

# Отечественные рентгеновские установки для неразрушающего контроля семейства ПРДУ

Н. Н. Потрахов, В. Б. Бессонов, К. К. Гук, А. С. Дмитриев, А. А. Подымский  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
nn@eltech-med.com

**Аннотация.** Благодаря высокой информативности, а также наглядности, оперативности проведения и неразрушающему характеру, рентгенографические методы имеют неоспоримое преимущество перед всеми известными методами контроля различных материалов и промышленных изделий. Использование результатов отечественных исследований в области микрофокусной рентгенографии позволяет принципиально снизить габариты, вес и энергопотребление используемых источников рентгеновского излучения. В ходе исследований разработаны многофункциональные рентгенографические и рентгеномографические установки нового класса – в передвижном исполнении семейства ПРДУ, которые реализуют методику микрофокусной рентгенографии в различных приложениях.

В статье описаны результаты разработки и применения отечественных технических средств для рентгеновского контроля электронных компонентов и печатных плат, а также монокристаллических изделий в неспециализированных условиях.

Высокие диагностические возможности, малые габариты, вес и стоимость позволяют рассматривать их в качестве массового «настольного» рентгенографического инструмента.

**Ключевые слова:** микрофокусная рентгенография, рентгеновский контроль и диагностика, передвижные рентгенографические и рентгеномографические установки

## I. ВВЕДЕНИЕ

Основными преимуществами рентгеновских методов контроля, в первую очередь, рентгенографических являются высокие наглядность и информативность получаемых результатов, оперативность, а также относительная простота их реализации. При этом все известные рентгеновские методы являются неразрушающими, то есть позволяют оценить внутреннее строение объекта контроля, не нарушая его целостности.

Последние достижения в области технологии аппаратных средств рентгенографии, в частности, разработка цифровых приемников рентгеновского изображения, открыли новое направление рентгеноприборостроения – многофункциональные установки для рентгеновского контроля и диагностики в передвижном исполнении.

Разработки передвижных (портативных) рентгенодиагностических установок (ПРДУ) были

начаты в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» несколько лет назад. Основанием для них послужили результаты продолжительных исследований сотрудников кафедры Электронных приборов и устройств университета в области микрофокусной рентгенографии, которая в настоящее время является международно признанным российским приоритетом [1].

Малые габариты, вес и энергопотребление при высоком качестве получаемых рентгеновских изображений позволяют проводить с помощью ПРДУ контроль самых разнообразных изделий непосредственно на месте их производства: в цехе, на монтажном участке или поточной линии сборки, научной или учебной лаборатории и т. д.

## II. ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕНТГЕНОГРАФИИ

1. Рентгенография (от греч. *grapfo* – писать, изображать) – способ получения изображения объекта исследования (ОИ) с помощью рентгеновского излучения (РИ). Для этого ОИ располагается между источником рентгеновского излучения (ИРИ) и приемником рентгеновского изображения (ПРИ).

Первым из предложенных и наиболее распространенным в настоящее время является контактный способ рентгеновской съемки – контактная или стандартная рентгенография. Рентгенооптическая схема съемки в контактной рентгенографии представлена на рис. 1а.

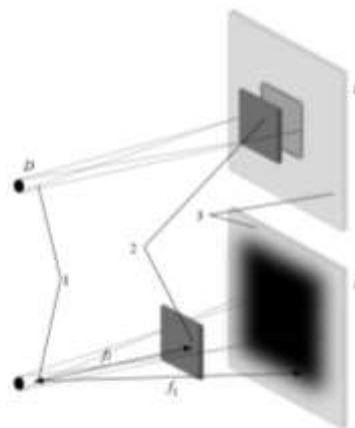


Рис. 1. Рентгенооптическая схема съемки в контактной рентгенографии:  $f_1$  – фокусное расстояние (ИРИ-ПРИ);  $f_2$  – расстояние ИРИ-ОИ; 1 – фокусное пятно ИРИ с характерным размером  $D$ ; 2 – ОИ; 3 – плоскость ПРИ

Для ее реализации используется ИРИ с так называемым протяженным фокусным пятном  $D$ . Его характерный размер составляет около 1 мм. Только при расположении ОИ в непосредственной близости к ПРИ – в контакте (рис. 1а), обеспечивается необходимая резкость получаемого изображения. Отсюда следует определение «контактная рентгенография». Удаление ОИ от ПРИ приводит к появлению нерезкости изображения – «размытию» его границ (рис. 1б).

В середине прошлого века был предложен проекционный способ рентгеновской съемки – проекционная рентгенография. Рентгенооптическая схема съемки в проекционной рентгенографии представлена на рис. 2.

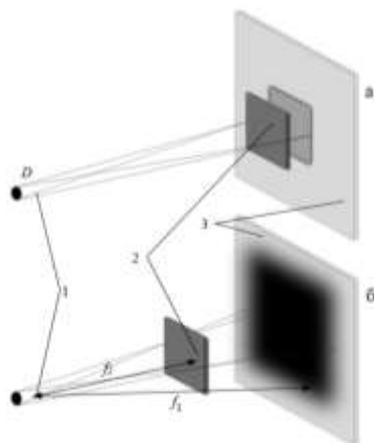


Рис. 2. Рентгенооптическая схема съемки в проекционной рентгенографии

Для ее реализации используются ИРИ с так называемым точечным фокусным пятном  $d$ . Его характерный размер составляет менее 0,1 мм от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров. В этом случае, как показано на рис. 2, требуемая резкость изображения сохраняется практически при любом расположении ОИ в пространстве между ИРИ и ПРИ, что позволяет получать резкое изображение объекта с проекционным увеличением  $m$  от нескольких раз до нескольких сот и даже тысяч раз.

Контактную и проекционную рентгенографии различают в зависимости от соотношения расстояний  $f_1$  и  $f_2$  и, соответственно, от коэффициента увеличения изображения объекта. Условно, при стандартной рентгенографии  $m=1-1,5$ ; при проекционной рентгенографии,  $m=10-1000$ .

Поскольку в проекционной рентгенографии, как уже отмечалось, используется ИРИ с характерным размером фокусного пятна менее 0,1 мм (100 мкм), то для ее определения в настоящее время используется термин – «микрофокусная рентгенография» [2].

В результате многолетних исследований в основном ленинградских-петербургских ученых были выявлены, описаны и количественно оценены основные особенности процесса формирования рентгеновского изображения при использовании источника рентгеновского излучения с фокусным пятном

микронных размеров. Основными из таких особенностей (эффектов) являются [3]:

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

Все перечисленные эффекты имеют разную природу, но проявляясь одновременно, позволяют значительно снизить экспозиционную дозу РИ при сохранении качества получаемого изображения ОИ по сравнению со стандартной рентгенографией. Соответственно могут быть снижены мощность, используемого для съемки рентгеновского аппарата, его габариты и вес.

2. Современным развитием рентгенографии является рентгеновская томография (от греч. tomos – кусок, слой) – способ получения изображения отдельного слоя ОИ с помощью РИ. Она позволяет определить (вычислить) плотность вещества в каждой условной точке (вокселе) всего объема ОИ. Поэтому в результате рентгеновской томографии может быть реконструировано («нарисовано») рентгеновское изображение отдельного слоя ОИ определенной толщины в любом произвольном сечении этого объекта или его трехмерное изображение [4]. В отличие от рентгенографии, что принципиально важно, на изображение конкретного слоя не будут наложены изображения деталей строения ОИ, не принадлежащих этому слою. Отсюда следует термин «томография» – получение изображения слоя ОИ. Соответственно, рентгеновское изображение ОИ в томографии характеризуется как объемное (трехмерное).

В общем случае для осуществления рентгеновской томографии, рентгеновские снимки ОИ выполняются последовательно с разных сторон. С этой целью ИРИ и ПРИ одновременно с определенным шагом перемещаются по окружности вокруг оси ОИ на угол до 360°. Производится так называемая многокурсовая съемка, дающая целый набор отдельных снимков (проекций) объекта. При этом каждая условная точка ОИ многократно, по числу проекций, просвечивается. В качестве примера на рис. 3 представлена одна из рентгенооптических схем томографической съемки – широкорасходящимся пучком РИ.

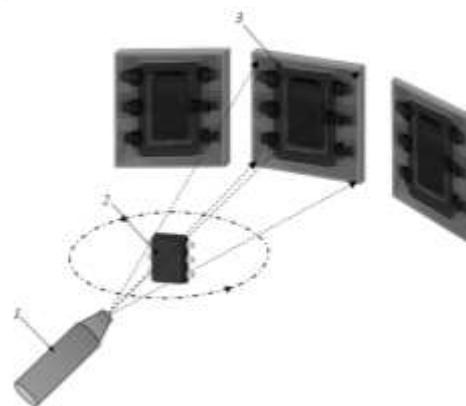


Рис. 3. Рентгенооптическая схема томографической съемки широкорасходящимся пучком РИ. 1 – ИРИ, 2 – ОИ (микросхема), 3 – ПРИ

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

Размеры вокселя в томографии также, как и пикселя в рентгенографии, в первую очередь, определяются разрешающей способностью ПРИ. Однако, как и в рентгенографии, использование ПРИ с фокусным пятном микронных размеров позволяет многократно увеличить пространственную разрешающую способность рентгеновской томографии за счет проекционного увеличения изображения ОИ.

Таким образом, микрофокусная рентгеновская томография позволяет проводить исследования относительно небольших объектов с высоким пространственным разрешением.

### III. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РЕНТГЕНОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ

К настоящему времени сотрудниками кафедры Электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на базе малых предприятий Технопарка университета ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» и ООО «Микротомография» разработаны многофункциональные передвижные рентгенографические установки семейства ПРДУ, предназначенные для целого ряда областей научной и практической деятельности [5].

Типовая конструкция ПРДУ включает в себя рентгенозащитную камеру (РЗК) для проведения рентгенографических работ, ПРИ моноблочного типа, цифровой ПРИ на основе плоскочувствительного детектора РИ, персональный компьютер (ПК) 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.

### IV. КОНТРОЛЬ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Ни одно из производств современной электронной техники не может обойтись без контроля качества ключевых технологических операций, например, «разварки» внутренних выводов диодов, транзисторов, микросхем и т. д. или паяных соединений печатных плат. Для решения указанных задач предназначены рентгенографические установки семейства ПРДУ различных исполнений (рис. 4).



Рис. 4. Рентгенографические установки семейства ПРДУ

Они успешно используются при входном контроле электронных компонентов и печатных плат, например, паяных соединений, выполненных по BGA-, QFN-, THT-технологиям, дефектов нанесения паяльной пасты, включая обнаружения пустот, перемычек и т. д., поиск посторонних элементов. Высокая разрешающая способность, получаемого изображения, позволяет отчетливо визуализировать металлизацию переходных отверстий на многослойных печатных платах (рис. 5а), а также пустот в паянных или клеевых соединениях при монтаже микросхем на платах (рис. 5б).

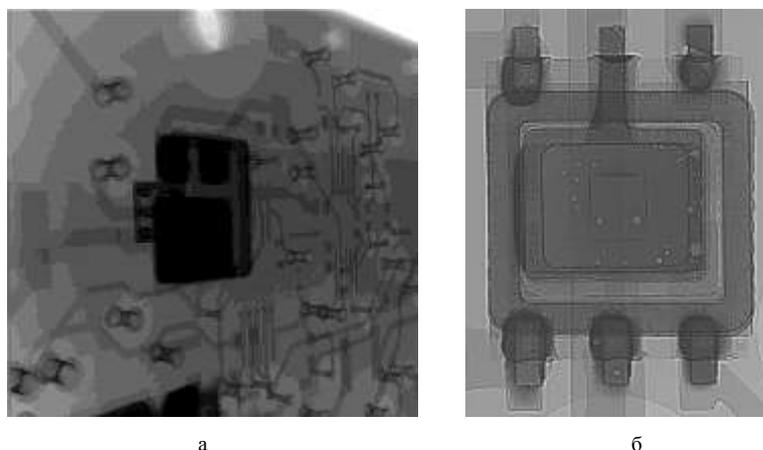


Рис. 5. Рентгеновское изображение фрагментов печатных плат

Для получения трехмерных рентгеновских изображений изделий электронной техники разработаны установки семейства ПРДУ с функцией томографии – микрофокусные рентгеновские компьютерные

томографы (МРКТ). Внешний вид одного из последних вариантов томографа представлен на рис. 6.



Рис. 6. Микрофокусный рентгеновский компьютерный томограф МРКТ-06

В состав томографа входит РЗК, внутри камеры расположены ИРИ моноблочного типа РАП - 150М - 0,1-5 с микрофокусной рентгеновской трубкой БС16 (IV), ПРИ на основе твердотельного плоскопанельного двухкоординатного детектора, а также автоматизированное УП для вращения и перемещения ОИ вдоль оси пучка РИ. Для управления работой основных узлов томографа, сбора и обработки проекционных данных, а также реконструкции изображения ОИ, используется оригинальное отечественное ПО.

Максимальное напряжение на рентгеновской трубке томографа – 130 кВ, максимальный ток трубки – 0,15 мА. Размеры входного окна детектора РИ равны 430×430 мм. Размер пикселя детектора РИ – 150 мкм. Размер вокселя получаемого изображения составляет от 5 мкм.

Габариты рентгенозащитной камеры (длина×ширина×высота) равны 1200×620×800 мм, габариты отсека для размещения образцов, позволяют исследовать ОИ размером до 210×250×250 мм. Общий вес томографа не превышает 400 кг.

В качестве примера результатов томографических исследований на рис. 7 представлено трехмерное рентгеновское изображение одного из изделий отечественной электронной техники – диода Ганна.

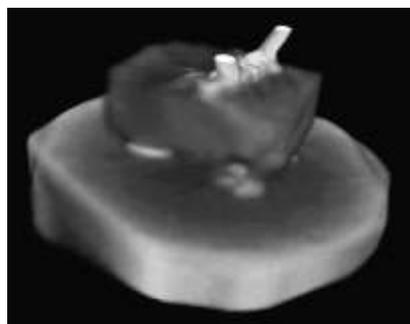


Рис. 7. Трехмерное рентгеновское изображение диода Ганна

Диаметр проволочных выводов равен 20 мкм. Послойный анализ изображения позволил обнаружить отсутствие эклектического соединения на одной из четырех контактных площадок.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наработанный опыт создания и эксплуатации современных технических средств рентгенографии показывает, что в нашей стране сформировался новый класс оборудования для рентгеновского контроля и диагностики – портативные рентгенографические и рентгенотомографические установки.

Диагностические возможности установок позволяют решать большинство задач, до недавнего времени посильных лишь зарубежным стационарным системам рентгеновского контроля. Однако использование оригинальных технических решений и ключевых комплектующих отечественного производства позволило принципиально снизить габариты, вес и, самое главное, их стоимость. В результате дорогостоящая стационарная система рентгеновского контроля превратилась в «настольный» инструмент подобно, известному всем специалистам и радиолюбителям, тестеру для измерения параметров радиоэлектронных схем, электрических сетей и т. д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Петербургская – Ленинградская школа электроники. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 658 с.
- [2] Васильев А.Ю. Рентгенография с прямым многократным увеличением в клинической практике. М.: ИПТК «Логос». 1998. 148 с.
- [3] Микрофокусная рентгенография в медицине / под. ред. Потрахова Н.Н. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 91 с.
- [4] Терешенко С.А. Методы вычислительной томографии. М.: Физматлит, 2004. 320 с.
- [5] Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Бессонов В.Б., Потрахов Ю.Н. Микрофокусная рентгенография: результаты исследований Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова // Территория NDT. 2016. № 3. С. 54-57.