

ДЕТЕКТОРЫ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

УДК 539.1.074.5: 620.179.152

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАНАРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

*Г.П. Васильев, А.С. Деев, А.А. Каплий, С.К. Киприч, Н.И. Маслов, В.Д. Овчинник,
С.М. Потин, М.Ю. Шулика, В.И. Яловенко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: nikolai.maslov@kipt.kharkov.ua

Экспериментально исследовано радиационное воздействие в широком диапазоне доз ускоренных электронов на энергетическое разрешение планарных кремниевых детекторов. Детекторы облучались электронами с энергией 25 МэВ на ускорителе «ЭПОС» ННЦ ХФТИ. В результате экспериментальных исследований получены данные о деградации энергетического разрешения детекторов при облучении, а также получены данные об изменении энергетического разрешения облученных детекторов с различным исходным энергетическим разрешением. Исследования проведены на созданных в ХФТИ неохлаждаемых Si-детекторах и считывающей спектрометрической электронике. Полученные результаты будут использованы для разработки и создания детекторов и детектирующих систем для АЭС и других применений.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее важной характеристикой детектирующей системы, в том числе и на основе неохлаждаемых планарных кремниевых детекторов (ПКД), является энергетическое разрешение. Детектирующие системы на базе ПКД в настоящее время получили широкое распространение и используются в ядерно-физических исследованиях и для решения различных прикладных задач [1 - 4]. В физике высоких энергий, например в Европейском Центре Ядерных Исследований (CERN, Женева, Швейцария), внутренние трековые системы четырех самых крупных детекторов (CMS, ATLAS, ALICE, LHCb) созданы на основе одноканальных и многоканальных планарных кремниевых детекторов площадью десятки квадратных метров и более миллиона детектирующих каналов в каждом [1, 5]. ПКД применяются также в ядерно-физических исследованиях и ядерной энергетике, в изделиях ядерной медицины, в промышленности в системах неразрушающего контроля [6 - 8].

При регистрации излучений планарным кремниевым детектором в детекторе и элементах спектрометрической электроники образуются радиационные дефекты, в результате чего характеристики детектирующих систем ухудшаются. По этой причине спектрометрическую электронику считывания располагают как можно дальше от источника регистрируемого излучения. Но даже в том случае, если спектрометрическая электроника защищена абсолютно и не повреждается, измерения энергетического распределения при определенных дозах делаются невозможными или затрудняются. Объясняется это тем, что при образовании радиационных дефектов увеличивающийся ток утечки ПКД вызывает необходимость подстройки или изменения спектрометрической электроники считывания. По этой причине измерения энергетического разрешения искажаются

и определяются не только ухудшением характеристик ПКД, которые изменились после облучения, но и несогласованностью между характеристиками детектора и характеристиками спектрометрической электроники считывания. С целью контроля достоверности измерений энергетического разрешения облучаемого кремниевого планарного детектора, необходимо одновременное измерение других характеристик ПКД и подстройка или изменение спектрометрической электроники считывания даже в том случае, если спектрометрическая электроника не повреждается излучением.

По указанным причинам, для измерения энергетического разрешения облучаемого в широком диапазоне доз планарного кремниевого детектора на начальных этапах облучения применяется разработанная ранее спектрометрическая электроника считывания [9] (DC-схема), а также электроника считывания, разработанная для измерений энергетического разрешения при больших дозах облучения (AC-схема).

1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ НАЧАЛЬНЫХ ДОЗАХ

1.1. Определение дозы облучения детекторов.

Для определения поперечного распределения пучка ускоренных электронов был использован эффект потемнения стекла. Фотометрирование стекла позволяет оценить оптимальную область размещения облучаемых образцов и рассчитать дозу облучения.

Поглощенная доза в облучаемом детекторе определялась по потерям энергии электронов и интегральным плотностям потока электронов. Плотность потока электронов в этом случае определяется по току ускоренных электронов, измеряемому пролетным магнитоиндукционным датчиком, и измеренным поперечным распределениям пучка ускоренных электронов. Отклонение плотности потока электро-

нов от максимального значения вблизи оси на площади около $(10 \times 10) \text{ см}^2$ менее 10%.

На Рис. 1. показаны результаты фотометрирования стекла после облучения на ускорителе «ЭПОС».

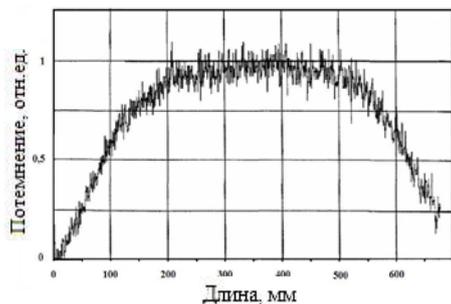


Рис. 1. Результаты фотометрирования стекла после облучения на ускорителе «ЭПОС»

Для определения дозы облучения использовались дозиметры Harwell Red 4034 [10] и Riso B3 [11].

Дозиметры Harwell Red 4034 изготовлены из чувствительного к излучению полиметилметакрилата (ПММА) в виде оптически прозрачных модулей, индивидуально запечатанных в ламинированных пакетах. Получаемое при облучении радиационно-индуцированное потемнение измеряется с помощью спектрофотометра UVmini-1 240 UV-Vis Spectrophotometer. Дозиметр Harwell Red 4034 имеет функциональный диапазон измеряемых доз $5 \dots 50 \text{ кГр} = 0,5 \dots 5 \text{ Мрад}$.

Пластиковый (polyvinyl butyral) пленочный дозиметр Riso B3 – бесцветная гибкая пластиковая пленка, меняет свой цвет под воздействием облучения [11]. Радиационно-индуцированный цвет анализировался на планшетном сканере, аналогичном описанному в [12]. При анализе используется программный пакет, который использует базу пленок, облученных точными дозами электронов в диапазоне $1 \dots 100 \text{ кГр} = 0,1 \dots 10 \text{ Мрад}$.

1.2. Спектрометрическая электроника считывания для измерения энергетического разрешения при облучении неохлаждаемых планарных кремниевых детекторов при начальных дозах облучения.

Для измерения энергетического разрешения неохлаждаемых ПКД разработана и изготовлена одноканальная спектрометрическая электроника считывания. Зарядочувствительный предварительный усилитель (ЗПУ) способен работать с неохлаждаемыми планарными детекторами емкостью до 100 пФ и входным током до 10 нА. ЗПУ выполнен в виде усилителя постоянного тока с коэффициентом усиления с разомкнутой обратной связью не менее 80 дБ и частотой единичного усиления не менее 200 МГц. На входе ЗПУ стоит полевой транзистор с током затвора не более 10 пА (при температуре 25°C) и высокой крутизной $\approx 22 \text{ мА/В}$, что обеспечивает очень низкий шум $0,8 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ на частоте 100 кГц, приведенный к входу ЗПУ (с нулевой емкостью на входе). Коэффициент передачи усилителя не менее 1 В/пКл. Типичное время нарастания сигнала 10...90% на выходе ЗПУ не превышает 50 нс при

2 пФ емкости детектора. Динамический диапазон сигналов на выходе не менее 2 В.

Ранее для считывания сигналов в условиях, не повреждающих ПКД (низкие допороговые энергии излучения или малые интенсивности излучения), применялось прямое подсоединение детектора к ЗПУ, без соединительного конденсатора direct current (DC). С использованием DC-подсоединения были получены предельные значения энергетического разрешения для неохлаждаемых детекторов менее 1 кэВ [9] (см. Рис. 2).

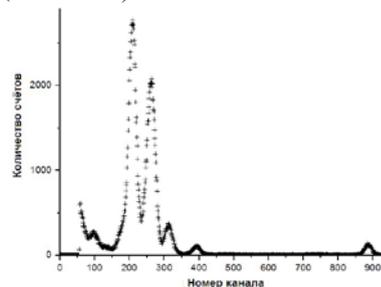


Рис. 2. Тестовое измерение необлученного детектора с DC-подключением. FWHM ~ 1 кэВ

На Рис. 3 показана схема direct current (DC) подключения ПКД к ЗПУ для получения предельного энергетического разрешения.

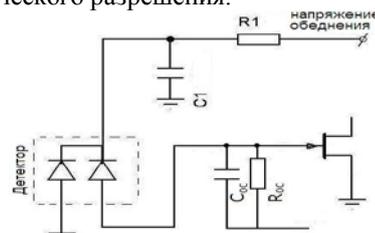


Рис. 3. Схема direct current (DC) подключения ПКД к ЗПУ для получения предельного энергетического разрешения

Взаимодействие ускоренных электронов с ПКД приводит к возникновению дефектов в структуре его кристаллической решетки, и в большинстве случаев эти повреждения возрастают пропорционально дозе облучения. Дефекты кристаллической решетки в значительной степени ведут к увеличению тока утечки детектора, что, в свою очередь, ведет к ухудшению энергетического разрешения. Увеличенный обратный ток детектора ведет к увеличению смещения на затворе входного полевого транзистора ЗПУ и как следствие – к прекращению работы системы считывания.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ

2.1. Спектрометрическая электроника считывания для измерения энергетического разрешения при облучении планарных кремниевых детекторов в широком диапазоне доз.

Решением проблемы блокировки считывающей электроники увеличивающимся током утечки при облучении является подключение ПКД к ЗПУ с от-

сечкой постоянного тока по схеме Alternating current (AC), (см. Рис. 4).

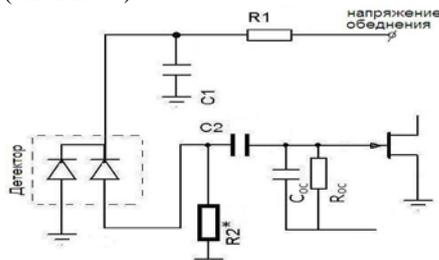


Рис. 4. Схема AC-считывания для измерения энергетического разрешения облучаемых ПКД в широком интервале доз

Параметры входа AC-системы считывания (величина нагрузочного сопротивления и величина сопротивления фильтра питания) были определены при дозе 230 крад сравнением с DC-системой считывания по измеряемым величинам энергетического разрешения. В таблице приведены результаты измерений энергетического разрешения детекторов (FWHM) по линии излучения ^{241}Am (59,54 кэВ) для двух типов подключения (DC и AC) после облучения дозой 230 крад.

Детекторы	Ток (нА) утечки при 40 В	FWHM (кэВ) схема DC	FWHM (кэВ) схема AC
H27 (230 крад)	17,29	3,16	3,19
H28 (230 крад)	17,96	-	3,15
H30 (230 крад)	14,3	2,68	2,9
X31 (230 крад)	16,83	3,1	3,25
H42 (0 крад)	0,27	1,5	1,62
Inten (0 крад)	0,34	1,52	1,56

Как видно из таблицы (и из Рис. 5 и 6), величины измеряемого энергетического разрешения системами считывания AC и DC хорошо согласуются при дозе облучения детектора 230 крад.

Результаты измерений двух типов подключений, приведенные в таблице, показывают, что система подключения AC считывает сигналы со всех детекторов. Величины энергетических разрешений, измеренные с использованием двух типов подключения – DC и AC, близки.

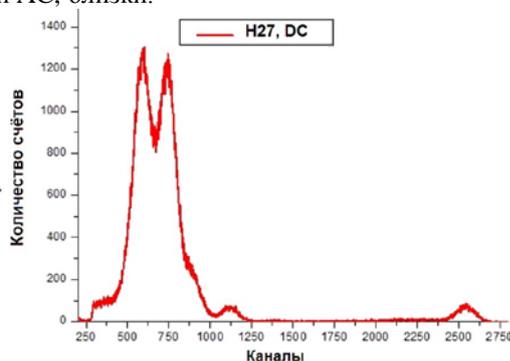


Рис 5. Спектр изотопного источника излучения ^{241}Am , полученный с использованием детектора H27, облученного дозой 230 крад. Спектр измерен с применением DC-подключения. FWHM = 3,16 кэВ

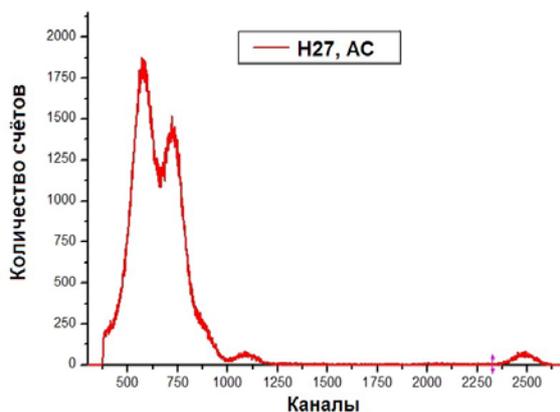


Рис 6. Спектр изотопного источника излучения ^{241}Am , полученный с использованием детектора H27, облученного дозой 230 крад. Спектр измерен с применением AC-подключения. FWHM = 3,19 кэВ

На Рис 5 и 6 представлены спектры изотопного источника излучения ^{241}Am , полученные с использованием ПКД H27, облученного дозой 230 крад.

Энергетические разрешения, измеренные по линии излучения ^{241}Am (59,54 кэВ) двумя типами подключений – DC и AC, хорошо согласуются.

2.2. Измерение энергетического разрешения при облучении планарных кремниевых детекторов в широком диапазоне доз.

Параметры входа AC-системы считывания (величина нагрузочного сопротивления и величина сопротивления фильтра питания) были определены при дозе 230 крад сравнением с DC-системой считывания по измеряемым величинам энергетического разрешения.

Однако, после следующего облучения детектора дозой 1300 крад результаты измерений показали, что снова необходима подстройка входных параметров AC-системы считывания.

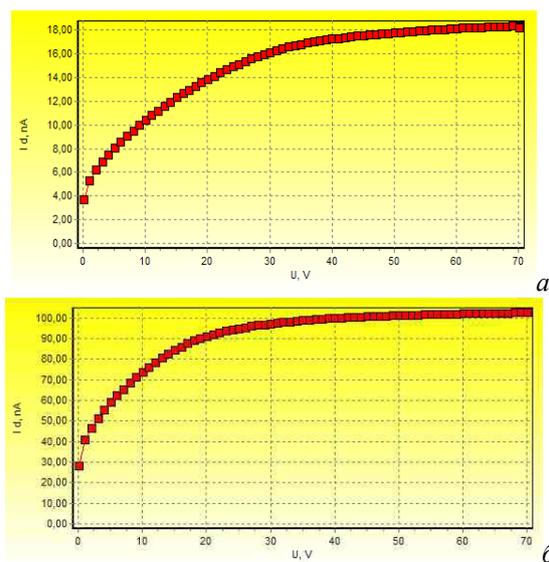


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика активной области детектора H27 после облучения дозами 230 крад (а) и 1530 крад (б)

На Рис. 7 и 8 показаны результаты измерений прироста токов утечки и результаты измерений AC-системой считывания энергетического разрешения

для детектора H27 после облучения суммарной дозой 1530 крад.

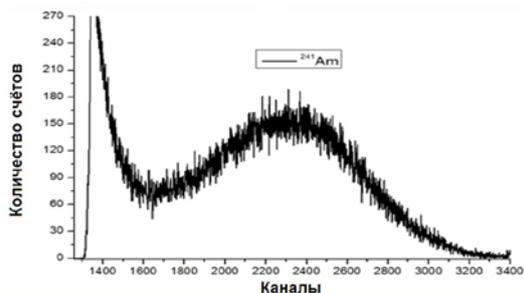


Рис. 8. Результаты измерений АС-системой считывания энергетического разрешения для детектора H27 после облучения общей дозой 1530 крад.

Энергетическое разрешение 20,7 кэВ (FWHM) по линии 59,54 кэВ источника ^{241}Am

Из Рис. 7 и 8 видно, что при рабочем напряжении детектора 40 В ток детектора увеличился в 6 раз и энергетическое разрешение при этом увеличилось в 6,5 раза (см. Рис. 6 и 8). Это противоречит ожидаемой зависимости энергетического разрешения детектора от его тока утечки, близкой к корневой зависимости [13, 14]. Значительное увеличение тока утечки детектора и уменьшение его обратного сопротивления привело к несогласованности с входными параметрами АС-системы считывания.

После приведения резисторов входа АС-системы считывания в соответствие с измененным током утечки детектора (и его сопротивлением) энергетическое разрешение уменьшилось до 7,16 кэВ (Рис. 9).

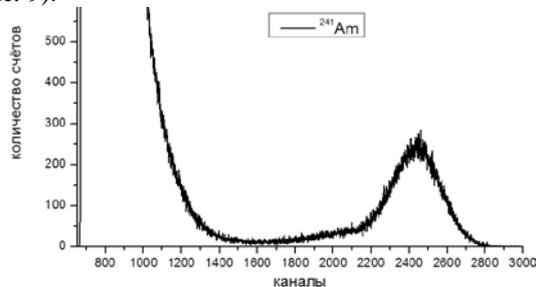


Рис. 9. Результаты измерений энергетического разрешения для детектора H27 при дозе облучения 1530 крад после изменения входных сопротивлений АС-системы считывания. Энергетическое разрешение 7,16 кэВ (FWHM) по линии 59,54 кэВ изотопного источника ^{241}Am

В результате изменения входных сопротивлений АС-системы считывания, измеренное энергетическое разрешение близко к ожидаемому значению при зависимости энергетического разрешения от тока утечки, близкой к корневой.

2.3. Результаты измерения энергетического разрешения неохлаждаемых планарных кремниевых детекторов с разным начальным энергетическим разрешением.

Используя оптимизированную АС-систему считывания, было исследовано радиационное влияние ускоренных электронов при суммарной дозе облучения 1530 крад на энергетическое разрешение пяти планарных кремниевых детекторов с разным

начальным энергетическим разрешением. Начальные энергетические разрешения облучаемых ПКД имели значения от 1,06 до 2,15 кэВ. На Рис. 10 и 11 приведены результаты измерений энергетического разрешения (FWHM) и токов утечки детектора X31 при облучении его ускоренными электронами до суммарной дозы 1530 крад.

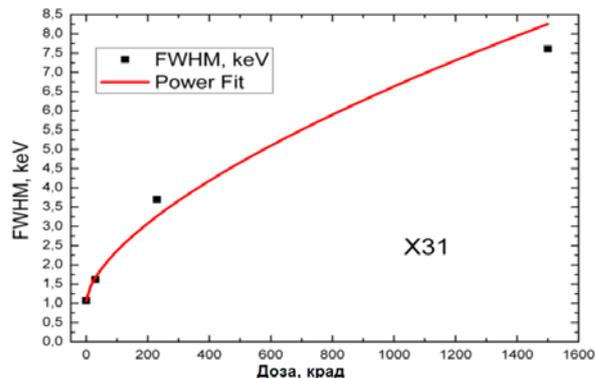


Рис. 10. Энергетическое разрешение (FWHM) детектора X31 при облучении его ускоренными электронами до суммарной дозы 1530 крад. Энергетическое разрешение необлученного детектора составляет 1,06 кэВ

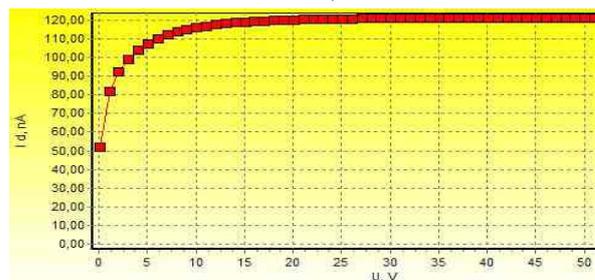


Рис. 11. Токи утечки (ВАХ) активной области детектора X31 при облучении его ускоренными электронами суммарной дозой 1530 крад

На Рис. 12 и 13 приведены результаты измерений энергетического разрешения (FWHM) и токов утечки детектора H28 при облучении его ускоренными электронами до суммарной дозы 1530 крад. Начальное энергетическое разрешение 1,42 кэВ.

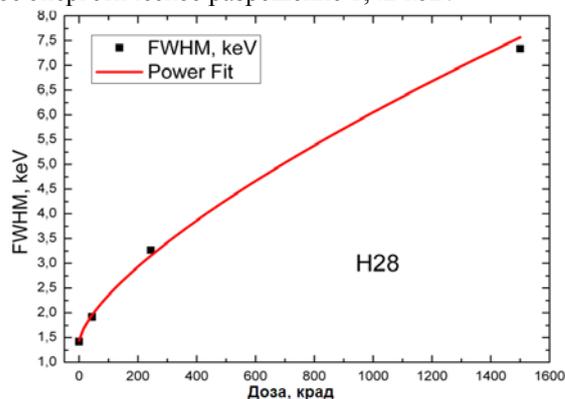


Рис. 12. Энергетическое разрешение (FWHM) детектора H28 при облучении его ускоренными электронами до суммарной дозы 1530 крад. Энергетическое разрешение необлученного детектора составляет 1,42 кэВ

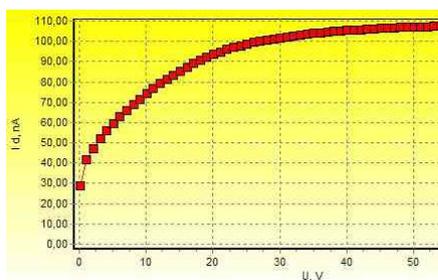


Рис. 13. Токи утечки (ВАХ) активной области детектора H28 при облучении его ускоренными электронами суммарной дозой 1530 крад

На Рис. 14 и 15 приведены результаты измерений энергетического разрешения (FWHM) и токов утечки детектора A1 с максимальным начальным энергетическим разрешением при облучении его ускоренными электронами до суммарной дозы 1530 крад.

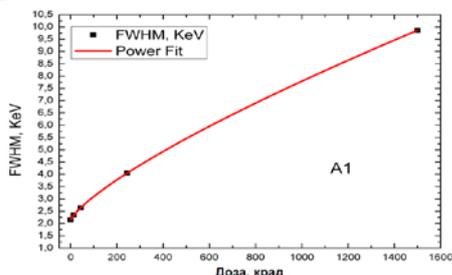


Рис. 14. Энергетическое разрешение (FWHM) детектора A1 при облучении его ускоренными электронами до суммарной дозы 1530 крад. Энергетическое разрешение необлученного детектора составляет 2,15 кэВ

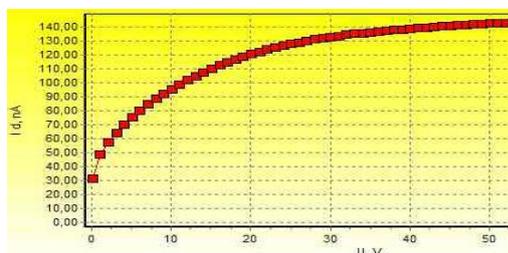


Рис. 15. Токи утечки (ВАХ) активной области детектора A1 при облучении его ускоренными электронами суммарной дозой 1530 крад

Как видно из рисунков, после облучения суммарной дозой 1530 крад величина энергетического разрешения для детектора с максимальным начальным энергетическим разрешением (см. детектор A1, Рис. 14) отличается от величины энергетического разрешения первого детектора (см. детектор X31, Рис. 10) не более чем на 30%. Для четырех детекторов с начальными энергетическими разрешениями от 1,06 до 1,42 кэВ после облучения энергетические разрешения практически равны. Сглаживающий эффект при облучении можно объяснить двумя причинами. Первая причина заключается в том, что энергетическое разрешение при облучении увеличивается меньше, чем токи утечки. Это происходит потому, что ток утечки входит в соотношение для шума детектора и предварительного усилителя следующим образом [13, 14]:

$$Q_n^2 = \left(\frac{e^2}{8}\right) \cdot \left[\left(2q_e I_d + \frac{4kT}{R_p} + i_{na}^2 \right) \cdot \tau + \left(4kTR_s + e_{na}^2 \right) \cdot \frac{C^2}{\tau} + 4A_f C^2 \right],$$

где e – основание натуральных логарифмов; q_e – заряд электрона; I_d – ток утечки детектора; k – константа Больцмана; T – абсолютная температура; R_p – эквивалентное входное параллельное сопротивление; i_{na} – спектральная плотность шума входного тока предварительного усилителя; τ – время формирования сигнала; R_s – эквивалентное входное последовательное сопротивление; e_{na} – спектральная плотность шума входного напряжения предварительного усилителя; C – суммарная входная емкость; A_f – спектральная плотность шумов вида $1/f$.

Для дробового шума детектора в единицах заряда на входе предварительного усилителя часто используют упрощенное соотношение:

$$\sigma_q = \sqrt{2qI\tau_\phi},$$

где q – заряд электрона; I – ток утечки детектора; τ_ϕ – время формирования сигнала в усилителе.

Это упрощенное соотношение, близкое к корневой зависимости, наглядно демонстрирует сглаживающий эффект при облучении.

Другая причина сглаживающего эффекта при облучении заключается в особенности дефектообразования в планарных детекторах и, как следствие, в особенности изменения тока утечки в результате облучения ПКД. Как было показано ранее в работе [5], дополнительные поверхностные токи утечки, возникающие в результате погрешностей технологического процесса при производстве планарных детекторов, не увеличиваются при облучении детекторов. Поэтому поверхностные токи утечки оказываются сравнительно малыми по сравнению с объемными токами утечки, возникающими в результате облучения материала детектора.

ВЫВОДЫ

Выполнено экспериментальное исследование радиационного воздействия на энергетическое разрешение неохлаждаемых планарных кремниевых детекторов (ПКД) с разным начальным энергетическим разрешением. Разработана методика и спектротрическая электроника для считывания сигнала с ПКД при облучении в широком интервале доз. Планарные кремниевые детекторы облучались на ускорителе «ЭПОС» Института физики высоких энергий и ядерной физики ННЦ ХФТИ электронами с энергией 25 МэВ в диапазоне доз от 0 до 1530 крад.

Показано, что:

- для измерения реального энергетического разрешения ПКД необходимо после облучения определенными дозами приведение в соответствие входных параметров электроники считывания с измененными после облучения параметрами ПКД;
- после облучения ПКД суммарной дозой 1530 крад уверенно регистрируется неохлаждаемым детектором линия излучения 59,54 кэВ изотопного

источника ²⁴¹Am с энергетическим разрешением 7 кэВ;

- при облучении детекторов сглаживается отличие в величинах энергетического разрешения для детекторов с разным начальным энергетическим разрешением. Объясняется сглаживающий эффект при облучении преимущественным образованием радиационных дефектов в объеме материала детектора и зависимостью энергетического разрешения детектора от его тока утечки, близкой к корневой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. K. Aamodt, N. Maslov, et al. The ALICE Collaboration, The ALICE Experiment at the CERN LHC, 2008_JINST_3_S08002, 245 p.
2. Г.Л. Бочек, А.С. Головаш, А.В. Косинов и др. Сдвоенный кремниевый детектор для регистрации бета-частиц в условиях гамма-излучения // *Известия РАН, сер. физ.* 2005, т. 69, № 11, с. 1558-1561.
3. Г.П. Васильев, В.К. Волошин, С.К. Киприч, Н.И. Маслов и др. Герметизированные модули кремниевых детекторов ионизирующего излучения // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, № 3, с. 200-204.
4. Г.Л. Бочек, Н.И. Маслов, С.В. Наумов и др. Регистрация заряженных частиц в условиях фона гамма-излучения // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2005, № 4, с. 68-71.
5. N. Maslov, A.P. de Haas, P. Kuijter, et al. Radiation tolerance of single-sided microstrip detector with Si₃N₄ insulator // *ALICE/PUB 98-24*, 5 Nov. 1998.
6. В.И. Кулибаба, А.А. Мазиллов, Н.И. Маслов. О возможности регистрации β-излучения Si-детекторами в зоне чернобыльской аварии // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2006, № 3, с. 140-141.
7. Н.И. Айзацкий, В.И. Кулибаба, Н.И. Маслов и др. Система для измерения профиля пучка гамма-квантов и электронов по распределению поверхностной β-активности // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2010, № 3, с. 180-183.
8. Г.П. Васильев, В.К. Волошин, А.С. Деев и др. Определение дозы излучения двухканальным спектрометром в диапазоне энергий 0,005...1 МэВ // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, №4, с. 205-209.
9. Г.П. Васильев, В.К. Волошин, А.С. Деев и др. Измерение энергии излучения спектрометрическими системами на основе неохлаждаемых кремниевых детекторов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, 2014, № 4, с.94-100.
10. www.harwell-dosimeters.co.uk/harwell-red-4034/
11. <http://www.nutech.dtu.dk/english/Products-and-Services/Dosimetry/HDRL>
12. J. Helt-Hansen, A. Miller. Assessment of dose measurement uncertainty using RisøScan // *Radiat. Phys. Chem.* 2006, v. 75, p. 1101-1106.
13. A.S. Grove. Physics and Technics of Semiconductor Devices. New York, Wiley, 1967, Ch. 6, p. 176-177.
14. Helmuth Spieler. Semiconductor detector systems. Oxford University press. 2005, p. 147.

Статья поступила в редакцию 26.10.2015

EFFECT OF IRRADIATION ON THE ENERGY RESOLUTION OF SILICON PLANAR DETECTORS

G.P. Vasilyev, A.S. Deiev, A.A. Kapliy, S.K. Kiprich, N.I. Maslov, V.D. Ovchinnik, S.M. Potin, M.Y. Shulika, V.I. Yalovenko

The radiation impact of accelerated electrons on the energy resolution of the planar silicon detectors experimentally investigated. The detectors were irradiated by electrons with energy 25 MeV using "EPOS" linac of NSC KIPT. As a result of experimental studies data were obtained on the degradation of the detector energy resolution under irradiation, as well as obtained experimental data about changes of energy resolution of the irradiated detectors with different initial energy resolution. Research conducted on the uncooled Si-detectors and readout spectrometric electronics developed and produced at NSC KIPT. The results will be used for development and manufacturing the detectors and detection systems for nuclear power plants and other applications.

ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ КРЕМНІЄВИХ ПЛАНАРНИХ ДЕТЕКТОРІВ

Г.П. Васильєв, А.С. Деев, А.А. Каплій, С.К. Кіпріч, М.І. Маслов, В.Д. Овчинник, С.М. Потін, М.Ю. Шуліка, В.І. Яловенко

Експериментально досліджено радіаційний вплив в широкому діапазоні доз прискорених електронів на енергетичну роздільну здатність планарних кремнієвих детекторів. Детектори опромінювалися електронами з енергією 25 МеВ на прискорювачі «ЕПОС» ННЦ ХФТІ. У результаті експериментальних досліджень отримані дані про деградацію енергетичної роздільної здатності детекторів при опроміненні, а також отримані дані про зміну енергетичної роздільної здатності опромінених детекторів з різною початковою енергетичною роздільною здатністю. Дослідження проведені на створених в ННЦ ХФТІ неохолоджуваних Si-детекторах і зчитувальній спектрометричній електроніці. Отримані результати будуть використані для розробки і створення детекторів і детектуючих систем для АЕС та інших застосувань.