

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-3-31-37>

КОНТРОЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ МИКРОФОКУСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

© **Николай Николаевич Потрахов***, **Карина Константиновна Гук**,
Виктор Борисович Бессонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ) имени В. И. Ульянова (Ленина), Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5; *e-mail: kzhamova@gmail.com

*Статья поступила 18 октября 2022 г. Поступила после доработки 2 ноября 2022 г.
Принята к публикации 12 декабря 2022 г.*

Рентгенографические методы по сравнению с другими методами контроля характеризуются высокой информативностью, наглядностью и оперативностью. В работе представлены результаты применения микрофокусной рентгенографии при контроле и диагностике промышленных изделий. Отличительная особенность метода микрофокусной рентгенографии — использование источника рентгеновского излучения с фокусным пятном микронных размеров и съемка с прямым геометрическим увеличением объекта исследования. Минимальные размеры визуализируемых структур в этом случае не ограничены размером пикселя приемника изображения и могут быть существенно меньше. Показано, что микрофокусная рентгенография позволяет не менее чем на порядок увеличить информативность получаемых рентгенограмм вследствие повышения пространственного разрешения. При этом технические средства для реализации метода могут быть малогабаритными, рассчитанными на применение в нестационарных и неспециализированных условиях. Полученные результаты могут быть использованы в научных исследованиях, при промышленном контроле изделий в электронике, приборостроении и других областях.

Ключевые слова: микрофокусная рентгенография; рентгеновский контроль и диагностика; передвижные рентгенографические и рентгенотомографические установки.

CONTROL OF INDUSTRIAL PRODUCTS BY MICROFOCUS RADIOGRAPHY

© **Nikolai N. Potrakhov***, **Karina K. Guk**, **Viktor B. Bessonov**

St. Petersburg Electrotechnical University (LETI), 5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197022, Russia;
*e-mail: kzhamova@gmail.com

Received October 18, 2022. Revised November 2, 2022. Accepted December 12, 2022.

X-ray methods in comparison with other control methods are characterized by high information content, clarity and efficiency. The paper presents the results of the use of microfocus radiography in the control and diagnostics of industrial products. A distinctive feature of the microfocus radiography method is the use of an X-ray source with a focal spot of micron sizes and a survey geometry with a direct geometric increase in the object of study. The minimum dimensions of the rendered structures in this case are not limited by the pixel size of the image receiver and can be significantly smaller. It is shown that the use of the microfocus radiography method makes it possible to increase the information content of the resulting radiographs by at least an order of magnitude, due to an increase in spatial resolution. At the same time, the technical means for implementing the described method can be small-sized, designed for use in non-stationary and non-specialized conditions. The results obtained can be used in scientific research and industrial control in the following areas: electronics, additive technologies, instrumentation and others.

Keywords: microfocus radiography; X-ray control and diagnostics; mobile radiography and X-ray tomography units.

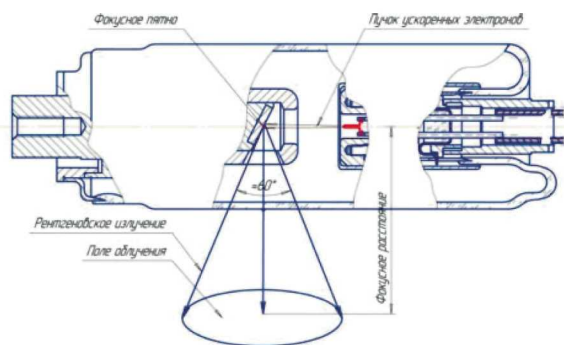


Рис. 1. Типовая конструкция рентгеновской трубки

Fig. 1. Typical design of an X-ray tube

Введение

Рентгеновское излучение широко используют для контроля промышленных изделий. Основные преимущества рентгеновских методов, в первую очередь рентгенографических, — высокие наглядность и информативность получаемых результатов, оперативность, относительная простота реализации. При этом рентгеновские методы относятся к неразрушающим, т.е. позволяют оценить внутреннее строение объекта контроля, не нарушая его целостности.

Разработка цифровых приемников рентгеновского изображения дала возможность создать установки для рентгеновского контроля и диагностики в передвижном исполнении. С помощью передвижных (портативных) рентгенодиагностических установок (ПРДУ) можно проводить контроль промышленных изделий непосредственно на месте их производства (в цехе, на монтажном участке или поточной линии сборки и др.).

В большинстве случаев пространственное разрешение при рентгеновском неразрушающем контроле ограничено характеристиками приемника рентгеновского изображения (ПРИ), точнее — размером его пикселя. Применяют приемники с размером пикселя 50 мкм и более, обеспечивающие пространственное разрешение менее 10 пар линий на миллиметр, что совершенно недостаточно при современных исследованиях. Вместе с тем повышение пространственного разрешения возможно путем использования специальных методов съемки, например, микрофокусной рентгенографии.

Цель работы — исследование технических объектов контроля методом микрофокусной рентгенографии.

Материалы, методика, оборудование

Рентгенография — способ получения изображения объекта исследования (ОИ) с помощью рентгеновского излучения (РИ). Для этого ОИ

располагают между источником рентгеновского излучения (ИРИ) и ПРИ.

В качестве ИРИ обычно используют рентгеновскую трубку (рис. 1) [1 – 4]. Один из ключевых ее параметров при проведении рентгенографии — фокусное пятно, точнее, характерные размеры участка на поверхности мишени анода трубки, который бомбардируется пучком ускоренных электронов и из которого, соответственно, генерируется РИ.

При прохождении сквозь объект РИ «ослабляется» (частично поглощается веществом объекта, частично рассеивается под разными углами по отношению к первоначальному направлению своего распространения). Степень ослабления зависит от плотности вещества и толщины ОИ, если он однороден, или плотности и размеров деталей его структуры. В результате на выходе из объекта РИ несет информацию о его внутреннем строении. Для визуализации этой информации в настоящее время используют цифровые ПРИ [5 – 7].

В целом рентгеновское изображение — сумма проекций (теней) от деталей строения ОИ, наложенных друг на друга. Другими словами, оно содержит информацию о суммарной плотности вещества по толщине ОИ в каждой условной точке (пикселе) на площади рентгеновской тени (проекции) объекта в плоскости ПРИ. Соответственно, рентгеновское изображение ОИ в рентгенографии характеризуется как плоское (двумерное) или теневое суммационное [8].

Размер пикселя рентгеновского изображения определяется пространственной разрешающей способностью рентгенографической системы, состоящей из ИРИ и ПРИ, а также размерами фокусного пятна ИРИ. Чем выше суммарная пространственная разрешающая способность рентгенографической системы, тем меньше пиксель получаемого рентгеновского изображения и тем более мелкие детали строения ОИ могут быть обнаружены на рентгеновском снимке.

Взаимное расположение ОИ, ИРИ и ПРИ, а также расстояния f_1 (ИРИ – ПРИ) и f_2 (ПРИ – ОИ) определяют рентгенооптическую схему съемки и, соответственно, коэффициент геометрического увеличения изображения m ОИ:

$$m = f_2/f_1.$$

На рис. 2 приведены рентгенооптические схемы съемки в контактной и проекционной рентгенографии (f_1 , f_2 — расстояния ИРИ – ПРИ и ИРИ – ОИ).

Для реализации контактной рентгенографии используют ИРИ с так называемым протяженным фокусным пятном D . Его характерный размер составляет около 1 мм. Только при рас-

положении ОИ в непосредственной близости к ПРИ (в контакте) обеспечивается необходимая резкость получаемого изображения (см. рис. 2, а). Удаление ОИ от ПРИ приводит к нерезкости изображения — «размытию» границ (см. рис. 2, б).

При проекционной рентгенографии применяют ИРИ с так называемым точечным фокусным пятном d , характерный размер которого менее 0,1 мм (как правило, от нескольких микрометров до десятков микрометров). В этом случае требуемая резкость изображения сохраняется практически при любом расположении ОИ в пространстве между ИРИ и ПРИ, что позволяет получать резкое изображение объекта с проекционным увеличением до нескольких сотен и даже тысяч раз.

Контактную и проекционную рентгенографии различают в зависимости от соотношения расстояний f_1 и f_2 и эффективных размеров фокусного пятна (при стандартной (контактной) рентгенографии — $f_2 \geq f_1$, $m = 1 - 1,5$, при проекционной — $f_1 \geq f_2$, $m \approx 10 - 1000$).

Поскольку в проекционной рентгенографии используют ИРИ с характерным размером фокусного пятна менее 0,1 мм, то ее еще определяют как микрофокусную рентгенографию [9].

Проведенные исследования выявили основные особенности (эффекты) процесса формирования рентгеновского изображения при использовании ИРИ с фокусным пятном микронных размеров [10]:

- эффект увеличения глубины резкости;
- эффект «воздушной подушки»;
- эффект псевдообъемного изображения;
- эффект фазового контраста.

Имея разную природу, эти особенности проявляются одновременно и позволяют в микрофокусной рентгенографии значительно снизить экспозиционную дозу РИ при сохранении качества получаемого изображения ОИ по сравнению со стандартной рентгенографией.

Рентгеновская томография — способ получения изображения отдельного слоя ОИ с помощью РИ — позволяет определить (вычислить) плотность вещества в каждой условной точке (вокселе) объема ОИ. Поэтому в результате рентгеновской томографии может быть реконструировано рентгеновское изображение отдельного слоя ОИ определенной толщины в любом произвольном сечении или его трехмерное изображение. В отличие от рентгенографии на изображение конкретного слоя не будут наложены изображения деталей строения ОИ, не принадлежащих этому слою. Соответственно, рентгеновское изображение ОИ в томографии характеризуется как объемное (трехмерное) [11, 12].

В общем случае при рентгеновской томографии рентгеновские снимки ОИ выполняются по-

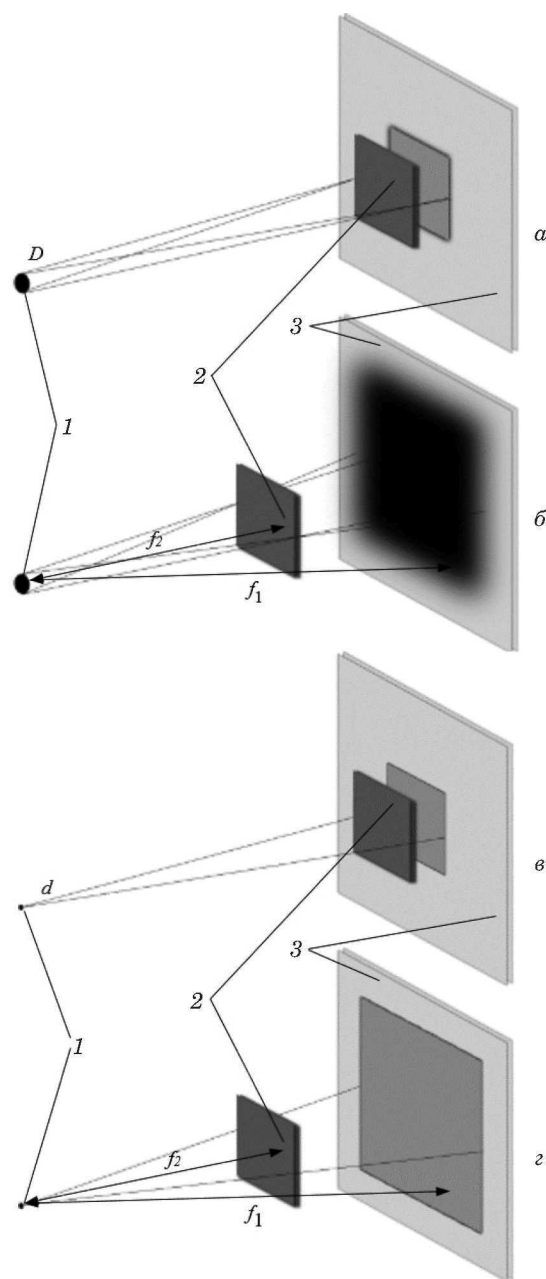


Рис. 2. Рентгенооптические схемы съемки в контактной (а, б) и проекционной (в, г) рентгенографии при близости и удалении ОИ и ПРИ соответственно: 1 — фокусное пятно ИРИ с характерным размером D ; 2 — ОИ; 3 — плоскость ПРИ

Fig. 2. X-ray optical scheme of shooting in contact (a, b) and projection (c, d) radiography at the proximity and distance of RI and PRI, respectively: 1 — focal spot of RES with a characteristic size D ; 2 — OI; 3 — plane PRI

следовательно с разных сторон. Для этого ИРИ и ПРИ одновременно с определенным шагом перемещают по окружности вокруг оси ОИ. Проводится так называемая многоракурсная съемка, дающая ряд отдельных снимков (проекций) объекта. При этом каждая условная точка ОИ многократно (по числу проекций) просвечивается.

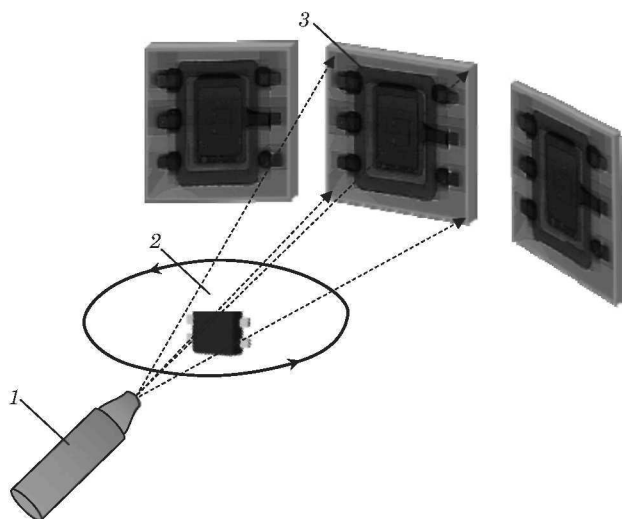


Рис. 3. Рентгенооптическая схема томографической съемки широкорасходящимся пучком РИ: 1 — ИРИ; 2 — ОИ (микросхема); 3 — ПРИ

Fig. 3. X-ray optical scheme of tomographic imaging with a widely divergent X-ray beam: 1 — IRI; 2 — OI (microcircuit); 3 — PRI

На рис. 3 представлена рентгенооптическая схема томографической съемки широкорасходящимся пучком РИ.

Количество выполняемых проекций определяет точность вычисления плотности вещества в каждой точке ОИ и, соответственно, точность последующей реконструкции изображения конкретного слоя в сечении ОИ или трехмерного изображения всего объекта.

Размеры вокселя в томографии (так же, как и пикселя в рентгенографии) в первую очередь определяются разрешающей способностью ПРИ. Однако использование ИРИ с фокусным пятном

микронных размеров дает возможность многократно увеличить пространственную разрешающую способность рентгеновской томографии за счет проекционного увеличения изображения ОИ.

Для реализации методики микрофокусной рентгенографии разработаны ПРДУ и рентгено-томографические установки семейства МРКТ (рис. 4) [13 – 16]. Ни одно из производств современной электронной техники не может обойтись без контроля качества ключевых технологических операций, например, «разварки» внутренних выводов диодов, транзисторов, микросхем и других или паяных соединений печатных плат [17, 18].

Типовая конструкция ПРДУ включает рентгенозащитную камеру (РЗК) для проведения рентгенографических работ, ИРИ моноблочного типа, цифровой ПРИ на основе плоскпанельного детектора РИ, персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением (ПО) и устройство для позиционирования (УП) объекта. Типы рентгеновской трубки и детектора РИ, а также конструкция и количество степеней перемещения УП зависят от форм-фактора ОИ и задач контроля.

Для получения трехмерных рентгеновских изображений изделий электронной техники используют микрофокусные рентгеновские компьютерные томографические установки семейства МРКТ.

Обсуждение результатов

На рис. 5 представлены рентгеновские снимки платы, полученные на ИРИ с характерным размером фокусного пятна 1 и 0,1 мм. Информа-

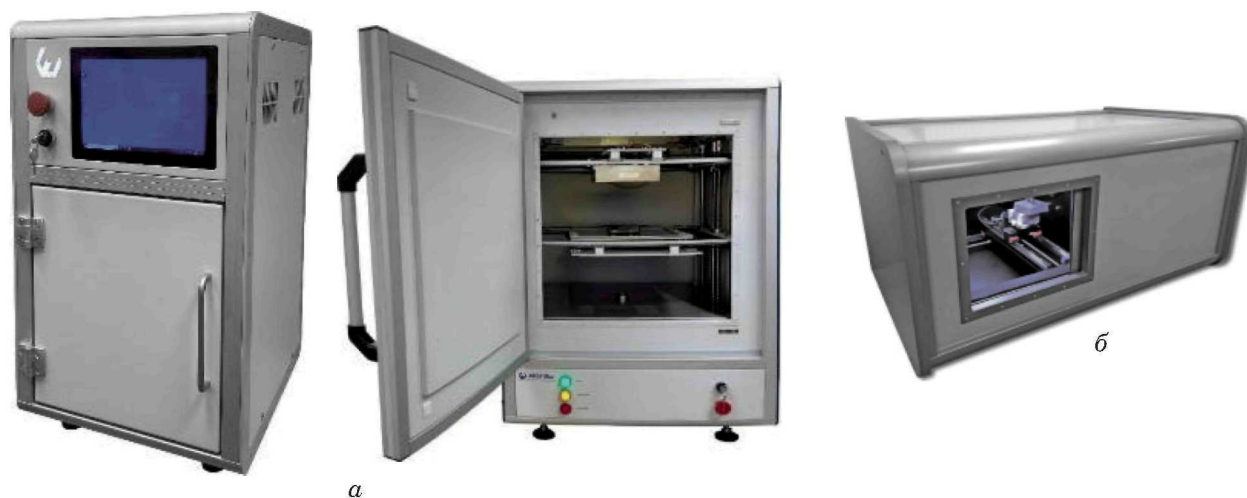


Рис. 4. Рентгенографические установки семейства ПРДУ (а), микрофокусный рентгеновский компьютерный томограф МРКТ-04 (б)

Fig. 4. X-ray units of the PRDU family (a) and microfocus X-ray computed tomograph MRCT-04 (b)

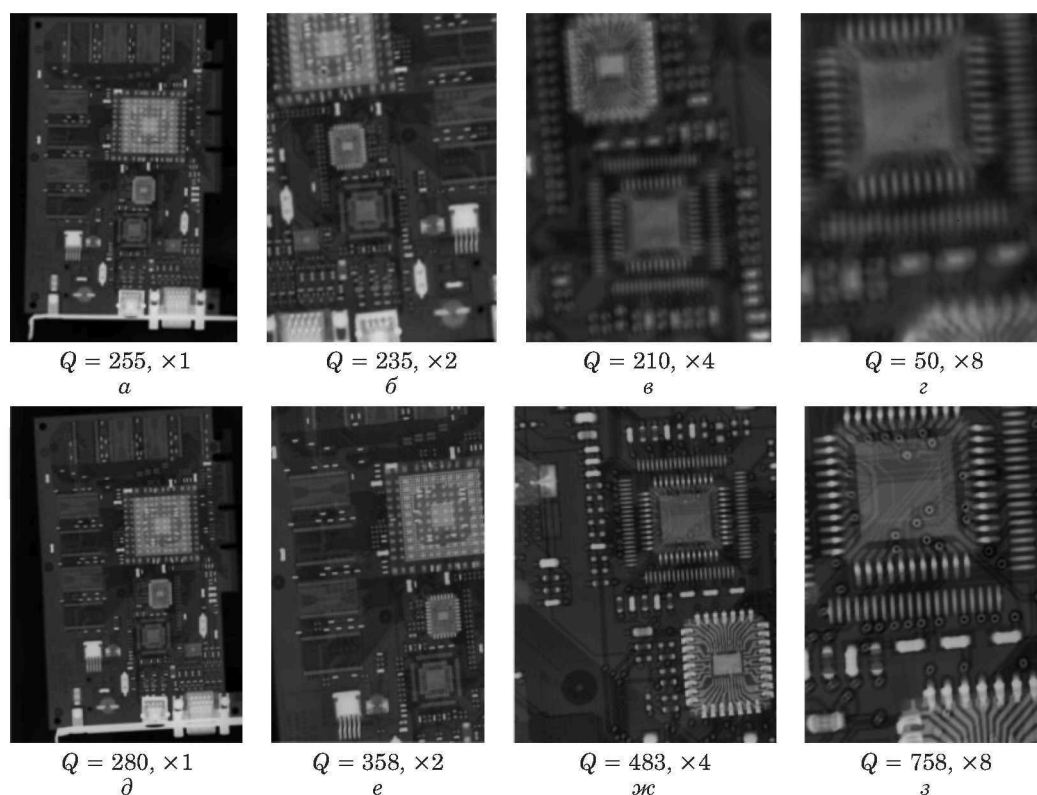


Рис. 5. Рентгеновские снимки тест-объекта, полученные на аппарате с фокусным пятном 1 ($a - z$) и 0,1 мм ($\partial - з$)

Fig. 5. X-ray images of the test object obtained on a device with a focal spot of 1 ($a - d$) and 0.1 mm ($e - h$)

тивность снимков оценивали визуально, а также по величине информационного индекса Q , рассчитанного с помощью специальной компьютерной программы. Под информационным индексом понимается количество элементарных участков, которые можно выделить на снимке при условии, что средняя плотность почернения каждого участка по отношению к примыкающим участкам отличается не менее чем на 5 % [19].

Видно, что с ростом увеличения изображения при микрофокусной рентгенографии (в отличие от стандартной рентгенографии) не только сохраняется резкость изображения, но и прослеживаются детали, не различимые при контактной съемке. Соответственно, индекс информативности меняется от 280 (контактный микрофокусный снимок) до 758 (микрофокусный снимок с 8-кратным увеличением изображения).

МРКТ успешно применяют при входном контроле электронных компонентов и печатных плат, например, паяных соединений, дефектов нанесения паяльной пасты, включая обнаружение пустот, перемычек и др., поиск посторонних элементов. Высокая разрешающая способность получаемого изображения позволяет отчетливо визуализировать металлизацию переходных отверстий на многослойных печатных платах, а

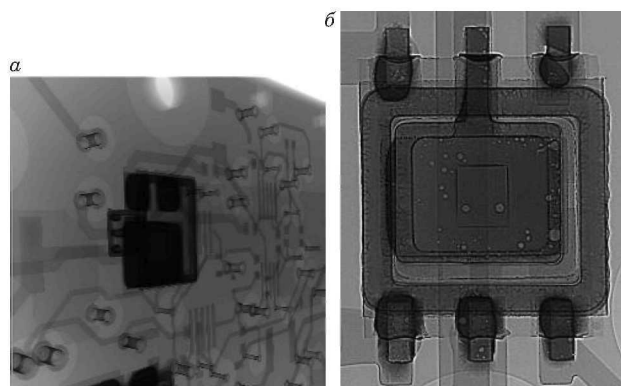


Рис. 6. Рентгеновские изображения фрагментов печатных плат: a — металлизация переходных отверстий; b — пустоты при монтаже микросхем на платах

Fig. 6. X-ray images of fragments of printed circuit boards: a — metallization of vias; b — voids when mounting microcircuits on boards

также пустот во впаянных или клеевых соединениях при монтаже микросхем на платах (рис. 6).

Внутри РЗК, входящей в состав томографа, расположены ИРИ моноблочного типа РАП-150М-0,1-5 с микрофокусной рентгеновской трубкой БС16 (IV), ПРИ на основе твердотельного плоскочастотного двухкоординатного детектора, а также автоматизированное УП для враще-

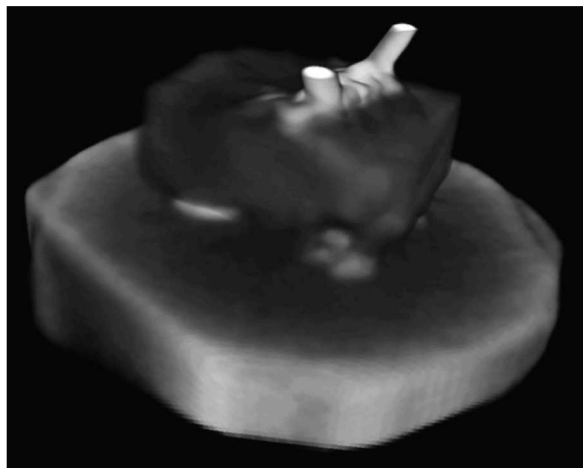


Рис. 7. Трехмерное рентгеновское изображение диода Ганна

Fig. 7. 3D X-ray image of a Gunn diode

ния и перемещения ОИ вдоль оси пучка РИ. Для управления работой основных узлов томографа, сбора и обработки проекционных данных и реконструкции изображения ОИ используют оригинальное ПО [20, 21].

На рис. 7 представлено трехмерное рентгеновское изображение диода Ганна, полученное на томографе МРКТ-04. Послойный анализ изображения позволил зафиксировать отсутствие эклектического соединения на одной из четырех контактных площадок.

Заключение

Проведенные испытания показали, что применение метода микрофокусной рентгенографии при контроле промышленных объектов позволяет в несколько раз повысить информативность результатов исследований. При этом особенности метода дают возможность реализовать его с помощью портативных технических средств, что особенно важно с точки зрения универсальности их использования.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов С. А., Щукин Г. А. Рентгеновские трубки технического назначения. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 200 с.
- Подымский А. А., Потрахов Н. Н. Микрофокусные рентгеновские трубки нового поколения / Контроль. Диагностика. 2017. № 4. С. 4–8. DOI: 10.14489/td.2017.04
- Potrakhov N. N., Bessonov V. B., Obodovsky A. V., et al. 0,2BPM64-200 microfocus X-ray tube for projection radiography / Russ. J. Nondestruct. Testing. 2017. Vol. 53. N 3. P. 227–230. DOI: 10.1134/S106183091703007X
- Буртелов В. А., Кудряшов А. В., Шешин Е. П., Худа Халид Хамид Маджма. Компактные источники рентгеновского излучения / Труды МФТИ. 2019. Т. 11. № 2(42). С. 116–155.
- Мирошниченко С. И. Цифровые приемники рентгеновских изображений. — Киев: Медицина Украины, 2014. — 100 с.

- Kozhevnikov D., Chelkov G., Demichev M., et al. Performance and applications of GaAs: Cr-based Medipix detector in X-ray CT / J. Instr. 2017. Vol. 12. N 1. P. C01005.
- Kim H., Cunningham I., Yin Z., Cho G. On the development of digital radiography detectors: a review / Int. J. Prec. Eng. Manufact. 2008. Vol. 9. P. 86–100.
- Григорьев М. С. Классификация цифровых систем неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники / Труды СПИИРАН. 2014. № 4(35). С. 94–107.
- Потрахов Н. Н. Диагностические возможности микрофокусной рентгенографии / Медицинская техника. 2014. № 5(287). С. 8–12.
- Микрофокусная рентгенография в медицине. — СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. — 91 с.
- Терещенко С. А. Методы вычислительной томографии. — М.: Физматлит, 2004. — 318 с.
- Бессонов В. Б., Потрахов Н. Н., Ободовский А. В. и др. Рентгеновская томография / Фотоника. 2019. Т. 13. № 7. С. 688–693.
- Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю., Жамова К. К. и др. Микрофокусная рентгенография: результаты исследований Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова / Территория NDT. 2016. № 3. С. 54.
- Потрахов Н. Н., Бессонов В. Б., Ободовский А. В. и др. Установки для рентгеновского контроля (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 10. С. 35–42.
- Потрахов Н., Хаютин С., Лифшиц В., Осес Р. Установка ПРДУ «КРОС» для экспрессного определения кристаллографической ориентации кубических монокристаллов по обратным лауэграммам / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 8. С. 27–30.
- Потрахов Е. Н., Потрахов Н. Н., Подымский А. А. и др. Контроль качества кольцевых сварных швов малого диаметра с помощью рентгеновского аппарата РАП-120ПМ / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 6. С. 36–38.
- Альков А., Корбанкова Т., Кулибаба А. и др. Рентгеновский контроль электронной компонентной базы / Электроника: наука, технология, бизнес. 2021. № 6(207). С. 62–65. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.207.6.62.65
- Корж Д. А., Севрюгин П. В. Анализ методов и средств входного контроля печатных плат / Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 5. С. 1139–1142.
- Потрахов Н. Н. Микрофокусная рентгенография в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. — СПб.: Техномедиа, 2007. — 184 с.
- Устинов А. О. Системы рентгеновской инспекции электронных узлов отечественного производства / Наноиндустрия. 2020. № S96-2. С. 515–517. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.515.517
- Бессонов В. Б., Ларионов И. А., Ободовский А. В. Особенности разработки программно-аппаратных комплексов для микрофокусной рентгеновской компьютерной томографии / Физические основы приборостроения. 2019. Т. 8. № 4(34). С. 23–33.

REFERENCES

- Ivanov S. A., Shchukin G. A. X-ray tubes for technical purposes. — Leningrad: Énergoatomizdat, 1989. — 200 p. [in Russian].
- Podymsky A. A., Potrakhov N. N. Microfocus X-ray tubes of a new generation / Kontrol'. Diagn. 2017. N 4. P. 4–8 [in Russian]. DOI: 10.14489/td.2017.04
- Potrakhov N. N., Bessonov V. B., Obodovsky A. V., et al. 0,2BPM64-200 microfocus X-ray tube for projection radiography / Russ. J. Nondestruct. Testing. 2017. Vol. 53. N 3. P. 227–230. DOI: 10.1134/S106183091703007X

4. **Burtelov V. A., Kudryashov A. V., Sheshin E. P., Khuda Khalid Khamid Majma.** Compact sources of X-ray radiation / Tr. MFTI. 2019. Vol. 11. N 2(42). P. 116 – 155 [in Russian].
5. **Miroshnichenko S. I.** Digital receivers of X-ray images: monograph. — Kiev: Meditsina Ukrainy, 2014. — 100 p. [in Russian].
6. **Kozhevnikov D., Chelkov G., Demichev M., et al.** Performance and applications of GaAs: Cr-based Medipix detector in X-ray CT / J. Instr. 2017. Vol. 12. N 1. P. C01005.
7. **Kim H., Cunningham I., Yin Z., Cho G.** On the development of digital radiography detectors: a review / Int. J. Prec. Eng. Manufact. 2008. Vol. 9. P. 86 – 100.
8. **Grigorov M. S.** Classification of digital systems for non-destructive x-ray testing of microelectronic products / Tr. SPIIRAN. 2014. N 4(35). P. 94 – 107 [in Russian].
9. **Potrakhov N. N.** Diagnostic capabilities of microfocus radiography / Med. Tekh. 2014. N 5(287). P. 8 – 12 [in Russian].
10. **Microfocus radiography in medicine.** — St. Petersburg: SPbGÉTU “LÉTI”, 2015. — 91 p. [in Russian].
11. **Tereshchenko S. A.** Methods of computational tomography. — Moscow: Fizmatlit. 2004. — 318 p. [in Russian].
12. **Bessonov V. B., Potrakhov N. N., Obodovsky A. V., et al.** X-ray tomography / Fotonika. 2019. Vol. 13. N 7. P. 688 – 693 [in Russian].
13. **Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Zhamova K. K., et al.** Microfocus radiography: research results of St. Petersburg State Electrotechnical University “LÉTI” / Terr. NDT. 2016. N 3. P. 54 [in Russian].
14. **Potrakhov N. N., Bessonov V. B., Obodovsky A. V., et al.** Installations for X-ray control (review) / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 10. P. 35 – 42 [in Russian].
15. **Potrakhov N. N., Khayutin S. G., Lifshits V. A., Oses R.** “KROS” PRDE device for express determination of the crystallographic orientation of cubic single crystals from inverse Laue patterns / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 8. P. 27 – 30 [in Russian].
16. **Potrakhov E. N., Potrakhov N. N., Podymsky A. A., et al.** Quality control of small-diameter circumferential welds using the RAP-120PM X-ray machine / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 6. P. 36 – 38 [in Russian].
17. **Alykov A., Korbankova T., Kulibaba A., et al.** X-ray control of electronic component base / Élektronika Nauka Tekhnol. Biznes. 2021. N 6(207). P. 62 – 65 [in Russian]. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.207.6.62.65
18. **Korzh D. A., Sevryugin P. V.** Analysis of methods and means of input control of printed circuit boards / Fund. Probl. Radio-élekt. Priborostr. 2018. Vol. 18. N 5. P. 1139 – 1142 [in Russian].
19. **Potrakhov N. N.** Microfocus radiography in dentistry and maxillofacial surgery. — St. Petersburg: Tekhnimedia, 2007. — 184 p. [in Russian].
20. **Ustinov A. O.** Systems of X-ray inspection of electronic components of domestic production / Nanoindustriya. 2020. N S96-2. P. 515 – 517 [in Russian]. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.515.517
21. **Bessonov V. B., Larionov I. A., Obodovsky A. V.** Features of the development of software and hardware systems for microfocus X-ray computed tomography / Fiz. Osnovy Priborostr. 2019. Vol. 8. N 4(34). P. 23 – 33 [in Russian].