

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Расчет быстродействия кремниевого вершинного детектора эксперимента CLAS12Е. О. Курбатов^{1,a}, М. М. Меркин^{1,b}, С. В. Рогожин²¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ).² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.E-mail: ^a kurbatov.phys@gmail.com, ^b merkinm@silab.sinp.msu.ru

Статья поступила 18.01.2012, подписана в печать 07.02.2012.

Эксперимент CLAS12 проводится с целью наблюдения обобщенных партонных распределений в эксклюзивных реакциях. Кремниевый вершинный детектор эксперимента CLAS12 должен обеспечить регистрацию всех продуктов реакции при ожидаемой высокой светимости. Представлены результаты расчета в программе GEANT4 ожидаемых физических загрузок в кремниевом вершинном детекторе. С учетом емкостной нагрузки, создаваемой подключенными сенсорами, определена частота шумовых срабатываний считывающей электроники. Для определения доли событий, которые могут быть потеряны по причине задержек в электронике считывания, выполнено компьютерное моделирование логики работы считывающей микросхемы FSSR2 архитектуры «data driven». При соотношении сигнал:шум 8:1 считывающая электроника может обработать ожидаемые загрузки при установленном пороге регистрации 0.4 м.и.ч.

Ключевые слова: кремниевые детекторы, микроэлектроника, проект CLAS12.

УДК: 621.382. PACS: 29.40.Gx.

Введение

Эксперимент CLAS12 проводится на непрерывном электронном пучке ускорителя CEBAF в Национальной ускорительной лаборатории им. Джефферсона (ТJNAF, Ньюпорт-Ньюс, США). Энергия электронов составляет 11 ГэВ, а ток пучка — 21 мкА, вследствие чего светимость достигает 10^{35} 1/с · см² [1].

Научная программа эксперимента CLAS12 посвящена исследованиям структуры нуклонов. Главной задачей эксперимента является получение так называемых обобщенных партонных распределений (ОПР) — принципиально нового способа описания внутренней структуры нуклона. ОПР, предложенные в работах [2–4], представляют собой плотности кварков, имеющих определенный импульс и одновременно с этим определенную поперечную координату. Они зависят от кинематических переменных x и ξ , доли импульса нуклона, которую переносят партоны, и разности доли продольного импульса, переносимого взаимодействующим партоном в начальном и конечном состояниях (2ξ) соответственно, а также от квадрата четырехмерного импульса, переданного нуклону t . Поведение каждого кварка описывается четырьмя ОПР: H_q , E_q , \tilde{H}_q , \tilde{E}_q , различающимися для разных ароматов кварков. При $t = \xi = 0$ ОПР переходят в обычное распределение партонов по импульсам; интегралы ОПР по t представляют собой формфакторы.

ОПР могут быть экспериментально определены в эксклюзивных процессах: глубоковиртуальном комптоновском рассеянии (ГВКР) и глубоковиртуальном рождении мезонов (ГВРМ). В ГВКР электрон выбивает кварк из нуклона, обмениваясь виртуальным фотоном

большой энергии. Кварк испускает фотон и возвращается в нуклон. Близким классом реакций является двойное глубоковиртуальное комптоновское рассеяние (ДГВКР). В этом процессе на выходе образуется виртуальный фотон, который затем распадается в лептонную пару.

С учетом сравнительно низких сечений этих реакций для их наблюдения необходима высокая светимость [5], а для обеспечения эксклюзивности — регистрация всех продуктов реакции. Кремниевый вершинный детектор эксперимента CLAS12 позволяет регистрировать продукты реакции практически в полном диапазоне пространственных углов в системе центра масс. Однако с учетом высокой светимости важной задачей является обеспечение соответствующего быстродействия считывающей электроники.

1. Описание кремниевого детектора

Кремниевый вершинный детектор (silicon vertex tracker) эксперимента CLAS12 (рис. 1) состоит из дисковой и цилиндрической частей. Цилиндрическая часть представляет собой четыре вложенных друг в друга цилиндра-«барреля». Баррели состоят из 10, 12, 18 и 24 модулей-секторов соответственно и имеют радиусы 6, 7.8, 11.9 и 16 см. Каждый модуль барреля составлен из двух детектирующих плоскостей, на плоскости три односторонних микростриповых кремниевых сенсора толщиной 300 мкм соединены последовательно, при этом общая длина стрипа достигает 30 см. На плоскости с шагом 75 мкм расположены 512 стрипов. Считывание осуществляется с каждого второго; одна плоскость обслуживается двумя считывающими микросхемами FSSR2 [6]. Диски расположены на расстояниях

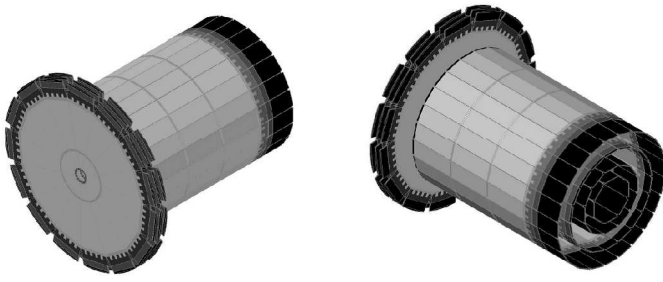


Рис. 1. Вид кремниевого вершинного детектора

23.8, 25.8 и 27.8 см от мишени, каждый диск разделен на 15 секторов. Модули дисковой части составлены из двух соединенных последовательно сенсоров. Внешний радиус чувствительно кремниевой области дисковой части — 17.5 см, внутренний — 1.9 см.

2. Физические загрузки

Сенсоры внутреннего барреля находятся ближе всего к мишени; как следствие, на них приходится наивысшие загрузки. Проведено моделирование в GEANT4 частоты регистрации фона и событий. Ожидаемые загрузки при использовании водородной мишени представлены в табл. 1. При величине порога регистрации 0.2, 0.4 и 0.6 м.и.ч. (м.и.ч. — минимально ионизирующая частица, величина потерь энергии в слое кремния толщиной 300 мкм равна 90 кэВ) общая частота событий во внутреннем барреле составляет 59, 16 и 11 МГц соответственно. Как видно, при пороге 0.2 м.и.ч. основной вклад вносят фотоны, при повышении порога их количество значительно уменьшается, также сокращается доля низкоэнергетичных электронов рассеяния, в то время как частота регистрации других продуктов реакции остается неизменной. Внутренний баррель считывается 20 микросхемами, в пересчете на одну микросхему частота событий в зависимости от установленного порога составляет 2.9, 0.8 и 0.55 МГц.

3. Шумовые загрузки

Для считывания сигнала с кремниевых сенсоров в эксперименте CLAS12 используются микросхемы FSSR2. Микросхема FSSR2 имеет 128 входных каналов; каждый канал оснащен зарядочувствительным усилителем, $CR - (RC)^2$ формирователем и дискриминатором. Формирователь имеет программируемое время формирования: 65, 85, 100 и 125 нс. Частота шумовых срабатываний дискриминатора f_n при заданном пороге Q_T определяется величиной шума усилителя Q_n [7]:

$$f_n = \frac{f_0}{2} e^{-Q_T^2/2Q_n^2}.$$

В этой формуле f_0 — частота перехода сигнала через нулевой уровень (частота Райса). Она определяется параметрами усилителя; в случае $CR - (RC)^2$ фильтра — временем формирования τ :

$$f_0 = \frac{1}{2\sqrt{3}\tau}.$$

В работе [8] было показано, что шум минимален при времени формирования 125 нс. Для этого времени формирования получаем $f_0 = 2.3$ МГц. Уровень

шума предусилителя в достаточно широких пределах линейно зависит от емкостной нагрузки на входе: $ENC = a + b \cdot C$. Параметры a и b определяются для каждого усилителя экспериментально. Результаты измерения зависимости шума от емкостной нагрузки для усилительного каскада микросхемы FSSR2 в режиме минимального шума приведены на рис. 2.

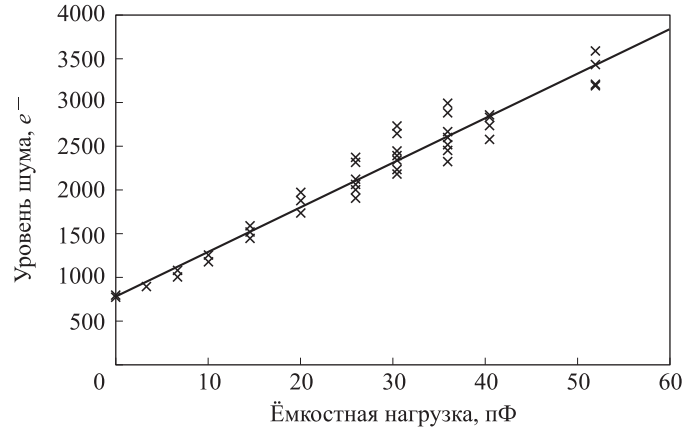


Рис. 2. Зависимость уровня шума от емкостной нагрузки

Полученные значения параметров:

$$a = 780 \pm 20e^-, \quad b = 50 \pm 2e^- \text{ пФ}.$$

Стрип длиной 30 см с при расстоянии до соседнего стрипа 75 мкм эквивалентен емкостной нагрузке 40 пФ [9]. Исходя из этого, уровень шума полноразмерного модуля составляет 2800 электронов. Амплитуда сигнала от м.и.ч. — 22 500 электронов, что дает соотношение сигнал: шум 8:1. Можно рассчитать частоту шумовых срабатываний в одном канале в зависимости от порога (табл. 2). В пересчете на 128 каналов микросхемы частота составит 23 МГц, 11 кГц, 0.3 Гц на микросхему, т. е. при пороге 0.2 м.и.ч. частота шумовых срабатываний в 8 раз превышает частоту физических событий.

4. Быстродействие считывающей электроники

Особенностью микросхемы FSSR2 является ее архитектура «data-driven»: если амплитуда сигнала в одном из каналов превышает установленный порог, контроллер микросхемы инициирует передачу данных, не дожидаясь какого-либо внешнего синхроимпульса. Логически 128 каналов микросхемы разбиты на 16 групп-«столбцов». Каждый столбец обслуживается своим логическим блоком «end-of-column» (EOC). Если в течение одного такта работы логики микросхемы (медленный синхроимпульс с периодом 132 нс) сигнал в канале превышает установленный порог, он сигнализирует своему блоку EOC о наличии данных и перестает принимать новые сигналы. Канал может снова принимать сигналы только после того, как данные из его ячейки памяти будут переданы на интерфейс передачи данных. События, произошедшие в течение одного такта в разных каналах, выстраиваются в очередь на передачу от канала 1 к каналу 128. Блок логики EOC

может находиться в четырех состояниях: LISTEN (ожидание событий), FULL (события готовы к передаче), OUTPUT (передача данных о событиях контроллеру микросхемы) и EMPTY (передача данных завершена). Переход между этими состояниями происходит по такту за исключением состояния EMPTY, в которое блок переходит сразу после завершения передачи данных. Если канал сообщает о поступившем сигнале, но его блок EOC не находится в состоянии LISTEN, обработка этого сигнала начнется только после начала следующего цикла.

Таблица 1

Ожидаемая частота (МГц) регистрации частиц во внутреннем барреле кремниевого вершинного детектора

Порог, м.и.ч.	π^-	e^-	γ	e^+	π^+	p	Всего
0.2	0.66	2.2	51	0.42	1.8	2.5	59
0.4	0.66	1.8	8.2	0.42	1.8	2.5	16
0.6	0.66	1.5	3.4	0.42	1.8	2.5	11

Таблица 2

Частота шумовых срабатываний в одном канале микросхемы в зависимости от установленного порога при шуме $2800e^-$

Величина порога, м.и.ч.	0.2	0.4	0.6
$f_{\text{threshold}}$	180 кГц	90 Гц	$3 \cdot 10^{-4}$ Гц

Логика передачи данных микросхемы работает по быстрому синхроимпульсу (частота 70 МГц). Микросхема может передавать данные по 1, 2, 4 или 6 линиям; используются оба фронта синхроимпульса, потому максимальная скорость передачи данных составляет 840 Мбит/с. Единица данных микросхемы, соответствующая одному событию, — 24 бита, таким образом, интерфейс передачи данных может передавать данные о более чем $3 \cdot 10^7$ событиях в секунду, что, как будет показано ниже, больше, чем может обработать логика микросхемы.

Исходя из логики работы микросхемы, можно выделить две возможных причины потери событий. Во-первых, два события, произошедших в одном канале за один такт, будут объединены в одно. Во-вторых, если канал ждет своей очереди на передачу данных, приходящие в него события будут потеряны. Для определения доли потерянных событий было проведено компьютерное моделирование быстродействия работы микросхемы FSSR2. На рис. 3 представлена зависимость доли потерянных событий от общей частоты событий на входе микросхемы.

Микросхема может обработать все ожидаемые физические загрузки с потерей менее 3% событий. Однако шумовые срабатывания при пороге 0.2 м.и.ч. приведут к слишком высоким загрузкам и потере около 10% событий при использовании шести линий передачи данных. При таком значении порога это сравнимо с долей физических событий, следовательно, такие потери

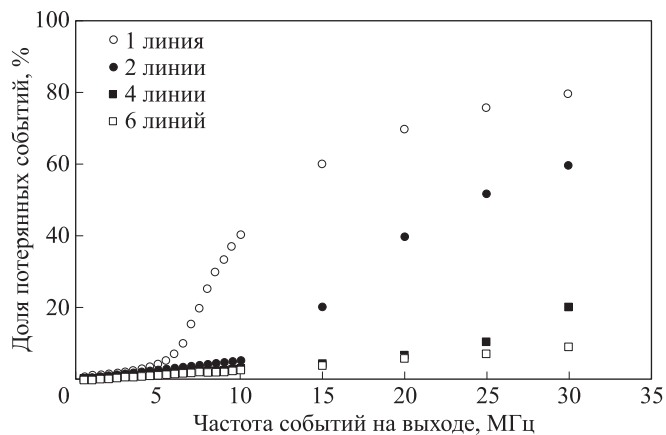


Рис. 3. Доля потерянных событий для одной микросхемы в зависимости от частоты событий на входе микросхемы и количества используемых линий передачи данных

неприемлемы. При повышении порога регистрации до 0.4 м.и.ч. падают шумовые загрузки и, как следствие, доля потерянных событий снижается до 1% даже при использовании одной линии передачи данных.

Выводы

Проведено компьютерное моделирование ожидаемых в эксперименте CLAS12 загрузок. Исходя из шумовых характеристик предусилителя FSSR2, рассчитана ожидаемая частота шумовых срабатываний: при пороге 0.2 м.и.ч. шумовые загрузки в 8 раз превышают физические. Выполнено моделирование работы логики считывания микросхемы FSSR2. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что микросхема в состоянии справиться с ожидаемыми физическими загрузками, но при достижимом соотношении сигнал:шум 8:1 нецелесообразно устанавливать порог регистрации на 0.2 м.и.ч. При использовании порога 0.4 м.и.ч. частота физических событий в слое детектора с максимальными загрузками составит 1 МГц на микросхему, а частота шумовых срабатываний — 11 кГц. При этом доля потерянных событий составит менее 1%.

Список литературы

1. http://www.jlab.org/div_dept/physics_division/GeV/doe_review/CDR_for_Science_Review.pdf
2. Müller D., Robaschick D., Geyer B. et al. // Fortschr. Phys. 1994. **42**. P. 101.
3. Ji X. // Phys. Rev. Lett. 1997. **78**. P. 610.
4. Radyushkin A. V. // Phys. Lett. B 1996. **380**. P. 417.
5. Guidal M., Vanderhaeghen M. // Phys. Rev. Lett. 2003. **90**. P. 12001.
6. Hoff J., Manghisoni M., Mekkaoui A. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. **53**, N 4. P. 2470.
7. Spieler H. Introduction to Radiation Detectors and Electronics. Lecture Notes — Physics 198. Spring Semester 1999.
8. Воронин А.Г., Карманов Д.Е., Меркин М.М., Рогожин С.В. // Приб. и техн. эксперимента. 2010. № 6. С. 34.
9. Карманов Д.Е., Меркин М.М., Рогожин С.В. // Приб. и техн. эксперимента. 2012. № 1. С. 35.

Calculating the performance of the CLAS12 Silicon Vertex Tracker**E. O. Kurbatov^{1,a}, M. M. Merkin^{1,b}, S. V. Rogozhin²**¹*D. V. Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia.*²*Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: ^a kurbatov.phys@gmail.com, ^b merkinm@silab.sinp.msu.ru.*

The CLAS12 experiment aims to determine the Generalized Parton Distributions in exclusive reactions. The CLAS12 Silicon Vertex Tracker has to provide for the registration of all particles in high luminosity. Results of a GEANT4 simulation of the expected rates in the SVT are presented. Frequency of noise hits is determined according to expected sensor capacitive load. In order to obtain the fraction of events lost due to readout electronics delays a computer simulation of the «data-driven» FSSR2 chip is performed. At a signal to noise ration of 8 to 1 the readout electronics can process the expected rates if a 0.4 m.i.p. threshold is selected.

Keywords: silicon detectors, microelectronics, CLAS12.

PACS: 29.40.Gx.

*Received 18 January 2012.*English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2012).**Сведения об авторах**

1. Курбатов Евгений Олегович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-5948, e-mail: kurbatov.phys@gmail.com.

2. Меркин Михаил Моисеевич — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (495) 932-9216, e-mail: merkinm@silab.sinp.msu.ru.

3. Рогожин Станислав Вадимович — аспирант; e-mail: rogozhin@silab.sinp.msu.ru.