



Получено: 9.08.2023 г. | Принято: 16.08.2023 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.266.270>

Научная статья

## СИСТЕМА НАНОПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Д.И.Яминский<sup>1</sup>, аспирант, ORCID: 0009-0009-6370-7496

И.В.Яминский<sup>1, 2</sup>, д.ф.-м.н., проф. МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор Центра перспективных технологий, ORCID: 0000-0001-8731-3947 / [yaminsky@nanoscopy.ru](mailto:yaminsky@nanoscopy.ru)

**Аннотация.** Разработана двухступенчатая система нанопозиционирования по трем координатам X, Y и Z с точностью до 0,1 нм. Система нанопозиционирования предназначена для использования в сканирующей зондовой микроскопии, оптической микроскопии сверхвысокого разрешения и микролинзовой микроскопии. В статье рассмотрен пример построения сканирующего капиллярного микроскопа на основе разработанной системы прецизионных перемещений.

**Ключевые слова:** наноперемещения, зондовая микроскопия, сканирующая капиллярная микроскопия, нанокапилляр

**Для цитирования:** Д.И. Яминский, И.В. Яминский. Система нанопозиционирования для физического эксперимента. НАНОИНДУСТРИЯ. 2023. Т. 16, № 5. С. 266–270. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.266.270>

Received: 9.08.2023 | Accepted: 16.08.2023 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.266.270>

Original paper

## NANOPOSITIONING SYSTEM FOR PHYSICAL EXPERIMENT

D.I.Yaminsky<sup>1</sup>, Post-graduate, ORCID: 0009-0009-6370-7496

I.V.Yaminsky<sup>1, 2</sup>, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof., General Director of Advanced Technologies Center, ORCID: 0000-0001-8731-3947 / [yaminsky@nanoscopy.ru](mailto:yaminsky@nanoscopy.ru)

**Abstract.** A two-stage nanopositioning system has been developed along three coordinates X, Y and Z with an accuracy of 0.1 nm. The nanopositioning system is intended for use in scanning probe microscopy, ultra-high resolution optical microscopy, and microlens microscopy. This paper considers an example of constructing a scanning capillary microscope based on the developed system of precision movements.

**Keywords:** nanodisplacements, probe microscopy, scanning capillary microscopy, nanocapillary

**For citation:** D.I. Yaminsky, I.V. Yaminsky. Nanopositioning system for physical experiment. NANOINDUSTRY. 2023. V. 16, no. 5. PP. 266–270. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2023.16.5.266.270>.

<sup>1</sup> МГУ имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия / Lomonosov Moscow State University, Physical department, Moscow, Russia

<sup>2</sup> ООО НПП "Центр перспективных технологий", Москва, Россия / Advanced Technologies Center, Moscow, Russia

## ВВЕДЕНИЕ

Компактная миниатюрная система наноперемещений востребована во многих приложениях физического эксперимента. Предложенное решение может быть успешно применено в сканирующей капиллярной (ионпроводящей [1, 2]) микроскопии. В этом случае исследуемый образец размещается на дне чашки Петри, будучи погруженным в солевой раствор. В качестве зонда выступает нанокапилляр с конусообразным окончанием и выходным отверстием около 30–50 нм. В сканирующем капиллярном микроскопе осуществляется регистрация ионного тока между двумя хлорсеребряными электродами. Один из них расположен в нанокапилляре, заполненном электролитом, а второй – в солевом растворе в чашке Петри. При приближении капилляра к поверхности образца ионный ток падает. Уменьшение ионного тока в нанокапилляре соответствует расположению нанокапилляра над поверхностью образца примерно на расстоянии, равном диаметру выходного отверстия нанокапилляра, то есть на расстоянии 30–50 нм.

Величина ионного тока через нанокапилляр зависит от следующих факторов:

- геометрии нанокапилляра, определяется в основном диаметром выходного отверстия  $r_0$ ;
- приложенного электрического напряжения  $U$  между двумя электродами. Часто это напряжение устанавливается равным 200 мВ;
- удельного сопротивления  $\rho$  используемого электролита (раствора соли).

Рассмотрим простейшую геометрию нанокапилляра в виде верхней цилиндрической части длиной  $L$  с внутренним радиусом  $r$  и конической части, длиной  $L_0$ , с выходным отверстием радиусом  $r_0$  (рис.1).

Полное сопротивление  $R$  внутренней части капилляра, заполненной электролитом, составит величину:

$$R = \rho L / (\pi r^2) + \rho L_0 / (\pi r r_0). \quad (1)$$

Для капилляра удачной формы справедливы следующие величины:

$$r = 0,25 \text{ мм}; L = 40 \text{ мм}$$

$$r_0 = 25 \text{ нм}; L_0 = 10 \text{ мм}.$$

Вследствие существенного различия между  $r$  и  $r_0$  ( $r/r_0 = 10000$ ) первым слагаемым в величине

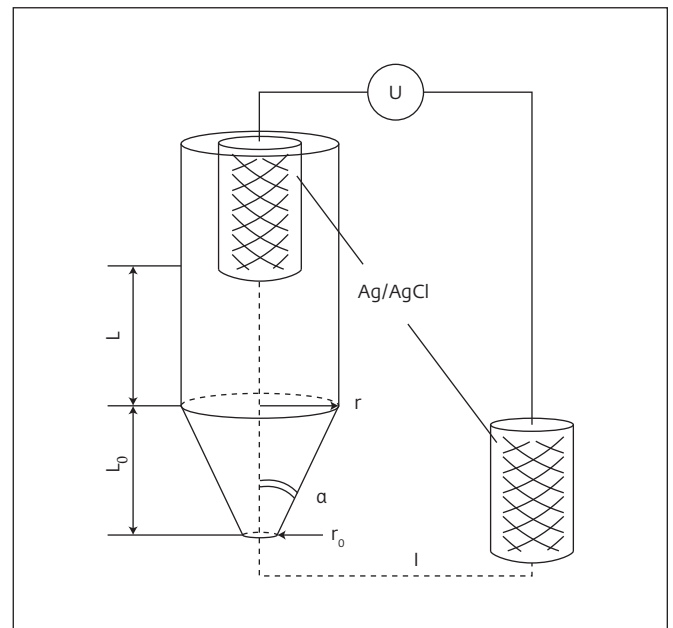


Рис.1. Принципиальная схема для расчета сопротивления нанокапилляра.  $L$  – длина верхней цилиндрической части с внутренним радиусом  $r$ ;  $L_0$  – длина конической части с выходным отверстием радиусом  $r_0$ ;  $\alpha$  – угол между вертикалью и образующей конуса нанокапилляра.  $I$  – ионный ток, протекающий между  $Ag/AgCl$ -электродами;  $U$  – электрическое напряжение между двумя  $Ag/AgCl$ -электродами

## INTRODUCTION

A compact miniaturised nanodisplacement system is in demand in many applications of physical experiment. The proposed solution can be successfully applied in scanning capillary (ion-conducting capillary [1, 2]) microscopy. In this case, the studied sample is placed at the bottom of a Petrie dish, being immersed in a salt solution. The probe is a nanocapillary with a cone-shaped end and an outlet opening of about 30–50 nm. In a scanning capillary microscope, the ionic current between two silver chloride electrodes is recorded. One of them is located in a nanocapillary filled with electrolyte and the second one is located in a salt solution in a Petrie dish. As the capillary approaches the sample surface, ionic current decreases. The decrease of ionic current in the nanocapillary corresponds to the nanocapillary location above the sample surface at a distance equal to the nanocapillary outlet diameter, i.e. at a distance of 30–50 nm.

The ionic current magnitude through the nanocapillary depends on the following factors:

сопротивления  $R$  можно пренебречь. Тогда получаем приближенную формулу:

$$R = \rho L_o / (\pi r_o). \quad (2)$$

Эту формулу можно преобразовать, используя угол между вертикалью и образующей конуса нанокапилляра  $\alpha$ , поскольку отношение  $r/L_o$  практически равняется тангенсу угла  $\alpha$  ( $\text{tg}\alpha$ ):

$$R = \rho / (\pi r_o \text{tg}\alpha). \quad (3)$$

Рассмотрим случай заполнения капилляра физиологическим раствором. Физиологический раствор – это водный раствор хлорида натрия (NaCl) с массовой долей  $\omega(\text{NaCl}) \approx 0,9\%$ . Удельное сопротивление физиологического раствора  $\rho = 120 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  при температуре в  $20^\circ\text{C}$ . Для капилляра с длиной конической части 10 мм начальным радиусом в 0,25 мм и радиусом выходного отверстия в 25 нм сопротивление составляет  $R = 300 \text{ МОм}$ .

Таким образом, величина ионного тока при напряжении между электродами в 200 мВ составит:

$$I = U/R = 0,67 \text{ нА}. \quad (4)$$

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для приготовления нанокапилляра используется стеклянная заготовка – трубочка длиной 100 мм с наружным диаметром 1 мм и внутренним диаметром 0,5 мм. Из одной заготовки получается два равноценных нанокапилляра. Нанокапилляр изготавливается на пуллере P-1000 или P-2000 компании Sutter. В открытом доступе имеется прекрасно написанное компанией Adair Oesterle руководство по вытягиванию нанокапилляров – Pipette Cookbook 2018 P-97 & P-1000 Micropipette Pullers, Ref F, Sutter Instrument Company (108 с.).

В сканирующем капиллярном микроскопе нанокапилляр совершает вертикальное перемещение вверх и вниз в диапазоне десятков микрон. Такое перемещение позволяет наблюдать живые клетки, в том числе нейронные сети, перепад по высоте которых может составлять десяток микрон. Образец в чашке Петри размещается в держатель системы нанопозиционирования.

Система нанопозиционирования имеет две ступени (рис.2). Первая из них выполнена с использованием линейных направляющих и шаговых двигателей. Диапазон

- nanocapillary geometry determined mainly by the outlet diameter  $r_o$ ;
- applied electrical voltage  $U$  between the electrodes. This voltage is often set equal to 200 mV;
- resistivity  $\rho$  of the electrolyte used (salt solution).

Let us consider the simplest geometry of a nanocapillary in the form of an upper cylindrical part of length  $L$  with inner radius  $r$  and a conical part  $L_o$  and an outlet of radius  $r_o$  (Fig.1).

The total resistance  $R$  of the inner part of the capillary filled with electrolyte will be equal to:

$$R = \rho L / (\pi r^2) + \rho L_o / (\pi r r_o). \quad (1)$$

The following values are valid for a good capillary:

$$r = 0,25 \text{ mm}; L = 40 \text{ mm}$$

$$r_o = 25 \text{ nm}; L_o = 10 \text{ mm}.$$

Due to significant difference between  $r$  and  $r_o$  ( $r/r_o = 10000$ ), the first summand in the resistance value  $R$  can be neglected. Hence, we obtain an approximate formula:

$$R = \rho L_o / (\pi r r_o). \quad (2)$$

This formula can be converted using the angle between the vertical and the nanocapillary cone formation  $\alpha$ , since the ratio  $r/L_o$  is almost equal to the tangent of angle  $\alpha$  ( $\text{tg}\alpha$ ):

$$R = \rho / (\pi r_o \text{tg}\alpha). \quad (3)$$

Let us consider the case of capillary filling with physiological solution. Physiological solution is an aqueous solution of sodium chloride (NaCl) with mass fraction  $\omega(\text{NaCl}) \approx 0.9\%$ . The specific resistance of physiological solution is  $\rho = 120 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$  at normal temperature ( $20^\circ\text{C}$ ). For a capillary with the conical part length of 10 mm, an initial radius of 0.25 mm and the radius of the outlet equal to 25 nm, resistance is  $R = 300 \text{ MOhm}$ .

Thus, the ionic current magnitude at voltage of 200 mV between the electrodes is:

$$I = U/R = 0,67 \text{ nA}. \quad (4)$$

## MATERIALS AND METHODS

To prepare a nanocapillary, a glass blank is used with the 100 mm long tube with an outer diameter of 1 mm and an inner diameter of 0.5 mm. Two equivalent nanocapillaries are obtained from one blank. The nanocapillary is fabricated on a Sutter P-1000 or P-2000 puller. Adair Oesterle's company excellently written

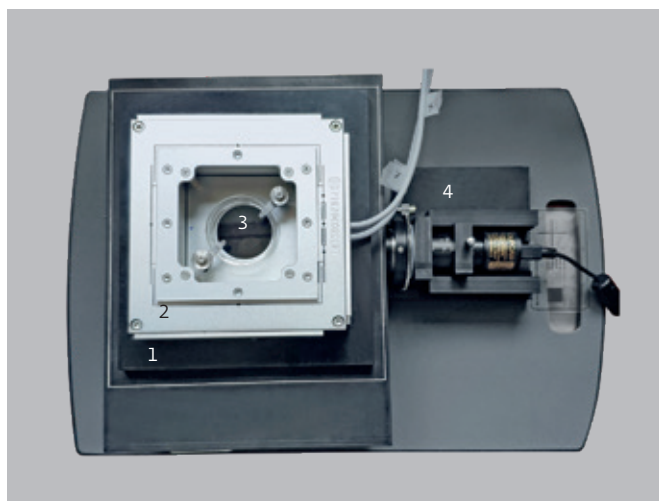


Рис.2. Система нанопозиционирования: 1 – первая двухкоординатная механическая ступень с диапазоном перемещения 12 мм по осям X и Y; 2 – двухкоординатный пьезоманипулятор точного позиционирования с диапазоном в 50 мкм по осям X и Y; 3 – чашка Петри для установки образца; 4 – оптическая система с регулируемым рабочим расстоянием для наблюдения образца и положения нанокapилляра

Fig.2. Nanopositioning system: 1 – first two-axis mechanical stage with a moving range of 12 mm in X and Y axes; 2 – two-axis precision piezo manipulator with a range of 50  $\mu\text{m}$  in X and Y axes; 3 – Petrie dish for a sample; 4 – optical system with adjustable working distance for observation of sample and position of nanocapillary

перемещений по осям X и Y – 12 мм. Минимальный шаг варьируется в пределах от 0,16 до 2,5 мкм.

На первой механической ступени располагается трехкоординатная пьезокерамическая платформа со следующими характеристиками:

- диапазон движения по осям X и Y: 50  $\times$  50 мкм;
- разрешение по осям X и Y: 0,05 нм;
- резонансная частота по оси X: 3000 Гц;
- резонансная частота по оси Y: 2000 Гц.

Для перемещения нанокapилляра можно использовать линейный пьезоманипулятор с диапазоном движения в 30 мкм и точностью в 0,03 нм, либо ступень Z в составе трехкоординатного пьезоманипулятора XYZ. Для оптического контроля образца и положения нанокapилляра в систему нанопозиционирования внедрен оптический микроскоп с автоматизированной фокусировкой.

## ВЫВОДЫ

Разработанная система является эффективным инструментом для исследования биологических

guide to pulling nanocapillaries, Pipette Cookbook 2018 P-97 & P-1000 Micropipette Pullers, Ref F, Sutter Instrument Company (108 pages), is publicly available.

In a scanning capillary microscope, a nanocapillary moves vertically up and down in the range of tens of microns. This movement allows observing the living cells, including neuronal networks, whose height difference can be tens of microns. The sample is placed in a Petri dish in the holder of the nanopositioning system.

The nanopositioning system consist of two stages (Fig.2). The first of them is made using linear guides and stepper motors. The movement range in the X and Y axes is 12 mm. The minimum step varies from 0.16  $\mu\text{m}$  to 2.5  $\mu\text{m}$ .

The first mechanical stage has a three-axis piezoceramic platform with the following characteristics:

- movement range in X and Y axes: 50  $\times$  50  $\mu\text{m}$ ;
- resolution in X and Y axes: 0.05 nm;
- X-axis resonant frequency: 3000 Hz;
- resonant frequency in the Y axis: 2000 Hz.

To move the nanocapillary, a linear piezo manipulator with a movement range of 30  $\mu\text{m}$  and accuracy of 0.03 nm, or a Z stage as part of a three-axis XYZ piezo manipulator can be used. For optical control of the sample and nanocapillary position, an optical microscope with automated focusing is implemented in the nanopositioning system.

Генератор тестового аэрозоля  
для проверки HEPA и ULPA-фильтров

**KitAseptica DOP TEST®**



[www.aseptica.biz](http://www.aseptica.biz)

Tel.: (495) 585-88-15, (495) 274-01-02 E-mail: aseps5858815@gmail.com

объектов методами зондовой, оптической и микролинзовой микроскопии без использования меток, что является крайне актуальным для биологии и биомедицины [3, 4].

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа Яминского И.В. по определению технических параметров системы нанопозиционирования выполнена при финансовой поддержке физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова (Регистрационная тема 122091200048-7). Авторы благодарят магистра физического факультета Т.О.Советникова за подготовку рисунков и мастера по точным и специальным приборам химического факультета А.Н.Прохорова за изготовление макета 1 ступени системы нанопозиционирования.

### 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. Hansma P.K., Drake B., Marti O., Gould S.A., Prater C.B. The Scanning Ion-Conductance Microscope. *Science*, 1989, 243, 641. <https://doi.org/10.1126/science.2464851>
2. Novak P., Li C., Shevchuk A., et al. Nanoscale live-cell imaging using hopping probe ion conductance microscopy. *Nat Methods*. 2009, 6, 279–281. <https://doi.org/10.1038/nmeth.1306>
3. Sovetnikov T.O., Akhmetova A.I., Gukasov V.M., Evtushenko G.S., Rybakov Yu.L., Yaminskii I.V. Scanning probe microscopy in assessing blood cells roughness. *Bio-Medical Engineering*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10527-023-10253-3>
4. Akhmetova A.I., Sovetnikov T.O., Tikhomirova M.A., Gukasov V.M., Rybakov Yu.L., Shimanovskii N.L., Yaminsky I.V. Scanning capillary microscopy in the study of the effect of cytotoxic agents on the biomechanical and physicochemical properties of tumor cells. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11094-022-02770-4>

### CONCLUSIONS

The developed system is an effective tool to study the biological objects by probe, optical and microlens microscopy methods without using labels, which is extremely relevant for biology and biomedicine [3, 4].

### ACKNOWLEDGMENTS

The study of I.V.Yaminsky on detecting of nanopositioning system technical parameters was carried out with the financial support of the Physical Department of the Lomonosov Moscow State University (Registration subject 122091200048-7). The authors would like to thank T.O.Sovetnikov, Master's degree student of Physical Department for drawing figures and A.N. Prokhorov, Master of Precision and Special Instruments, Chemistry Faculty, for making the working mock-up of the 1st stage of the nanopositioning system.

### 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.



ИНФОПРОСТРАНСТВО ПРОФЕССИОНАЛОВ

ТЕХНОСФЕРА

Мы на  YouTube



Подписывайтесь



# РОССИЙСКИЙ ФОРУМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2023

📍 Федеральная территория «Сириус»

📅 9–14 октября 2023

**6**

дней

**1700**

участников

**665**

предприятий-  
участников

**13**

секций

**74**

экспозиции



Подписывайтесь, и будьте в курсе  
всех последних новостей!

+7 495 641 57 17

[microelectronica.pro](http://microelectronica.pro)

[info@microelectronica.pro](mailto:info@microelectronica.pro)

Организаторы

При поддержке

Оператор форума



ПрофКонференции