

УДК 539.26

**ДЕТЕКТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЗС-КАМЕР**  
**Кольчевская И.Н., Кольчевский Н.Н., Трапенюк Н.В.**

*Белорусский государственный университет  
 Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Экспериментально обнаружена чувствительность оптических ПЗС-камер к рентгеновскому излучению рентгеновской трубки с медным анодом при ускоряющих напряжениях 10–40 КэВ и токах 100–400 мкА. Показано, что изображения содержат отдельные пики, которые соответствуют отдельным фотонам рентгеновского излучения, распределение количества пиков по высоте зависит от параметров рентгеновской трубки. Предложена методика восстановления изображения, полученного в условиях экстремально низкой освещенности (в режиме малого числа фотонов, что характерно для рентгеновского диапазона).

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, ПЗС-камеры, детектор рентгеновского излучения.

**X-RAY DETECTOR BASED ON CMOS CAMERA**  
**Kolchevskay I., Kolchevsky N., Trapenok N.**

*Belarusian State University  
 Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** Experimentally detected the sensitivity of optical CMOS cameras to X-ray radiation from an X-ray tube with a copper anode at accelerating voltages of 10–40 KeV and currents of 100–400  $\mu$ A. Shown that the images contain individual peaks, which correspond to individual X-ray photons, the distribution of the number of peaks in height depends on the parameters of the X-ray tube. Proposed method of restoration of the image obtained under conditions of extremely low illumination (in the mode of a small number of photons, which is typical for the X-ray range).

**Key words:** X-ray, CMOS cameras, X-ray detector.

*Адрес для переписки: Кольчевский Н.Н., Курчатова, 1, ком.62, Минск, 220045, Республика Беларусь  
 e-mail: kolchevsky@gmail.com*

Прогресс в технологиях создания современных CCD и CMOS и высокая энергия отдельных фотонов рентгеновского излучения приводит к визуализации процесса формирования изображений при низких уровнях освещенности и создании детекторов рентгеновского излучения на их основе. Чувствительность обычной цифровой ПЗС-камеры к рентгеновскому излучению имеет ряд преимуществ к созданию детектора, к ним относятся дешевизна, простота в управлении и возможность дальнейшей модернизации.

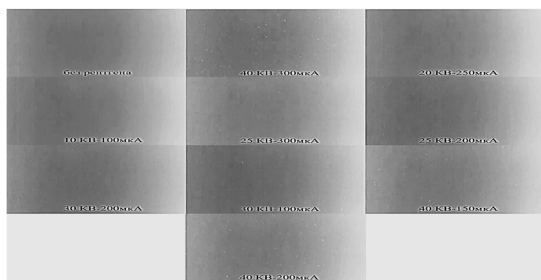


Рисунок 1 – Экспериментальные снимки, полученные ПЗС-камерой при разных режимах работы источника рентгеновского излучения

При помощи разработанного программно-аппаратного комплекса «X-ray-monitor», предназначенного для получения изображений, в заданном промежутке времени, с определенным интервалом, позволяющего использовать цифровую ПЗС-

камеру в качестве детектора, экспериментально получены снимки, при облучении матрицы рентгеновским излучением при различных режимах облучения (рис. 1).

Для полного анализа полученных снимков, была произведена обработка снимков для каждого режима облучения камеры в сравнении со снимком без рентгена, при помощи программного обеспечения (рис. 2).

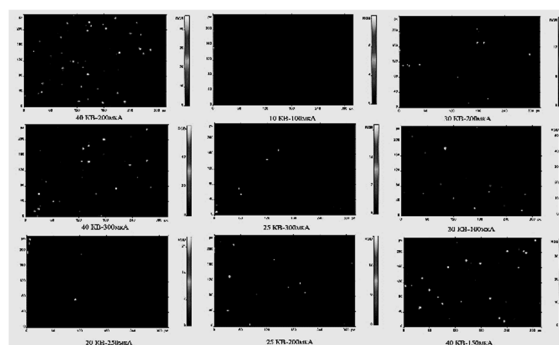


Рисунок 2 – Обработанные экспериментальные снимки для различных режимов облучения рентгеновским излучением

Произведена оценка количества пиков в зависимости от высоты пика, при разных режимах работы рентгеновского источника, построен график зависимости в программе OriginPro (рис. 3). По полученным данным можно сделать вывод, что с

ростом напряжения увеличивается количество фотонов (количество пиков), а также высота пиков увеличивается с ростом мощности.

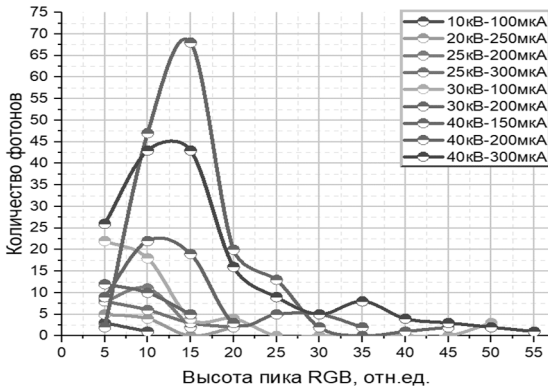


Рисунок 3 – График зависимости количества фотонов от высоты пика (для каждого режима)

Предельная чувствительность матричных приемников в рентгеновском диапазоне ограничена собственными шумами потока фотонов. Статистические свойства процессов регистрации излучения и фотонного шума удобно рассмотреть на основе полуклассической теории фоторегистрации, при этом предполагается: отсутствие пространственно-временных флуктуаций интенсивности излучения; вероятность более одного фотособытия в рассматриваемых интервалах времени и площади пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью одного фотособытия и отсутствия фотособытий. Фотособытия в двух неперекрывающихся интервалах времени независимы. Данные предположения соответствуют задаче статистики дискретных независимых событий. Рассмотрим задачу освещения матрицы, размером  $N$  на  $N$  ячеек, равномерным потоком с числом фотонов  $N^2$ . Учитывая случайный характер заполнения матрицы фотонами, получим неравномерное распределение фотонов с числом возможных уникальных состояний  $P$ , что говорит о сложности распознавания изображений:

$$P = \frac{(2N^2-1)!}{N^2!(N^2-1)!}, \quad (1)$$

где  $P$  – число состояний изображения,  $N^2$  – количество ячеек камеры.

Вычисления по полученной формуле (1) показывают, что для  $N = 2$  число состояний  $P = 35$ , для  $N = 100$  число состояний  $P = 1,1 \cdot 10^{6018}$ , для  $N = 1000$  число состояний  $P = 2,8 \cdot 10^{602056}$ . Расчеты показывают, что вероятность получить равномерное распределение ничтожно мала.

Для исследования изображений, получаемых с малым числом фотонов, применялось численное моделирование. Для моделирования задачи освещения матрицы, размером  $N$  на  $N$  ячеек, равномерным потоком, со счетным числом фотонов,

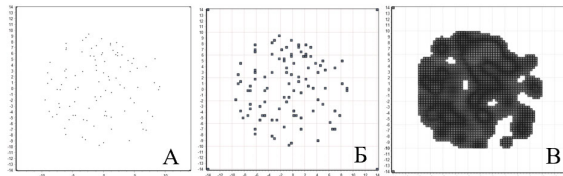
разработано программное обеспечение, которое с каждым зарегистрированным фотоном связывает Гауссову функцию:

$$F(r) = Ae^{-\frac{(r-B)^2}{2C^2}}, \quad (2)$$

где  $A$  – высота зарегистрированного пика,  $B$  – сдвиг,  $C$  – параметр, определяющий ширину Гауссова пика.

Функция Гаусса, заполняющая соседние ячейки изображения значениями в зависимости от амплитуды и ширины функции. Суммирование функций Гаусса для всех зарегистрированных фотонов создает непрерывное изображение объекта.

Показаны этапы восстановления сформированного изображения. На экране размером 20 на 20 случайным образом сгенерированы 100 точек. Каждая точка может характеризоваться как отдельный фотон. Цифровые детекторы состоят из матрицы пикселей. Попадание фотона в один из пикселей приводит к его срабатыванию. Расчеты показывают, что для матрицы 100 на 100 вероятность попадания двух фотонов в один пиксел ничтожно мала, т.е. речь идет о срабатывании отдельных пикселей цифрового детектора.



- $a$  – изображение 100 фотонов;
- $b$  – изображение активных пикселей;
- $b$  – результат восстановления изображения

Рисунок 4 – Результаты численного моделирования по восстановлению изображения

На рис. 4,  $a$  показано распределение сгенерированных фотонов. На рис. 4,  $b$  показаны распределение активных пикселей. Как видно из сравнения рисунков отсутствуют фотоны, попавшие в один и тот же пиксел. Визуально можно угадать, что генерация велась на диафрагме круглой формы. На рис. 4,  $b$  показан результат восстановления изображения, где с каждым пикселом связывалась функция Гаусса, заполняющая все ячейки матрицы детектора. При превышении суммарного значения функции Гаусса в ячейке порога, пиксел детектора считался сработавшим. Сработавший пиксел эквивалентен пикселю, в который попал фотон. Рис. 4 содержит цветовую информацию о суммарной интенсивности всех функций Гаусса отдельных пикселей. Видно, что максимальная интенсивность наблюдается в местах скопления фотонов.

Таким образом был смоделирован детектор рентгеновского излучения на основе оптических ПЗС-камер, произведены экспериментальные снимки при излучении рентгеновской трубки с

медным анодом при ускоряющих напряжениях 10–40 КэВ и токах 100–400 мкА. Предложена методика восстановления изображения, полученного в условиях экстремально низкой освещенности (в режиме малого числа фотонов, что характерно для рентгеновского диапазона).

#### Литература

1. Karolyn, A. MacDonald. An Introduction to X-ray Physics, Optics, and Applications / A. MacDonald Karolyn. – Princeton University Press, 2017. – 368 p.
2. Attwood. D. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation / D. Attwood. – Cambridge, 1999.

УДК 621.317.799:621.382

### МЕТОД ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА

Лисенков Б.Н.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Разработан метод заряда накопительного конденсатора в измерителе динамических параметров силовых полупроводниковых приборов. Новый метод позволяет существенно снизить массу, габариты и стоимость источника напряжения заряда.

**Ключевые слова:** динамические параметры силовых полупроводниковых приборов, метод двойного импульса, заряд накопительного конденсатора.

### STORAGE CAPACITOR CHARGING METHOD

Lisenkov B.

JSC "MNIPI"

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** A method has been developed for charging a storage capacitor in a dynamic parameter meter for power semiconductor devices. The new method can significantly reduce the weight, dimensions and cost of the charge voltage source.

**Key words:** dynamic parameters of power semiconductor devices, double pulse test, storage capacitor charge.

Адрес для переписки: Лисенков Б.Н., ул. Я. Коласа, 73, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

При измерении динамических параметров силовых полупроводниковых приборов (ПП), например, времени переключения, времени восстановления обратного сопротивления (reverse recovery) и др., формируют испытательные импульсы с пиковым током от единиц до сотен ампер путем разряда конденсатора через силовой объект тестирования.

Предварительно конденсатор заряжают через токоограничивающий резистор. Напряжение на конденсаторе приближается к напряжению источника по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau = RC$ , где  $R$  – сопротивление токоограничивающего резистора, а  $C$  – емкость конденсатора. Напряжение испытательных импульсов задают с погрешностью  $\pm 10\%$ , при неравномерности вершины до  $5\%$  [1–5].

Емкость конденсатора выбирают так, чтобы за время разряда напряжение на нем изменилось не более допустимого предела. Например, в разработанном макете измерителя динамических параметров силовых полупроводниковых приборов, который реализует измерение динамических параметров силовых ПП по методу двойного импульса (Dabble Pulse Test), емкость конденсатора составляет 1500 мкФ.

При измерении времени восстановления обратного сопротивления диода, обратное напряжение на нем должно составлять  $100\text{ В} \pm 10\text{ В}$  [3]. Это позволяет определить сопротивление токоограничивающего резистора в зависимости от мощности используемого источника напряжения.

Например, при мощности источника 100 Вт и напряжении 100 В, выходной ток равен 1,0 А ( $100\text{ Вт}/100\text{ В}$ ), сопротивление токоограничивающего резистора равно 100 Ом ( $100\text{ В}/1\text{ А}$ ), а постоянная времени зарядной цепи  $\tau = 0,15\text{ с}$  ( $100\text{ Ом} \times 1500\text{ мкФ}$ ). Время заряда конденсатора традиционным методом (по экспоненте) с приемлемой точностью соответствует  $5\tau$  и составляет около 0,75 с.

Чтобы устранить перегрев объекта тестирования, на котором рассеивается энергия испытательного импульса, интервал времени между импульсами может быть сравним с временем замены объекта тестирования вручную. С этой точки зрения, длительность интервала между импульсами порядка секунды представляется вполне допустимой, однако мощность (100 Вт), а следовательно габариты, вес и стоимость источника напряжения, мощность которого задействована лишь в течение  $1/5$  времени заряда, неоправданно высоки.