

УДК 621.375.4:539.1.075

К. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО, И. Л. ЗАЙЦЕВСКИЙ, Л. И. ТАРАСЕНКО,  
А. В. ПЕРЕВЕРТАЙЛО, Э. А. ШКИРЕНКО, А. С. КРЮКОВ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ

E-mail: detector@carrier.kiev.ua

## МОДУЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*Рассмотрено применение зарядочувствительных предусилителей и спектрометрических усилителей для преобразования и усиления сигналов твердотельных детекторов, указаны факторы, определяющие энергетическое разрешение спектрометрического тракта. Описана техника спектрометрии для контроля качества  $p-i-n$ -фотодиодов, приведена структура многоцелевой спектрометрической системы, схемные решения ее отдельных узлов, указаны их особенности и параметры.*

*Ключевые слова: зарядочувствительный предварительный усилитель, спектрометрический усилитель, модульный спектрометр,  $p-i-n$ -фотодиод.*

Исследования спектров низкоэнергетических источников ионизирующего излучения, зарегистрированных  $p-i-n$ -детекторами, изготовленными по различным технологиям [1, 2], показали зависимость энергетического разрешения от токов утечки  $p-i-n$ -диодов, эффективности сбора заряда, квантовой эффективности (для  $p-i-n$ -фотодиодов в сцинтилляционном детекторе) и др. То есть, можно сказать, что спектральная характеристика является «зеркалом», отражающим электрофизические показатели  $p-i-n$ -диодов и детекторов на их основе, обобщенным показателем качества технологии их изготовления и характеристик. Поскольку во многих применениях параметры энергетического разрешения спектральных характеристик являются основным критерием использования детекторов, очевидно, что они могут использоваться для оценки качества приборов и технологии их изготовления. Однако спектрометрия является сложным и дорогостоящим инструментом, поэтому она зачастую недоступна на этапе изготовления кристаллов  $p-i-n$ -диодов. Существующие спектрометрические системы, как правило, являются стационарными с жестко установленным диапазоном параметров, что создает ряд ограничений для получения спектральных характеристик изделий и подбора усилительного тракта, подходящего для разных типов детекторов.

Для применения спектрометрии при оценке качества технологии и характеристик детекторов необходимо иметь простую и относительно дешевую спектрометрическую аппаратуру, обладающую при этом высокими параметрами по энергетическому разрешению. Такая аппаратура представляет интерес также для разработчиков приборов при проведении различных эксперименталь-

но-конструкторских работ и может поставляться вместе с детекторами. В настоящей работе решается проблема создания такой спектрометрической аппаратуры, выполненной в виде набора модулей, и показывается ряд ее применений как для оценки качества  $p-i-n$ -детекторов и технологии их изготовления, так и в «стартовых» наборах («Start Kit»).

### Основные принципы построения спектрометрической установки. Зарядочувствительный предусилитель и спектрометрический усилитель

Сигнал в полупроводниковом детекторе первоначально возникает как заряд электронов и дырок, образовавшихся при взаимодействии детектора с частицей или гамма-квантом. Этот сигнальный заряд создает на емкости детектора импульс напряжения очень малой амплитуды (десятки или сотни микровольт), который недостаточен для дальнейшего использования в регистрирующей аппаратуре и приборах и требует усиления [3, 4]. В настоящее время стандартным подходом к усилению сигнала детектора является преобразование заряда в напряжение с помощью зарядочувствительного предусилителя (ЗЧПУ), который схематически изображен на рис. 1. Он состоит из полевого транзистора Т и усилителя У с цепью обратной связи, содержащей емкость  $C_f$  и резистор восстановления исходного уровня напряжения  $R_f$ . ЗЧПУ широко используется с полупроводниковыми детекторами, т. к. его характеристики преобразования не зависят от изменения емкости анода детектора [3–5]. Это очень важное обстоятельство, поскольку емкость  $p-n$ -перехода детектора сильно меняется при изменении напряжения обратного смещения, что снижает точность преобразования за-

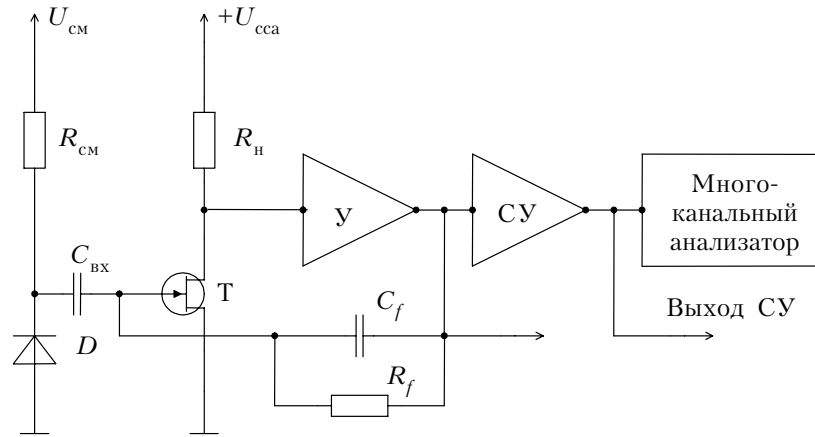


Рис. 1. Структурная схема типичного спектрометра:

$D$  – полупроводниковый детектор;  $Y$  – зарядочувствительный предусилитель;  $R_f$  – резистор восстановления исходного уровня;  $C_f$  – конденсатор обратной связи;  $SU$  – спектрометрический усилитель

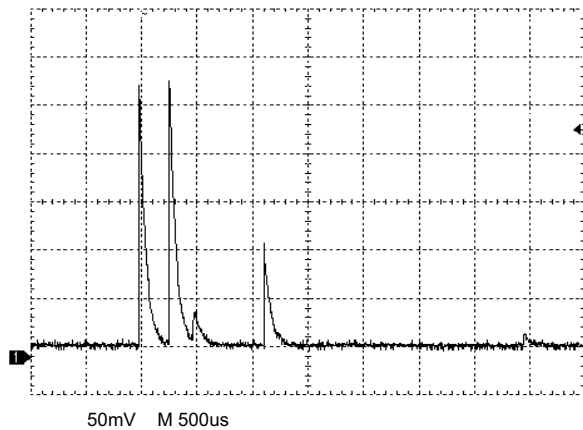


Рис. 2. Осциллограмма выходного сигнала реального ЗЧПУ для схемы с резистивной обратной связью

ряда в амплитуду импульса напряжения, которая необходима для спектрометрии. Сигналы, снимаемые с кремниевых детекторов, малы, кроме того необходимо обеспечить малые шумы входных цепей предусилителя. Для этого во входных цепях ЗЧПУ используют полевые транзисторы с низким уровнем шумов. Спектрометрический усилитель (**СУ**), следующий за ЗЧПУ, выполняет функцию оптимальной фильтрации для повышения отношения сигнал/шум, обеспечивает усиление сигнала до требуемого уровня и формирование симметричного сигнального импульса колоколообразного вида, подобного функции Гаусса, для дальнейшей обработки в многоканальном анализаторе (**МКА**) спектрометра (рис. 1).

Отрицательная обратная связь по заряду осуществляется конденсатором  $C_f$ , имеющим малую емкость. Коэффициент усиления  $k$  схемы усилителя  $Y$  при разомкнутой обратной связи больше 10000.

Амплитуда выходного сигнала ЗЧПУ определяется зарядом, образованным в детекторе ионизирующей частицей, и емкостью обратной связи  $C_f$  и практически не зависит от емкости детектора и напряжения смещения на детекторе. Конденсатор обратной связи  $C_f$  должен иметь высокую стабильность. Чем меньше емкость  $C_f$ , тем выше выходной сигнал, однако уменьшение  $C_f$  ниже 0,1 – 0,5 пФ при выполнении схемы на дискретных компонентах повышает вклад паразитных емкостей, что ухудшает стабильность работы схемы.

Выходной сигнал реального ЗЧПУ в виде импульсов на экране осциллографа для схемы с резистивной обратной связью, работающей с кремниевым детектором, показан на **рис. 2** [6]. На **рис. 3** показаны параметры переднего фронта импульса, параметры спада импульса ЗЧПУ и осциллограммы выходных сигнальных псевдогауссовских импульсов (колоколообразного вида) различной длительности FWHM (Full Width at Half Maximum – полная ширина пика на половине высоты) после **СУ**. Осциллограммы импульсов реальных ЗЧПУ приведены также в [5]).

Разрешение по энергии для схемы на рис. 1 определяется шумовыми характеристиками входного транзистора, емкостью конденсатора обратной связи, емкостью и токами утечки детектора и временем формирования импульса. На **рис. 4** показаны в разных единицах измерения шумовые характеристики высококачественного ЗЧПУ A250 (с усилителем-формирователем) фирмы Amptek [7] в зависимости от емкости детектора при изменении перечисленных выше факторов. В окне приведена таблица с наименованиями применяемых во входном каскаде полевых транзисторов, значениями тока «исток – сток»  $I_{ис}$  при включении транзистора в схему ЗЧПУ, значениями емкости обратной связи  $C_{ос}$  и постоянной времени формирования импульса  $T_f$ .

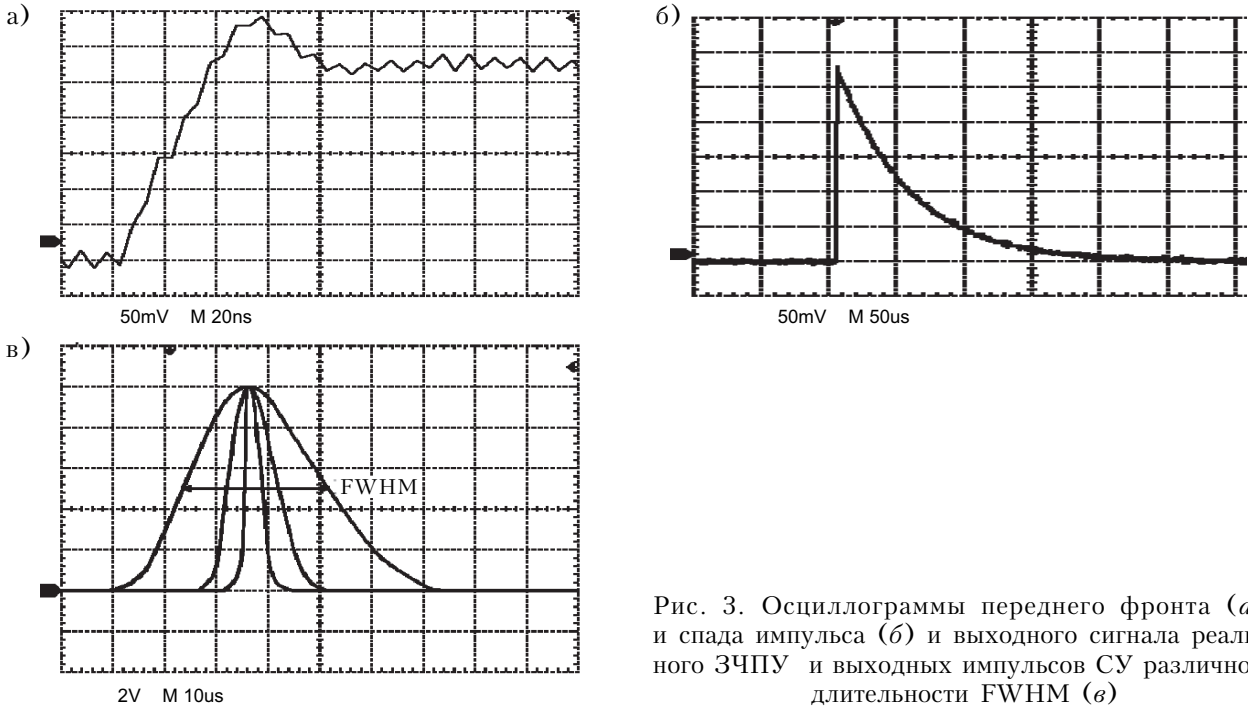


Рис. 3. Осциллограммы переднего фронта (а) и спада импульса (б) и выходного сигнала реального ЗЧПУ и выходных импульсов СУ различной длительности FWHM (в)

Приведенные на рис. 4 уровни энергетического разрешения ЗЧПУ соответствуют характеристикам современной дискретной электроники для считывания сигналов полупроводниковых детекторов (см. также изделия фирмы ORTEC [8]).

Применение ЗЧПУ для преобразования и усиления сигналов с твердотельных детекторов (Si, Ge, CdZnTe,  $p-i-n$ -фотодиод-сцинтиллятор и др.) в спектрометрической аппаратуре позволяет получать спектры излучения

высокого качества. На рис. 5 показан пример такого гамма-, рентгеновского спектра энергии от источника  $^{241}\text{Am}$ , зарегистрированного кремниевым  $p-i-n$ -диодом размерами  $2,7 \times 2,7$  мм и ЗЧПУ [9] (емкость диода 15 пФ, напряжение смещения 24 В, постоянная времени формирования импульса 8 мкс). Большой пик при  $E=8$  кэВ обусловлен флуоресценцией от медной фольги, расположенной между источником и детектором.

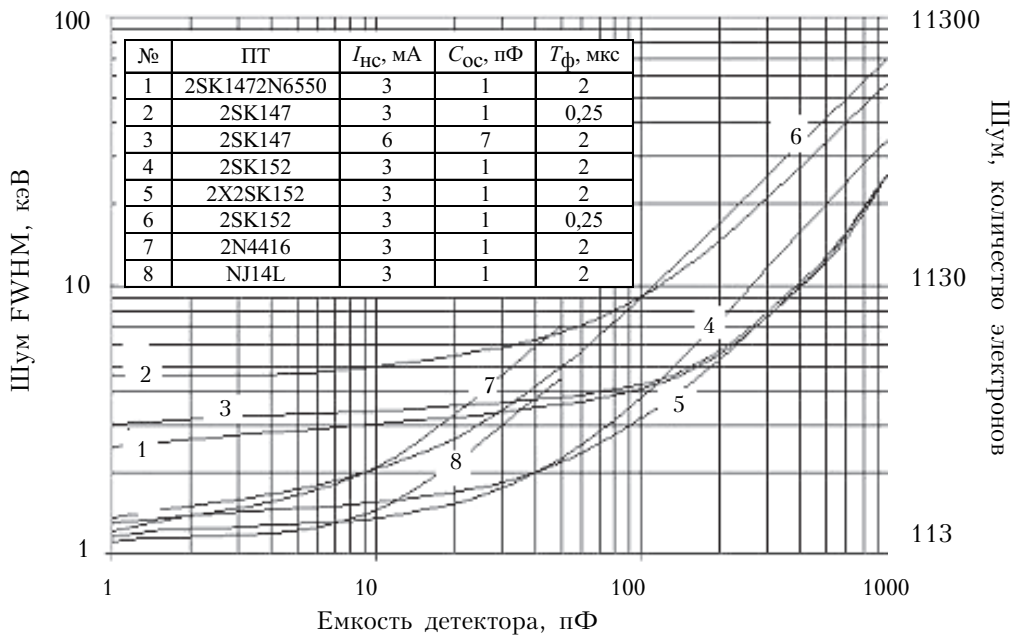


Рис. 4. Шумовые характеристики (шкала справа) и разрешение по энергии (шкала слева) ЗЧПУ с СУ типа А250 [7] в зависимости от емкости детектора для различных входных полевых транзисторов

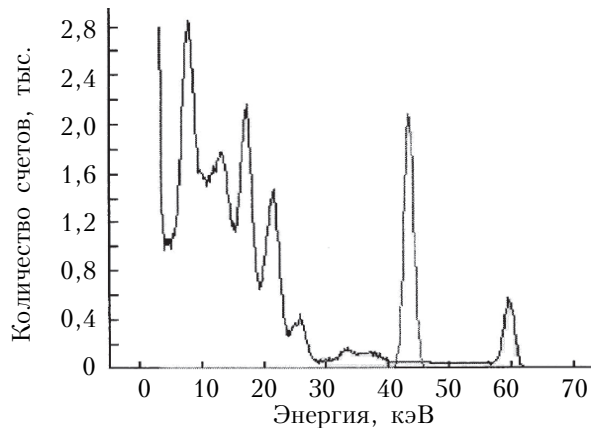


Рис. 5. Гамма-, рентгеновский спектр энергии излучения источника  $^{241}\text{Am}$ , зарегистрированный кремниевым  $p-i-n$ -диодом и ЗЧПУ [9]

Измерения спектра проводились при комнатной температуре, разрешение пика 59,54 кэВ составляет 2,07 кэВ. Посредине спектра — пик тестового импульсного генератора (эквивалент 43 кэВ), который имеет ширину 1,8 кэВ на своей полувысоте, что соответствует эквивалентному шумовому заряду электроники 212 электронов.

**Применение спектрометрии низкоэнергетического рентгеновского излучения для оценки качества технологии детекторов и приборов на их основе**

Применение техники спектрометрии, описанной выше, позволяет оценить качество детекторов. С помощью разработанного нами ЗЧПУ ПУ117 с резистором восстановления исходного уровня, спектрометрического усилителя и многоканального анализатора, включенных по схеме, показанной на рис. 1 (спектрометрическая установка ЗЧПУ ПУ117-СУ-МКА), проведены исследования спектрометрических характеристик различных  $p-i-n$ -диодов [1]. Известно, что тонкие (300–500 мкм) кремниевые планарные  $p-i-n$ -диоды достаточно эффективно регистрируют гамма-, рентгеновские фотоны с энергией 30–60 кэВ и могут применяться в качестве детекторов низкоэнергетического гамма- и рентгеновского излучения [9] (см. рис. 5). То же касается и кремниевых планарных  $p-i-n$ -фотодиодов [2], предназначенных для использования в гамма-, рентгеновских детекторах «сцинтиллятор — фотодиод» (СЦ—ФД). Разрешение пиков энергии в спектрах зависит от качества  $p-i-n$ -диодов (эффективности собирания заряда, токов утечки и др.). Таким образом, снимая спектры энергии низкоэнергетического гамма-, рентгеновского источника (например,  $^{241}\text{Am}$ ) с помощью  $p-i-n$ -диодов и  $p-i-n$ -фотодиодов, можно определять их качество и сравнивать между собой различные конструктивно-технологические варианты приборов. Кроме того, с помощью спектрометрической установки (ЗЧПУ-СУ-МКА) можно проводить

контроль качества  $p-i-n$ -диодов и оценивать возможность их дальнейшего применения в детекторах. На рис. 6 показан спектр излучения источника  $^{241}\text{Am}$ , измеренный при прямой регистрации кремниевым  $p-i-n$ -фотодиодом ФД05-25 размерами 5×5 мм [10]. Для привязки по энергии на спектре показано положение пиков 13,9, 17,8 и 59,54 кэВ.

Существенное отличие спектров на рис. 5 и рис. 6 связано с различием в площади диодов (7 и 25 мм<sup>2</sup>), что обуславливает различия в эффективности собирания заряда и других параметрах. В итоге качество  $p-i-n$ -фотодиода для сцинтилляторного детектора или  $p-i-n$ -диоода для регистрации частиц характеризуется степенью разрешения пиков источника  $^{241}\text{Am}$ , которое на рис. 6 ниже из-за большей площади диода.

Таким образом, контроль качества  $p-i-n$ -фотодиодов и их отбор могут быть также проведены косвенным способом, с помощью прямой регистрации  $p-i-n$ -фотодиодом спектра излучения источника низкоэнергетических гамма-, рентгеновских квантов. При этом чем больше отношение дрейфовой составляющей сигнального заряда к диффузионной составляющей и чем больше отношение сигнального заряда к шумовому (к величине темнового тока), тем лучше разрешение по энергии на спектре, который зарегистрирован фотодиодом [1, 2, 9]. Наличие на спектре ряда пиков ниже 30 кэВ, которые хорошо различаются по энергии (рис. 5), свидетельствует о высоком качестве  $p-i-n$ -фотодиода. При ухудшении параметров диода наблюдается уширение и размывание пиков или слияние всех пиков в кривую без разделения на отдельные пики, как это видно из спектра излучения изотопа  $^{241}\text{Am}$  на рис. 6. Полученный результат соответствует параметрам  $p-i-n$ -фотодиода S5106 корпорации Hamamatsu Photonics [11] и др. [12], при этом у  $p-i-n$ -фотодиодов всех производителей наблюдается ухудшение разрешения при увеличении площади диодов,

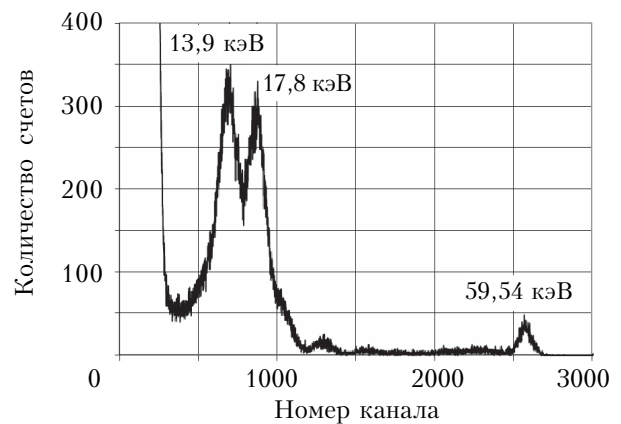


Рис. 6. Спектр гамма-, рентгеновского излучения источника  $^{241}\text{Am}$ , измеренный при прямой регистрации кремниевым  $p-i-n$ -фотодиодом [10] (температура 16°С, время экспозиции 1000 с)

что связано с возрастанием шумов емкости и шумов токов утечки, которые возрастают с увеличением площади.

При использовании  $p-i-n$ -фотодиода, который имеет высокое энергетическое разрешение при прямой регистрации низкоэнергетического излучения, в паре СЦ–ФД, как правило, также наблюдается высокое энергетическое разрешение регистрируемых гамма-спектров [1].

Спектрометрия альфа-излучения также является одним из методов оценки качества  $p-i-n$ -диодов, который активно применяется при разработке альфа-детекторов. На рис. 7 приведены значения толщины входного окна кремниевых альфа-детекторов на основе  $p-i-n$ -диодов, изготовленных при различной температуре отжига после ионной имплантации бора в  $n$ -подложку [13]. Энергия имплантации 12,5 кэВ, доза  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

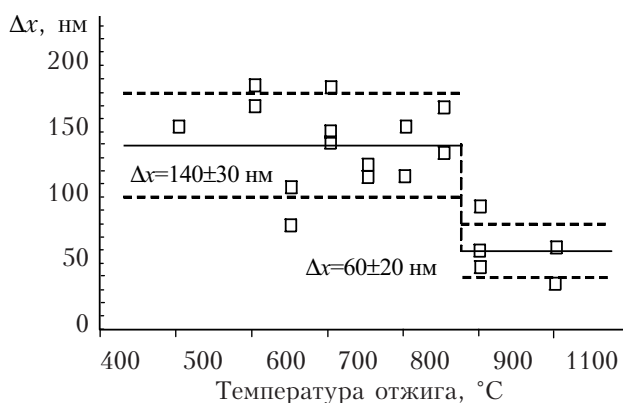


Рис. 7. Толщина входного окна  $\Delta x$  как функция температуры отжига для кремниевого детектора с  $p-n$ -переходом

Толщина входного окна определялась по ширине (разрешению) альфа-линий в спектре излучения альфа-источника  $^{241}\text{Am}$ , зарегистрированном с помощью изучаемых  $p-i-n$ -диодов. На рис. 7 видно резкое изменение толщины входного окна при температурах отжига выше 900 °C. Полученные данные были использованы при выборе технологических режимов формирования альфа-детекторов на основе  $p-i-n$ -диодов.

Таким образом, используя  $p-i-n$ -диоды в качестве детекторов и измеряя альфа- и рентгеновские спектры, можно существенно расширить возможности для исследования влияния конструктивно-технологических факторов на параметры детекторов и использовать результаты спектрометрии при отработке технологии. Возможность раздельной регистрации альфа-спектров и гамма-, рентгеновских спектров  $p-i-n$ -фотодиодом, в том числе в составе сцинтилляторного детектора СЦ–ФД, которая может быть использована при оценке качества технологии изготовления  $p-i-n$ -фотодиода и сборки детектора, показана в [14], где описаны способ и устройство раздельной регистрации  $\alpha$ -,  $\beta$ -

и  $\gamma$ -излучений с использованием пары «сцинтиллятор — кремниевый  $p-i-n$ -фотодиод».

### Спектрометрическая аппаратура для исследования детекторов

Метод спектрометрических измерений, описанный выше, является универсальным инструментом исследования в детекторной технике и регистрации излучений. Он широко используется для оценки качества детекторов, эффективности радиометрических и дозиметрических приборов и других целей. Как видно из приведенных результатов, он также применяется для определения технологических параметров  $p-i-n$ -диодов (например, для альфа-детекторов) [13] и для оценки качества технологии  $p-i-n$ -фотодиодов [1, 2]. Однако, учитывая высокую стоимость спектрометров, поставляемых зарубежными фирмами (20–50 тыс. долларов США), важным вопросом является создание относительно простых многоцелевых спектрометрических систем, адаптированных к разрабатываемым полупроводниковым детекторам различного типа. Такие исследовательско-конструкторские системы строятся на основе универсальных наборов блоков, которые могут поставляться вместе с детекторами («Start Kit») [10].

В процессе разработки кремниевых детекторов была создана подобная многоцелевая спектрометрическая система ЗЧПУ ПУ117-СУ-МКА [1]. Она состоит из зарядочувствительного преобразователя ПУ117, спектрометрического усилителя СУ04 с формирователем псевдогауссовых импульсов и многоканального анализатора, включенных так, как показано на рис. 1.

На рис. 8 показан спектр низкоэнергетического гамма-, рентгеновского излучения источника  $^{241}\text{Am}$ , зарегистрированный прямой регистрацией кремниевым  $p-i-n$ -диодом с размером активной области около  $0,9 \times 2,5 \times 0,4$  мм. Малый размер детектора позволяет минимизировать шумы детектора и наблюдать характеристики (разрешение) самого спектрометрического

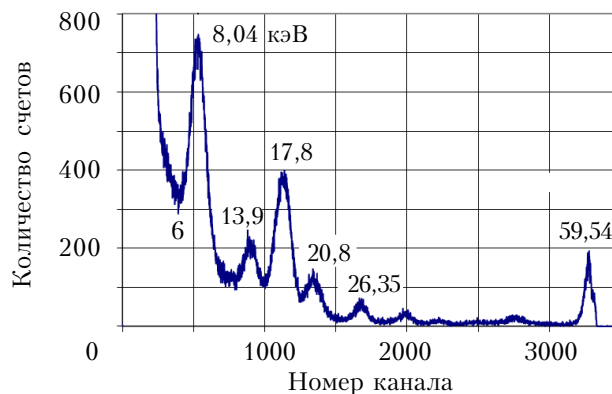


Рис. 8. Спектр излучения источника  $^{241}\text{Am}$ , зарегистрированный кремниевым  $p-i-n$ -диодом с размером активной области  $0,9 \times 2,5 \times 0,4$  мм (облучение через фильтр  $\text{Cu}$  (0,03 мм); смещение детектора 58 В, время экспозиции 5000 с, температура 18 °C; пик вблизи 8 кэВ соответствует флуоресценции  $\text{Cu}$ )

го тракта, основу которого составляют блоки ПУ128а и СУ04 [10]. Аппаратура позволяет разрешать пики спектра излучения  $^{241}\text{Am}$  вплоть до 8 кэВ. Разработанная электроника имеет высокое разрешение по энергии  $\Delta E$  — на уровне приборов ведущих зарубежных фирм [7, 8], что видно из приведенного спектра. Для данного кремниевое  $p-i-n$ -диода при комнатной температуре получено разрешение  $\Delta E \approx 2$  кэВ (в диапазоне 20–60 кэВ).

**Новые подходы к модернизации и удешевлению спектрометрических модулей**

В процессе разработки зарядочувствительных предусилителей была поставлена задача исключения высокоомного резистора из цепи обратной связи, обычно задающего режим входного полевого транзистора по постоянному току. Это позволит устранить источники шума, связанные с этим высокоомным резистором, и сделает возможным изготовление предусилителя по технологии биполярных интегральных схем. При этом были использованы два подхода:

- замена высокоомного резистора специальной структурой — делителем тока — на основе элементов биполярной интегральной схемы;
- использование полевого транзистора в режиме «плавающего» потенциала затвора с нулевым по отношению к внешним цепям током утечки затвора.

Шумовой заряд зарядочувствительного предусилителя без высокоомного резистора цепи обратной связи полностью определяется последовательным шумом канала используемого полевого транзистора и обратно пропорционален крутизне его передаточной характеристики.

Первый подход реализован в предусилителе ПУ118 (рис. 9). Это позволило существенно уменьшить шум предусилителя при сохранении малой потребляемой мощности благодаря замене высокоомного резистора в цепи обратной связи биполярной интегральной структурой (делителем тока) [15, 16].

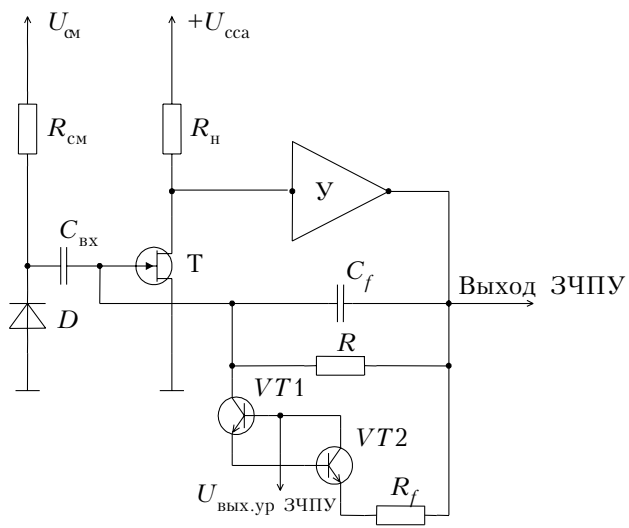


Рис. 9. Структурная схема предусилителя ПУ118 с делителем тока VT1, VT2 в цепи обратной связи

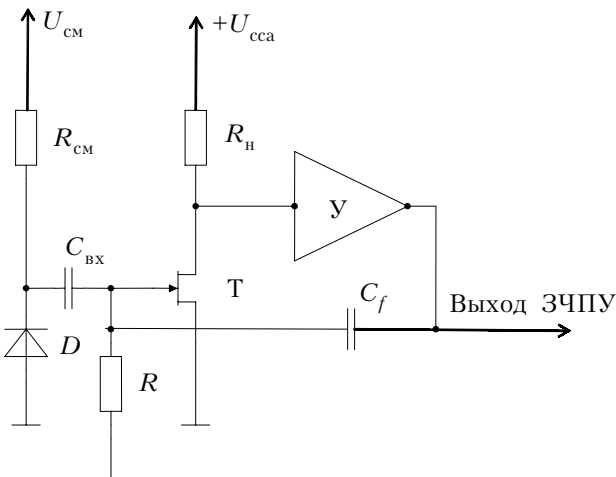


Рис. 10. Структурная схема предусилителя ПУ128а с «плавающим» потенциалом затвора полевого транзистора Т (У — усилитель-стабилизатор уровней постоянного напряжения на стоке Т и на выходе ЗЧПУ)

Второй подход — использование входного полевого транзистора с «плавающим» потенциалом затвора — реализован в предусилителе ПУ128а (рис. 10). Внешний вид предусилителя представлен на рис. 11, а его рабочие параметры — в табл. 1. Он позволяет дополнительно уменьшить шум ЗЧПУ за счет работы полевого транзистора с небольшим открывающим потенциалом затвора  $U_g$ , соответствующим ветви его выходных ВАХ при  $U_g \geq 0$  в режиме большого

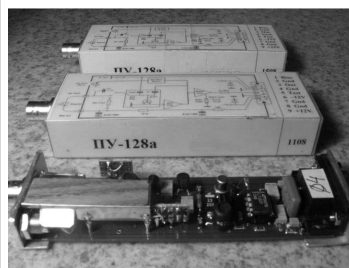


Рис. 11. Зарядочувствительный предусилитель ПУ-128а (со снятым корпусом и в корпусе)

Таблица 1  
Рабочие параметры ЗЧПУ ПУ128а

Параметр	Значение
Шум при $C_f=0$ пФ и времени формирования импульса 6 мкс	менее 1 кэВ (Si)
Чувствительность по энергии при $C_f=0,5$ пФ	180 или 360 мВ/МэВ (Si)
Постоянная времени спада выходного сигнала	около 200 мкс
Время нарастания выходного сигнала:	
— при 0 пФ	не более 30 нс
— при 100 пФ	не более 50 нс
Загрузочная способность	не менее $2,5 \cdot 10^{-8}$ К/с ( $5 \cdot 10^5$ МэВ/с)
Напряжение смещения детектора	до $\pm 100$ В

тока стока. При этом полевой транзистор обладает максимальной крутизной, что уменьшает вклад последовательного шума его канала. Если ток утечки детектора не превышает ток утечки затвора полевого транзистора, возможно непосредственное подключение детектора (без разделительной емкости) с любой полярностью напряжения смещения.

Одним из основных требований к многоцелевой спектрометрической системе является возможность работы с импульсами различной длительности. Например, увеличение длительности импульсов повышает отношение сигнал/шум при работе с сигналами полупроводниковых детекторов с большим временем собирания или с сигналами ФД с относительно медленными сцинтилляторами, а при работе с быстрыми детекторами, детекторами с относительно большой емкостью и/или на высоких нагрузках предпочтительно работать с импульсами малой длительности. Это обеспечивается применением спектрометрического усилителя СУ04 (рис. 12, табл. 2), имеющего следующие особенности:

- широкий диапазон длительности и высокая симметрия формируемых импульсов;
- малый уровень собственного шума;
- стабилизация нуля выходного сигнала и устранение его сдвига при повышенных импульсных нагрузках.

Расширение диапазона длительностей формируемых импульсов обеспечивается применением специально разработанного формирователя импульса на активных фильтрах с однократным дифференцированием и девятикратным интегрированием. Формирователь обеспечивает эффективное подавление как широкополосного, так и низкочастотного шума вида  $1/f$

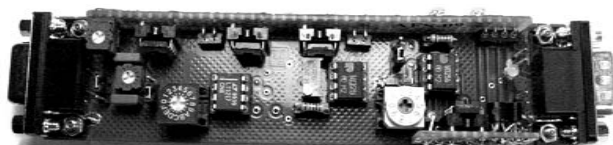


Рис. 12. Плата спектрометрического усилителя-формирователя СУ-04

Таблица 2  
Рабочие параметры СУ04 с импульсом  $FWHM = 4 \text{ мкс}$

Параметр	Значение
Коэффициент передачи: – максимальный – минимальный	$\pm 640$ $\pm 5$
Среднеквадратическое значение шума, приведенного ко входу	не более 3,5 мкВ
Максимальная периодическая импульсная нагрузка – при амплитуде выходного сигнала 5В	80 кГц

( $K_{\text{шш}} \approx 1,13$ ,  $K_{\text{шш},1/f} \approx 1,26$ ) и имеет повышенную симметрию выходного квазигауссова импульса, что способствует повышению грузочной способности тракта. Формирователь выполнен в виде сменной платы. Усилитель СУ04 комплектуется набором сменных плат, предназначенных для формирования импульсов в диапазоне длительности 0,5–30 мкс. Длительность формируемых импульсов выбирается путем установки сменной платы формирователя импульсов требуемой длительности.

Для снижения собственного шума спектрометрического усилителя используется ослабление шума входного каскада СУ04 за счет фильтрации в активном фильтре.

Для стабилизации нуля выходного сигнала СУ04 и компенсации его сдвига при повышенных импульсных нагрузках используется стабилизатор режима/восстановитель постоянной составляющей, по принципу действия аналогичный микросборке BLR1 фирмы Amptek [7]. Он поддерживает нулевой уровень выходного сигнала при отсутствии импульсов, компенсирует его сдвиг при повышенной импульсной нагрузке, не вносит изменений в уровень и спектральный состав шума канала и также выполнен в виде сменной платы.

### Заключение

Проведенный анализ применения методики и техники спектрометрических измерений для контроля качества твердотельных детекторов позволил определить требования к структуре и параметрам простых многоцелевых спектрометрических систем, используемых в процессе разработки и контроля параметров таких детекторов. Для расширения возможностей применения такие системы строятся на основе универсальных наборов блоков (модулей). Низкий уровень собственного шума модульного спектрометра позволяет использовать его вместе с полупроводниковыми детекторами и детекторами «сцинтиллятор –  $p-i-n$ -фотодиод». Относительно низкая стоимость и простота эксплуатации позволяют поставлять модульный спектрометр в комплекте с детекторами для построения экспериментальных приборных систем.

Разработанная многоцелевая спектрометрическая система, состоящая из ЗЧПУ, спектрометрического усилителя с формирователем псевдогауссовых импульсов и дополненная многоканальным анализатором, имеет высокое разрешение по энергии на уровне анализаторов ведущих зарубежных фирм и при прямой регистрации кремниевым  $p-i-n$ -диодом позволяет разрешать пики излучения источника  $^{241}\text{Am}$  вплоть до 8 кэВ с разрешением около 2 кэВ.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Перевертайло В.Л. Характеристики и технология изготовления кремниевых планарных  $p-i-n$ -фотодиодов для сцинтилляционных детекторов // Электроника и связь.

Тематический выпуск «Проблемы электроники». — 2007. — Ч. 1. — С.15—23. [Perevertaylo V.L. // Elektronika i svyaz'. Tematicheskii vypusk «Problemy elektroniki». 2007. Part 1. P.15]

2. Rosenfeld A., Perevertaylo V. L., Lerch M et al. Spectral characterisation of a blue-enhanced silicon photodetector // IEEE Trans. of Nuclear Science. — 2001. — Vol. 48, N 4. — P.1220—1224.

3. Акимов Ю. К, Игнатъев О. В, Калинин А. И, Кушнирук В. Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. — Москва: Энергоатомиздат, 1989. [Akimov Yu. K, Ignat'ev O. V, Kalinin A. I, Kushniruk V. F. Poluprovodnikovye detektory v eksperimental'noi fizike. Moscow: Energoatomizdat, 1989]

4. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurements. — New York: John Wiley and Sons, 1979.

5. Silicon Photodiodes and Charge sensitive amplifiers for Scintillation Counting and High Energy Physics. Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division, Catalog #KOTH0002E02, June, 1993.

6. Jimenez F. J. R. Test procedure for charge sensitive preamplifiers with feedback resistor. — Mexico: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, December, 2008.

7. <http://www.amptek.com/a250.htm> — сайт фирмы "Amptek".

8. <http://www.ortec-online.com/download/142A-142B-142C.pdf> — сайт фирмы "ORTEC"

9. Silicon PIN diode radiation detectors. Carroll-Ramsey Associates. Berkeley, CA. Copyright 1999, <http://www.carrollramsey.com/detect.htm> - сайт фирмы "CRA".

10. <http://www.detector.org.ua> — сайт предприятия "БИТ" (Украина).

11. Si PIN Photodiode — [http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/pd041/pd054/pd057/S5106/index\\_en.htm](http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/pd041/pd054/pd057/S5106/index_en.htm) — сайт фирмы "Hamamatsu Photonics".

12. [http://www.deete.com/Scintillation Detector Applications Using Si Diodes](http://www.deete.com/Scintillation%20Detector%20Applications%20Using%20Si%20Diodes) — сайт фирмы "Detection Technology Inc."

13. Maisch T., Gunzler R., Weiser M. et al. Ion-implanted Si *pn*-junction detectors with ultrathin windows // Nuclear Instruments and Methods. — 1990. — Vol. A288. — P. 19—23.

14. Пат. 78531 України. Спосіб вимірювання іонізуючого випромінювання та пристрій для його реалізації / Гавриленко В.І., Перевертайло В.Л. — 2007. — Бюл. № 4. [Pat. 78531 Ukraini. Sposib vimiryuvannya ionizuyuchogo viprominyuvannya ta pristirii dlya yogo realizatsiyi / Gavrilenko V.I., Perevertaylo V.L. 2007. Bull. N 4]

15. Пат. 84314 України. Зарядово-чутливий попередній підсилювач з низьким рівнем шуму / Артемов С.В, Зайцевський І.Л., Кожушко Б.В., Шевченко С.В. — 2008. — Бюл. № 19. [Pat. 84314 Ukraini. Zaryadovo-chutlivii poperednii pidsilyuvach z niz'kim rivnem shumu / Artemov S.V, Zaitsevs'ky I.L., Kozhushko B.V., Shevchenko S.V. 2008. Bull. N 19]

16. Патент 94492 України. Дільник струму / Зайцевський І. Л. — 2011. — Бюл. № 9. [Patent 94492 Ukraini. Dil'nik strumu / Zaitsevs'ky I. L. 2011. Bull. N 9]

Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.09 2012 г.

Perevertaylo V. L., Zaitsevsky I. L., Tarasenko L.I., Perevertaylo A. V., Shkirenko E. A., Kryukov A. S. **Modular spectrometer for quality assessment of solid-state detector technology.**

*Key words: charge preamplifier, spectrometric amplifier, modular spectrometr, p-i-n-photodiode.*

The authors consider application of charge sensitive preamplifiers and spectrometric amplifiers for transformation and amplification of signals of solid state detectors. The factors that determine the energy resolution of the spectrometer path are presented. The article describes the spectrometry technique for *p-i-n*-photodiodes quality control. The structure of a multi-purpose spectrometer system and schematics of its individual components are presented, their features and parameters are specified.

Ukraine, Kiev, Research Institute of Microdevices STC "IMC" NASU.

Перевертайло В. Л., Зайцівський І. Л., Тарасенко Л. І., Перевертайло О. В., Шкіренко Е. А., Крюков О. С. **Модульний спектрометр для оцінки якості технології твердотільних детекторів.**

*Ключові слова:* зарядочутливий попередній підсилювач, спектрометричний підсилювач, модульний спектрометр, *p-i-n*-фотодіод.

Розглянуто застосування зарядочутливих попередніх підсилювачів і спектрометричних підсилювачів для перетворення і підсилення сигналів твердотільних детекторів, вказані чинники, що визначають енергетичне роздільну здатність спектрометричного тракту. Описано техніку спектрометрії для контролю якості *p-i-n*-фотодіодів, наведено структуру багатопільовий спектрометричної системи, схемні рішення її окремих вузлів, вказано їх особливості та параметри.

Україна, м. Київ, Науково-дослідний інститут мікроприладів НТК «ІМК» НАНУ.