

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра проектирования и технологии радиоэлектронных средств

Е.А. КОРНЕВ, А.С. ЛЕЛЮХИН, Е.В. ГРИБАНОВА

# **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ С ЛИНЕЙНОЙ МАТРИЦЕЙ МИКРОДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом государственного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2009

УДК 621.386 (07)

ББК 32.995 я 7

К 67

Рецензент

кандидат технических наук, доцент М.Г. Петрушанский

К 67

**Корнев, Е.А.**

**Вычислительный эксперимент с линейной матрицей**

**микродетекторов рентгенографической сканирующей системы:**

**методические указания / Корнев, Е.А., Лелюхин, А.С., Грибанова, Е.В. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009.- 31 с.**

Методические указания содержат исходные данные к вычислительному эксперименту, алгоритмы и примеры расчета спектров поглощения и пропускания в алюминиевом фильтре и чувствительной области микродетектора. Представлена также последовательность расчета распределений энергии и числа фотонов рентгеновского луча по глубине чувствительной области микродетектора.

Методические указания позволяют студентам овладеть навыками моделирования спектров пропускания и поглощения чувствительной области рентгеновских микродетекторов средствами компьютерной программы Mathcad и выполнить расчетно-графическую работу по дисциплине «Рентгеновские системы».

Методические указания могут быть использованы также при изучении дисциплин: «Физические основы рентгеновских методов диагностики и контроля», «Детекторы рентгеновских изображений», «Рентгеновские трубки, излучатели, моноблоки, питающие устройства».

Данные методические указания предназначены для студентов, обучающихся по основной образовательной программе высшего профессионального образования специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

ББК 32.995 я 7

© Корнев Е.А., 2009

© ГОУ ОГУ, 2009

## Содержание

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                                                         | 4  |
| 1 Цель и задачи вычислительного эксперимента .....                                                                     | 5  |
| 2 Исходные данные к вычислительному эксперименту .....                                                                 | 5  |
| 3 Спектры пропускания алюминиевого фильтра .....                                                                       | 8  |
| 4 Моделирование спектров пропускания и поглощения в различных сечениях<br>чувствительной области микродетектора .....  | 9  |
| 5 Распределение энергии и распределение числа поглощенных фотонов как<br>функций номера чувствительного элемента ..... | 12 |
| Список использованных источников.....                                                                                  | 14 |
| Приложение А Задание на расчетно-графическую работу по дисциплине<br>«Рентгеновские системы».....                      | 15 |

## Введение

Внедрение в медицинскую практику рентгеновских цифровых информационно-измерительных систем диагностики можно рассматривать как одно из современных направлений в развитии средств рентгенографии, обеспечивающих формирование, регистрацию и компьютерную обработку рентгенографических изображений исследуемого объекта /1/.

Известно, что расширить информативность и диагностические возможности цифровой проекционной рентгенографии можно путем применения новых спектрозональных (мультиэнергетических) методов детектирования излучения и соответствующих рентгеновских средств формирования изображений /2/. Но в спектрозональных системах полноформатного типа необходимо производить как минимум две экспозиции в разных диапазонах энергии излучения или для снижения дозы облучения пациента применять спектрально-чувствительные двухкоординатные матрицы микродетекторов, проблемами применения которых является их ограниченное быстродействие и аппаратная сложность наряду с высокой стоимостью. Практически более приемлемы спектрозональные системы сканирующего типа с однокоординатными матрицами спектрально-чувствительных микродетекторов, которые должны соответствовать достаточно высоким физико-техническим требованиям, особенно, по эффективности регистрации излучения, координатному и спектрометрическому разрешению. В новых разработках используются следующие однокоординатные детекторы: линейки сцинтилляторов с фотодиодами (NaI, CsI, ZnSe); полупроводниковые микрополосковые линейки (кристаллы GaAs, CdTe, CdZTe, Si, аморфный Si и др); микрополосковые, микроточечные или микродырочные детекторы с газовыми смесями на основе Xe, Kr /3/.

Разработка новой сканирующей спектрозональной системы на основе однокоординатных матриц спектрально-чувствительных микродетекторов, как правило, связана с обоснованным выбором типа линейки микродетекторов, с определением геометрической структуры и оптимальных размеров отдельного микродетектора и линейки микродетекторов в целом. Решение перечисленных задач, в свою очередь, предопределяет изучение спектрального состава, степени ослабления и поглощения излучения как после фильтрующих элементов, так и в различных сечениях чувствительной области линейки микродетекторов.

В настоящих методических указаниях представлена структурная схема вычислительного эксперимента, приведены исходные данные, алгоритмы и результаты расчета спектров пропускания и поглощения в алюминиевом фильтре и чувствительной области микродетектора средствами компьютерной программы Mathcad. Спектры поглощения, кроме того, используются для моделирования распределений энергии и числа фотонов рентгеновского луча по глубине чувствительной области микродетектора.

## 1 Цель и задачи вычислительного эксперимента

Целью вычислительного эксперимента является компьютерное моделирование ряда свойств линейной матрицы однотипных микродетекторов - изучение в одном или группе микродетекторов характера ослабления и поглощения рентгеновского излучения в зависимости от энергии и от толщины детектора.

Следовательно, в процессе выполнения вычислительного эксперимента необходимо решить следующие задачи:

- 1) сформулировать исходные данные к вычислительному эксперименту;
- 2) определить изменения форм спектров пропускания на выходе дополнительного фильтра после источника излучения;
- 3) определить изменения форм спектров пропускания и поглощения в различных сечениях детектора;
- 4) осуществить поиск распределения поглощенной относительной энергии и относительного числа фотонов по его толщине.

## 2 Исходные данные к вычислительному эксперименту

2.1 Структурная схема вычислительного эксперимента приведена на рисунке 1, на котором арсенид-галиевый (GaAs) детектор 5 представлен в виде линейной матрицы однотипных 128 чувствительных микродетекторов размером  $0,2 \times 0,2 \times 0,24$  мм<sup>3</sup> по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  соответственно. Поток рентгеновских квантов 4 от источника излучения 1 поступает на вход первого микродетектора после алюминиевого фильтра 2 и диафрагмы 3, формирующей узкий пучок излучения.

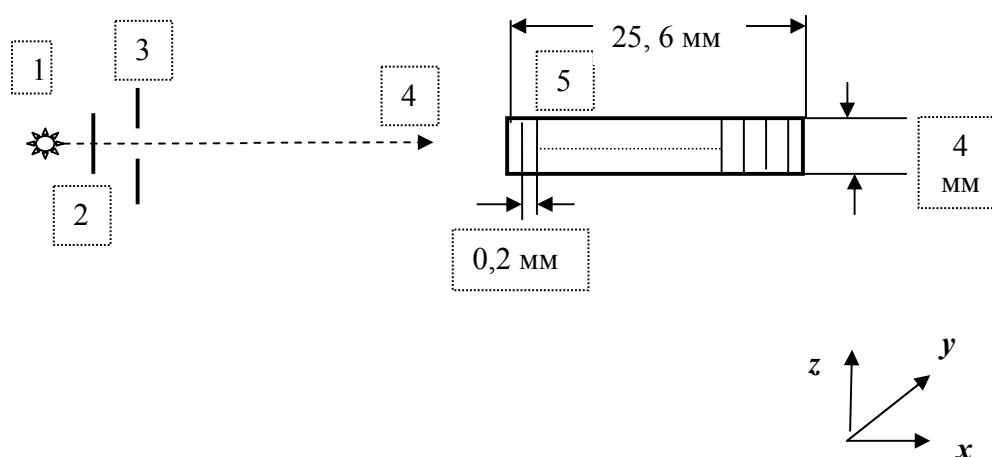


Рисунок 1 - Структурная схема вычислительного эксперимента

2.2 Для проведения вычислительного эксперимента используются следующие исходные данные:

1) диапазон энергий излучения рентгеновской трубки от минимальной  $E_{\text{мин.}}=1$  кэВ до максимальной, интервал дискретизации энергии  $\Delta E=1$  кэВ;

2) относительная спектральная плотность тормозного излучения рентгеновской трубки, описываемая аналитической зависимостью:

$$J_{E_{\text{отн}}} = \frac{J_E}{J_{E_{\text{max}}}} = \frac{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot (E_0 - E)}{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot E_0} = 1 - \frac{E}{E_0}; \quad (1)$$

3) относительное спектральное распределение числа фотонов по энергии излучения, приведенное к максимуму распределения фотонов в точке  $E_{\text{Min}}$ , в следующем виде:

$$J_{N_{\text{отн}}} = \frac{J_N}{J_{N_{\text{max}}}} = \frac{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot \left(\frac{E_0}{E} - 1\right)}{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot \left(\frac{E_0}{E_{\text{Min}}} - 1\right)} = \frac{\left(\frac{E_0}{E} - 1\right)}{\left(\frac{E_0}{E_{\text{Min}}} - 1\right)} = \frac{(E_0 - E)E_{\text{Min}}}{(E_0 - E_{\text{Min}})E} = \frac{E_{\text{Min}}}{(E_0 - E_{\text{Min}})} \left(\frac{E_0}{E} - 1\right), \quad (2)$$

где  $C$  - постоянный коэффициент, зависящий от материала мишени рентгеновской трубки и её типа;

$E_0$  - максимальная энергия рентгеновских квантов спектра тормозного рентгеновского излучения;

$h$  - постоянная Планка;

$i_a$  - анодный ток рентгеновской трубки;

$Z$  - заряд атома анодного материала трубки.

Графики относительной спектральной плотности энергии излучения от энергии (формула 1) и относительного спектрального распределения числа фотонов по энергии излучения (формула 2) представлены на рисунке 2.

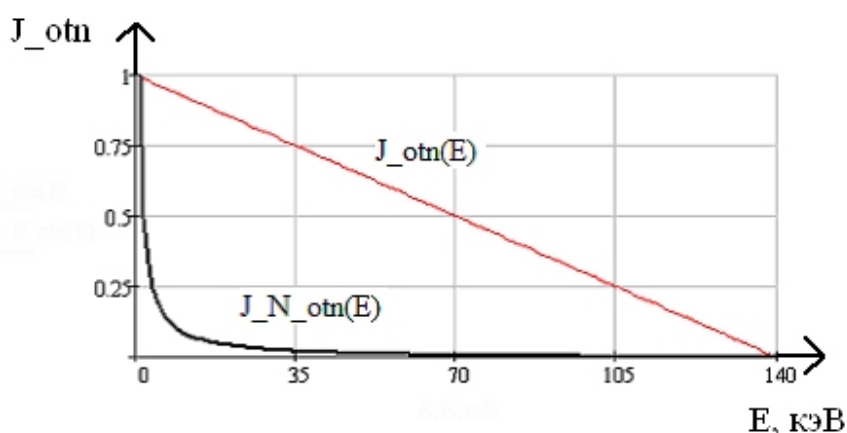


Рисунок 2 - Графики зависимостей относительной спектральной плотности излучения от энергии  $J\_otn(E)$  и спектрального распределения числа фотонов по энергии  $J\_N\_otn(E)$

4) табличные значения зависимости массового коэффициент ослабления от энергии компьютерной программы XCOM /XCOM: Photon Cross Sections on Personal Computer// by M.J. Berger and J.H.Hubbell/ National Bureau of Standards/1987.NBSIR 87-3597/.

На рисунке 3 представлены графики зависимостей массового коэффициента поглощения для алюминия (рисунок 3, а) и GaAs (рисунок 3, б), соответствующие табличным данным компьютерной программы XCOM.

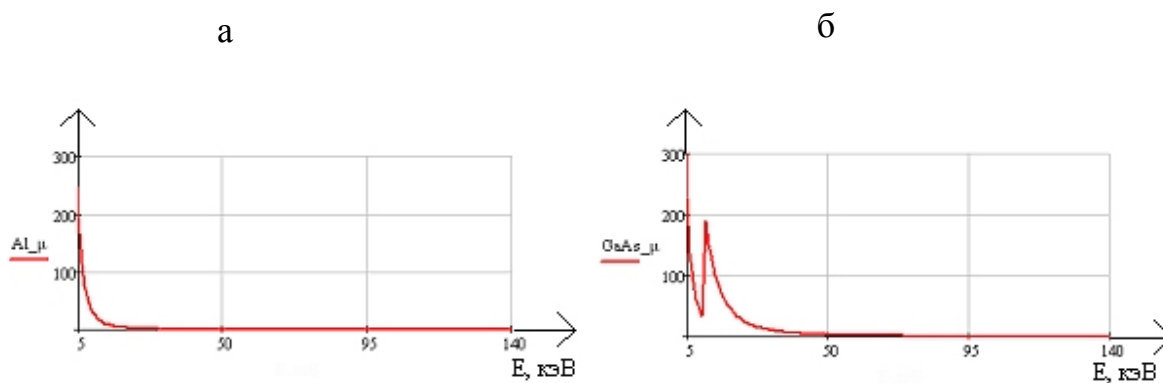


Рисунок 3- Зависимость массового коэффициента ослабления алюминия (а) и арсенида галлия (GaAs) (б) от энергии квантов,  $[cm^2/g]$

Максимум на рисунке 3, б обусловлен возбуждением флуоресцентных линий К-серии, потенциал возбуждения которых равен 10,4 кэВ для Ga и 11,9 кэВ для As.

2.3 Вычислительный эксперимент проводится в следующей последовательности: сначала определяются спектры пропускания алюминиевого

фильтра, затем моделируются спектры пропускания и поглощения в различных сечениях чувствительной области микродетектора, после этого ведутся расчеты распределений энергии и числа фотонов рентгеновского луча по глубине чувствительной области микродетектора.

### 3 Спектры пропускания алюминиевого фильтра

Алюминиевый фильтр обычно используется в рентгенографической системе для поглощения в спектре излучения рентгеновской трубки квантов низкой энергии которые лишь увеличивают поглощенную дозу в объекте исследования и не участвуют в формировании изображения.

Алюминиевый фильтр и чувствительные области микродетектора имеют нелинейные зависимости коэффициентов ослабления от энергии, что иллюстрируется графиками на рисунках 3, а и 3, б. Следовательно, для определения выходных откликов на рентгеновские воздействия, описываемые выражениями (1) и (2), необходимо использовать методы анализа нелинейных систем /4/. Для этого, необходима дискретизация по энергии относительных спектральных распределений (1) и (2) путем операции свертки с дискретной последовательностью  $\delta$ -функций:

$$J_{vx}(E) = \sum_{i=1}^{140} J_{otn}(E) \delta(E - i\Delta E), \quad (3)$$

$$J_{N_{vx}}(E) = \sum_{i=1}^{140} J_{N_{otn}}(E) \delta(E - i\Delta E). \quad (4)$$

Известно, что ослабление потока рентгеновского излучения в веществе характеризуется экспоненциальным законом и зависит от массового коэффициента ослабления, а также от плотности и толщины исследуемого объекта /5/. Следовательно, выходные отклики алюминиевого фильтра можно определить умножением нелинейной передаточной функции фильтра на дискретные последовательности относительных распределений интенсивностей (3) и (4). В этом случае пропущенные (ослабленные) спектры излучения на выходе алюминиевого фильтра можно описать в виде одномерных массивов:

$$J_{prop\_Al\_E} = e^{-\mu_1(E)\rho_1 x_1} J_{vx_E}, \quad (5)$$

$$J_{prop\_Al\_N_E} = e^{-\mu_1(E)\rho_1 x_1} J_{N_{vx_E}}, \quad (6)$$

где  $e^{-\mu_1(E)\rho_1 x_1}$  – коэффициент передачи алюминиевого фильтра;

$\mu_1(E)$  – массовый коэффициент ослабления в алюминии, являющийся функцией зависящий от энергии, см<sup>2</sup>/г;

$\rho_1 = 2,7$  — плотность объекта в рассматриваемой точке, г/см<sup>3</sup>;

$X_1 = 0,2$  — толщина слоя алюминия в направлении оси  $x$ , см.

На рисунке 4 приведены графики, описываемые выражениями (5) и (6) соответственно для спектральной плотности и спектрального распределения фотонов в зависимости от энергии на выходе алюминиевого фильтра.

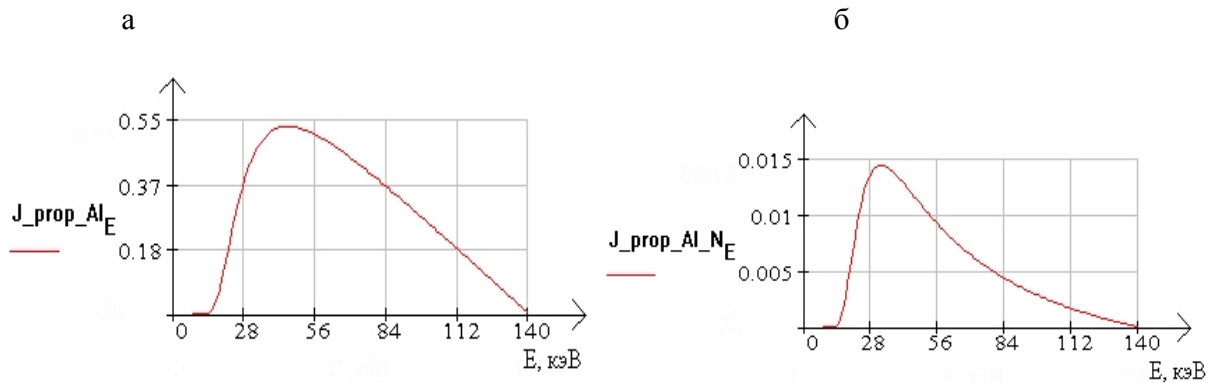


Рисунок 4 - Графики относительной спектральной плотности энергии на выходе алюминиевого фильтра: а) в случае задания спектрального распределения мощности излучения от энергии; б) в случае задания спектрального распределения числа фотонов от энергии

Нетрудно видеть, что выходные спектры алюминиевого фильтра в сравнении с соответствующими исходными спектрами излучения (рисунок 2) существенно изменяются по форме, причем излучение с низкой энергией практически полностью поглощается в фильтре, а максимумы интенсивностей уменьшаются и сдвигаются в область более высоких значений энергий.

#### 4 Моделирование спектров пропускания и поглощения в различных сечениях чувствительной области микродетектора

4.1 Спектры пропускания в различных сечениях чувствительной области микродетектора определяются так же, как для алюминиевого фильтра. При этом входным воздействием первой чувствительной области микродетектора является спектральное распределение излучения на выходе алюминиевого фильтра. Спектры пропускания после каждой чувствительной области  $n$  можно описать двумерными массивами:

$$J\_prop\_GaAs_{E,n} = e^{-\mu_2(E)\rho_2x_2^n} J\_prop\_Al_E, \quad (7)$$

$$J\_prop\_GaAs\_N_{E,n} = e^{-\mu_2(E)\rho_2x_2^n} J\_prop\_Al\_N_E, \quad (8)$$

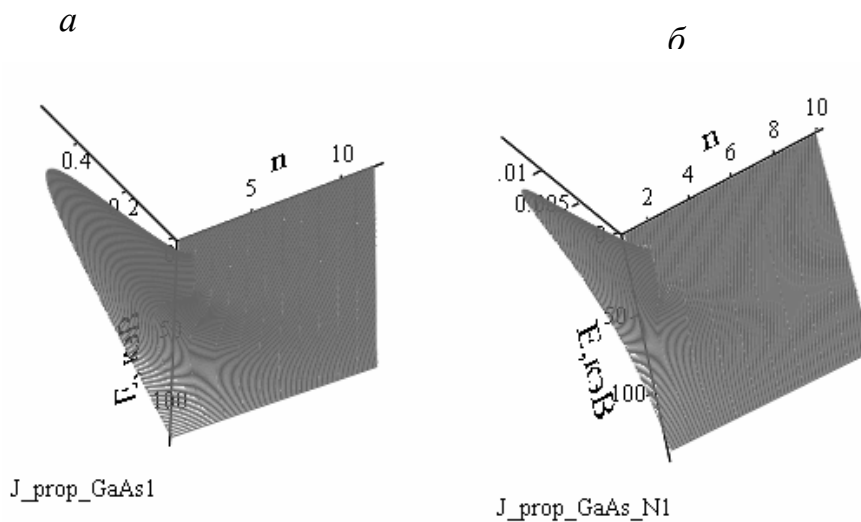
где  $e^{-\mu_2(E)\rho_2x_2^n}$  — коэффициент передачи  $n$ -й полосы фильтра;  
 $n$  — номер чувствительной области,  $n=1, 2, 3, \dots, 128$ ;

$\mu_2(E)$  – массовый коэффициент ослабления в арсениде галлия, зависящий от энергии,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;

$\rho_2 = 5,32$  — плотность объекта в рассматриваемой точке  $\text{г}/\text{см}^3$ ;

$x_2 = 0,2$  — толщина объекта в направлении оси  $x$ ,  $\text{см}$ ,

На рисунках 5, а и 5, б представлены спектры пропускания рентгеновского излучения, полученные на выходах первых десяти чувствительных элементов микродетектора в виде поверхностей, аналитические зависимости которых представлены формулами (7) и (8).

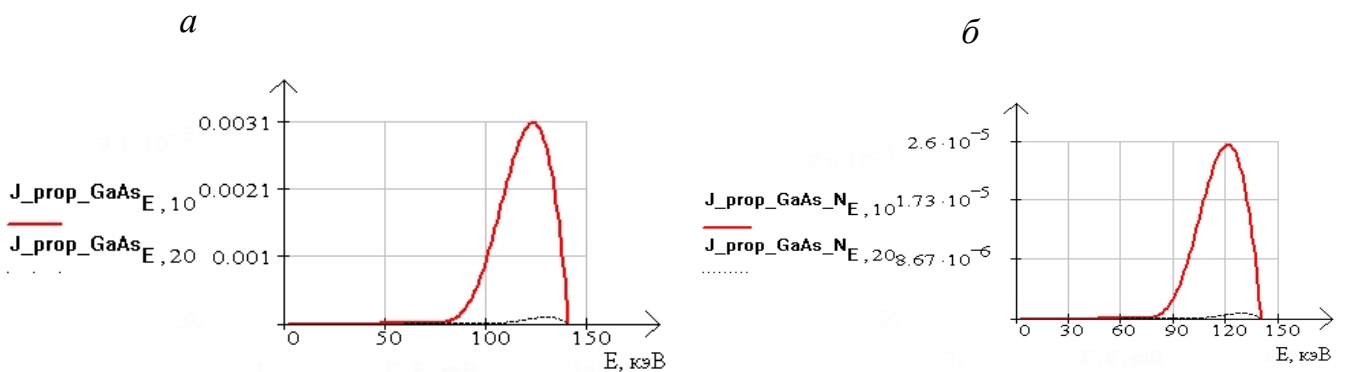


а - в случае задания спектрального распределения мощности излучения от энергии;

б- в случае задания спектрального распределения числа фотонов от энергии.

Рисунок 5- Выходные спектры пропускания рентгеновского излучения первых десяти чувствительных элементов микродетектора

Графики рисунка 6 иллюстрируют возможность получения описанным выше способом спектров пропускания рентгеновского излучения по выше изложенной методике в любом геометрическом сечении микродетектора.



*а*- в случае задания спектрального распределения мощности излучения от энергии;

*б*- в случае задания спектрального распределения числа фотонов от энергии

Рисунок 6- Спектры пропускания рентгеновского излучения 10-го и 13-го чувствительных элементов микродетектора

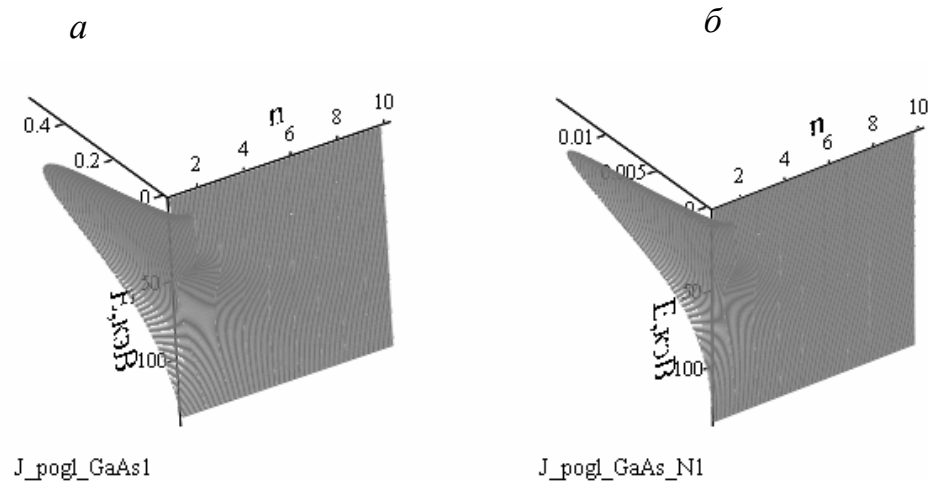
Выходные спектры рисунков 5 и 6 отражают характерную зависимость изменения спектров излучения от толщины микродетектора: максимумы тормозных спектров постепенно уменьшаются и смещаются в область более высоких энергий.

4.2 Полученные в п. 4.1 настоящих методических указаний спектры пропускания позволяют найти спектры поглощения в элементарной чувствительной ячейке с любым номером, а также распределение поглощенной энергии по толщине детектора. Используя формулы (7) и (8), можно записать спектры поглощения рентгеновского излучения в элементах микродетектора в виде разностей двумерных массивов выходных спектров пропускания *n* –го и (*n*+1) –го элемента:

$$J\_pogl_{E,n} = J\_prop_{E,n} - J\_prop_{E,n+1}, \quad (9)$$

$$J\_pogl\_N_{E,n} = J\_prop\_N_{E,n} - J\_prop\_N_{E,n+1}. \quad (10)$$

Спектры поглощения, построенные по выражениям (9) и (10), представлены на рисунке 7. Для наглядности показаны только спектры поглощения первых десяти детекторов.



*а* - в случае задания спектрального распределения мощности излучения от энергии;

*б* - в случае задания спектрального распределения числа фотонов от энергии

Рисунок 7 - Графики спектров поглощения рентгеновского излучения в первых десяти элементарных чувствительных арсенид-галлиевых ячейках

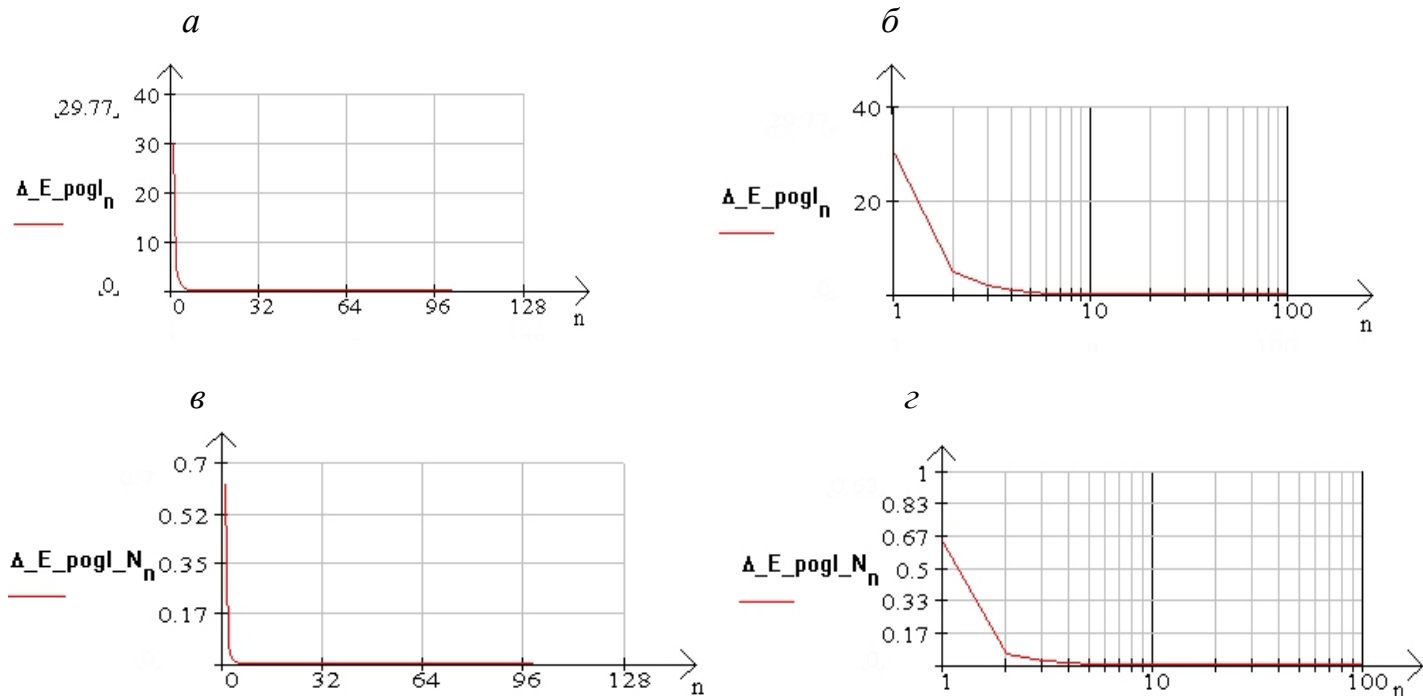
## 5 Распределение энергии и распределение числа поглощенных фотонов как функций номера чувствительного элемента

Распределение относительной энергии и распределение относительного числа поглощенных фотонов как функций номера чувствительного элемента определяют суммированием соответственно всех значений спектрального распределения интенсивности излучения (9) и суммированием всех значений спектрального распределения числа фотонов спектров поглощения (10) для каждого из 128 чувствительных элементов и позволяет определить соответственно:

$$\Delta\_E\_pogl_{E,n} = \sum_{n=1}^{128} \sum_{E=1}^{140} J_{\_poglE,n} \quad (11)$$

$$\Delta\_E\_poglN_{E,n} = \sum_{n=1}^{128} \sum_{E=1}^{140} J_{\_pogl} N_{E,n} \quad (12)$$

Графики распределений (11) и (12) представлены на рисунках 8, а, б, в и г.



а, б - в случае задания спектрального распределения мощности излучения от энергии соответственно в линейном и логарифмическом масштабах;

в, г - в случае задания спектрального распределения числа фотонов от энергии соответственно в линейном и логарифмическом масштабах

Рисунок 8 - Распределения относительной энергии и относительной интенсивности фотонов рентгеновского излучения в 128 элементарных ячейках

Приведенные результаты моделирования спектров поглощения и пропускания по глубине чувствительной области микродетектора могут быть использованы для разработки линейки микродетекторов спектрально-зонной рентгеновской системы при выборе материала и определения толщины микродетектора с целью получения требуемой эффективности регистрации излучения.

Кроме того, знание форм спектров пропускания и поглощения излучения по сечениям микродетектора, а также сведения о распределении числа фотонов или поглощенной энергии по толщине микродетектора дают возможность выбора адекватной по информативности и пропускной способности электронной системы съема спектрометрической и координатной информации.

## **Список использованных источников**

1 **Блинов, Н. Н.** Что впереди? / Н.Н. Блинов, А.И. Мазуров // Медицинская техника.- 2006.-№5. – С.3-6

2 Об определении химического состава методом мультэнергетической радиографии /С.В. Найденев, В.Д. Рыжиков. Письма в ЖЭТФ. -2002.- Т.28.- Вып. 9.- С. 6-13

3 Спектрозональный рентгеновский детектор для компьютерных рентгенографических установок медицинского и промышленного назначения: отчет о НИР (заключительный) / Оренб. гос. университет; рук. Корнев Е.А.; исполн.: Лелюхин А.С., Петрушанский М.Г. - Оренбург, 2008.- 163 с. - № ГР 01200802037

4 **Солонина, А.И.** Основы цифровой обработки сигналов: курс лекций/ А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов, Е.Б. Соловьева. - Изд. 2-е испр. и перераб. – СПб.: БХВ- Петербург, 2005.- 768 с.: ил.

5 Рентгентехника: справочник. В 2-х кн.; под ред. В.В. Ключева – М.: Машиностроение, 1992. Кн. 1. - 480 с.

## Приложение А (обязательное)

### Задание на расчетно-графическую работу по дисциплине «Рентгеновские системы»

#### А.1 Исходные данные к РГР

А. 1.1 Аналитическое описание спектров излучения источника:

а) Спектральная плотность энергии излучения рентгеновской трубки:

$$J_E = \frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot (E_0 - E), \quad \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{Дж}} \right], \quad (\text{A.1})$$

где  $C$  - постоянный коэффициент;

$E_0$  - максимальная энергия рентгеновских квантов спектра тормозного рентгеновского излучения;

$h$  - постоянная Планка;

$i_a$  - анодный ток рентгеновской трубки;

$Z$  - заряд атома анодного материала трубки.

б) Относительная спектральная плотность энергии, приведенная к максимуму распределения, равна

$$J_{E_{\text{отн}}} = \frac{J_E}{J_{E_{\text{max}}}} = \frac{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot (E_0 - E)}{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot E_0} = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (\text{A.2})$$

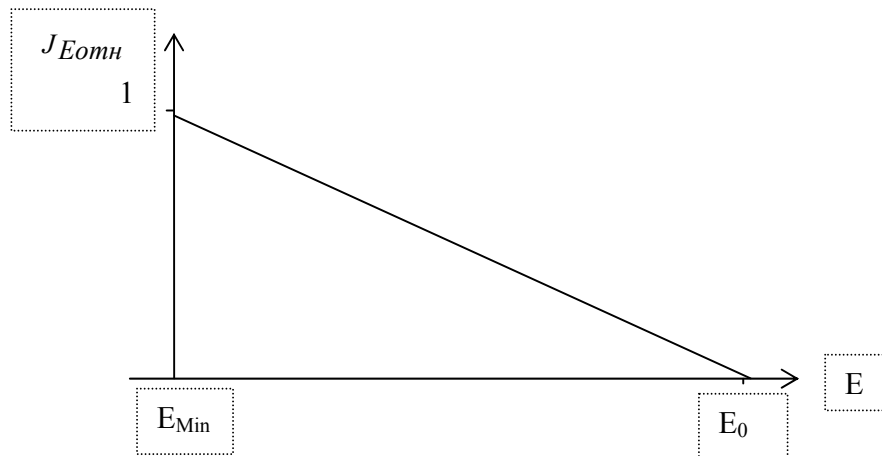


Рисунок А.1 - График относительной спектральной плотности энергии излучения от энергии

в) Диапазон изменения энергии  $[E] = [E_{Min}, E_0]$  кэВ, где  $E_{Min} = 5$  кэВ – нижняя граница диапазона энергии,  $E_0 = 150$  кэВ.

г) Спектральное распределение числа фотонов по энергии излучения рентгеновской трубки определяется из выражения (А.1) простым делением на текущее значение энергии  $E$ :

$$J_N = \frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot \left( \frac{E_0}{E} - 1 \right), \quad \left[ \frac{1}{с \cdot м^2 \cdot Дж} \right] \quad (A.3)$$

В этом случае относительное спектральное распределение числа фотонов по энергии излучения, приведенное к максимуму распределения в точке  $E_{Min}$ , равно:

$$J_{N-отн} = \frac{J_N}{J_{Nmax}} = \frac{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot \left( \frac{E_0}{E} - 1 \right)}{\frac{C}{h} \cdot i_a \cdot Z \cdot \left( \frac{E_0}{E_{Min}} - 1 \right)} = \frac{E_{Min}}{E_0 - E_{Min}} \left( \frac{E_0}{E} - 1 \right), \quad (A.4)$$

где  $J_{Nmax}$  - значение интенсивности распределения на энергии  $E_{Min}$ .

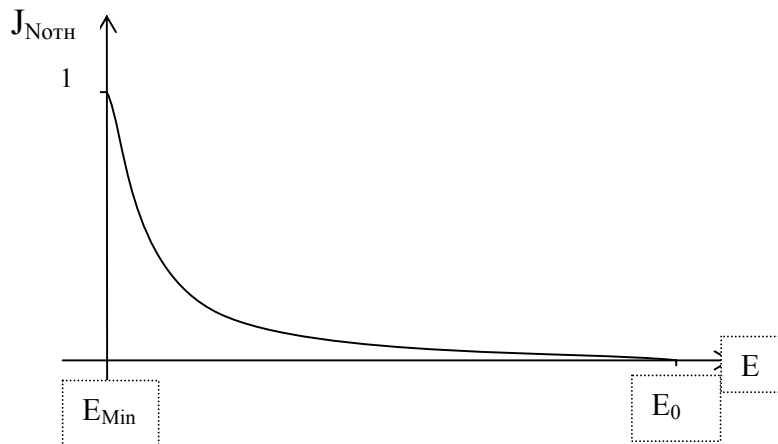
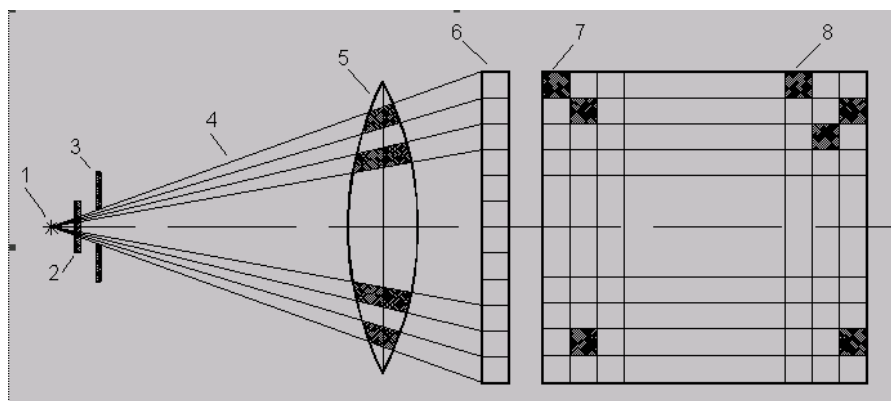


Рисунок А.2 - График относительного спектрального распределения числа фотонов по энергии излучения

А.1.2 Структурная схема рентгенооптической системы с линейной матрицей детекторов для первого вычислительного эксперимента представлена на рисунке А.3.



1 - источник излучения; 2 – алюминиевый фильтр; 3 - диафрагма, формирующая узкий веерообразный пучок излучения; 4 - поток рентгеновских квантов; 5 - объект исследования; 6 – детектор с одномерной пространственной дискретизацией чувствительной поверхности; 7 - матрица элементов изображения объекта, полученная сканированием линейки детекторов; 8 – элемент изображения (пиксел)

Рисунок А.3 - Структурная схема рентгенооптической схемы для проведения первого вычислительного эксперимента

А.1.3 На рисунке А.4 приведена структура линейной матрицы GaAs – детекторов на 128 каналов, как один из видов детекторов. Поток излучения направлен по оси  $y$ , вдоль размера 4 мм (перпендикулярно плоскости рисунка).

Для всех заданий первого вычислительного эксперимента выбирается аналогичная структура линеек микродетекторов, отличающихся только материалами и размерами чувствительной области детектирования (см. таблицу А.3)

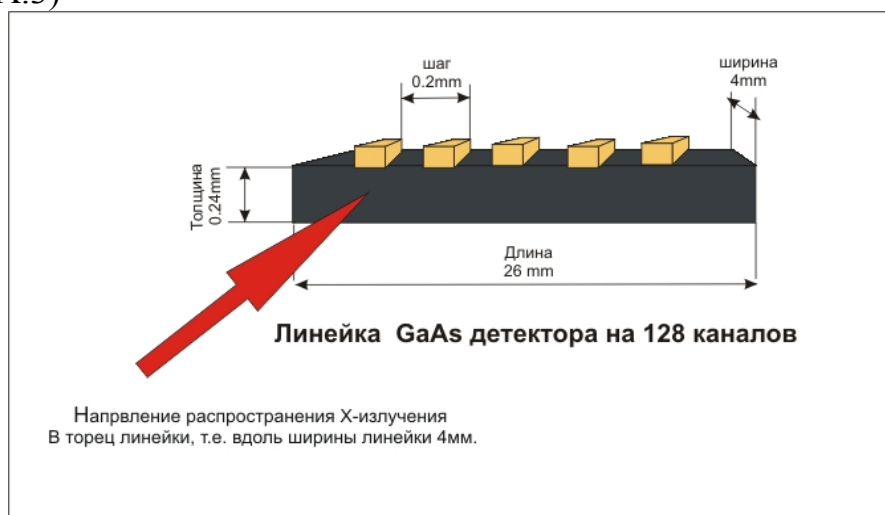


Рисунок А.4 - Структурная схема линейной матрицы GaAs –детекторов на 128 каналов. Размер одного пиксела  $0,2 \times 0,24 \times 4 \text{ мм}^3$

А.1.4 Параметры различных материалов чувствительной области детекторов приведены в таблицах А.1 и А.2.

А.1.5 Зависимости массовых коэффициентов ослабления различных материалов от энергии излучения можно найти в таблицах XCOM /XCOM: Photon Cross Sections on Personal Computer// by M.J. Berger and J.H.Hubbell/ National Bureau of Standards/1987.NBSIR 87-3597/.

## А.2 Задание № 1

Для структурной схемы рисунков А3, А.4 проведите первый вычислительный эксперимент для заданного варианта РГР (см. таблицу А.3 настоящего приложения)

А.2.1 Определите зависимости относительной спектральной плотности излучения или относительного спектрального распределения числа фотонов по энергии излучения на выходе алюминиевого фильтра заданной толщины (см.раздел 3 настоящих методических указаний). Результаты представьте в виде таблиц и соответствующих графиков.

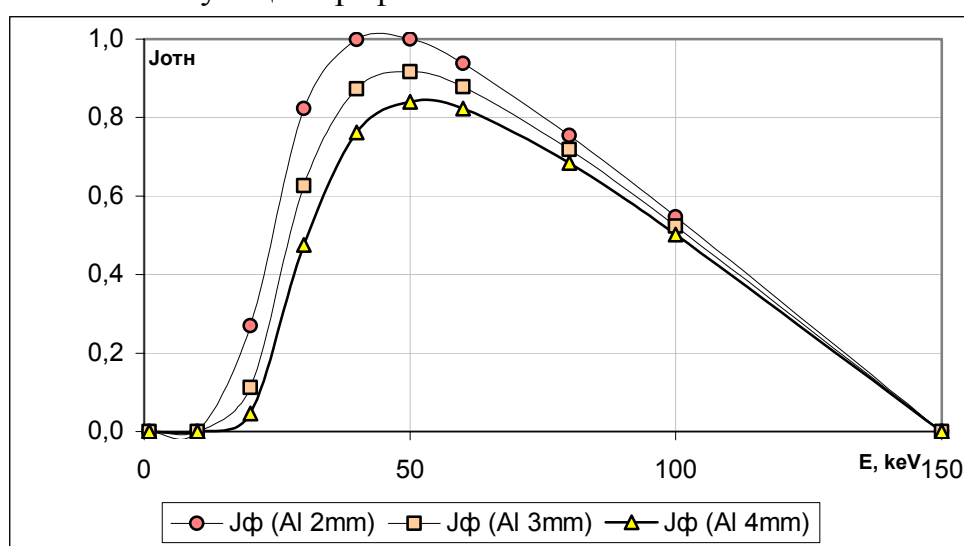


Рисунок А.5 - Примерный вид относительной спектральной плотности излучения на выходе алюминиевых фильтров толщиной соответственно 2, 3, 4 мм

А.2.2 Используя результаты п. А.2.1, как входные спектры излучения для детектора, определите зависимости относительной спектральной плотности излучения или относительного спектрального распределения числа фотонов по

энергии излучения в различных сечениях по глубине одного из микродетекторов линейной матрицы (см. п. 4.1 настоящих методических указаний).

А.2.3 Постройте графики спектров пропускания от энергии в тех же сечениях детектора (см. п. 4.1 настоящих методических указаний).

Результаты расчетов представьте также в виде таблиц для двух любых сечений микродетектора.

А.2.4 Постройте графики спектров поглощения от энергии в тех же сечениях детектора (см. п. 4.2 настоящих методических указаний).

Результаты расчетов представьте также в виде таблиц для двух любых сечений микродетектора.

А.2.5 Восстановите исходные относительные спектры излучения источника

$J_{E_{отн}} = \frac{J_E}{J_{E_{max}}} = 1 - \frac{E}{E_0}$  или  $J_{N_{отн}} = \frac{E_{Min}}{E_0 - E_{Min}} \left( \frac{E_0}{E} - 1 \right)$  по спектру на выходе любого  $n$ -го сечения детектора.

А.2.6 Найдите распределение относительной поглощенной энергии или относительного количества квантов вдоль координаты  $y$  детектора (см. раздел 5 настоящих методических указаний).

Расчетные данные приведите в виде таблиц и графиков, как показано на рисунках А.6, А.7.

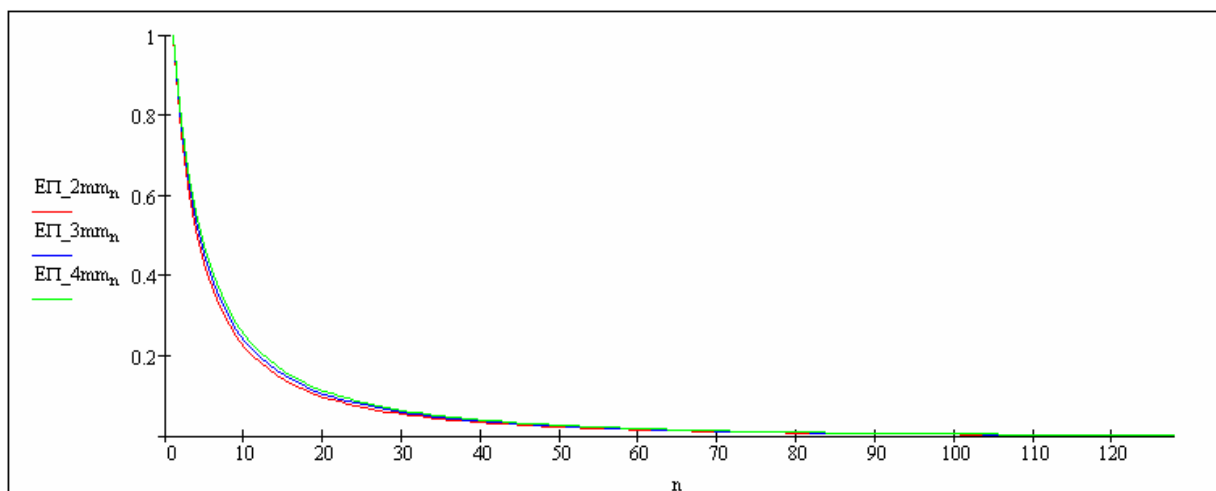


Рисунок А.6 - Примерный вид распределения относительной поглощенной энергии вдоль координаты  $y$  GaAs детектора (верхний — после 2 мм алюминиевого фильтра, средний — после 3 мм, нижний — после 4 мм)

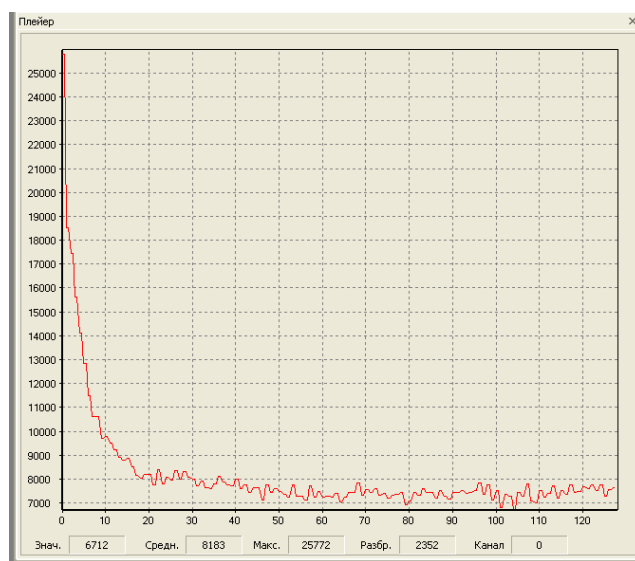


Рисунок А.7 – Экспериментальное распределение относительной поглощенной энергии вдоль координаты  $y$  GaAs детектора (после 2 мм алюминиевого фильтра)

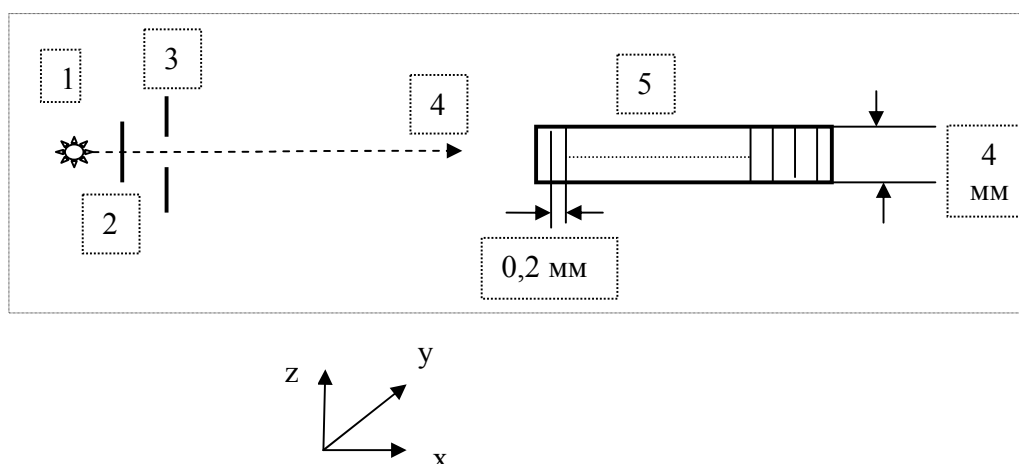
### А.3 Задание № 2

*Проведите второй вычислительный эксперимент для заданного варианта РГР (см. таблицу А. 3 приложения А).*

А.3.1 Представьте, что линейку микродетекторов (рисунок А.3) развернули на  $90^0$  в плоскости  $xoy$  относительно луча, алюминиевого фильтра и диафрагмы таким образом, что 128 микродетекторов стали цепочкой последовательно включенных одинаковых фильтров, каждый заданной толщины (см. рисунок А.8). Поток излучения направлен по оси  $x$  в плоскости  $xoy$ . При этом алюминиевые фильтры остаются той же заданной толщины

А.3.2 Выполните расчеты в соответствии с п. А.2.1.

А.3.3 Используя результаты расчетов п. А.3.2, как входные спектры излучения для детектора, определите зависимости относительной спектральной плотности излучения или относительного спектрального распределения числа фотонов по энергии излучения в цепочке последовательно включенных 128 одинаковых фильтров. Примерный вид относительной спектральной плотности излучения на выходе первого GaAS микродетектора показан на рисунке А.9.



1 - источник излучения; 2 - алюминиевый фильтр; 3 - диафрагма, формирующая узкий веерообразный пучок излучения; 4 - поток рентгеновских квантов; 5 - цепочка последовательно включенных 128 микродетекторов

Рисунок А.8 - Структурная схема второго вычислительного эксперимента

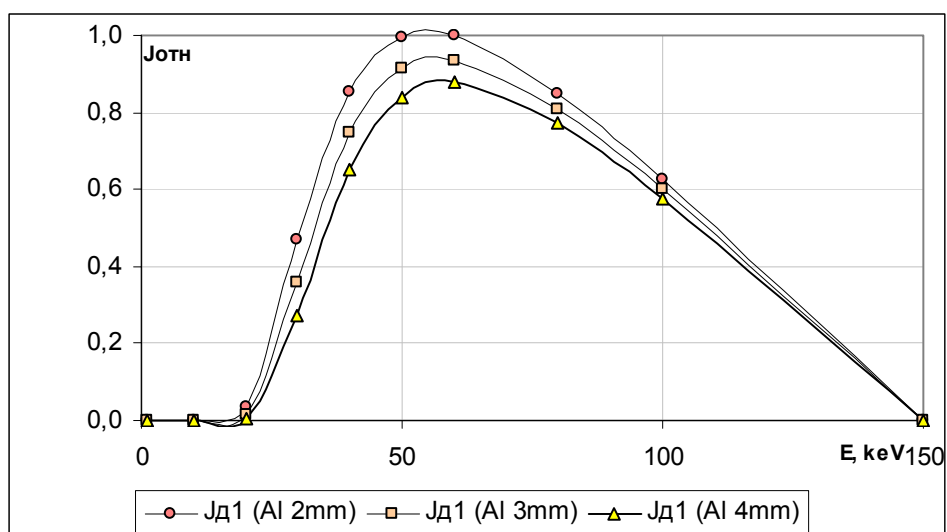


Рисунок А.9 - Примерный вид относительной спектральной плотности излучения на выходе первого GaAS микродетектора при условии, что на вход микродетектора поступал поток излучения с выхода алюминиевого фильтра толщиной 2, 3, 4 мм

А.3.4 Постройте графики спектров пропускания от энергии после каждого микродетектора цепочки последовательно включенных 128 одинаковых фильтров (см.п.4.1 настоящих методических указаний). Результаты расчетов представьте также в виде таблиц для двух любых микродетекторов.

Результаты расчетов представьте также в виде таблиц для двух любых микродетекторов.

А.3.5 Постройте графики спектров поглощения от энергии после каждого микродетектора цепочки последовательно включенных 128 одинаковых фильтров (см. п.4.2 настоящих методических указаний).

Результаты расчетов представьте также в виде таблиц для двух любых микродетекторов.

А.3.6 Восстановите исходные относительные спектры излучения источника

$J_{E_{отн}} = \frac{J_E}{J_{E_{max}}} = 1 - \frac{E}{E_0}$  или  $J_{N_{отн}} = \frac{E_{Min}}{E_0 - E_{Min}} \left( \frac{E_0}{E} - 1 \right)$  по спектру на выходе n-го звена цепочки микродетекторов.

А.3.7 Найдите распределение относительной поглощенной энергии или относительного количества квантов вдоль координаты X детектора (см. раздел 5 настоящих методических указаний). Расчетные данные приведите в виде таблицы и графиков, как показано на рисунках А.6, А.7.

### А.4 Задание № 3

*Обработка рентгеновских спектрозональных изображений (СПЗ-изображений) для заданного варианта РГР (см. таблицу А.3 приложения А).*

А.4.1 СПЗ – изображения представляют собой экспериментальные файлы изображений в формате tiff, полученные с помощью системы формирования изображения на основе линейки 128 GaAs – детекторов по схеме рисунка А.8. Пример СПЗ - изображения приведен на рисунке А.10, на котором линия А-А представляет собой одну строку изображения с 128 микродетекторов.



Рисунок А.10- СПЗ - изображение (повернуто на 90°)

Область для обработки должна соответствовать фрагменту изображения, имеющему более высокую яркость относительно других фрагментов. Обработку необходимо выполнять в среде MathCAD.

А.4.2 Для ввода «изображения» в MathCAD в виде матрицы необходимо предварительно изменить параметры tiff-изображения, воспользовавшись

программой Microsoft Office Document Imaging или аналогичной (см. рисунок А.11).

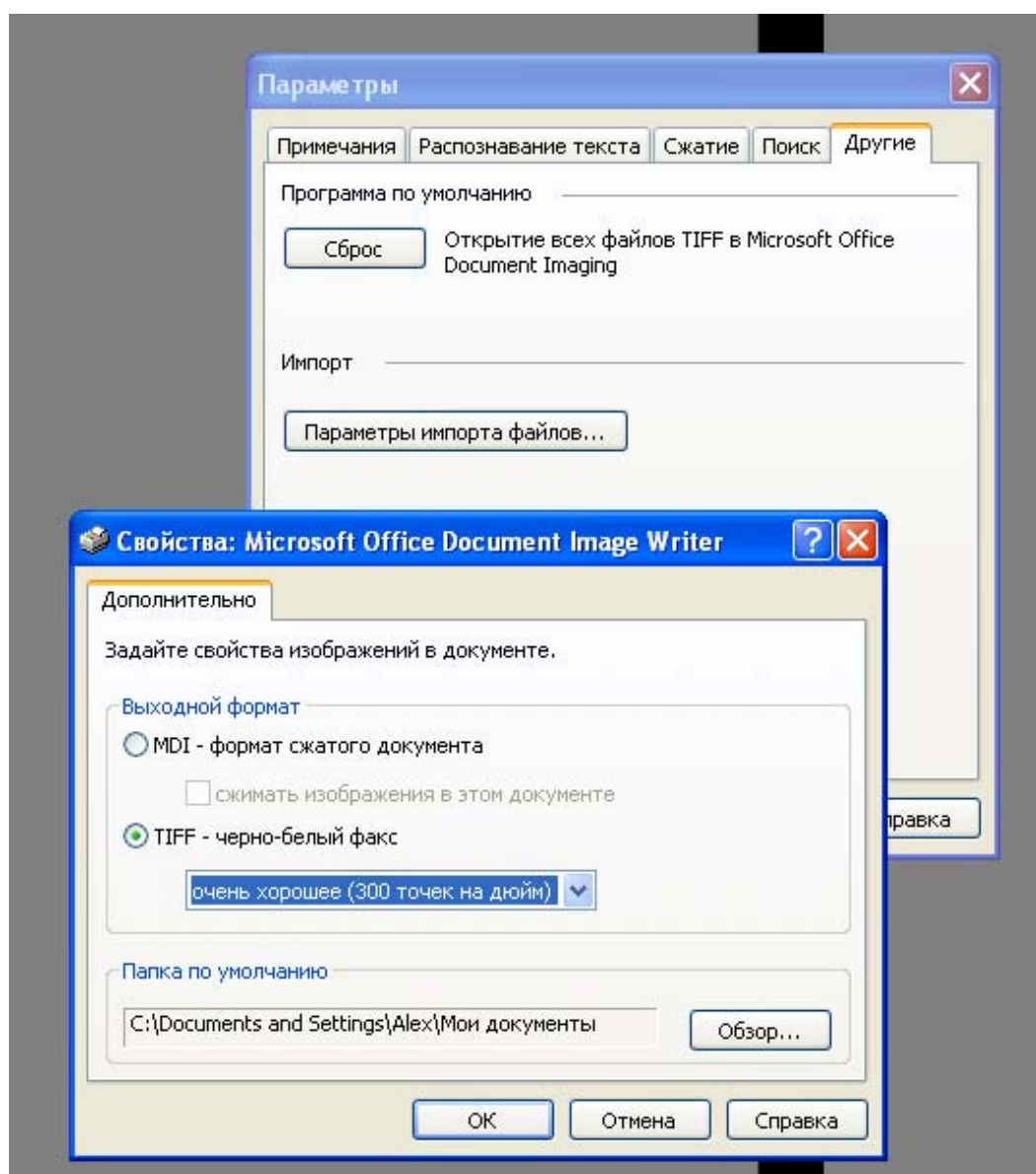


Рисунок А.11 - Диалоговые окна программы Microsoft Office Document Imaging

А.4.3 Пример гистограммы, соответствующей строке, т.е. горизонтальному сечению *А-А* изображения, приведен на рисунке А.12.

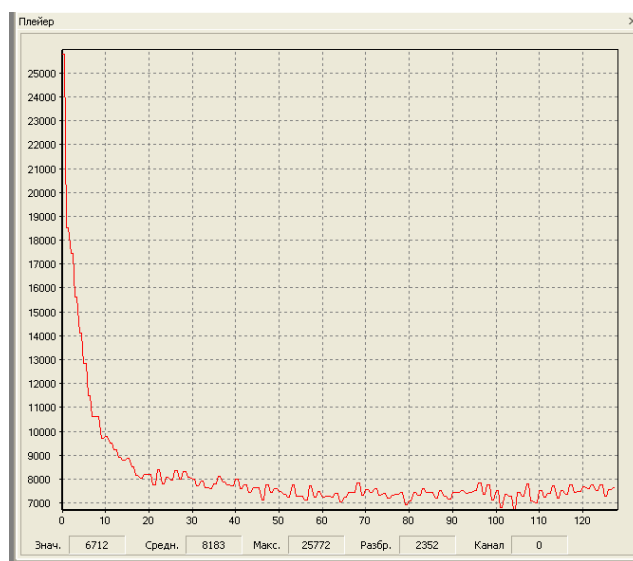


Рисунок А.12 - Гистограмма распределения энергии излучения по 128 микродетекторам

Видно, что в сечении изображения наблюдается затухающее изменение уровня яркости изображения распределения энергии излучения по 128 микродетекторам (возможно близко к экспоненциальному закону).

А.4.4 После ввода матрицы изображения в MathCAD необходимо выделить субматрицу, соответствующую области наибольшей яркости за исключением первых десяти и последних пяти строк.

А.4.5 По выделенному диапазону строк (субматрицы) и по каждому из 128 столбцов значений яркости рассчитывается вектор средних и соответствующих среднеквадратичных отклонений. Далее формируется матрица векторов размером  $2 \times N$ , где  $N$  – число столбцов в субматрице,  $N=128$ .

А.4.6 Для каждого обработанного изображения необходимо фиксировать материал фильтра, информация о котором содержится в комментарии к каждому из изображений.

А.4.7 После расчета вектора средних значений яркости необходимо рассчитать характеристические углы  $\theta$  и  $\varphi$  по формулам:

$$\theta = \arccos \left( \frac{\ln \left( \frac{I_f}{I_{ob}} \right)_h}{\sqrt{\ln^2 \left( \frac{I_f}{I_{ob}} \right)_h + \ln^2 \left( \frac{I_f}{I_{ob}} \right)_m + \ln^2 \left( \frac{I_f}{I_{ob}} \right)_l}} \right),$$

$$\varphi = \arctg \left( \frac{\ln \left( \frac{I_f}{I_{ob}} \right)_m}{\ln \left( \frac{I_f}{I_{ob}} \right)_l} \right),$$

где  $I_f$  - среднее значение интенсивности, соответствующее столбцу с номером  $N$ , полученное по изображению воздушного фильтра;

$I_{ob}$  - среднее значение интенсивности столбца  $N$  по изображению исследуемого фильтра.

Индексы  $l$ ,  $m$  и  $h$  соответствуют номерам  $N$  средних значений интенсивности в векторе средних. Предлагается осуществить расчет угла  $\varphi$  для  $l=2, m=3 \dots 20$ . Для всех фильтров формируется вектор значений угла  $\varphi$ .

Вектор значений угла  $\theta$  рассчитывается для  $l=2, m=10, h=20$  также для всех фильтров.

Таблица А.1 -Свойства полупроводниковых материалов

| материал | Атомный номер<br>$Z$ | Плотность,<br>$\rho/\text{см}^3$ | Температура,<br>К | Ширина,<br>эВ | Энергия ионизации,<br>эВ | Подвижность,<br>$\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$ |       | Время жизни, с    |                                        | Длина свободного пробега, см |       | Типичная толщина детектор | Подвижность к времени жизни продукта, $\frac{\text{см}^2}{\text{В}}$ |                   |
|----------|----------------------|----------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|-------|-------------------|----------------------------------------|------------------------------|-------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------|
|          |                      |                                  |                   |               |                          | электрон                                                      | дырка | электрон          | дырка                                  | электрон                     | дырка |                           | электрон                                                             | дырка             |
| Si       | 14                   | 2,33                             | 77                | 1,16          | 3,76                     | 21000                                                         | 11000 | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$<br>$2 \cdot 10^{-3}$ | 200                          | 200   | >1 см                     | >1                                                                   | >1                |
|          |                      |                                  | 300               | 1,12          | 3,62                     | 1350                                                          | 480   | $>10^{-3}$        |                                        |                              |       |                           |                                                                      |                   |
| Ge       | 32                   | 5,32                             | 77                | 0,74          | 2,98                     | 36000                                                         | 42000 | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$<br>$1 \cdot 10^{-3}$ | 200                          | 200   | >3 см                     | >1                                                                   | >1                |
|          |                      |                                  | 300               | 0,67          | 2,96                     | 3900                                                          | 1900  | $>10^{-3}$        |                                        |                              |       |                           |                                                                      |                   |
| GaAs     | 31; 33               | 5,32                             | 130               | 1,4           | 4,51                     | 8600                                                          | 400   | $10^{-8}$         | $10^{-7}$                              | 0,86                         | 0,04  | 0,1 мм                    | $8 \cdot 10^{-5}$                                                    | $4 \cdot 10^{-6}$ |
|          |                      |                                  | 300               |               | 4,2                      |                                                               |       |                   |                                        |                              |       |                           |                                                                      |                   |
| GaSe     | 31;34                | 4,55                             | 300               | 2,03          | 6,3                      | 60                                                            | 215   | $3 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-8}$                      | 0,009                        | 0,009 |                           |                                                                      |                   |
| CdTe     | 48; 52               | 6,06                             | 190               | 1,47          | 4,43                     | 1100                                                          | 100   | $3 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$                      | 0,5                          | 0,25  | 2 мм                      | $3,3 \cdot 10^{-3}$                                                  | $2 \cdot 10^{-4}$ |

|           |               |      |     |       |       |      |      |                     |                   |     |     |         |                     |                     |
|-----------|---------------|------|-----|-------|-------|------|------|---------------------|-------------------|-----|-----|---------|---------------------|---------------------|
|           |               |      | 300 |       |       |      |      |                     |                   |     |     |         |                     |                     |
| CZT       | 48;<br>30; 52 | 5,92 | 300 | 1,5-2 | 5     | 1000 | 80   | $2 \cdot 10^{-5}$   | $2 \cdot 10^{-5}$ |     |     | 2 мм    |                     |                     |
| HgI       | 80; 53        | 6,40 | 300 | 2,13  | 4,2   | 100  | 4    | $10^{-6}$           | $10^{-5}$         | 1   | 0,1 | 2 мм    | $10^{-4}$           | $4 \cdot 10^{-5}$   |
| TlBr      | 81; 35        | 7,56 | 300 | 2,68  | 6,5   | 6    |      | $2,5 \cdot 10^{-6}$ |                   |     |     |         | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$ |
| SiC       | 14; 6         | 3,12 | 300 | 2,2   | 9     |      |      |                     |                   |     |     |         |                     |                     |
| алмаз     | 6             | 3,51 | 300 | 5,4   | 13,25 | 2000 | 1600 | $10^{-8}$           | $10^{-8}$         | 0,4 | 0,3 | 0,15 мм | $2 \cdot 10^{-5}$   | $10^{-5}$           |
| ZnTe      | 30; 52        | 5,72 | 300 | 2,26  | 7     | 340  | 100  | $4 \cdot 10^{-9}$   | $7 \cdot 10^{-7}$ |     |     |         | $1,4 \cdot 10^{-6}$ | $7 \cdot 10^{-5}$   |
| $Bi_2S_3$ | 83; 16        | 6,73 | 300 | 1,3   |       | 200  | 1100 | $10^{-10}$          | $10^{-9}$         |     |     |         |                     |                     |
| PbI       | 82; 53        | 6,2  | 300 | 2,32  | 4,9   | 8    | 2    | $10^{-6}$           | $10^{-8}$         |     |     |         | $8 \cdot 10^{-6}$   |                     |
| AlSb      | 13; 51        | 4,26 | 300 | 1,62  | 5,06  | 1200 | 700  | $3 \cdot 10^{-9}$   | $10^{-9}$         |     |     |         |                     |                     |

Таблица А.2 - Основные детекторные свойства газов

| Основные параметры                                                                                         | Детекторный газ      |                      |                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|                                                                                                            | Хе                   | Kr                   | Ar                    |
| Атомный номер                                                                                              | 54                   | 36                   | 18                    |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                                                                               | $5,86 \cdot 10^{-3}$ | $3,74 \cdot 10^{-3}$ | $1,784 \cdot 10^{-3}$ |
| Массовый коэффициент поглощения<br>рентгеновского излучения ( $E_{\gamma}=100$ кэВ),<br>см <sup>2</sup> /г | $8,8 \cdot 10^{-3}$  |                      | $0,763 \cdot 10^{-3}$ |
| Первый потенциал ионизации, В                                                                              | 12,13                | 14,0                 | 15,76                 |
| Коэффициент конверсии, эВ/пару                                                                             | 20-22                | 20-22                | 20-22                 |
| Длительность импульса электронной<br>составляющей тока на выходе детектора, нс                             | 30-100               | 30-100               | 30-100                |

Таблица А.3 - Варианты заданий расчетно-графической работы

| №<br>вар. | №<br>экспер. | Материал<br>детектора | Спектр источника                          |                                                  | Направл. X-луча<br>относит. дет. |       | Толщ.<br>фильтра,<br>мм | Размеры<br>чувствительной<br>обл. микродетект.<br>по осям, мм |      |      | Число<br>сечений<br>(звеньев)<br>микродет.<br>по оси Y | Давление<br>газа,<br>×10 <sup>5</sup> Па |
|-----------|--------------|-----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|-------|-------------------------|---------------------------------------------------------------|------|------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|           |              |                       | $J_E, \frac{Вт}{м^2 \cdot дж},$<br>рис. 1 | $J_N, \frac{1}{с \cdot м^2 \cdot дж},$<br>рис. 2 | рис.4                            | рис.6 |                         | X                                                             | Y    | Z    |                                                        |                                          |
| 1         | 1            | GaAs                  | +                                         | -                                                | +                                | -     | Al 2, 3, 4              | 0,2                                                           | 4,0  | 0,24 | 20                                                     | -                                        |
| 2         | 1            | Si                    | +                                         | -                                                | +                                | -     | Al 2, 3, 4              | 0,2                                                           | 4,0  | 0,24 | 20                                                     | -                                        |
| 3         | 1            | CdTe                  | +                                         | -                                                | +                                | -     | Al 2, 3, 4              | 0,2                                                           | 4,0  | 0,24 | 20                                                     | -                                        |
| 4         | 1            | Xe                    | +                                         | -                                                | +                                | -     | Al 2, 3, 4              | 0,2                                                           | 60,0 | 0,24 | 60                                                     | 10, 20                                   |
| 5         | 1            | Kr                    | +                                         | -                                                | +                                | -     | Al 2, 3, 4              | 0,2                                                           | 60,0 | 0,24 | 60                                                     | 10,20                                    |
| 6         | 1            | GaAs                  | -                                         | +                                                | +                                | -     | Al 2, 3, 4              | 0,2                                                           | 4,0  | 0,24 | 20                                                     | -                                        |
| 7         | 1            | Si                    | -                                         | +                                                | +                                | -     | Al 2, 3, 4              | 0,2                                                           | 4,0  | 0,24 | 20                                                     | -                                        |
|           |              |                       |                                           |                                                  |                                  |       |                         |                                                               |      |      |                                                        |                                          |

|    |   |      |   |   |   |   |              |     |      |      |     |        |
|----|---|------|---|---|---|---|--------------|-----|------|------|-----|--------|
| 8  | 1 | CdTe | - | + | + | - | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 4,0  | 0,24 | 20  | -      |
| 9  | 1 | Xe   | - | + | + | - | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 60,0 | 0,24 | 60  | 10, 20 |
| 10 | 1 | Kr   | - | + | + | - | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 60,0 | 0,24 | 60  | 10, 20 |
| 11 | 2 | GaAs | + | - | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 25,6 | 0,24 | 128 | -      |
| 12 | 2 | Si   | + | - | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 25,6 | 0,24 | 128 | -      |
| 13 | 2 | CdTe | + | - | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 25,6 | 0,24 | 128 | -      |
| 14 | 2 | Xe   | + | - | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 60,0 | 0,24 | 128 | 10, 20 |
| 15 | 2 | Kr   | + | - | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 60,0 | 0,24 | 128 | 10, 20 |
| 16 | 2 | GaAs | - | + | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 25,6 | 0,24 | 128 | -      |
| 17 | 2 | Si   | - | + | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 25,6 | 0,24 | 128 | -      |
| 18 | 2 | CdTe | - | + | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 25,6 | 0,24 | 128 | -      |
| 19 | 2 | Xe   | - | + | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 60,0 | 0,24 | 128 | 10, 20 |
| 20 | 2 | Kr   | - | + | - | + | Al 2, 3, 4   | 0,2 | 60,0 | 0,24 | 128 | 10, 20 |
| 21 | 3 | GaAs | + | - | - | + | Al, Ti и др. | 0,2 | 4,0  | 0,24 | 128 | -      |

|    |   |      |   |   |   |   |              |     |     |      |     |   |
|----|---|------|---|---|---|---|--------------|-----|-----|------|-----|---|
| 22 | 3 | GaAs | + | - | - | + | Al, Ti и др. | 0,2 | 4,0 | 0,24 | 128 | - |
| 23 | 3 | GaAs | + | - | - | + | Al, Ti и др. | 0,2 | 4,0 | 0,24 | 128 | - |
| 24 | 3 | GaAs | + | - | - | + | Al, Ti и др. | 0,2 | 4,0 | 0,24 | 128 | - |
| 25 | 3 | GaAs | + | - | - | + | Al, Ti и др. | 0,2 | 4,0 | 0,24 | 128 | - |