

МОДУЛЬ КРЕМНИЕВОГО ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА
ЭКСПЕРИМЕНТА CLAS12

© 2012 г. Д. Е. Карманов, М. М. Меркин, С. В. Рогожин*

НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

Поступила в редакцию 18.02.2011 г.

Представлены результаты испытаний прототипа детектирующего модуля цилиндрической части трековой системы эксперимента CLAS12. Модуль состоит из четырех соединенных последовательно кремниевых микростриповых сенсоров суммарной длиной 30 см и микросхемы считывания FSSR2. Приведены результаты измерений сигнала вдоль модуля и уровня шума при различной длине стрипов модуля. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при длине стрипа до 30 см соотношение сигнал/шум составляет не менее 6 : 1 при регистрации однозарядных релятивистских частиц.

ПРОТОТИП МОДУЛЯ ТРЕКОВОЙ
СИСТЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТА CLAS12

Ключевым элементом центрального детектора эксперимента CLAS12 является микростриповый кремниевый вершинный трекер. Конструкция трекера более подробно описана в [1]. Трекер состоит из четырех вложенных друг в друга цилиндров и трех дисков. Цилиндрическая часть собрана из прямоугольных сенсоров, последовательно соединенных в линейки, в которых стрипы одного сенсора продолжают стрипы другого. Общая длина стрипа в модуле составляет от 10 см (внутренний цилиндр) до 30 см (внешний цилиндр).

Односторонние микростриповые кремниевые сенсоры для прототипа модуля разработаны в НИИЯФ МГУ и изготовлены ЗАО “НИИ Материаловедения” (Зеленоград) [1]. На каждом сенсоре расположено 512 стрипов, сигнал считывается только с четных, т.е. 256 стрипов. Шаг стрипов составляет 75 мкм, шаг считывания соответственно 150 мкм. Стрипы расположены под углом 1.5° к стороне сенсора, длина стрипа на сенсоре — 7.5 см. Толщина сенсоров, использованных в прототипе, 300 мкм. Электроника считывания подключается к стрипу через интегрированный с ним проходной конденсатор, выполненный в виде слоя оксида и нитрида кремния. Сенсор представляет собой стандартный прибор с емкостным съемом сигнала и подачей напряжения через поликремниевый резистор нагрузки. Для считывания сигналов используются микросхемы FSSR2 [2].

Перед установкой в прототип модуля каждый сенсор был протестирован. В ходе тестирования контролю подвергались несколько параметров. Перечислим наиболее существенные из них. Во-

первых, измерялось напряжение полного обеднения $V_{п.об}$, т.е. рабочее напряжение сенсоров. Далее контролировались суммарный ток утечки всех стрипов при рабочем напряжении $I_{общ}$, ток утечки $p-n$ -перехода каждого стрипа I_c и сопротивление интегрированного со стрипом поликремниевый резистора стрипа $R_{поли}$; эти параметры влияют на шумовые свойства системы “сенсор — считывающая электроника”. Также для каждого стрипа измерялись ток утечки и емкость проходного конденсатора $C_{пр}$. По значениям емкости проводился контроль обрывов стрипов и их замыканий друг на друга. Емкость существенно ниже среднего значения свидетельствует об обрыве металлизации и соответственно об обрыве стрипа. Если же емкости нескольких соседних стрипов в несколько раз превышают среднее значение, металлизации этих стрипов замкнуты между собой так же, как и сами стрипы. Кроме того, наличие тока утечки проходного конденсатора свидетельствует о его пробое, что приводит к неработоспособности канала электроники.

Параметры сенсоров, использованных при сборке прототипа модуля, приведены в табл. 1; они несколько отличаются от ожидаемых, но соответствуют требованиям эксперимента.

Модуль (см. рис. 1) составлен из четырех подключенных последовательно сенсоров и одной бескорпусной микросхемы FSSR2 [3]. Микросхема FSSR2 содержит 128 каналов, каждый из которых оснащен зарядочувствительным усилителем (з.ч.у.) со схемой фильтрации типа $CR-(RC)^2$ с изменяемой постоянной времени $t_{ф}$, схемой восстановления базовой линии и трехбитным аналогоцифровым преобразователем АЦП. Также микро-

Таблица 1. Ожидаемые и измеренные параметры микростриповых сенсоров

| Параметр | Ожидаемое значение | Измеренное значение |
|------------|--------------------|--|
| $V_{п.об}$ | <100 В | $20 \text{ В} < V_{п.об} < 30 \text{ В}$ |
| $R_{поли}$ | 1 МОм | $1 \pm 0.5 \text{ МОм}$ |
| $I_{общ}$ | <3 мкА | <1 мкА |
| I_c | <10 нА | ~1 нА |
| $C_{пр}$ | 120 пФ | 100 пФ |

схема включает в себя систему буферизации и считывания, построенную по принципам архитектуры data driven [4]. Между микросхемой и первым сенсором установлен так называемый “питч-адаптер”, согласовывающий шаг контактных площадок микросхемы (50 мкм) с шагом стрипов на сенсоре (150 мкм).

Схема подключения каналов показана на рис. 2: на первом сенсоре задействованы 24 канала, на втором и третьем – 16, на четвертом – 8. Таким образом, подключенные группы стрипов имеют длину 7.5, 22.5 и 30 см. Один из подключенных каналов микросхемы является тестовым; к выходам предусилителя и формирователя этого канала можно подключиться непосредственно.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И ВЕЛИЧИНЫ СИГНАЛА

В схеме фильтрации канала усилителя микросхемы FSSR2 реализовано четыре значения постоянной времени интегрирования-дифференцирования t_{ϕ} : 65, 85, 100 и 125 нс. Учитывая тот факт, что шумы в системах с использованием з.ч.у. обычно определяются так называемыми последовательными шумами (serial noise), которые пропорциональны $\sqrt{1/t_{\phi}}$, а также принимая во внимание общие требования по быстродействию системы считывания трековой системы CLAS12, измерения

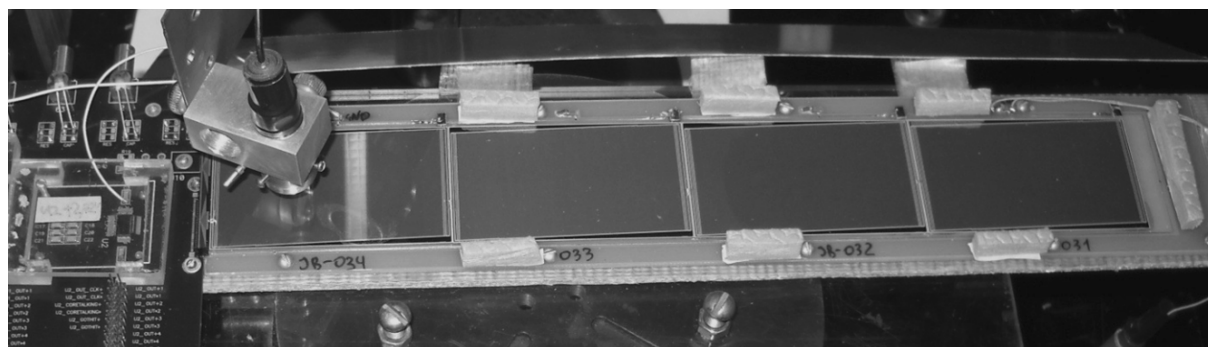
параметров прототипа модуля проводились при $t_{\phi} = 125 \text{ нс}$.

Для имитации частицы использовался импульсный красный ($\lambda = 650 \text{ нм}$) лазер, длительность импульса составляла 50 нс. Амплитуда импульса накачки подбиралась таким образом, чтобы сигнал от светового импульса в сенсоре соответствовал сигналу от однозарядной релятивистской частицы (так называемая минимально ионизирующая частица = м.и.ч.), которая оставляет в слое кремния толщиной 300 мкм заряд в $22500 e^-$ [5]. Для этого электроника считывания предварительно калибровалась импульсами напряжения от генератора: на вход тестового канала FSSR2 через небольшую калибровочную емкость 1.5 пФ подавался заряд, эквивалентный $22500 e^-$. Была измерена амплитуда сигнала на выходе предусилителя и формирователя, под которую затем подстраивалась амплитуда импульса накачки лазера.

Измерения уровня и формы выходного сигнала в зависимости от места попадания лазерного импульса в длинный стрип не выявили разницы между сигналами, приходящими в дальний участок стрипа (расположенный на расстоянии ~30 см от входа микросхемы) и в участок стрипа, непосредственно примыкающий к микросхеме. На рис. 3 представлены осциллограммы зарегистрированных микросхемой лазерного импульса, по амплитуде соответствующего м.и.ч., и α -частицы. Во втором случае величина сигнала существенно превосходит динамический диапазон усилительного каскада микросхемы FSSR2 и вводит его в насыщение.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ УРОВНЯ ШУМА ДЛЯ МОДУЛЯ

Упрощенная схема подключения стрипа кремниевого сенсора к каналу считывания микросхемы FSSR2 представлена на рис. 4; обычно выделяют [6] четыре основных источника шума:

**Рис. 1.** Внешний вид прототипа модуля.

– ENC_C – собственный шум з.ч.у. – микросхемы FSSR2, пропорциональный полной емкости C на входе усилителя;

– ENC_{I_c} – дробовой шум тока I_c утечки $p-n$ -перехода стрипа;

– $ENC_{R_{cm}}$ – тепловой шум сопротивления смещения R_{cm} между имплантацией стрипа и шиной смещения, в нашем случае $R_{cm} = R_{поли}$ (табл. 1);

– ENC_{R_c} – тепловой шум сопротивления R_c металлизации стрипа.

Здесь $ENC...$ – корень из дисперсии заряда (в электронах), поставляемого на вход з.ч.у. соответствующим источником шумов.

Полный шум в системе составит

$$ENC = \sqrt{ENC_C^2 + ENC_{I_c}^2 + ENC_{R_{cm}}^2 + ENC_{R_c}^2}. \quad (1)$$

Шум з.ч.у. ENC_C пропорционален полной емкости на входе усилителя; его зависимость от емкости нагрузки C_d обычно записывается в виде

$$ENC_C = a + bC_d. \quad (2)$$

Паразитная емкость $C_{п}$ здесь учтена в значении величины a . Для режима работы микросхемы с временем формирования 125 нс и отключенным восстановителем базовой линии были получены [1] следующие значения параметров:

$$a = 600 \pm 50 e, \quad b = 19 \pm 2 e/\text{пФ}. \quad (3)$$

Каждый подключенный стрип с учетом перемычек эквивалентен емкости $C_c = 13$ пФ; измеренная емкость питч-адаптера составляет $C_a = 8$ пФ.

Для остальных указанных выше составляющих мы воспользуемся расчетными формулами из [4], учитывая, что они получены для идеального $CR-RC$ -фильтра. В канале усилителя FSSR2 используется фильтр типа $CR-(RC)^2$; коэффициент превышения шума этого фильтра составляет 0.89 от аналогичного параметра $CR-RC$ -фильтра [7] – этот коэффициент учтен в расчетах.

При таком подходе дробовой шум тока утечки I_c рассчитывается по формуле

$$ENC_{I_c} = \frac{e}{2} \sqrt{\frac{I_c t_{\phi}}{q_e}}, \quad (4)$$

где q_e – заряд электрона, t_{ϕ} – время формирования сигнала. Для расчетов было взято значение тока утечки стрипа 1 нА.

Тепловой шум резисторов смещения определяется по формуле

$$ENC_{R_{cm}} = \frac{e}{q_e} \sqrt{\frac{kTt_{\phi}}{2R_{cm}}}, \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, R_{cm} – сопротивление резистора смещения.

Тепловой шум металлизации стрипов зависит от сопротивления металлизации R_c , эквивалентной емкости сенсора C_d и паразитных емкостей $C_{п}$:

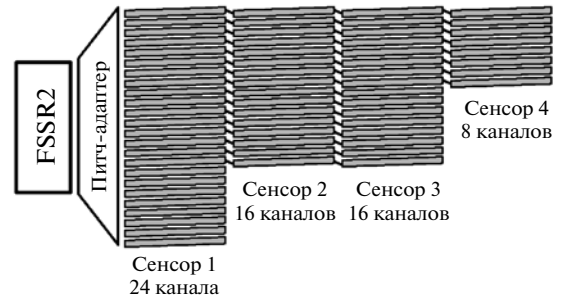


Рис. 2. Схема подключения каналов модуля к считывающей микросхеме.

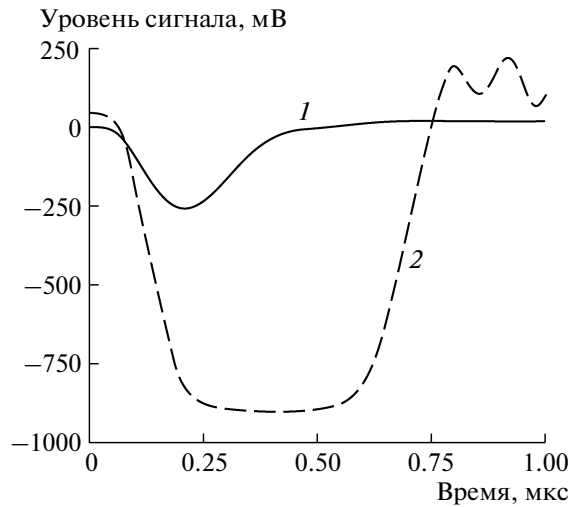


Рис. 3. Уровень сигнала на выходе формирователя для сигнала лазера амплитудой 1 м.и.ч. (1) и α -частицы (2).

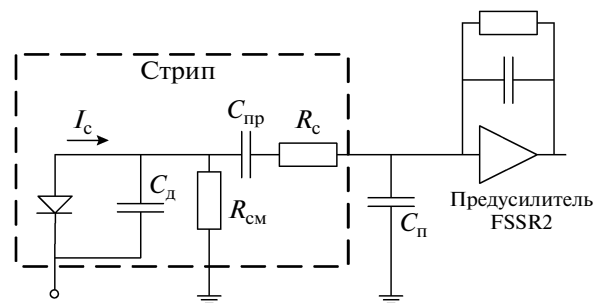


Рис. 4. Упрощенная схема подключения стрипа кремниевого сенсора к каналу считывания микросхемы FSSR2. C_d – емкость стрипа сенсора включает собственную емкость стрипа C_c и емкость линии адаптера C_a ; $C_{п}$ – паразитные емкости; $C_{пр}$ – емкость проходного конденсатора.

$$ENC_{R_c} = (C_d + C_{п}) \frac{e}{q_e} \sqrt{\frac{kTR_c}{6t_{\phi}}}. \quad (6)$$

Оценить значение паразитной емкости $C_{п}$ можно по соотношению параметров a и b (3); для более точного определения этой величины была

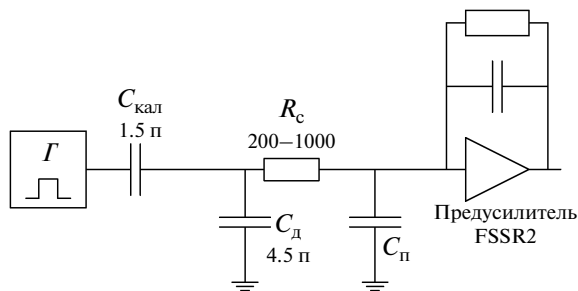


Рис. 5. Схема подключения генератора для измерения уровня шума. Для запуска считывания данных из измеряемого канала на него подавался импульс от генератора Γ через малую калибровочную емкость $C_{\text{кал}}$.

измерена зависимость уровня шума от подключенного по изображенной на рис. 5 схеме сопротивления. В этой схеме в качестве постоянной емкостной нагрузки был установлен конденсатор C_d ; сопротивление R_c изменялось от 200 до 1000 Ом.

Общий шум в такой схеме складывается из шума предусилителя с входной емкостью $C - ENC_C$ (2) и теплового шума последовательного сопротивления $R_c - ENC_{R_c}$ (6), который пропорционален сумме емкостей ($C_d + C_п$):

$$ENC = \sqrt{ENC_C^2 + ENC_{R_c}^2}. \quad (7)$$

Зная шумовую характеристику предусилителя, можно из измеренной зависимости $ENC(R_c)$ выделить зависимость теплового шума $ENC_{R_c}(R_c)$; она представлена на рис. 6.

Из этой зависимости было получено значение паразитной емкости $C_п = 33 \pm 1$ пФ. Значение согласовывается с полученным параметром a (3).

Суммарные оценочные значения уровня шума в e^- для разного числа подключенных сенсоров даны в табл. 2. Наибольший вклад вносят шумы ENC_C и ENC_{R_c} .

ИЗМЕРЕНИЯ ШУМА МОДУЛЯ

Измерения уровня шума проводились по описанной в [1] методике определения зависимости частоты регистрируемых сигналов от порога дискриминатора при постоянной частоте сигнала на

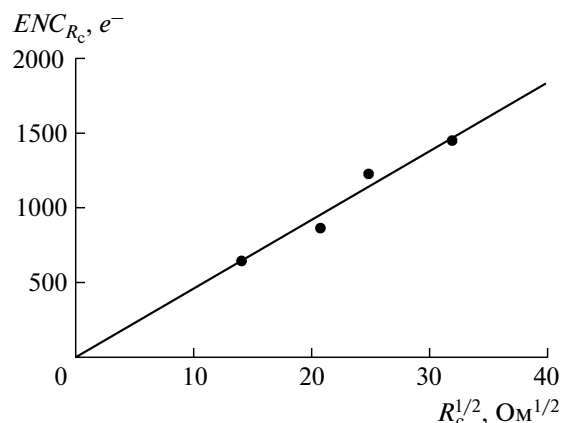


Рис. 6. Зависимость теплового шума ENC_{R_c} от подключенного сопротивления R_c .

входе. Для повышения точности измерений вначале была проведена калибровка дискриминатора микросхемы: измерялась зависимость порога сигнала от амплитуды входного сигнала. Полученная характеристика не является строго линейной (см. рис. 7): при большой величине сигнала усилительный каскад микросхемы приближается к насыщению, и коэффициент передачи падает.

Для измерений на модуле был выбран режим работы микросхемы с временем формирования 125 нс и отключенным восстановителем базовой линии. Для запуска лазера подавались импульсы частотой 120 кГц и длительностью 50 нс; амплитуда приблизительно соответствовала $22500 e^-$.

Расчетная зависимость уровня шума от длины стрипа, построенная по результатам, представленным в табл. 2, приведена на рис. 8, здесь же показаны измеренные значения шума для стрипов разной длины при $t_{\phi} = 125$ нс и отключенной схеме восстановления базовой линии. При максимальной длине стрипа 30 см измеренный уровень шума не превышает $3500 e^-$. Учитывая, что минимально ионизирующая частица образует в кремнии толщиной 300 мкм заряд в $22500 e^-$ [5], отношение сигнал/шум в прототипе модуля оказывается лучше, чем 6 : 1.

С учетом влияния наводок на длинную линию стрипа модуля результаты измерений достаточно

Таблица 2. Расчетные значения уровня шума в e^-

| Число сенсоров | Длина стрипа, см | ENC_C | ENC_{I_c} | $ENC_{R_{см}}$ | ENC_{R_c} | ENC |
|----------------|------------------|---------|-------------|----------------|-------------|-------|
| 1 | 7.5 | 880 | 35 | 240 | 1000 | 1400 |
| 2 | 15 | 1100 | 50 | 340 | 1700 | 2100 |
| 3 | 22.5 | 1320 | 60 | 410 | 2600 | 2900 |
| 4 | 30 | 1530 | 65 | 480 | 3400 | 3800 |

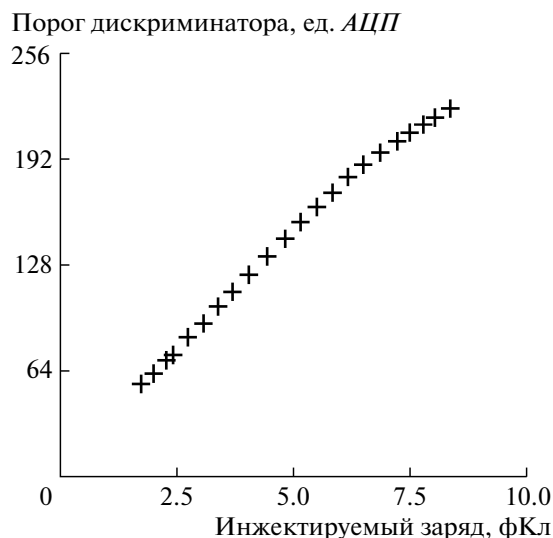


Рис. 7. Зависимость порога дискриминатора микросхемы от величины инжектируемого заряда.

хорошо согласуются с расчетами. Наблюдаемый “завал” уровня шума при большой длине стрипа может быть связан с ростом сопротивления его металлизации. Сопротивление R_c (см. рис. 5) отделяет вход усилителя от емкости стрипа, что должно сказываться на снижении шумовой составляющей ENC_C ; качественно эффект ясен, если R_c устремить к бесконечности, однако используемые для оценок шумов формулы [6] это не учитывают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлен и испытан первый полноразмерный прототип модуля трековой системы эксперимента CLAS12. Прототип включает четыре микростриповых сенсора и одну микросхему FSSR2, суммарная длина одного стрипа модуля достигает 30 см, активная толщина сенсоров 300 мкм. Проведенные измерения не выявили изменения формы и амплитуды сигнала вдоль стрипов модуля. Уровень шума при максимальной длине стрипа 30 см составляет $3500 e^-$, таким образом для реги-

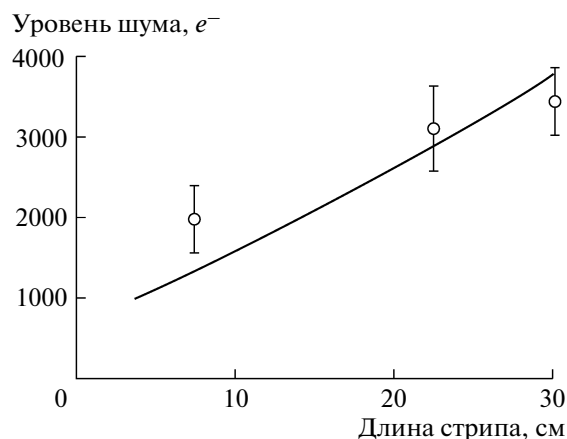


Fig. 8. Зависимость уровня шума от длины стрипа. Точки – измерения, линия – расчет.

страции однозарядных релятивистских частиц обеспечивается соотношение сигнал/шум > 6 . Измеренная шумовая характеристика согласуется с расчетной. Это подтверждает возможность использования микросхемы FSSR2 в составе полноразмерного модуля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А.Г., Карманов Д.Е., Меркин М.М., Рогожин С.В. // ПТЭ. 2010. №. С. 34.
2. Antonioli M.A., Bonneau P., Eng B. et al. CLAS-Note 2010-016. 2010; <http://www1.jlab.org/ul/Physics/Hall-B/clas/public/2010-016.pdf>
3. Hoff J., Manghisoni M., Mekkaoui A. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. № 4. P. 2470.
4. Аткин Э.В., Воронин А.Г., Королев М.Г. и др. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 61.
5. Ideas ASA. The VA1' Specifications v0.92. 2004.
6. Hartmann F. Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics. Berlin–Heidelberg: Springer, 2009. P. 26–27.
7. Акимов Ю.К., Игнатъев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989.