

$F(V)$ , но уже рассматриваемого как сумма линейных форм:

$$F(V) = \sum_{i=1}^N \omega_i (s_i - \sum_{j=1}^N k_{ij} V)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $k_{ij}$  – некоторые коэффициенты в линейной форме.

Решение (5) в матричной форме имеет вид:

$$F(V) = \mathcal{A}^T \mathbb{W} \mathcal{A}, \quad (6)$$

где  $\mathcal{A} = \mathcal{S} - \mathcal{K}V$  – вектор невязок;  $\mathbb{W}$  – матрица случайных векторов;  $\mathcal{K}$  – матрица, составленная из коэффициентов линейных форм;  $\mathbb{W}$  – диагональная матрица весов.

Оценку эффективности рассмотрим на примере 2-х гармонических зашумленных сигналов  $\sigma_i = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + N(\sigma_i, M_i)$  сначала для каждого из этапов по отдельности, затем суммарный выигрыш после двух последовательных обработок.

Пусть амплитуды, СКО и фазы полезного сигнала от 1-го ИУ и от 2-го ИУ равны, математические ожидания шумов равны нулю, а  $\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 2$ .

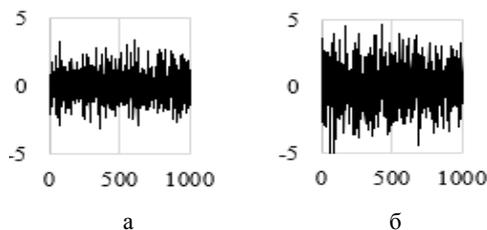


Рисунок 2 – Исходные сигналы при моделировании: а – сигнал от 1-го ИУ, б – сигнал от 2-го ИУ

Результаты моделирования представлены на рис. 3, а (комплексирование на первом этапе), б (на втором этапе) и в (после двух этапов).

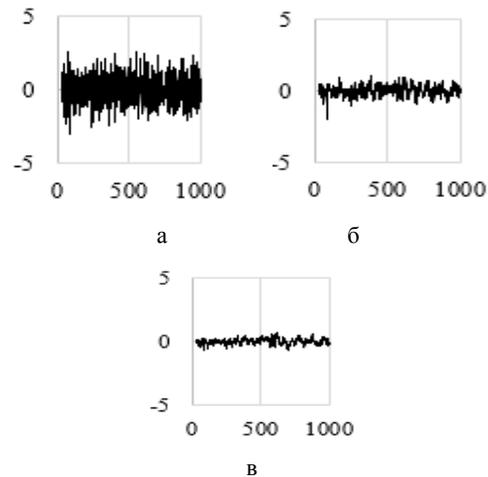


Рисунок 3 – Моделирование комплексирования трех сигналов

Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования\*

Сигнал	ИУ <sub>1</sub>	ИУ <sub>2</sub>	Э <sub>1</sub>	Э <sub>2</sub>	Э <sub>1</sub> +Э <sub>2</sub>
Уровень	1,00	2,00	0,82	0,36	0,21
СКО					

ИУ<sub>*i*</sub> – сигнал от ИУ, Э<sub>*i*</sub> – сигнал после этапа обработки

#### Литература

- Горин, А. В. Комплексирование координатной информации на основе алгоритмов нечеткой логики / А. В. Горин // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов: материалы 16 Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. – 345 с.
- Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление. – Изд. 2-е / А. Пегат. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.

УДК 535-3, 535.314

### ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ 2D-КАМЕРЫ

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Субач А.А.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрены особенности применения 2D-рентгеновских камер для реализации методов проекционной микроскопии, контактной микроскопии и стереорентгенографии.

**Ключевые слова:** Рентгеновское излучение, рентгеновская микроскопия, стереорентгенография.

#### X-RAY IMAGING OF OBJECTS USING A DIGITAL 2D-CAMERA

Dudchik Yu., Khilko G., Subach A.

A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU  
Minsk, Belarus

**Abstract.** The features of the use of 2-D X-ray cameras for the implementation of the methods of projection microscopy, contact microscopy and stereoradiography are considered.

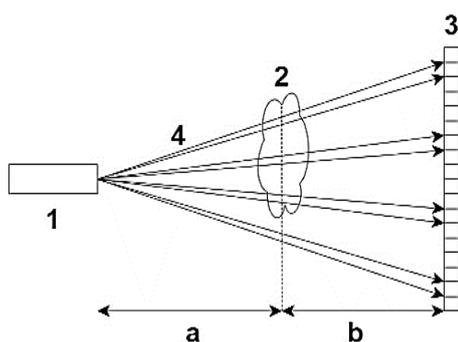
**Key words:** X-ray radiation, X-ray microscopy, stereoradiography.

Адрес для переписки: Дудчик Ю.И., Курчатова 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: dudchik@bsu.by

Развитие цифровой техники и появление цифровых камер для видимого излучения открыло новые перспективы и для рентгеновской техники. В настоящее время для визуализации рентгеновского излучения используются устройства, содержащие сцинтиллирующий экран, объектив и цифровую видеокамеру. Для визуализации рентгеновских лучей с энергией фотонов 1–8 кэВ также используются ПЗС или МОП-матрицы с прямым детектированием рентгеновских лучей без применения сцинтиллятора.

В работе рассмотрены особенности применения 2-D рентгеновских камер для реализации метода проекционной микроскопии с использованием квазиточечного источника излучения, метода контактной микроскопии и метода стереорентнографии.

На рис. 1 показана схема реализованного проекционного рентгеновского микроскопа. В качестве источника рентгеновских лучей использовался микрофокусный рентгеновский аппарат РЕЙС-25И, содержащий микрофокусную рентгеновскую трубку с прострельным медным анодом. Размер фокусного пятна источника равен 50 мкм. Напряжение на аноде – 25 кВ, ток – 0,1 мА. Для регистрации изображений объектов использовалась 2-D рентгеновская камера Photonic Science. Блок детектирования камеры содержит ПЗС-матрицу, к которой присоединена волоконно-оптическая шайба с нанесенным слоем сцинтиллятора. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет 18x12 мм, число пикселей равно 4008x2670. Пространственная разрешающая способность микроскопа зависит от размера источника излучения, разрешающей способности камеры, а также от расстояния, на котором объект располагается по отношению к камере и источнику.



1 – рентгеновская трубка; 2 – объект; 3 – 2D-детектор;  
4 – рентгеновские лучи

Рисунок 1 – схема получения изображения объектов с использованием рентгеновской камеры

Если объект располагается на расстоянии  $a$  от источника и на расстоянии  $b$  до камеры, то данный случай соответствует методу проекционной микроскопии с увеличением, равным  $(a + b)/a$ . В этом

случае разрешение метода практически совпадает с размером источника. Если объект располагается вплотную к рабочему экрану рентгеновской камеры, то пространственное разрешение устройства совпадает с пространственным разрешением камеры. Рассматриваемый случай соответствует методу контактной микроскопии.

На рис. 2 показаны изображения металлической сетки в рентгеновских лучах: толщина проволок сетки – 150 мкм. Расстояние  $(a+b)$  от источника излучения до камеры – 220 мм.

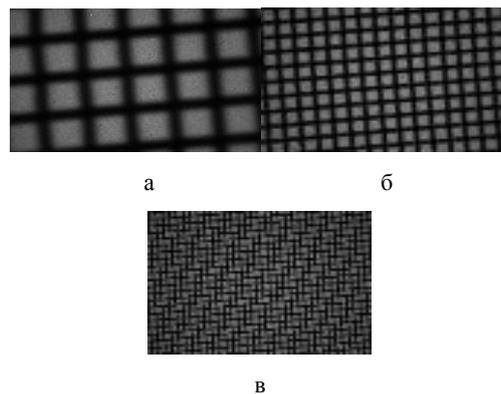
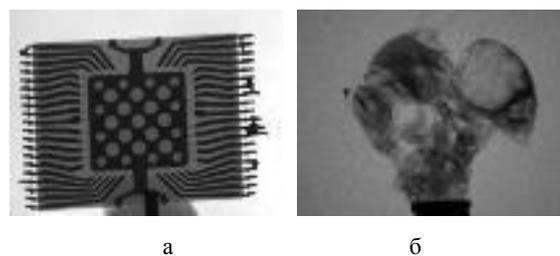


Рисунок 2 – Изображение сетки в рентгеновских лучах на различных расстояниях  $a$  до сетки:  
а)  $a = 30$  мм; б)  $a = 90$  мм; в)  $a = 200$  мм

Разрешающая способность в методе проекционной микроскопии определяется размером источника излучения, который в данном случае равен 50 мкм. Для получения изображения объектов с лучшим пространственным разрешением имеет смысл располагать объект вплотную к рентгеновской камере. Проведенные нами ранее исследования показали, что пространственная разрешающая способность использованной Photonic Science камеры, определенная методом ножа, составляет около 20 мкм. На рис. 3 показаны изображения объектов, полученные методом контактной микроскопии. Типичные условия съемки: расстояние  $a$  от источника до объекта – 500 мм, расстояние  $b$  от объекта до камеры – 5 мм. В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом



а – изображение микросхемы; б – изображение пчелы

Рисунок 3 – Изображения объектов в рентгеновских лучах

Методы рентгеновской проекционной и контактной микроскопии имеют свои ограничения, связанные с особенностями взаимодействия рентгеновских лучей с материалом объекта: для получения контрастного изображения объекта необходимо, чтобы его различные участки по-разному поглощали излучение. Это условие, как правило, не выполняется для материалов с небольшим порядковым номером – полимеров, пластиков, полимерных композитов, которые слабо поглощают рентгеновские лучи. Поэтому получение изображения объектов, выполненных из материалов с малым порядковым номером, и которые слабо поглощают рентгеновские лучи, является актуальной задачей. Нами разрабатывается стереофотографический метод получения изображения слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов [1]. В рамках разрабатываемого метода съемка объекта производится при двух положениях источника излучения, смещенных перпендикулярно относительно оптической оси системы. В исследованиях рентгеновская трубка БСВ-17 располагалась на расстоянии 400 мм до объекта, объект – на расстоянии 20 мм до камеры. Два полученных изображения объекта в рентгеновских лучах обрабатывались с использованием компьютерной программы StereoPhoto Maker, которая специально предназначена для построения стереоизображений.

На рис. 4 показаны рентгеновские изображения зерен риса, стеклянных микрокапилляров и их стереоизображения.

Из рис. 4 видно, что использование метода стереофотографии в рентгеновском диапазоне длин волн позволило существенно увеличить контраст изображения: на стереоизображениях объектов по-

являются детали, которые отсутствуют в исходных изображениях.

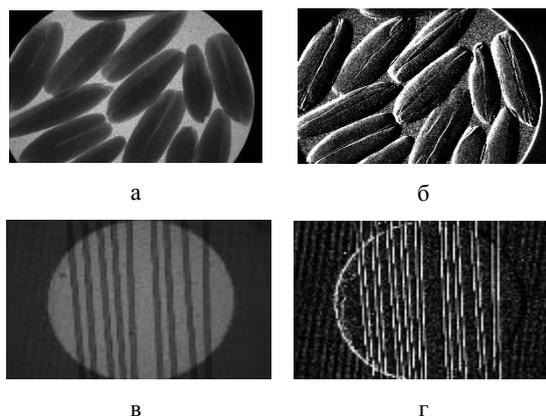


Рисунок 4 – Изображения различных объектов в рентгеновских лучах и их стереоизображения: а) изображение зерен риса в рентгеновских лучах; б) стереоизображение зерен риса; в) изображение стеклянных капилляров в рентгеновских лучах; г) стереоизображение стеклянных капилляров

**Благодарности.** Работа поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

#### Литература

1. Дудчик, Ю. И. Получение изображения объектов в рентгеновских лучах методом стереофотографии / Ю. И. Дудчик // Приборостроение–2019 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2019 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 19–20.

УДК 621.382

### МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ТЕСТИРОВАНИЯ МОЩНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ ИЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Ефименко С.А., Кособуцкая Н.В.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Тестирование – это измерение электрических параметров микросхем и полупроводниковых приборов и проведение функционального контроля микросхем. Поскольку мощные микросхемы и полупроводниковые приборы являются тепловыделяющими, их тестирование должно проводиться с учетом перегрева кристалла. В работе рассмотрены возможные способы их тестирования, в том числе учитывающие перегрев кристалла.

**Ключевые слова:** измерение, тестирование, тепловыделяющие микросхемы и полупроводниковые приборы.

### MODERNIZATION OF THE METHOD OF TESTING A POWERFUL INTEGRATED CIRCUIT OR SEMICONDUCTOR DEVICE IN THE TEMPERATURE RANGE

Efimenko S., Kosobutskaya N.

JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company  
Minsk, Belarus

**Annotation.** Testing is the measurement of electrical parameters of microcircuits and semiconductor devices and carrying out functional control of microcircuits. Since high-power chips and semiconductor devices are heat-generating, their testing should be carried out taking into account the overheating of the crystal. The paper considers possible ways of testing them, including taking into account the overheating of the crystal.

**Keywords:** measurement, testing, heat-generating chips and semiconductor devices.