

Информационное обеспечение и программная поддержка анализа и обработки голографической информации

А. Г. Карпов¹, В. В. Трофимов¹, А. Г. Федоров^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Российская Федерация, 677027, Республика Саха (Якутия), Якутск, ул. Белинского, 58

Для цитирования: Карпов А. Г., Трофимов В. В., Федоров А. Г. Информационное обеспечение и программная поддержка анализа и обработки голографической информации // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2021. Т. 17. Вып. 4. С. 409–418.
<https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.409>

Представлена реализация информационно-экспертной системы с интегрированной экспериментальной установкой для получения и обработки голографических изображений тонких пленок. Такие изображения позволяют получить информацию об атомной структуре вещества. Уникальность данной реализации состоит в применении комплексных взаимодополняющих методов системного анализа, математического и имитационного моделирования, численного и натурального экспериментов. Работоспособность отдельных элементов информационно-экспертной системы и системы в целом выполнялась применительно к исследованию данных, полученных как на экспериментальной установке, так и расчетным способом.

Ключевые слова: электронная голография, обработка изображений, информационно-экспертная система, диагностирование наноструктур, информационный модуль, инструментальный модуль.

1. Введение. Рассмотрение тонких пленок различных материалов на нано- и микроуровне является актуальным на современном этапе развития науки и техники. При этом получение изображений изучаемых объектов, в том числе в трехмерной форме, очевидно, облегчает само исследование и его представление [1–4]. Интеллектуальная компьютерная поддержка предполагает наличие или создание математического и программного обеспечения, реализующего программу эксперимента. На наш взгляд, такую поддержку можно наиболее эффективно обеспечивать с помощью информационно-экспертной системы [5]. Элементы базы знаний информационно-экспертной системы реализуют обращение к аппаратуре и обработку информации. В функциональном аспекте для исследования объекта в данном случае должны быть выполнены следующие процессы [6, 7]:

- 1) получение голографического изображения;
- 2) реконструкция структуры обследуемого объекта по голографическому изображению;
- 3) определение характеристик объекта по его структуре.

2. Структура информационно-экспертной системы. Информационно-экспертная система состоит из двух модулей: инструментального (рис. 1) и информационного (рис. 2).

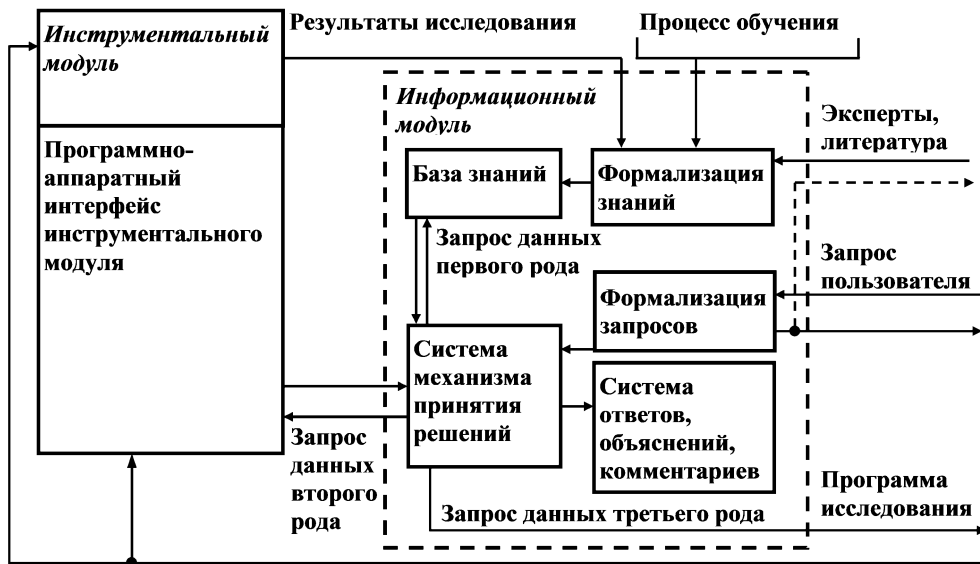


Рис. 1. Структура информационно-экспертной системы

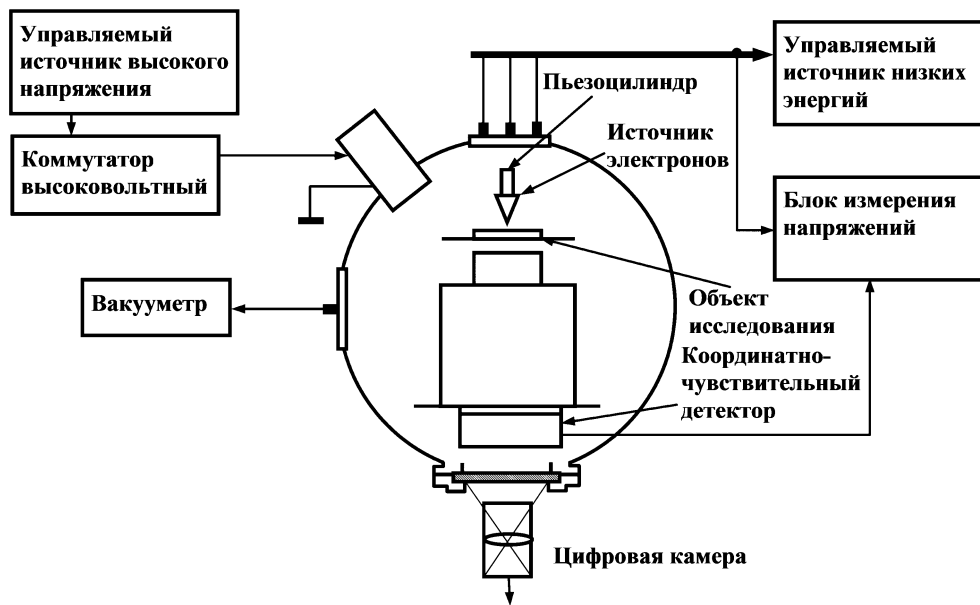


Рис. 2. Структура инструментального модуля [8]

Информационно-экспертная система построена по модульному принципу, это позволяет реализовать различные варианты исследовательских и технологических операций. База знаний содержит модели изучаемых объектов, явлений, процессов. Иными словами, она представляет собой совокупность базы данных и базы правил экспертизы. База данных содержит сведения о проведенных исследованиях, пред-

ставленных в упорядоченном виде. База правил обеспечивает экспертизу выдвинутых гипотез и принятие решений по разрабатываемым проектам. Адаптивность как свойство экспертных систем реализуется в рассматриваемом случае за счет накопления и корректировки данных в базе данных, адекватного изменения критериев принятия решений в задачах экспертной части на основании, во-первых, результатов выработки и экспериментальной проверки гипотез, во-вторых, информации о ходе принятия решений в экспертной части. Запрос данных может реализоваться в таких формах:

- обращение в базу данных, которое удовлетворяется, если требуемая обработка уже выполнялась;
- составление программы экспериментальных исследований, необходимых для решения поставленной задачи, в ходе которых пополняется база данных; затем вновь запускается экспертный модуль, и запросы данных удовлетворяются по первой форме реализации.

Задачи и функции информационно-экспертной системы можно свести к следующему:

- экспертиза, проводимая с целью проверки исследовательских гипотез или реализации разрабатываемых проектов;
- выработка программы экспериментов по проверке гипотезы или реализации проекта с последующим проведением исследования;
- обработка информации, содержащейся в базе данных;
- выдача информации о проводимых и проведенных работах;
- реализация реконструкции структуры изучаемого объекта по голографическим изображениям, полученным в инструментальном модуле (рис. 3), включающая в свой

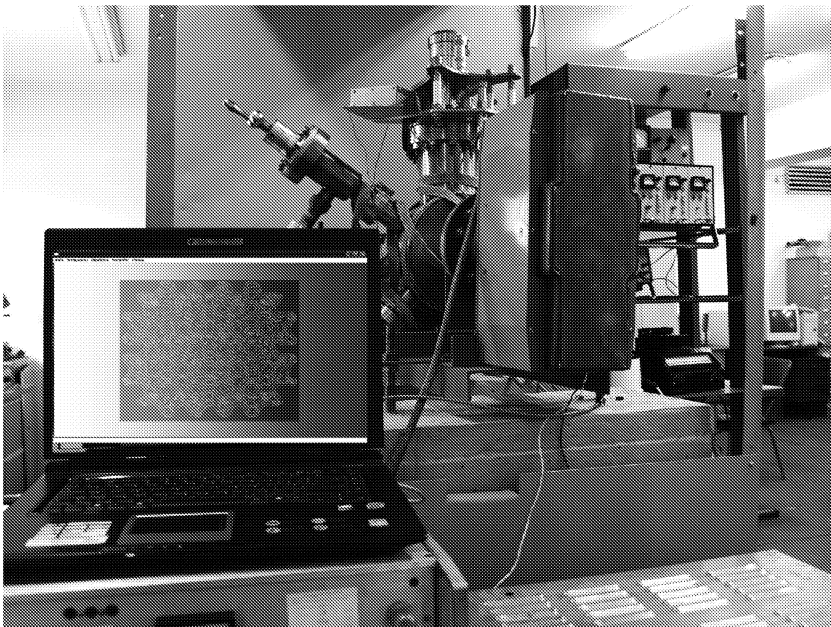


Рис. 3. Общий вид инструментального модуля

состав средства предварительной обработки голографических изображений, средства содержательного исследования реконструированной информации с анализом струк-

тур объектов исследования, средства накопления данных об экспериментах в базе данных.

Решение задачи изучения голографических изображений осуществляется в три этапа. На первом этапе проводится первичная обработка экспериментальных данных, которая включает их нормировку, статистическую обработку, фильтрацию, изменение контрастности, выделение информационной области, выделение границ и объектов на базе медианного фильтра с передачей их интенсивности без искажений и флуктуаций [9, 10]. Второй этап — реконструкция голографического изображения по интерференционной картине [11–13]. Третий этап — подготовка окончательных данных и получение выводов по результатам исследования.

3. Программное обеспечение информационного модуля. Предлагается принцип построения структуры программного обеспечения (рис. 4), которая дает возможность обеспечивать высокую гибкость в отношении:

- использования известных аппаратных средств;
- применения оригинальных аппаратных средств, требующих разработки;
- использования известных алгоритмов и программ, а также их адаптации;
- разработки и реализации оригинальных программных средств;
- компоновки всей системы в целом, в том числе в направлении оптимизации используемых ресурсов.

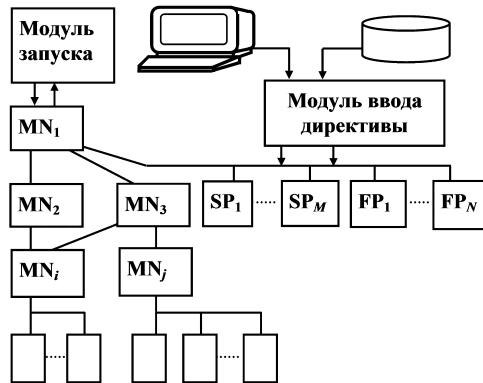


Рис. 4. Структура программного обеспечения

Все модули системы подразделяются на три типа: MN — интерпретатор, SP — системная подпрограмма, FP — функциональная подпрограмма. Обычно системные подпрограммы подключаются к MN первого уровня.

Каждый элемент программного обеспечения может быть отнесен к одному из следующих типов:

- системная программа, обеспечивающая связь с соответствующим устройством и включаемая в состав используемой операционной системы;
- системная подпрограмма — модуль, обслуживающий работу специализированного программного обеспечения;
- функциональная подпрограмма, выполняющая задание управляющих воздействий на физическую установку, ввод и обработку данных, вывод на внешнюю память и на другие системные устройства компьютера;
- модули базы данных информационно-экспертной системы.

Структура системы древовидная. Это достигается за счет того, что структуры модулей интерпретаторов те же, что и у других программных модулей, и могут подключаться к интерпретаторам более высокого уровня. Все программные модули, доступные пользователю, включены в систему и вызываются к исполнению единообразно. Модули системы имеют фиксированную структуру. Структура программного обеспечения, связанного с работой инструментального модуля, представлена на рис. 5.



Рис. 5. Структура программного обеспечения инструментального модуля

Принципы, заложенные в структуру программного обеспечения информационно-экспертной системы, обеспечивают ее модификацию путем замены модулей и блоков с возможностью последующего гибкого развития всех основных компонентов при появлении новых решений и эволюции технологий, а также проводимых с их помощью исследований. Для реконструкции голографических изображений изучаемого объекта проведены разработка алгоритмов и реализация регистрации изображений. Обеспечено сравнение расчетных и экспериментальных данных (изображений). Принцип работы алгоритма реконструкции основан на методике Фурье-анализа с возможностью работы алгоритма в реальном масштабе времени после предварительной обработки изображений.

4. Тестирование информационно-экспертной системы для исследования пространственной структуры тонких пленок по голографическим изображениям. Тестирование информационно-экспертной системы состоит из двух взаимосвязанных задач — тестирования инструментального модуля и тестирования информационного модуля.

4.1. Интерфейс программного обеспечения для исследования пространственной структуры тонких металлических пленок. Интерфейс программного обеспечения реализован по классическому варианту (рис. 6) с помощью библиотеки wxWidgets [14]. Меню «Файл» и «Помощь» выполняют стандартные действия.

Меню «Инструменты» представлено на рис. 7.

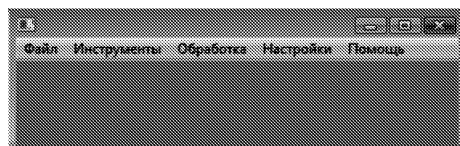


Рис. 6. Вид окна программы

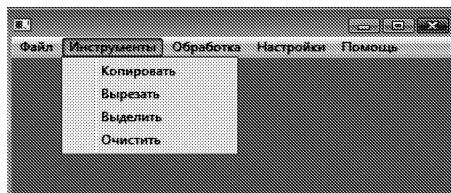


Рис. 7. Меню «Инструменты»

Пункты «Копировать» и «Вырезать» выполняют копирование области экрана или «вырезание» выделенной части экрана. Пункт «Выделение» автоматически выделяет всю область экрана для последующего ее вырезания или копирования. Пункт «Очистить области экрана» выполняет очистку.

Меню «Обработка» представлено на рис. 8. Оно включает пункты «Реконструкция К–Г» и «МедианнаяФ». Пункт «Реконструкция К–Г» выполняет реконструкцию пространственной структуры исследуемого образца, пункт «МедианнаяФ» — медианную фильтрацию.

Меню «Настройки» представлено на рис. 9. Оно выполняет операции изменения контрастности, яркости и осуществляет сглаживание цифровых изображений.

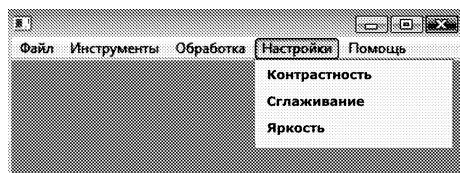


Рис. 8. Меню «Обработка»

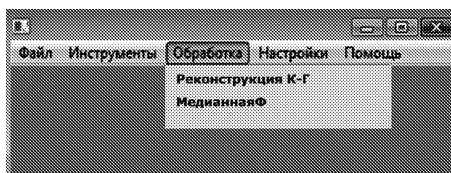


Рис. 9. Меню «Настройки»

4.2. Тестирование программного обеспечения обработки голографической информации. Проверка работоспособности программного обеспечения информационно-экспертной системы для исследования пространственной структуры тонких пленок на наноуровне, включая моделирование голографических изображений, проводилась на перспективном в настоящее время материале — графене. По данной структуре графена было рассчитано модельное изображение, показанное на рис. 10.

Результат регистрации, предварительной обработки и модельной коррекции голографического изображения графена представлен на рис. 11. Реконструированная трехмерная структура пленки графена изображена на рис. 12.

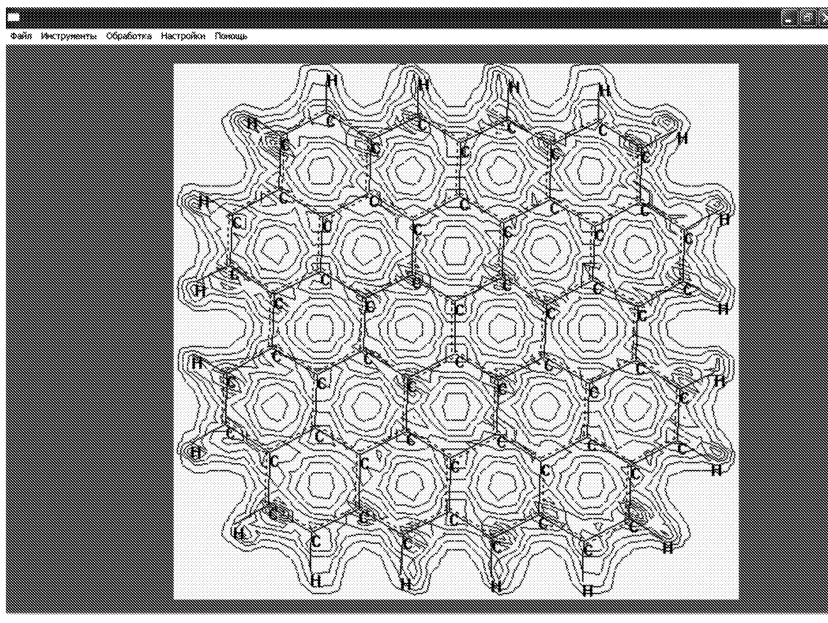


Рис. 10. Модельное дифракционное изображение графена

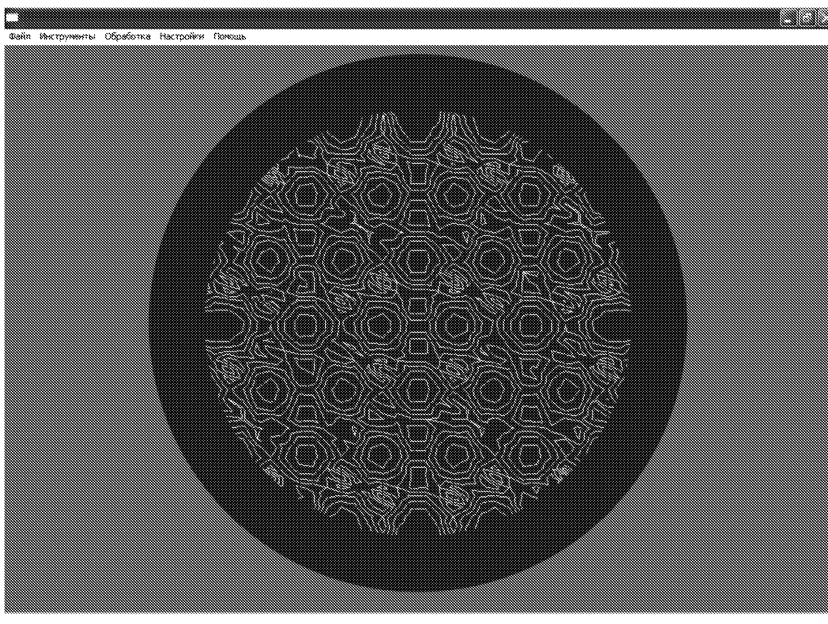


Рис. 11. Регистрация и обработка изображения графена

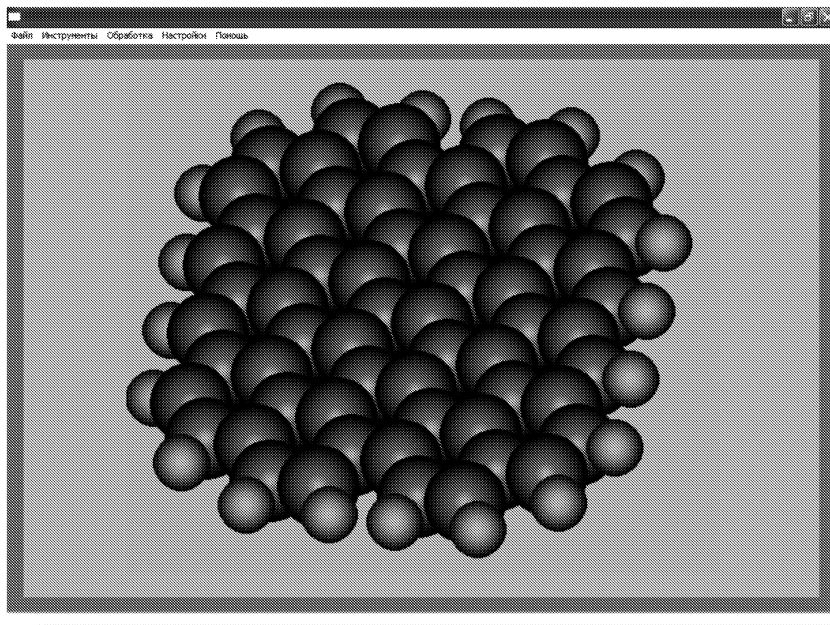


Рис. 12. Реконструкция трехмерной структуры пленки графена

5. Заключение. Важнейший аспект подхода к решению поставленной проблемы — применение комплексных, взаимодополняющих методов: использование на всех этапах проектирования, разработки и реализации элементов информационно-экспертной системы методов системного анализа, математического и имитационного моделирования, численного и натурального экспериментов. При создании инструментальных, аппаратных и программных средств, ориентированных на неразрушающее исследование 3D-структуры объектов, мы исходили из того, что наиболее полная информация об объекте исследования может быть получена также только при комплексном подходе к анализу его структуры по взаимодополняющим методикам, позволяющим получить данные в виде объемных изображений (3D). Предложенная система соответствующих методов — электронная голография и низкоэнергетическая электронная микроскопия — помогут решить исследовательские задачи. Апробация отдельных элементов информационно-экспертной системы и системы в целом, проверка их работоспособности выполнялись применительно к изучению голографических изображений, полученных как на экспериментальной установке, так и расчетным способом. Результаты тестирования соответствуют данным, представленным в [15].

Литература

1. *Карташев В. А., Карташев В. В.* Изображение нанорельефа при интерпретации измерений методом имитационного моделирования // *Нано- и микросистемная техника.* 2016. Т. 18. С. 131–133.
2. *Игнатов И. И., Мосин О. В.* Исследование структурно-функциональных свойств фуллерен-содержащего минерала шунгита и микрокристаллического алюмосиликата цеолита методами элементного анализа, ПЭМ, ИК- и ДНЭС-спектроскопии // *Нано- и микросистемная техника.* 2016. Т. 18. С. 357–366.
3. *Егоров О. В.* *Техническая микроскопия.* М.: Техносфера, 2007. 376 с.
4. *Egorov N. V., Karпов A. G., Antonova L. I., Fedorov A. G., Trofimov V. V.* Technique for investigating the spatial structure of thin films at a nanolevel // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, synchrotron and neutron techniques.* 2011. Vol. 5. N 5. P. 992–995.

5. *Егоров Н. В., Карпов А. Г.* Диагностические информационно-экспертные системы. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. 490 с.
6. *Edgar V., Lawrence F. A., David C. J.* Introduction to electron holography. New York: Kluwer Academic/Plenum Publ. 1999. 354 p.
7. *Fink H.-W., Stocker W., Schmid H.* Holography with low-energy electrons // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Vol. 65. N 10. P. 1204–1206.
8. *Егоров Н. В., Антонова Л. И., Татаринцев П. С.* и др. Безлинзовый низкоэнергетический проекционный микроскоп для осевой электронной голографии (кедроскоп) // *Приборы и техника эксперимента.* 2000. № 5. С. 157–158.
9. *Gonzalez R., Woods R.* Digital image processing: international version. 3rd ed. Upper Saddle River, New York, USA: Prentice Hall, 2008. 976 p.
10. *Miano J.* Compressed image file formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP ACM. Boston: Addison Wesley Longman Press, 1999. 264 p.
11. *Morin R., Degiovanni A.* Interferometry with low-energy electrons // *JVST B — Microelectronics and nanometer structures.* 1995. Vol. 13(2). P. 407–409.
12. *Nussbaumer H. J.* Fast Fourier transform and convolution algorithms. Berlin; Heidelberg: Springer, 1981. 276 p.
13. *Федоров А. Г., Карпов А. Г.* Численное восстановление голографических изображений для исследования структуры тонких пленок // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления.* 2011. Вып. 2. С. 76–80.
14. *Smart Ju., Hock K., Csotor S.* Cross-platform GUI programming with wxWidgets. Upper Saddle River, New York, USA: Prentice Hall as part of Bruce Perens' Open Source Series, 2006. 700 p.
15. *Zharkov S. M.* Methods of modern transmission electron microscopy in material study // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry.* 2009. Vol. 4. Iss. 2. P. 294–306.

Статья поступила в редакцию 8 октября 2020 г.

Статья принята к печати 13 октября 2021 г.

Контактная информация:

Карпов Андрей Геннадьевич — д-р техн. наук, проф.; a.g.karpov@spbu.ru

Трофимов Василий Валерьевич — ст. преп.; v.v.trofimov@spbu.ru

Федоров Артур Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; ag.fedorov@s-vfu.ru

Information and program support of the analysis and processing of holographic information

A. G. Karpov¹, V. V. Trofimov¹, A. G. Fedorov^{1,2}

¹ St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² North-Eastern Federal University, 58, ul. Belinskogo, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677027, Russian Federation

For citation: Karpov A. G., Trofimov V. V., Fedorov A. G. Information and program support of the analysis and processing of holographic information. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2021, vol. 17, iss. 4, pp. 409–418. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu10.2021.409> (In Russian)

The research of thin films of various materials on nano- and microlevel is undoubtedly topical. Three-dimensional images of thin films can significantly increase the level of the received results. Intellectual computer support of researches assumes the existence or creation of mathematical and the software that implements the experimental program. Such support can most effectively be realized with the help of an information and expert system, based on a holographic electron microscope. In this work we presented an information and expert system for solving this problem. When creating instrumental, hardware and software tools for non-destructive research of the 3D structure of objects, we proceeded from the assumption that the most complete information about the object of research can be obtained only with a

comprehensive approach to the analysis of the structure of the object using complementary techniques that allow obtaining data as a 3D image.

Keywords: electronic holography, image processing, information-expert system, diagnostics of nanostructures, information module, tool module.

References

1. Kartashev V. A., Kartashev V. V. Izobrazhenie nanorel'efa pri interpretacii izmerenij metodom imitacionnogo modelirovaniya [Obtaining of nanoscale surface images by simulation of stm measuring process]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika [Nano- and microsystem technology]*, 2016, vol. 18, pp. 131–133. (In Russian)
2. Ignatov I. I., Mosin O. V. Issledovanie strukturno-funktional'nyh svoystv fullerensoderzhashchego minerala shungita i mikrokristallicheskogo alyumosilikata ceolita metodami elementnogo analiza, PEM, IK i DNES-spektroskopii [Research of the structural-functional properties of the fullerene-like shungite and micro-crystalline alumosilicate mineral zeolite by elemental analysis, TEM, IR and DNES]. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika [Nano- and microsystem technology]*, 2016, vol. 18, pp. 357–366. (In Russian)
3. Egorov O. V. *Tekhnicheskaya mikroskopiya [Technical microscopy]*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007, 376 p. (In Russian)
4. Egorov N. V., Karpov A. G., Antonova L. I., Fedorov A. G., Trofimov V. V. Technique for investigating the spatial structure of thin films at a nanolevel. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, synchrotron and neutron techniques*, 2011, vol. 5, no. 5, pp. 992–995.
5. Egorov N. V., Karpov A. G. *Diagnosticheskie informacionno-ekspertnye sistemy [Diagnostic information and expert systems]*. St. Petersburg, St. Petersburg University Press, 2002, 490 p. (In Russian)
6. Edgar V., Lawrence F. A., David C. J. *Introduction to electron holography*. New York, Kluwer Academic/Plenum Publ., 1999, 354 p.
7. Fink H.-W., Stocker W., Schmid H. Holography with low-energy electrons. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, vol. 65, no. 10, pp. 1204–1206.
8. Egorov N. V., Antonova L. I., Tatarinov P. S. et al. Bezzinovyj nizkoenergeticheskij proekcionnyj mikroskop dlya osevoj elektronnoj golografii (kendroskop) [Lens-free low-energy projection microscope for axial electronic holography (kendroscope)]. *Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and experimental techniques]*, 2000, no. 5, pp. 157–158. (In Russian)
9. Gonzalez R., Woods R. *Digital image processing. International version*. 3rd ed. Upper Saddle River, New York, USA, Prentice Hall Publ., 2008, 976 p.
10. Miano J. *Compressed image file formats: JPEG, PNG, GIF, XBM, BMP ACM*. Boston, Addison Wesley Longman Press, 1999, 264 p.
11. Morin R., Degiovanni A. Interferometry with low-energy electrons. *JVST B — Microelectronics and nanometer structures*, 1995, vol. 13(2), pp. 407–409.
12. Nussbaumer H. J. *Fast Fourier transform and convolution algorithms*. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 1981, 276 p.
13. Fedorov A. G., Karpov A. G. Chislennoe vosstanovlenie golograficheskikh izobrazhenii dlia issledovaniia struktury tonkikh plenok [Numerical restoration of holographic images for research of structure of thin films]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2011, iss. 2, pp. 76–80. (In Russian)
14. Smart Ju., Hock K., Csomor S. *Cross-platform GUI programming with wxWidgets*. Upper Saddle River, New York, USA, Prentice Hall Publ. as part of Bruce Perens' Open Source Series, 2006, 700 p.
15. Zharkov S. M. Methods of modern transmission electron microscopy in material study. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2009, vol. 4, iss. 2, pp. 294–306.

Received: October 8, 2020.

Accepted: October 13, 2021.

Authors' information:

Andrey G. Karpov — Dr. Sci. in Engineering, Professor; a.g.karpov@spbu.ru

Vasily V. Trofimov — Senior Lecturer; v.v.trofimov@spbu.ru

Arthur G. Fedorov — PhD in Engineering, Associate Professor; ag.fedorov@s-vfu.ru