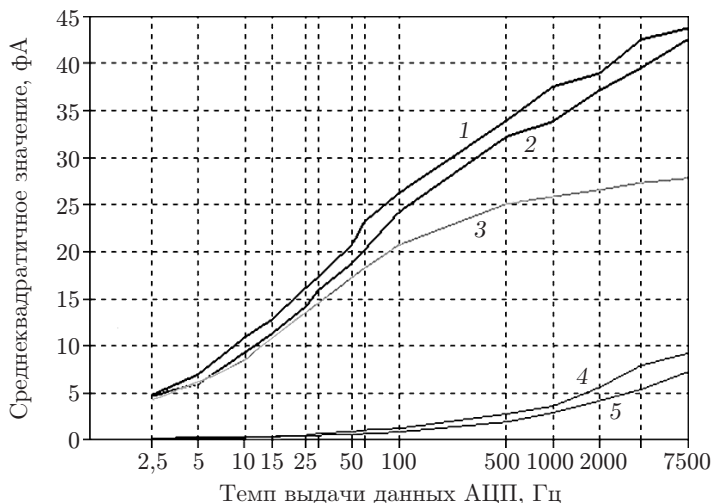


Рис. 4

Разрешающая способность прибора ограничивается его собственным шумом, который наиболее заметно проявляется при установке чувствительности 1 В/нА. На рис. 4 кривой 1 представлены значения собственного шума, измеренные на интервалах длительностью 10 с. Устройство во время измерений было подключено к ИК, напряжение между электродами составляло 800 В (типичное значение при проведении экспериментов), пучок СИ отсутствовал.

Как и следовало ожидать, с увеличением темпа выдачи данных АЦП (F_{rate}) собственный шум возрастает, поскольку при этом полоса пропускания прибора расширяется. Полоса пропускания определяется двумя фильтрами низких частот. В роли первого выступает преобразователь ток—напряжение, имеющий фиксированную частоту среза $f_{-3\text{дб}} = 1/(2\pi RC) = 32$ Гц, где $C = 5$ пФ — ёмкость, включённая параллельно резистору обратной связи, а $R = 1$ ГОм. Второй фильтр входит в состав цифровой части сигма-дельта-АЦП, его полосу пропускания можно регулировать путём установки требуемого F_{rate} .

Рассмотрим вклады основных источников шума, присутствующих в системе.

Как следует из сравнения кривых 1 и 2 (кривая 2 получена так же, как и кривая 1, но при нулевом высоком напряжении), работа высоковольтного источника увеличивает собственный шум прибора на 1–2 фА.

Шум АЦП, отнесённый ко входу устройства, представлен кривой 4, каждое значение которой получено экспериментально при замыкании входов АЦП на общий провод (измерения выполнены на десяти секундных интервалах). На рисунке для сравнения приведена аналогичная зависимость (кривая 5), построенная по данным, взятым из технической документации [14].

Шум на выходе преобразователя ток—напряжение при величине резистора обратной связи 1 ГОм практически полностью определяется тепловым шумом резистора, среднеквадратичное значение которого рассчитывается по формуле

$$i_T = \sqrt{(4kT\Delta f/R)}, \tag{2}$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура (300 К); $R = 1$ ГОм; Δf — полоса наблюдаемых частот. Тепловой шум, как и шум источника вы-

сокого напряжения, подавляется обоими фильтрами, поэтому в выражение для расчёта шумовой полосы Δf должен войти не только модуль амплитудно-частотной характеристики преобразователя ток—напряжение, но и модуль передаточной функции цифрового фильтра сигма-дельта-АЦП $|H(f, F_{\text{rate}})|$, которая приведена в [14]. Таким образом, шумовая полоса определяется формулой

$$\Delta f(F_{\text{rate}}) = \int_{f_1}^{f_2} \frac{|H(f, F_{\text{rate}})|^2}{1 + (f/f_{-3 \text{ Дб}})^2} df. \quad (3)$$

Данное выражение использовалось при численном расчёте значений теплового шума (2), при этом нижний и верхний пределы интегрирования для всех F_{rate} были одинаковыми: $f_1 = 0,1 \text{ Гц}$, $f_2 = 10^5 \text{ Гц}$.

Итак, в качестве критерия оценки качества шумовой характеристики прибора целесообразно принять среднеквадратичную сумму шума преобразователя ток—напряжение, рассчитанную по формулам (2) и (3), и шума АЦП (кривая 5). Эта сумма представлена кривой 3 на рис. 4.

Вклад других источников, к которым, прежде всего, следует отнести высокочастотные пульсации импульсных преобразователей питания, расположенных на печатной плате устройства, а также шумы его цифровой части, можно определить по кривым 2 и 3.

Следовательно, в полосе пропускания для частот входного сигнала 1 Гц ($F_{\text{rate}} = 2,5 \text{ Гц}$) и менее (цифровая фильтрация ресурсами ПК) чувствительность по току почти полностью зависит от теплового шума резистора. Это наиболее востребованная область

Параметры устройства	Значения
Количество каналов измерения	2
Чувствительность (каждого канала)	1 В/нА (диапазон 1) 1 В/мкА (диапазон 2)
Точность	$\pm 1 \%$
Температурный дрейф (типичное значение)	$-1,5 \pm 5 \cdot 10^{-5} I_{\text{вх}}$, фА/°С (диапазон 1) $-1,5 \pm 5 \cdot 10^{-5} I_{\text{вх}}$, пА/°С (диапазон 2)
Диапазоны измеряемых токов	$-0,5 \text{ нА} \dots + 3 \text{ нА}$ (1 В/нА) $-0,5 \text{ мкА} \dots + 3 \text{ мкА}$ (1 В/мкА)
Частоты выдачи данных F_{rate}	2,5, 5, 10, 15, 25, 30, 50, 60, 100, 1000, 2000, 3750, 7500 Гц
Среднеквадратичное значение собственного шума	5 фА при $F_{\text{rate}} = 2,5 \text{ Гц}$ (полоса пропускания сигнала 1 Гц) 20 фА при $F_{\text{rate}} = 50 \text{ Гц}$ (полоса пропускания сигнала 16 Гц) (см. рис. 4)
Эффективная разрядность АЦП	22 бит (при $F_{\text{rate}} = 2,5 \text{ Гц}$)
Внешний запуск АЦП	Есть
Диапазон высоковольтного источника	0–1100 В
Интерфейсы связи	Ethernet, TCP/IP (связь с компьютером) RS-485 (синхронизация)
Напряжение питания	10–30 В (12 В номинальное)
Потребляемая мощность	не более 5 Вт

частот, поскольку она связана с большей частью экспериментов, проводимых с использованием ИК. Если пренебречь зависимостью от высокого напряжения, то и в области низких частот (до $F_{\text{rate}} = 25$ Гц, полоса 10 Гц [13]) собственный шум совпадает с расчётными значениями. Практически можно принять, что вплоть до частоты $F_{\text{rate}} = 50$ Гц (полоса 16 Гц) собственный шум достигает минимального уровня. В области высоких частот (выше $F_{\text{rate}} = 100$ Гц) шумовая характеристика не столь оптимистична, однако и в ней шумовой фон удовлетворяет требованиям экспериментов.

Технические характеристики устройства представлены в таблице.

Заключение. Разработан прецизионный прибор, позволяющий измерять токи в диапазоне $5 \cdot 10^{-15}$ – $3 \cdot 10^{-6}$ А при минимально достижимом уровне собственного шума в полосе пропускания 16 Гц и ниже. Прибор заменяет ряд автономных модулей, применяемых в экспериментах с ионизационной камерой: источник высокого напряжения, блоки аналого-цифрового преобразования, комплект усилителей малых токов и интерфейс связи с компьютером пользователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Косов А. В., Шеромов М. А.** Экспериментальное исследование пространственного положения пучков СИ в каналах № 13 и 7 накопителя ВЭПП-4М // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2013. **77**, № 2. С. 110–112.
2. **Косов А. В., Купер Э. А., Шеромов М. А.** Высоковакуумная ионизационная камера с высоким пространственным разрешением для мониторинга пучка СИ // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 11. С. 44–48.
3. **Купер Э. А., Леденев А. В.** Измерительный МДМ-усилитель // Автометрия. 1978. № 4. С. 124–127.
4. **Руководство** пользователя на предусилитель малых токов SR570. Версия 1.6 (03/2005). [Сайт производителя Stanford Research Systems]. URL: <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/SR570m.pdf> (дата обращения: 15.12.2014).
5. **Fisenko A. N., Kosov A. V., Kozak V. R. et al.** Coordinate-sensitive ionization chamber with high spatial resolution // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 2005. **543**, N 1. P. 361–364.
6. **Обзор** четырёхканального пикоамперметра TertrAMM. [2013]. [Сайт производителя CAENELS]. URL: <http://www.caenels.com/caenels/getattach.php?mod=TETRAMM&obj=mn&id=2749> (дата обращения: 15.12.2014).
7. **Обзор** четырёхканального пикоамперметра AH501D. [2013]. [Электронный ресурс компании Seiko Instruments Inc.]. URL: http://www.sii-ic.com/jp/segg/files/2013/07/AH501D_Flyer_2013-1.pdf (дата обращения: 15.12.2014).
8. **Спецификация** на высокоомные резисторы типа HVCB2512. [1.02.2014]. [Сайт производителя Stackpole Electronics, Inc.]. URL: <http://www.seielect.com/Catalog/SEI-hvc.pdf> (дата обращения: 15.12.2014).
9. **Техническая** документация на операционный усилитель LMP7721. Версия "D". [2013]. [Сайт производителя Texas Instruments]. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp7721.pdf> (дата обращения: 15.12.2014).
10. **Техническая** документация на источник высокого напряжения C4900-51 [июнь 2012]. [Сайт производителя Hamamatsu Photonics]. URL: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/C4900_TACC1013E05.pdf (дата обращения: 15.12.2014).
11. **Техническая** документация на микроконтроллер AduC845. Версия "C". [2012]. [Сайт производителя Analog Devices]. URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUC845-847-848.pdf (дата обращения: 15.12.2014).

12. **Спецификация** Internet-модуля NM7010A. Версия 2.6. [2007]. [Сайт производителя Wiznet Co]. URL: http://www.wiznet.co.kr/sub_modules/en/product/Product_Detail.asp?cate1=&cate2=&cate3=&pid=1033 (дата обращения: 15.12.2014).
13. **Дорохов Д. В., Купер Э. А., Шеромов М. А.** Электроника нового поколения для ионизационных камер // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2015. **79**, № 1. С. 18–22.
14. **Техническая** документация на АЦП ADS1256. Версия "К". [9.12.2013]. [Сайт производителя Texas Instruments]. URL: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=ADS1256&fileType=pdf> (дата обращения: 15.12.2014).

Поступила в редакцию 7 ноября 2014 г.
