

**МОДЕЛЬ АЛМАЗНОГО КОАКСИАЛЬНОГО СЕНСОРА
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ**
**MODEL OF A DIAMOND COAXIAL SENSOR FOR REGISTRATION
OF PROTONS AND ELECTRONS**

Каперко Алексей Федорович

д-р техн. наук, профессор, академик РАН
E-mail: akaperko@hse.ru

Недосекин Павел Геннадьевич

аспирант, инженер-конструктор 1 категории
E-mail: nedosekin@ancprotek.ru, sklir@mail.ru

**Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
“Высшая школа экономики”, Москва**

Аннотация: Представлено исследование коаксиального алмазного сенсора для регистрации протонов и электронов. Проведено моделирование процесса взаимодействия заряженных частиц в объеме сенсора в диапазоне энергий от 25 до 200 МэВ для протонов и от 300 кэВ до 5 МэВ для электронов, а также проанализирована эффективность регистрации электронов и протонов в объеме алмазного коаксиального сенсора.

Ключевые слова: алмазный сенсор; ионизирующее излучение; радиация; линейная передача энергии; счетчик; моделирование; алмаз.

ВВЕДЕНИЕ

Для регистрации окружающего ионизирующего излучения (ИИ) применяются электротехнические приборы, позволяющие фиксировать излучение либо в виде электрических импульсов, либо в виде возрастания тока в измерительной цепи [1]. Сенсор, изготовленный из полупроводникового кристалла, — это, по сути, твердотельный аналог ионизационной камеры, служащий для регистрации ионизирующего излучения. Полупроводниковые сенсоры ИИ имеют ряд достоинств — малые габариты и масса. К одним из важных параметров полупроводниковых сенсоров ИИ относится также их высокое энергетическое разрешение. Сенсоры на основе полупроводников [2]

Kaperko Alexey F.

D. Sc. (Tech.), Professor, Acting Member of of RANS
E-mail: akaperko@hse.ru

Nedosekin Pavel G.

Postgraduate, Design Engineer 1 Category
E-mail: nedosekin@ancprotek.ru, sklir@mail.ru

**Moscow Institute of Electronics and Mathematics
of National Research University Higher School
of Economics, Moscow**

Abstract: In this work, a study of a coaxial diamond sensor for registration of protons and electrons is carried out. The process of interaction of charged particles in the volume of the sensor is simulated in the energy range: from 25 MeV to 200 MeV for protons and from 300 keV to 5 MeV for electrons. The study of effective registration of electrons and protons in the volume of a diamond coaxial sensor is being carried out.

Keywords: diamond sensor; ionizing radiation; radiation; linear power transmission; enumerator; modeling; diamond.

обладают высокой линейностью, быстродействием, простотой, чувствительностью к магнитным полям.

Работа полупроводникового сенсора близка по принципу действия к работе газонаполненной ионизационной камеры. При взаимодействии ионизирующего излучения с массой полупроводникового сенсора в полупроводниковом материале образуются свободные носители заряда — электроны и дырки (в газе — электроны и ионы), которые собираются электрическим полем на соответствующих электродах. Электрический импульс тока, полученный с электродов, является полезным сигналом с сенсора. Следовательно, сенсор ионизационного типа по принципу действия представляет собой конденсатор, заполненный тем

или иным веществом (полупроводник, диэлектрик, газ). В исходном состоянии конденсатор заряжен до напряжения смещения, приложенного к противоположным обкладкам сенсора. Импульс, который возникает при ионизации сенсора (сигнальный ток), приводит к изменению заряда на противоположных обкладках конденсатора. При этом формируется импульс тока с амплитудой, равной числу образованных электронов и дырок, т. е. энергии, потерянной заряженной частицей в чувствительном объеме сенсора [3, 4].

Одним из широкозонных полупроводниковых ионизационных сенсоров является сенсор, выполненный из монокристаллического алмаза [5]. Данный вид сенсоров благодаря своим оптимальным физическим и химическим свойствам имеет перспективу длительного использования при регистрации ионизирующего излучения — это труднодоступность замены, возможность работы в агрессивных средах и при высоких температурах. Например, возможно его применение для регистрации космического излучения.

Радиационная стойкость полупроводниковых сенсоров на основе алмаза на несколько порядков выше, чем у имеющихся аналогов — сенсоров из кремния и германия.

Модель ионизирующего сенсора на основе алмаза представляет собой конденсатор с обкладками, которые наносятся на противоположные плоскости пластины из алмаза методом магнетронного осаждения металла на поверхность. На обкладках происходит формирование заряда, возникающего при ионизации заряженными частицами объема сенсора (рис. 1).

При проведении исследования в данной работе применялась программа компьютерного мо-

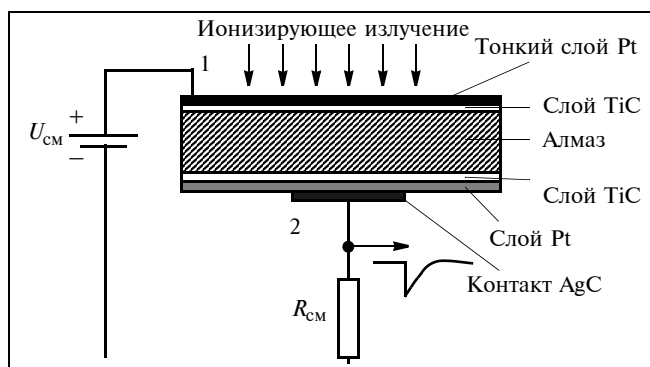


Рис. 1. Сенсор из алмаза для регистрации ионизирующего излучения

делирования Geant 4 [6, 7] с подключением библиотек.

Структура исследуемого объекта сенсора на основе алмаза в виде коаксиального конденсатора аналогична разработанной конструкции коаксиального германиевого сенсора [8] с той разницей, что модель коаксиального алмазного сенсора, заимствуя форму и расположение электрических контактов, имеет другую физическую структуру.

Эффективность регистрации ионизационного сенсора элементарных частиц — одна из важных характеристик его работы. Сбор поглощенной энергии от заряженной частицы объемом сенсора зависит от толщины и плотности вещества, из которого он состоит. Заряженные частицы в объеме полупроводника, образованные в процессе ионизации, необходимо собрать на противоположных электродах сенсора. Для этого электроны и дырки должны обладать временем жизни и высокой подвижностью μ . Время жизни носителей определяется наличием атомов примесей-ловушек и структурных дефектов, которые могут захватывать электроны и дырки в процессе их движения на некоторое время, а также способствовать их рекомбинации.

Подвижность μ определяется пропорциональностью между напряженностью электрического поля и скоростью дрейфа. При увеличении объема сенсора и расстояния между его обкладками увеличивается и расстояние, пройденное заряженными частицами. Увеличение расстояния между обкладками сенсора ведет к увеличению напряженности электрического поля, которое необходимо приложить для эффективного сбора заряда. С увеличением напряженности электрического поля растет и напряжение, прикладываемое на сенсор, что приводит к увеличению потребляемой мощности аппаратуры и возникновению токов утечки на самом сенсоре. Одним из способов решения данной задачи является разработка многослойной структуры сенсора [9] или использование коаксиального сенсора, изображенного на рис. 2.

СТРУКТУРА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОАКСИАЛЬНОГО АЛМАЗНОГО СЕНСОРА

В процессе работы построена и исследована модель с двумя типами сенсора ионизирующего излучения из алмаза: плоского конденсатора (рис. 3) и коаксиального сенсора (рис. 4).

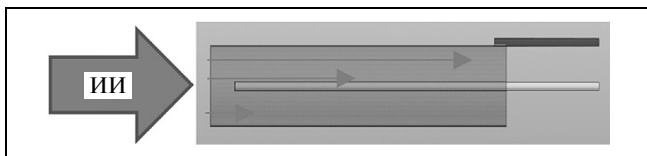


Рис. 2. Модель коаксиального алмазного сенсора

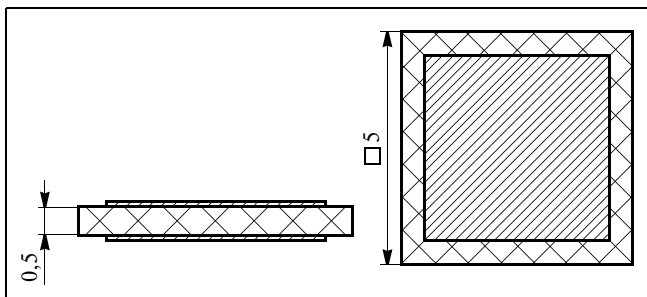


Рис. 3. Алмазный сенсор, тип — плоский конденсатор

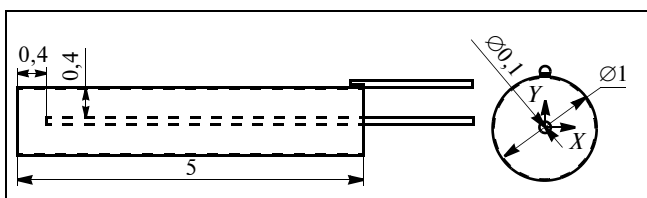


Рис. 4. Алмазный сенсор, тип — коаксиальный конденсатор

Модель алмазного сенсора в виде плоского конденсатора изготавливается из пластины алмаза 5×5 мм и толщиной 0,5 мм. На противоположные плоскости алмазной пластины, предварительно отполированные и химически обработанные, в вакуумной камере наносятся металлические электрические слои и контакты (см. рис. 1). Металлический контакт на алмазной поверхности выполняется напылением нескольких слоев для увеличения адгезивных свойств веществ. Предварительно на алмазную поверхность методом магнетронного распыления наносится подслой Ti или Ta толщиной 0,005 мм, производится отжиг для формирования слоя карбида TiC, TaC. Затем напыляется второй слой Al или Au толщиной 0,2...0,3 мм.

Коаксиальная конструкция ионизирующего сенсора из алмаза (см. рис. 4) представляет собой цилиндр из алмаза длиной 5 мм и диаметром 1 мм. На поверхность цилиндра и его верхнюю часть наносится по технологии вакуумного напыления проводящий слой металла. Центральный контакт коаксиального алмазного детектора изготавлива-

ется при помощи лазера. Лазерный луч прожигает объем кристалла по центральной оси на заданную глубину, при этом происходит изменение структуры алмаза, графитизация внутренней поверхности объема, создается проводящий электрический слой, который осуществляет собирающий электрический контакт. Крепление электрических выводных контактов от поверхности коаксиального алмазного элемента к измерительному тракту аппаратуры производится при помощи золотых проводников толщиной 0,3 мм. Фиксация собирающих контактов к поверхности коаксиального сенсора осуществляется при помощи вжигания серебряносодержащей проводящей полимерной пасты.

Модель алмазного сенсора как плоского, так и коаксиального конденсатора, строится при помощи компьютерного моделирования. В модели задаются геометрические и физические параметры сенсора и моделируется процесс прохождения заряженных частиц через его объем. Моделирование осуществляется для электронов в диапазоне энергии от 300 кэВ до 5 МэВ и протонов с энергией от 25 до 500 МэВ.

Для расчета процесса взаимодействия заряженных частиц в объеме сенсора определим длину свободного пробега частицы (много больше расстояния между атомами среды). Траекторию частицы представим как последовательность взаимодействия с отдельными атомами, при этом групповое взаимодействие частиц не учитывается. Длина свободного пробега электрона с энергией 100 эВ и протона с энергией 500 кэВ в алмазе равна постоянной решетки алмаза 3,567 Å. Поэтому движение электронов и протонов с более высокими энергиями в алмазе можно рассматривать как последовательное взаимодействие с атомами углерода.

Для процесса взаимодействия электронов и протонов с веществом [10] характерны два механизма потери энергии: ионизационные потери энергии и радиационные потери:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{полн}}^{e,p} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}}^{e,p} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}}^{e,p}.$$

Потеря энергии на ионизацию в объеме алмаза для электронов находим по формуле:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}}^e = 4,6 \cdot 10^{-4} E_e \frac{Z^2 p}{A} (14,6 \cdot \ln Z), [\text{эВ/см}],$$

для протонов:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}}^p = 3,05 \cdot 10^5 \frac{Zz^2 \rho}{A\beta^2} \times \left[11,2 + \ln \frac{\beta^2}{Z(1-\beta^2)} - \beta^2 \right], \text{ [МэВ/см]},$$

где ρ — плотность вещества; A , Z — атомный вес и заряд атома среды; z , $\beta = v/c$ — заряд и относительная скорость частицы.

Радиационные потери пропорциональны энергии электронов, протонов и определяются по следующей формуле:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}}^{e,p} = \frac{1}{l_{\text{рад}}} E,$$

из которой видно, что энергия уменьшается экспоненциально:

$$E = E_0 e^{-\frac{x}{l_{\text{рад}}}},$$

где $l_{\text{рад}}$ — радиационная длина, на котором энергия электрона, протона в результате потерь на излучение уменьшается в e раз, x — толщина объема вещества, который преодолевает электрон, протон:

$$l_{\text{рад}} = \frac{1}{4n\alpha r_e^2 Z^2 \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right)},$$

где

$$\alpha = \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137} \text{ — постоянная тонкой структуры;}$$

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2} \text{ — классический радиус электрона;}$$

$$n = \frac{Z\rho N_a}{A}, N_a \text{ — число Авогадро;}$$

m_e — масса электрона; c — скорость света;

$m_e c^2 = 511$ кэВ — масса покоя электрона.

Помимо процесса передачи энергии от электронов и протонов объему сенсора необходимо определить интенсивность взаимодействия электронов и протонов, прошедших через объем сенсора.

В ядерной физике подобные процессы описываются с помощью поперечных сечений и интен-

сивности провзаимодействовавших электронов, протонов и определяются по формуле [11]:

$$\frac{dI}{dx} = -I_0 \sigma N,$$

где $\sigma N dx$ — площадь исследуемого объекта, через который проходит поток частиц; I_0 — поток частиц, падающий на объект исследования и пересекающий его, он будет взаимодействовать с объемом вещества, и интенсивность пучка будет изменяться на величину dI от пройденного расстояния dx ; коэффициент пропорциональности σ — ядерное поперечное сечение объекта исследования для частиц пучка.

Интенсивность частиц I , провзаимодействовавших с объемом исследуемого объекта, определяется по формуле:

$$I = I_0(1 - e^{-\mu x}),$$

где $\mu = \sigma N$ — коэффициент поглощения $N = \frac{\rho}{A} N_a$.

Ионизационные потери энергии при $v \approx c$ пропорциональны величине Z и логарифму энергии, а потери на излучение растут линейно с энергией и пропорциональны Z^2 , поэтому при больших энергиях потери на излучение преобладают:

$$\sigma = 6 \cdot 10^{-28} Z^2 \left[4 \cdot \ln\left(\frac{2E}{m_e c^2}\right) - \frac{4}{3} \right].$$

Входные данные для моделирования представлены на рис. 5. Источник излучения протонов задается с энергией частиц в диапазоне 25, 50, 100, 200 МэВ, количество частиц, падающих на исследуемый объект, равно 10^6 .

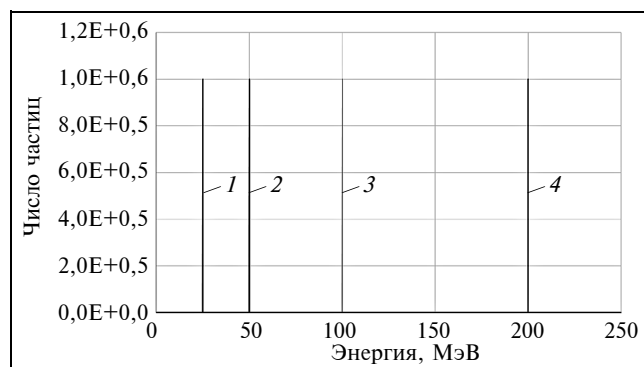


Рис. 5. Энергия источника излучения протонов: 1 — 25 МэВ; 2 — 50 МэВ; 3 — 100 МэВ; 4 — 200 МэВ

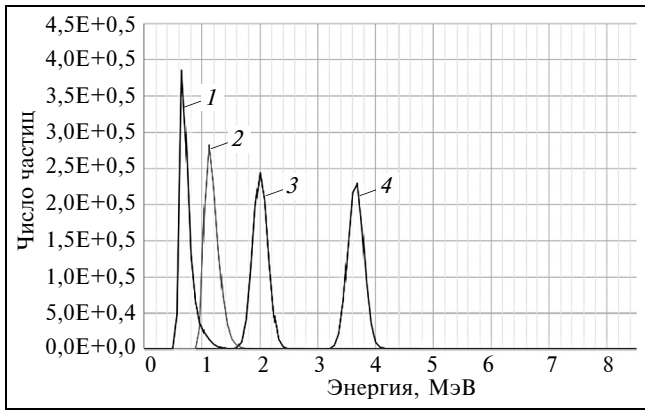


Рис. 6. Спектр поглощенной энергии протона алмазным сенсором, тип — плоский конденсатор:
1 — 25 МэВ; 2 — 50 МэВ; 3 — 100 МэВ; 4 — 200 МэВ

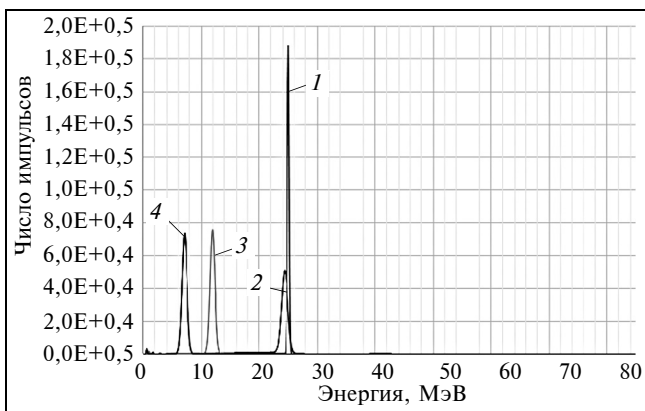


Рис. 7. Спектр поглощенной энергии протона алмазным сенсором, тип — коаксиальный конденсатор:
1 — 25 МэВ; 2 — 50 МэВ; 3 — 100 МэВ; 4 — 200 МэВ

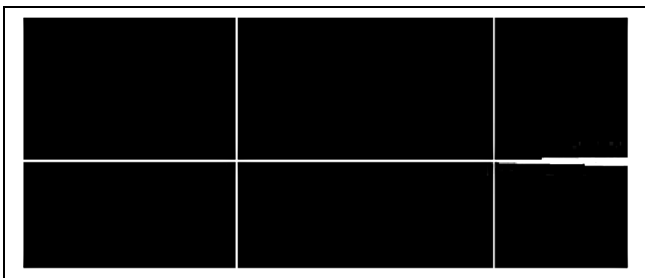


Рис. 8. Прохождение протонов с энергией 25 МэВ через объем алмаза ионизирующего сенсора в виде плоского конденсатора

Моделируя процесс прохождения протонов с заданной энергией через объем алмазного сенсора, получаем спектры, изображенные на рис. 6 и 7.

Анализируя полученные данные табл. 1 и рис. 6, 7, видно, что при повышении энергии протона в обоих случаях частица проходит через исследуемый объект и оставляет поглощенный в объ-

еме вещества минимум энергии, следовательно, эффективность регистрации падает. В то же время при сравнении двух спектров видно, что эффективность поглощения энергии протона у коаксиального типа выше, чем у плоского конденсатора. Частицы с энергией 25 и 50 МэВ передают больше энергии в случае коаксиальной конструкции алмазного сенсора. Стоит отметить пик энергии протонов при 25 МэВ, где происходит полное поглощение энергии объемом коаксиального алмазного сенсора. Процесс моделирования отображен на рис. 8, 9 и 10, где наблюдается процесс прохождения протона через объем сенсора.

Рассмотрим процесс моделирования прохождения электронов с энергией 300, 500 кэВ, 1 и 5 МэВ через исследуемые образцы с теми же технологическими параметрами.

Спектр источника излучения электронов для алмазного сенсора в виде плоского конденсатора и коаксиального сенсора представлен на рис. 11.

Данные моделирования прохождения электронов через исследуемый образец показаны в спектрах на рис. 12 и 13.

Анализ табл. 2 и рис. 12 и 13 полученных спектров прохождения электронов через объект

Таблица 1

Эффективность работы алмазного сенсора.
Интенсивность падающих протонов $I_0 = 10^6$,
 x — толщина сенсора

Алмазный сенсор	Плоский конденсатор, $x = 0,5$ мм		Коаксиальный конденсатор, $x = 5$ мм	
	dI/dx , частиц	dE/dx , МэВ	dI/dx , частиц	dE/dx , МэВ
25	$2,2 \cdot 10^5$	3,68	$1,81 \cdot 10^5$	25,04
50	$2,43 \cdot 10^5$	2	$0,49 \cdot 10^5$	24,56
100	$2,83 \cdot 10^5$	1,12	$0,733 \cdot 10^5$	12,7
200	$3,9 \cdot 10^5$	0,64	$0,735 \cdot 10^5$	7,2

Таблица 2

Эффективность работы алмазного сенсора.
Интенсивность падающих электронов $I_0 = 10^6$

Алмазный сенсор	Тип — плоский конденсатор, $x = 0,5$ мм		Тип — коаксиальный конденсатор, $x = 5$ мм	
	dI/dx , частиц	dE/dx , МэВ	dI/dx , частиц	dE/dx , МэВ
300 кэВ	$0,875 \cdot 10^5$	0,3	$0,737 \cdot 10^5$	0,3
500 кэВ	$0,646 \cdot 10^5$	0,5	$0,439 \cdot 10^5$	0,5
1 МэВ	$0,247 \cdot 10^5$	0,26	$0,13 \cdot 10^5$	0,98
5 МэВ	$0,432 \cdot 10^5$	0,224	$0,0313 \cdot 10^5$	1,79

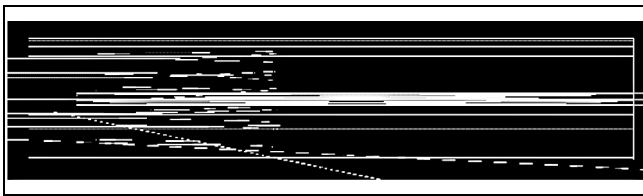


Рис. 9. Прохождение протонов с энергией 25 МэВ через объем алмаза в виде сенсора коаксиального типа

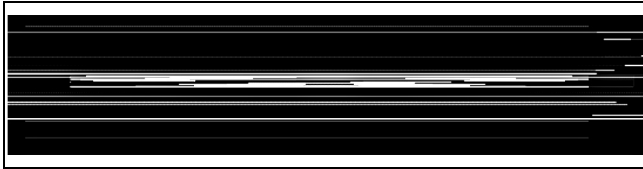


Рис. 10. Прохождение протонов с энергией 200 МэВ через объем алмаза в виде сенсора коаксиального типа

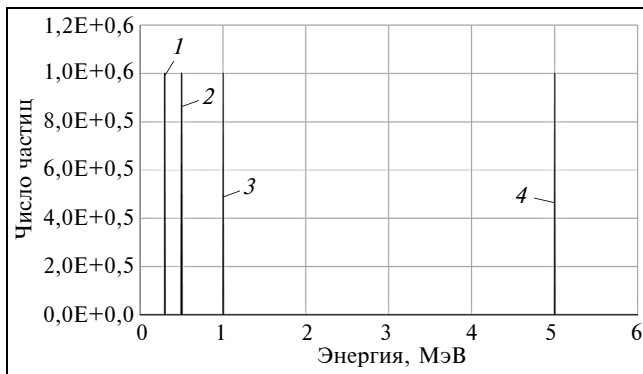


Рис. 11. Энергия излучения источника электронов: 1 — 300 кэВ; 2 — 500 кэВ; 3 — 1 МэВ; 4 — 5 МэВ

исследования показывает, что в обоих случаях построения модели для алмазного сенсора плоского и коаксиального конденсаторов изменения спектра незначительны. Стоит отметить, что для энергии электрона в 1 МэВ конденсаторный тип сенсора более эффективен при регистрации электронов. Количество электронов, проходящих через объем образца в виде плоского конденсатора, и энергия, поглощенная им, выше, чем у сенсора коаксиального типа.

С повышением энергии электронов наблюдается тенденция улучшения регистрации сенсором коаксиального типа, но сравнительно небольшая. Видно, что эффективность поглощения энергии объемом вещества сенсора коаксиального типа выше, в то же время уровень количества электронов, поглощенный объемом, мал. Данная ситуация связана с изменением траектории движения электронов при соударениях с элементарными

частицами и ядрами кристаллической решетки в объеме алмаза. Коаксиальному типу сенсора не хватает площади для эффективной регистрации электронов.

В процессе моделирования на рис. 13 наблюдалось появление вторичного “горба” на спектре. Это связано с образованием вторичных электронов, столкновением электронов в объеме сенсора с элементарными частицами, которые отражаются, меняют траекторию движения и порождают другие заряженные частицы. Первый “горб” отображает первое взаимодействие электронов до момента, когда электроны покинули объем исследуемого образца и то количество энергии, которое они передали образцу. Пик спектра показывает электроны, которые остались в исследуемом образце и передали свою энергию.

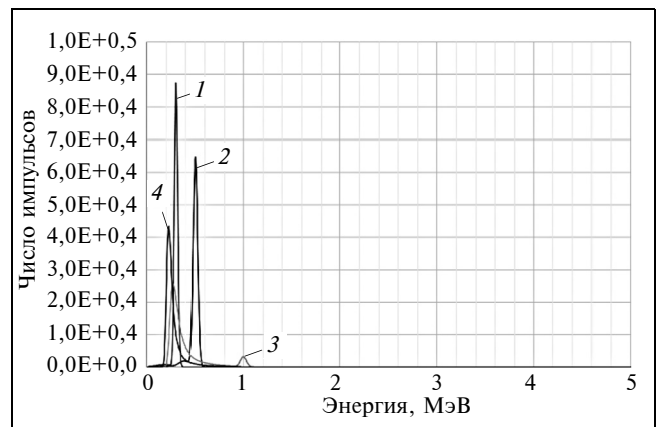


Рис. 12. Спектр поглощенной энергии электрона алмазным сенсором, тип — плоский конденсатор: 1 — 300 кэВ; 2 — 500 кэВ; 3 — 1 МэВ; 4 — 5 МэВ

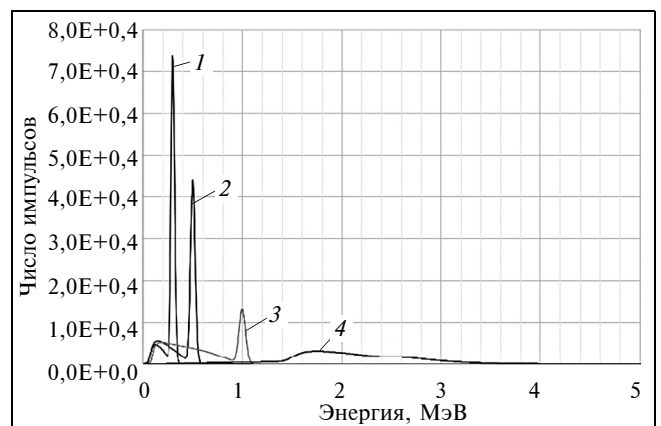


Рис. 13. Спектр поглощенной энергии электрона алмазным сенсором, тип — коаксиальный конденсатор: 1 — 300 кэВ; 2 — 500 кэВ; 3 — 1 МэВ; 4 — 5 МэВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что в процессе работы были получены модели взаимодействия заряженных частиц с объемом алмазного сенсора разного типа — плоского и коаксиального конденсаторов.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что ионизирующий алмазный сенсор в виде коаксиального конденсатора хорошо работает для эффективного сбора заряда протонов в диапазоне энергии 10...50 МэВ, что можно видеть по рис. 7. При энергии протона 25 МэВ наблюдается пик полного поглощения энергии, т. е. протон полностью отдает свою энергию в объеме сенсора. Сенсор же конденсаторного типа едва реагирует на взаимодействие заряженных частиц с ним.

Анализируя данные моделирования при регистрации электронов, отметим факт полного поглощения частиц с энергией 300 и 500 кэВ для обоих типов сенсоров. В то же время следует отметить, что коаксиальный тип сенсора регистрирует меньше попадающих электронов, чем конденсаторный из-за недостаточности его рабочей площади.

Следует отметить, что коаксиальный алмазный сенсор при энергиях электрона от 1 до 5 МэВ, в отличие от сенсора конденсаторного типа, продолжает регистрировать пролетающие частицы. Следовательно, благодаря длине коаксиального сенсора, по которой проходят электроны больших энергий и передают заряд, сенсор остается чувствительным к ионизирующему излучению.

Из проведенных исследований и полученных данных можно сделать вывод, что коаксиальный алмазный сенсор эффективнее сенсора в виде плоского конденсатора при одинаковых входных параметрах, заложенных в процессе компьютерного моделирования.

Для повышения эффективности работы коаксиального ионизирующего детектора из алмаза можно создать матрицу, которая будет состоять из набора коаксиальных детекторов и регистрировать электроны, выходящие из объема сенсора. Также это позволит разработать координатный детектор, в котором условно один коаксиальный детектор принимается за независимый пиксель матрицы, и снимать с него электрический сигнал. Одним из возможных применений такого детектора в астрономии может послужить установка та-

ких матриц на телескопы для построения рентгеновской карты неба.

Еще раз отметим в качестве преимущества малые габариты радиационного детектора коаксиального типа из алмаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко В. И., Силаева М. Е. Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов: Учебное пособие. Образовательная программа в области физической ядерной безопасности. — М.: МНТЦ “Ответственная наука”, 2011. — 356 с. [Boiko V. I., Silaeva M. E. Methods and instruments for measuring nuclear and other radioactive materials: Tutorial. Nuclear Security Education Program. — Moscow: MNTC “Responsible Science”, 2011. — 356 p. (In Russian)]
2. Акимов Ю. К. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 344 с. [Akimov Yu. K. Semiconductor detectors in experimental physics. — Moscow: Energoatomizdat, 1989. — 344 p. (In Russian)]
3. Сидоренко В. В., Кузнецов Ю. А., Оводенко А. А. Детекторы ионизирующих излучений: Справочник. Л.: Судостроение, 1984. — 240 с. [Sidorenko V. V., Kuznetsov Yu. A., Ovodenko A. A. Ionizing radiation detectors: Handbook. — Leningrad: Sudostroyeniye, 1984. — 240 p. (In Russian)]
4. Болодыня А. И., Ободовский И. М. Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Принципы и применения. — М.: ИД Интеллект, 2012. — 208 с. [Bolzdynya A. I., Obodovsky I. M. Detectors of ionizing particles and radiation. Principles and Applications. — Moscow: ID Intellect, 2012. — 208 p. (In Russian)]
5. Козлов С. Ф. Алмазные детекторы ядерных излучений. Алмаз в электронной технике. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 248 с. [Kozlov S. F. Diamond detectors of nuclear radiation. Diamond in electronic technology. — Moscow: Energoatomizdat, 1990. — 248 p. (In Russian)]
6. Geant 4 Software Installation [Electronic resource]. URL: http://geant4.web.cern.ch/geant4/collaboration/working_groups/softman/trainig/installation.pdf (reference date 10.08.2020).
7. Installation guide for Geant4 [Electronic resource]. URL: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/Users-Guides/InstallationGuide> (reference date 10.08.2020).
8. Germanium detector types [Electronic resource]. URL: <https://www.mirion.com/learning-center/radiation-detector-types/germanium-detector-types> (reference date 10.08.2020).
9. Недосекин П. Г. Трехслойный детектор гамма излучения на основе алмаза // Датчики и Системы. — 2019. — № 4. — С. 20–26. [Nedosekin P. G. Three-layer diamond-based gamma-ray detector // Sensors and Systems. — 2019. — N 4. — P. 20–26. (In Russian)]
10. Черняев А. П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. — М.: Физматлит, 2004. — 152 с. [Chernyaev A. P. Interaction of ionizing radiation with matter. — Moscow: Fizmatlit, 2004. — 152 p. (In Russian)]
11. Ольховский И. И. Курс теоретической механики для физиков. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: МГУ, 1974. — 569 с. [Olkhovsky I. I. A course in theoretical mechanics for physicists. 2nd ed., Rev. and add. — Moscow: MSU, 1974. — 569 p. (In Russian)]

Поступила в редакцию 26.02.2020

После доработки 20.04.2020

Принята к публикации 18.05.2020