

М.С. ГРИГОРОВ, О.О. БАСОВ
**МЕТОДИКА МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
РЕНТГЕНОГРАФИИ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Григоров М.С., Басов О.О. Методика мультэнергетической рентгенографии изделий микроэлектроники с неоднородной структурой.

Аннотация. Анализ существующих систем неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники, их основных возможностей и характеристик свидетельствует о необходимости внедрения метода мультэнергетической рентгенографии, позволяющего расширить возможности цифровой рентгенографии на изделия микроэлектроники с неоднородной структурой. Разработанная методика позволяет получить минимальный набор цифровых рентгеновских изображений изделия микроэлектроники с неоднородной структурой за счет обоснованного выбора команд источнику рентгеновского излучения для запуска «рабочих» режимов экспозиции. Указанный набор изображений обеспечивает возможность проведения контроля дефектов изделия по результатам визуализации внутренней структуры всех его функциональных элементов с требуемым качеством.

Ключевые слова: мультэнергетическая рентгенография, изделие микроэлектроники, рентгеновское изображение, показатель качества рентгеновского изображения.

Grigorov M.S., Basov O.O. Technique of a Multipower X-Ray Analysis of Products of Microelectronics with Non-Uniform Structure.

Abstract. The analysis of the existing systems of nondestructive x-ray control of products of microelectronics, their main opportunities and characteristics testifies to need of introduction of a multipower X-ray analysis method allowing to expand possibilities of a digital X-ray analysis for microelectronics products with non-uniform structure. The developed technique allows us to receive the minimum set of digital x-ray images of a product of microelectronics with non-uniform structure due to a reasonable choice of commands to a source of x-ray radiation in order to actuate the "working" modes of exposition. The specified set of images provides the possibility of monitoring product defects by results of visualization of the internal structure of all its functional elements with the demanded quality.

Keywords: multipower x-ray analysis, microelectronics product, x-ray image, indicator of quality of the x-ray image.

1. Введение. Современное производство изделий микроэлектроники (ИМ) предъявляет высокие требования к контролю качества выпускаемой продукции. При этом оценка качества изделий, для которых применение "традиционных" методов диагностики и локализации дефектов малоэффективно или невозможно в силу различных причин, может быть произведена только с использованием неразрушающего рентгеновского контроля (НРК).

Современные ИМ характеризуются сложной, многослойной, а, следовательно, неоднородной (с точки зрения ослабления рентгеновских лучей) структурой. Большое количество разнородных функциональных элементов (ФЭ) в составе ИМ обуславливает необходимость

проведения нескольких рентгеновских экспозиций, обеспечивающих для каждого типа ФЭ (уровня неоднородности) ИМ формирование рентгеновского изображения (РИ) требуемого качества. Увеличение числа формируемых РИ требует обработки и анализа каждого из них, что приводит к возрастанию количества итераций и, соответственно, времени реализации задач НРК, в частности, по расшифровке дефектов ИМ.

Поэтому в настоящее время объективно существует противоречие между необходимостью получения изображения всех ФЭ ИМ с требуемым качеством, и необходимостью снижения затрат времени на проведение НРК. Его разрешение лежит в области автоматизации существующих систем НРК за счет совершенствования математического и программного обеспечения процедуры формирования РИ ИМ с неоднородной структурой. Указанный подход представляет собой сложную научно-техническую задачу и обуславливает актуальность исследований.

2. Существующие подходы к реализации мультэнергетической рентгенографии. Процесс формирования набора РИ в описанных выше условиях принято называть мультэнергетической рентгенографией.

В медицине известен метод двухэнергетической рентгенографии [1, 2], согласно которого из двух изображений, сделанных при разных анодных напряжениях на рентгеновской трубке, путем субтракции получают изображения мягких и костных тканей. Указанный метод также получил широкое распространение для выявления опасных вложений в ручной клади и багаже [3, 4].

Для исследования возможности повышения точности разделения веществ с близкими эффективными атомными номерами в [5] был предложен метод трехэнергетической рентгенографии, где решение поставленной задачи осуществлялось двумя способами:

1) используя энергоселективные свойства трех линеек детекторов, за одно сканирование формируется три изображения объекта контроля в различных энергетических диапазонах при одном выбранном анодном напряжении источника рентгеновского излучения. Достоинством этого способа можно считать высокую скорость получения изображений, недостатком – существенное перекрытие энергетических диапазонов при получении изображения;

2) используя высокую точность позиционирования механизма перемещения объекта контроля последовательно получают три его изображения при трех разных анодных напряжениях и различных условиях фильтрации с последующим совмещением изображений, полу-

ченных в трех энергетических диапазонах. В этом случае достигается лучшее энергетическое разделение.

Опираясь на известные методы рентгенографии, нашедшие применение в других областях, разработана методика мультэнергетической рентгенографии, позволившая расширить возможности цифровой рентгенографии на изделия микроэлектроники с неоднородной структурой.

3. Методика мультэнергетической рентгенографии изделий микроэлектроники с неоднородной структурой. Разработанная методика включает в себя следующие шаги.

1. Установление зависимости интенсивности излучения $J^H(\lambda)$ от параметров источника рентгеновского излучения (анодного напряжения U^A и анодного тока i^A рентгеновской трубки).

2. Интерполяция полученных значений интенсивности для обеспечения большей точности установки параметров источника рентгеновского излучения.

3. Формирование набора команд $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{1 \dots N}$ источнику рентгеновского излучения на основе анализа зависимости значений количественного показателя качества $Q_{\text{кол}}$ от режима работы источника.

4. Формирование первого (опорного) РИ ИМ с неоднородной структурой.

5. Выбор набора команд $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{1 \dots N}$, обеспечивающих получение для каждого типа ФЭ ИМ изображения требуемого качества.

6. Формирование РИ в моменты действия анодных напряжения U^A и тока i^A , соответствующих командам из набора $\{C_j(U^A, i^A)\}$.

Для реализации методики предложено ввести в контур регулирования источника рентгеновского излучения звено обратной связи на основе датчика (детектора) рентгеновского излучения (рисунок 1).

В качестве приемника излучения в данном датчике применен фотодиод (1), снабженный металлическим экраном, установленным для защиты схемы от излучения большой мощности, и триггер Шмитта (2) с нелинейной цепью обратной связи, содержащей сопротивление $R_{\text{ос}}$ (4) и полевой транзистор (3) в диодном включении. При сравнительной простоте построения такой фотодатчик обеспечивает линейное преобразование потока излучения Φ_j в частоту f_x выходных импульсов за счет цепи отрицательной обратной импульсной связи.

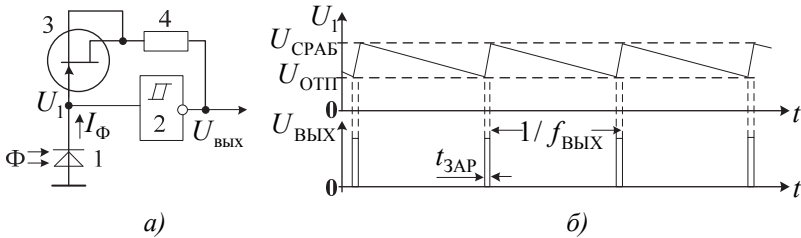


Рис. 1. Микромощный датчик рентгеновского излучения: а – принципиальная электрическая схема; б – временные диаграммы работы

Принцип действия детектора рентгеновского излучения основан на медленном заряде собственной емкости C_d фотодиода в зоне гистерезиса ΔU_Γ триггера Шмитта фототоком $I_\Phi = \Phi_j S_\lambda$, прямо пропорциональным измеряемому потоку излучения Φ_j и световой чувствительности S_λ фотодиода, с последующим быстрым разрядом емкости фотодиода до исходного уровня током обратной связи. Если пренебречь длительностью времени разряда $t_{\text{РАЗ}}$ емкости C_d фотодиода по сравнению со временем ее заряда $t_{\text{ЗАР}}$, то при выполнении неравенства $t_{\text{ЗАР}} \gg t_{\text{РАЗ}}$ частота выходных импульсов определяется соотношением:

$$f_X \approx \frac{I_\Phi}{\Delta U_\Gamma C_d} \approx \frac{\Phi_j S_\lambda}{\Delta U_\Gamma C_d} = \Phi_j K_\Phi,$$

где $K_\Phi = S_\lambda / \Delta U_\Gamma C_d$ – коэффициент преобразования фотодетектора.

Для преобразования частоты f_X выходных импульсов детектора излучения в цифровой код N_X разработана следующая схема (рисунок 2). В данном преобразователе реализован принцип цифрового измерения частоты, согласно которому число выходных импульсов детектора излучения суммируется в счетчике на постоянном интервале измерения $T_{\text{ИЗМ}} = \text{const}$, в конце которого на выходах счетчика формируется код

$$N_X = f_X T_{\text{ИЗМ}} = \Phi_j K_\Phi T_{\text{ИЗМ}},$$

прямо пропорциональный измеряемому потоку рентгеновского излучения Φ_j .

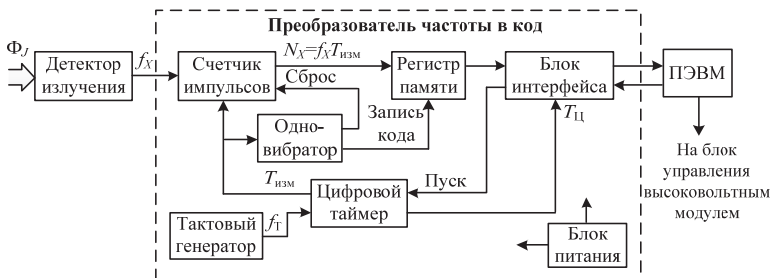


Рис. 2. Структурная схема преобразователя частоты импульсов в цифровой код

В схеме преобразователя частоты в код (рисунок 2) применены цифровой таймер с номинальной емкостью счета $N_{\text{НОМ}}$ и кварцевый генератор импульсов высокой тактовой частоты $f_T \gg f_X$, служащие для формирования такта измерения постоянной длительности, составляющей $T_{\text{ИЗМ}} = N_{\text{НОМ}} / f_T = (0,1 \dots 0,5)$ с.

Выбор длительности такта измерения, равной целому числу периодов частоты 50 Гц, позволяет значительно ослабить влияние помех промышленной частоты на результат преобразования фототока. Процесс заполнения интервала $T_{\text{ИЗМ}}$ импульсами измеряемой частоты f_X эквивалентен ее интегрированию на данном участке времени, что приводит к значительному (в сотни раз) ослаблению влияния периодических помех на результат измерения [6].

В схеме преобразователя частоты в цифровой код используются регистр памяти, служащий для запоминания выходного кода N_X в конце такта измерения $T_{\text{ИЗМ}}$, и блок интерфейса для связи с управляющей ЭВМ. Блок интерфейса преобразует параллельный цифровой код, снимаемый с выходов регистра памяти, в последовательный код, который передается на ЭВМ по линии связи. Соответствующие команды для регулирования и установки анодного напряжения и тока в высоковольтном источнике анодного напряжения поступают от ЭВМ на блок управления высоковольтным модулем, обеспечивающим гальваническую разделение выходов ЭВМ от высоковольтных электрических цепей.

Измерение потока излучения Φ , начинается при подаче импульса "Пуск" от ПЭВМ, который поступает через блок интерфейса на управляющий вход цифрового таймера. При этом цифровой таймер формирует импульс заданной длительности $T_{\text{ИЗМ}}$, поступающий на вход "Разрешение счета" счетчика, в течение которого выходные импульсы

датчика излучения частоты f_x суммируются в счетчике и непрерывно увеличивают значение его выходного кода. По окончании интервала измерения $T_{\text{изм}}$, т. е. по срезу импульса на выходе цифрового таймера срабатывает одновибратор и формирует короткий импульс, который поступает на С-вход записи регистра памяти и на R-вход сброса счетчика. По фронту этого импульса выходной код N_x счетчика записывается в регистр памяти, после чего высоким уровнем этого импульса выполняется сброс счетчика, при котором все его выходы устанавливаются в нулевое состояние. После окончания такта измерения $T_{\text{изм}}$ подается сигнал от цифрового таймера на ЭВМ через блок интерфейса, который является сигналом разрешения на считывание полученного значения выходного кода и его запись в память ЭВМ.

Для повышения точности управления интенсивностью потока рентгеновского излучения в устройстве выполняется автоматическая аддитивная коррекция погрешности от влияния темнового тока $I_{\text{фт}}$ фотодиода. Особенность работы системы НРК заключается в том, что рентгеновский источник из-за большой рассеиваемой мощности работает в периодическом режиме. При этом формирование высокого напряжения на аноде рентгеновской лампы выполняется на коротком интервале времени, не превышающем 8 с, в течение которого формируется рентгенограмма объекта контроля, после чего напряжение на рентгеновской лампе отключается. Циклы измерения и остановки лампы задаются командами ЭВМ, что позволяет измерять темновой ток $I_{\text{фт}}$ фотодиода в детекторе излучения и формировать начальный код $N_{\text{нач}} = I_{\text{фт}} T_{\text{изм}} / \Delta U_{\text{Г-Сд}}$, который автоматически вычитается из последующих результатов измерения потока рентгеновского излучения при работе системы НРК в активном режиме. Такая цифровая коррекция результатов преобразования позволяет практически исключить влияние темнового тока фотодиода на точность детектора излучения в широком температурном диапазоне.

Введение предложенного звена обратной связи в состав системы НРК позволяет установить зависимость интенсивности от параметров источника рентгеновского излучения рентгеновской трубки при значительно высокой точности ее установки.

При реализации опытного образца устройства использовались цифровые КМОП микросхемы серии К561: в детекторе излучения в генераторе тактовых импульсов и в одновибраторе применены микросхемы триггера Шмитта типа К561ТЛ1, в счетчике импульсов и таймере использовались микросхемы типа К561ИЕ11, К561ИЕ8, а регистр памя-

ти собран на микросхемах К561ИР9, и т. п. При изготовлении промышленной партии преобразователь частоты в код можно реализовать на простом микроконтроллере, а в канале связи с ЭВМ использовать стандартную микросхему приемопередатчика типа USB.

С использованием опытного образца устройства (рис. 2) был проведен натурный эксперимент по установлению искомой зависимости интенсивности $J^H(\lambda)$ рентгеновского излучения от анодного напряжения U^A и анодного тока i^A (таблица 1) для автономной провечивающей полнокадровой рентгеновской установки «Калан-4У».

Таблица 1. Параметры излучения вне объекта контроля

U^A/i^A (кВ/мА)	$J^H(\lambda)$, отн. ед.	\bar{I}_j	$C_{0,99}$	$Q_{\text{кол.}}$
80/1	1,76	35,21	0,0391	900,51
80/2	3,69	73,72	0,0273	2700,37
80/3	5,77	115,44	0,0273	4228,57
100/1	2,60	51,91	0,0273	1901,47
100/2	5,77	115,33	0,0273	4224,54
100/3	8,80	175,96	0,0273	6445,42
120/1	3,55	71,07	0,0273	2603,30
120/2	8,33	166,51	0,0234	7115,81
120/3	12,42	248,45	0,0273	9100,73
140/1	4,54	90,71	0,0273	3322,71
140/2	10,71	214,11	0,0273	7842,86
140/3	12,70	254	0,0273	9304,03
160/1	5,55	110,97	0,0273	4064,84
160/2	12,66	253,29	0,0273	9278,02
160/3	12,70	254	0,0234	10854,70
180/1	6,05	121	0,0273	4432,23
180/2	12,70	254	0,0234	10854,70
180/3	12,70	254	0,0273	9304,03

Для реализации второго шага методики предложено использовать кубическую интерполяцию полученных значений зависимости интенсивности $J^H(\lambda)$ рентгеновского излучения от анодного напряжения U^A и анодного тока i^A . Это позволяет обеспечить большую точность установки заданной интенсивности рентгеновского излучения.

Аналогичным образом может быть установлена искомая зависимость для любого источника рентгеновского излучения. Она позво-

ляет сформировать набор команд $\{C_j(U^A, i^A)\}$, $j = \overline{1 \dots N}$, обеспечивающих получение области:

$$G^Q = \bigcup_{j=1}^N \bigcup_{i=1}^{O_j} G_{ji}^Q,$$

где G_{ji}^Q – отдельные области рентгеновского изображения, сформированные по результатам сегментации и процедуры анализа качества.

Реализация третьего шага метода основана на анализе зависимости количественного показателя качества $Q_{\text{кол},ji}$ вне объекта контроля (таблица 1), упорядоченного в порядке возрастания, от режима работы (рисунок 3). В качестве количественного показателя качества области РИ ИМ использована величина:

$$Q_{\text{кол},ji} = \frac{\bar{I}_{G_{ji}}}{C_{G_{ji}}},$$

где $\bar{I}_{G_{ji}}$ – средняя яркость области G_{ji} ; $C_{G_{ji}}$ – сосредоточенность долей энергии области G_{ji} при значении доли суммарной энергии $m = 0,99$ [7-11]. Об инвариантности сосредоточенности $C_{0,99}$ долей энергии РИ ИМ к яркости \bar{I}_j его элементов свидетельствуют данные, приведенные в таблице 1.

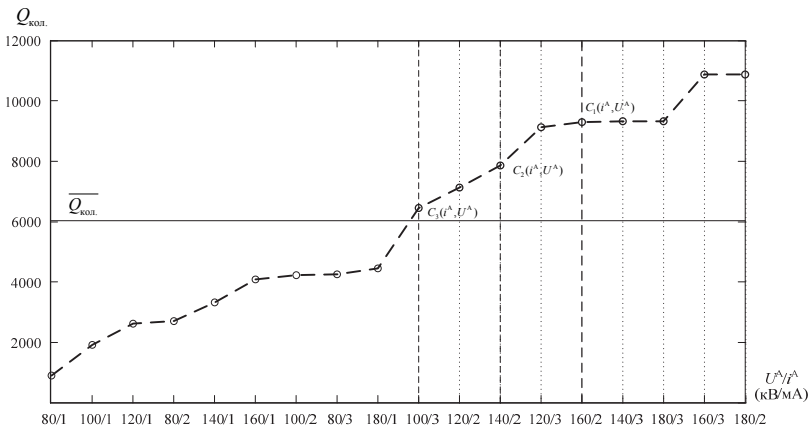


Рис. 3. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от режима работы рентгеновского источника

Сопоставление зависимости количественного показателя качества $Q_{\text{кол},ji}$ от режима работы источника рентгеновского излучения с результатами экспертной оценки позволило сделать ряд важных выводов.

1. В качестве "рабочих" следует выбирать такие режимы работы рентгеновского излучателя (параметры (U^A, i^A)), которые обеспечивают получение значений показателя $Q_{\text{кол}} > \overline{Q_{\text{кол}}}$, где $\overline{Q_{\text{кол}}}$ – среднее значение данного показателя по множеству режимов работы излучателя. Это позволит реализовать пятый шаг разработанной методики.

2. Для формирования опорного РИ (четвертый шаг методики) следует использовать "средний" режим работы рентгеновского излучателя, попавший в диапазон "рабочих". В рассматриваемом случае такой режим формируется командой $C_1(160, 2)$, т.е. рентгеновский излучатель работает при следующих параметрах: $U_1^A = 160$ кВ, $i_1^A = 2$ мА.

3. В предположении, что источник рентгеновского излучения питается переменным (пульсирующим) анодным напряжением U^A и через него протекает переменный (пульсирующий) анодный ток i^A , получение РИ (шестой шаг методики) следует осуществлять в моменты времени действия анодных напряжения и тока, соответствующих значениям из "рабочего" диапазона режимов функционирования. Так для рассматриваемого случая (рисунок 3) моменты формирования команд $\{C_j(U^A, i^A)\}, j = \overline{2 \dots N}$, представлены на рисунке 4.

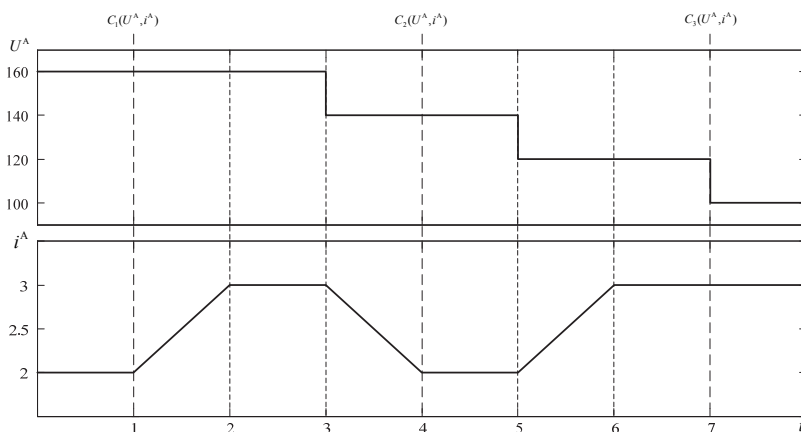


Рис. 4. Формирование команд источнику рентгеновского излучения

Реализация методики с учетом указанных рекомендаций позволяет получить набор рентгеновских изображений, обеспечивающий возможность провести контроль дефектов по результатам визуализации его внутренней структуры с требуемым качеством изображения для всех ФЭ ИМ [12, 13].

4. Заключение. В процессе исследования была решена задача внедрения метода мультэнергетической рентгенографии в системы неразрушающего рентгеновского контроля, расширив возможности данных систем на изделия микроэлектроники с неоднородной структурой. Разработанная методика позволяет получить минимальный набор цифровых рентгеновских изображений изделия микроэлектроники с неоднородной структурой за счет обоснованного выбора команд источнику рентгеновского излучения для запуска "рабочих" режимов экспозиции.

Литература

1. *Мазуров А.И.* Последние достижения в цифровой рентгенотехнике // Медицинская техника. 2010. № 5(263). С. 10-14.
2. *Jens Rieke, et al.* Clinical results of Csl-detector-based dual-exposure dual energy in chest radiography // Eur Radiol. 2003. vol. 13. pp. 2577–2582.
3. *Macdonald R.* Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in airport security application // Proc. SPIE. 2001. vol. 4301. pp. 31–41.
4. Способ улучшения распознаваемости материала в рентгеновской контрольной установке и рентгеновская контрольная установка // патент № 2462702. РФ. 2012. 11 с.
5. *Рыжиков В.Д., Ополонин А.Д., Волков В.Г., Лисецкая Е.К., Галкин С.Н., Воронкин Е.Ф.* Трехэнергетическая цифровая радиография для разделения веществ с малым эффективным атомным номером // Вісник НТУ «ХП». 2013. № 34(1007). С. 43–51.
6. *Орнатский П.П.* Автоматические измерения и приборы // Киев: Высш.шк. 1988. 486 с.
7. *Жиляков Е.Г., Черноморец А.А., Лысенко И.В.* Метод определения точных значений долей энергии изображений в заданных частотных интервалах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2013. Вып. 4. С. 115–123.
8. *Черноморец А.А., Голощапова В.А., Лысенко И.В., Болгова Е.В.* О частотной концентрации энергии изображений // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 2011. №1(96). Вып. 17/1. С. 146–151.
9. *Жиляков Е. Г., Черноморец А.А., Белов А.С., Болгова Е.В.* О субполосных свойствах изображений // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 2013. №8(151). Вып. 26/1. С. 175–182.
10. *Черноморец А.А., Иванов О.Н.* Метод анализа распределения энергий изображений по заданным частотным интервалам // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 2010. №19(90). Вып.16/1. С. 161–166.
11. *Григорьев М.С., Басов О.О.* Анализ распределения энергии рентгеновского изображения по частотным интервалам // Научные технологии и инновации (XXI научные чтения): Сборник научных трудов Международной научно-

практической конференции, посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. С. 160–165.

12. Григоров М.С., Басов О.О. Применение мультэнергетической цифровой рентгенографии для контроля качества изделий микроэлектроники с неоднородной структурой // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции. Орел. 2014. URL: <http://youconf.ru/itnop2014/materials/manager/view/61>.
13. Григоров М.С., Басов О.О. Автоматизация неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники при применении мультэнергетической рентгенографии // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей Международной молодежной научно-технической конференции. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. 2014. Том 1. С. 97–100.

References

1. Mazurov A.I. [Latest advances in digital rentgenotechnika]. *Medicinskaya tehnika – Medical equipment*. 2010. vol.5(263). pp. 10–14. (In Russ.).
2. Jens Rieke, et al. Clinical results of Csl-detector-based dual-exposure dual energy in chest radiography. *Eur Radiol*. 2003. vol. 13. pp. 2577–2582.
3. Macdonald R. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in airport security application. *Proc. SPIE*. 2001. vol. 4301. pp. 31–41.
4. [Method for improving ability to recognise materials in x-ray inspection system, and x-ray inspection system]. Patent no. 2462702. Russian Federation. 2012. 11 p. (In Russ.).
5. Rizikov V.D., Opolonin A.D., Volkov V.G., Liseckaya E.K., Galkin S.N., Voronkin E.F. [Three-power digital radiography for division of substances with small effective atomic number]. *Vestnik NTU «HPI» – Messenger of NTU «HPI»*. 2013. vol. 34(1007). pp. 43–51. (In Russ.).
6. Ornatskiy P.P. *Avtomaticheskie izmereniya i pribori* [Automatic measurements and devices]. Kiev: Highschool. 1988. 486 p. (In Russ.).
7. Zilyakov E.G., Chernomorets A.A., Lisenko I.V. [Method of determination of exact values of shares of energy of images in the set frequency intervals]. *Voprosi radioelektroniki. Ser. RLT – Questions electronics. Ser. RLT*. 2013. vol. 4. pp. 115–123. (In Russ.).
8. Chernomorets A.A., Goloshapova V.A., Lisenko I.V., Bolgova E.V. [About frequency concentration of energy of images]. *Nauchnie vedomosti BelGU. Ser. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika – Scientific sheets of BelSU. Ser. History. Political science. Economy. Informatics*. 2011. vol. 1(96). Issue 17/1. pp. 146–151. (In Russ.).
9. Zilyakov E.G., Chernomorets A.A., Belov A.S., Bolgova E.V. [About subband properties of images]. *Nauchnie vedomosti BelGU. Ser. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika. – Scientific sheets of BelSU. Ser. History. Political science. Economy. Informatics*. 2013. vol. 8(151). Issue 26/1. pp. 175–182. (In Russ.).
10. Chernomorets A.A., Ivanov O.N. [Method of the analysis of distribution of energiya of images on the set frequency intervals]. *Nauchnie vedomosti BelGU. Ser. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika. – Scientific sheets of BelSU. Ser. History. Political science. Economy. Informatics*. 2010. vol. 19 (90). Issue 16/1. pp. 161–166. (In Russ.).
11. Grigorov M.S., Basov O.O. [The analysis of distribution of energy of the x-ray image on frequency an interval]. *Naukoemkie tehnologii I innovacii (XXI nauchnie chteniya): Sbornik nauchnih trudov Mezhdunarodnoy nauchno-praktecheskoy konferencii, posvyasenny 60-letiu BGTU im. V.G. Shuhova* [High Tech and Innova-

- tion (XXI Scientific Reading): Collection of scientific papers of International scientific-practical conference]. Belgorod. 2014. pp. 160–165. (In Russ.).
12. Grigorov M.S., Basov O.O. [Application of a multipower digital X-ray analysis for quality control of products of microelectronics with non-uniform structure]. *Informacionnie tehnologii v nauke, obrazovanii i proizvodstve: Sbornik nauchnih trudov VI Mezdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Information technology in science, education and production: Collection of scientific papers of VI International scientific-practical conference]. 2014. Available at: <http://youconf.ru/itnop2014/materials/manager/view/61>. (In Russ.).
 13. Grigorov M.S., Basov O.O. [Automation of nondestructive x-ray control of products of microelectronics at application of a multipower X-ray analysis]. *Progressivnie tehnologii i processy: Sbornik nauchnih statey Mezdunarodnoy molodeznoy nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Progressive technology and processes: Collection of scientific papers of International youth scientific and technical conference]. Kursk. 2014. vol. 1. pp. 97–100. (In Russ.)

Григоров Михаил Сергеевич — научный сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: системы рентгеновского контроля, обнаружение сигналов побочных электромагнитных излучений технических средств, проектирование систем контроля. Число научных публикаций — 45. gms.orel@mail.ru; Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)549579.

Grigorov Mihail Sergeevich — researcher, Academy of Federal Agency of protection of Russian Federation. Research interests: systems of x-ray control, detection of signals of compromising emanations of technical equipment, engineering of control systems. The number of publications — 45. gms.orel@mail.ru; 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549579.

Басов Олег Олегович — к-т техн. наук, докторант, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: обработка и кодирование речевых и иконических сигналов, проектирование полимодальных инфокоммуникационных систем. Число научных публикаций — 165. oobasov@mail.ru; Приборостроительная, 35, Орел, 302034; р.т.: +7(4862)549533.

Basov Oleg Olegovich — Ph.D., doctoral student, The Academy of Federal Security Guard Service of the Russian Federation. Research interests: processing and coding of speech and iconic signals, polymodal infocommunicational systems design. The number of publications — 165. oobasov@mail.ru; 35, Priborostroitelnaya Street, Orel, 302034, Russia; office phone: +7(4862)549533.

РЕФЕРАТ

Григоров М.С., Басов О.О. **Методика мультиэнергетической рентгенографии изделий микроэлектроники с неоднородной структурой.**

В условиях устойчивого развития цифровых рентгеновских систем повышаются возможности проведения неразрушающего рентгеновского контроля изделий микроэлектроники. При этом для изделий микроэлектроники, которые обладают неоднородной структурой, возникает противоречие между необходимостью оперативно проводить контроль и получать рентгеновское изображение каждого элемента изделия с требуемым качеством.

По этой причине возникают задачи по автоматизации формирования минимального набора рентгеновских изображений изделия микроэлектроники с неоднородной структурой за счет обоснованного выбора команд источнику рентгеновского излучения для запуска "рабочих" режимов экспозиции.

Опираясь на известные методы рентгенографии, нашедшие применение в других областях, в работе была решена задача по внедрению метода мультиэнергетической рентгенографии в системы неразрушающего рентгеновского контроля, позволяющего расширить возможности цифровой рентгенографии на изделия микроэлектроники с неоднородной структурой.

Предложенная методика основана:

- на установлении зависимости интенсивности излучения от параметров источника рентгеновского излучения;
- интерполяции полученных значений интенсивности излучения;
- формировании набора команд источнику рентгеновского излучения на основе анализа зависимости значений количественного показателя качества от режима работы источника;
- формировании опорного рентгеновского изображения изделия микроэлектроники с неоднородной структурой;
- выборе набора команд, обеспечивающих получение изображения требуемого качества для каждого типа функциональных элементов изделия микроэлектроники;
- формировании рентгеновских изображений изделия микроэлектроники в моменты действия анодных напряжения и тока, соответствующих командам из предопределенного набора.

Разработанная методика позволяет получить минимальный набор рентгеновских изображений изделия микроэлектроники с неоднородной структурой, обеспечивающий возможность провести контроль дефектов изделия по результатам визуализации его внутренней структуры с требуемым качеством изображения для всех его функциональных элементов, за счет обоснованного выбора команд источнику рентгеновского излучения для запуска «рабочих» режимов экспозиции.

SUMMARY

Grigorov M.S., Basov O.O. **Technique of a Multipower X-Ray Analysis of Products of Microelectronics with Non-Uniform Structure.**

In the conditions of a sustainable development of digital x-ray systems possibilities of carrying out nondestructive x-ray control of products of microelectronics raise. Thus for microelectronics products, which possess non-uniform structure, there is a contradiction between the need to carry out control quickly and to receive the x-ray image of each element of a product with the demanded quality.

For this reason, there are tasks of automation of formation of the minimum set of x-ray images of a product of microelectronics with non-uniform structure due to a reasonable choice of teams to a source of x-ray radiation in order to actuate the "working" modes of an exposition.

Based on the known methods of a X-ray analysis, which found application in other areas in work, the task of introduction of a multi-power X-ray analysis method allowing to expand possibilities of a digital X-ray analysis on microelectronics products with non-uniform structure was solved.

The offered technique is based on:

- establishment of dependence of radiation intensity on parameters of a source of x-ray radiation;
- interpolation of the received values of intensity of radiation;
- formation of a set of commands to a source of x-ray radiation on the basis of the analysis of dependence of values of a quantitative quality index on a source operating mode;
- formation of the basic x-ray image of a product of microelectronics with non-uniform structure;
- a choice of a set of the commands providing the image of the demanded quality for each type of functional elements of a product of microelectronics;
- formation of x-ray images of a product of microelectronics at the moments of action of anode tension and current corresponding to the commands from the predetermined set.

The developed technique allows us to receive the minimum set of x-ray images of a product of microelectronics with non-uniform structure. This set provides the opportunity to carry out control of product defects by results of visualization of its internal structure with the demanded quality of the image for all its functional elements, due to a reasonable choice of commands to a source of x-ray radiation in order to actuate the "working" modes of exposition.