

Неклассический рентгеновский спектрометр на основе линейного многоканального детектора

А. С. Лелюхин, Т. И. Пискарёва, Е. А. Корнев

В работе предложена схема восстановления спектральных распределений излучения импульсных рентгеновских источников по абсорбционным кривым, регистрируемым линейным многоканальным детектором на основе арсенида галлия. Экспериментально показана возможность анализа спектрального состава излучения и определения радиационных параметров пучка в последовательные моменты времени формирования рентгеновского импульса.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, восстановление спектра излучения, метод минимизации направленного расхождения.

Введение

При изучении физических процессов, связанных с регистрацией рентгеновского излучения в широком энергетическом диапазоне при высокой концентрации энергии излучения в пространстве и времени, используют неклассические рентгеновские спектрометры. Суть методики получения экспериментальных данных заключается в измерении с помощью детекторов полного поглощения интенсивности излучения за ослабляющими фильтрами разной толщины. Очевидно, что процесс измерений можно организовать либо путем механической смены фильтров для одноканальной системы регистрации, либо путем построения пространственно распределенной многоканальной системы. В первом случае последовательно зарегистрированные сигналы являются разнесенными во времени, и при временной нестабильности пучка излучения результат измерений не будет соответствовать мгновенному спектру источника. Во втором случае необходимо обеспечивать идентичность каналов регистрации, априорно полагая, что спектральный состав излучения не меняется от точки к точке в плоскости размещения ослабляющих фильтров. По результатам серии измерений, выполненных за фильтрами разной толщины, формируется массив данных,

необходимый для построения кривой ослабления излучения в материале фильтра. Спектральный состав излучения восстанавливается по экспериментально полученной кривой ослабления при известных параметрах фильтров и детекторов для заданной геометрии регистрации.

Метод ослабляющих фильтров применяется для анализа излучения плазмы [1–3], оценки спектрального состава синхротронного излучения [4, 5], при решении задач контроля параметров рентгеновских диагностических систем [6–8].

Целью данной работы являлось изучение возможности восстановления спектрального состава рентгеновского излучения импульсных источников по абсорбционным кривым, регистрируемым линейным многоканальным детектором на основе арсенида-галлия, и установление факторов, влияющих на достоверность получаемых результатов.

Формирование абсорбционных кривых и методика восстановления спектров

В случае размещения линейного многоканального детектора вдоль рентгеновского луча отдельные каналы детектирования одновременно играют роль ослабляющих фильтров для последующих каналов и детекторов, регистрирующих кванты излучения, испытавшие взаимодействие в чувствительной области [7]. При такой схеме регистрации экспериментальные данные, необходимые для построения абсорбционной кривой, будут получены в локальной точке профиля пучка одновременно по всем каналам детектирования.

Предположим, что линейный детектор выполнен в виде прямоугольной пластины, в объеме которой выделено m чувствительных каналов

Лелюхин Александр Сергеевич, доцент, к.т.н.
Пискарёва Татьяна Ивановна, доцент, к.т.н.
Корнев Евгений Андреевич, доцент, к.ф.-м.н.
Тел. 8(3532) 21-03-13.
E-mail: alex-ray@inbox.ru

Оренбургский государственный университет.
Россия, 460018, Оренбург, просп. Победы 13.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2017 г.

(см. рис. 1), а кванты излучения, проникающие в детектор, распределены по энергии с вероятностью γ_E .

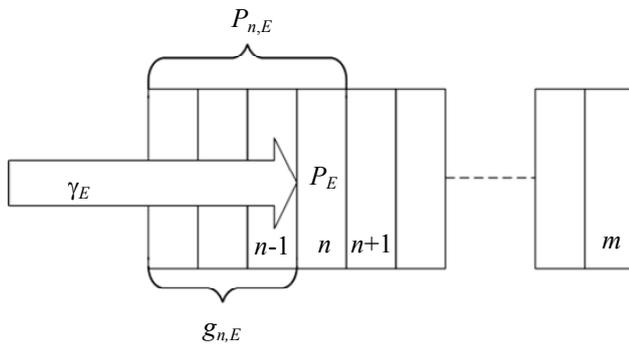


Рис. 1. Схема задания априорных вероятностей взаимодействия квантов рентгеновского излучения при формировании абсорбционной кривой.

С учетом сделанных допущений, абсорбционная кривая в дискретном представлении может быть задана вектором значений $J_n = \sum_E \gamma_E P_{n,E}$, где

$P_{n,E}$ – априорная вероятность регистрации кванта излучения с энергией E в канале с номером n . Априорная вероятность $P_{n,E}$ определяется произведением вероятностей поглощения квантов в отдельном канале P_E на вероятность их пропуска (n-1) предыдущим каналом детектирования $q_{n,E}$, т. е. $P_{n,E} = P_E q_{n,E}$.

Апостериорная вероятность регистрации квантов P_n будет установлена по экспериментальным данным, полученным с каждого из каналов регистрации после экспонирования детектора.

Определив априорную и апостериорную вероятности взаимодействия квантов пучка тормозного излучения в веществе детектора с известными параметрами, далее для нахождения спектра излучения можно воспользоваться итерационной процедурой Тараско [9, 10], заданной в нашем случае уравнением:

$$\gamma_E^{(s+1)} = \left[\gamma_E^{(s)} \sum_{n=0}^m P_E q_{n,E} \frac{P_n}{\sum_E \gamma_E^{(s)} P_E q_{n,E}} \right] \frac{1}{\sum_{k=0}^m P_E q_{k,E}},$$

где $\gamma_E^{(s+1)}$ – приближение искомого спектра после выполнения текущей итерации.

Поскольку между чувствительной областью детектора и источником излучения присутствует среда распространения (фильтр), то начальное приближение для спектра тормозного излучения на входе детектора можно определить уравнением $\gamma_E^{(0)} = p_E q_{F,E}$, где $q_{F,E} = \exp(-\mu_{F,E} \rho_{FI} t_F)$ – вероятность пропуска излучения фильтром толщиной t_F ; $\mu_{F,E}$ – массовый коэффициент ослабления

материала фильтра; ρ_F – плотность материала фильтра. Толщина фильтра в данном случае должна быть задана как некоторое начальное приближение.

Для организации вычислительного процесса в работе использовался комплекс программных модулей «X-ray SRT» [11], разработанный для восстановления спектральных распределений методом минимизации направленного расхождения. Последовательность обработки данных об эффективном поглощении квантов пучка рентгеновского излучения в объеме линейного GaAs-детектора включает следующие этапы: задание начальных условий; считывание матрицы экспериментальных данных; формирование абсорбционной кривой; расчет матрицы априорных вероятностей; задание начального приближения спектрального распределения; построение сплайн функции спектрального распределения; пересчет матрицы апостериорных вероятностей; формирование i -го приближения спектрального распределения; перенормировка матриц спектрального распределения; вычисление минимизирующего функционала направленного расхождения; проверка условия завершения итерационного процесса и возврат к построению сплайн функции спектрального распределения, если условие выполнено, или формирование спектрального распределения, если условие не выполнено; расчет радиационных параметров пучка; вывод результатов.

Экспериментальное оборудование

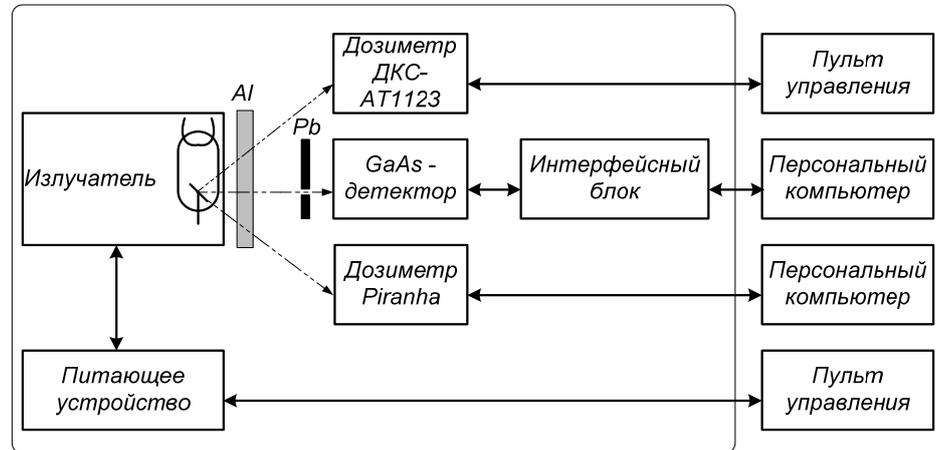
Для регистрации абсорбционных кривых в работе использовалась система детектирования, включающая линейный многоканальный детектор на основе арсенида галлия [12]. Линейный детектор содержит 128 каналов детектирования в виде микродетекторов, образованных на кристалле арсенида галлия металлизированными стрипами. Длина кристалла в направлении рентгеновского луча – 26 мм; площадь поверхности – $4 \times 0,24 \text{ мм}^2$. При заданной геометрии глубина чувствительной области отдельного канала детектирования составляет 200 мкм, электрическая емкость канала 0,5 пФ. Каждый канал имеет собственный интегратор, что обеспечивает одновременный сбор заряда сразу по всем 128 каналам. Накопленный за время экспозиции электрический заряд преобразуется в последовательность цифровых шестнадцатизначных кодов. Динамический диапазон системы определяется заданными временем накопления заряда и величиной емкости интегрирования и может быть адаптирован под условия эксперимента программно. Минимальное время накопления заряда – 5 мкс, время считывания фиксировано и составляет 140 мкс.

Физические принципы формирования импульсов тока в квантово-чувствительных GaAs-детекторах позволяют считать, что сигнал на выходе измерительного канала определяется количеством поглощенных квантов, причем в независимости от их энергии [12]. Таким образом, детектор обеспечивает возможность получения абсорбци-

онных кривых по сигналам, пропорциональным числу квантов, зарегистрированных в каждом из каналов детектирования за время накопления заряда.

При выполнении экспериментального исследования линейный GaAs-детектор и вспомогательное оборудование размещались внутри контура радиационной защиты (см. рис. 2).

Рис. 2. Схема размещения экспериментального оборудования.



Для контроля линейности дозовой характеристики источника и независимых измерений анодного напряжения U_a , суммарной фильтрации t_{Al} и первого слоя половинного ослабления (HVL_1) в поле излучения дополнительно устанавливались дозиметр гамма-излучения ДКС-АТ1123 (Атомтех, Беларусь) и универсальный дозиметр Piranha (RTI Electronics AB, Швеция).

В качестве источника излучения использовался рентгеновский излучатель, оборудованный рентгеновской трубкой с вращающимся вольфрамовым анодом. Поле излучения формировалось глубинной диафрагмой излучателя. Частотное питающее устройство обеспечивало задание анодного напряжения в диапазоне 50–150 кВ с шагом 1 кВ, причем для двух экспозиций – 2,5 и 5 мА с.

Линейный GaAs-детектор позиционировался по рентгеновскому лучу с помощью приборного столика (на рис. 2 не показан), оснащенного микрометрическими винтами. Для ограничения влияния рассеянного излучения на форму регистрируемых абсорбционных кривых на входное окно детектора устанавливался дополнительный свинцовый коллиматор в форме плоской пластины $100 \times 100 \times 2,5$ мм с щелью размером 2×4 мм. Внутри корпуса детектора, непосредственно перед кристаллом арсенида галлия, размещался массивный свинцовый коллиматор, образующий щелевой канал $0,7 \times 4$ мм глубиной 7 мм.

С учетом радиационных характеристик источника излучения при выполнении экспериментального исследования в качестве постоянных параметров задавались следующие параметры: напряжение питания микродетекторов – 15 В,

время интегрирования – 2,5 мс, период измерений 2,7 мс. Емкость интегрирования составляла 2, 4 или 16 пФ в зависимости от задаваемого анодного напряжения.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Экспериментальное исследование заключалось в регистрации импульсов рентгеновского излучения и последующем анализе характера изменений граничной энергии E_{ff} и слоя половинного ослабления пучка во времени. Качественные характеристики пучка рассчитывались согласно методике, предложенной в [8], по спектральным распределениям, которые, в свою очередь, восстанавливались по абсорбционным кривым, сформированным в последовательные моменты времени.

Форма рентгеновского импульса, зарегистрированного GaAs-детектором, может существенно различаться в зависимости от схемотехнического решения, использованного для задания высокого напряжения на аноде рентгеновской трубки. Под рентгеновским импульсом в данном случае понимается изменение выходного сигнала нулевого канала детектора от времени в момент его экспозиции. Обычно схема питания рентгеновского источника настроена таким образом, чтобы поддерживать постоянную мощность дозы в плоскости приемника излучения за время экспозиции и обеспечивать повторяемость дозы при повторных включениях. В случае «коротких» экспозиций в простых схемах питания используется повышен-

ный предварительный накал катода так, что в начальный момент времени ток трубки имеет большее значение, компенсируя недобор анодного напряжения. По мере достижения анодным напряжением заданного значения анодный ток уменьшается, а мощность, отдаваемая в нагрузку, остается неизменной. В результате форма рентгеновского импульса, регистрируемого детекторами, работающими в режиме измерения мощности дозы, будет близка к прямоугольной. Детекторы, работающие в счетном режиме, регистрируют характерный экспоненциально затухающий выброс, формирующийся на вершине импульса в результате остывания катода рентгеновской трубки.

В нашем случае импульсы, регистрируемые линейным GaAs-детектором, имели длительность 210–220 мс; фронт – 6 мс; спад – 8 мс; длительность выброса на вершине импульса – 80 мс. С учетом задержки начала измерений, универсальный дозиметр Piranha выброса на вершине импульса не фиксировал. За время экспозиции накапливался двумерный массив экспериментальных данных, достаточный для формирования не менее 80 абсорбционных кривых. В результате появилась возможность оценить изменения спек-

трального состава излучения по мере развития рентгеновского импульса.

Рентгеновский импульс $U_{ch}(t)$, зарегистрированный на уставках 150 кВ; 2,5 мА с, и абсорбционные кривые, сформированные по фронту, на вершине и по спаду импульса в моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 , соответствующие уровням 0,7 (кривые 1 и 2); 0,5 (кривая 3) и 0,4 (кривая 4) относительно максимального значения сигнала, приведены на рис. 3.

Динамика трансформации абсорбционных кривых говорит об эволюции спектрального состава излучения во времени. Так, при одинаковом уровне сигнала в моменты времени t_1 и t_2 абсорбционная кривая 2, очевидно, соответствует более жесткому излучению в сравнении с абсорбционной кривой 1. В моменты времени t_3 и t_4 уровни сигнала отличаются друг от друга на 10 %, а абсорбция излучения при этом осуществляется одинаково.

Спектральные распределения, восстановленные по полученным абсорбционным кривым, представлены на рис. 4. Здесь же показано относительное изменение эффективной энергии пучка E_{eff} за время экспозиции детектора.

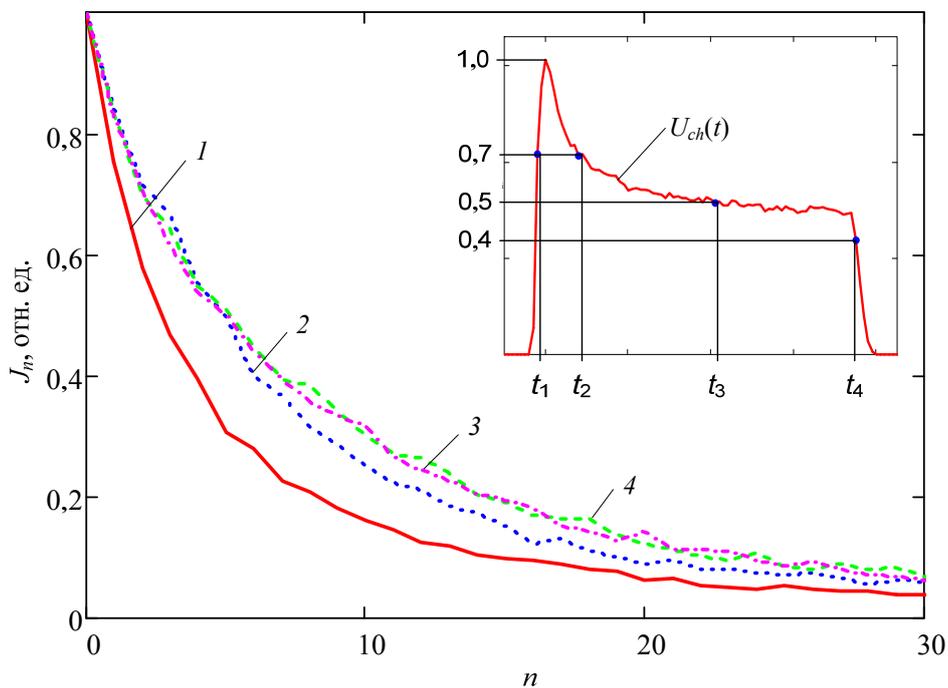


Рис. 3. Абсорбционные кривые 1–4, соответствующие разным этапам формирования рентгеновского импульса (J_n – отражает уровень яркостного сигнала, зарегистрированного в канале детектирования с номером n , относительно нулевого канала).

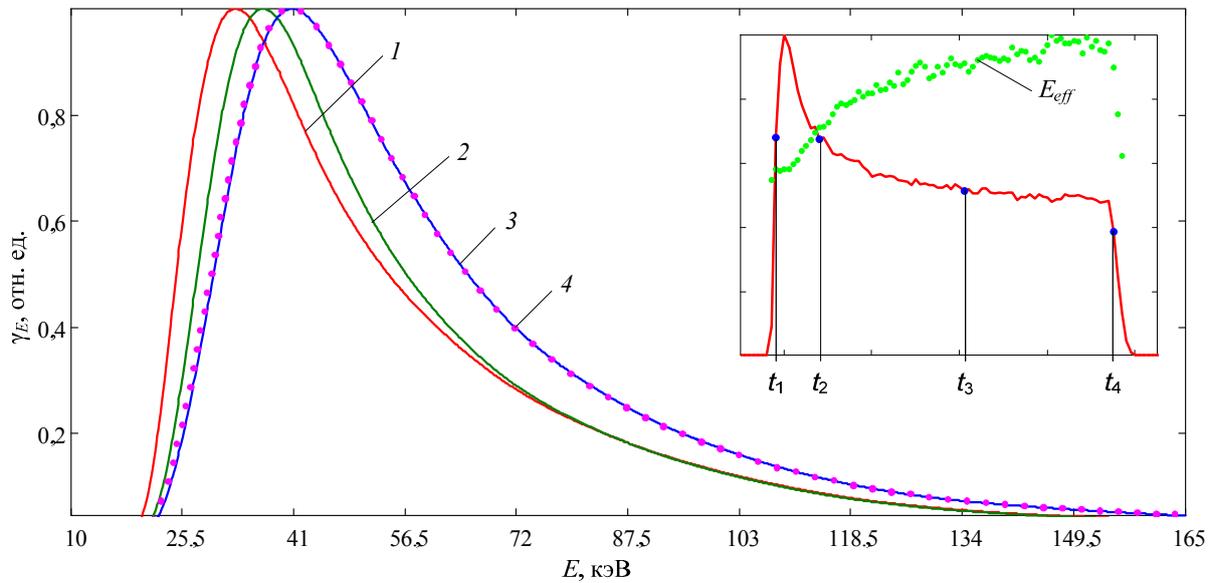


Рис. 4. Спектральные распределения рентгеновского излучения 1–4, восстановленные по абсорбционным кривым, зарегистрированным в моменты времени t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , и динамика изменения эффективной энергии пучка в течение экспозиции.

Видно, что по мере развития рентгеновского импульса максимум спектрального распределения сдвигается в сторону больших энергий и возрастает эффективная энергия пучка. Очевидно, что методика восстановления принципиально не позволяет обнаруживать характеристическое излучение материала анода и скачки поглощения, поскольку спектр излучения приближается сплайнами.

Характер изменения радиационных параметров, рассчитанных по восстановленным спек-

тральным распределениям для трех уставок анодного напряжения, в сравнении с данными, полученными универсальным дозиметром Piranha, можно проследить по представленной таблице.

В пределах погрешностей измерений средние значения первого слоя половинного ослабления и граничной энергии согласуются с результатами прямых измерений, что косвенно подтверждает эффективность предложенной схемы восстановления спектральных распределений.

Таблица

Экспериментальные результаты

Уставка, кВ	Значение, измеренное универсальным дозиметром Piranha			Значение, рассчитанное по восстановленным спектрам (линейный GaAs-детектор)			
	U_a , кВ	HVL_1 , см	t_{Ab} , см *	по уровню	E_{fr} , кэВ	HVL_1 , см	E_{eff} , кэВ
150	144,2±3,6	0,56±0,04	0,27	0,7 по фронту	133	0,36	36,4
				0,7 на вершине	132	0,44	39,7
				0,5 на вершине	150	0,57	44,6
				0,4 по спаду	149	0,56	44,3
				Среднее значение за все время импульса	145±8	0,53±0,08	42,9±3,0
120	115,8±2,9	0,45±0,03	0,29	0,7 по фронту	104	0,29	33,3
				0,7 на вершине	104	0,33	35,0
				0,5 на вершине	125	0,47	40,7
				0,4 по спаду	122	0,44	39,6
				Среднее значение за все время импульса	121±7	0,44±0,07	39,4±2,8
100	97,0±2,4	0,36±0,03	0,28	0,7 по фронту	90	0,24	30,9
				0,7 на вершине	88	0,26	31,5
				0,5 на вершине	109	0,35	35,7
				0,4 по спаду	103	0,35	36,0
				Среднее значение за все время импульса	100±6	0,32±0,05	34,5±2,4

* погрешность измерения не нормируется

Однако в связи с асимптотическим приближением огибающей спектрального распределения к оси энергий, в определении граничной энергии возникает неоднозначность, обуславливающая существенный разброс результатов. В данной работе граничная энергия определялась по уровню 0,05 восстановленного спектрального распределения. В дальнейшем необходимо найти более адекватный критерий, позволяющий оценивать граничную энергию пучка до входа в итерационный процесс, т.е. на этапе задания начального приближения спектра.

Также следует отметить, что при уменьшении анодного напряжения до 70 кВ исходных данных для восстановления спектра при текущей геометрии детектора недостаточно. Расчеты показывают, что для повышения достоверности восстановления и расширения диапазона измерений в сторону меньших напряжений до 50 кВ необходимо уменьшать глубину канала детектирования до 40 мкм.

Существенное влияние на результаты измерений оказывает вторичное излучение, возбуждаемое в элементах конструкции детектора. Если не принимать мер по его ограничению, то в результате неравномерной боковой засветки детектора регистрируемые абсорбционные кривые трансформируются, что проявляется как эффект «ужесточения» спектра падающего излучения.

Заключение

Предложенная в работе схема восстановления спектральных распределений импульсного рентгеновского излучения по форме экспериментально регистрируемых абсорбционных кривых

позволяет получать устойчивое, физически обоснованное приближение спектра. Представленные экспериментальные результаты подтверждают возможность определения радиационных параметров пучка излучения во времени в локальной точке пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгов А. Н., Савёлов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 35.
2. Баловнев А. В., Григорьева И. Г., Додулад Э. И., Савёлов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 23.
3. Баловнев А. В., Визгалов И. В., Салахутдинов Г. Х. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 40.
4. Du Y. H., Wang Y. F., Hua W., Huang Y. Y., Hu T. D. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2006. Vol. 565. P. 855.
5. Yanfei Wang, Yonghua Dubc, Tiandou Hu // Inverse Problems in Science and Engineering. 2009. Vol. 17. No. 2. P. 175.
6. Waggener R. G., Blough M. M., Terry J. A., Chen D., Lee N. E., Zhang S. McDavid W. D. // Med Phys., 1999. Vol. 26. No. 7. P. 1269.
7. Муслимов Д. А., Лелюхин А. С., Гамалей К. А. // Медицинская техника. 2011. № 5. С. 34.
8. Лелюхин А. С. // Медицинская техника. 2017. № 3. С. 35.
9. Тараско М. З. Метод минимума направленного расхождения в задачах поиска распределений. Препринт ФЭИ № 1446. Обнинск, 1983.
10. Теребиж В. Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач. – М.: Физматлит, 2005.
11. Лелюхин А. С., Муслимов Д. А., Таисов М. В., Аджиева М. Д. Комплекс программных модулей для восстановления спектра тормозного излучения методом минимизации направленного расхождения. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611219 от 28.01.2014. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Россия.
12. Толбанов О. П. // Вестник Томского государственного университета. 2005. № 285. С.155.

PACS: 07.85.NC

Non-classical X-ray spectrometer based on a linear multichannel detector

A. S. Lelyukhin, T. I. Piskaryova, and E. A. Kornev

Orenburg State University
13 Av. Pobedy, Orenburg, 460018, Russia
E-mail: alex-ray@inbox.ru

Received November 27, 2017

A scheme for reconstructing spectral distributions of radiation from pulsed X-ray sources by absorption curves has been proposed. To register the absorption curves, a linear multichannel detector based on gallium arsenide is used. It has been shown experimentally that it is possible to analyze the spectral composition of the radiation and determine the radiation parameters of the beam at successive instants of time of the X-ray pulse.

Keywords: X-ray radiation, radiation spectrum reconstruction, method of minimizing directional divergence.

REFERENCES

1. A. N. Dolgov, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 35 (2008).
2. A. V. Balovnev, I. G. Grygoryeva, E. I. Dodulad, A. S. Savelov, and G. Kh. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 23 (2013).
3. A. V. Balovnev, I. V. Vizgalov, and G. H. Salakhutdinov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 40 (2015).
4. Y. H. Du, Y. F. Wang, W. Hua, Y. Y. Huang, and T. D. Hu, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **565**, 855 (2006).
5. Yanfei Wang, Yonghua Dubc and Tiandou Hu, *Inverse Problems in Science and Engineering* **17** (2), 175 (2009).
6. R. G. Waggener, M. M. Blough, J. A. Terry, D. Chen, N. E. Lee, S. Zhang, and W. D. McDavid, *Med Phys.* **26**, 1269 (1999).
7. D. A. Muslimov, A. S. Lelyukhin, and K. A. Gamaley, *Biomedical Engineering* **45** (5), 171 (2011).
8. A. S. Lelyukhin, *Biomedical Engineering* **51** (3), 200 (2017).
9. M. Z. Tarasco, *The method of minimum directional divergence in problems of finding distributions*, (Preprint IPPE No. 1446, Obninsk, 1983) [in Russian].
10. V. Yu. Terebyzh, *Introduction to the statistical theory of inverse problems*, (Fizmatlit, Moscow, 2005) [in Russian].
11. A. S. Lelyukhin, D. A. Muslimov, M. V. Taisov, and M. D. Adzhieva, *A set of software modules for reconstructing the bremsstrahlung spectrum by minimizing the directional divergence*. (Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No. 2014611219, RF 2014).
12. O. P. Tolbanov, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, No. 285, 155 (2005).