
ФИЗИКА ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. РАДИОФИЗИКА

ATOMIC NUCLEUS AND ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS. RADIO PHYSICS

УДК 539.1.074+621.37.01

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ «ТЕТРОД-JFET» И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АЛМАЗНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

К. Г. АФАНАСЬЕВ¹⁾, М. А. БАТУРИЦКИЙ¹⁾,
И. Ф. ЕМЕЛЬЯНЧИК¹⁾, А. В. ЛИТОМИН¹⁾, А. В. СОЛИН¹⁾

¹⁾НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ, ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Беларусь

Описан интегральный зарядочувствительный усилитель «Тетрод-JFET», разработанный в НИУ «Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий» БГУ и произведенный на ОАО «Интеграл» в рамках участия в программе Большого адронного коллайдера. Представлено исследование алмазных детекторов заряженных частиц с его помощью. Определена эффективная длина сбора заряда – основного параметра качества

Образец цитирования:

Афанасьев К. Г., Батурицкий М. А., Емельянчик И. Ф., Литомин А. В., Солин А. В. Интегральный зарядочувствительный усилитель «Тетрод-JFET» и его применение при исследовании алмазных детекторов заряженных частиц // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 1. С. 66–72.

For citation:

Afanaciev K. G., Batouritski M. A., Emeliantchik I. F., Litomin A. V., Solin A. V. Integrated charge sensitive amplifier «Tetrod-JFET» and its application for research of diamond charged-particles detectors. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 1. P. 66–72 (in Russ.).

Авторы:

Константин Геннадьевич Афанасьев – старший научный сотрудник лаборатории физики частиц.

Михаил Антонович Батурицкий – кандидат технических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории физики частиц.

Игорь Федорович Емельянчик – заведующий лабораторией физики частиц.

Александр Васильевич Литомин – старший научный сотрудник лаборатории электронных методов и средств эксперимента.

Александр Викторович Солин – старший научный сотрудник лаборатории электронных методов и средств эксперимента.

Authors:

Konstantin G. Afanaciev, senior researcher at the laboratory of particle physics.

k.afanaciev@gmail.com

Mikhail A. Batouritski, PhD (engineering), docent; leading researcher at the laboratory of particle physics.

m_batouritski@hep.by

Igor F. Emeliantchik, head of the laboratory of particle physics.

igor@hep.by

Alexander V. Litomin, senior researcher at the laboratory of electronic methods and means of experiment.

litomin@tut.by

Alexander V. Solin, senior researcher at the laboratory of electronic methods and means of experiment.

solin@hep.by

алмазного детектора. Для этого измерялся заряд, образовавшийся при прохождении минимально ионизирующей частицы, на основе которого рассчитывалась эффективная длина сбора заряда на базе известной величины количества электронно-дырочных пар, порождаемых минимально ионизирующей частицей на единице пути в алмазе.

Ключевые слова: алмазный детектор; зарядочувствительный усилитель; минимально ионизирующая частица; эффективная длина сбора заряда; физика частиц и высоких энергий.

INTEGRATED CHARGE SENSITIVE AMPLIFIER «TETROD-JFET» AND ITS APPLICATION FOR RESEARCH OF DIAMOND CHARGED-PARTICLES DETECTORS

*K. G. AFANACIEV^a, M. A. BATOURITSKI^a,
I. F. EMELIANTCHIK^a, A. V. LITOMIN^a, A. V. SOLIN^a*

^aResearch Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
11 Babrujskaja Street, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: I. F. Emeliantchik (igor@hep.by)

Integrated charge sensitive amplifier «Tetrod-JFET», which was developed by «National Center for Particle and High Energy Physics», BSU and produced by JSC «Integral» within the framework of collaboration in the Large Hadron Collider program, is described. Research of diamond charged-particles detectors is presented. Effective charge collection distance, the main parameter determining the quality of diamond detector, is measured. The procedure includes measurements of the charge created by a minimum ionization particle and its conversion to the charge collection distance using the known number of electron-hole pairs generated by the minimum ionization particle per unit length of the diamond transversing.

Key words: diamond detector; charge sensitive amplifier; minimum ionization particle; charge collection distance; particle and high energy physics.

В рамках участия в программе Большого адронного коллайдера в НИУ «Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий» БГУ (его правопреемником с 18 сентября 2015 г. является НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ) была разработана заказная интегральная микросхема (ИМС) зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) «Тетрод-JFET», который предназначен для работы в составе калориметрических детекторов.

Усилитель «Тетрод-JFET» реализован в виде интегральной схемы (ИС) с использованием базового технологического процесса Vi-JFET с проектными нормами 1,5 мкм. Производство микросхем было организовано на ОАО «Интеграл». Функциональная схема усилителя приведена на рис. 1.

Интегральная схема «Тетрод-JFET» – это малошумящий широкополосный ЗЧУ с головным полевым транзистором *p*-типа. Основные параметры микросхемы «Тетрод-JFET» приведены в таблице.

Главной характеристикой малошумящего ЗЧУ является эквивалентный шумовой заряд (ENC). Его можно приблизительно описать следующим образом [3]:

$$Q_{ENC} = K_{shape} \sqrt{Q_{ENC_s}^2 + Q_{ENC_p}^2},$$

где K_{shape} – коэффициент формы, определяемый усилителем-формирователем; Q_{ENC_s} и Q_{ENC_p} – вклады последовательной и параллельной составляющей шумов соответственно.

Вклады Q_{ENC_s} и Q_{ENC_p} можно упрощенно описать (принимая во внимание только основные источники шумов) следующим образом [1]:

$$Q_{ENC_s} = (C_{in} + C_f) \sqrt{\frac{kt}{3g_m \tau}}, \quad (1)$$

$$Q_{ENC_p} = \sqrt{\left(\frac{q_e \cdot I_{leak}}{4} + \frac{kt}{2R_f} \right) \cdot \tau}, \quad (2)$$

где C_{in} – емкость на входе (емкость детектора плюс входная емкость усилителя); C_f – емкость обратной связи; k – постоянная Больцмана; T – температура; g_m – крутизна (коэффициент передачи) входного полевого транзистора; τ – время формирования; q_e – заряд электрона; I_{leak} – ток утечки детектора; R_f – сопротивление резистора обратной связи.

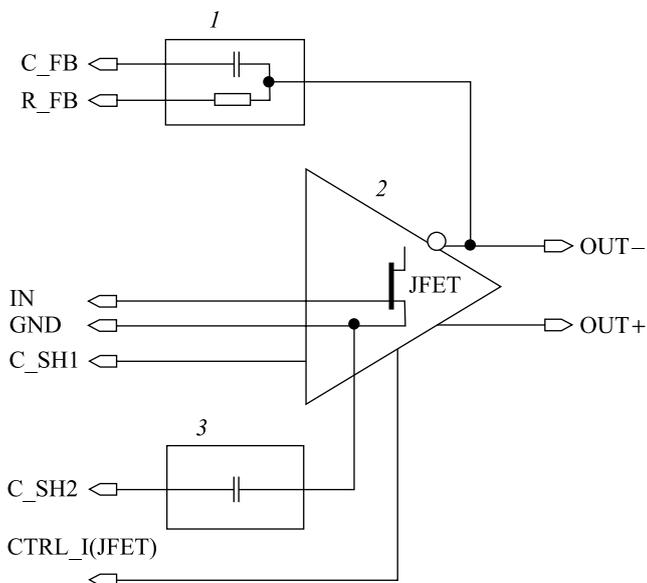


Рис. 1. Функциональная схема ЗЧУ «Тетрод-JFET»:
 1 – встроенные элементы обратной связи (используются при необходимости максимальной миниатюризации);
 2 – усилитель, построенный с использованием базового технологического процесса Bi-JFET; 3 – цепь частотной коррекции

Fig. 1. Functional scheme of CSA «Tetrod-JFET»:
 1 – built-in feedback elements (are used when maximum miniaturization is needed); 2 – amplifier developed with help of basic technologic process Bi-JFET; 3 – frequency correction circuit

**Основные параметры микросхемы
 «Тетрод-JFET» при напряжении питания ± 9 В
 Main parameters of «Tetrod-JFET»
 integrated circuit for the supply voltage ± 9 V**

Положительное напряжение питания, ток потребления	+ (6...9) В (2,71...3,16) мА
Отрицательное напряжение питания, ток потребления	- (6...9) В (5,56...5,65) мА
Ток головного транзистора	4,5 мА
Коэффициент усиления с разомкнутой обратной связью	> 500
Крутизна головного транзистора	6,9 мА/В
Входная емкость	16,7 пФ
Полоса пропускания	80 МГц
Линейный динамический диапазон	13 бит

Параметром, оказывающим большое влияние на шумы и поддающимся варьированию в широких пределах, является время формирования. Оно определяется усилителем-формирователем, включаемым после зарядочувствительного усилителя.

В схеме регистрации сигнала алмазного детектора в качестве усилителя-формирователя также использована микросхема «Тетрод-JFET» (рис. 2).

С увеличением времени формирования параллельная составляющая шума растет, а последовательная уменьшается, поэтому минимизация шумов состоит в поиске компромиссного значения времени формирования, при котором эти составляющие равны.

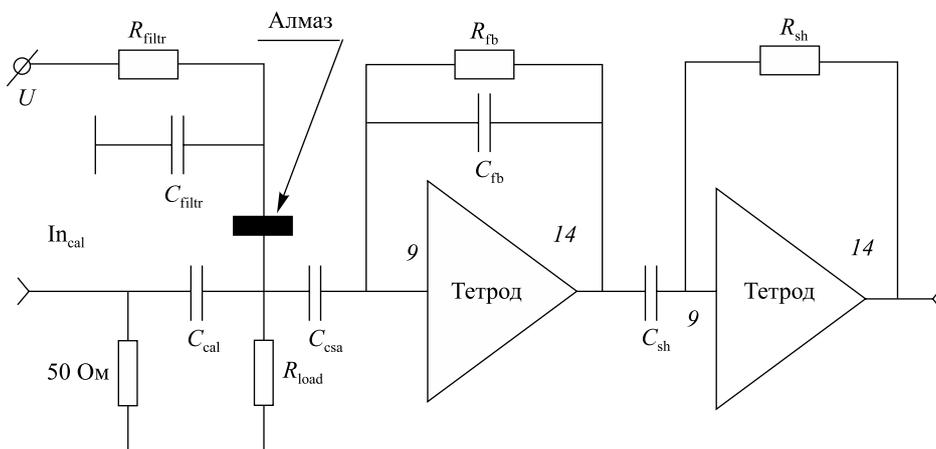


Рис. 2. Функциональная схема регистрации сигнала алмазного детектора:

In_{cal} – калибровочный вход; R_{filtr} и C_{filtr} образуют фильтр, сглаживающий пульсации высоковольтного источника питания;
 C_{cal} – калибровочная емкость; R_{load} – нагрузочный резистор;
 C_{csa} – конденсатор, обеспечивающий гальваническую развязку усилителя и детектора;
 R_{fb} – резистор обратной связи; C_{fb} – конденсатор обратной связи;
 C_{sh} и R_{sh} задают форму выходного сигнала; 9 – вход усилителя; 14 – выход усилителя

Fig. 2. Functional scheme of diamond detector signal registration:

In_{cal} – calibration input; R_{filtr} and C_{filtr} are comprising filter, which is flattening pulsations of high voltage source; C_{cal} – calibration capacity;
 R_{load} – load resistor; C_{csa} – capacitor, decoupling amplifier and detector;
 R_{fb} – feedback resistor; C_{fb} – feedback capacitor;
 C_{sh} and R_{sh} are shaping the output signal; 9 – amplifier input; 14 – amplifier output

Зависимость параллельных и последовательных шумов от времени формирования показана на рис. 3. Данная зависимость построена с помощью формул (1) и (2). Основные параметры, определяющие шумы, – крутизна головного транзистора (6,9 мА/В), входная емкость (16,7 пФ), входной ток утечки (2 нА), сопротивление резистора обратной связи (100 МОм).

Оптимальным, как видно из рис. 3, является время формирования, равное 800 нс. Поэтому формирователь RC-CR, образованный микросхемой «Тетрод» и элементами R_{sh} и C_{sh} (см. рис. 2), генерирует сигнал со временем нарастания 800 нс. Одновременно сигнал усиливается по напряжению до амплитуды, достаточной для того, чтобы подать его непосредственно на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Измеренное значение ENC составило $\sim 400 e^-$ при температуре 24 °С и емкости подключенного детектора $C_{det} \sim 3$ пФ. Эта величина сравнима с характеристиками специализированных лабораторных зарядочувствительных усилителей (например, Amptek A250, США).

Усилитель «Тетрод-JFET» был использован нами при измерении эффективной длины сбора заряда алмазных детекторов.

Эффективную длину сбора заряда приближенно можно представить как ту часть толщины детектора, которая участвует в акте регистрации (из-за наличия дефектов кристаллической решетки работает не вся толщина детектора).

Для измерения эффективной длины сбора заряда необходим поток заряженных частиц. В лабораторных условиях для этого обычно используют радиоактивные β -источники, например ^{90}Sr . Спектр β -источника ^{90}Sr непрерывный, поэтому все частицы, испускаемые им, для набора статистики использовать нельзя. Необходимо выделить частицы, вызывающие одинаковое энерговыделение при прохождении через детектор. Этому требованию отвечают частицы с правого края спектра (с энергией больше 1 МэВ), которые можно считать минимально ионизирующими [2]. Они обеспечивают удобство измерений и являются основным видом частиц, которые регистрируются детекторами, предназначенными для физики частиц и высоких энергий. В связи с этим чувствительность к минимально ионизирующим частицам очень важна для таких детекторов.

Эффективная длина сбора заряда в исследуемых детекторах измерялась при помощи экспериментального стенда, схематически изображенного на рис. 4. Электроны, испускаемые β -источником ^{90}Sr , коллимировались и затем проходили через исследуемый образец детектора. При этом электроны теряли энергию из-за ионизации материала детектора. Создаваемые в результате ионизации носители заряда начинали двигаться под воздействием приложенного к образцу электрического поля, что приводило

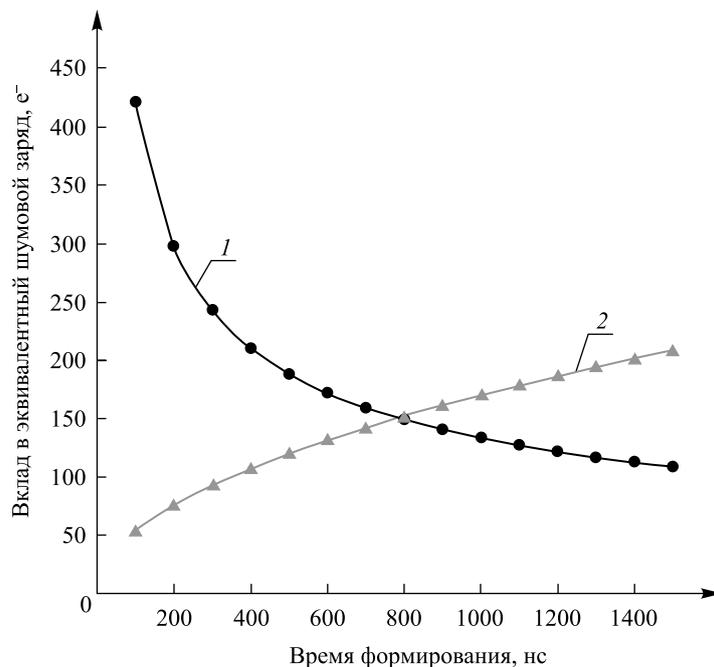


Рис. 3. Вклады последовательного и параллельного шумов в эквивалентный шумовой заряд усилителя «Тетрод-JFET»: 1 – последовательная составляющая шумов; 2 – параллельная составляющая шумов

Fig. 3. Contributions of sequence and parallel noises to the equivalent noise charge of «Tetrod-JFET» amplifier: 1 – sequence noise; 2 – parallel noise

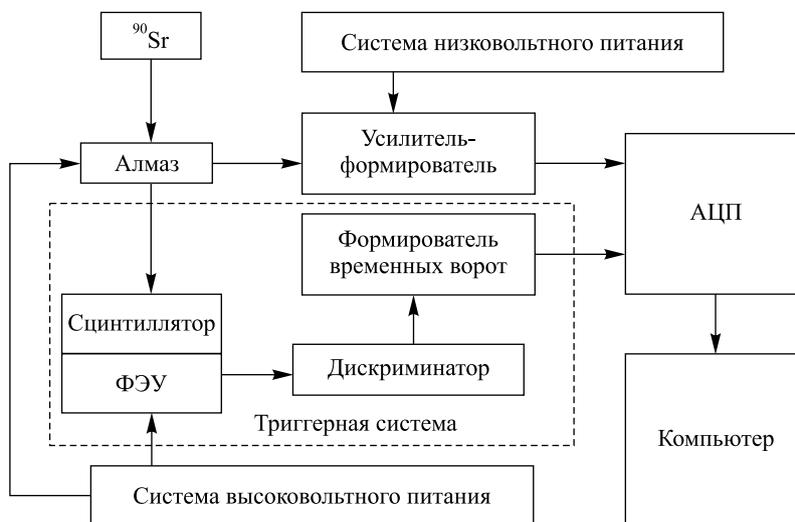


Рис. 4. Структурная схема измерительного комплекса для исследования алмазных детекторов заряженных частиц

Fig. 4. Structural scheme of measurement complex for research of diamond detectors of charged particles

к индуцированию электрического сигнала, который считывался зарядочувствительным усилителем. После этого электроны от источника ^{90}Sr проходили через второй коллиматор и попадали в два последовательно расположенных пластиковых сцинтилляционных детектора разной толщины. Сигналы со сцинтилляционных детекторов считывались при помощи двух фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Затем эти сигналы подавались на дискриминатор и после него – на схему совпадений. Путем подбора напряжения питания ФЭУ, толщины пластин сцинтиллятора и порогов дискриминатора удалось добиться

срабатывания схемы совпадений только в случае регистрации электронов с энергией больше 1 МэВ, вызвавших вспышки в обоих сцинтилляторах. Система коллиматоров и геометрия установки в сочетании с отбором электронов по энергии при помощи сцинтилляционного триггера, таким образом, позволяют утверждать, что большинство зарегистрированных электронов прошли через исследуемый образец и имели энергию свыше 1 МэВ. Такие электроны можно приблизительно считать минимально ионизирующими частицами (minimum ionizing particle, MIP), для которых хорошо известно среднее и наиболее вероятное энерговыделение в алмазе.

Сигнал триггерной системы запускал оцифровку сигнала ЗЧУ при помощи зарядового интегратора LeCroy 2249W (США). Данные оцифровки считывались управляющим компьютером и затем сохранялись в виде спектра. Пример такого спектра изображен на рис. 5.

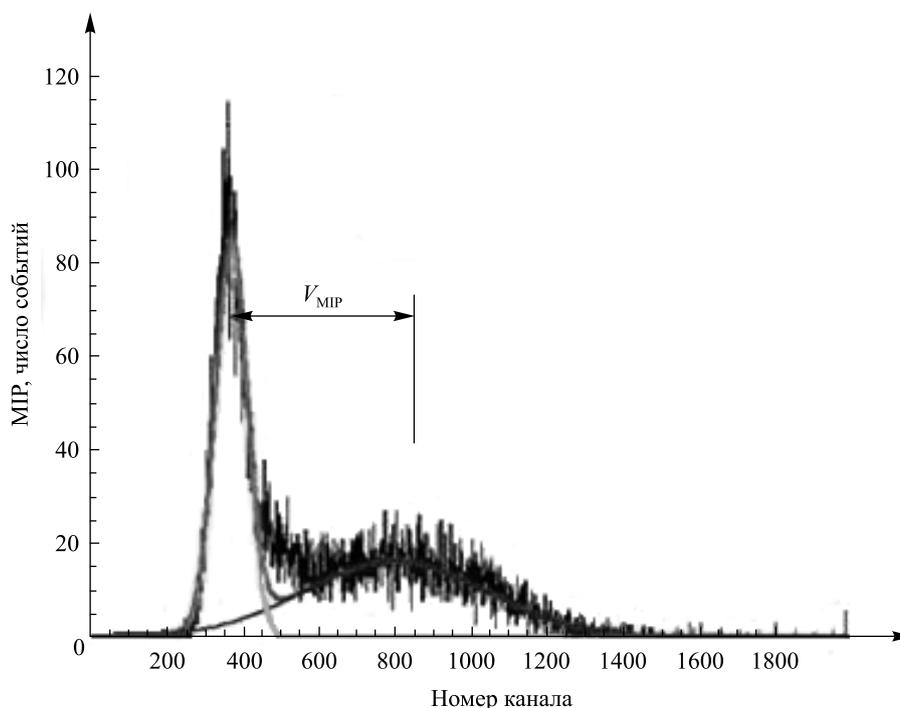


Рис. 5. Спектр отклика алмазного детектора на минимально ионизирующую частицу, зарегистрированный с помощью интегрального усилителя «Тетрод-JFET»

Fig. 5. Spectrum of response of diamond detector to minimum ionization particle, registered with help of «Tetrod-JFET» integrated circuit

Величина V_{MIP} , представленная на рис. 5, – это амплитуда отклика на минимально ионизирующую частицу, выраженная в каналах АЦП. Умножив ее на цену канала k , полученную при калибровке, легко получить значение заряда, генерированного при прохождении минимально ионизирующей частицы.

$$Q_{\text{MIP}} = V_{\text{MIP}} \cdot k.$$

Разделив этот заряд на известное из литературы количество электронно-дырочных пар, порождаемое минимально ионизирующей частицей на единице пути в алмазе ($36 \text{ e}^-/\mu\text{км}$ [3]), получаем эффективную длину сбора заряда:

$$\delta = \frac{Q_{\text{MIP}}}{36}.$$

Усилитель «Тетрод-JFET», примененный нами в исследовании алмазных детекторов заряженных частиц, можно использовать и для изучения других детекторов. При исследовании детекторов всегда необходим маломощный усилитель. Обычно его собирают из дискретных элементов. Применение усилителя «Тетрод-JFET» позволяет сократить время, затрачиваемое на сборку экспериментальной установки, и сосредоточить усилия на самих детекторах.

Продемонстрировано использование маломощного усилителя «Тетрод-JFET» в системе измерения эффективной длины сбора заряда алмазных детекторов заряженных частиц. Усилитель спроектирован в НИУ «Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий» БГУ и произведен ОАО «Интеграл», т. е. является полностью отечественным изделием.

Библиографические ссылки

1. Radeka V. Low-noise techniques in detectors // *Annual Rev. Nucl. Part. Sci.* 1988. Vol. 38. P. 217–277. DOI: 10.1146/annurev.ns.38.120188.001245.
2. Беспалов В. И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2008.
3. Tapper R. J. Diamond detectors in particle physics // *Rep. Prog. Phys.* 2000. Vol. 63, № 8. P. 1273–1316. DOI: 10.1088/0034-4885/63/8/203.

References

1. Radeka V. Low-noise techniques in detectors. *Annual Rev. Nucl. Part. Sci.* 1988. Vol. 38. P. 217–277. DOI: 10.1146/annurev.ns.38.120188.001245.
2. Bespalov V. I. [Interaction of ionizing radiation with matter]. Tomsk : Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2008 (in Russ.).
3. Tapper R. J. Diamond detectors in particle physics. *Rep. Prog. Phys.* 2000. Vol. 63, No. 8. P. 1273–1316. DOI: 10.1088/0034-4885/63/8/203.

*Статья поступила в редколлегию 04.09.2017.
Received by editorial board 04.09.2017.*