

№ 20 (241), вып. 44
Сентябрь 2016

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1995 г.
Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Учредитель:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Издатель:
НИУ «БелГУ»
Издательский дом «Белгород»
Адрес редакции, издателя, типографии:
308015 г. Белгород, ул. Победы, 85

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС 77-63055
от 10 сентября 2015 г.
Выходит 4 раза в год.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

О.Н. Полухин,
ректор НИУ «БелГУ», доктор
политических наук, профессор

Зам. главного редактора

И.С. Константинов,
проректор по научной
и инновационной работе НИУ «БелГУ»,
доктор технических наук, профессор

Научный редактор

В.М. Московкин,
профессор кафедры мировой экономики
НИУ «БелГУ», доктор географических
наук

Ответственный секретарь:

О.В. Шевченко,
зам. начальника УНИИ НИУ «БелГУ»,
кандидат исторических наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ ЖУРНАЛА

Главный редактор серии

А.В. Носков
(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

НАУЧНЫЕ ВЕДОМОСТИ

Белгородского государственного университета

Математика. Физика

Belgorod State University Scientific Bulletin Mathematics & Physics

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА

- В.П. Архипов, А.В. Глушак**
Вырождающиеся дифференциальные уравнения второго порядка. Асимптотические представления решений **5**
- И.В. Рахмелевич**
О решениях многомерного параболического уравнения второго порядка со степенными нелинейностями **23**
- В.М. Московкин**
Теорема Пифагора. Четыре новых доказательства **34**
- Г.В. Гаркавенко, Н.Б. Ускова, А.Р. Зголич**
Метод подобных операторов и спектральные свойства разностного оператора с четным потенциалом **42**
- И.И. Струкова**
Периодические на бесконечности функции ограниченной вариации **50**
- А.Н. Шелковой**
Асимптотика собственных значений дифференциального оператора с нелокальными краевыми условиями **60**
- Н.Д. Бирюк, А.Ю. Кривцов**
Второй метод Ляпунова и его применение в анализе устойчивости параметрического контура **69**

ФИЗИКА

- С.В. Блажевич, А.В. Носков, А.С. Старовойтов**
Применение углового распределения дифрагированного переходного излучения в тонкой монокристаллической мишени для определения расходимости пучка релятивистских электронов **77**
- О.В. Дудка, А.А. Мазилов, Ю.А. Гордиенко**
Поверхностная самодиффузия вольфрама и молибдена, активированная низкоэнергетичным облучением атомами гелия **86**

Заместитель главного редактора

Н.В. Малай

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

Ответственный секретарь

Р.А. Загороднюк

(аспирант НИУ БелГУ)

Члены редколлегии:

С.В. Блажевич

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

А.Н. Беляков

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

И.П. Борисовский

(кандидат физико-математических наук,
доцент НИУ «БелГУ»)

А.Г. Брусенцев

(доктор физико-математических наук,
профессор БГТУ им. В.Г. Шухова)

И.Е. Внуков

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

А.В. Глушак

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

Р. Кавалла

(профессор, Технический университет,
Фрайберг, Германия)

В.В. Красильников

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

А.П. Солдатов

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

В.В. Сыщенко

(доктор физико-математических наук,
профессор НИУ «БелГУ»)

Статьи представлены в авторской
редакции

Выпускающий редактор *Л.П. Котенко*

Художественный редактор *А.Н. Оберемок*

Оригинал-макет *А.В. Носков*

E-mail: noskov_a@bsu.edu.ru

Подписано в печать 12.09.2016.

Формат 60×84/8.

Гарнитура Georgia, Impact.

Усл. п. л. 22,8.

Заказ 239.

Цена свободная.

Тираж 1000 экз.

Дата выхода 30.09.2016.

Подписной индекс в Объединенном
каталоге «Пресса России» – 18078.

Оригинал-макет подготовлен
и тиражирован в Издательском доме
«Белгород»

Адрес: 308015 г. Белгород, ул. Победы, 85

А.С. Деев

Регистрация излучений с энергиями до 1,33 МэВ
детекторами малых размеров **98**

Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева

О взаимосвязи статистической и информационной
энтропии при описании состояний сложных систем **105**

**А.И. Картамышев, А.О. Боев, В.Н. Максименко,
И.В. Неласов, В.Н. Савельев, А.Г. Липницкий**

Многочастичные потенциалы межатомных
взаимодействий в системе Ti-V с учетом угловых
взаимодействий для молекулярно-динамических
расчетов **117**

Д.О. Полетаев, Д.А. Аксенов, А.Г. Липницкий

Первопринципное исследование влияния свободной
энергии электронов и тепловых колебаний атомов на
стабильность силицидов титана и растворимость
кремния в ГПУ титане **129**

В.Н. Савельев, А.Г. Липницкий

Новые многочастичные потенциалы межатомных
взаимодействий для молекулярно-динамического
моделирования вольфрама **138**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Т.С. Кумыков

Моделирование возникновения фрактальных структур
«Бабстонов» в атмосфере **149**

Н.Н. Ушакова

Математическая модель процесса формирования
космического изображения высокого и сверхвысокого
разрешения в группировке космических аппаратов **155**

Н.А. Чеканов, И.Н. Беляева, Н.Н. Чеканова

Вычислительная схема решения некоторых задач
из теории сопротивления материалов **168**

А.В. Субботин

Классификация аналитических обратимых динамических
систем **175**

Сведения об авторах 180



УДК 539.1.074.5:620.179.152

**РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ С ЭНЕРГИЯМИ ДО 1,33 МэВ
ДЕТЕКТОРАМИ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ****REGISTRATION OF THE RADIATION WITH ENERGIES UP TO 1.33 MeV
BY THE DETECTORS OF SMALL SIZES****А.С. Деев
O.S. Deiev***ННЦ «Харьковский физико-технический институт»,
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина**NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology",
1 Akademicheskaya St, Kharkov, 61108, Ukraine**E-mail: deev@kipt.kharkov.ua*

Аннотация. Детектирующим модулем на основе неохлаждаемого кремниевого планарного детектора и детектирующим модулем типа «сцинтиллятор - кремниевый фотосенсор» измерены спектры гамма-излучения источников ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{60}Co . Спектры излучения для Si планарного детектора $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ содержат пики полного поглощения для энергий γ -квантов до 662 кэВ. Экспериментально измеренная ширина пиков (FWHM) для энергий E_γ от 59.54 до 662 кэВ находится в диапазоне от 1.3 до 3.6 кэВ. Разрешение детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$ для энергий от 59.54 до 1332.5 кэВ составило 22.8–86 кэВ.

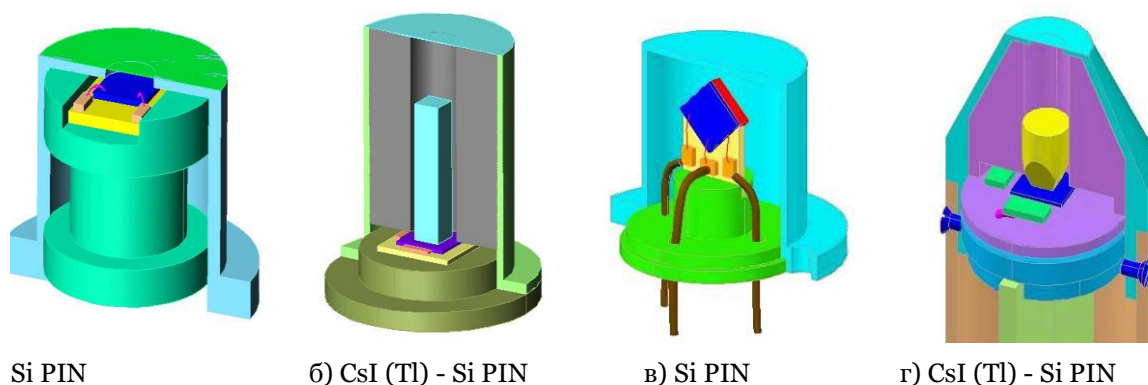
Resume. Spectra of gamma radiation of sources ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{60}Co were measured by the detecting module based on uncooled planar silicon detector and by the detecting module of the type "scintillator - silicon photo sensor". Spectra of radiation for planar Si detector $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ contain peaks of full absorption for γ -rays energies up to 662 keV. The experimentally measured width of the peaks (FWHM) for energies E_γ from 59.54 keV to 662 keV is in the range from 1.3 to 3.6 keV. The resolution of the detecting system based on scintillator CsI(Tl) $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$ for the energies from 59.54 keV to 1332.5 keV was 22.8–86 keV.

Ключевые слова: кремниевые планарные детекторы, энергетическое разрешение детектора, источники гамма-излучения.

Key words: silicon planar detectors, energy resolution of the detector, sources of gamma rays.

Введение

Изготовленные в ННЦ ХФТИ герметизированные модули неохлаждаемых планарных кремниевых детекторов толщиной 300 мкм и детектирующие системы типа сцинтиллятор CsI (Tl) – кремниевый PIN фотодиод, а также считывающая электроника показали высокую стабильность при использовании в экспериментах физики высоких энергий, ядерно-физических экспериментах, в устройствах контроля концентрации элементов, в медицинских диагностических устройствах [1-6]. Конструкция неохлаждаемого планарного Si детектора подробно описана в [2]. Экспериментально детально изучены особенности регистрации гамма-излучений [4-5]. Размеры Si детекторов $2 \times 2 \times 0.3 \text{ мм}^3$, $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$. Размеры сцинтилляторов $2 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$, $2 \times 2 \times 2.4 \text{ мм}^3$, $5 \times 5 \times 10 \text{ мм}^3$ (Рис. 1).



Si PIN

б) CsI (Tl) - Si PIN

в) Si PIN

г) CsI (Tl) - Si PIN

Рис. 1. Основные типы детектирующих модулей [1-3]

Fig. 1. Main types of detection modules [1-3]

После изготовления изделия тестируются по статическим характеристикам (токи утечки и емкость детектора в зависимости от напряжения обеднения) и по динамическим характеристикам (энергетическое разрешение детектора – полная ширина на полувысоте фотопика – FWHM). Ранее в [5,7] нами определены минимальные пороговые энергии, которые можно регистрировать такими детекторами и их предельное разрешение при комнатной температуре [7].

Для системы CsI (Tl) – Si минимальная энергия регистрации составила ~ 36 кэВ (ограничения обусловлены шумами регистрирующей системы) при разрешении FWHM ~ 25 кэВ. Для Si детектора минимальная энергия регистрации $\sim 3,5$ кэВ, а разрешение составило $0,7-0,9$ кэВ для различных типов электроники [7].

Малый размер Si детекторов обуславливает трудности при регистрации квантов с высокими энергиями (большое количество комптоновски рассеянных квантов и низкая эффективность фотопоглощения).

Целью настоящей работы является определение верхнего энергетического предела регистрации гамма-квантов детектирующими модулями двух типов. Используются радиоактивные источники ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{60}Co с энергией в диапазоне $59,54$ кэВ – $1332,5$ кэВ. Измерялись и рассчитывались в GEANT 4 спектры выделенной энергии в детекторах малых размеров.

Регистрация гамма-квантов с энергиями до $1,33$ МэВ системами CsI(Tl) – Si PIN фотодиод малых размеров

Проведены измерения для детектирующей системы CsI(Tl) – Si PIN фотодиод с размером сцинтиллятора $2 \times 2 \times 2,4$ мм³ (Рис. 2,3). Определено разрешение (FWHM) для линий излучения изотопов ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co с энергией в диапазоне $59,54$ кэВ – $1332,5$ кэВ.

Данные экспериментально определенного энергетического разрешения FWHM детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером $2 \times 2 \times 2,4$ мм³ в зависимости от энергии регистрируемого излучения представлены в табл. 1.

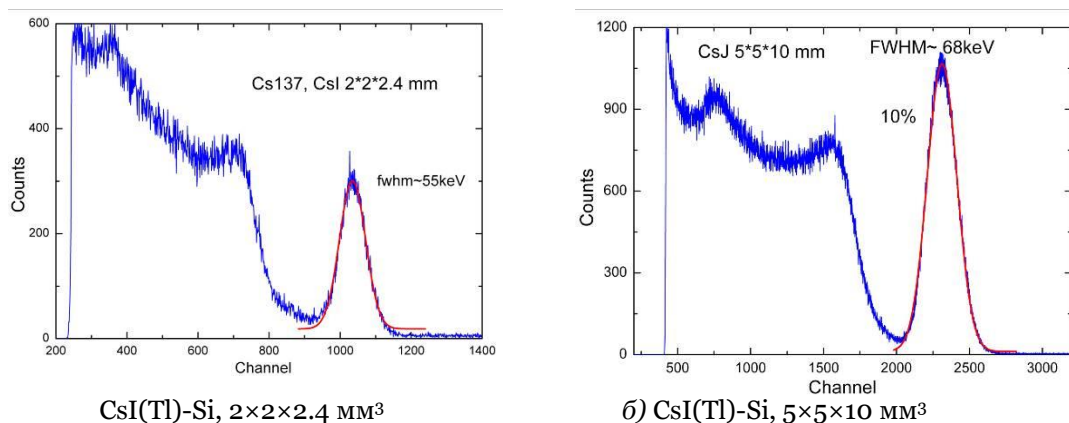


Рис. 2. Экспериментальные спектры излучения источника ^{137}Cs измеренные детектором CsI(Tl)-Si
Fig. 2. Experimental spectra of a ^{137}Cs source measured with a detector CsI(Tl)-Si

Таблица 1

Table 1

Разрешение детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером $2 \times 2 \times 2.4 \text{ mm}^3$

Resolution of the detector system based scintillator CsI (Tl) measuring $2 \times 2 \times 2.4 \text{ mm}^3$

Энергия, кэВ	59.54	122	511	662	1274.5	1332.5
FWHM	~22.8	~26.4	~52	~58	~71	~86

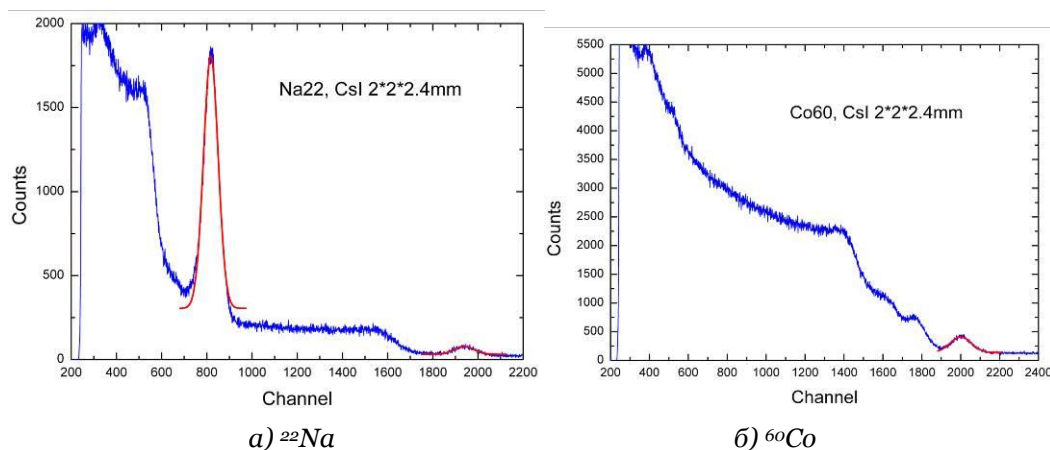


Рис. 3. Экспериментальные спектры излучения источников ^{22}Na , ^{60}Co измеренные детектором CsI(Tl)-Si
Fig. 3. Experimental emission spectra of the sources ^{22}Na , ^{60}Co measured with a detector CsI(Tl)-Si

Типичные расчеты в GEAN4 выделенной энергии, например, для ^{60}Co показаны на рис. 4.

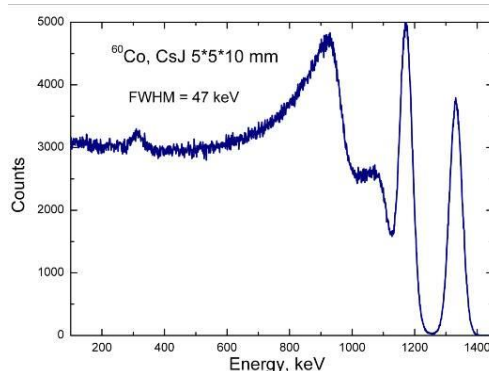


Рис. 4. Расчетные спектры выделенной энергии гамма-квантов от источника ^{60}Co в детекторе CsI(Tl)-Si размером $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$

Fig. 4. The calculated spectra of deposited energy of gamma rays from ^{60}Co source in the detector a CsI(Tl)-Si with a size of $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$

Измерения показывают возможность определения энергии излучения с энергией вплоть до 1.5 МэВ. Однако разрешение системы CsI(Tl)-Si падает, и в случае сложного спектра гамма-излучения, состоящего из нескольких линий, разделить близлежащие линии становится сложно.

Регистрация гамма-квантов с энергиями до 0.662 МэВ планарными Si детекторами

Нижний предел измерений ~ 3.5 кэВ ограничен защитной Al фольгой и шумами электроники системы ~ 1.5 кэВ. Для определения верхнего энергетического предела регистрации гамма-квантов планарным детектором использовались источники излучения ^{133}Ba и ^{137}Cs .

Относительная интенсивность линий ^{133}Ba составляет (энергия излучения в кэВ к интенсивности в процентах) E_γ/I_γ : 35/22.6; 53/2; 79.6/3; 81/34; 276/34; 276/7; 303/18; 356/62; 383/9.

На Рис. 5,6 представлены экспериментальные спектры излучения линий ^{133}Ba для Si детектора $5 \times 5 \times 0.3$ мм³, измеренные при падении квантов под прямым углом (90°) к поверхности детектора и под нулевым углом (0°) к поверхности детектора.

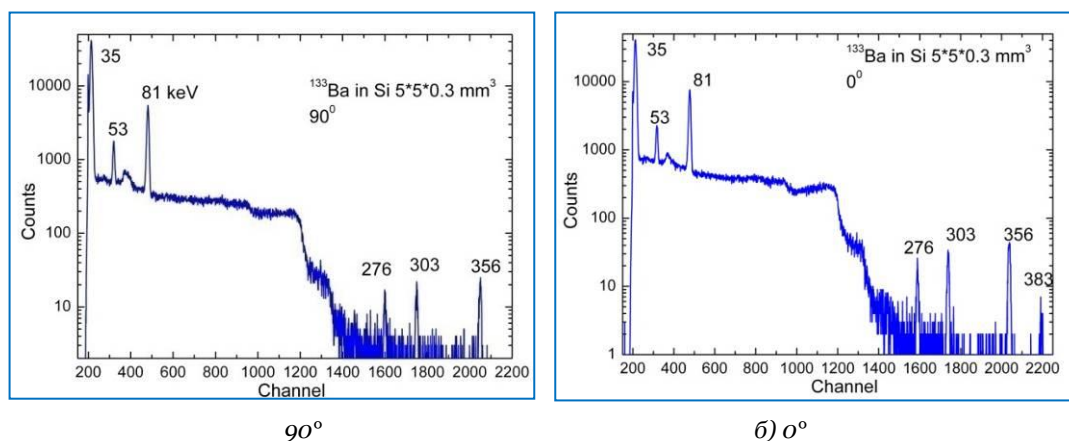


Рис. 5. Экспериментальные спектры излучения ^{133}Ba измеренные Si детектором $5 \times 5 \times 0.3$ мм³
Fig. 5. Experimental emission spectra of ^{133}Ba are measured by the Si detector of $5 \times 5 \times 0.3$ мм³

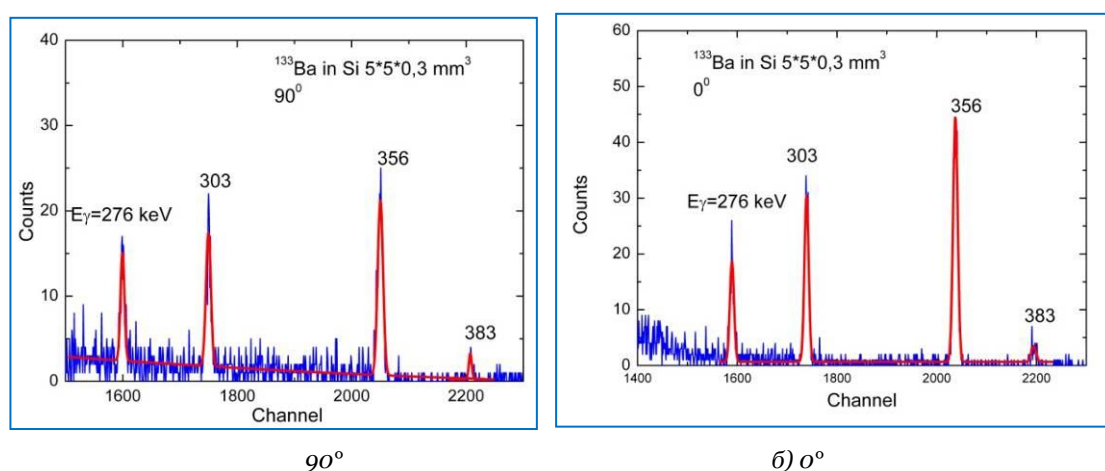


Рис. 6. Экспериментальные спектры излучения ^{133}Ba измеренные Si детектором $5 \times 5 \times 0.3$ мм³ (высокоэнергетическая часть). Фитирование пиков проведено в ORIGIN 8
Fig. 6. Experimental emission spectra of ^{133}Ba are measured by the Si detector of $5 \times 5 \times 0.3$ мм³ (high-coenergy part). The fitting of peaks is carried out in ORIGIN 8

Под углом 0° регистрируется в 2.5-3 раза больше высокоэнергетичных квантов. Расположение детектора – «ласточкин хвост» (Рис. 1,в). Линии легко идентифицируются, определены ширины линий излучения (FWHM). Расчет в GEANT4 согласуется с экспериментом (рис. 7).

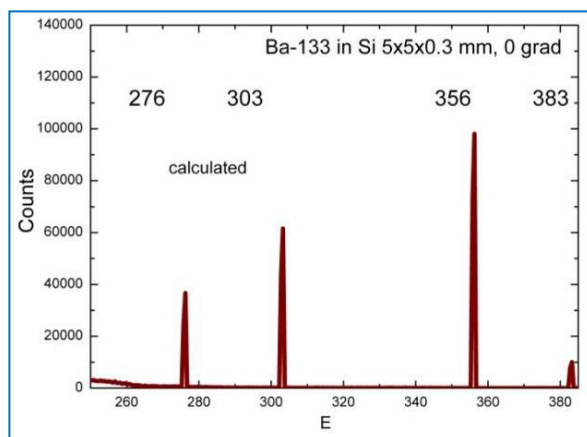


Рис. 7. Расчетные спектры выделенной энергии источника ^{133}Ba в Si детекторе $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ (высокоэнергетическая часть)

Fig. 7. The calculated spectra of deposited energy of the ^{133}Ba source in Si-detector $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ (high energy part)

Данные экспериментально определенного энергетического разрешения FWHM детектирующей системы на базе Si детектора размером $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ в зависимости от энергии регистрируемого излучения представлены в табл. 2.

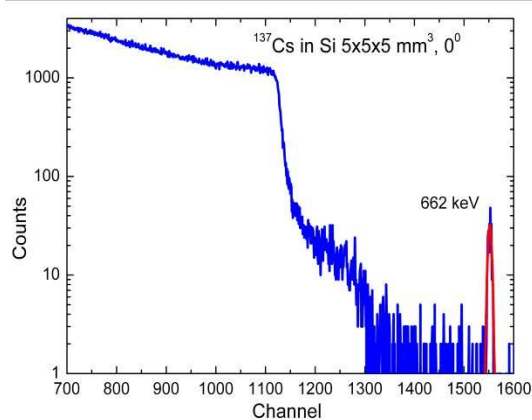
Таблица 2

Table 2

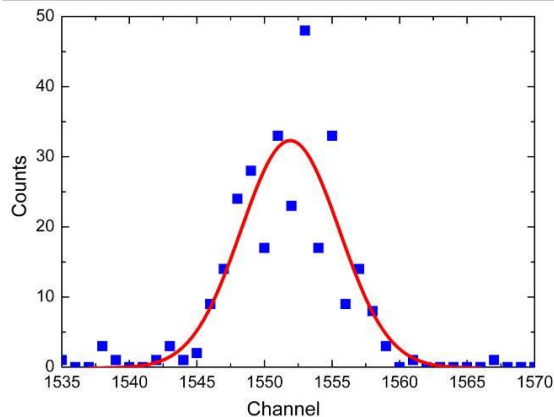
Разрешение детектирующей системы на базе Si детектора размером $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$
The resolution of the detection system based on Si detector with a size of $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$

Энергия, кэВ	59.54	53	81	276	303	356	383	662
FWHM	~1.3	~1.62	~1.67	~1.58	~1.78	~1.94	~2.03	~3.6

На рис. 8–10 представлены экспериментальные и расчетный спектры излучения источника ^{137}Cs , $E_\gamma=662 \text{ кэВ}$, измеренные Si детектором $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$, измеренные при падении квантов под прямым углом (90°) к поверхности детектора и под нулевым углом (0°) к поверхности детектора.



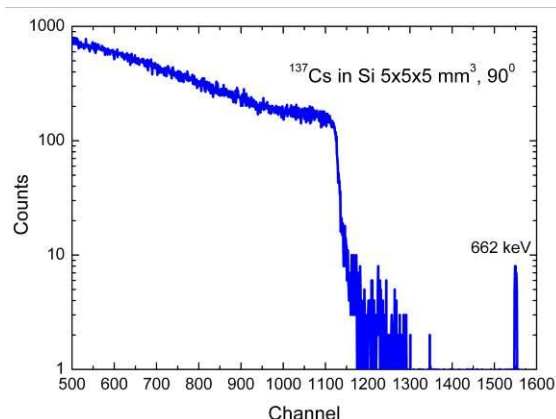
а) Экспериментальный спектр



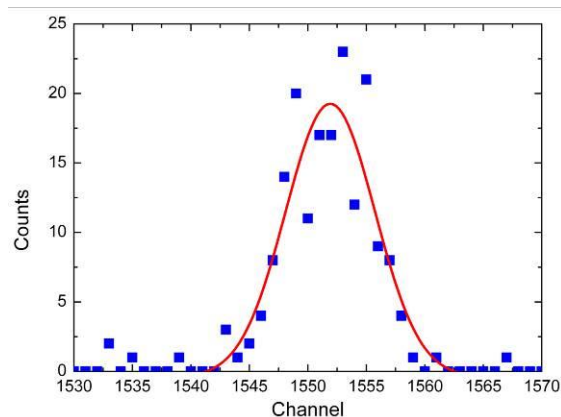
б) Пик фотопоглощения

Рис. 8. Экспериментальные спектры излучения источника ^{137}Cs , измеренные Si детектором $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ при падении квантов под углом 0° к поверхности детектора

Fig. 8. Experimental spectra of a ^{137}Cs source measured with a Si detector $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ in the fall of quanta at an angle of 0° to the surface of the detector

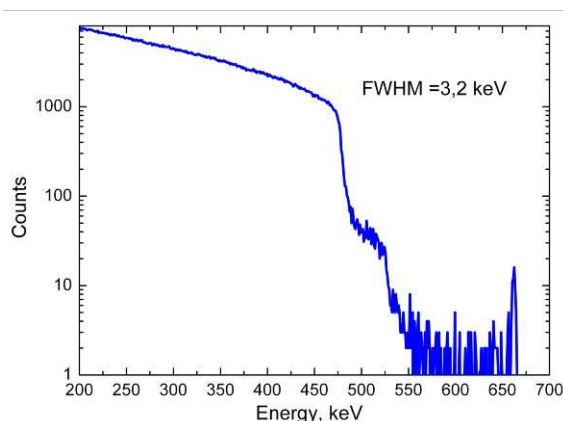


а) Экспериментальный спектр

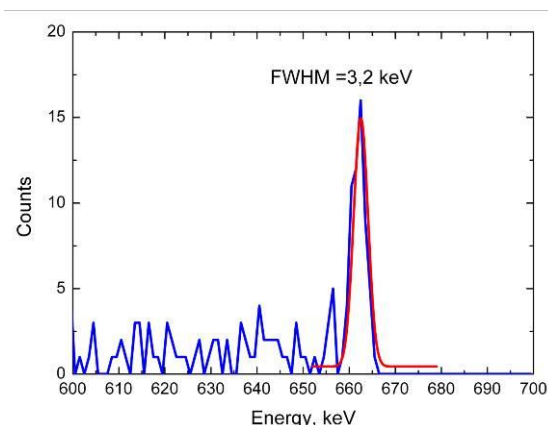


б) Пик фотопоглощения

Рис. 9. Экспериментальные спектры излучения источника ^{137}Cs , измеренные Si детектором $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ при падении квантов под углом 90° к поверхности детектора
Fig. 9. Experimental spectra of a ^{137}Cs source measured with a Si detector $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ in the fall of quanta at an angle of 90° to the surface of the detector



а) Расчетный спектр



б) Пик фотопоглощения

Рис. 10. Расчетный спектр излучения источника ^{137}Cs в Si детекторе $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ при падении квантов под углом 90° к поверхности детектора
Fig. 10. The calculated spectrum of a ^{137}Cs source in Si-detector $5 \times 5 \times 0.3 \text{ мм}^3$ in the fall of quanta at an angle of 90° to the surface of the detector

Зарегистрированных квантов в фотопике больше при падении квантов под нулевым углом (0°) к поверхности детектора. Линии идентифицируются, определена ширина фотопика FWHM $\sim 3,6 \text{ кэВ}$. Требуется очень длительные экспозиции. Расчет в GEANT 4 подобен экспериментальным данным. Для получения фотопика в случае поглощения кванта с $E_\gamma = 662 \text{ кэВ}$ необходимо поглотить электрон с энергией $\sim 660 \text{ кэВ}$, средний пробег которого в кремнии около 1.5 мм. Траектория электрона должна лежать в плоскости детектора. Регистрация таких квантов является почти предельным случаем для тонкого планарного детектора.

Выводы

Таким образом, определены верхние энергетические пределы регистрации гамма-квантов детектирующими модулями малых размеров и двух типов. Использованы радиоактивные источники ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{60}Co с энергией в диапазоне 59.54 кэВ – 1332.5 кэВ.



Экспериментально определенное разрешение детектирующей системы на основе сцинтиллятора CsI(Tl) размером $2 \times 2 \times 2.4$ мм³ составило: для энергии 59.54 кэВ – FWHM ~22,8 кэВ, для энергии 122 кэВ – FWHM ~26.4 кэВ, для энергии 511 кэВ – FWHM ~52 кэВ, для энергии 662 кэВ – FWHM ~58 кэВ, для энергии 1274.5 кэВ – FWHM ~71 кэВ, для энергии 1332.5 кэВ – FWHM ~86 кэВ. Спектры излучения для Si планарного детектора $5 \times 5 \times 0.3$ мм³, несмотря на чрезвычайно малую эффективность регистрации, содержат пики полного поглощения для энергий квантов до 662 кэВ. Экспериментально определенное разрешение детектирующей системы Si детектором $5 \times 5 \times 0.3$ мм³ составило: для энергии 59.54 кэВ – FWHM ~1.3 кэВ, для энергии 53 кэВ – FWHM ~1.62 кэВ, для энергии 81 кэВ – FWHM ~1.67 кэВ, для энергии 276 кэВ – FWHM ~1.58 кэВ, для энергии 303 кэВ – FWHM ~1.78 кэВ, для энергии 356 кэВ – FWHM ~1.94 кэВ, для энергии 383 кэВ – FWHM ~2.03 кэВ, для энергии 662 кэВ – 3.6 кэВ.

Список литературы

1. Vasilyev G.P., Voloshin V.K., Kiprich S.K. et al. 2010. Encapsulated modules of silicon detectors of ionizing radiation. Problems of atomic science and technology, № 3, Series: Nuclear Physics Investigations (54): 200-204.
 2. Maslov N.I. 2013. Physical and technological aspects of creation and applications of silicon planar detectors. Problems of atomic science and technology, № 2, Series: Nuclear Physic Investigations (84): 165-171.
 3. Kulibaba V.I., Maslov N.I., Naumov S.V., Ovchinnik V.D., Prokhorets I.M. 2001. Readout electronics for multichannel detectors. Problems of Atomic Science and Technology. Ser.:NPL. 5(39): 177-179.
 4. Bochek G.L., Deiev O.S., Maslov N.I., Voloshyn V.K. 2011. X-ray lines relative intensity depending on detector efficiency, foils and cases thickness for primary and scattered spectra. Problems of atomic science and technology, № 3, Series: Nuclear Physic Investigations (55): 42-49.
 5. Vasiliev G.P., Voloshyn V.K., Deiev O.S. et al. 2014. Measurement of Radiation Energy by Spectrometric Systems Based on Uncooled Silicon Detectors. Journal of Surface Investigation. X ray. Synchrotron and Neutron Techniques. 2(8): 391-397.
 6. Vasiliev G.P., Voloshyn V.K., Deiev O.S. et al. 2012. Radiation dose determination by dual channel spectrometer in energy range 0.005...1 MeV. Problems of atomic science and technology, 4 (80). Series: Nuclear Physic Investigations (59): 205-209.
 7. Деев А.С., Мазиллов А.А., Наумов С.В., Шулика М.Ю. 2015. Энергетическое разрешение спектрометра на основе неохлаждаемого Si планарного детектора и предварительного усилителя с емкостной и резистивно-емкостной обратной связью. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 23 (220), вып. 41: 62-70.
- Deiev O.S., Mazilov A.A., Naumov S.V., Shulika M.Yu. 2015. Energy resolution of the spectrometer based on uncooled planar Si detector and pre-amplifier with capacitive and resistive-capacitive feedback. Belgorod State University Scientific Bulletin, Mathematics & Physics, 23 (220), issue 41: 62-70.