

УДК 621.382

А.О. Комаров, А.В. Рыбка, С.А. Соколов, И.Н. Шляхов, канд. физ.-мат. наук

## Электроника для обработки сигнала полупроводникового детектора ядерных излучений на основе соединения CdZnTe

В аппаратуре ядерной электроники основной задачей является регистрация сигнала детекторов, который представляет собой токовый импульс. Амплитуда и длительность полезного сигнала требует проведения специальной обработки, которая заключается в преобразовании токового импульса в напряжение, необходимое для дальнейшей обработки сигнала, а также оптимальную фильтрацию для увеличения отношения "сигнал/шум".

In nuclear electronics the main problem is the correct registration of detector signals, obtained in form of current pulses. A design of a charge sensitive preamplifier which operates in a broad frequency band and provides the charge collection almost without distortion is proposed.

**Ключевые слова:** зарядо-чувствительные предусилители, CdZnTe, детектор, гамма-излучение, сигнал, шум, моделирование.

### Введение

Решение проблем эффективного мониторинга окружающей среды и контроля состава радионуклидов в ядерном топливе и радиоактивных отходах остается актуальной во всем мире, включая и Украину, обладающую крупномасштабной атомной промышленностью. В настоящее время количество ядерных материалов возрастает при снятии с эксплуатации ядерных установок, в результате образуются новые радиоактивные отходы. Эффективный мониторинг невозможен без разработки высокочувствительных датчиков для регистрации ионизирующих излучений. Разработка и создание современных датчиков  $\gamma$ -излучения особенно актуальна для Украины, с учетом последствий Чернобыльской аварии и общий уровень техногенного загрязнения [1].

Основной задачей аппаратуры ядерной электроники является регистрация сигнала детекторов, который представляет собой токовый импульс. Параметры, в частности амплитуда и длительность полезного сигнала, требует проведения его специальной обработки, которая заключается в преобразовании токового импульса в напряжение, необходимое для даль-

нейшей обработки сигнала, и его оптимальную фильтрацию с целью увеличения отношения "сигнал/шум".

### 1. Разработка предусилителя для преобразования сигнала CdZnTe детектора

Анализ показывает, что при существующем многообразии схем зарядо-чувствительных предусилителей (ЗЧПУ), почти всегда в них можно выделить следующие три основные составные части.

1. Входной каскад, который усиливает входной сигнал и одновременно его инвертирует. Этот каскад, в наибольшей степени влияет на шумовые характеристики всего предусилителя, и чаще всего он выполняется с использованием полевого транзистора, включенного по схеме «с общим истоком». Для получения максимального усиления используют транзисторы с высоким значением крутизны переходных характеристик;

2. Каскад или несколько каскадов, усиливающие сигнал без поворота фазы и без инверсии. Такой каскад должен иметь низкое входное сопротивление, т.е. работать по принципу усилителя тока. Низкое входное сопротивление, являющееся нагрузкой входного каскада, необходимо для уменьшения влияния проходной емкости полевого транзистора. Нужно отметить, что в случае применения современных высокочастотных элементов требование компенсации проходной емкости не является обязательным. В простейшем случае роль такого усилителя тока может выполнять каскад, включенный по схеме с общей базой. Однако при этом не всегда достигается требуемый коэффициент усиления.

3. Выходной каскад зарядо-чувствительного усилителя должен обеспечить согласование высокоомной нагрузки усилителя тока и входного сопротивления последующих каскадов. Это может быть просто повторитель напряжения [2].

Таким образом, схема ЗЧПУ, если рассматривать ее без обратной связи, представляет собой инвертирующий усилитель напряжения с большим коэффициентом усиления. Введение конденсатора обратной связи с выхода на вход усилителя преобразует его в интегратор. При этом амплитуда выходного импульса напряже-

ния становится пропорциональной площади входного импульса тока, поступающего из детектора, т.е. измеряемому входному заряду. Тем самым реализуются условия адекватной передачи заряда, генерируемого одиночным квантом излучения в детекторе.

При разработке предусилителя для преобразования сигнала полупроводникового детектора на базе CdZnTe необходимо также учитывать ряд следующих специфических требований.

1. В CdZnTe детекторах время сбора электронов и дырок отличается почти на порядок. Из-за этого предусилитель должен обладать широкой, а главное, равномерной полосой пропускания. Невыполнение этого требования приводит к потере или искажению части собираемого заряда и, в результате, к ухудшению шумовых характеристик предусилителя.

2. Приборы радиационного контроля должны работать в широком частотном диапазоне. Следовательно, собственная постоянная времени предусилителя должна быть не более единиц микросекунд. Для выполнения этого требования необходимо уменьшать емкость обратной связи и вводить цепь компенсации собственной емкости детектора [3].

Учитывая сказанное, при разработке предусилителя было проведено комплексное компьютерное моделирование схем, опубликованных в литературе [2, 4]. Целью моделирования было определение частотных характеристик различ-

ных схем предусилителей. Для моделирования использовался стандартный пакет программ Micro-Cap 7.0.

Упрощенная схема предусилителя, ставшего классическим для детекторов на основе Ge приведена на Рис. 1. Уровень шумов данной схемы определяется в основном типом и режимом работы полевого транзистора J1, а также номиналом и типом резистора обратной связи R2. При моделировании в качестве J1 был выбран транзистор 2N4416, т.к. он наиболее часто используется в промышленных предусилителях, Q2 – BC547C, Q1 – BC557C. Эквивалент детектора образуют резистор R1, конденсатор C2 и генератор V4. Частотная характеристика схемы представлена на Рис. 2.

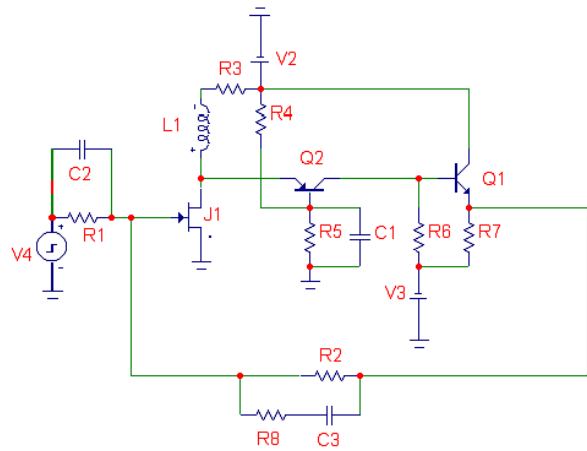


Рис. 1. Схема предусилителя для Ge детектора

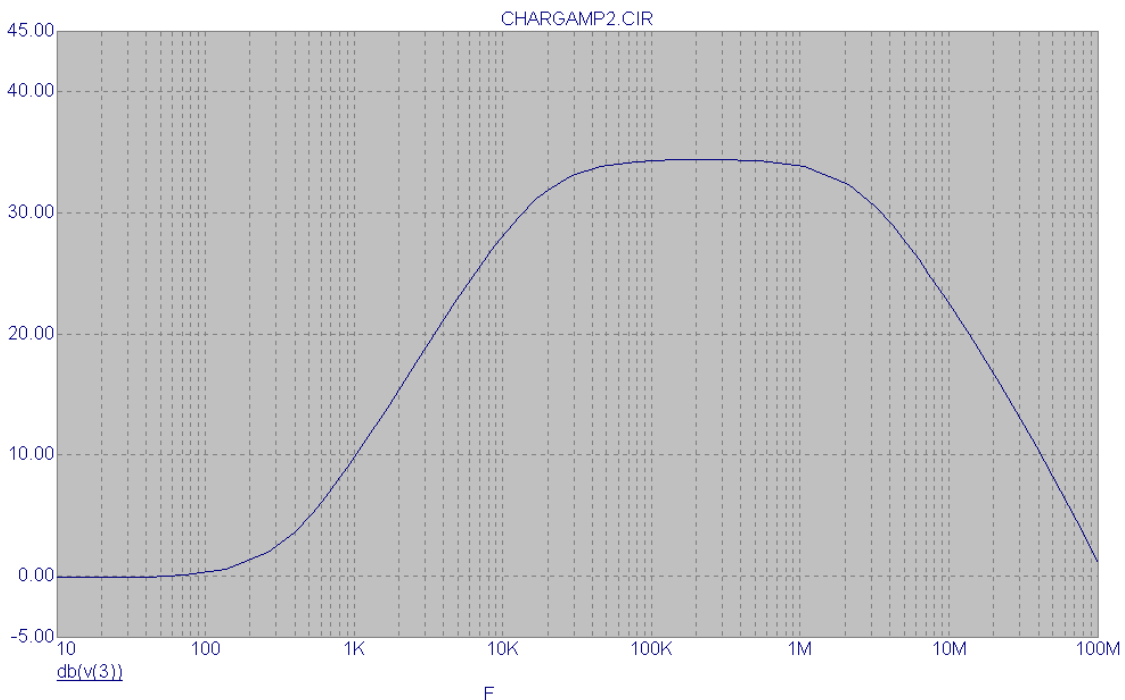


Рис. 2. Частотная характеристика предусилителя для Ge детектора

На Рис. 2 по оси Y отложен коэффициент усиления в дБ, а по оси X частота в Гц. Из графика видно, что в области частот больше 2 МГц усиление схемы начинает уменьшаться. Т.е., при использовании этого усилителя для детектора на основе CdZnTe произойдет потеря части собираемого заряда и ухудшение шумовых характеристик измерительного тракта. Так, у детектора, размеры которого 5×5×2 мм<sup>3</sup>, время собирания электронов составляет порядка 100 нс. Следовательно, для обеспечения сбора заряда без искажений сигнала полоса пропускания предусилителя должна быть не менее 10 МГц. Изготовление предусилителя по схеме, приведенной на Рис. 1, и испытание его опытного образца, подтвердило правильность такого вывода.

Схема, представленная на Рис. 3, была результатом усовершенствования и оптимизации схемного решения, предложенного в работе [2]. В отличие от прототипа, в данном случае нагрузкой полевого транзистора является цепочка R1L2, улучшающая частотные свойства первого каскада усиления. Кроме того, были изменены параметры корректирующей цепи R6L1. В качестве J1 использовался транзистор 2N4416, а X2 - операционный усилитель типа AD811. Для компьютерного моделирования характеристик

усилителя была создана эквивалентная модель детектора, включающая резистор R2, конденсатор C3 и генератор V4. Полученная таким образом частотная характеристика схемы представлена на Рис. 4. Из Рис. 4 видно, что участок равномерного усиления, соответствующий степени неравномерности не более 3 дБ, распространяется до частоты 40 МГц.

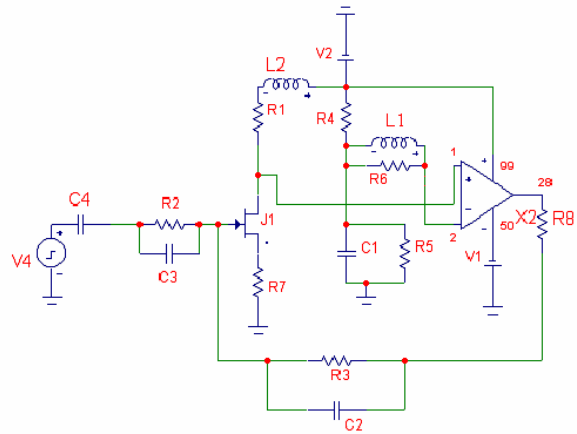


Рис. 3. Оптимизированная схема предусилителя

Таким образом, при применении данной схемы сбор электронной компоненты заряда детектора обеспечивается практически без искажений и потерь.

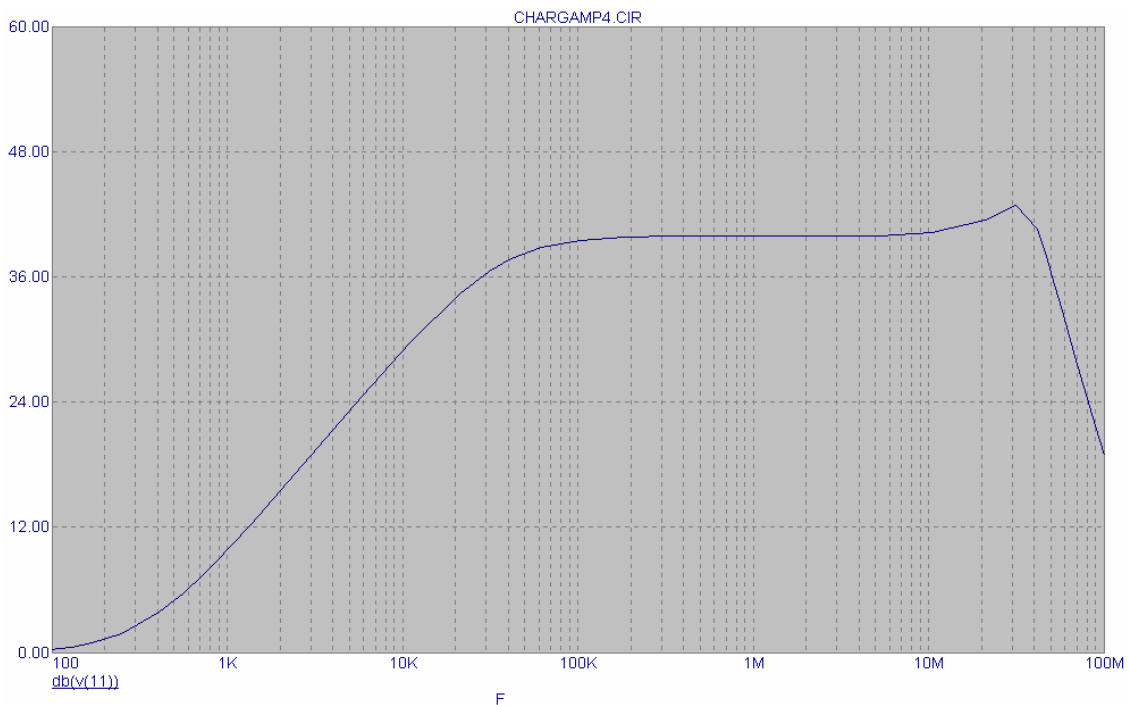


Рис. 4. Частотная характеристика оптимизированного предусилителя

На рис. 5 приведена фотография разработанной и оптимизированной схемы предусилителя.

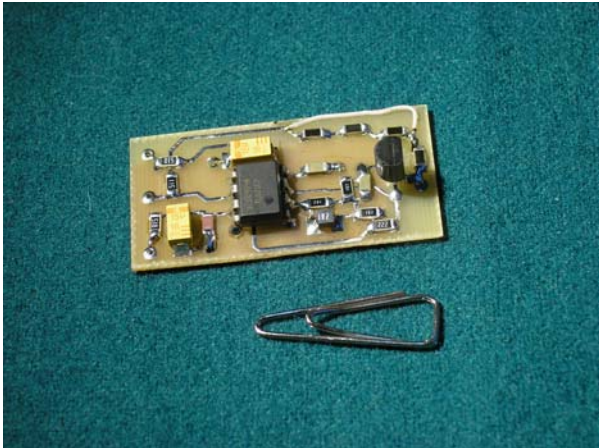


Рис. 5. Внешний вид оптимизированного предусилителя

## 2. Экспериментальные исследования

Испытания предусилителя с детекторами дозиметрического качества на основе CdZnTe проводились при комнатных температурах с использованием спектрометрического тракта «CANBERRA». Предусилитель с детектором помещались в экранированный корпус блока детектирования (БД). Функциональная схема подключения БД представлена на Рис. 6.

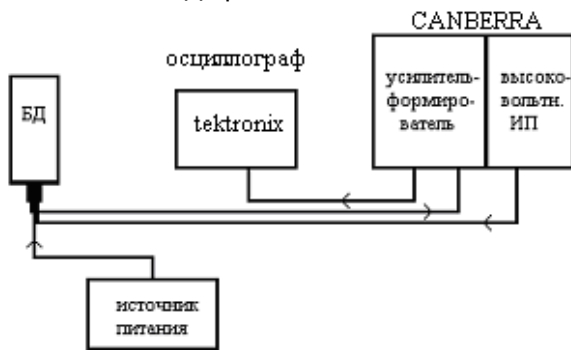


Рис. 6. Функциональная схема подключения

Во время эксперимента на детектор подавалось напряжение смещения порядка 200 В. Перед БД, на расстоянии 0,5 см от детектора, размещался образцовый гамма-источник  $^{241}\text{Am}$  из набора ОСГИ (образцовый спектрометрический гамма-источник). Сигнал с ЗЧПУ, после обработки усилителем-формирователем (УФ), выводился на осциллограф «Tektronix-TDS2022C» (Рис. 7). Время формирования УФ составляло порядка 1 мкс при коэффициенте усиления 1000.

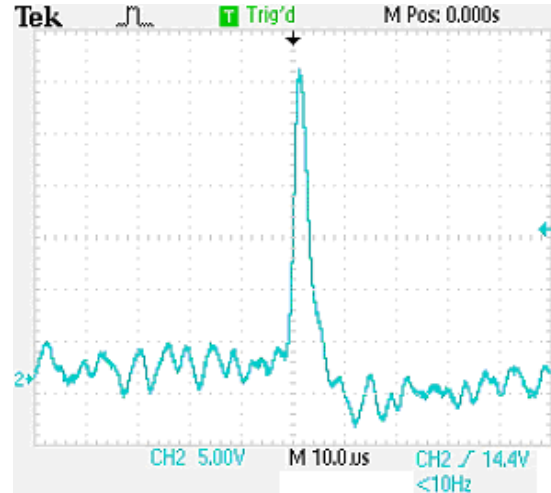


Рис. 7. Форма сигнала от  $^{241}\text{Am}$  после преобразования УФ

Из графика видно, что выходной сигнал усилителя-формирователя имеет крутой фронт, при этом длительность импульса составляет около 4 мкс. Таким образом, испытания оптимизированного ЗЧПУ для БД гамма-излучения с детекторами на основе CdZnTe подтвердила правильное направление исследований, выбранное при моделировании схемы.

Для проведения радиационных испытаний на основе разработанного ЗЧПУ была изготовлена мелкосерийная партия БД (Рис. 8). Испытания проведены в ННЦ «Институт метрологии» на дозиметрических проверочных установках УГВ-1 и УГВ-2 с радиоактивными источниками  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ .



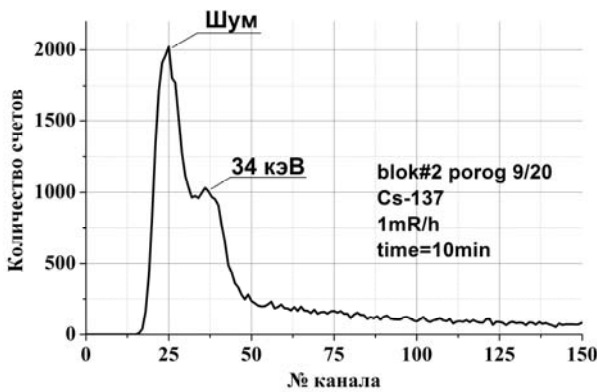
Рис. 8. БД гамма-излучения состоящий из разработанного ЗЧПУ и CdZnTe детектора

Анализ полученных результатов позволил определить чувствительность дозиметрических БД. Ниже, в таблице 1, приведены значения чувствительности для каждого из испытанных блоков.

**Таблица 1. Чувствительность блоков детектирования**

Блок, №	1	2	3	4	5
Чувствительность по <sup>137</sup> Cs, имп./мкР	112	111	92	100	100
Чувствительность по <sup>60</sup> Co, имп./мкР	67	68	56	60	62

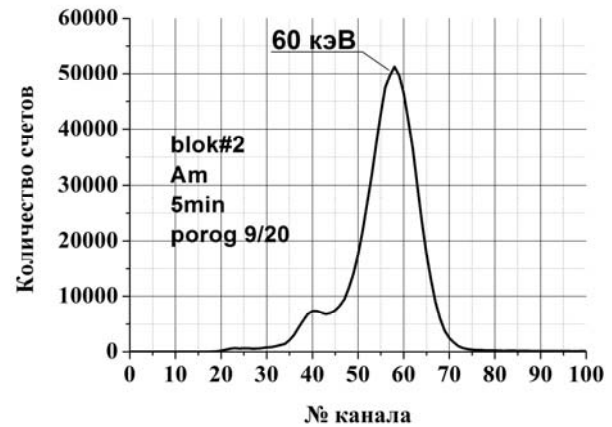
Кроме того, для дальнейшей коррекции энергетической зависимости чувствительности во время испытаний, были получены амплитудные распределения сигналов от радионуклидов <sup>137</sup>Cs (Рис. 9) и <sup>241</sup>Am (Рис. 10) различной мощности дозы. Для сравнения на Рис. 11 и Рис. 12 представлены амплитудные распределения сигнала дозиметрического БД от источников <sup>241</sup>Am и <sup>152</sup>Eu из набора ОСГИ.



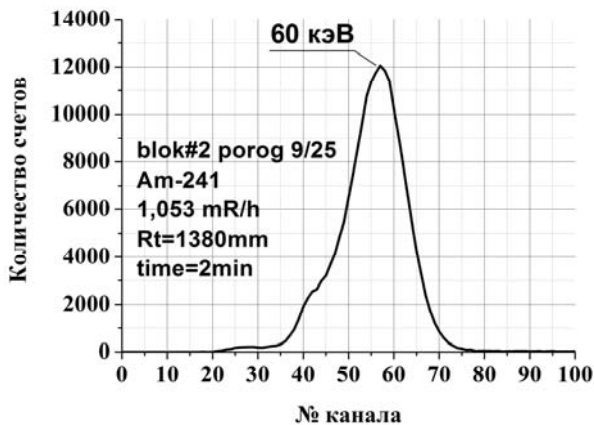
**Рис. 9. Амплитудное распределение <sup>137</sup>Cs**

кажение части собранного заряда и ухудшение шумовых характеристик предусилителя.

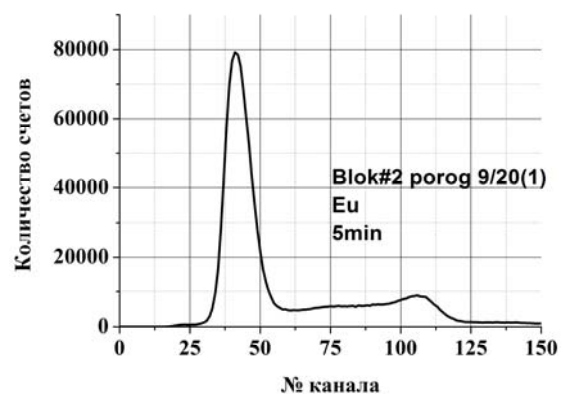
Проведенные комплексные исследования электрофизических характеристик полупроводниковых детекторов на основе CdZnTe позволили заменить детектор эквивалентной электрической схемой для осуществления компьютерного моделирования и оптимизации схемы ЗЧПУ. Показано, что, поскольку дозиметр должен работать в широком диапазоне импульсной нагрузки, истинная постоянная времени предусилителя не должна превышать нескольких микросекунд. Для реализации этих требований ёмкость обратной связи уменьшена, и она включена в цепь компенсации внутренней ёмкости детектора.



**Рис. 11. Амплитудное распределение <sup>241</sup>Am**



**Рис. 10. Амплитудное распределение <sup>241</sup>Am**



**Рис. 12. Амплитудное распределение <sup>152</sup>Eu**

**Выводы**

В работе показано, что из-за большой разницы времени сбора заряда электронов и дырок, предусилитель для детекторов на основе CdZnTe должен работать в широком и устойчивом частотном диапазоне. Несоблюдение этого требования повлечет за собой потерю или ис-

В результате исследований разработан ЗЧПУ, который имеет частотную характеристику с участком равномерного усиления, степень неравномерности которого не превышает 3 дБ, распространяющийся до частоты 40 МГц.

Исследования блоков детектирования гамма-излучения на основе CdZnTe и оптимизиро-

ванных ЗЧПУ показали высокие значения чувствительности ~ 100 имп./мкР ( $^{137}\text{Cs}$ ).

### Литература

1. *Вопросы дозиметрии и радиационная безопасность на атомных электрических станциях*, под. редакцией А.В. Носовского, "Укратомиздат", Славутич, 1998
2. *Hamrita H. et all / Nuclear Instruments and methods in Physics Research A 531 (2004) 607-615*
3. *Захарченко А.А. и др. / Вестник ХНУ Серия физическая "Ядра, частицы, поля". –2007, № 784, вып. 4 (36), – с. 85—92.*
4. *Eberth J., Simpson J. / Progress in Particle and Nuclear Physics 60 (2008) 283–337*

*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины*