

Из вышесказанного следует, что при построении входного усилителя можно использовать низкочастотные усилители. Как правило, низкочастотные усилители обладают большим коэффициентом усиления и малыми входными токами.

Таким образом предложенный метод измерения поверхностной фото-ЭДС обладает рядом преимуществ, которые позволяют в значительной степени упростить конструкцию измерительной системы, а также улучшить точность и достоверность результатов измерения.

#### Литература

1. Kevin O. A self-tracking method for local surface-photovoltage measurements on semiconducting surfaces /

O. Kevin, S. Speller, I. Barke // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2017. 50 204004

2. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств наноконпозитных полимеров модернизированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев, А.В. Кравцевич, И.А. Ровба, В.И. Лысенко, Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.

3. Podshivalov, V.N. Determination of the diffusion length of charge minority carriers using digital oscillography of surface photovoltage / V.N. Podshivalov // Russ Microelectron. – 2010, vol. 39 p. 34–41.

4. Dittrich Th. Extraction of source functions of surface photovoltage transients at very short times / Th. Dittrich, O. Garcia Vera, S. Fengler, S. Pineda, S. Bönisch // Review of Scientific Instruments. – 2019. – Vol. 90

УДК 535-3: 535.314

### ФОРМИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИКАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР

Дудчик Ю.И.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

Пучки рентгеновского и гамма-излучения широко используются в науке, технике и медицине. Для их формирования используются различные элементы рентгеновской оптики, такие как зонные пластинки, многоэлементные преломляющие рентгеновские линзы, поликапиллярные линзы Кумахова, конические и параболические монокапилляры, многослойные зеркала, зеркала скользящего падения. Каждый из указанных элементов имеет свой собственный энергетический диапазон использования, однако для фотонов с энергией больше 100 кэВ эффективность указанных элементов падает. Что касается гамма-лучей с энергией фотонов от 100 кэВ до 1 МэВ, то недавно в [1] было показано, что показатель преломления для гамма-лучей с энергией около 1 МэВ больше единицы, что не соответствовало сложившимся представлениям. Предполагалось, что это открытие станет основой для создания нового вида гамма-оптики. Однако позже указанные авторы признали возможные ошибки в своей работе и сошлись во мнении, что показатель преломления для гамма-излучения меньше единицы, что является общепринятым. Следовательно, коллиматор, по-видимому, является единственным средством контроля гамма-излучения. Поскольку коллиматор характеризуется низкой светосилой, то разработка принципов и устройств для управления пучками гамма-излучения высоких энергий представляется многообещающей и актуальной.

В данной работе предлагается использовать многослойные структуры и поликапиллярные стеклянные структуры в качестве источников вторичного гамма-излучения для увеличения интенсивности гамма-излучения на объекте.

Идея состоит в том, что пропускать первичный пучок гамма-излучения от рентгеновской трубки или ускорителя электронов, через слоистую структуру: пучок будет испытывать рассеяние на электронной подсистеме структуры за счет эффекта Комптона, при этом часть пучка вторичного излучения в направлении каналов структуры образует дополнительный гамма-луч, который увеличит интенсивность излучения в заданном направлении.

На рисунке 1 показана структура, состоящая из плоских слоев материала с атомным номером  $Z$  (обозначен как 4), расположенных на расстоянии  $b$  друг от друга. Толщина отдельного слоя 4 равна  $a$ . Гамма-лучи из рентгеновской трубки или ускорителя пересекают слои структуры под углом  $\varphi$  и рассеиваются на электронной подсистеме атомов слоя 4. Лучи, рассеянные под углом  $\theta$ , попадают в каналы структуры и образуют направленный пучок гамма-лучей, где  $\theta$  – угол между рассеянным фотоном и первичным пучком.

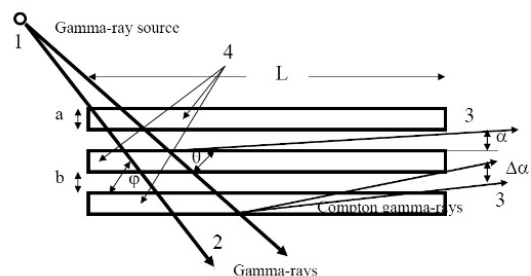


Рисунок 1 – Слоистая структура для генерации гамма-излучения

Интенсивность вторичного комптоновского гамма-пучка зависит от пропускания структуры в направлении угла  $\alpha$ , где  $\alpha$  – угол между рассеян-

ным пучком и поверхностью слоя. Если источник комптоновских лучей расположен на расстоянии  $x$  от поверхности слоя, то пропускание структуры  $T$  в направлении угла  $\alpha$  (рисунок 1) можно определить как:

$$T = \exp\left(-\frac{kx}{\sin\alpha}\right), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент ослабления излучения в материале слоя. Расходимость  $\Delta\alpha$  вторичного гамма-пучка можно определить как  $\Delta\alpha = b/L$ , где  $L$  – длина структуры. Эффективная толщина слоя материала  $a$  может быть определена из соотношения:

$$a = \frac{1}{k} \Delta\alpha = \frac{b}{Lk}. \quad (2)$$

Например, рассмотрим слоистую структуру из стекла. Пробег  $l_{abs} = 1/k$  фотонов с энергией 1 МэВ в стекле составляет 7,08 см. Для  $L = 30$  см и  $b = 10$  мкм значение  $a$  равно 2,3 мкм.

Для генерации вторичных комптоновских рентгеновских пучков использовались стеклянные поликапиллярные структуры в виде линзы Кумахова. Фотография линзы показана на рисунке 2.

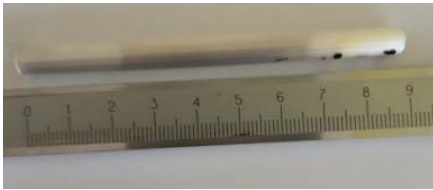


Рисунок 2 – Фотография линзы Кумахова, которая использовалась в экспериментах

Линза Кумахова состоит из большого количества изогнутых поликапилляров. Рентгеновские лучи распространяются внутри стеклянных капилляров, как в волноводах, в режиме полного внешнего отражения от стенок капилляров. При традиционном использовании линзы она располагается на фокусном расстоянии  $f_1$  от источника рентгеновского излучения, в то время как фокусное пятно линзы также находится на фокусном расстоянии  $f_2$ : для использованной линзы  $f_2 = 152$  мм для фотонов с энергией 8 кэВ. Нами предложен другой способ формирования рентгеновского пучка, в котором линза расположена близко к протяженному источнику рентгеновских лучей или гамма-излучения, как показано на рисунке 3 [2]. В этом случае на выходе из линзы наблюдаются два пучка излучения: первый, как результат прохождения излучения через поликапиллярную структуру в волноводном режиме, этот пучок показан как 4 на рисунке 3, а второй пучок – из-за комптоновского рассеяния на стенках капилляров, обозначен цифрой 5.

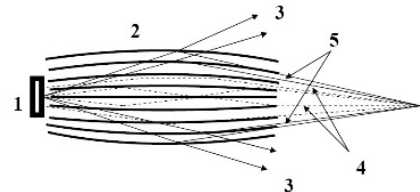


Рисунок 3 – Устройство для получения рентгеновского пучка:

1 – источник рентгеновских лучей; 2 – линза Кумахова; 3 – первичный пучок рентгеновских лучей; 4 – пучок рентгеновских лучей, прошедший через капилляры; 5 – рассеянные (комптоновские) пучки рентгеновских лучей

В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка с медным анодом и фокусным пятном около 0,8 мм, напряжение на аноде составляло 38 кВ, ток 2 мА. На рисунке 4 показано изображение фокусного пятна рентгеновской трубки, полученное с помощью камеры-обскуры. Изображение было записано с помощью рентгеновской камеры Photonic Science. Изображение фокусного пятна рентгеновской трубки также было получено с помощью линзы Кумахова. Для этого линза располагалась близко к фокусному пятну рентгеновской трубки, а рентгеновская камера располагалась рядом с линзой на другой ее стороне.

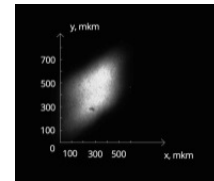


Рисунок 4 – Изображение фокусного пятна рентгеновской трубки, полученное с помощью камеры-обскуры

На рисунке 5 показано изображение рентгеновского пучка на выходе из кумаховской линзы при двух экспозициях: 3 с и 40 с. При экспозиции 3 с изображение сечения рентгеновского пучка совпадает с изображением фокусного пятна рентгеновской трубки, полученного с помощью камеры-обскуры. Это изображение формируется рентгеновскими лучами, которые распространяются через капилляры линзы в режиме полного внешнего отражения. При выдержке 40 с на рисунке 5, помимо лучей 4 в центре линзы, рентгеновские лучи наблюдаются по всему периметру линзы.

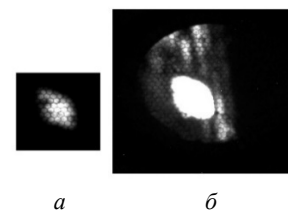


Рисунок 5 – Изображения рентгеновского пучка на выходе из линзы Кумахова при двух выдержках: 3 с (а) и 40 с (б)

Путем измерения размеров сечения рентгеновского пучка на различных расстояниях от линзы нами установлено, что два указанных пучка (проходящий и рассеянный) фокусируются линзой в одно пятно, что приводит к увеличению интенсивности рабочего пучка. Этот результат может быть использован при создании мощных источников гамма излучения.

УДК 535-3, 535.314

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАТНОРАССЕЯННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОСВЕЧИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Кучинский П.В., Новик А.Н., Субач А.А.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ  
Минск, Республика Беларусь*

Рентгеновские лучи широко используются для просвечивания изделий и материалов с целью определения внутренних неоднородностей. Традиционно объект располагают между источником излучения и фотопленкой или 2D- детектором. В этом случае получается теневое изображение объекта в прямом пучке. Существует и другой способ получения изображения объектов в обратнорассеянных рентгеновских лучах, когда для получения изображения объекта, он сканируется узконаправленным рентгеновским пучком, а рассеянное излучение регистрируется детектором, который располагается со стороны источника излучения [1]. Процесс построения изображения заключается в том, что, перемещая по заданной траектории рентгеновский луч, можно произвести поточечное считывание двумерного изображения, рассчитанного на наблюдение в отраженном излучении. Рассеянное излучение, приобретающее при этом амплитудную модуляцию вследствие взаимодействия с объектом, преобразуется в электрический сигнал. При считывании изображения сканер дискретизирует его в виде совокупности отдельных точек (пикселей) разного уровня оптической плотности. Информация об уровнях оптической плотности этих точек анализируется, преобразуется в цифровую форму и вводится для дальнейшей обработки в компьютер. Преимущества такой методики получения информации об объекте связаны с односторонним доступом к объекту, поэтому разработка рентгеновского сканера, работающего на основе обратнорассеянного излучения, является актуальной проблемой.

Нами модернизирован ранее разработанный рентгеновский сканер на основе обратнорассеянного рентгеновского излучения [2]. Сканер, фотография которого приведена на рисунке 1, содержит рентгеновскую трубку, механическое сканирующее устройство для формирования рентгеновского пучка и детектор для измерения интенсивности обратнорассеянных рентгенов-

### Литература

1. Refractive Index of Silicon at  $\gamma$  Ray Energies / Habs, D., Günther, M.M., Jentschel, M., Urban, W. // Phys. Rev. Lett., 108, 184802 (2012).
2. Compton effect based on a secondary source of hard x-ray beams / Yu. I. Dudchik, R. Rademacher, J.T. Cremer, R.H. Pantell, C.K. Gary, and M.A. Piestrup // Proc. SPIE 11108, Advances in X-Ray/EUV Optics and Components XIV, 111080Q (9 September 2019).

ских лучей. В устройстве сканирования использованы шаговые двигатели типа ДШИ 200. Применение шаговых двигателей позволило осуществлять позиционирование узконаправленного рентгеновского пучка на исследуемый объект и осуществлять сканирование без применения датчиков обратной связи. Точность позиционирования рентгеновского пучка на исследуемом объекте при его удалении от источника излучения на расстояние 500 мм составляет 0,5–3 мм.

Работа сканера обратнорассеянного рентгеновского излучения осуществляется следующим образом. После включения источника рентгеновского излучения (стационарная рентгеновская установка типа ДРОН-2) осуществляется сканирование исследуемого объекта рентгеновским пучком. Система позиционирования приводится в действие шаговыми двигателями под управлением модулей управления шаговыми двигателями и по командам, поступающим от микроконтроллера, что обеспечивает перемещение коллиматора по заданной траектории и соответственно направление потока рентгеновского излучения от источника рентгеновского излучения на исследуемый объект в заданное место и в строго определенное время.

Функциональная схема сканера обратнорассеянного рентгеновского излучения показана на рисунке 2. Регистрация обратнорассеянного рентгеновского излучения осуществляется сцинтилляционным детектором на основе монокристалла NaI(Tl) и фотоэлектронного умножителя, входящими в состав счетно-вычислительного устройства ЭВУ-1-4. Персональный компьютер (ПК) посредством микроконтроллера (МК) обеспечивает управление и синхронизацию работы сканирующего устройства, осуществляет подсчет импульсов, поступающих от детектора обратнорассеянного рентгеновского излучения, накопление, хранение и обработку информации. Полученное изображение выводится на экран монитора компьютера (ПК).