

Pin структура - как детектор нейтронных потоков

Яшин В.С.¹

Федоренко В.В

¹ ООО «СофтЭксперт»

141595, Московская область, д Ложки, тер. Индустриальный Парк Есиново, стр. 17а/2, помещ. 19

expert@softexp-rf.ru

Аннотация

В докладе рассматривается изменение электрических характеристик Pin диода под действием нейтронного излучения со спектром нейтронов соответствующему спектру деления. Исследован процесс (восстановления) фендинга характеристик со временем в период 365 дней.

На основе данной структуры исследованы возможности использования Pin диода в качестве накопительного детектора для контроля общей дозы нейтронов на персонал и аппаратуру.

Исследованы температурные кривые ВАХ, выбран оптимальный измерительный ток для точного контроля накопленной дозы.

Предлагаются технические решения для измерительной схемы и ее аппаратная реализация.

Разработаны сборки детекторов на основе гибридной технологии.

Начаты исследования по влиянию протонного излучения и ТЗЧ на свойства структуры.

Ключевые слова: Pin диод, нейтронное излучение, флюенс, доза, дозовая нагрузка.

Введение

Изменения свойств Pin структуры под действием нейтронного излучения была замечена рядом исследователей. В связи с этим предпринимались попытки применения Pin структуры в качестве нейтронного детектора.

В ходе исследования были получены достаточно противоречивые результаты. При более тщательном исследовании результатов было отмечено, что определяющим фактором является толщина структуры. “Тонкие” и “толстые” структуры имеют различный отклик на действие нейтронного излучения.

Для проверки возможности использования Pin структуры в качестве нейтронного детектора был изготовлен детектор, имеющий практически кубическую структуру с размером 1x1x1.2 мм. При этом отклик данной структуры оказался хорошо воспроизводимым, и имеет линейную зависимость прямого напряжения открытия перехода от полученной дозы нейтронного излучения.

Описание структуры Pin диода

Известен P-I-N – диодный преобразователь нейтронного излучения (RU 2408955 C1, опубл. 10.01.2011) содержащий высокоомную подложку кремния N-типа проводимости и несколько инжектирующих электродов p-типа проводимости, при этом эмиттеры p-типа проводимости P-I-N-диодного преобразователя нейтронного излучения расположены в виде матрицы на лицевой стороне подложки, а значение длины базы варьируется глубиной травления кремния на обратной стороне подложки, в области между эмиттером и контактом к области N-типа проводимости.

Недостатком известного полупроводникового прибора является значительный разброс по чувствительности от образца к образцу и зависимость дозы излучения от угла падения, и энергии нейтронного потока, причем эта зависимость будет различной для каждого детектора в группе.

Известен твердотельный детектор заряженных частиц (US 7714300 B1, опубл. 11.05.2010), содержащий PIN-диод; металлический слой на тыльной стороне PIN-диода; проводящее покрытие, которое является однородным и сплошным на лицевой стороне PIN-диода, при этом передняя сторона принимает падающие заряженные частицы, подлежащие обнаружению; электрические соединения с металлическим слоем и проводящим покрытием; оксидное покрытие между проводящим покрытием и PIN-диодом; и проводящие переходные отверстия через оксидное покрытие.

Недостатком известного детектора является очень низкая эффективность регистрации нейтронного излучения за счет незначительной по объему обедненной области.

Наиболее близким по технической сущности является PIN – диод (US 3982267 A, опубл. 21.09.1976), содержащий зону из полупроводникового материала с очень высоким удельным сопротивлением, причем эта зона состоит, по существу, из внутреннего материала и имеет две параллельные поверхности. На одной из граней находится слой полупроводника, сильно легированного примесью первого типа N или P. На противоположной грани находится слой, сильно легированный примесью типа, противоположного примеси первого типа.

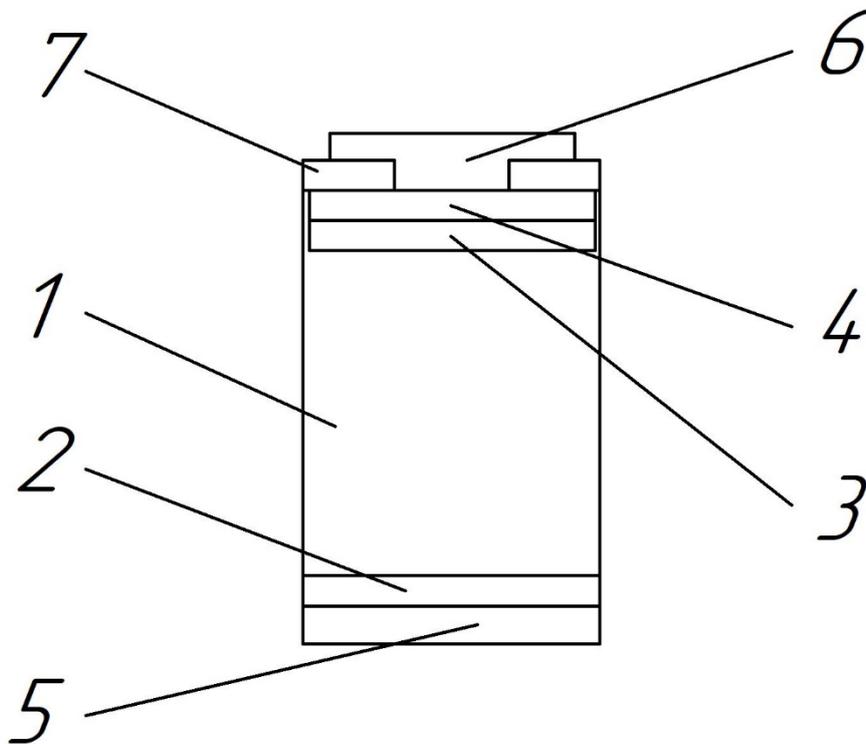
Недостатком известного диода является значительный разброс по чувствительности от образца к образцу и зависимость дозы излучения от угла падения, и энергии нейтронного потока, причем эта зависимость будет различной для каждого детектора в группе, что ведет к снижению чувствительности обнаружения нейтронного излучения.

Технической проблемой, на решение которой направлены данные исследования является устранение перечисленных недостатков прототипов.

Техническим результатом является повышение чувствительности обнаружения нейтронного излучения.

Технический результат достигается тем, что Р-I-N-диодный дозиметр, содержит высокоомную подложку кремния область I(N)-типа со временем жизни неосновных носителей заряда свыше 1000 мкс, содержащую с нижней стороны пластины слой проводимости N⁺ - типа для формирования омического контакта к подложке, с верхней стороны пластины выполнен слой с проводимостью Р-типа, *согласно полезной модели*, обедненная область I(N)-типа, находящаяся между областями Р-типа и N⁺-типа, имеет форму куба, а расположенная в ней область Р-типа достигает границы диода только с лицевой стороны и занимает 90% её поверхности, при этом контактное окно, составляет 80-85% площади области Р⁺- типа.

Р-I-N-диодный дозиметр поясняется чертежом. На фиг. показан разрез Р-I-N-диодного дозиметра.



Р-I-N-диодный дозиметр состоит из высокоомной кремниевой пластины (область I(N)-типа) толщиной не менее 1,2 мм. Область проводимости Р-типа в верхней части кремниевой пластины образована легированием примесью, например, бором. Для формирования надежного омического контакта дополнительно выполняется подлегирование верхнего слоя с Р-типом проводимостью. Конструкция диода выполнена таким образом, чтобы обедненная область I(N)-типа, находящаяся между областями Р-типа и N⁺-типа, имеет форму куба, а расположенная в ней область Р-типа достигает границу диода только с лицевой стороны.

Это необходимо, чтобы граница Р-N перехода не выходила на край диода при скрайбировании (разделении пластины на отдельные кристаллы). Такая конструкция позволяет избежать неконтролируемых токов утечки по границе раздела перехода.

Основу конструкции диода составляет область I(N)-типа (высокоомный кремний) 1 в котором методом ионной имплантации с последующим отжигом и разгонкой сформированы следующие слои. С нижней стороны пластины выполнена область (слой) N⁺-типа проводимости 2 для создания омического контакта к подложке 1. С верхней стороны пластины выполнена область (слой) с проводимостью Р-типа 3 легированием примесью для формирования Р-N перехода, таким образом, чтобы после всех термических операций область Р-типа достигла границ диода только с лицевой стороны и не попала в область разделения кристаллов, при изготовлении диодов. Для надежного формирования контакта области Р-типа 3 дополнительно подлигируется примесью до образования области (слоя) с проводимостью Р⁺-типа 4 так, чтобы с учетом всех термических операций область Р⁺-типа не достигала области скрайбирования на боковых поверхностях кристалла. После окисления лицевой части пластины методом фотолитографии формируется контактное окно, отделенное слоем диоксида кремния 7 от остальных зон лицевой поверхности диода, составляющее 80-85% площади области Р⁺-типа 4 для формирования алюминиевой контактной площадки Al 6.

Контакт к области I(N)-типа 1 формируется с тыльной стороны пластины напылением алюминия с дальнейшим выжиганием алюминия. Таким образом при линейном размере диода 1,1x1,1мм и толщине пластины 1,2 мм формируется изделие с областью I(N)-типа кубической формы.

Устройство работает следующим образом.

Вольт амперная характеристика диода данной конструкции отличается от классической характеристики PIN диода тем, что ток проходящий от контактной площадки 6 к областям Р⁺ - типа 4, Р - типа 3, I(N) - типа 1, N⁺ - типа 2 до контакта пластины 5 не растет по экспоненте, а его рост органичен резистивной составляющей I(N)-области 1. Таким образом если измерять напряжение на открытом Р-N переходе на границе разделов областей 3-1, при заданном

токе на восходящей ветви вольтамперной характеристики то можно четко фиксировать изменения, происходящие под действием нейтронного излучения. Под действием нейтронного излучения происходит два процесса в области I(N)-типа 1:

- за счет возникающих структурных изменений под действием нейтронного излучения происходит изменение напряжения открытия перехода P-N перехода на границе разделов областей 3-1. Данное изменение пропорционально поглощенной дозе;

- при больших поглощенных дозах более 10 Гр [Грей] нейтронного излучения происходит легирование кремния 1 за счет ядерных реакций. Под воздействием потока тепловых нейтронов происходит образование радиоактивного изотопа ^{31}Si и его последующий распад с образованием стабильного фосфора ^{31}P . Легирование уменьшает сопротивление обедненной части кремния и тем самым увеличивает точность измерения поглощенной дозы нейтронного излучения при больших дозах, другими словами, достигаем повышения чувствительности обнаружения нейтронного излучения.

После выпуска партии кристаллов, измеряют начальное напряжение открытия P-N перехода на границе разделов областей 3-1 перехода при токе близком к 1мА. В дальнейшем с заданной периодичностью контролируют изменение данного параметра. Рост напряжения открытия P-N перехода на границе разделов областей 3-1 пропорционален поглощенной дозе и имеет линейную зависимость. Для пересчета измеренного напряжения в дозу или флюенс нейтронов радиации используют калибровочную кривую, которая снимается экспериментально для изготовленной партии детекторов изготовленных с одной партии пластин с одного слитка и в одном технологическом процессе.

Для достижения высокой чувствительности особенно к быстрым нейтронам используется кремний с высоким удельным сопротивлением не менее $5000 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ с временем жизни неосновных носителей более 1000 мкс. Для компенсации «Анизотропии» - зависимости чувствительности от угла падения нейтронного потока на PIN - детектор, диод спроектирован так, чтобы область I(N)-типа 1 имела кубическую форму с размером стороны около 1 мм. При этом большая область I(N)-типа 1 способствует увеличению чувствительности. Область P-типа занимает 90% поверхности диода с лицевой стороны, что способствует меньшему разбросу чувствительности диода к нейтронному излучению как на пластине, так и между пластинами при групповом производстве. Кроме того, такая конструкция позволяет избежать неконтролируемых токов утечки, возникающих по границе скрайбирования (резки) пластины на отдельные кристаллы, так как область P-N перехода на границе разделов областей 3-1 не выходит на границу скрайбирования и защищена диоксидом кремния 7.

Полезная модель позволяет повысить чувствительность обнаружения нейтронного излучения за счет обедненной области I(N)-типа 1, находящейся между областями P-типа и N^+ -типа, выполненной в форме куба, и расположенной в ней области P-типа достигающей границы диода только с лицевой стороны и занимающей 90% её поверхности, при этом контактное окно отделено слоем диоксида кремния от остальных зон лицевой поверхности диода и составляет 80-85% площади области P^+ типа.

Таким образом достигается повышение чувствительности обнаружения нейтронного излучения.

Дозовые характеристики Pin диода

Для примера на рисунке 1 приставлена характеристика зависимости изменения напряжения на Pin структуре от поглощенной дозы нейтронного излучения спектр деления. Испытания проведены на экспериментальной базе 12 ЦНИИ МО РФ. В данном эксперименте микросборка находилась в дополнительном пластмассовом корпусе с толщиной стенки 1 мм.

Данные измерений представлены в таблице.

| Поглощенная доза по данным 12 ЦНИИ | образец 3 значение прироста напряжения открытия перехода | образец 2 значение прироста напряжения открытия перехода | образец 3 значение прироста напряжения открытия перехода | среднее значение | средняя дозовая чувствительность по точкам |
|------------------------------------|---|---|---|--|--|
| 50 | 7,151024333 | 7,240567429 | 7,225766571 | 7,205786 | 0,144116 |
| 30 | 4,470506 | 4,468416 | 4,418271 | 4,452398 | 0,148413 |
| 20 | 2,739486 | 2,707896 | 2,752481 | 2,733288 | 0,136664 |
| | | | | Средняя дозовая чувствительность | 0,143064 |

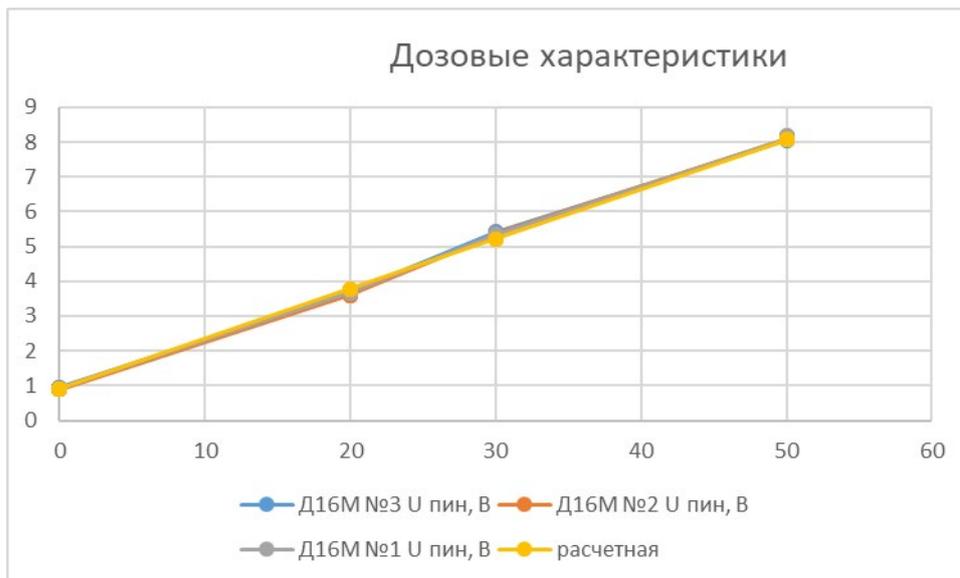
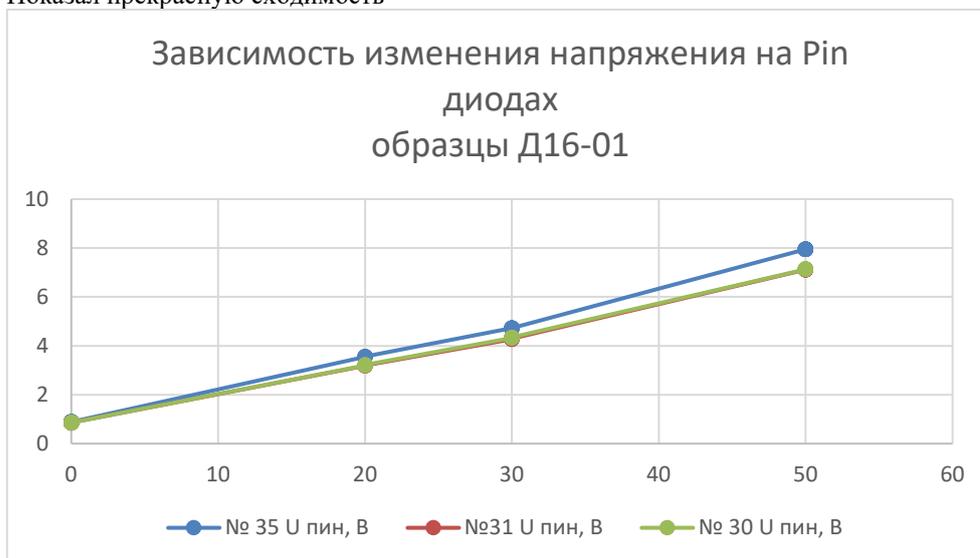


Рис 1

Повторный эксперимент на изделиях в металлическом (алюминиевом) корпусе
Показал прекрасную сходимость



| | № образц | №35 | №31 | №30 | Среднее для выборки |
|---|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| Среднее значения | | 7,953695 | 7,115606 | 7,140956 | <u>7,403419</u> |
| отклонение от среднего для точки 50 Гр. | | 7,43% | 3,89% | 0,45% | |

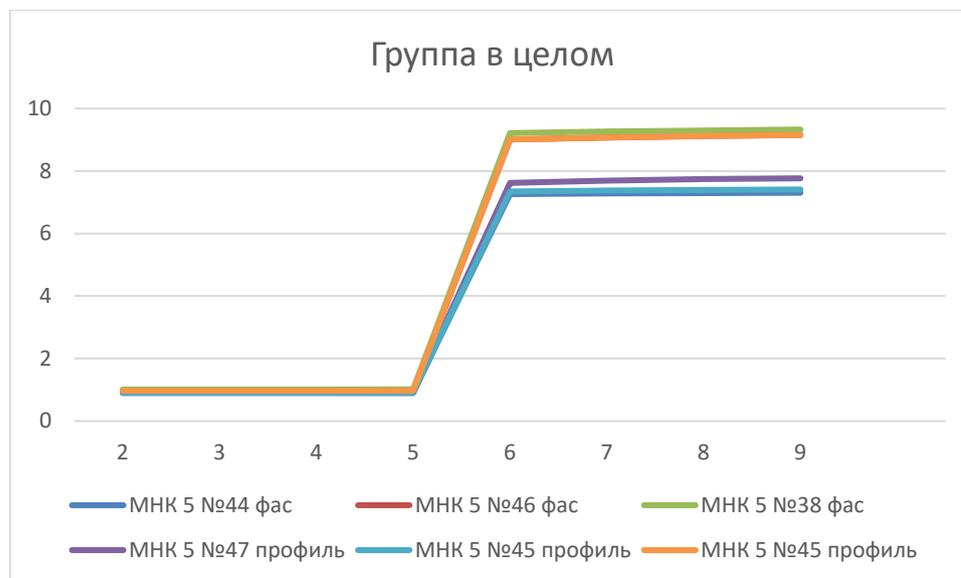
Дополнительно решено проверить расширение диапазона до 65 Гр

Образцы детекторов МНК 5 были подвергнуты облучению в двух плоскостях развернутых на 90 градусов для определения угловой зависимости чувствительности детектора

Все представленные образцы изделий и были подвергнуты однократному одномоментному облучению нейтронами (спектр деления) с поглощенной дозой 65 Гр.

Полученные результаты показывают возможность расширения диапазона регистрации поглощенной дозы до значений не менее 65 Гр.

| | | | | | | |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Измеренное | 6,372187 | 8,113378 | 8,261145 | 6,810512 | 6,475102 | 8,113378 |
| Расчетное | 9,295 | 9,295 | 9,295 | 9,295 | 9,295 | 9,295 |
| Погрешность | 31% | 13% | 11% | 27% | 30% | 13% |
| Средняя погрешность по группам | | | 18% | | | 23% |
| Средняя погрешность по выборке | | | | | | 21% |



Экспериментальные данные. Их анализ. Новые ВАХ после облучения.

Испытания проводились комиссией, назначенной приказами Начальника ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России № 698 от 04.12.2020 г., № 420 от 07.07.2021 г., в периоды с 07.12.2020 г. по 31.04.2021 г., с 08.07.2021 г. по 31.08.2021 г. на моделирующих установках (МУ) ПРИЗ-М, Транс-4-1 на территории научно-испытательного центра ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Нагрузки дозиметров необходимой дозой излучений проводились в соответствии с «Методикой определения параметров нагружения образцов ВВТ на установках ПРИЗ-М, СНЕГ-13, РХ-у-30, 2010 г.» (инв. № 3/441) и «Методикой испытаний дозиметров Д-16-01, Д-16-01М детекторов МНК-5 в их составе на чувствительность к импульсному гамма-излучению с использованием моделирующей установки Транс-4-1», утвержденными начальником ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Измерения параметров нагружения объекта испытаний гамма- и нейтронным излучениями моделирующих установок ПРИЗ-М, Транс-4-1 проводились в соответствии с методиками, действующими в ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России.

Определение электро-физических параметров дозиметров до и после нагружений на МУ и оценка эффективности предлагающихся изменений в дозиметре Д-16-01, проводилась представителями Заказчика (ООО «СофтЭксперт»).

Параметры нейтронного излучения ИЯУ ПРИЗ-М в т. 2

| | | |
|---|----------------------|--------------------------------|
| 1. Дифференциальный спектр нейтронов в т.2 определен с погрешностью не более ($P=0,95$) в диапазонах: | от 10^{-4} -0,5 эВ | 5-10% |
| | от 0,5 эВ - 10 кэВ | 20 % |
| | от 10-250 кэВ | 15 % |
| | от 0,25 - 8 МэВ | 5-8% |
| | от 8 - 12 МэВ | 8% |
| | от 12- 18 МэВ | 10% |
| 2. Плотность потока нейтронов, нейтр/(см ² -с) | | $1,57 \cdot 10^9 \pm 5 \%$ |
| 3. Средняя энергия нейтронов в спектре, МэВ | | 0,516 |
| 4. Мощность поглощенной дозы нейтронов в тканеэквивалентном материале, Гр/с | | $1,89 \cdot 10^{-2} \pm 20 \%$ |

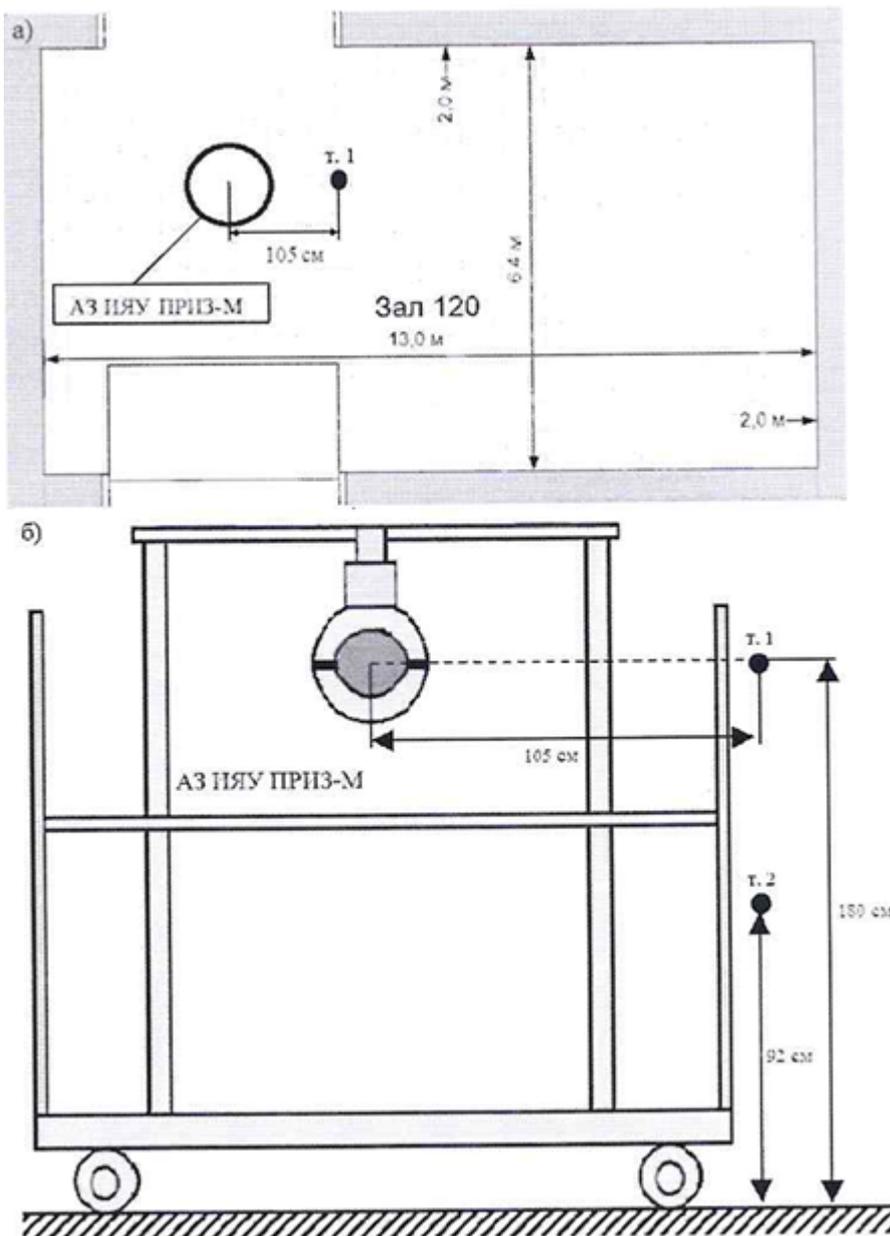


Рисунок – Условная схема расположения объекта испытания и расчетных точек: а) вид сверху; б) вид сбоку

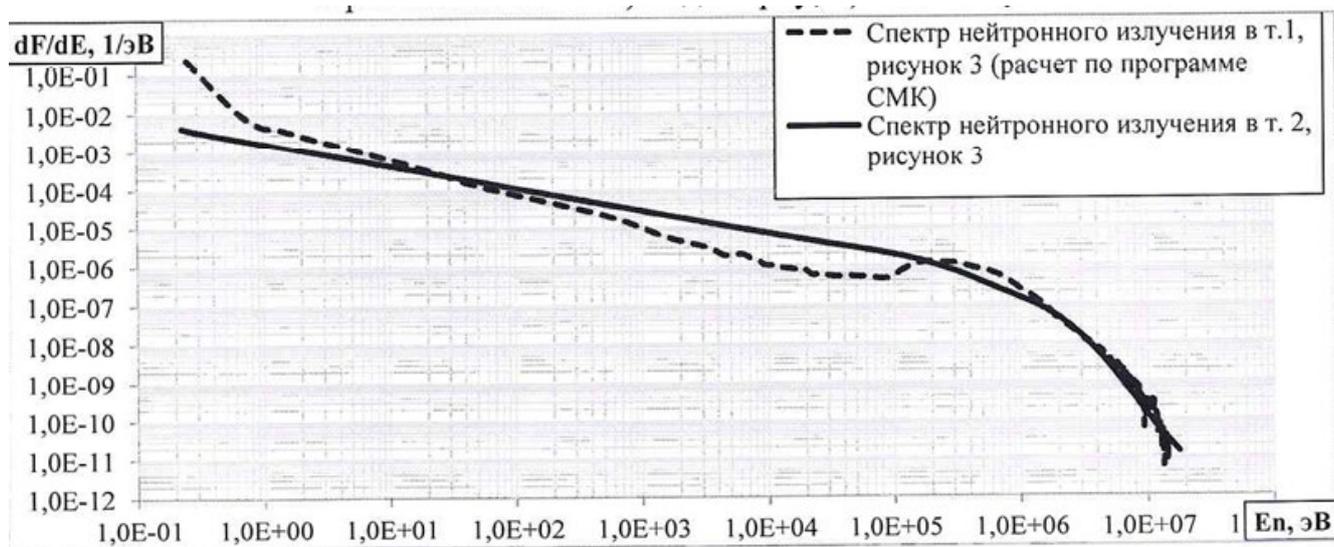


Рисунок – Дифференциальные спектры нейтронного излучения ИЯУ ПРИЗ-М

Таблица - Поглощенная доза нейтронов в т. 2 и результаты обработки показаний объектов испытаний

| Опытный образец | Заводской номер | Поглощенная доза нейтронов в тканеэквивалентном материале (т. 2), Гр | Измеренный прирост напряжения на ПИН-структуре (U,B) ' |
|-----------------|-----------------|--|--|
| Д-16-01 | 1000030 | 20 | 2,34 |
| | 1000030 | 30 | 3,45 |
| | 1000030 | 50 | 6,28 |
| | 1000030 | 65 | 9,14 |
| | 1000031 | 20 | 2,33 |
| | 1000031 | 30 | 3,42 |
| | 1000031 | 50 | 6,26 |
| | 1000031 | 65 | 7,64 |
| | 1000035 | 20 | 2,70 |
| 1000035 | 30 | 3,85 | |

| Опытный образец | Заводской номер | Поглощенная доза нейтронов в тканеэквивалентном материале (т. 2), Гр | Измеренный прирост напряжения на ПИН-структуре (U, В) |
|-----------------|-----------------|--|---|
| | 1000035 | 50 | 7,06 |
| | 1000035 | 65 | 9,12 |
| Д-16-01М | 1 | 20 | 2,75 |
| | 1 | 30 | 4,41 |
| | 1 | 50 | 7,23 |
| | 1 | 65 | 7,3 |
| | 2 | 20 | 2,70 |
| | 2 | 30 | 4,47 |
| | 2 | 50 | 7,24 |
| | 2 | 65 | 7,1 |
| | 3 | 20 | 2,73 |
| | 3 | 30 | 4,48 |
| | 3 | 50 | 7,15 |
| | 3 | 65 | 9,59 |
| МНК-5 | 00601902 | 20 | 2,22 |
| | 00601902 | 30 | 4,45 |
| | 00601902 | 50 | 7,17 |
| | 00611902 | 20 | 2,94 |
| | 00611902 | 30 | 4,31 |
| | 00611902 | 50 | 7,28 |
| | 00161902 | 20 | 2,75 |
| | 00161902 | 30 | 4,47 |
| 00161902 | 50 | 7,16 | |

Таблица Поглощенная доза нейтронов в т. 2 и результаты обработки показаний объектов испытаний, расположенных под разными углами к источнику гамма-нейтронного излучения

| Заводской номер, угол $^{\circ}$ относительно источника гамма-нейтронного излучения | Поглощенная доза нейтронов в тканеэквивалентном материале (т. 2), Гр | Измеренный прирост напряжения на ПИН-структуре (U, В) |
|---|--|---|
| 441902, 0 $^{\circ}$ | 65 | 6,37 |
| 461902, 0 $^{\circ}$ | 65 | 8,11 |
| 381902, 0 $^{\circ}$ | 65 | 8,26 |
| 471902, 90 $^{\circ}$ | 65 | 6,81 |
| 451902, 90 $^{\circ}$ | 65 | 6,53 |
| 471902, 90 $^{\circ}$ | 65 | 6,91 |

Литература

1. Holmes-Siedle A. G, Adams L. Dosimetric silica films: the influence of fields on the capture of positive charge // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1982.— Vol. NS-29.— P. 1975—1979.
2. Holmes-Siedle A. G The space charge dosimeter — general principles of a new method of radiation dosimetry // Nucl. Instrum. and Methods.— 1974.— Vol. 121.— P. 169—179.
3. Adams L., Holmes-Siedle A. The development of an MOS dosimetry unit for use in space // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1978.— Vol. NS-25.—P. 1607—1612
4. Thompson I., Thomas R. E., Berndt L. P. Radiation dosimetry with MOS sensors // Radiation Protection Dosimetry.— 1984.— Vol. 6.— P. 121—124.
5. Holmes-Siedle A. G, Adams L. RADFETs: a review of the use of metal-oxide-silicon devices as integrating dosimeters // Radiat. Phys. Chem.— 1986.— Vol. 28, N 2.— P. 235—244.
6. Hughes R. C, Huffman D., Snelling J. V et al. Miniature radiation dosimeter for in vivo radiation measurements // Int. J. Radiat. Oncol. Phys.— 1988.— Vol. 14.— P. 963—967.
7. Ensell C, Holmes-Siedle A, Adams L. Thick oxide p-MOSFET dosimeter for high energy radiation // Nucl. Instrum. and Methods.— 1988.— Vol. A269.— P. 655—658.
8. Litovchenko P. G, Barabash L. I., Rozenfeld A. B. et al. MOS structure for emergency gamma and proton dosimetry // Radiation Protection Dosimetry.— 1990.— Vol. 33.— P. 179—182.
9. Buehler M. G, Blaes B. R, Soli G A., Tardio G R. On-chip p-MOSFET dosimetry // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1993.— Vol. 40.— P. 1442—1449
10. Soubra M., Cygler J., Mackay G Evaluation of a dual bias metal oxide-silicon semiconductor field effect transistor detector as radiation dosimeter // Med. Phys.— 1994.— Vol. 21.— P. 567—572
11. Butson M. J, Rosenfeld A. B., Mathur J. N. et al. A new radiotherapy surface dose detector: the MOSFET // Med. Phys.— 1996.— Vol. 23.— P. 655—658.
12. Ramani R., Russell S., O'Brien P. Clinical dosimetry using MOSFET's // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.— 1997.— Vol. 37.— P. 959—964
13. Sarrabayrouse G, Siskos S. Radiation dose measurement using MOSFETs // IEEE Instrum. Meas. Magazine.— 1998.— Vol. 1 (2).— P. 26—
14. Halvorsen P. H Dosimetric evaluation of a new design MOSFET in vivo dosimeter // Med. Phys.— 2005.— Vol. 32.— P. 110—117.
15. Gladstone D. J., Lu X Q., Humm J. L et al. A Miniature MOSFET radiation dosimeter probe // Med. Phys.—1994.— Vol. 21.— P. 1721—1728.
16. Rosenfeld A. B. MOSFET dosimetry on modern radiation oncology modalities // Radiation Protection Dosimetry.— 2002.— Vol. 101.— P. 393—398.
17. Asensio L. J., Carvajal M. A., Lopez-Villanueva J. A. et al. Evaluation of low-cost commercial MOSFET as radiation dosimeter // Sensors and Actuators.— 2006.— Vol. A125.— P. 288—295.
18. Kwan I. S., Rosenfeld A. B., Qi Z. Y et al. Skin dosimetry with new MOSFET detectors // Radiation Measurements.— 2008.— Vol. 43.— P. 929—932.
19. Перевертайло В. Л. Создание элементной базы для ядерно-физического и радиационного приборостроения на основе кремниевой интегральной технологии // Тр. 5-й Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные и электронные технологии».— Одесса.— 2004.— С. 200