



Получено: 2.05.2024 г. | Принято: 6.05.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.166.175>

Научная статья

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОБНОВЛЕНИЯ ЗОНДА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО КОСМОСА

Б.А. Логинов^{1, 2}, нач. лаб., ORCID: 0000-0001-5081-1424 / b-loginov@mail.ru

Ю.В. Хрипунов^{2, 3}, к.ф.-м.н., дир., ORCID: 0000-0003-2250-0420

М.А. Щербина^{2, 3}, студент, ORCID: 0009-0001-8873-4986

А.А. Смирнов², студент, ORCID: 0009-0007-6716-4535

А.К. Маккой², студент, ORCID: 0009-0003-6800-3443

Н.С. Нехаенко², студент, ORCID: 0009-0009-4193-0013

П.А. Гранаткин², студент, ORCID: 0009-0003-7822-4100

Х.Я. Хамди², студент, ORCID: 0009-0008-0943-1057

Н.Р. Калназарова², студент, ORCID: 0009-0007-2598-6514

Е.О. Петряев², студент, ORCID: 0009-0003-4816-6886

К.К. Танаса², студент, ORCID: 0009-0006-4111-3441

Х.А. Ахророва², студент, ORCID: 0009-0009-9786-801X

Д.Р. Айнулова², студент, ORCID: 0009-0008-8242-9076

М.Н. Плужник², студент, ORCID: 0009-0004-1998-9645

А.А. Мизгайло², студент, ORCID: 0009-0007-8018-2527

В.А. Бобарыкина², студент, ORCID: 0009-0007-5345-3627

М.В. Мамикоян², студент, ORCID: 0009-0009-7341-2333

А.Р. Измайлова², студент, ORCID: 0009-0006-1207-8026

Аннотация. Разработан, опробован и оптимизирован новый способ обновления иглы сканирующего зондового микроскопа путем напыления на нее разных материалов. Выполнены эксперименты по напылению на иглу различных металлов, в сканирующем туннельном микроскопе этой иглой сняты сканы до и после напыления на нее металлов, оценено изменение разрешающей способности после напыления металлов как основного параметра микроскопа. Новый способ обновления зонда разрабатывался для первого в мире космического сканирующего туннельного микроскопа, однако он применим и для зондовых микроскопов других типов, например, для атомно-силовых микроскопов, а также для различных применений зондовых микроскопов в целом, в том числе для работающих в вакуумных камерах различного назначения.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия, сканирующая атомно-силовая микроскопия, напыление металлов

Для цитирования: Б.А. Логинов, Ю.В. Хрипунов, М.А. Щербина, А.А. Смирнов, А.К. Маккой, Н.С. Нехаенко, П.А. Гранаткин, Х.Я. Хамди, Н.Р. Калназарова, Е.О. Петряев, К.К. Танаса, Х.А. Ахророва, Д.Р. Айнулова, М.Н. Плужник, А.А. Мизгайло, В.А. Бобарыкина, М.В. Мамикоян, А.Р. Измайлова. Разработка способа обновления зонда сканирующего зондового микроскопа в условиях открытого космоса. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 3–4. С. 166–175. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.166.175>.

¹ Национальный исследовательский университет МИЭТ, Зеленоград, Россия / National Research University of Electronic Technology MIET, Zelenograd, Russia

² Образовательный центр "Сириус", федеральная территория "Сириус", Россия / Educational Centre "Sirius", Sirius Federal Territory, Russia

³ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия / Orel State University named after I.S. Turgenyev, Orel, Russia



Received: 2.05.2024 | Accepted: 6.05.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.166.175>

Original paper

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR UPDATING THE PROBE OF A SCANNING PROBE MICROSCOPE IN OPEN SPACE CONDITIONS

B.A. Loginov^{1, 2}, Head of Laboratory, ORCID: 0000-0001-5081-1424 / b-loginov@mail.ru
Y.V. Khripunov^{2, 3}, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Director, ORCID: 0000-0003-2250-0420
M.A. Shcherbina^{2, 3}, Student, ORCID: 0009-0001-8873-4986
A.A. Smirnov², Student, ORCID: 0009-0007-6716-4535
A.K. McCoy², Student, ORCID: 0009-0003-6800-3443
N.S. Nekhaenko², Student, ORCID: 0009-0009-4193-0013
P.A. Granatkin², Student, ORCID: 0009-0003-7822-4100
H.Y. Hamdy², Student, ORCID: 0009-0008-0943-1057
N.R. Kalnazarova², Student, ORCID: 0009-0007-2598-6514
E.O. Petryaev², Student, ORCID: 0009-0003-4816-6886
C.K. Tanasa², Student, ORCID: 0009-0006-4111-3441
X.A. Ahrorova², Student, ORCID: 0009-0009-9786-801X
D.R. Ainulova², Student, ORCID: 0009-0008-8242-9076
M.N. Pluzhnik², Student, ORCID: 0009-0004-1998-9645
A.A. Mizgaylo², Student, ORCID: 0009-0007-8018-2527
V.A. Bobarykina², Student, ORCID: 0009-0007-5345-3627
M.V. Mamikoyan², Student, ORCID: 0009-0009-7341-2333
A.R. Izmailova², Student, ORCID: 0009-0006-1207-8026

Abstract. A new method of updating the needle of a scanning probe microscope by sputtering different materials on it has been developed, tested and optimised. Experiments on sputtering different metals on the needle were performed, scans were taken with this needle in a scanning tunnelling microscope before and after sputtering metals on it, and the change in resolving power after sputtering metals as the main parameter of the microscope was evaluated. The new method of probe updating was developed for the world's first space scanning tunnelling microscope, but it is also applicable for probe microscopes of other types, for example, for atomic force microscopes, as well as for various applications of probe microscopes in general, including those operating in vacuum chambers for various purposes.

Keywords: scanning probe microscopy, scanning tunnelling microscopy, scanning atomic force microscopy, metal sputtering

For citation: B.A. Loginov, Y.V. Khripunov, M.A. Shcherbina, A.A. Smirnov, A.K. McCoy, N.S. Nekhaenko, P.A. Granatkin, H.Y. Hamdy, N.R. Kalnazarova, E.O. Petryaev, C.K. Tanasa, X.A. Ahrorova, D.R. Ainulova, M.N. Pluzhnik, A.A. Mizgaylo, V.A. Bobarykina, M.V. Mamikoyan, A.R. Izmailova. Development of a method for updating the probe of a scanning probe microscope in open space conditions. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 3-4. PP. 166-175. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.3-4.166.175>.

ВВЕДЕНИЕ

27 июня 2023 года в спутнике Земли "Нанозонд-1" Россией в космос был запущен первый в мире [1] спутниковый сканирующий зондовый микроскоп (марка СММ-2000С), который сразу же начал передавать кадры (<https://nauka.tass.ru/nauka/18422659>) и успешно продолжает работать уже почти год (<https://www.mos.ru/news/>

INTRODUCTION

On 27 June 2023, Russia launched the world's first [1] satellite scanning probe microscope (SMM-2000C) into space in the Nanozond-1 satellite, which immediately began transmitting frames (<https://nauka.tass.ru/nauka/18422659>) and has been successfully operating for almost a year (<https://www.mos.ru/news/item/136461073>). The construction of new



item/136461073). Начато строительство новых аналогичных космических аппаратов [2] для разных задач в космосе – как для оценки стойкости поверхности различных материалов в условиях открытого космоса с потоками ионов солнечного ветра, так и для оценки масштабов загрязнения космоса микро- и наночастицами пыли, возникающей от столкновения старых неуправляемых спутников.

Одной из проблем работы зондовых микроскопов в непилотируемом спутнике является стойкость зонда микроскопа в течение более чем двухлетнего полета. Для микроскопа с собственной электроникой и процессором в спутнике распространенного сейчас формата CubeSat-3U выделяется очень мало места – не более 90×90×200 мм. Приходится ужимать габариты самих микроскопов, не говоря уж о том, чтобы еще помещать вместе с ними какие-то механизмы замены зондов. Поэтому стало актуально изобретение такого способа обновления зонда, который бы занимал как можно меньше места.

Идея пришла в процессе работ по выбору материалов для напыления в космосе с целью покрытия проводящей ток пленкой неэлектропроводных объектов [3] для возможности их исследований в спутниковом сканирующем туннельном микроскопе. И заключалась эта идея в следующем: возможно, при напылении металла на отработавшую иглу сканирующего зондового микроскопа с затупившимся острием на конце этого острия будут образовываться новые наноструны, которые и будут работать.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор рассмотренных для напыления металлов для проверки идеи обновления зонда был фактически подготовлен вышеуказанной предыдущей работой [3], в которой был выяснен список металлов, пленки которых сохраняют электропроводность в условиях остаточных атмосферных газов, где может находиться и спутник Земли. Это такие металлы, как золото, серебро, никель, цинк, висмут и сплав Вуда, состоящий из висмута (50%), свинца (25%), олова (12,5%) и кадмия (12,5%). Из способов напыления рассматривались способы CVD/PVD осаждения, аналогичные описанным в [4–9]. Однако в условиях малого объема в спутнике оказалось крайне затруднительным использование плазменных, в том числе магнетронных, способов распыления, ввиду необходимости размещать для их работы баллон с газом, чаще всего аргоном, а также клапаны подачи газа с блоками управления ими. Поэтому

similar spacecraft [2] was started for different tasks in space – both for assessing surface resistance of various materials in open space conditions with solar wind ion streams and for assessing the extent of space pollution by micro- and nanosized dust particles arising from the collision of old unguided satellites.

One of the problems of probe microscope operation in an unmanned satellite is microscope probe durability during more than two years of flight. There is very little space for a microscope with its own electronics and processor in a satellite of the now common CubeSat-3U format – no more than 90×90×200 mm. We have to shrink the dimensions of the microscopes themselves, not to mention the fact that we have to put together with them some probe replacement mechanisms. Therefore, it has become urgent to invent a method of probe renewal that would take up as little space as possible.

The idea came in the process of work on the selection of materials for sputtering in space to cover non-electrically conductive objects with a conductive film [3] for possibility of their study in a satellite scanning tunnelling microscope. This idea consisted in the following: perhaps, when metal is sputtered onto the spent needle of a scanning probe microscope with a blunted point, new nanoneedles will be formed at the end of this point, which will work.

MATERIALS AND METHODS

The choice of metals considered for sputtering to test the idea of the probe upgrade was actually prepared by the above-mentioned previous work [3], where presented the list of metals whose films retain electrical conductivity in the conditions of residual atmospheric gases, where the Earth's satellite may be. These are such metals as gold, silver, nickel, zinc, bismuth and Wood's alloy consisting of bismuth (50%), lead (25%), tin (12.5%) and cadmium (12.5%). CVD/PVD deposition methods similar to those described in [4–9] were considered for sputtering. However, in conditions of small volume in the satellite it turned out to be extremely difficult to use plasma, including magnetron, sputtering methods, due to the need to place for their operation a gas cylinder, most often argon, as well as gas supply valves with their control units. Therefore, as in [3], the method of thermoemission sputtering of metal was chosen, which is practically feasible in the satellite, in which it is required to place near the probe heated by current small-sized spiral with a diameter of 2–3 mm and length of 3–5 mm of metal wire, and to supplement the electronic board with only one transistor with dimensions of about 8×6×2 mm to switch on the electric current through the spiral, as a result of the spiral is heated and from it vaporise metal atoms deposited on the microscope probe.

Two international teams – a team of participants of the World Youth Festival WYF-2024 from 01 to 06 March



в итоге, как и в работе [3], был выбран практически осуществимый в спутнике способ термоземиссионного распыления металла, в котором требуется поместить рядом с зондом нагреваемую током малогабаритную спираль диаметром 2–3 мм и длиной в 3–5 мм из металлической проволоки и дополнить электронную плату всего лишь одним транзистором размерами около 8×6×2 мм для включения электрического тока через спираль, вследствие чего спираль раскаляется и с нее испаряются атомы металла, осаждающиеся на зонде микроскопа.

В проработке этого способа обновления зонда подряд друг за другом приняли участие и провели большую работу в Образовательном центре "Сириус" две международные команды: команда участников Всемирного фестиваля молодежи ВФМ-2024 с 1 по 6 марта 2024 года (проект "Первый в мире зондовый микроскоп-спутник Земли: эксперимент по обновлению зонда в открытом космосе", <https://www.miet.ru/news/162401>) и команда Международной детской программы "Глобальные большие вызовы" ГБВ-2024 с 8 по 21 марта 2024 года (проект "Разработка процедуры обновления зонда сканирующего микроскопа-спутника в условиях открытого космоса", https://vk.com/wall-152844913_2103?ysclid=lv9bhzgq8j180924955).

В качестве вакуумной системы была применена "Вакуумно-плазменная установка МАГ-5" (Завод ПРОТОН, Зеленоград, Россия, www.microscopy.su), в которой могут реализоваться процессы физического (PVD) и химического (CVD) осаждения [4–9]. Все эксперименты проводились при давлении 10^{-3} мбар, что соответствует условиям открытого космоса на высоте чуть ниже линии Кармана, границы в 100 км над уровнем моря Земли между космосом и атмосферой. Это давление было выбрано для экспериментов как наиболее жесткое условие эксперимента – из-за наличия примесей в виде остаточной атмосферы. С целью корректного сравнения металлов напыление их на зонды проводилось с разогревом молибденовой лодочки, в которую помещались кусочки металлов, до температуры, при которой скорость испарения металлов была примерно одинаковой. Схемы и фотографии процессов напыления вместе с фотографиями работавших над ней соавторов представлены на рис.1.

Для определения разрешающей способности зондов использовался серийно выпускаемый "Микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000" (Завод ПРОТОН, Зеленоград, Россия, www.microscopy.su, номер 46918 в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации),

2024 (project "The world's first probe microscope-satellite of the Earth: experiment of probe renewal in open space", <https://www.miet.ru/news/162401>) and a team of the International Children's Programme "Global Grand Challenges" GGC-2024 from 08 to 21 March 2024 (project "Development of the procedure of probe renewal of the scanning microscope-satellite", <https://www.miet.ru/news/162401>) – took part in the development of this method of probe renewal one after another.

The vacuum system used was the "MAG-5 vacuum-plasma unit" (PROTON Plant, Zelenograd, Russia, www.microscopy.su), in which physical (PVD) and chemical (CVD) deposition processes can be realised [4–9]. All experiments were conducted at a pressure of 10^{-3} mbar, which corresponds to the conditions of open space at an altitude just below the Karman line, the boundary 100 km above the Earth's sea level between space and atmosphere. This pressure was chosen for the experiments as the most rigid experimental condition – due to presence of impurities in the form of residual atmosphere. For the purpose of correct comparison of metals, their sputtering on probes was carried out with heating of a molybdenum boat, in which pieces of metals were placed, to a temperature at which the rate of vaporisation of metals was approximately the same. Diagram and photos of the sputtering processes together with photos of the co-authors working on it are presented in Fig.1.

To determine the resolving power of the probes, we used a commercially available "Scanning Probe Microscope SMM-2000" (PROTON Plant, Zelenograd, Russia, www.microscopy.su, number 46918 in the State Register of Measuring Instruments of the Russian Federation), the flight version of which works in space and which has a large resolution reserve for this work, up to visualisation of individual atoms. The needles before and after metal sputtering on them in the scanning tunnelling microscopy mode used in space were scanned with the same sample of a gold mirror, the same as the one used in space in this microscope. After that, using the SMM-2000 microscope software, the granulometric analysis was performed, the histogram of distribution statistics of the observed gold particles diameters, which make up the mirror, was built, and the first smallest diameter of these grains, the percentage of which exceeded 1% of their total number, was taken as an answer to the question "what is the resolving power of the probe used at the moment". There were also smaller grains in the distribution, but if they were less than 1% of the total number, they were not taken into consideration to exclude frame noise. Visual determination of the diameter of those very small grains, which, however, are clearly perceived by the eye as a separate independent grain with clear boundaries, was also performed.

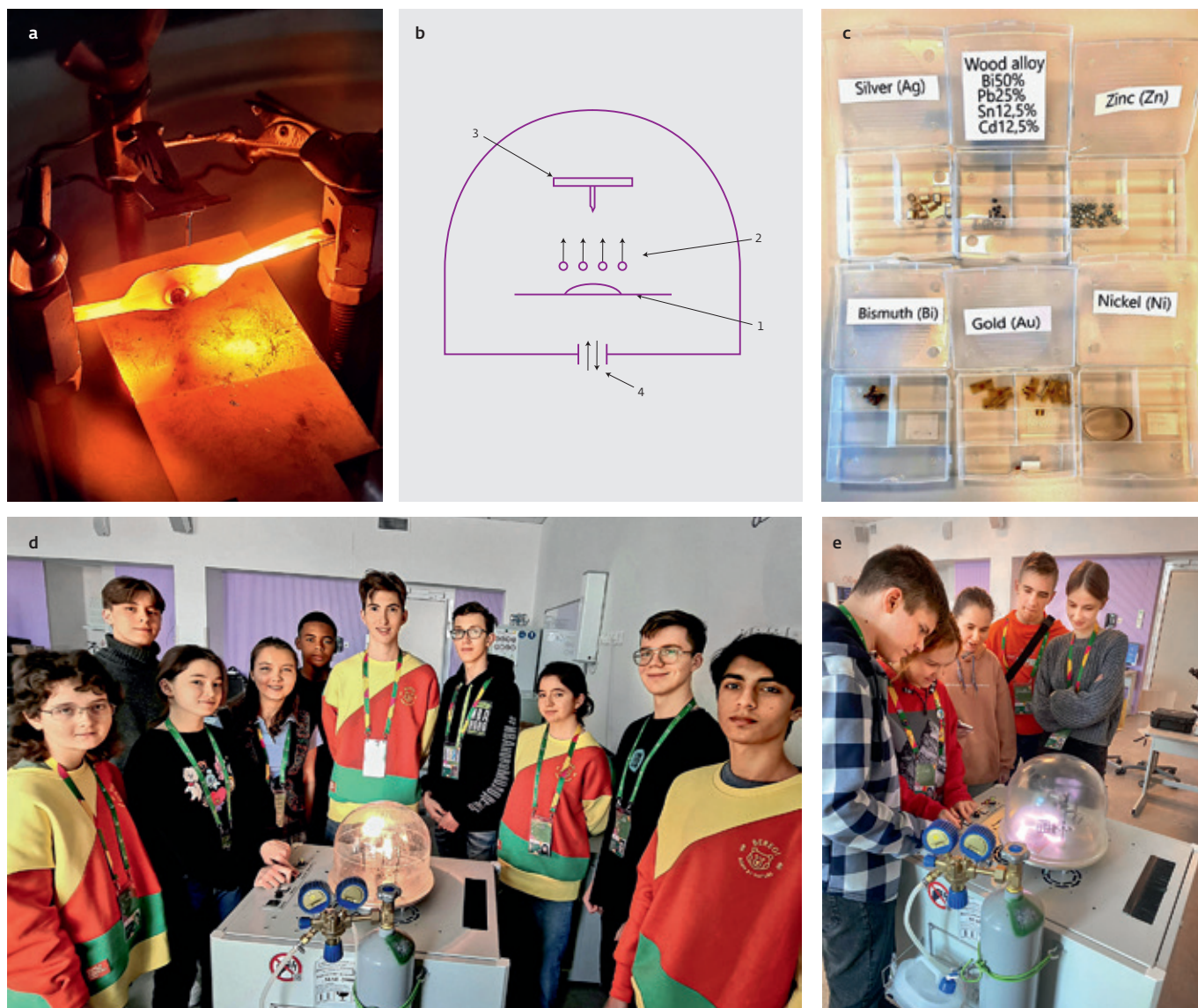


Рис.1. Схемы и фотографии процессов напыления на "Вакуумно-плазменной установке МАГ-5": а – фотография процесса напыления; б – схема процесса напыления, где: 1 – нагреваемая танталовая лодочка с кусочком распыляемого металла, 2 – летящие атомы металла, 3 – держатель зонда с зондом, обращенным острием к распыляемому металлу, 4 – откачка и напуск атмосферы; с – подготовленные для распыления кусочки металлов; д – команда Всемирного фестиваля молодежи ВФМ-2024, слева направо: Анна Катерина МакКой (США), Егор Петряев (Россия, Мордовия), Хилола Ахронова (Таджикистан), Назокат Калназарова (Узбекистан), Чриз Кйлиан Танаса (Габон), Никита Нехаенко (Россия, Москва), Павел Гранаткин (Россия, Ивановская обл.), Диана Айнулова (Россия, Москва), Александр Смирнов (Россия, Санкт-Петербург), Хамдй Яссер (Египет); е – команда программы "Глобальные большие вызовы" ГБВ-2024, слева направо: ассистент обеих команд Максим Щербина (Россия, г. Орел), Алиса Измаилова (Узбекистан, г. Ташкент), Варвара Бабарыкина (Россия, г. Смоленск), Максим Плужник (Россия, Ставропольский край), Анна Мизгайло (Белоруссия, г. Минск), Мери Мамиконян (Армения, отсутствует на фото, см. рис.4б)

Fig.1. Schemes and photos of sputtering processes on the "MAG-5 vacuum-plasma unit": а – photo of the sputtering process; б – scheme of the sputtering process, where: 1 – heated tantalum boat with a piece of atomised metal, 2 – flying metal atoms, 3 – probe holder with a probe facing the atomised metal, 4 – pumping and atmospheric inlet; с – prepared metal pieces for sputtering; д – team of the WYF-2024 World Youth Festival, from left to right: Anna Catherine McCoy (USA), Egor Petryaev (Russia, Mordovia), Hilola Akhronova (Tajikistan), Nazokat Kalnazarova (Uzbekistan), Chriz Kylian Tanasa (Gabon), Nikita Nekhaenko (Russia, Moscow), Pavel Granatkin (Russia, Ivanovo Oblast), Diana Ainulova (Russia, Moscow), Alexander Smirnov (Russia, St. Petersburg), Hamdy Yasser (Egypt); е – Team of the GGC-2024 Global Grand Challenges Programme, from left to right: Maxim Scherbina (Russia, Oryol), assistant of both teams, Alisa Izmailova (Uzbekistan, Tashkent), Varvara Babarykina (Russia, Smolensk), Maxim Pluzhnik (Russia, Stavropol Krai), Anna Mizgailo (Belarus, Minsk), Meri Mamikonyan (Armenia, not pictured, see fig.4b)



летная версия которого работает в космосе и который имеет большой запас по разрешению для этой работы, вплоть до визуализации отдельных атомов. Иглами до и после напыления на них металла в используемом в космосе режиме сканирующей туннельной микроскопии сканировался один и тот же образец золотого зеркала, такой же, как и используемый в космосе в этом микроскопе. После чего с использованием программы микроскопа СММ-2000 выполнялся гранулометрический анализ, строилась гистограмма статистики распределения диаметров наблюдаемых золотых частиц, из которых состоит зеркало,

It should be noted that the work started by the team of the World Youth Festival WYF-2024 was continued by the team "Global Grand Challenges" of GBV-2024, which additionally proposed to make special jamming of probes by contact touching them with a glass plate, emulating the most severe wear of the needle in space as a result of its contact with a mirror due to some event, and also mastered the granulometric analysis of the SMM-2000 microscope programme to determine the resolution of the probe in addition to visual analysis. The results of work on the microscopes and photographs of the co-authors working with the microscopes are presented in Figs.2, 3 and 4.

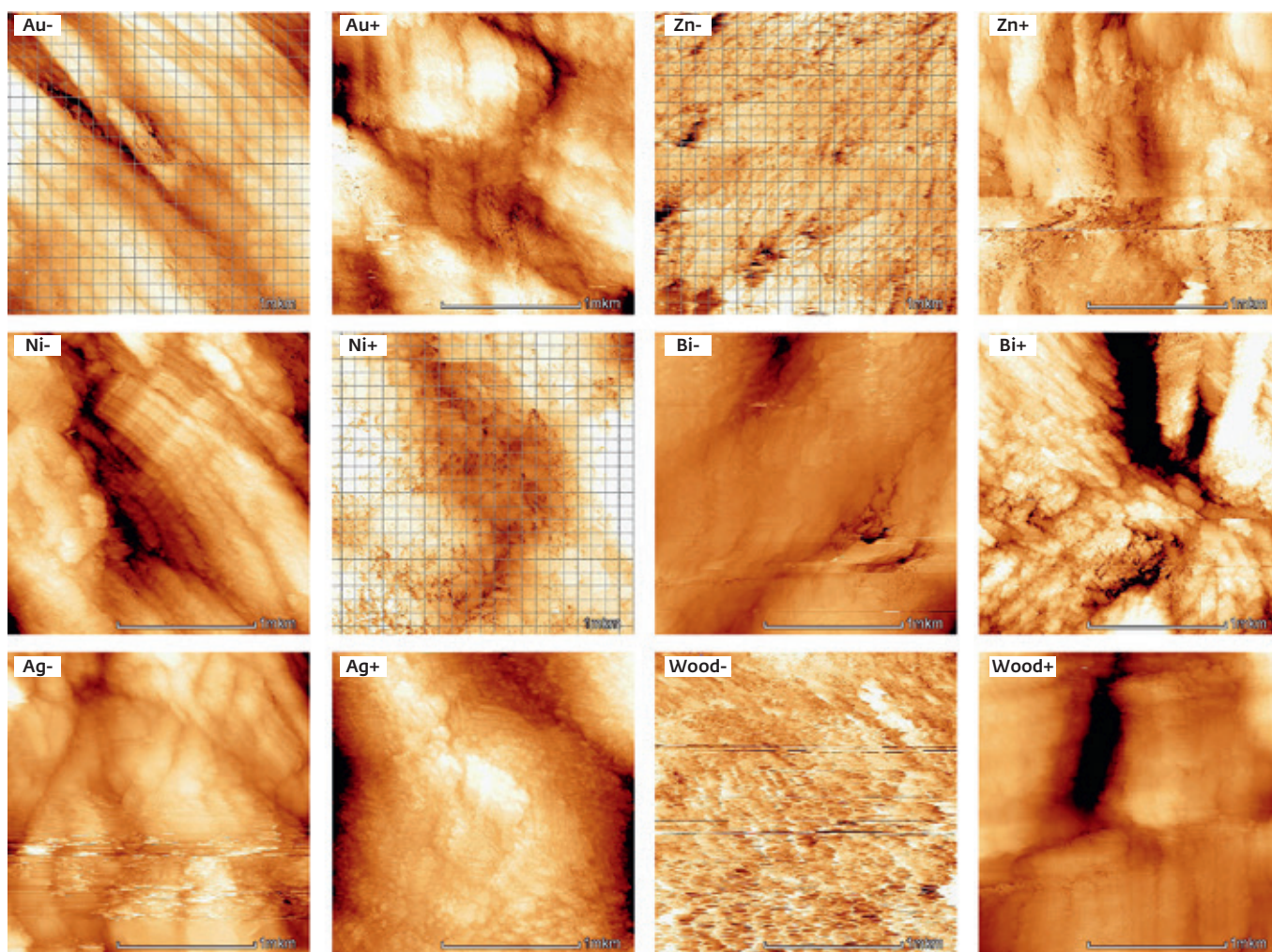


Рис.2. Кадры размером 2×2 мкм со сканирующего зондового микроскопа СММ-2000, полученные командой Всемирного фестиваля молодежи ВФМ-2024 в сканирующем туннельном режиме: обозначение металла со знаком "-" означает, что кадр получен на новом зонде; обозначение металла со знаком "+" означает, что кадр получен на том же для этого металла зонде, но с напылением этого металла

Fig.2. Frames of $2 \times 2 \mu\text{m}$ from the SMM-2000 scanning probe microscope obtained by the WYFY-2024 team in scanning tunnel mode: metal with "-" sign means that the frame was obtained on a new probe; metal with "+" sign means that the frame was obtained on the same probe for this metal, but with sputtering of this metal



Таблица 1. Сравнение металлов по визуальному определению получаемых при их напылении на зонд минимальных диаметров зерен (ВФМ-2024)

Table 1. Comparison of metals by visual determination of the minimum grain diameters obtained during their sputtering on the probe (WFM-2024)

№	Металл Metal	Минимальный размер зерна на новом зонде, нм Minimum grain size on new probe, nm	Минимальный размер зерна на зонде после напыления металла, нм Minimum grain size on the probe after metal sputtering, nm
1	Золото Gold	8,3	11,3
2	Цинк Zink	8,9	12,2
3	Никель Nickel	8,5	12,8
4	Висмут Bismuth	8,3	13,1
5	Серебро Silver	8,5	14,7
6	Сплав Вуда Wood's alloy	8,9	17,1

Таблица 2. Сравнение металлов по гранулометрическому анализу с определением получаемых при их напылении на зонд минимальных диаметров зерен (ГБВ-2024)

Table 2. Comparison of metals by particle size analysis with minimum grain diameters determination obtained by sputtering them on a probe (GBV-2024)

№	Металл Metal	Минимальный размер зерна на новом зонде, нм Minimum grain size on new probe, nm	Минимальный размер зерна на зонде после его замятия и напыления металла, нм Minimum grain size on the probe after its jamming and metal sputtering, nm
1	Висмут Bismuth	5,4	4,7
2	Никель Nickel	5,4	5,0
3	Цинк Zink	5,2	5,2
4	Сплав Вуда Wood's alloy	5,2	5,2
5	Серебро Silver	5,4	5,4
6	Золото Gold	5,2	5,4

и первый наименьший диаметр этих зерен, процентное содержание которых превышало 1% от их общего числа, брался как ответ на вопрос: "какая разрешающая способность у используемого в данный момент зонда". В распределении были зерна и меньшего размера, однако, если их было менее 1% от общего количества, для исключения

RESULTS AND DISCUSSION

The result of the conducted researches are shown in the tables of minimum sizes of grains obtained on new needles, as well as on the same needles after metallisation (Table 1) or on the same needles, but before metallisation jammed by impact of the point against glass (Table 2).

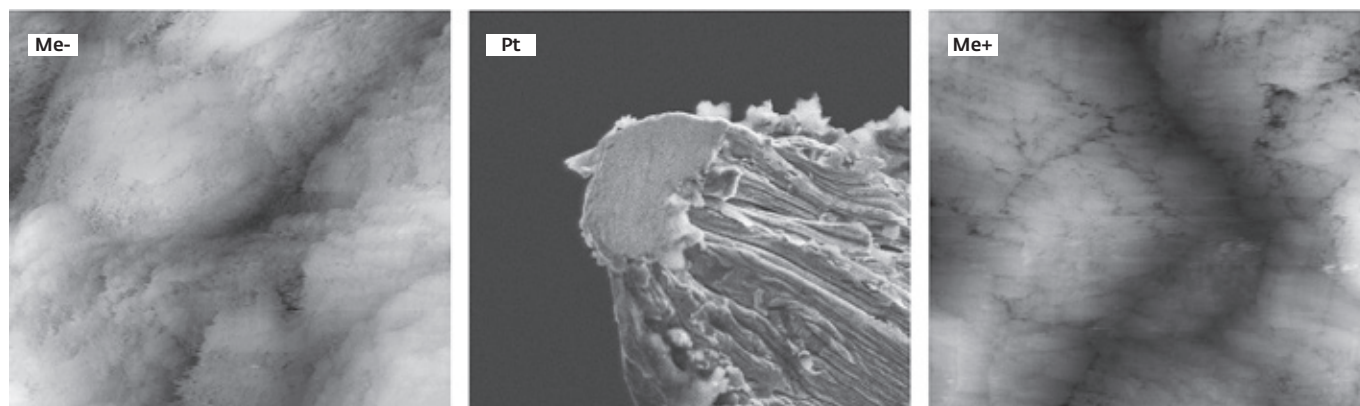


Рис.3. Характерные для указанных в табл.2 металлов кадры размером 2×2 мкм со сканирующего зондового микроскопа СММ-2000, полученные командой "Глобальные большие вызовы" ГБВ-2024 в сканирующем туннельном режиме: Me-кадр получен на новом зонде; Pt – острие платиновой иглы сканирующего туннельного микроскопа после замятия легким соприкосновением со стеклом; Me+ – кадр получен на том же зонде, но после его замятия и напыления металла

Fig.3. Frames of 2×2 μm from the SMM-2000 scanning probe microscope obtained by the GGC-2024 Global Grand Challenges team in scanning tunnelling mode for the metals listed in Table 2: Me-frame obtained on a new probe; Pt – the tip of the platinum needle of the scanning tunnelling microscope after jamming by light contact with glass; Me+ – frame obtained on the same probe, but after its jamming and metal sputtering

шумов кадра они не брались в рассмотрение. Выполнялось и визуальное определение диаметра тех самых малых зерен, которые, однако, отчетливо воспринимаются глазом как отдельное самостоятельное зерно с четкими границами. Надо отметить, что начатая командой Всемирного фестиваля молодежи ВФМ-2024 работа была продолжена командой "Глобальные большие вызовы" ГБВ-2024, которая дополнительно предложила специально делать замятие зондов путем контактного прикосновения их острием к стеклянной пластинке, эмулируя этим самый сильный износ иглы в космосе в результате ее касания о зеркало из-за какого-то события, а также освоила гранулометрический анализ программы микроскопа СММ-2000 для определения разрешения зонда в дополнение к визуальному анализу. Результаты работы на микроскопах и фотографии работавших с микроскопами соавторов представлены на рис.2-4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результатом проведенных исследований являются таблицы минимальных размеров зерен, полученных на новых иглах, а также на этих же иглах после металлизации (табл.1) или же на этих же иглах, но до металлизации замятых соударением острия о стекло (табл.2).

Из табл.1 видно, что наилучшим металлом для обновления зондов явилось золото, дающее наилучшее разрешение зерен золотого зеркала.

It can be seen from Table 1 that the best metal for probe upgrades was gold, giving the best resolution of the gold mirror grains.

From Table 2, it can be seen that in general, for all metals, based on the results of numerical particle size analysis, the probe fully recovers its functionality after metal sputtering even after jamming.

The final conclusion of the research was the decision to start the development of a design providing the above-described developed new method of probe renewal – for its implementation in the next scanning probe microscopes to be launched into space. With the use of gold as a metal, simultaneously sputtered both on the sample to give electrical conductivity to all objects on its surface [3], and on the probe, for its renewal. This choice of gold coincided coincidentally with the use of gold as a mirror material in the space microscope, which is exposed to solar wind ions and on which fast space dust particles are to be stuck for research. It should also be emphasised that the above-described new method of probe upgrade was developed for the world's first space scanning tunnelling microscope, but it is also applicable to probe microscopes of other types, for example, to common atomic force microscopes, as well as to various applications of probe microscopes in general [10], including those operating in vacuum chambers for various purposes.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was carried out thanks to the partnership of the Sirius Educational Centre, JSC PROTON Plant, Zelenograd, National Research University MIET, I.S.Turgenev Oryol State University, Sputniks LLC and the Foundation for Promotion



Рис.4. Фотографии процесса работы команд на сканирующих зондовых микроскопах СММ-2000: d – пятый слева направо – руководитель обеих команд Логинов Борис Альбертович; e – первый справа налево – методист направления "Нанотехнологии" программы "Большие вызовы" образовательного центра "Сириус" Хрипунов Юрий Вадимович
 Fig.4. Photos of the teams' work process on SMM-2000 scanning probe microscopes: d – fifth from left to right – Boris Albertovich Loginov, Head of both teams; e – first from right to left – Yuri Vadimovich Khripunov, methodologist of the "Nanotechnologies" direction of the "Grand Challenges" programme of the Sirius Educational Centre

Из табл.2 видно, что в целом для всех металлов, по результатам численного гранулометрического анализа, зонд полностью восстанавливает свою функциональность после напыления на него металла даже после замятия.

Итоговым выводом исследований стало принятие решения о старте разработки конструкции, обеспечивающей вышеописанный разработанный новый способ обновления зонда – для его реализации в последующих запусках в космос сканирующих зондовых микроскопах. С применением золота в качестве металла, одновременно напыляемого и на образец для придания

of Innovations, Moscow. The world's first scanning probe microscope – an Earth satellite – was launched under the Planet Watch programme and further launches are planned.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



электропроводности всех объектов на его поверхности [3], и на зонд – для его обновления. Этот выбор золота случайно совпал также с использованием в космическом микроскопе золота в качестве материала зеркала, на которое идет воздействие ионов солнечного ветра и на котором должны застревать быстрые частицы космической пыли для исследований. Необходимо также особо отметить, что вышеописанный новый способ обновления зонда разрабатывался для первого в мире космического сканирующего туннельного микроскопа, однако он применим и для зондовых микроскопов других типов, например для распространенных атомно-силовых микроскопов, а также для различных применений зондовых микроскопов в целом [10], в том числе для работающих в вакуумных камерах различного назначения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена благодаря партнерству Образовательного центра "Сириус", АО "Завод ПРОТОН" (Зеленоград), Национального исследовательского университета МИЭТ, Орловского государственного университета имени И.С.Тургенева, ООО "Спутникс" и Фонда содействия инновациям (Москва), по программе которого "Дежурный по планете" был осуществлен запуск первого в мире сканирующего зондового микроскопа – спутника Земли и планируются дальнейшие запуски.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Логинов Б.А.** Комплекс зондовой микроскопии для работы в космическом пространстве и атмосфере. Патент на изобретение 2778278 С1, 17.08.2022. Заявка № 2021128836 от 04.10.2021.
2. **Логинов Б.А.** Первый в мире сканирующий зондовый микроскоп в виде спутника как старт этапа научных спутников-лабораторий. НАНОИНДУСТРИЯ. 2021. № 5. С. 22–26.
3. **Логинов Б.А., Хрипунов Ю.В., Щербина М.А., Вьюник А.О., Дмитриева В.Д., Дьякова А.А., Лебедева М.К., Макеев В.С., Первых А.Р., Шевченко Д.С., Ханин С.Д.** Исследование способа термоэмиссионного распыления для создания тонкопленочных покрытий из металлов для работы сканирующего туннельного микроскопа в открытом космосе. НАНОИНДУСТРИЯ, 2024. Т. 17. № 1. С. 8–17.
4. **Loginov A.B., Ismagilov R.R., Obratsov A.N., Bozhev I.V., Bokova-Sirosh S.N., Obratsova E.D., Loginov B.A.** Few-layer graphene formation by carbon deposition on polycrystalline Ni surface. Applied Surface Science. 2019. Vol. 494. PP. 1030–1035.
5. **Логинов А.Б., Божьев И.В., Бокова-Сирош С.Н., Образцова Е.Д., Исмагилов Р.Р., Логинов Б.А., Образцов А.Н.** Формирование графена на поликристаллическом никеле. Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 11. С. 1756–1762.
6. **Loginov A.B., Ismagilov R.R., Bokova-Sirosh S.N., Bozhev I.V., Obratsova E.D., Loginov B.A., Obratsov A.N.** Formation of nanostructured films based on MoS₂, WS₂, MoO₂ and their heterostructures. Technical Physics. Vol. 92, no. 13. P. 2078.
7. **Логинов А.Б., Исмагилов Р.Р., Бокова-Сирош С.Н., Божьев И.В., Образцова Е.Д., Логинов Б.А., Образцов А.Н.** Формирование наноструктурированных пленок MoS₂, WS₂, MoO₂ и гетероструктур на их основе. Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 10. С. 1509–1516.
8. **Loginov A.B., Fedotov P.V., Bokova-Sirosh S.N., Sapkov I.V., Chmelenin D.N., Ismagilov R.R., Obratsova E.D., Loginov B.A., Obratsov A.N.** Synthesis, Structural, and Photoluminescence Properties of MoS₂ Nanowall Films. Physica Status Solidi (B): Basic Research. John Wiley & Sons Ltd. (United Kingdom). 2022. P. 2200481.
9. **Логинов А.Б., Бокова-Сирош С.Н., Федотов П.В., Сапков И.В., Хмеленин Д.Н., Исмагилов Р.Р., Образцова Е.Д., Логинов Б.А., Образцов А.Н.** Получение и свойства мезопористых пленок MoS₂. Физика и техника полупроводников. 2022. Т. 56. № 12. С. 1112–1119.
10. **Логинов Б.А., Логинов П.Б., Логинов В.Б., Логинов А.Б.** Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке. НАНОИНДУСТРИЯ. 2019. Т. 12. № 6. С. 352–365.



МИКРОСКОП СКАНИРУЮЩИЙ ЗОНДОВЫЙ «СММ-2000»

ВСТРОЕННАЯ ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ И ВЫСОЧАЙШЕЕ РАЗРЕШЕНИЕ

В базовой комплектации показывает атомы пиролитического графита в режиме сканирующей туннельной микроскопии.

Для качественного осмотра малых и больших объектов микроскоп имеет сканеры с разными размерами полей по X/Y/Z.

Микроскоп предоставляет уникальную возможность сборки его и разборки — для встраивания в различные системы и для лучшего обучения, выдерживая сборки-разборки до 12 лет в учебных классах

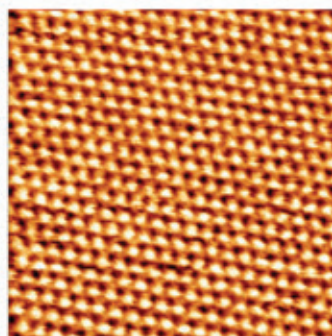
Микроскоп СММ-2000 работает со стандартными зондами-кантилеверами, имеет 3 основных режима сканирующей туннельной, полуконтактной и контактной атомно-силовой микроскопии, а также более 25 дополнительных режимов по снятию карт различных физических характеристик.



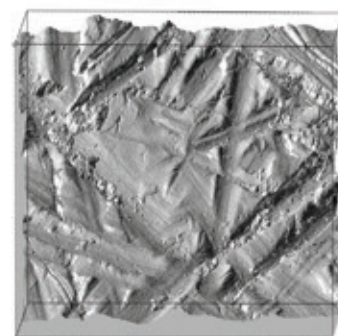
- Увеличение от 2 тыс. до 10 млн. крат
- Разрешение вплоть до АТОМОВ
- Трехмерный вид поверхности
- Измерение размеров от 0,2 нм до 40 мкм
- Распределение размеров зерен
- Анализ шероховатости до 0,2 нм
- Техподдержка 24/7 на «микроскоп.su»
- Серийный выпуск в России
- Для точных производств, науки и университетов
- Надежен даже для обучения в школах!

Микроскоп позволяет: отсканировать поверхность в выбранной точке образца, снять образец с микроскопа, воздействовать на образец тем или иным способом, например, напылить,

протравить или облучить, обратно установить образец в микроскоп и просканировать ту же с нанометровой точностью ранее выбранную точку на образце.



АТОМЫ ПИРОГРАФИТА
кадр 8,8×8,8 нм



ШЛИФ СТАЛИ, кадр 10×10 мкм,
шероховатость Ra = 0,007 мкм