

УДК 539.12.04

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРОМЕТРА С Si(Li) ДЕТЕКТОРОМ

Д.А. Санжаревский\*, В.А. Стратиенко, А.В. Щагин

НИЦ "Харьковский физико-технический институт"

ул. Академическая 1, г. Харьков, 61108, Украина

\*e-mail: [sangarevsky@kipt.kharkov.ua](mailto:sangarevsky@kipt.kharkov.ua)

Received April 25, 2013

Представлены результаты экспериментального исследования энергетического разрешения рентгеновского спектрометра на основе охлаждаемого Si(Li) детектора в зависимости от энергии налетающих фотонов. Экспериментальные данные по энергетическому разрешению сравниваются с расчетными данными. Определен фактор Фано детектора и шум электронного тракта. Найдено аналитическое выражение для описания энергетического разрешения спектрометра в диапазоне от порядка 1 до порядка 100 кэВ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** рентгеновское излучение, рентгеновский детектор, фактор Фано, энергетическое разрешение

### THE ENERGY RESOLUTION OF THE X-RAY SPECTROMETER WITH Si(LI) DETECTOR

D.A. Sanzharevsky\*, V.A. Stratienko, A.V. Shchagin

Kharkov Institute of Physics and Technology

1, Academicheskaya St., Kharkov 61108, Ukraine

Results of experimental research of the energy resolution of the X-ray spectrometer based on cooled Si(Li) detector against from the energy of the incident photons are presented. The experimental data on the energy resolution are compared to results of calculated data. The Fano factor of the detector and the noise of the electronics are determined. Analytical expression for description of the energy resolution of the spectrometer in the range from about 1 to about 100 keV is found.

**KEY WORDS:** X-ray radiation, X-ray detector, Fano factor, energy resolution

### ЕНЕРГЕТИЧНЕ РОЗРІЗНЕННЯ РЕНТГЕНІВСЬКОГО СПЕКТРОМЕТРУ ІЗ Si(LI)ДЕТЕКТОРОМ

Д.А. Санжаревський\*, В.А. Стратієнко, А.В. Щагін

НИЦ "Харківський фізико-технічний інститут"

вул. Академічна 1, м. Харків, 61108, Україна

Наведені результати експериментального дослідження енергетичного розрізнення рентгенівського спектрометру на основі охолоджувального Si(Li) детектора в залежності від енергії налітаючих фотонів. Експериментальні данні по енергетичному розрізненню порівнюються із розрахунковими даними. Визначено фактор Фано детектору та шум електронного тракту. Знайдено аналітичний вираз для описання енергетичного розрізнення спектрометру у діапазоні від порядку 1 до порядку 100 кеВ.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** рентгенівське опромінення, рентгенівський детектор, фактор Фано, енергетичне розподілення

Кремниевые полупроводниковые детекторы получили широкое распространение в спектрометрии мягкого рентгеновского излучения [1-3]. Для правильной интерпретации результатов измерений спектров рентгеновского излучения требуется знать энергетическое разрешение спектрометра при различных энергиях рентгеновского излучения. Поэтому продолжают исследования энергетического разрешения полупроводниковых рентгеновских спектрометров с различными типами детекторов, см. например, [4-6].

Целью настоящей работы является определение энергетической зависимости разрешения сравнительно толстого (4,3 мм) Si(Li) рентгеновского детектора. В работе представлены результаты наших измерений и расчетов энергетического разрешения Si(Li) детектора с аналоговым спектрометрическим трактом как функции энергии рентгеновских квантов в диапазоне от порядка 1 до порядка 100 кэВ.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент был выполнен в Харьковском физико-техническом институте. В измерениях мы использовали охлаждаемый Si(Li) детектор, аналоговый процессор сигналов, ртутный генератор импульсов стабильной амплитуды и радиоактивные источники.

Рентгеновский Si(Li) детектор типа БДЭР-2-25А с 20 мкм Ве входным окном и предусилителем произведен в РНИИРП г. Рига, СССР. Чувствительная поверхность кристалла является кругом площадью 25 мм<sup>2</sup>, толщина кристалла 4,3 мм. Детектор и первый полевой транзистор предусилителя постоянно охлаждаются жидким азотом. Напряжение смещения детектора 300 В и питания предусилителя  $\pm 24$  В подавались от блока питания амплитудного анализатора АИ-1024-95-17. Ранее, этот детектор использовался в измерениях спектров параметрического рентгеновского излучения в работе [7], где эффективность регистрации детектора с коллиматором была измерена и рассчитана как функция энергии фотонов в диапазоне 5,9-59,5 кэВ.

В качестве аналогового процессора сигналов предусилителя мы применили спектрометрический

усилитель БУС-2-47 в составе прибора "Лангур", произведенного в РНИИРП г. Рига, СССР. Усилитель обеспечивал однократное дифференцирование и четырехкратное интегрирование сигнала с обоими неизменными временами дифференцирования и интегрирования 6,4 мкс (время формирования). Все электролитические конденсаторы в усилителе БУС-2-47, а также в предусилителе Si(Li) детектора, были заменены новыми, по причине их деградации со временем. Сформированные и усиленные импульсы регистрировались 4096-канальным амплитудным анализатором АИ-1024-95-17 произведенным в г. Нарва, СССР. Анализатор был соединен с компьютером через последовательный интерфейс RS232 и управлялся с помощью специально разработанной компьютерной программы. Ртутный генератор импульсов стабильной амплитуды NZ-635/B использовался как источник тестовых сигналов при наладке спектрометра. Блок-схема установки показана на рис. 1. Спектрометр показан на фотографии, приведенной на рис. 2.

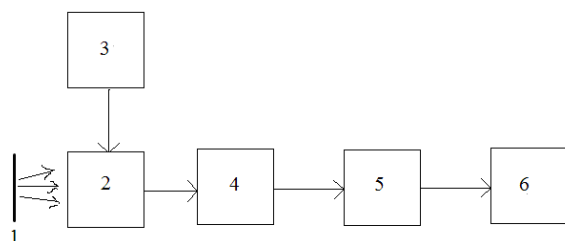


Рис.1. Блок - схема измерительной установки.

1 - радиоактивный источник излучения, 2 - Si(Li) детектор БДЭР-2-25А, 3 - ртутный генератор импульсов NZ-635/B, 4 - спектрометрический усилитель БУС-2-47, 5 - анализатор импульсов АИ-1024-95-17, 6 - компьютер.

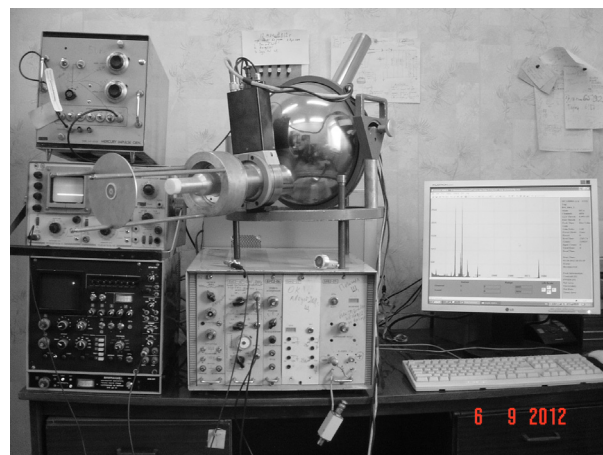


Рис.2. Рентгеновский спектрометр на основе Si(Li) детектора, который использовался в экспериментах.

В измерениях энергетического разрешения, мы применяли квазимонохроматическое рентгеновское излучение радиоактивных источников с шириной излучаемых спектральных пиков значительно меньшей, чем энергетическое разрешение нашего спектрометра. В частности, мы применяли радиоактивный источник  $^{241}\text{Am}$  из стандартного комплекта ОСГИ и радиоактивный источник  $^{55}\text{Fe}$  из стандартного комплекта СОИРИ, произведенных в СССР, и микроисточник W+Ti(D,T)+SiO, произведенный в Украине. Микроисточник W+Ti(D,T)+SiO состоит из слоя Ti, напыленного на W подложку и насыщенного тритием и дейтерием и покрытого защитным слоем оксида кремния толщиной около 0,1 мкм. Вольфрамовая подложка имела форму иглы диаметром 0,3 мм, слои располагались на конце иглы. Спектры излучения измерялись от четырех игл одновременно.

Стандартный источник  $^{241}\text{Am}$  обеспечивал квазимонохроматическое излучение с энергией 26,345 и 59,537 кэВ возбужденных ядер  $^{237}\text{Np}$ , возникающих вследствие распада ядер  $^{241}\text{Am}$ . Другие линии от  $^{241}\text{Am}$  обусловлены характеристическим рентгеновским излучением  $^{237}\text{Np}$ . Стандартный источник  $^{55}\text{Fe}$  обеспечивал квазимонохроматическое излучение с энергией 5,894 кэВ в результате характеристического рентгеновского излучения (ХРИ)  $K_{\alpha}$   $^{55}\text{Mn}$ , а так же излучение с энергией 6,45 кэВ ХРИ  $K_{\beta}$  возбужденных атомов  $^{55}\text{Mn}$ , возникающих в результате электронного захвата ядром  $^{55}\text{Fe}$ . Микроисточник W+Ti(D,T)+SiO обеспечивал квазимонохроматическое характеристическое рентгеновское излучение с энергией 4,51 кэВ, соответствующей ХРИ  $K_{\alpha}$  атомов титана и 1,74 кэВ, соответствующей ХРИ  $K_{\alpha}$  атомов кремния. Характеристическое рентгеновское излучение в микроисточнике W+Ti(D,T)+SiO возбуждалось главным образом электронами с непрерывным спектром и с максимальной энергией 18,6 кэВ, излучаемых при  $\beta$ -распаде трития внутри титанового слоя. Кроме того, электроны генерируют тормозное излучение, имеющее непрерывный спектр с максимальной энергией около 18,6 кэВ. Слабый спектральный пик с энергией около 8,5 кэВ обусловлен ХРИ  $L_{\alpha}$  атомов W подложки. Измерения спектров производились при атмосферном давлении. Микроисточник W+Ti(D,T)+SiO был установлен на расстоянии нескольких миллиметров от Ве окна детектора, чтобы уменьшить ослабление мягкого рентгеновского излучения в воздухе. Остальные источники устанавливались на расстоянии нескольких сантиметров от детектора. Коллиматор перед Si(Li) детектором не устанавливался. Положение и ширина спектральных пиков в измеренных спектрах определялись с использованием программного обеспечения поставляемого вместе с цифровым процессором PX-4 (Amptek). Энергетическая калибровка спектрометра проводилась по спектральным пикам с энергией 1,74 кэВ ( $K_{\alpha}$  Si), 5,894 кэВ ( $K_{\alpha}$   $^{55}\text{Mn}$ ), 26,345 и 59,537 кэВ (излучение возбужденных ядер  $^{237}\text{Np}$ ).

Измерения спектра выполнялись при малых нагрузках спектрометрического тракта, около ста счетов в

секунду, во избежание уширения спектральных пиков, которые могут возникать при увеличении скорости счета. Экспериментально измеренные спектры представлены на рис. 3-5. На рисунках отмечены энергии пиков, которые использовались при калибровке и измерениях ширины пиков.

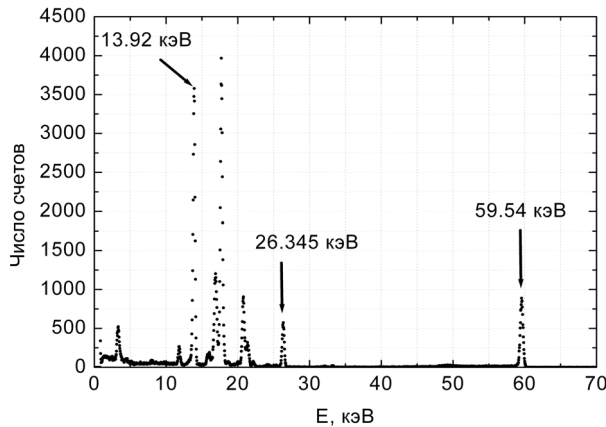


Рис.3. Спектр рентгеновского излучения, измеренный от стандартного радиоактивного источника  $^{241}\text{Am}$ .

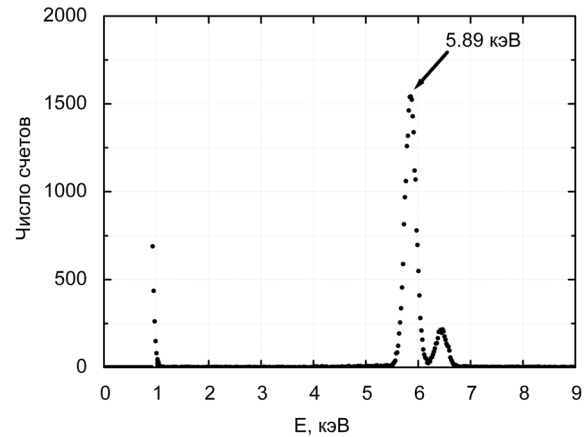


Рис.4. Спектр рентгеновского излучения, измеренный от стандартного радиоактивного источника  $^{55}\text{Fe}$ .

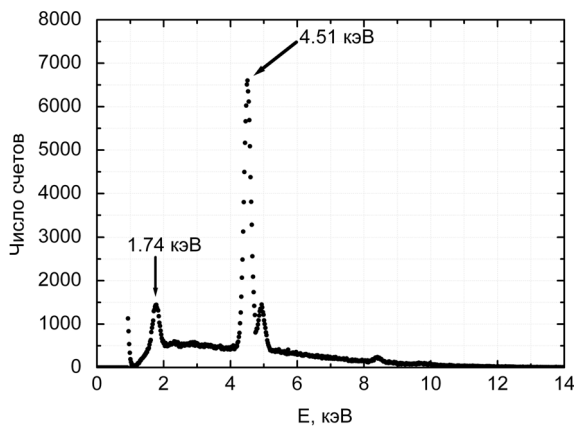


Рис.5. Спектр рентгеновского излучения, измеренный от четырех игл W+Ti(D,T)+SiO.

шумами электронного тракта,  $\sigma_d$  - стандартное отклонение, обусловленное главным образом ограниченным числом  $N$  элементарных зарядов, генерируемых в детекторе на один квант рентгеновского излучения с энергией  $E$ ,

$$\sigma_d = \omega \cdot \sqrt{F \cdot N}, \quad (3)$$

где  $F$  - фактор Фано [1],

$$N = \frac{E}{\omega}, \quad (4)$$

где  $\omega$  - средняя энергия, необходимая для создания одной электронно-дырочной пары в детекторе. Эта энергия равна  $\omega = 3,76$  эВ для кристалла кремния при температуре  $77^0\text{K}$  и  $\omega = 3,65$  эВ при  $300^0\text{K}$  [2]. При подстановке выражений (2-4) в (1), получается формула для расчета энергетического разрешения спектрометра как функции энергии падающих фотонов  $E$

$$FWHM = \sqrt{(FWHM)_{el}^2 + 2,35^2 \cdot F \cdot \omega \cdot E}. \quad (5)$$

Параметр  $(FWHM)_{el} = 2,35 \cdot \sigma_{el}$ , обусловлен шумом электронного тракта и не зависит от энергии падающих фотонов. Произведение  $F \cdot \omega$  зависит от свойств детектора. Фактор Фано для кремниевого детектора был вычислен многими авторами с различными результатами, не превышающими  $F < 0,12$  [2].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных измерений FWHM спектральных пиков соответствующих квазимонохроматическим линиям радиоактивных источников представлены в таблице.

### РАСЧЕТ

Энергетическое разрешение спектрометра описывается полной шириной на половине высоты (FWHM) измеренных спектральных пиков. Обычно форму спектральных пиков описывают нормальным (Гауссовым) распределением, а величина FWHM может быть описана формулами (30,31) из приложения в [1].

$$FWHM = 2,35 \cdot \sigma \quad (1)$$

где:  $\sigma$  - полное среднеквадратическое (стандартное) отклонение в полученных спектральных пиках,

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{el}^2 + \sigma_d^2} \quad (2)$$

где:  $\sigma_{el}$  - стандартное отклонение обусловленное

Таблица.

Результаты измерений энергетического разрешения (FWHM) рентгеновского спектрометра при различных энергиях рентгеновского излучения.

Энергия, кэВ	1,74	4,51	5,89	13,92	26,345	37,4	59,54
Источник излучения	W+Ti(D,T)+SiO	W+Ti(D,T)+SiO	<sup>55</sup> Fe	<sup>241</sup> Am	<sup>241</sup> Am	-	<sup>241</sup> Am
Спектральный пик	K <sub>α</sub> -Si	K <sub>α</sub> -Ti	K <sub>α</sub> - <sup>55</sup> Mn	L <sub>α</sub> - <sup>237</sup> Np	<sup>237</sup> Np	генератор	<sup>237</sup> Np
FWHM, эВ	249	249	259	342	378	232	432

Остальные спектральные пики от источников имеют ширины сопоставимые или более широкие, чем энергетическое разрешение нашего спектрометра. Поэтому они не использовались в наших измерениях. Экспериментальные данные из таблицы показаны точками на рис. 6.

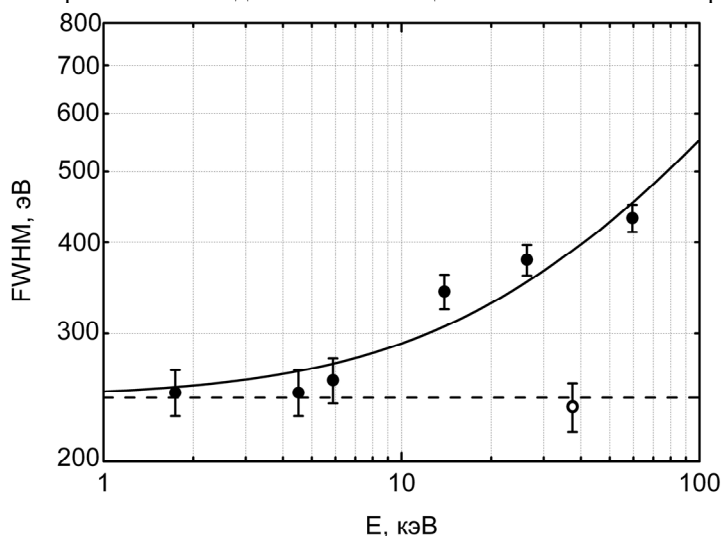


Рис.6. Энергетическое разрешение рентгеновского спектрометра как функция энергии рентгеновских квантов.

Фано детектора оказался равным  $F = 0,118$ , а шум электронного тракта  $FWHM_{el} = 245$  эВ. Рассчитанная величина шума электронного тракта показана пунктирной линией на рис.6 и подтверждается измерением ширины спектрального пика от ртутного генератора, которая показана пустым кружком на рис.6. Эта ширина определяется только шумом электронного тракта [2,5]. Таким образом, энергетическое разрешение нашего спектрометра описывается формулой:

$$FWHM = \sqrt{245^2 + 2,45 \cdot E}, \quad (6)$$

где:  $E$  – энергия фотонов в эВ. Результаты расчета по формуле (6) в энергетическом диапазоне от порядка 1 до порядка 100 кэВ показаны на рис. 6 сплошной линией. На рисунке видно хорошее согласие результатов измерений и расчета. Формула (6) позволяет прогнозировать и рассчитывать энергетическое разрешение спектрометра при таких энергиях, где измерения не выполнялись.

Таким образом, в работе проведены измерения энергетического разрешения рентгеновского спектрометра на основе охлаждаемого Si(Li) детектора, получен фактор Фано детектора, получена формула (6) для расчета энергетического разрешения спектрометра при энергии рентгеновского излучения от порядка 1 до порядка 100 кэВ.

Результаты исследования могут использоваться для планирования экспериментов и обработки результатов измерения спектров рентгеновского излучения.

Авторы благодарны А.М. Горбаню за модификацию программного кода, управляющего анализатором АИ-1024-95-17; А.А. Турчину за модификацию предусилителя; рецензентам за полезные замечания. В.А. Стратиенко благодарен В.Ф. Рыбалко за предоставление микроисточников W+Ti(D,T)+SiO.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kowalski E. Nuclear electronics. - Berlin, New York: Springer-Verlag, 1970; Е. Ковальский. Ядерная электроника. - М.: Атомиздат, 1972. - 360 с.
2. Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.

3. Morse J., Energy resolving semiconductor detectors for X-ray spectroscopy // ISSD Friday Lecture at European Synchrotron Radiation Facility. – 2010, <http://www.esrf.eu/files/live/sites/www/files/Instrumentation/friday-lectures-slides/ESRFtalk201002EDX-Systems.pdf>
4. Mathieson K., Bates R., Iles G.M., Manolopoulos S. et al. Simulated and experimental results from a room temperature silicon X-ray pixel detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2001. – Vol.A 460. - P.191–196.
5. Feng H., Kaaret P., Andersson H. Double-layer silicon PIN photodiode X-ray detector for a future X-ray timing mission // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2006. – Vol.A 564. - P.347–351.
6. Pullia A., Bertuccio G. Resolution limits of silicon detectors and electronics for soft X-ray spectroscopy at non cryogenic temperatures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1996. – Vol.A 380. - P.1-5.
7. Shchagin A.V., Khizhnyak N.A. Differential properties of parametric X-ray radiation from a thin crystal // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1996. - Vol.B 119. - P.115-122.