

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121>
УДК 621.386.12

А. И. Мазуров¹, Н. Н. Потрахов²

¹Научно-исследовательская производственная компания "Электрон"
Волхонское шоссе, квартал 2, д. 4Б, Санкт-Петербург, 198188, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

О ТЕХНОЛОГИЯХ РЕНТГЕНОВСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Аннотация

Введение. Рентгенографические методы широко распространены в настоящее время при производстве различных изделий и компонентов электронной промышленности, в том числе микро- и нанoeлектроники. Одним из наиболее информативных и наглядных методов является проекционная рентгеновская микроскопия. Разработаны и используются в промышленности специализированные рентгеновские системы для технологического контроля. Ключевым элементом конструкции системы рентгеновского контроля (СРК) является рентгеновская трубка. В подавляющем большинстве случаев СРК построены на основе разборных микрофокусных рентгеновских трубок с постоянной откачкой. Это существенно усложняет конструкцию установки, увеличивает ее габариты, массу и стоимость.

Цель работы. Анализ возможных технических и технологических решений, позволяющих повысить доступность рентгеновской системы для контроля электронных компонентов при сохранении информативности контроля.

Материалы и методы. Представлены результаты аналитических исследований оценки степени влияния основных параметров рентгеновской трубки – размера фокусного пятна и фокусного расстояния – на разрешающую способность получаемых рентгеновских изображений. Описаны достоинства и недостатки двух вариантов конструкции СРК: на основе разборных и отпаянных от вакуумной откачной системы рентгеновских трубок. Проанализированы зависимости размеров фокусного пятна от напряжения на рентгеновской трубке и от мощности, подводимой электронным пучком к мишени рентгеновской трубки. Показано, что отпаянные микрофокусные рентгеновские трубки могут быть с успехом использованы в качестве источника излучения в установках для рентгенографического контроля. Сделан вывод о том, что в большинстве случаев отпаянные трубки более практичны.

Результаты. При решении большинства задач по неразрушающему контролю электронных компонентов в составе рентгеновской системы с успехом могут быть использованы источники рентгеновского излучения на основе отпаянных рентгеновских трубок. Благодаря этому существенно уменьшаются габариты, масса, а также стоимость рентгеновской системы контроля электронных компонентов.

Заключение. Отпаянные рентгеновские трубки могут служить эффективной альтернативой при разработке рентгеновской системы контроля электронных компонентов, позволяющей принципиально повысить доступность такой системы.

Ключевые слова: рентгеновская проекционная микроскопия, отпаянные (закрытые) микрофокусные трубки, разборные (открытые) микрофокусные трубки, микрофокусные рентгеновские системы, разрешающая способность

Для цитирования: Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. О технологиях рентгеновских систем для контроля электронных компонентов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 3. С. 113–121. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта по теме "Создание портативной установки для микрофокусной рентгенографии с целью оперативного контроля микроструктуры, физико-химических свойств и определения остаточного ресурса авиационных деталей и узлов из полимерных композиционных материалов". Номер проекта 15-19-00259.

© Мазуров А. И., Потрахов Н. Н., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.03.2019; принята к публикации 20.05.2019; опубликована онлайн 27.06.2019

Anatoly I. Mazurov¹, Nikolay N. Potrakhov²✉

¹Research and development production company "Electron"
4B, Volkhonskoe shosse, kv. 2, 196605, St. Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

ABOUT TECHNOLOGIES OF X-RAY SYSTEMS FOR CONTROL OF ELECTRONIC COMPONENTS

Annotation

Introduction. X-ray methods are currently widely used in manufacturing of various products and components of the electronics industry, including micro- and nano-electronics. One of the most informative and illustrative methods is projection X-ray microscopy. Specialized X-ray systems for process control are developed and used in industry. The key element in the design of an X-ray inspection system is an X-ray tube. In the overwhelming majority of cases, X-ray inspection systems are based on collapsible microfocus x-ray tubes with constant pumping. This greatly complicates the design of the installation, increases its dimensions, weight and cost.

Objective. Analysis of possible technical and technological solutions that improve the availability of the X-ray system for monitoring of electronic components while maintaining the information content of the control.

Materials and methods. The article presents the results of analytical studies of assessment of the degree of influence of the main parameters of the X-ray tube – the size of the focal spot and the focal length – on the resolution of the resulting X-ray images. The advantages and disadvantages of two variants of the construction of the X-ray inspection systems are described: based on collapsible and based on sealed X-ray tubes. The dependence of the size of the focal spot on the voltage on the X-ray tube and on the power supplied by the electron beam to the target of the X-ray tube is analyzed. It is shown that sealed (from a vacuum pumping system) micro focus X-ray tubes can be successfully used as a radiation source in installations for X-ray inspection. It is concluded that in most cases, sealed tubes are more practical.

Results. In solving of most problems of non-destructive testing of electronic components in the composition of the X-ray system, X-ray sources based on sealed X-ray tubes can be successfully used. Due to this, dimensions, weight, and the cost of an X-ray system for monitoring of electronic components are substantially reduced.

Conclusion. Sealed X-ray tubes are an effective alternative in the development of an X-ray system for monitoring of electronic components, which enables to fundamentally increase the availability of such a system.

Key words: x-ray projection microscopy, sealed (closed) microfocus tubes, collapsible (open) microfocus tubes, microfocus x-ray systems, resolution

For citation: Mazurov A. I., Potrakhov N. N. About Technologies of X-Ray Systems for Control of Electronic Components. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 113–121. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-3-113-121

Acknowledgement. The research was supported by the Russian Science Foundation within the frames of the project "Creation of portable installation for micro focus X-ray diffraction for real time monitoring of the micro-structure, physical, chemical properties and determination of the residual life of aircraft parts and assemblies made from polymer composite materials". Project number 15-19-00259.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 19.03.2019; accepted 20.05.2019; published online 27.06.2019

Введение. Постоянное уменьшение размеров компонентов (от микро- до нано-) и устройств электронной промышленности сделало актуальной неразрушающую технологию выявления возможных дефектов. Это вызвало разработку специализированных проекционных рентгеновских микроскопов с микро- и нанофокусными источниками рентгеновского излучения.

Ключевым узлом конструкции системы рентгеновского контроля (СРК), определяющим ее технологию и область применения, является микрофокусная рентгеновская трубка. Применяются микрофокусные трубки двух типов: разборные с постоянным поддержанием вакуума с помощью насосов (далее – открытые рентгеновские трубки) и отпаянные от откачного поста для поддержания вакуума (закрытые рентгеновские трубки).

В последние годы круг задач, решаемых в электронной промышленности с помощью СРК, существенно расширился. Особенно интенсивно развиваются СРК для контроля возможных дефектов в различных компонентах микроэлектроники, а также качества монтажа печатных плат, осуществляемого по новым технологиям [1].

СРК с открытыми и закрытыми рентгеновскими трубками имеют существенно различные функциональные возможности, потребительские свойства и стоимость. Поэтому не только теоретический, но и практический интерес представляет сравнительный анализ этих систем, что в совокупности поможет обоснованно подойти к их выбору для конкретной области контроля изделий электронной промышленности.

Целью настоящей статьи является анализ возможных технических и технологических решений, позволяющих повысить доступность рентгеновской системы для контроля электронных компонентов при сохранении информативности контроля.

Материалы и методы. Функциональная схема СРК показана на рис. 1. Здесь L – расстояние от рентгеновского излучателя до приемника изображения, l – расстояние от рентгеновского излучателя до объекта.

Рентгеновский излучатель системы содержит открытую или закрытую микрофокусную рентгеновскую трубку, рентгеновское питающее устройство и откачной пост для поддержания вакуума (только для открытых трубок).

Устройство позиционирования объекта позволяет установить контролируемый объект в нужной позиции относительно рентгеновского излучателя и детектора изображения. Оно содержит автоматизированные механизмы, позволяю-

щие перемещать рентгеновский излучатель, приемник изображения и объект по заданной траектории в необходимых пределах. Выбором расстояний l между излучателем и объектом, а также L между излучателем и приемником изображения обеспечивается необходимый коэффициент увеличения изображения объекта.

Функция приемника заключается в преобразовании теневого рентгеновского изображения объекта в цифровое изображение, которое сохраняется в памяти компьютера. Это изображение подвергается цифровой обработке с помощью специализированного программного обеспечения и воспроизводится на мониторе компьютера. Система управляется также от компьютера.

Излучатель, объект, устройство позиционирования образца и приемник располагаются в специальной камере с освинцованными стенками (рентгенозащитной камере), которая не позволяет рентгеновскому излучению выйти за ее пределы.

На рис. 2 представлен внешний вид одного из вариантов конструктивного исполнения СРК электронных компонентов.

Как правило, СРК работают в режиме рентгенографии и рентгеноскопии, опционно предусматривается режим компьютерной томографии. В основе СРК любого производителя лежит микрофокусная рентгеновская трубка, определяющая допустимое увеличение изображения объекта и его качество.

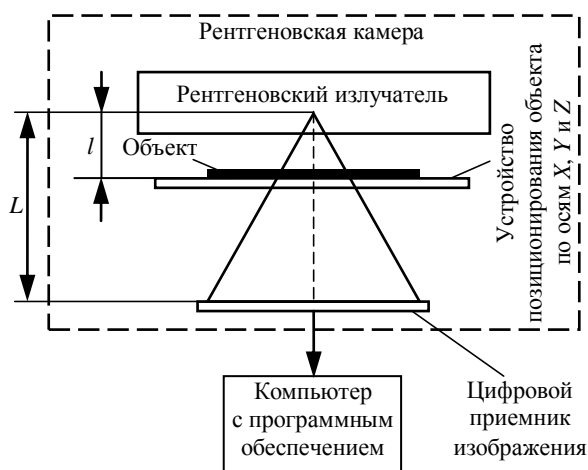


Рис. 1. Функциональная схема СРК

Fig. 1. Functional diagram of X-ray verification systems



Рис. 2. Внешний вид одного из вариантов конструктивного исполнения СРК электронных компонентов

Fig. 2. The appearance of one of the design options for X-ray verification electronic components system

В зарубежных рентгеновских системах применяются рентгеновские трубки трех разновидностей: открытые с прострельным анодом и закрытые двух модификаций с массивным и прострельным анодами. На рис. 3 представлены схемы рентгеновских трубок.

В России подобные рентгеновские системы серийно не выпускаются, хотя рентгеновские трубки, позволяющие разрабатывать обсуждаемые конструкции, разработаны. На рис. 4 представлен внешний вид отпаянной микрофокусной рентгеновской трубки БС-16 (III) семейства БС [2] (а) и ее конструкция (б). Трубка рассчитана на напряжение 150 кВ, имеет полый вынесенный анод и мишень прострельного типа, расположенную на торце длинной анодной трубы.

Главные параметры трубок для СРК – это размер фокусного пятна f , минимальное фокусное расстояние l или расстояние, на котором объект может быть расположен от фокусного пятна

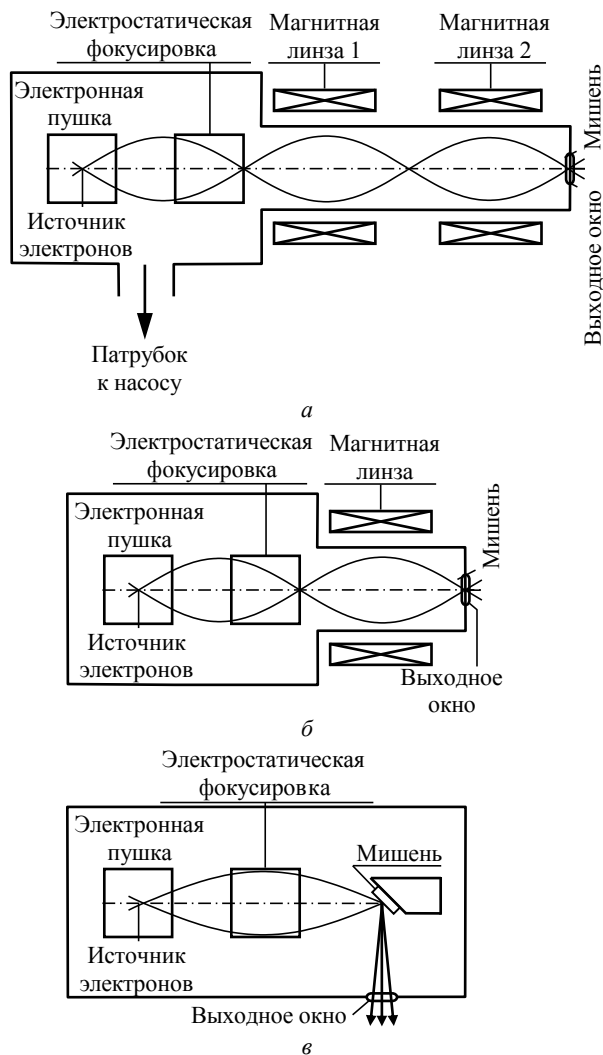


Рис. 3. Схемы рентгеновских трубок
 Fig. 3. X-ray tube designs: а – spouted tube with pass anode, б – closed tube with pass anode, в – closed tube with massive anode

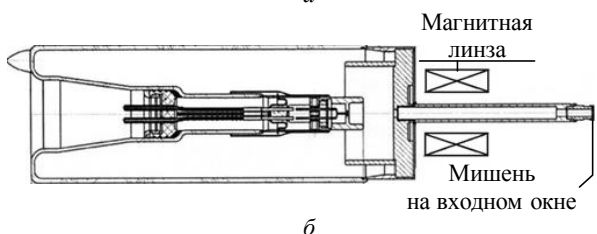
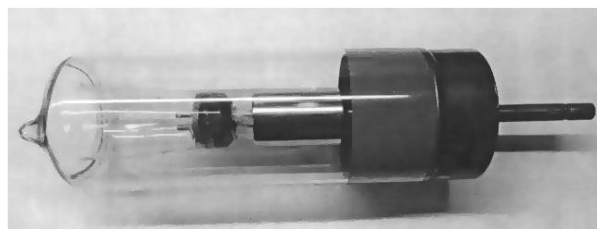


Рис. 4. Рентгеновская трубка БС-16 (III)
 Fig. 4. X-ray tube БС-16 (III): а – appearance, б – design

трубки, а также мощность, выделяемая на аноде, при которой обеспечиваются необходимая интенсивность излучения и заданный срок службы мишени анода.

Размер фокусного пятна. Размер фокусного пятна f при заданной разрешающей способности детектора R_d определяет максимальное проекционное увеличение объекта [3]

$$m_{\max} = \frac{(fR_d)^2 + 1}{(fR_d)^2}. \quad (1)$$

Превышать m_{\max} нецелесообразно, так как увеличение изображения приведет только к увеличению его общего размера, но разрешающая способность получаемого изображения будет уменьшаться.

При увеличении m_{\max} суммарная разрешающая способность системы R_{Σ} [3] составит

$$R_{\Sigma} = \sqrt{R_d^2 + 1/f^2}.$$

Для известных рентгеновских систем $f < 10$ мкм, $R_d < 10$ мм⁻¹, тогда $R_{\Sigma} \cong 1/f$.

В соответствии с формулой Найквиста, для визуализации в объекте дефектов с линейным размером a , разрешающая способность детектора изображения должна быть равна $R_{\Sigma} = 1/(2a)$. Следовательно, минимальный размер обнаруживаемого дефекта a в образце не может быть менее половины размера фокусного пятна ($a \geq f/2$).

Полученный результат говорит о том, что по мере уменьшения компонентов электронной техники (а также их возможных дефектов) появится потребность не только в микрофокусных, но и в

нанофокусных рентгеновских трубках. Поэтому вопрос минимизации размера фокусного пятна – первостепенный для СРК контроля изделий электронной техники.

Однако предел возможности разрешения мелких структур определяет не минимальный размер фокусного пятна трубки, а дифракция рентгеновского излучения при его прохождении через неоднородный объект [4]. Эффект дифракции ограничивает минимальный размер обнаруживаемого дефекта значением

$$a = \sqrt{l\lambda}, \quad (2)$$

где $\lambda = k/U$ – эффективная длина волны в спектре излучения, генерируемого рентгеновской трубкой, причем k – коэффициент пропорциональности; U – напряжение на рентгеновской трубке.

Поскольку фокусное расстояние l имеет конструктивные пределы, в соответствии с (2) обнаруживать наноразмерные дефекты в объекте можно только при достаточно низких напряжениях на рентгеновской трубке. Следовательно, нанофокусные рентгеновские системы более подходят для лабораторных исследований объектов малых размеров и низкой плотности, чем для исследований объектов промышленной электроники.

Во-первых, размер фокусного пятна рентгеновской трубки зависит от диаметра электронного пучка d на мишени, ускоряющего электронный пучок анодного напряжения U и от мощности, подводимой к мишени анодного узла электронным пучком.

В открытых трубках (см. рис. 3, а) необходимый диаметр электронного пучка на мишени анодного узла достигается с помощью достаточно сложной электронно-оптической системы (ЭОС), состоящей из электронной пушки, электростатической фокусирующей системы и одной или нескольких магнитных линз. Такая ЭОС позволяет сформировать электронный пучок на мишени диаметром 1 мкм и менее с незначительными aberrациями. В закрытых трубках с вынесенным анодом (рис. 3, б) используется обычно одна магнитная линза, надеваемая на анодную трубу (см. рис. 4). С точки зрения достижения минимального диаметра электронного пучка на мишени фокусировка закрытых трубок несколько уступает фокусировке открытых трубок.

Независимо от диаметра электронного пучка d область возбуждения (генерирования) рентгенов-

ского излучения на мишени (эффективный диаметр фокусного пятна $f_{эф}$) существенно больше из-за диффузного рассеивания электронов в мишени за пределы электронного пучка [5]. На рис. 5 представлены траектории ускоренных электронов в мишени в результате диффузного рассеивания.

Область возбуждения рентгеновского излучения является функцией напряжения на трубке и она тем больше, чем выше это напряжение. Для контроля компонентов электроники используют напряжение 20...160 кВ. На рис. 6 представлены зависимости диапазона рассеивания R (пробега ускоренных электронов в вольфрамовой мишени) и эффективного диаметра фокусного пятна $f_{эф}$ от энергии электронного пучка E .

Во-вторых, интенсивность рентгеновского излучения определяется как

$$I = kiU_a^2 = KPU_a = KP_0S_fU_a,$$

где K – коэффициент пропорциональности; i – ток трубки; U_a – анодное напряжение; P – мощность на аноде; S_f – площадь фокусного пятна.

Анодный узел, содержащий вольфрамовую мишень прострельного типа, нанесенную на бериллиевую подложку, в условиях естественного (конвективного) теплового обмена с окружающей средой длительно выдерживает удельную мощность $P_0 \leq 1$ Вт/мкм². Превышение этой тепловой нагрузки приводит к эрозии мишени (подплавлению, отслаиванию, растрескиванию, распылению и т. д.), что резко сокращает срок ее службы.

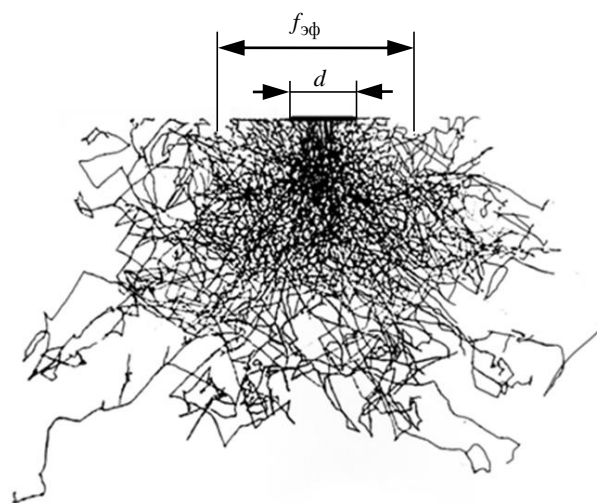


Рис. 5. Траектории ускоренных электронов в мишени в результате диффузного рассеивания
Fig. 5. The trajectories of the target electrons accelerated due to diffuse scattering

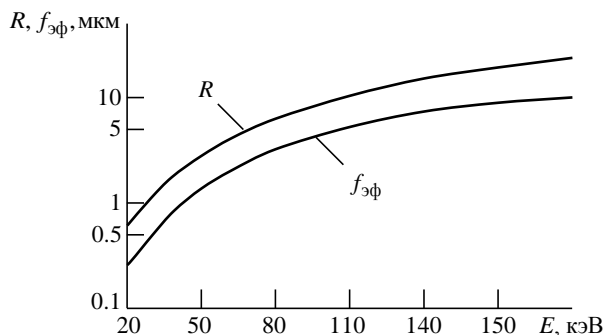


Рис. 6. Зависимость диапазона рассеивания и эффективного диаметра фокусного пятна от энергии электронного пучка

Fig. 6. The dependence of the dispersion range and the effective diameter of the focal spot on the electron beam energy

Поскольку мощность, подводимая к мишени, также определяет размер фокусного пятна, для обеспечения необходимой интенсивности излучения и мощности трубки приходится увеличивать размеры фокусного пятна.

Таким образом, фокусное пятно рентгеновской трубки не может иметь одного строго фиксированного размера. Его размер следует определять экспериментально при типичных режимах работы рентгеновской системы и указывать эти режимы в соответствующей документации.

Фокусное расстояние пятно–объект. По соотношению (1) определяется проекционное увеличение изображения объекта, при котором обеспечивается максимально возможная разрешающая способность рентгеновской системы для фиксированных f и R_d . В существующих рентгеновских системах проекционное увеличение m определяется ее конструкцией и равно отношению расстояния между фокусным пятном трубки и приемником L к расстоянию между фокусным пятном трубки и объектом l : $m = L/l$.

Чтобы приблизиться к теоретическому пределу коэффициента увеличения m_{\max} , расстояние l необходимо минимизировать. От значения l зависит также размер L , который во многом определяет конструкцию устройства позиционирования объекта. В настоящее время для трубок с прострельной мишенью l составляет 0.2...1 мм. Для объекта толщиной Z увеличение его изображения по толщине образца изменяется от минимального $m_{\min} = L/l + Z$ до максимального $m_{\max} = L/l$. Следует отметить, что для объекта толщиной $Z=l$ увеличение $m_{\min} = m_{\max}/2$, в результате чего на его изображении возникает эффект псевдообъема [6].

Анализ технологий. Каждая из двух рассмотренных технологий построения СРК имеет свои преимущества и недостатки.

За счет более совершенной фокусирующей системы и возможностей выбора конструкции анода рентгеновские системы на открытых трубках позволяют для тонких образцов обнаруживать дефекты менее 1 мкм. При этом возможность неоднократной замены катода и мишени анода позволяет эксплуатировать трубку на предельных нагрузках: эмиссионной – на катод и тепловой – на мишень.

Однако СРК на открытых трубках обладают по сравнению с рентгеновскими системами на закрытых трубках целым рядом существенных недостатков:

- большими габаритами, массой и сложностью конструкции, связанными с использованием металлокерамического изолятора, рассчитанного на полное рабочее напряжение трубки, а также вакуумноплотных механических разборных соединений металлического баллона трубки со сменными узлами (катодом и анодом);

- наличием в составе трубки неотъемлемого конструктивного элемента – специализированного откачного поста;

- необходимостью высоковольтной тренировки трубки после замены отдельных узлов, накладывающей дополнительные требования на генераторное устройство источника питания, и последующей юстировки электронно-оптической системы;

- возможным увеличением размеров фокусного пятна вследствие механических вибраций откачного поста;

- высокой стоимостью.

Отмеченные недостатки отсутствуют у СРК на основе закрытых (отпаянных) трубок. При этом последние существенно превосходят системы на основе открытых трубок по целому ряду других потребительских свойств.

Например, замена отпаянной трубки в случае выхода ее из строя технологически проще по сравнению с заменой узлов в разборной трубке, поскольку:

- нет необходимости в проведении юстировки электронно-оптической системы и высоковольтной тренировки трубки;

- замена трубки занимает меньше времени, чем смена анода или катода в разборной трубке;

- потребляемая мощность рентгеновской системы на основе закрытой трубки существенно ниже.

Особенно эффективны трубки с вынесенной на анодную трубу мишенью. Они устойчивы в

работе и долговечны, так как негативное влияние на их электрическую прочность рассеянных на мишени электронов устранено отсутствием в анодной трубе электрического поля.

За рубежом СРК для электронной промышленности выпускает целый ряд фирм (с открытыми [7]–[11], с закрытыми [8]–[10] трубками).

Анализ показывает, что системы на закрытых трубках с массивным анодом позволяют обнаруживать дефекты размером до 5 мкм. Они обеспечивают минимальное фокусное расстояние около 10 мм и эффективны при увеличении изображения образца до 100 крат.

Системы на закрытых трубках с прострельным анодом позволяют обнаруживать дефекты до 2.5 мкм. За счет меньшего расстояния "фокусное пятно – объект" (около 1 мм) они эффективны при увеличении изображения объекта до 1000 крат.

Системы на открытых трубках с прострельным анодом позволяют обнаруживать дефекты менее 1 мкм и эффективны при увеличении изображения более 1000 крат.

Как уже отмечалось, в России отсутствует выпуск СРК для электронной промышленности, но элементная база для их производства на основе закрытых трубок с вынесенным анодом имеется. Освоены в серийном производстве микрофокусные рентгеновские трубки серии БС с фокусным пятном до 5 мкм [12] и доступны плоскопанельные детекторы с разрешающей способностью $R_n = 3.5 \dots 10 \text{ мм}^{-1}$ с соответствующим программным обеспечением. Сказанное подтверждают результаты разработки одного из первых отечественных образцов микрофокусного рентгеновского компьютерного томографа МРКТ – 01 [13].

Заключение. В электронной промышленности востребованы СРК, построенные по обеим рассмотренным технологиям. Для контроля относительно крупных и плотных объектов, где достаточно обнаруживать дефекты размером от 5 мкм и более, эффективны системы на закрытых трубках с массивными анодами.

Для обнаружения дефектов размером до 2.5 мкм следует выбирать системы на основе закрытых трубок с мишенью прострельного типа.

Наиболее совершенны системы на основе открытых трубок с мишенью прострельного типа, позволяющие обнаруживать дефекты менее 1 мкм. Однако чем выше разрешение системы, тем ниже такие потребительские свойства, как цена, габариты, масса, а также просвечивающая возможность из-за снижения максимального значения напряжения на рентгеновской трубке.

При разработке СРК перспективны мультифокусные открытые рентгеновские трубки. Они имеют режимы разной мощности для контроля плотных объектов или объектов средней плотности, а также режим разрешения для контроля наноструктур. Режимы переключаются в процессе контроля изделий.

Однако следует отметить, что во многих случаях более практична закрытая трубка с полым вынесенным анодом, размер фокусного пятна которой может регулироваться с помощью магнитной или электромагнитной линзы.

Полученные выводы позволяют обоснованно подойти к решению вопросов конструирования СРК, а также предложить области их применения в зависимости от размеров фокусного пятна и типа рентгеновской трубки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пирогова Е. В. Проектирование и технология печатных плат. М.: Форум Интра-М, 2005. 560 с.
2. Подымский А. А., Потрахов Н. Н. Микрофокусные рентгеновские трубки нового поколения // Контроль. Диагностика. 2017. № 4. С. 4–8.
3. Мазуров А. И., Потрахов Н. Н. Возможности и ограничения микрофокусной рентгенографии в медицине // Биотехносфера. 2010. № 4. С. 20–23.
4. Быстров Ю. А., Иванов С. А. Ускорительная техника и рентгеновские приборы. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.
5. Практическая растровая электронная микроскопия / под ред. Дж. Гоулдстейна, Х. Яковица. М.: Мир, 1978. 656 с.
6. Потрахов Н. Н., Грязнов А. Ю., Потрахов Е. Н. Эффект псевдообъемного изображения в микрофокусной рентгенографии // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2009. № 2. С. 18–24.
7. Гнутов А. Установки рентгеновского контроля YXLON – видеть, а не смотреть // Производство электроники. 2013. № 5. С. 1–4.
8. Bernard D. X-ray tube selection criteria for BGA / CSP X-ray inspection // Proc. of SMTA Int. Conf., Chicago, Sept. 2002. Eden Prairie, MN, USA: SMTA, 2002.
9. Шмаков М. Выбор системы рентгеновского контроля. Взгляд технолога // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 4. С. 60–68.

10. Шмаков М. Выбор системы рентгеновского контроля. Взгляд технолога // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 5. С. 33–40.

11. Гаранин А. Критерии выбора установки рентгеновского контроля: необходимо и достаточно // Печатный монтаж. 2012. № 5. С. 170–177.

12. Подымский А. А. Мощные рентгеновские трубки для проекционной рентгенографии: дис. ... канд. техн. наук / ЛЭТИ. СПб., 2016. 157 с.

13. Микрофокусная компьютерная томография – новый метод исследования микроминиатюрных объектов / В. Б. Бессонов, А. В. Ободовский, В. В. Клонов, Д. К. Кострин // Евразийский союз ученых. 2014. Т. 3. С. 12–15.

14. Кокорева И., Щелкунов Г. Рентгеновские методы неразрушающего контроля // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. 2017. № 5. С. 84–93.

Мазуров Анатолий Иванович – кандидат технических наук (1972), заместитель генерального директора по научной работе НИПК "Электрон" (Санкт-Петербург). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – рентгенотелевидение; цифровая рентгенотехника.

E-mail: mazurov@electronxray.com

Потрахов Николай Николаевич – доктор технических наук (2009), заведующий кафедрой электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – разработка технических средств рентгенографии и методик их применения.

<https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

E-mail: nn@eltech-med.com

15. Баканов Г. Ф., Соколов С. С., Суходольский В. Ю. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / под ред. И. Г. Мироненко. М.: Academia, 2007. 163 с.

16. Study of the Microfocus X-Ray Tube Based on a Point-Like Target Used for Micro-Computed Tomography / R. Zhou, X. Zhou, X. Li, Y. Cai, F. Liu // PLoS One. 2016 Jun 1; 11(6): eCollection 2016. PMID: 27249559. P. 1–12. doi: 10.1371/journal.pone.0156224

17. Lei Zheng, Huarong Liu, Junting Wang. Transmission-type window of HFCVD diamond film for microfocus X-ray tube // 4th Intern. Conf. on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering. Conference Paper. January 2016. P. 641–644. doi: 10.2991/mmme16.2016.212

REFERENCES

1. Pirogova E. V. *Proektirovanie i tekhnologiya печатных плат* [PCB Design and Technology]. Moscow, Forum Intra-M, 2005, 560 p. (In Russ.)

2. Podymskii A. A., Potrakhov N. N. New Generation Microfocus X-ray Tubes. Testing. Diagnostics. 2017, no. 4, pp. 4–8. (In Russ.)

3. Mazurov A. I., Potrakhov N. N. Possibilities and Limitations of Microfocus X-ray in Medicine. *Bio-tekhnosfera*, 2010, no. 4, pp. 20–23. (In Russ.)

4. Bystrov Yu. A., Ivanov S. A. *Uskoritel'naya tekhnika i rentgenovskie pribory* [Accelerator and X-ray Equipment]. Moscow, Vyssh. shk., 1983, 288 p. (In Russ.)

5. *Prakticheskaya rastrovaya elektronnyaya mikroskopiya* [Practical Scanning Electron Microscopy], ed. by Dzh. Gouldsteina, Yakovitsa. Moscow, Mir, 1978, 656 p. (In Russ.)

6. Potrakhov N. N., Gryaznov A. Yu., Potrakhov E. N. The Effect of a Pseudo-Volumetric Image in Microfocus Radiography. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2009, no. 2, pp. 18–24. (In Russ.)

7. Gnutov A. YXLON X-ray Installations – See, Not Watch. *Proizvodstvo Elektroniki* [Electronics Manufacturing]. 2013, no. 5, pp. 1–4. (In Russ.)

8. Bernard D. X-ray tube selection criteria for BGA / CSP X-ray inspection. Proc. of SMTA Int. Conf., Chicago, September 2002. Eden Prairie, MN, USA, SMTA, 2002.

9. Shmakov M. The Choice of X-ray Control System. Technologist's View. *Technologies in the Electronics Industry*. 2006, no. 4, pp. 60–68. (In Russ.)

10. Shmakov M. The Choice of X-ray Control System. Tech-Nologue View. *Technologies in Electronic Industry*. 2006, no. 5, pp. 33–40. (In Russ.)

11. Garanin A. Criteria for Choosing an X-Ray Control Unit: Necessary and Sufficient. *Printed Circuits Assembly*. 2012, no. 5, pp. 170–177. (In Russ.)

12. Podymskii A. A. Powerful X-Ray Tubes for X-Ray Projection: diss. ... Cand. of sci. LETI, SPb., 2016, 157 p. (In Russ.)

13. Bessonov V. B., Obodovskii A. V., Klonov V. V., Kostrin D. K. Microfocus Computed Tomography – A New Method of Microminiature Objects Research. *Eurasian Union of Scientists*. 2014, Vol. 3, pp. 12–15. (In Russ.)

14. Kokoreva I., Shchelkunov G. X-Ray Methods of Non-Destructive Testing. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2017, no. 5, pp. 84–93. (In Russ.)

15. Bakanov G. F., Sokolov S. S., Sukhodol'skii V. Yu. *Osnovy konstruirovaniya i tekhnologii radioelektronnykh sredstv* [Fundamentals of Design and Technology of Radio Electronic Means], ed by I. G. Mironenko. Moscow, Academia, 2007, 163 p. (In Russ.)

16. Zhou R., Zhou X., Li X., Cai Y., Liu F. Study of the Microfocus X-Ray Tube Based on a Point-Like Target Used for Micro-Computed Tomography. *PLoS One*. 2016 Jun. 1; 11(6) eCollection 2016. PMID: 27249559. P. 1–12. doi: 10.1371/journal.pone.0156224

17. Lei Zheng, Huarong Liu, Junting Wang. Transmission-type Window of HFCVD Diamond Film for Microfocus X-ray Tube. 4th Int. Conf. on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering. Conference Paper. January 2016, pp. 641–644. doi: 10.2991/mmme16.2016.212

Anatoly I. Mazurov – Cand. of Sci. (Engineering) (1972), Deputy Director of Research and Development Production Company "Electron" (Saint Petersburg). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: X-ray television; digital X-ray equipment.

E-mail: mazurov@electronxray.com

Nikolay N. Potrakhov – Dr. of Sci. (Engineering) (2009), Head of the Department of Electronic Devices and Equipment of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: development of technical means of radiography and methods of their application.

E-mail: nn@eltech-med.com

КНИЖНЫЕ НОВИНКИ



УДК 533.9:621.387

ББК В333

Г13

Авторы: Киселев А. С., Кострин Д. К., Лисенков А. А.,
Марцынюков С. А., Смирнов Е. А., Черниговский В. В.

Газоразрядная плазма: физика и применение

под общ. ред. проф. А. А. Лисенкова

СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2018. 243 с.

ISBN 978-5-7629-2387-3

Приведены основные сведения и представлены основные физические процессы, протекающие в газоразрядной плазме. В основу издания положены материалы лекционных курсов по дисциплинам "Вакуумная и плазменная электроника", "Прикладная физика плазмы", "Квантовые и оптоэлектронные приборы и устройства", читаемых студентам бакалавриата и магистрантам, обучающимся по направлению 210100 "Электроника и нанoeлектроника", по программе 210153.68 "Электронные приборы и устройства". Данные материалы необходимы для изучения процессов и характеристик газового разряда, а также приборов и технологических устройств, изготовленных на его основе.

Издание предназначено для подготовки дипломированных специалистов и магистров физико-технических факультетов вузов, аспирантов и научных работников, специализирующихся в области низкотемпературной плазмы и ионно-плазменной технологии.