НОВЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С МИКРОФОКУСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

NEW X-RAY MEASURING SYSTEM WITH MICROFOCUS SOURCES FOR THE DIAGNOSIS OF SOLID MICRO- AND NANOSTRUCTURES

Н.Герасименко¹⁻³, д.ф.-м.н., Д.Смирнов^{1,2}, А.Турьянский², д.ф.-м.н. / rmta@miee.ru
N.Gerasimenko¹⁻³, D.Sc., D.Smirnov^{1,2}, A.Touryanski, D.Sc.

Проблема импортозамещения сложных средств диагностики и контроля продукции и процессов высокотехнологичных производств, в первую очередь, микро- и нанoeлектроники, ядерной энергетики, космической и оборонной техники, заставила обратить внимание на оригинальные подходы к развитию и созданию новых рентгеновских измерительных систем. В микро- и нанoeлектронике данное направление реализуется на базе совместных работ Физического института РАН им. П.Н.Лебедева и Национального исследовательского университета МИЭТ с привлечением производственных организаций: "НИИМЭ" и "Микрон", "МЭЛЗ", "Ангстрем" и др.

The problem of import substitution of complex diagnosis and control systems for products and processes of high-tech industries, primarily micro – and nanoelectronics, nuclear power, aerospace & defense industry, forced to pay attention to novel approaches to the development and creation of new X-ray measuring systems. In micro- and nanoelectronics this direction is realized on the basis of joint work of the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS) and National Research University of Electronic Technology (MIET) involving production organizations: Mikron, MELZ, Angstrom, etc.

Задача импортозамещения включает взаимосвязанные вопросы создания высокотехнологичных средств контроля, которые соответствуют требованиям современного производства к безопасности, оперативности проведения измерений, минимальной стоимости эксплуатации, доступности высококлассных специалистов, а также организации эффективного взаимодействия производственного персонала с коллективами разработчиков для решения возникающих проблем.

Особо следует подчеркнуть тот факт, что в рамках созданного рабочего сообщества организуется многосторонняя обратная связь, благодаря объединению усилий фундаментальной и прикладной науки, высших учебных

заведений, промышленных предприятий. Такую синергию следует активно использовать для получения конкурентных преимуществ перед зарубежными компаниями в рамках политики импортозамещения.

Методы рентгеновского анализа для отечественной микроэлектронной промышленности апробировались в "НИИМЭ" и "Микрон", кластере НИУ МИЭТ и на других предприятиях Зеленоградского научно-производственного комплекса. С учетом полученного опыта разработаны программы развития рентгеновских методов анализа на базе отечественного оборудования, что отвечает не только решению задач импортозамещения, но и обеспечивает принципиально новые возможности для рентгеновской диагностики в области

¹ Национальный исследовательский университет "МИЭТ" / National Research University of Electronic Technology (MIET)

² Физический институт РАН им. П. Н. Лебедева / Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS)

³ Томский государственный университет / Tomsk State University (TSU)

прецизионных исследований, в частности, в твердотельной нанотехнологии. Предварительные работы в указанных направлениях и их результаты также дали возможность сформулировать новые подходы к метрологическому обеспечению микро- и нанoeлектроники, массовому использованию рентгеновских методов контроля в других высокотехнологических направлениях, таких как реакторное материаловедение, космическая техника и добыча полезных ископаемых.

Рассмотрим уникальные особенности и перспективы развития и коммерциализации разработанных рентгеновских измерительных систем, а также обсудим комплексный подход к неразрушающей диагностике твердотельных нанообъектов и структур [1].

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НОВОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Взаимодействие с ведущими профильными предприятиями позволило разработать комплексный подход к пооперационному и финишному контролю процессов микроэлектронного производства. Следует отметить, что эти разработки нашли положительный отклик у специалистов предприятий, в том числе "НИИМЭ" и "Микрон". Выбор комплексного подхода к организации контрольных измерений связан с тем, что на практике технология нанoeлектроники сталкивается со многими трудностями на стадии освоения новых процессов: формируются неучтенные дополнительные

подслои в изготавливаемых структурах, изменяются параметры нижележащих функциональных слоев в ходе многостадийного технологического процесса.

Для преодоления указанных трудностей разработана рентгеновская аналитическая система CompleXRay [2]. В эту систему изначально закладывались возможности модернизации с учетом требований эксплуатирующих организаций. В первую очередь, следует отметить обеспечение радиационной безопасности. Система комплектуется маломощной рентгеновской трубкой и не требует радиационной регистрации и учета. Оборудование разработано по модульному принципу и предназначено для комплексных исследований широкого класса объектов, включая кристаллы, поликристаллы и аморфные среды, наноразмерные структуры. Благодаря инновационной рентгенооптической схеме обеспечиваются уникальные возможности при исследовании тонких пленок, многослойных наноструктур и границ раздела. Модульность и универсальность конструкции позволяют проводить измерения удаленно, что может быть использовано для организации дистанционного обучения и при исследовании опасных материалов [3].

Рентгеновская измерительная система реализует наиболее полное сочетание аналитических методов на единой платформе. При этом благодаря использованию острофокусного источника

The objective of import substitution includes related issues of creating high-tech controls that meet the requirements of modern production to safety, efficiency of measurements, minimum operating costs, availability of highly skilled professionals, as well as to the organization of effective interaction of the production staff with development teams to resolve problems.

It should be emphasized the fact that in the framework of the working community multilateral feedback, through the combined efforts of fundamental and applied science, higher educational institutions, industrial enterprises will be organized.

Such synergies should be actively used to obtain competitive advantages over foreign companies under the import substitution policy.

X-ray analysis methods for Russian microelectronics industry were tested in Mikron, the MIET cluster and in other enterprises of Zelenograd scientific-industrial complex. Based on the obtained experience, the programs of development of X-ray analysis methods on the basis of domestic equipment were developed, which meets not only the import substitution challenges, but also provides new opportunities for X-ray diagnostics in the field of precision research, in

particular, in solid state nanotechnology. Preliminary works in these areas and their results also gave the opportunity to formulate new approaches to metrological support of micro- and nanoelectronics, to mass use of X-ray control methods in other high-tech areas such as reactor material science, space engineering and mining.

We will consider the unique characteristics and prospects of the development and commercialization of the novel X-ray measuring systems, and also we will discuss a comprehensive approach to non-destructive diagnostics of solid-state nano-objects and structures [1].

Рис.1. Двухволновая рентгенооптическая схема проведения измерений

Fig.1. Two-wave X-ray optical measurements system

и сменных монохроматоров достигаются рекордные характеристики по угловому разрешению и точности малоугловых измерений. Запатентованная метрологическая схема, основанная на параллельной регистрации данных на нескольких длинах волн, позволяет значительно повысить точность рентгеновских измерений [4, 5].

На метрологической платформе рентгеновского комплекса впервые реализован режим относительных измерений путем определения отношения сигналов на двух и более выбранных спектральных линиях (рис.1). Это исключает аппаратные ошибки и позволяет проводить корректные измерения при близких к нулю углах рассеяния. Могут быть установлены различные типы

THE PRINCIPLES OF A NEW X-RAY ANALYSIS SYSTEM

Interaction with leading production companies allowed to develop an integrated approach to the process control in micro-electronic production. It should be noted that these developments have received a positive response from the specialists of Mikron and other the enterprises. The choice of an integrated approach to the organization of control measurements is caused by that in practice nanoelectronics faces many challenges at the stage of development of new processes:

unaccounted additional sublayers are formed in manufactured structures, the parameters of the underlying functional layers change during the multi-stage process.

To overcome these difficulties analytical X-ray system CompleXRay [2] is developed. The concept of this system initially provides the ability to upgrade to meet the requirements of the customer. First of all, it should be noted radiation safety. The system comes with a low-power X-ray tube and does not require registration and accounting. The equipment is modular and is

designed for a broad class of complex research facilities, including crystals, polycrystalline and amorphous environment, nanoscale structures. The innovative X-ray optical scheme provides a unique opportunity for the study of thin films, multilayer nanostructures and interfaces. The modularity and versatility of the design allows to measure remotely that can be used for distance learning and the study of hazardous materials [3].

X-ray measuring system implements the most complete combination of analytical methods on a single platform.

фильтров и монохроматоров, в том числе монохроматор из монокристаллического алмаза, который позволяет работать с поляризованным излучением.

В используемой схеме селекции спектральных линий образец облучается характеристическим и тормозным излучением с максимальной энергией рентгеновских квантов до 40 кэВ, что обеспечивает возможность определения элементного состава по спектрам рентгеновской флуоресценции. При этом спектрометрические измерения могут проводиться как в статическом положении, так и при угловом или линейном сканировании для получения дополнительной информации о распределении состава по площади и глубине образца.

При рентгеновских измерениях наиболее важным параметром источника является размер фокуса. В рентгеновском комплексе установлен острофокусный излучатель с проекцией фокуса 20 мкм (опционально – 10 мкм). Это позволяет получать рекордно высокое угловое разрешение и впервые использовать на практике метод рентгеновской рефрактометрии при исследовании слоистых наноструктур. Для увеличения интенсивности рентгеновских пучков может эффективно применяться рефракционная и зеркальная фокусирующая оптика. Кроме того, возможности оборудования позволяют прецизионно измерять качество используемой оптики. Исследования характеристик многослойных периодических рентгеновских

зеркал выполнялись совместно с Институтом физики микроструктур РАН.

ИЗМЕРЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНОСТРУКТУР

Разработанный комплексный подход к измерению многослойных тонкопленочных наноструктур прежде всего обеспечивает получение однозначных и достоверных результатов благодаря использованию взаимодополняющих методов исследования, базирующихся на различных физических принципах и позволяющих разрешить возникающие неоднозначности при решении обратных задач. В настоящее время проведение полного технологического цикла изготовления нанoeлектронных приборов, в особенности при переходе к проектным нормам около или менее 90 нм, требует решения проблем измерения параметров изготавливаемых структур. Трудности обусловлены как недостаточной информативностью отдельных стандартных методов и неоднозначностью моделей, так и неверными предположениями о структуре и составе создаваемых объектов.

Используемый в измерительной системе метод рентгеновской рефлектометрии считается стандартным для исследования многослойных тонкопленочных структур, однако анализ только зеркальной составляющей рентгеновского отражения не позволяет разделить вклад в рефлектограмму от градиента плотности материала слоев и от шероховатостей и неоднородностей границ раздела. В связи с этим, наряду с методом относительной

Thus, through the use of fine-focus source and interchangeable monochromators record characteristics of the angular resolution and accuracy of the low-angle measurements are achieved. Patented metrological scheme based on parallel data logging at multiple wavelengths, allows to increase significantly the accuracy of the X-ray measurements [4,5].

On the metrology platform of X-ray complex was first implemented relative measurement mode by determining the ratio of signals on two or more selected spectral lines (fig.1).

This eliminates the hardware error and enables correct measurement at close to zero scattering angle. Various types of filters and monochromators can be fitted, including monocrystalline diamond monochromator, which allows to work with the polarized radiation.

In the scheme of selection of spectral lines the sample is irradiated with characteristic and bremsstrahlung radiation with a maximum energy of X-rays up to 40 keV, which enables the determination of elemental composition by X-ray fluorescence spectra. Thus spectrometric

measurements can be taken both in a static position and during angular or linear scanning for additional information on the distribution of the composition in the area and depth of a sample.

The most important source parameter for X-ray measurements is the size of the focus. The system is equipped with fine-focusing X-ray source with a focus projection of 20 μm (optional – 10 μm). This provides a record high angular resolution and allows for the first time to use in practice a method of X-ray refractometry in the study

Рис.2. Схема рентгенооптических измерений многослойных структур

Fig.2. The scheme of the X-ray optical measurements of multilayer structures

рефлектометрии, в комплекс методов были включены рентгеновская рефрактометрия и диффузное рассеяние рентгеновского излучения (рис.2).

Использование острофокусного источника позволяет исследовать рефракцию рентгеновского излучения в тонкопленочных структурах, напрямую рассчитать показатель его преломления и, следовательно, получить информацию о распределении плотности материала. Для уточнения параметров шероховатостей границ раздела используется метод диффузного рассеяния рентгеновского излучения. Все это позволяет

разрешить неоднозначности типа "плотность-шероховатость" при решении обратных задач и получить однозначные результаты измерений размерных параметров твердотельных многослойных наноструктур.

Особое внимание также уделено корректности решения обратных задач. Проводится регуляризация (сглаживание и т.д.) экспериментальных данных с тем, чтобы уменьшить погрешность при работе с отношением сигналов на двух длинах волн. Затем для поиска глобального экстремума функционала невязки при подгонке теоретической

Рис.3. Рентгеновские рефлектограммы на двух длинах волн $\lambda(\text{CuK}_\alpha) = 0,154$ нм и $\lambda(\text{CuK}_\beta) = 0,139$ нм (а) и кривые диффузного рассеяния (б) для диффузионно-барьерной структуры TiN/Ti/SiO₂ на кремнииFig.3. X-ray reflectograms for two wavelengths $\lambda(\text{CuK}_\alpha) = 0,154$ nm and $\lambda(\text{CuK}_\beta) = 0,139$ nm (a) and diffuse scattering curves (b) for the diffusion-barrier structure of TiN/Ti/SiO₂ on silicon

Рис.4. Относительная рентгеновская рефлектограмма (а) и ПЭМ-изображение (б) диффузионно-барьерной структуры TiN/Ti/SiO₂ на кремнии. Слой TiN состоит из трех подслоев: TiNO_x(2,0 нм) / TiN поликристаллический (2,5 нм) / TiN аморфный (1,4 нм). Среднеквадратичные шероховатости границ раздела $\sigma = 0,4\text{--}0,7$ нм

Fig.4. Relative X-ray reflectogram (a) and TEM image (b) of diffusion-barrier structure of TiN/Ti/SiO₂ on silicon. TiN layer consists of three sublayers: TiNO_x(2.0 nm) / TiN polycrystalline (2.5 nm) / amorphous TiN (1.4 nm). The RMS roughness of the interface $\sigma = 0.4\text{--}0.7$ nm

и экспериментальных кривых применяются хорошо зарекомендовавшие себя стохастические алгоритмы: генетический алгоритм и алгоритм "пчел" [6].

Для повышения производительности используется параллельная обработка экспериментальных

данных на графических процессорах [7]. Данная технология позволяет сократить время расчета на два порядка и, таким образом, использовать рентгено-оптические методы непосредственно для контроля роста многослойных структур в ходе технологического процесса.

of layered nanostructures. To increase the intensity of X-ray beams can be effectively applied refractive and mirror focusing optics. Furthermore, the capacities of the equipment allows to precisely measure the quality of the optics used. Studies of the characteristics of periodic multilayer X-ray mirrors were performed in collaboration with the Institute for Physics of Microstructures RAS.

MEASUREMENT OF MULTILAYER THIN-FILM NANOSTRUCTURES

The developed comprehensive approach to the measurement

of multilayer thin-film nanostructures primarily provides unambiguous and reliable results through the use of complementary research methods, which are based on different physical principles and allow to resolve any ambiguity in the solution of inverse problems. Currently a full technological cycle of production of nanoelectronic devices, in particular in the transition to a design rules of about 90 nm or less, requires solving problems of measurement of manufactured structures. Difficulties are caused by insufficient informational

capabilities of standard techniques and ambiguity of models, and also by incorrect assumptions about the structure and composition of the created objects.

The X-ray reflectometry used in the measuring system is a standard for the study of multilayer thin-film structures, however, the analysis only of the specular component of the X-ray reflection doesn't allow to separate the contributions to the waveform from the density gradient of material of layers and from the roughness and irregularities of the interfaces. In

Рис.5. Рентгеновские рефлектограммы пористых low-k-слоев SiCN / SiOC / Si. Толщина SiCN – 90 нм, SiOC – 180 нм
Fig.5. X-ray reflectograms of porous low-k layer SiCN / SiOC / Si. The thickness of the SiCN – 90 nm, SiOC – 180 nm

На рис.3-6 приведены результаты комплексного анализа тонкопленочных структур, полученных при технологическом процессе с проектными нормами 180 нм: диффузионно-барьерные слои TiN (5 нм) / Ti (10 нм) / SiO₂ (15 нм) / Si; пленки пористых low-k-диэлектриков SiCN (90 нм) / SiOC (180 нм) / Si [8]. Решались задачи по идентификации и расчету параметров неучтенных слоев, формирующихся при протекании технологических процессов, выполнена корректировка данных контрольных

Рис.6. Угловые диаграммы интенсивности преломленного излучения от образцов SiCN / SiOC / Si. Рефракционные пики: A_{1,2} – SiCN ($\rho = 1,56 \text{ г/см}^3$), B_{1,2} – SiOC ($\rho = 2,27 \text{ г/см}^3$)
Fig.6. Angular diagrams of the intensity of the refracted radiation from samples SiCN / SiOC / Si. Refractive peaks: A_{1,2} – SiCN ($\rho = 1,56 \text{ г/см}^3$), B_{1,2} – SiOC ($\rho = 2,27 \text{ г/см}^3$)

измерений (спектральная эллипсометрия и др.). Для подтверждения результатов рефлектометрии использовались данные просвечивающей электронной микроскопии.

Метод двухволновой рентгеновской рефлектометрии высокоэффективен при исследовании слабо-возмущенных (по плотности) слоистых структур, в частности, полученных ионной имплантацией [9].

this regard, along with the relative reflectometry in a complex of methods were included X-ray refractometry and diffuse X-ray scattering (fig.2).

Using of fine-focusing X-ray source allows to investigate the X-ray refraction in thin-film structures, to calculate the index of refraction and, therefore, to obtain information about the density distribution of the material. To clarify the roughness parameters of interfaces the diffuse X-ray scattering is used. All this helps to resolve ambiguities of “density-roughness” in the solution

of inverse problems and to obtain unambiguous results of measurements of dimensions of multi-layer solid-state nanostructures.

Special attention is also paid to the correctness of the solution of inverse problems. Regularization (smoothing, etc.) of experimental data in order to reduce an error when working with the ratio of the signals at the two wavelengths. Then to find the global extremum of the residual functional when fitting the theoretical and experimental curves are used well-established stochastic algorithms:

genetic algorithm and bees algorithm [6].

To improve performance, parallel processing of experimental data on GPUs [7] is used. This technology allows to reduce the computation time by two orders of magnitude and, thus, to use X-ray methods directly to control the growth of multilayer structures during the manufacturing process.

Fig.3-6 shows the results of a comprehensive analysis of thin-film structures obtained by the process with a design rule of 180 nm: a diffusion-barrier layers TiN (5 nm) / Ti (10 nm) / SiO₂

Рис.7. Рентгеновские рефлектограммы на двух длинах волн $\lambda_1 = 0,154$ нм (1) и $\lambda_2 = 0,139$ нм (2) F⁺-имплантированного образца, доза облучения $9,25 \cdot 10^{15}$ см⁻², энергия 40 кэВ
Fig.7. X-ray reflectograms for two wavelengths $\lambda_1 = 0,154$ nm (1) and $\lambda_2 = 0,139$ nm (2) of F⁺-implanted sample, the radiation dose of $9.25 \cdot 10^{15}$ cm⁻², energy of 40 Kev

На рис.7-8 представлены рефлектограммы кремниевых подложек, имплантированных ионами фтора. Вместо экспоненциально ниспадающей стандартной кривой рефлектометрии (рис.7) на относительно равномерной рефлектограмме (рис.8) получена удобная для математической обработки слабоизменяющаяся функция с выраженными экстремумами в области

углов зеркального отражения $2\theta < 1^\circ$, для которой можно наблюдать радикальное проявление контраста интенсивности полезного сигнала.

КОНКУРЕНТНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА

Представленная концепция обеспечивает конкурентные преимущества на рынке исследовательского научного оборудования. Ее отличает, в первую очередь, универсальность и простота конструкции, обеспечивающие высокую безопасность, ремонтпригодность, легкость модернизации, низкие себестоимость и стоимость эксплуатации. Взаимосвязанный комплекс методов для конкретных измерительных задач твердотельной технологии обуславливает достоверность и однозначность полученных результатов. Кроме того, обеспечена возможность оперативной обработки экспериментальных данных для контроля хода технологического процесса.

Следует особо отметить использование для данных систем нового поколения микрофокусных портативных источников. Специалистами Физического института РАН им. П.Н.Лебедева с участием "МЭЛЗ" и "Ангстрем" разработан микрофокусный рентгеновский генератор нового поколения XRS COMPACT (рис.9), который объединяет целый ряд инновационных решений, обеспечивающих рекордные характеристики, надежность и широкую сферу применения. Микрофокусный рентгеновский генератор – автономный моноблок, содержащий миниатюрную рентгеновскую трубку и высоковольтный модуль. Благодаря уникальной

(15 nm) / Si; porous low-k dielectrics films SiCN (90 nm) / SiOC (180 nm) / Si [8]. Problems of identification and calculation of parameters of unaccounted layers formed during technological processes were solved, corrections of measurements (spectral ellipsometry, etc.) were made. To confirm the results of the reflectometry transmission electron microscopy were used.

Two-wavelength X-ray reflectometry method is highly effective in the study of weakly perturbed (by density) layered structures, in particular produced by ion implantation [9]. Fig.7-8

presents the reflectograms of silicon wafers implanted with fluorine ions. Instead of the exponential drop-down standard reflectometry curve (fig.7) in the relative reflectogram (fig.8) obtained convenient for mathematical processing function with pronounced extreme in the area of specular reflection angles $2\theta < 1^\circ$ for which it is possible to observe a radical manifestation of the contrast of the intensity of desired signal.

COMPETITIVE ADVANTAGES

The presented concept provides a competitive advantage in the

market of scientific research equipment. It is distinguished, in the first place, by the versatility and simplicity of design ensuring high safety, maintainability, ease of upgrading, low prime cost and operating cost. An integrated set of methods for specific measurement tasks of solid state technology determines the accuracy and certainty of the results. In addition, the possibility of rapid processing of experimental data to monitor the production process is provided.

Of particular note is the use in these systems of a new

двухступенчатой системе электростатической фокусировки и встроенной схеме управления высоким напряжением достигается размер фокуса не более 30 мкм. Запатентованная конструкция анодного блока с прозрачной подложкой из монокристаллического алмаза обеспечивает одновременную генерацию потоков рентгеновского и оптического излучений. Это позволяет визуализировать рентгеновский пучок, что значительно повышает безопасность работы с источником и облегчает юстировку измерительной схемы. Применение прозрачной алмазной анодной подложки также обеспечивает максимальную яркость рентгеновского фокуса.

Высокая стабильность положения и малый размер фокусного пятна дают возможность эффективно использовать фокусирующую рентгеновскую оптику, включая изогнутые рентгеновские зеркала и поликапиллярные линзы. Применение микрофокусного источника с зеркальной параболической оптикой позволяет формировать параксиальные монохроматические рентгеновские пучки с расходимостью ~1 мрад и интенсивностью более 10^7 фотон/с.

В конструкции компактного источника (рис.10) применяется воздушная система охлаждения и анод трансмиссионного типа. Анод представляет собой оптически активированную алмазную подложку с нанесенной металлической пленкой, в которой возбуждается рентгеновское излучение. Система позволяет проводить рентгеноструктурные измерения кристаллов и поликристаллов и создавать настольные и мобильные модели дифрактометров, рефлектометров и элементных

Рис.8. Относительная рентгеновская рефлектограмма F⁺-имплантированного образца. Проявление "скрытых" осцилляций в области малых углов $2\theta < 1^\circ$

Fig.8. Relative X-ray reflectogram for F⁺-implanted sample. The hidden oscillations in the region of small angles $2\theta < 1^\circ$

анализаторов, встроенных, в том числе, в производственное оборудование для контроля роста формируемых структур в реальном времени. Высокая яркость рентгеновского источника может быть использована в процессах глубокой литографии и гальванопластики (LIGA), востребованных для создания МЭМС.

generation of portable microfocus X-ray sources. Specialists of LPI RAS involving MELZ and Angstrom developed microfocus X-ray generator of new generation XRS COMPACT (fig.9), which brings together a number of innovative solutions that provide record-breaking performance, reliability and wide scope of application. Microfocus X-ray generator is a standalone device, containing a miniature X-ray tube and high-voltage module. Thanks to the unique two-stage electrostatic focusing system and built-in high voltage control circuit, the focus

Рис.9. Рентгеновский генератор XRS COMPACT

Fig.9. X-ray generator XRS COMPACT

Рис.10. Схема микрофокусного источника: 1 – электронный пучок; 2 – слой металла; 3 – алмазная подложка; 4 – совмещенный фокус; 5 – фокусирующая оптика

Fig.10. Scheme of microfocus source: 1 – electron beam; 2 – metal layer; 3 – diamond substrate; 4 – focus; 5 – focusing optics

ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

Вместо заключения отметим, что решение проблемы импортозамещения применительно к рентгеновскому оборудованию нами рассматривается в нескольких направлениях.

size less than $30\ \mu\text{m}$ is achieved. The patented design of the anode block with a transparent substrate of single-crystal diamond provides simultaneous generation of X-ray and optical radiation. It allows visualization of the X-ray beam, which greatly increases the safety of the source and facilitates the adjustment of the measuring circuit. The use of transparent diamond anode substrate also provides the maximum brightness of the X-ray focus.

The high position stability and small focal spot size allow effectively to use the focusing

X-ray optics, including curved X-ray mirrors and polycapillary lenses. The use of microfocus source with a parabolic mirror optics allows to create a paraxial monochromatic X-ray beams with a divergence of $\sim 1\ \text{mrad}$ and intensity more than $10^7\ \text{photon/s}$.

In the design of a compact source (fig.10) is used air cooling system and transmission type anode. The anode is an optically activated diamond substrate coated with a metal film, in which X-rays are excited. The system allows X-ray diffraction measurements of crystals

Обеспечение высокотехнологичных производств эффективными системами неразрушающей рентгеновской диагностики требует расширения взаимодействия между научными, производственными и учебными организациями для решения технических задач, внедрения новых разработок в производство и подготовки высококвалифицированных специалистов. Только комплекс этих факторов позволит в короткие сроки обеспечить необходимый уровень интеграции для реализации заявленных целей.

По отдельным важным направлениям уже получены значимые результаты. К ним можно отнести создание и развитие новых рентгеновских систем на базе двухволновой схемы измерений и компактных микрофокусных рентгеновских источников нового поколения с алмазными анодными подложками. Для данных систем с учетом требований реального высокотехнологичного производства разработан комплекс взаимодополняющих методов исследования, а также аппаратно-программный комплекс для удаленной организации измерений и экспрессной обработки полученных результатов, что является принципиальным для анализа опасных материалов, в том числе топливных элементов атомных станций.

Представленные в данной статье разработки и предложения подробно обсуждались на круглом столе "Новое поколение микрофокусных рентгеновских источников для неразрушающего контроля и многофункциональные системы рентгеновской диагностики", организованном Физическим

and polycrystals and creation of desktop and mobile models of diffractometers, reflectometers and elemental analyzers. These devices can be embedded, including, in production equipment to control the growth of the structures in real time. High brightness of X-ray source may be used in deep lithography and electroforming (LIGA) to produce MEMS.

PROSPECTS FOR IMPORT SUBSTITUTION

Instead of a conclusion, we will note that the solution to the problem of import substitution

институтом РАН им. П.Н.Лебедева в рамках XIV Международной выставки "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности" (17–19 февраля 2015 года, Москва). Особый отклик получили предложения об организации производств и развитии указанных рентгеновских систем посредством различных форм взаимодействия в рамках БРИКС и ШОС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасименко Н.Н., Рыгалин Б.Н., Смирнов Д.И., Турьянский А.Г. Рентгеновские методы исследования наноструктур и нанобъектов электроники. – Нанотехнологии в электронике. Вып. 2 / Под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2013. 688 с. : Гл. 6. С. 227–264.
2. Турьянский А.Г., Анисимов В.И., Бейлин Н.Д., Герасименко Н.Н., Гижя С.С., Капустянов В.Е., Пиршин И.В., Сенков В.М., Смирнов Д.И. Аналитическая система "COMPLEXRAY" для рентгеновской диагностики наноструктур. – Нанотехника. 2012. № 4. С. 7–12.
3. Герасименко Н.Н., Турьянский А.Г., Cherner Ya.E., Медетов Н.А., Смирнов Д.И. Организация удаленного массового доступа к уникальному оборудованию, сопряженному с виртуальной обучающей системой. – Вестник Челябинского государственного педагогического университета. 2013. № 2. С. 44–51.
4. Touryanski A.G., Vinogradov A.V., Pirshin I.V. X-ray reflectometer. USA Patent No. 6041098, US Cl. 378–70 (2000).
5. Турьянский А.Г., Герасименко Н.Н., Пиршин И.В., Сенков В.М. Многофункциональный рентгеновский рефлектометр исследования наноструктур. – Наноиндустрия. 2009. № 5(17). С. 40–43.
6. Kartashov D.A., Medetov N.A., Smirnov D.I., and Orlov R.S. Effect of the preliminary transformation of experimental data on the accuracy of results of processing X-ray reflectograms. – Russian Microelectronics. 2012. Vol. 41. № 7. P. 437–442.
7. Карташов Д.А., Медетов Н.А., Смирнов Д.И., Орлов Р.С., Иващенко О.В. Повышение эффективности вычислений результатов двухволновой рентгеновской рефлектометрии многослойных структур при использовании графических процессоров и технологии CUDA. – Электронный журнал "Труды МАИ". 2010. Вып. 40. С. 15. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy>.
8. Смирнов Д.И., Гиниятуллин Р.М., Зюльков И.Ю., Медетов Н.А., Герасименко Н.Н. Проблемы измерения параметров элементов и структур современной микро- и нанoeлектроники на примере диффузионно-барьерных структур TiN/Ti. – Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 14. С. 34–42.
9. Герасименко Н.Н., Апрелов С.А., Тарасенков А.Н., Калинин С.В., Турьянский А.Г., Пиршин И.В. Рентгеновская рефлектометрия кремния, имплантированного фтором. – Известия вузов. Электроника. 2007. № 3. С. 70–72.

as applied to X-ray equipment is considered in several ways.

Supplying the hi-tech industries with effective systems of nondestructive X-ray diagnostics demands expansion of interaction between the scientific, production and educational organizations for the solution of technical tasks, introduction of new developments and training of highly qualified specialists. Only the combination of these factors will allow in the short term to provide the necessary level of integration to achieve the stated goals.

On certain important areas already obtained significant

results. These include the creation and development of new X-ray systems based on two-wave measurement and compact microfocus X-ray sources of new generation with diamond anode substrates. To meet the requirements of real high-tech production a set of complementary research methods is developed, as well as hardware and software for remote measurements and rapid processing of the obtained results, which is crucial for the analysis of hazardous materials, including fuel elements of nuclear power plants.

Presented in this article developments and proposals were discussed at the roundtable "The new generation of microfocus X-ray sources for non-destructive testing and multifunctional X-ray diagnostics systems", organized by the LPI RAS in the framework of the XIV International exhibition NDT Russia (17–19 February 2015, Moscow). Special response was received by proposals for the organization of production and development of these X-ray systems through various forms of cooperation within the BRICS and the SCO. ■