https://doi.org/10.15350/17270529.2023.1.12

УДК 543.428.2

Разработка программного комплекса для количественного анализа химического состава по Оже-электронным спектрам

Э. Ф. Хаметова[1,2], О. Р. Бакиева[2]

[1] Удмуртский государственный университет, Россия, 426034, Ижевск, ул. Университетская, 1

[2] Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

Аннотация. В настоящее время в области микроэлектроники активно применяется реверс-инжиниринг. Обычно для этого используют методы послойного анализа, которые позволяют определять не только дефекты производства, но и восстанавливать архитектуру микросхем. Одним из таких методов является Оже-электронная спектроскопия (ОЭС) с послойным ионным травлением. Данная работа посвящена разработке программного комплекса по обработке и анализу экспериментальных Оже-электронных спектров. В ходе работы была выявлена некоторая проблематика как в обнаружении сигнала в спектре (идентификация слабого сигнала), так и в принадлежности сигнала конкретному химическому элементу. На сегодняшний день разработанный программный комплекс проводит качественный и количественный анализ экспериментальных данных в полуавтоматическом режиме.

Ключевые слова: программное обеспечение, Оже-электронная спектроскопия, обработка и анализ данных, Python.

✉ *Элина Хаметова, e-mail: elinaphanilevna851@gmail.com*

Development of a Software Package for Quantitative Analysis of Chemical Composition by Auger-electron Spectra

Elina F. Khametova[1,2], Olga R. Bakieva[2]

[1] Udmurt State University (1, Universitetskaya St., Izhevsk, 426034, Russian Federation)

[2] Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St, Izhevsk, 426067, Russian Federation)

Summary. Currently, reverse engineering is actively used in the field of microelectronics. Layer-by-layer methods are usually used to detect manufacturing defects and restore the architecture of microcircuits. One of the methods is Auger electron spectroscopy (AES) with layer-by-layer ion etching. It is known that each atom has its own electronic structure and, accordingly, its own Auger transition energy; this is a characteristic value by which the sort of an atom is determined. Thus, it is possible to draw a conclusion about the chemical composition of the surface. The present work is devoted to the development of a program for the processing and analysis of experimental Auger electron spectra. In the course of the work, some problems were identified both in determining the presence of a signal (identification of a weak signal) and belonging of the signal to a specific chemical element. To date, the developed program is capable of performing a qualitative and quantitative analysis of experimental data in a semi-automatic mode. The program input data are in the form of a two-column text file that contains the conditions and output data of the experiment. The output data of the developed program are the information about the chemical composition of the surface and the concentration of identified chemical elements displayed on the screen. The work of the program was certified based on the experimental data obtained for different contents of chemical elements. Using the program, both the chemical composition of each test object and the concentration of all identified chemical elements were correctly determined.

Keywords: software, Auger electron spectroscopy, data processing and analysis, Python.

✉ *Elina Khametova, e-mail: elinaphanilevna851@gmail.com*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в области микроэлектроники актуальна проблема реверс-инжиниринга [1 – 3], задача которой заключается в выявлении дефектов и восстановлении архитектуры чипов, по которой можно будет воспроизводить их производство. Для воссоздания структуры чипа необходимо определить тип легирующего элемента и его процентное содержание в каждом блоке схемы. Обычно для этого используют методы

послойного анализа, такие как вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС) [4 – 6], метод атомно-эмиссионной спектрометрии с тлеющим разрядом [7 – 9], рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия [10, 11], метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР) [12 – 14]. Эти методы основаны на анализе либо вторичных ионов, либо вылетевших с поверхности образца электронов, либо упругого рассеяния быстрых ионов атомами исследуемого вещества. В данной работе будет рассмотрен метод Оже-электронной спектроскопии (ОЭС) с послойным травлением ионами аргона [15 – 17].

Оже-электронная спектроскопия – метод спектроскопии, который основан на анализе распределения по энергии электронов, возникших в результате Оже-эффекта, то есть испускания электрона ионизованным атомом после образования вакансии в его внутренней электронной оболочке [18, 19]. Как известно, каждый атом имеет свою электронную структуру и соответственно свою энергию Оже-перехода, это характеристическая величина, по которой определяют химическую сортность атома. Таким образом, можно сделать вывод о наличии на поверхности того или иного элемента. Особенностью ОЭС является малая глубина анализа 1 – 3 нм. Локальность метода определяется как по глубине, так и по площади – до 1 мкм^2. В результате проведения эксперимента исследователь получает спектр, содержащий информацию о химических элементах в пределах точки анализа.

Анализ литературных данных показал, что в настоящее время имеющаяся программная база по обработке и анализу Оже-электронных спектров, состоит из программных продуктов от компаний Jeol (Япония) и Omicron (США), которые являются зарубежными производителями научного оборудования, в том числе и Оже-электронных спектрометров. Однако использование данного программного обеспечения подразумевает работу на конкретном лабораторном оборудовании, то есть ПО поставляется исключительно в комплекте с прибором. Кроме того, существует проблема конфликта версий различных операционных систем и соответствующего программного обеспечения.

На сегодняшний день для обработки и анализа экспериментальных Оже-электронных спектров в России отсутствует специализированное официально зарегистрированное программное обеспечение. Исследователи проводят все необходимые расчеты вручную, а при большом объеме экспериментальных данных этот процесс является достаточно трудоемким. Особенно остро эта проблема стоит при анализе элементного состава образца по глубине, когда необходимо получить и проанализировать данные после каждого этапа ионного травления. Кроме того, часто стоит задача анализа химического состава не только по глубине, но и по площади образца, тогда количество спектров, которые необходимо обработать, может возрасти на порядок. В этом случае фактор скорости обработки эксперимента является определяющим, что обуславливает необходимость в разработке соответствующего автоматизированного программного обеспечения.

Данная работа посвящена разработке программного комплекса, который позволит в автоматическом режиме проводить качественный и количественный анализ химического состава по Оже-электронным спектрам и не будет привязан к лабораторному оборудованию.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предлагаемый в данной работе программный комплекс предназначен для проведения анализа Оже-электронных спектров. Программа написана на высокоуровневом языке программирования – Python [20, 21].

Пользователь имеет возможность построить экспериментальные данные, определить химический состав поверхности и провести расчет процентного содержания идентифицированных химических элементов, а также получить результаты проведенного анализа экспериментальных данных.

В состав программы входят следующие модули:

- база коэффициентов элементной чувствительности;
- модуль качественного анализа;
- модуль количественного анализа.

База коэффициентов элементной чувствительности была оцифрована из атласа эталонных спектров чистых элементов и заложена в программный код [22].

Модуль качественного анализа дает результат о химическом составе образца и работает следующим образом. На вход в программу загружаются экспериментальные данные. Оже-спектры наиболее часто представляются в виде дифференциального сигнала $dN(E)/dE$, при котором за энергетическое положение пика условно принято считать положение минимума высокоэнергетического отрицательного отклонения. Такое положение по энергии будет отличаться от энергии пика, полученного в интегральном режиме на величину, которая зависит от ширины пика. Кинетическая энергия Оже-перехода *ABC* выражается в виде:

$$E_{ABC} = E_A - E_B - E_C - F(BC) + R_x^{int} + R_x^{ext},$$

где E_i – энергия связи *i*-го энергетического уровня атома, $F(BC)$ – энергия взаимодействия между дырками *B* и *C* в конечном атомном состоянии, R_x^{int} и R_x^{ext} – энергии внутриатомной и внеатомной релаксаций соответственно. Она возникает вследствие дополнительного экранирования атомного остова, которое необходимо учитывать при наличии дырки на остовном уровне, и обусловлена притяжением или "релаксацией" внешних электронных орбиталей к этому остову. Слагаемые *F* и *R* часто имеют значительную величину, что может приводить к отклонению положения Оже-пика от табличного (эталонного) значения, что приводит к необходимости введения интервала, в котором может быть обнаружен данный химический элемент.

Сначала производится графическое построение данных на экране, где оператор выделяет необходимые пики спектра (за положение пика условно принято считать положение минимума высокоэнергетического отрицательного отклонения).

Для определения химического состава необходимо провести следующие действия для каждого выделенного пика. Используя полученное значение энергетического положения выделенного пика, из базы коэффициентов элементной чувствительности оператору выводится список предполагаемых химических элементов в пределах доверительного интервала (±5 эВ). Из данного списка оператору необходимо выбрать предполагаемый химический элемент.

Модуль количественного анализа основан на методе коэффициентов элементной чувствительности. Согласно данному методу интенсивность Оже-сигнала I_i элемента *i* пропорциональна произведению его концентрации на поверхности X_i на коэффициент элементной чувствительности S_i [18, 19]:

$$I_i = S_i X_i .$$

Коэффициент элементной чувствительности определяется из атласов эталонных спектров чистых элементов [22]. Все спектры в этих атласах сняты в идентичных условиях и перед записью каждого спектра производится калибровка.

Расчет процентного содержания идентифицированных химических элементов проводится в соответствии с выражением [18, 19]:

$$N_z = \frac{I_z / S_z}{\sum_{i=1}^{n} I_i / S_i},$$

где S_i, S_z – коэффициенты элементной чувствительности к элементу *i* и *z*, I_i, I_z – амплитуды Оже-пиков элементов *i* и *z* соответственно, *n* – число элементов в исследуемой системе. Погрешность определения относительной атомной концентрации составляет 5 %.

Входными данными программы является двухколоночный текстовый файл, в котором записаны условия и выходные данные эксперимента. Выходными данными разработанной программы является выводимая на экран информация о химическом составе поверхности и процент содержания того или иного химического элемента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для демонстрации работы программного комплекса были выбраны несколько экспериментальных данных с различным содержанием химических элементов. На рис. 1 показаны экспериментальные Оже-спектры рассматриваемых систем, где наблюдаются как пики с большой амплитудой, так и малоинтенсивные пики, амплитуды которых находятся на уровне шума.

С помощью программы был проведен качественный и количественный анализ. На рис. 1, *a* были обнаружены сигналы углерода (энергия Оже KLL перехода 268 эВ) (1) и кислорода (энергия Оже KLL перехода 508 эВ) (2). Согласно результатам работы программы содержание углерода составляет 79 ат.%, а кислорода – 21 ат.%. На рис. 1, *b* обнаружены сигналы кислорода (энергия Оже KLL перехода 511 эВ) (1) и триплет кобальта (энергия Оже LMM перехода 768 эВ) (2). В результате расчетов было определено, что содержание кислорода составляет 87 ат.%, а кобальта – 13 ат.%. На рис. 1, *c* выделены сигналы углерода (энергия Оже KLL перехода 272 эВ) (1), хрома (энергия Оже LMM перехода 492 эВ) (2), кислорода (энергия Оже KLL перехода 511 эВ) (3) и триплет никеля (энергия Оже LMM перехода 843 эВ) (5). Согласно расчетам программы содержание углерода составляет 14 ат.%, хрома – 8 ат.%, кислорода – 29 ат.%, а никеля – 49 ат.%. На рис. 1, *d* обнаружены сигналы углерода (энергия Оже KLL перехода 273 эВ) (1), кислорода (энергия Оже KLL перехода 514 эВ) (2) и триплет железа (энергия Оже LMM перехода 702 эВ) (6). Согласно расчетам программы содержание углерода составляет 8 ат.%, кислорода – 30 ат.%, а железа – 62 ат.%.

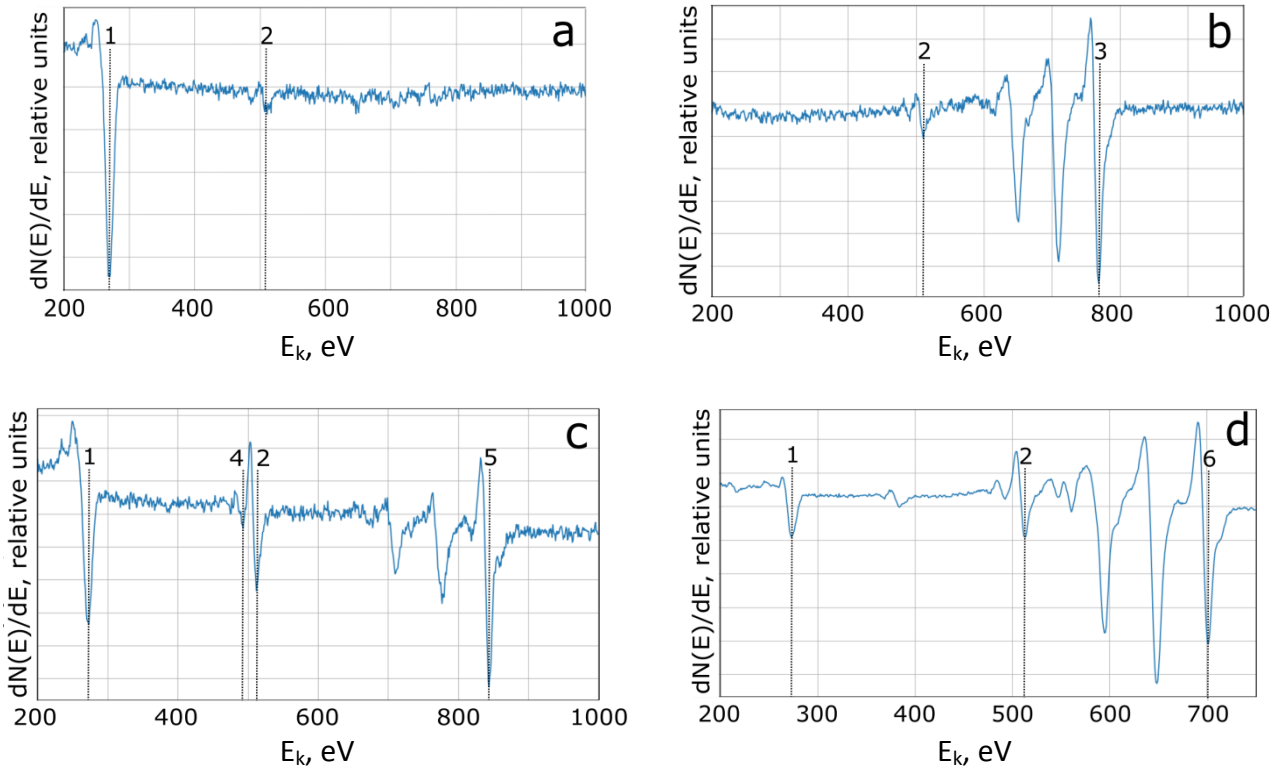

Рис. 1 Экспериментальные Оже-электронные спектры рассматриваемых систем:
1 - C, 2 - O, 3 - Co, 4 -Cr, 5 - Ni, 6 - Fe
Fig. 1 Experimental Auger electron spectra of the systems under consideration:
1 - C, 2 - O, 3 - Co, 4 - Cr, 5 - Ni, 6 - Fe

В ходе работы по созданию программного комплекса для анализа Оже-электронных спектров возник ряд трудностей. Как упоминалось выше, существует проблема определения полезного сигнала на фоне шума, поскольку амплитуда Оже-пика может быть сравнима с

фоновыми помехами. Кроме того, необходимо решить проблему определения самого химического элемента. В зависимости от химическог-о, структурного состояния и проводимости поверхности Оже-пики могут быть смещены по энергетическому положению. Данная проблема была решена введением доверительного интервала в шкале кинетических энергий, по которому определяются предполагаемые химические элементы. Оператору предлагается выбрать из списка те элементы, которые могут быть обнаружены в некотором диапазоне от зарегистрированного положения сигнала. Однако к настоящему моменту нет строгого описания для определения величины данного доверительного интервала. Кроме того, существует проблема перекрытия сигналов химических элементов. В этом случае сигнал одного элемента может вносить свой вклад в сигнал другого, что искажает результаты анализа. Данная проблема также требует решения в предлагаемом программном комплексе.

В разработанном программном комплексе на данный момент отсутствует графический интерфейс пользователя, и приложение не упаковано в автономный исполняемый файл. Но в дальнейшем работа с программой будет возможна на персональном компьютере (ПК) под управлением ОС Windows.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены этапы разработки программного комплекса для анализа экспериментальных Оже-электронных спектров. На данный момент в программе реализованы модули качественного и количественного анализа. Однако отсутствует графический интерфейс для удобства пользования. Таким образом, следующим этапом планируется разработка графического интерфейса пользователя и упаковка Python-кода в автономный исполняемый файл. Кроме того, планируется решить проблему идентификации слабого сигнала и повысить точность определения химического элемента до 1 %.

На данный момент программа работает в полуавтоматическом режиме. В дальнейшем планируется усовершенствовать программный код и сделать программный комплекс полностью автоматическим. На сегодняшний день перспективным направлением является применение нейронных сетей и искусственного интеллекта к задачам, где обычные алгоритмы уже малоэффективны. Решение проблемы автоматического определения программой наличия сигналов, положения пиков, и соответственно химического состава поверхности относится к таким задачам. Поэтому одним из дальнейших этапов данной работы является создание нейронной сети для автоматического проведения количественного анализа по экспериментальным Оже-электронным спектрам, полученным как в дифференциальном, так и в интегральном режиме.

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ гос. регистрации 121030100002-0)

Studies were performed using equipment of Core shared research facilities "Center of physical and physical-chemical methods of analysis, investigations of properties and characteristics surface, nanostructures, materials and samples" of UdmFRC UB RAS within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state registration number 121030100002-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang X., Wang B., Zhang Q., Sun Y., Wang E., Luo H., Wu Y., Gu L., Li H., Liu K. Grain-Boundary Engineering of Monolayer MoS2 for Energy-Efficient Lateral Synaptic Devices // Advance Materials, 2021, vol. 33, 2102435. https://doi.org/10.1002/adma.202102435

2. Lindfors P. A., Kee R. W., & Jones D. L. Applications of Auger Electron Spectroscopy in Microelectronics // Microelectronics Processing: Inorganic Materials Characterization, 1986, pp. 118-143. https://doi.org/10.1021/bk-1986-0295.ch007

3. Jiang C., Zhou J., Li H., . Tan L., Li M., Tress W., Ding L., Grätzel M., Yi C. Double Layer Composite Electrode Strategy for Efficient Perovskite Solar Cells with Excellent Reverse-Bias Stability // Nano-Micro Letters, 2023, vol. 15, 12. https://doi.org/10.1007/s40820-022-00985-4

4. Zhou Y., Su M., Yu X., Zhang Y., Wang J.-G., Ren X., Cao R., Xu W., Baer D. R., Du Y., Borodin O., Wang Y., Wang X.-L., Xu K., Xu Z., Wang C., Zhu Z. Real-time mass spectrometric characterization of the solid-electrolyte interphase of a lithium-ion battery // Nature Nanotechnology, 2020, vol. 15, pp. 224-230. https://doi.org/10.1038/s41565-019-0618-4

5. Audinot J.-N., Philipp P., De Castro O., Biesemeier A., Hoang Q.-H., Wirtz T. Highest resolution chemical imaging based on secondary ion mass spectrometry performed on the helium ion microscope // Reports on Progress in Physics, 2021, vol. 84, 105901. https://doi.org/10.1088/1361-6633/ac1e32

6. Ratner B. D., Castner D. G. Surface Properties and Surface Characterization of Biomaterials // In book: Biomaterials Science (Fourth Edition), 2020, Chapter 1.2.4, pp. 53-75. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816137-1.00006-4

7. Oxley E., Yang C., Harrison W. W. Quantitative depth analysis using microsecond pulsed glow discharge atomic emission spectrometry // Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2000, vol. 15, pp. 1241-1245. https://doi.org/10.1039/B00196-9K

8. Dempster M. A., Marcus R. K. Analysis of amino acids and organometallic compounds by particle beam-hollow cathode glow discharge atomic emission spectrometry // Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2000, vol. 15, pp. 43-48. https://doi.org/10.1039/A905812E

9. Wagatsuma K., Hirokawa K. Observation of Cu-Ni alloy surfaces by low wattage glow discharge emission spectrometry // Surface and Interface Analysis, 1984, vol. 6, pp. 167-170. https://doi.org/10.1002/sia.740060404

10. Krishna D. N. G., Philip J. Review on surface-characterization applications of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Recent developments and challenges // Applied Surface Science Advances, 2022, vol. 12, 100332. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100332

11. Uskoković V. X-ray photoelectron and ion scattering spectroscopic surface analyses of amorphous and crystalline calcium phosphate nanoparticles with different chemical histories // Physical Chemistry Chemical Physics, 2020, vol. 22, pp. 5531-5547. https://doi.org/10.1039/C9CP06529F

12. Claessens N., Khan Z. Z., Haghighi N. R., Delabie A., Vantomme A., Vandervorst W., Meersschaut J. Quantification of area-selective deposition on nanometer-scale patterns using Rutherford backscattering spectrometry // Scientific Reports, 2022, vol. 12, 17770. https://doi.org/10.1038/s41598-022-22645-8

REFERENCES

1. Wang X., Wang B., Zhang Q., Sun Y., Wang E., Luo H., Wu Y., Gu L., Li H., Liu K. Grain-Boundary Engineering of Monolayer MoS2 for Energy-Efficient Lateral Synaptic Devices. *Advance Materials*, 2021, vol. 33, 2102435. https://doi.org/10.1002/adma.202102435

2. Lindfors P. A., Kee R. W., & Jones D. L. Applications of Auger Electron Spectroscopy in Microelectronics. *Microelectronics Processing: Inorganic Materials Characterization*, 1986, pp. 118-143. https://doi.org/10.1021/bk-1986-0295.ch007

3. Jiang C., Zhou J., Li H., . Tan L., Li M., Tress W., Ding L., Grätzel M., Yi C. Double Layer Composite Electrode Strategy for Efficient Perovskite Solar Cells with Excellent Reverse-Bias Stability. *Nano-Micro Letters*, 2023, vol. 15, 12. https://doi.org/10.1007/s40820-022-00985-4

4. Zhou Y., Su M., Yu X., Zhang Y., Wang J.-G., Ren X., Cao R., Xu W., Baer D. R., Du Y., Borodin O., Wang Y., Wang X.-L., Xu K., Xu Z., Wang C., Zhu Z. Real-time mass spectrometric characterization of the solid-electrolyte interphase of a lithium-ion battery. *Nature Nanotechnology*, 2020, vol. 15, pp. 224-230. https://doi.org/10.1038/s41565-019-0618-4

5. Audinot J.-N., Philipp P., De Castro O., Biesemeier A., Hoang Q.-H., Wirtz T. Highest resolution chemical imaging based on secondary ion mass spectrometry performed on the helium ion microscope. *Reports on Progress in Physics*, 2021, vol. 84, 105901. https://doi.org/10.1088/1361-6633/ac1e32

6. Ratner B. D., Castner D. G. Surface Properties and Surface Characterization of Biomaterials. In book: *Biomaterials Science* (Fourth Edition), 2020, Chapter 1.2.4, pp. 53-75. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816137-1.00006-4

7. Oxley E., Yang C., Harrison W. W. Quantitative depth analysis using microsecond pulsed glow discharge atomic emission spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2000, vol. 15, pp. 1241-1245. https://doi.org/10.1039/B00196-9K

8. Dempster M. A., Marcus R. K. Analysis of amino acids and organometallic compounds by particle beam-hollow cathode glow discharge atomic emission spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2000, vol. 15, pp. 43-48. https://doi.org/10.1039/A905812E

9. Wagatsuma K., Hirokawa K. Observation of Cu-Ni alloy surfaces by low wattage glow discharge emission spectrometry. *Surface and Interface Analysis*, 1984, vol. 6, pp. 167-170. https://doi.org/10.1002/sia.740060404

10. Krishna D. N. G., Philip J. Review on surface-characterization applications of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Recent developments and challenges. *Applied Surface Science Advances*, 2022, vol. 12, 100332. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100332

11. Uskoković V. X-ray photoelectron and ion scattering spectroscopic surface analyses of amorphous and crystalline calcium phosphate nanoparticles with different chemical histories. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020, vol. 22, pp. 5531-5547. https://doi.org/10.1039/C9CP06529F

12. Claessens N., Khan Z. Z., Haghighi N. R., Delabie A., Vantomme A., Vandervorst W., Meersschaut J. Quantification of area-selective deposition on nanometer-scale patterns using Rutherford backscattering spectrometry. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, 17770. https://doi.org/10.1038/s41598-022-22645-8

13. Nakajima K. Surface analysis of glass and ionic liquids using high-resolution Rutherford backscattering spectroscopy // JSAP Review, 2022, vol. 2022, 220201. https://doi.org/10.11470/jsaprev.220201

14. Sokhoreva V. V., Malyutin V. M., Kashkarov E. B. Kuznetsov S. I. Analysis of Natural Diamonds by Rutherford Backscattering // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2019, vol. 13, pp. 740-743. https://doi.org/10.1134/S1027451019040359

15. Argile C., Rhead G. E. Adsorbed layer and thin film growth modes monitored by Auger electron spectroscopy // Surface Science Reports, 1989, vol. 10, pp. 277-356. https://doi.org/10.1016/0167-5729(89)90001-0

16. Unger W. E. S., Wirth T., Hodoroaba V.-D. Auger electron spectroscopy // In book: Characterization of Nanoparticles, 2020, Chapter 4.3.2. pp. 373-395. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814182-3.00020-1

17. Rades S., Wirth T., Unger W. Investigation of silica nanoparticles by Auger electron spectroscopy (AES) // Journal of Surface Investigation: Special Issue: European Applications of Surface and Interface Analysis - ECASIA'13, 2014, vol. 46, pp. 952-956. https://doi.org/10.1002/sia.5378

18. Бриггс Д., Сих М. П. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 599 с.

19. Карлсон Т. А. Фотоэлектронная и Оже-спектроскопия / Пер. с англ. И.А. Брытова, Н.И. Комяка, В.В. Кораблева. Л.: Машиностроение. Ленинградское Отделение, 1981. 431 с.

20. Федоров Д. Ю. Программирование на языке высокого уровня Python: учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2022, 210 с.

21. Lutz M. Learning Python. 5th Edition, O'Reilly Media, Inc., 2013. 1594 p.

22. Childs D. K., Carlson B. A., LaVanier L. A., Hedberg C. L. Handbook of Auger electron spectroscopy: a book of reference data for identification and interpretation in Auger electron spectroscopy. Third Edition, Eden Prairie (Minn.): Physical electronics, 1995. 405 p.

13. Nakajima K. Surface analysis of glass and ionic liquids using high-resolution Rutherford backscattering spectroscopy. *JSAP Review*, 2022, vol. 2022, 220201. https://doi.org/10.11470/jsaprev.220201

14. Sokhoreva V. V., Malyutin V. M., Kashkarov E. B. Kuznetsov S. I. Analysis of Natural Diamonds by Rutherford Backscattering. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2019, vol. 13, pp. 740-743. https://doi.org/10.1134/S1027451019040359

15. Argile C., Rhead G. E. Adsorbed layer and thin film growth modes monitored by Auger electron spectroscopy. *Surface Science Reports*, 1989, vol. 10, pp. 277-356. https://doi.org/10.1016/0167-5729(89)90001-0

16. Unger W. E. S., Wirth T., Hodoroaba V.-D. Auger electron spectroscopy. In book: *Characterization of Nanoparticles*, 2020, Chapter 4.3.2. pp. 373-395. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814182-3.00020-1

17. Rades S., Wirth T., Unger W. Investigation of silica nanoparticles by Auger electron spectroscopy (AES). *Journal of Surface Investigation*: Special Issue: European Applications of Surface and Interface Analysis - ECASIA'13, 2014, vol. 46, pp. 952-956. https://doi.org/10.1002/sia.5378

18. Briggs D., Seah M. P. *Practical surface analysis by Auger and X-ray photoelectron spectroscopy*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 1983, 533 p.

19. Carlson T. A. *Photoelectron and Auger Spectroscopy*. New York: Plenum Press, 1975, 417 p.

20. Fedorov D. Yu. *Programmirovaniye na yazyke vysokogo urovnya Python: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Programming in the high-level language Python: textbook for universities]. 3 izd., pererab. i dop. Moscow: Yurayt Publ., 2022, 210 p.

21. Lutz M. *Learning Python*. 5th Edition, O'Reilly Media, Inc., 2013. 1594 p.

22. Childs D. K., Carlson B. A., LaVanier L. A., Hedberg C. L. *Handbook of Auger electron spectroscopy: a book of reference data for identification and interpretation in Auger electron spectroscopy*. Third Edition, Eden Prairie (Minn.): Physical electronics, 1995. 405 p.

Поступила 20.01.2023; после доработки 01.02.2023; принята к опубликованию 07.02.2023
Received January 20, 2023; received in revised form February 1,2023; accepted February 7, 2023

Информация об авторах

***Хаметова Элина Фанилевна**, студент, УдГУ; инженер-исследователь, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: elinaphanilevna851@gmail.com*

***Бакиева Ольга Ринатовна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация*

Information about the authors

***Elina F. Khametova**, Student, Udmurt State University; Research Engineer, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: elinaphanilevna851@gmail.com*

***Olga R. Bakieva**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation*