



Проливая свет на ДНК-оригами: практика использования

М. Е. Степанов¹, У. А. Хохрякова¹, Т. В. Егорова¹,
К. А. Магарян¹, А. В. Наумов^{1,2}

¹ Московский педагогический государственный
университет (МПГУ), Москва, Россия

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое
обособленное подразделение (ТОП ФИАН), Москва,
Троицк, Россия

В современной фотонике существует запрос на технологии воспроизводимого и контролируемого получения наноструктур, поскольку многие интересные и важные оптические процессы разыгрываются на характерном для таких структур субдифракционном масштабе. Однако для работы со светом на нанометровых расстояниях требуется нанометровая точность в позиционировании объектов, добиться которой стандартными методами оказывается подчас крайне непросто. Одним из новых подходов, способных стать ответом на этот вызов, является использование ДНК-оригами: строение полимерной молекулы ДНК позволяет, с одной стороны, химически «настраивать» ее геометрию для придания ей произвольной формы на естественном для нее нанометровом масштабе, а с другой, – адресно размещать нанообъекты в любой позиции вдоль ее цепи. В настоящем обзоре рассмотрены некоторые практические аспекты получения ДНК-оригами.

Ключевые слова: ДНК-нанотехнологии,
ДНК-оригами, численное моделирование,
наноструктуры

Статья получена: 12.12.2023

Статья принята: 19.01.2024

ВВЕДЕНИЕ

Оригами – древнее японское искусство складывать бумагу без разрезов, придавая ей произволь-

Shedding Light on DNA Origami: Practice

M. E. Stepanov¹, U. A. Khokhryakova¹, T. V. Egorova¹,
K. A. Magaryan¹, A. V. Naumov^{1,2}

¹ Moscow Pedagogical State University (MPCU), Moscow,
Russia

² Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Troitsk branch, Moscow, Troitsk, Russia

Modern photonics requires technologies for the reproducible and controllable production of nanostructures, since many interesting and important optical processes occur on the subdiffractive scale characteristic for such structures. However, working with light at nanometer distances requires nanometer precision in object positioning, which is extremely difficult to achieve using standard methods. One of the new approaches that can become a response to this challenge is the use of DNA origami: structure of the polymer DNA molecule allows, on the one hand, chemically “tuning” of its geometry to obtain arbitrary shape on a nanometer scale, and on the other, addressability of DNA molecule allows nanoobjects to be placed at any position along its chain. This review considers some practical issues related to DNA origami preparation.

Keywords: DNA nanotechnologies, DNA origami,
numerical modeling, nanostructures.

Article received: December 12, 2023

Article accepted: January 19, 2024

INTRODUCTION

Origami is an ancient Japanese art of folding paper without cuts, giving it an arbitrary shape (the word origami literally means “folding” (ori, 折り) “paper” (gami, 紙)). Inspired by this art, the scientific community gradually came up with the idea of creating nanostructures by sequentially folding (self-assembly) a long DNA molecule (so-called scaffold) using short DNA fragments that act as staples. It turned out that the self-assembly process can be chemically “programmed” in advance due to the unique structure of the DNA molecule [1] (see



ную форму (слово *origami* буквально означает «складывать» (*origi*, 折り) «бумагу» (*gami*, 紙)). Вдохновившись этим искусством, научное сообщество постепенно пришло к идее создания наноструктур путем последовательного сворачивания (самосборки) длинной молекулы ДНК (т.н. скаффолда) с помощью коротких фрагментов ДНК, играющих роль скрепок. Оказалось, что процесс самосборки можно химически «запрограммировать» заранее, благодаря особенностям строения молекулы ДНК [1] (см. молекулярные основы метода ДНК-оригами в первой части нашего обзора «Проливая свет на ДНК-оригами» [2]), чтобы придать молекуле произвольную форму.

Однако элегантность этой идеи в реальности сталкивается с определенными практическими сложностями, затрудняющими ее использование. В данной статье рассматриваются некоторые аспекты возникающих на этом пути проблем: вопрос рационального подбора молекул-скрепок, направляющих самосборку молекулы ДНК, особенности процедуры самосборки и характеристики полученных ДНК-оригами наноструктур.

Существует большое количество других интересных методов создания наноструктур [3–23], однако ДНК-оригами выделяется среди них степенью контроля и точности результата. Используя этот метод, можно воспроизводимо создавать молекулярные наноконструкции на основе ДНК с возможностью адресного обращения практически к любому звену (нуклеотиду) в структуре ее молекулярной цепи для размещения нанообъектов в заранее выбранной позиции, что делает метод ДНК-оригами уникальным инструментом по управляемому созданию наноконструкций [24].

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДНК-ОРИГАМИ

Принцип построения ДНК-оригами заключается в придании длинной кольцевой одноцепочечной молекуле ДНК (скаффолду) нужной геометрии путем скрепления ее фрагментов молекулярными скрепками – олигонуклеотидами (короткими фрагментами ДНК), – комплементарно связывающими нужные участки скаффолда [2]. Проблема заключается в том, что даже простая ДНК-оригами конструкция может включать сотни типов таких молекулярных скрепок индивидуального состава. Ошибки в их выборе могут привести к резкому ухудшению качества самосборки ДНК-оригами, что делает их рациональный подбор крайне важной задачей. Ответом на этот вызов стало развитие специализированного программного обеспечения, позволяющего упростить и автоматизировать про-

cedure of self-assembly and characterization of the resulting DNA origami nanostructures are presented in the second and third parts of the article.

the molecular basis of the DNA origami method in the first part of our review “Shedding light on DNA origami” [2]), in order to give the molecule an arbitrary shape. However, the elegance of this idea faces certain practical difficulties. This article discusses in more detail some of the problems that arise along this path, as well as provides solutions. The first part of the article discusses the rational selection of staple molecules that guide the self-assembly of the DNA molecule, which can be done through computer modeling. The procedure of self-assembly and characterization of the resulting DNA origami nanostructures are presented in the second and third parts of the article.

There are many other interesting methods for creating nanostructures [3–23], however, DNA origami stands out among them due to the level of control and precision of the results. Using this method, molecular nanostructures based on DNA can be created with nanometer resolution allowing at the same time precise addressing of nanoobjects at preselected positions of the DNA molecule with good reproducibility. This makes DNA origami a unique tool for the controlled creation of nanocomplexes [24].

1. DNA ORIGAMI MODELING

The principle behind constructing DNA origami is to provide a long circular single-stranded DNA molecule (scaffold) with desired geometry by fastening its fragments with molecular staples (oligonucleotides, short DNA fragments) complementarily connecting required sections of the scaffold [2]. The problem lies in the fact that even a simple DNA origami design can include hundreds of molecular staples of individual composition. Errors in their choice can lead to a sharp deterioration in the quality of DNA origami self-assembly, making their rational selection an extremely important task. The answer to this challenge has been the development of specialized software that simplifies and automates the process of selecting a specific set of staples that can facilitate the folding of the chosen scaffold into a specific geometric shape (DNA origami).

Given the recent emergence of DNA nanotechnology practice for using CAD tools (Computer Aided Design) for its design is still not yet fully established, so the actual design process may be extremely non-intuitive. In the work [1], it was proposed to divide all DNA origami design environments into three generations according to their functional capabilities.

CaDNAno is a first-generation DNA-design program that allows the development of custom DNA nanostructures for a wide range of applications. The program has a user-friendly interface that enables users to design 2D DNA models (Fig. 1a). Due to the lack of a 3D

цесс выбора конкретного набора скрепок, которые могут обеспечивать сворачивание выбранного скаффолда в определенную геометрическую форму (ДНК-оригами).

Учитывая недавнее появление области ДНК-нанотехнологий, практика использования CAD (Computer Aided Design) для его проектирования сложилась еще не до конца, и поэтому реальный процесс проектирования может быть крайне неинтуитивным. В работе [1] было предложено подразделить все среды проектирования ДНК-оригами на три поколения согласно возможностям их функционала.

К первому поколению можно отнести программу CaDNAo, позволяющую создавать индивидуальные наноструктуры ДНК для широкого спектра применений. Программа обладает удобным интерфейсом, с помощью которого пользователи могут проектировать ДНК-модели, рисуя их в 2D (рис. 1а). Из-за отсутствия 3D-интерфейса возникает сложность в проектировании трехмерных структур, однако Cadnano поддерживает экспорт моделей в различные форматы файлов для более сложного моделирования.

Программы второго поколения рассматриваются как более удобные в использовании и менее требовательные к объему технических деталей самосборки. В качестве представителя рассмотрим программу TALOS (Three-dimensional Algorithmically-generated Library of DNA Origami Shapes). Программа автоматически подбирает молекулярные скрепки для получения 3D-ДНК-оригами одной из 20 геометрических форм-каркасов (рис. 1б).

Программное обеспечение третьего поколения расширяет доступный функционал: появляется возможность тонкого редактирования структуры ДНК, визуализации готовой модели и ее параметров, моделирования внутренних взаимодей-

interface, there is difficulty in designing 3D structures, however, CaDNAo supports model export to various file formats for more complex modeling and future use. The second-generation programs are considered as more user-friendly and less demanding in terms of the technical assembly. For example, TALOS (Three-dimensional Algorithmically-generated Library of DNA Origami Shapes) automatically selects staples to obtain 3D DNA origami of one of 20 different geometric frames (Fig. 1b).

The third-generation design software further expands the available functionality. For instance, it

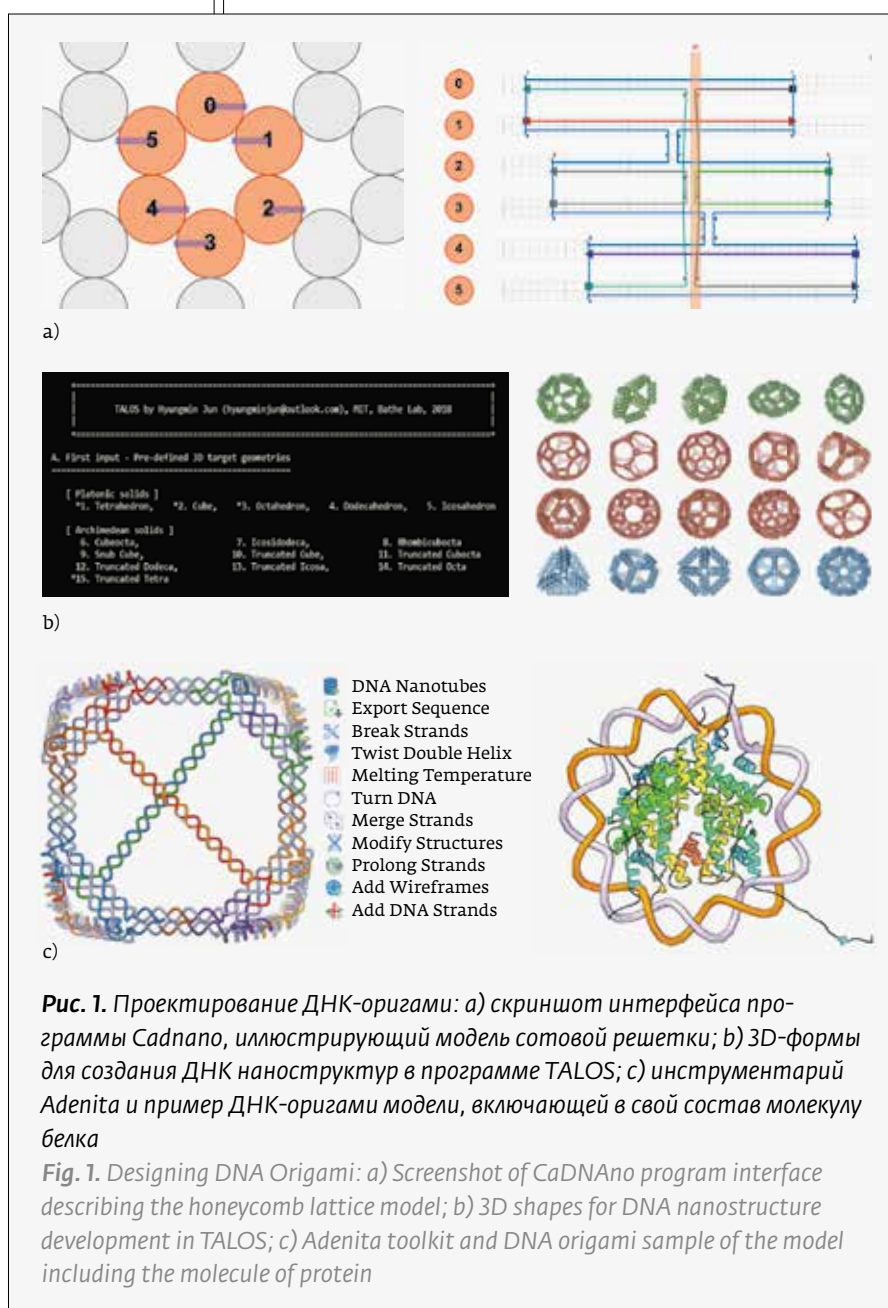


Рис. 1. Проектирование ДНК-оригами: а) скриншот интерфейса программы Cadnano, иллюстрирующий модель сотовой решетки; б) 3D-формы для создания ДНК наноструктур в программе TALOS; в) инструментарий Adenita и пример ДНК-оригами модели, включающей в свой состав молекулу белка

Fig. 1. Designing DNA Origami: a) Screenshot of CaDNAo program interface describing the honeycomb lattice model; b) 3D shapes for DNA nanostructure development in TALOS; c) Adenita toolkit and DNA origami sample of the model including the molecule of protein

ствий. Примером ПО третьего поколения (рис. 1с) можно считать Adentia Samson (2021).

Нужно отметить, что подходы к решению задачи о самосборке и предсказанию геометрии ДНК-оригами наноструктур имеют большой потенциал для оптимизации и постоянно совершенствуются [25].

2. СБОРКА И ОЧИСТКА ДНК-ОРИГАМИ

На этапе сборки ДНК-оригами (рис. 2) требуется высокая чистота компонентов и точность подбора условий процедуры. После того, как оптимальный дизайн скрепок осуществлен с помощью моделирования, их синтез заказывается в специализированных фирмах (в России Синтол, Евроген, ДНК-синтез и т. д.).

Выбор скаффолда для получения ДНК-оригами определяется размером и сложностью желаемой структуры ДНК-оригами. Чаще всего в качестве скаффолда используется одноцепочечная кольцевая молекула ДНК-генома бактериофага М13 длиной 7249 нуклеотидов. Очевидно, что размер структуры ДНК-оригами ограничен длиной скаффолда, используемого для сборки структуры. Эту проблему можно обойти, если использовать более длинные одноцепочечные молекулы ДНК в качестве скаффолдов, либо применять дополнитель-

can provide the user with ability of DNA structure fine-tuning, visualization of just-built model parameters and internal interactions. Example of 3rd generation program is Adentia Samson (2021).

It should be noted that the approaches to predictable self-assembly of DNA origami nanostructures problem have great potential for optimization and are constantly being improved [25].

2. ASSEMBLY AND PURIFICATION OF DNA-ORIGAMI

During the assembly of DNA origami (Fig. 2), high purity of components and precision in the selection procedure conditions are required. After the optimal staple (oligonucleotides) design is achieved through modeling, their synthesis is outsourced to specialized companies (in Russia they are “Syntol”, “Evrogen”, “DNA-synthesis”, etc.).

The scaffold selection for DNA origami is determined by the size and complexity of the desired DNA origami structure. Most common choice is a single-stranded circular DNA molecule of the M13 bacteriophage genome with a length of 7249 nucleotides. Obviously, the size of a DNA origami structure is limited by the scaffold length used for assembly. This issue can be circumvented by using the longer single-stranded DNA molecules as the scaffolds, or by applying additional staples

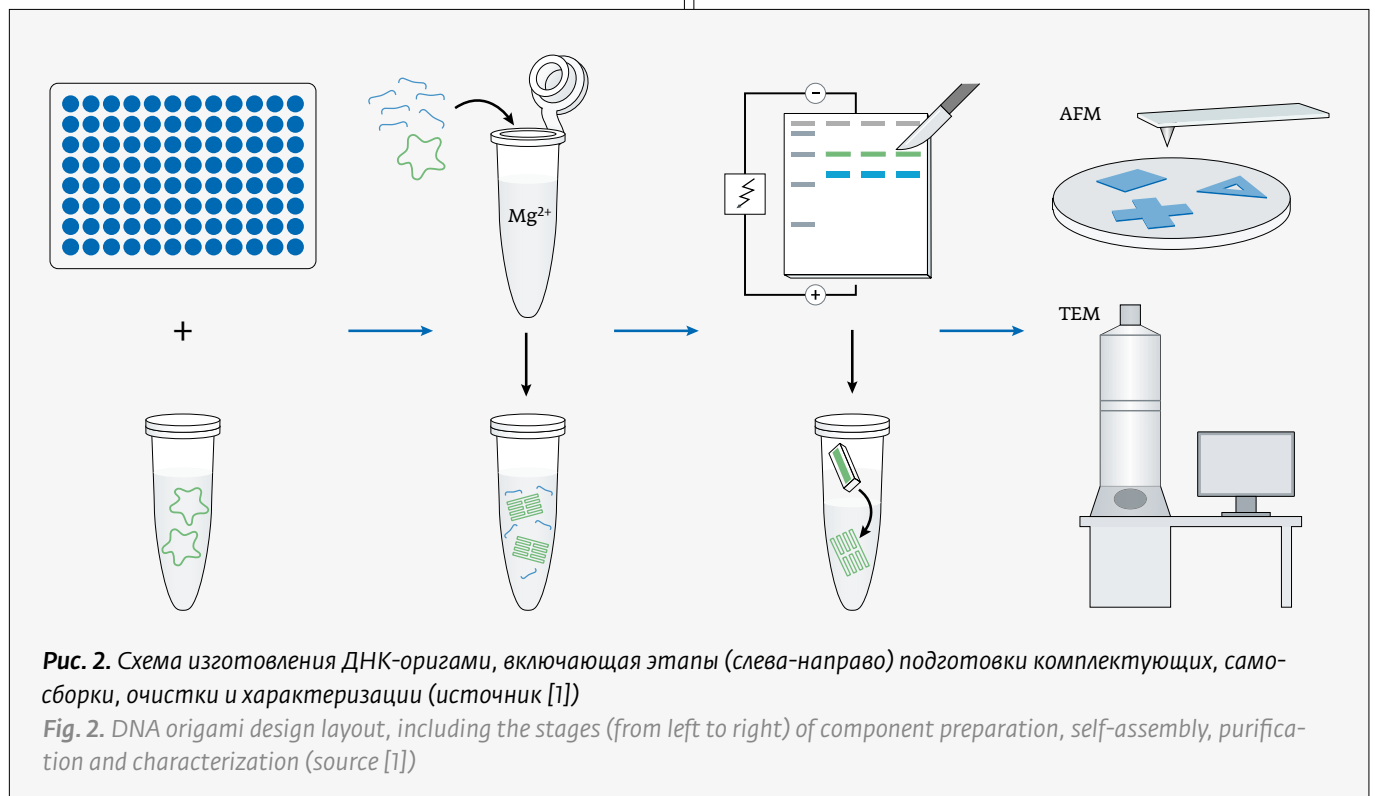


Рис. 2. Схема изготовления ДНК-оригами, включающая этапы (слева-направо) подготовки комплектующих, самосборки, очистки и характеристики (источник [1])

Fig. 2. DNA origami design layout, including the stages (from left to right) of component preparation, self-assembly, purification and characterization (source [1])



ные скрепки, комплементарные частично другим выступающим скрепкам, а частично – скаффолду, что позволяет формировать дополнительные элементы, выступающие за пределы основной структуры ДНК-оригами и увеличивать ее размер.

Стабильность спаривания оснований в молекуле ДНК очень сильно зависит от наличия в среде катионов [2]. В большинстве протоколов для сборки ДНК-оригами реакция происходит при pH=8 в трис-ацетатном буфере (TAE) с концентрацией ионов Mg^{2+} от 5 до 20 mM. К буферному раствору с нужной концентрацией ионов Mg^{2+} добавляют ДНК-скаффолд и скрепки в соотношении 1:10 или 1:20 (чтобы уменьшить количество образующихся неспецифических агрегатов), и подвергают специфической процедуре термической обработки (отжига). При процедуре отжига смесь сначала нагревают на короткое время почти до температуры кипения, а потом медленно охлаждают, в результате чего происходит спонтанная самосборка структуры ДНК-оригами. Длительность процесса охлаждения зависит от сложности структуры ДНК-оригами и занимает время от нескольких часов для маленьких 2D-конструкций до недели для многослойных 3D-конструкций. Создание сложных иерархических структур ДНК-оригами (супер-оригами) требует сборки в несколько этапов.

Следующий этап – очистка и концентрирование полученной структуры ДНК-оригами – имеет критическое значение для оптического/биомедицинского применения. С помощью электрофореза в агарозном геле оценивается качество и чистота сборки конструкции ДНК-оригами, поскольку электрофоретическая подвижность «правильных» и «побочных» продуктов сборки различается. Очистку ДНК-оригами обычно проводят с помощью электрофореза в агарозном геле с последующей экстракцией «правильного» продукта из кусочка вырезанного геля, ультрафильтрацией, преципитацией с полиэтиленгликолем (ПЭГ), ультрацентрифугированием или гель-фильтрацией (эксклюзионной хроматографией). Выбор метода очистки зависит от конечной цели применения структуры ДНК-оригами.

3. МЕТОДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ДНК-ОРИГАМИ

Методы исследования ДНК-оригами структур можно условно разделить на две группы: ансамблевые методы и методы исследования на уровне одиночных молекул. Первые (гель-электрофорез, флуоресцентная спектроскопия, спектроскопия кругового дихроизма) позволяют составить

that are partially complement of other staples or the scaffold, allowing for the formation of additional elements extending beyond the primary DNA origami structure and increasing its size. The stability of base pairing in the DNA molecule significantly depends on the cation presence in the solution [2]. In most protocols for assembling DNA origami, the reaction occurs at pH = 8 in the tris-acetate buffer (TAE) with a concentration of Mg^{2+} ions from 5 to 20 mM. The DNA scaffold and staples are added to the buffer solution with the required concentration of Mg^{2+} ions in a ratio of 1:10 or 1:20 (to reduce the number of nonspecific aggregates generated) and exposed to the procedure of a specific annealing. During the annealing procedure, the mixture is first heated briefly almost to the boiling temperature, and then slowly cooled, resulting in the spontaneous self-assembly of the DNA origami structure. The cooling process duration depends on the complexity of DNA origami structure and ranges from several hours for small 2D structures to a week for multi-layered 3D structures. Creating complex hierarchical DNA origami structures (super-origami) requires assembly in multiple stages. The next step (purification and concentration of the resulting DNA origami structure) is critical for the optical/biomedical applications. The quality and purity of the assembled DNA origami construction is evaluated using the agarose gel electrophoresis, as the gel migration rates of “correct” and “by-product” assembly products differs. Purification of DNA origami is usually done using agarose gel electrophoresis followed by extraction of the “correct” product from a cut gel piece, ultrafiltration, polyethylene glycol (PEG) precipitation, ultracentrifugation or gel filtration (size exclusion chromatography). The choice of purification method depends on the ultimate use of the DNA origami structure.

3. DNA ORIGAMI CHARACTERIZATION METHODS

The study methods for the synthesized DNA origami structures can be divided into two groups: ensemble methods and methods for studying at the level of single molecules. Ensemble methods (gel electrophoresis, fluorescence spectroscopy, circular dichroism spectroscopy) allow for creating a general picture, averaged over a large number of assembled structures: whether the planned DNA origami structure was assembled, how many side products were concomitant.

Second (electron and atomic force microscopy) are techniques suitable for single molecule analysis [26, 27]. In combination with millisecond time resolution, the atomic force microscopes can register fast dynamic processes in the single DNA origami structures, and the use of modified probe tips allows studying the



общую картину, усредненную по большому числу собранных структур: получилось ли в результате собрать ДНК-оригами конструкцию и с каким количеством побочных продуктов. Вторые (электронная и атомно-силовая микроскопия) позволяют регистрировать отдельные молекулы [26, 27]. В сочетании с миллисекундным временным разрешением современные атомно-силовые микроскопы способны регистрировать быстрые динамические процессы в одиночных ДНК-оригами, а применение модифицированных игл зондов позволяет исследовать эластичность ДНК-оригами [28]. Электронная микроскопия высокого разрешения способна зарегистрировать отдельные частицы, прикрепленные на противоположных сторонах одного нуклеотида ДНК, расстояние между которыми всего 0,34 нм [29]. Такое высокое разрешение позволяет отслеживать топологические изменения в одиночных структурах, однако приводит к скорому разрушению ДНК-структуры из-за необходимости готовить образец в вакууме. Для преодоления данной трудности применяются методы криогенной электронной микроскопии [30].

Каждая из представленных техник обладает своими преимуществами и ограничениями. Комбинирование различных методов может обеспечить более полное понимание структуры и свойств ДНК-оригами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод ДНК-оригами позволяет контролируемо придавать форму молекуле ДНК на естественном для этой молекулы масштабе (нанометровом) точно также, как японское искусство оригами позволяет придать форму листу бумаги на масштабе сантиметров. Отличие заключается в том, что для манипуляции молекулами организуются специальные химические и физические условия, в которых структура ДНК-оригами собирает сама себя. Разумеется, такой процесс требует кропотливой подготовки, но его результаты (в том числе в области фотоники) способны окупить все усилия, поскольку они открывают возможность контролировать как форму молекул ДНК, так и расположение нанообъектов с нанометровой точностью в любой позиции вдоль этой формы. При этом метод ДНК-оригами достаточно молод и его возможности еще далеко не исчерпаны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Московского педагогического госу-

эlasticity of DNA origami [28]. High-resolution electron microscopy makes it capable of registering individual particles attached to opposite sides of a single DNA nucleotide, with a distance of only 0.34 nm between them [29]. Such high resolution allows studying topological changes in the single structures, but it leads to rapid destruction of the DNA structure due to the need for sample preparation in a vacuum. To overcome this difficulty, more expensive methods of cryogenic electron microscopy are used [30].

Each of the given methods has its advantages and limitations. Combining different methods can provide the best way to achieve a complete understanding of DNA origami structural properties.

CONCLUSION

DNA origami method allows for controllably shaping a DNA molecule at a natural scale for this molecule (nanometer-scale), just like the Japanese art of origami allows shaping a piece of paper at a corresponding scale. The difference lies in the fact that for manipulating molecules, special chemical and physical conditions are organized in which the DNA origami assembles itself. The process requires careful preparation, but its results (including those in the field of photonics) can justify all efforts, as they provide an opportunity not only to control the shape of DNA molecules but also to place nanoobjects with nanometer precision at any position along this newly acquired shape. Furthermore, the DNA origami method is relatively young and its capabilities are far from being exhausted.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with financial support from the Ministry of Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of the Moscow Pedagogical State University "Physics of nanostructured materials and highly sensitive sensors: synthesis, fundamental research and applications in photonics, life sciences, quantum and nanotechnologies".

AUTHORS

Stepanov Maxim Evgenievich – junior researcher, Moscow Pedagogical State University (MPGU), Shpolskiy Department of Theoretical Physics, junior researcher at the Laboratory of Physics of Advanced Materials and Nanostructures, Moscow, Russia.

RSCI ID: 334465

Scopus ID: 57195265809

ResearcherID: AAB-6181-2022

ORCID: 0000-0002-0332-1235

Khokhryakova Uliana Aleksandrovna – Bachelor in fundamental physics of Moscow Pedagogical State University, research assistant at the Youth Laboratory of Biophotonics and Nanoengineering, e-mail: ua_khokhryakova@mpgu.su.



дарственного университета (МПУ) «Физика наноструктурированных материалов и высокочувствительная сенсорика: синтез, фундаментальные исследования и приложения в фотонике, науках о жизни, квантовых и нанотехнологиях» при поддержке Министерства просвещения РФ.

REFERENCES

1. S. Dey, C. Fan, K. V. Gothelf, J. Li, C. Lin, L. Liu, N. Liu, M. A. D. Nijhuis, B. Saccà, F. C. Simmel, H. Yan, P. Zhan. DNA origami. *Nature Reviews Methods Primers*. 2021;1.
2. M. E. Stepanov, U. A. Khokhryakova, T. V. Egorova, K. A. Magaryan, A. V. Naumov. Shedding light on DNA origami. *PHOTONICS Russia*. 2024; 18 (1): 72–80. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.8.600.602.
3. P. A. Demina, K. V. Khaydukov, V. V. Rocheva, R. A. Akasov, A. N. Generalova, E. V. Khaydukov. Technology of Infrared Photopolymerization. *PHOTONICS Russia*. 2022; 16(8): 600–602. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.1.72.80.
4. N. Anscombe. Direct laser writing. *Nature Photonics*. 2010;4:22–23.
5. P. Apel. Track etching technique in membrane technology. *Radiation Measurements*. 34 (2001) 559–566.
6. A. Balachandran, S. P. Sreenilayam, K. Madanan, S. Thomas, D. Brabazon. Nanoparticle production via laser ablation synthesis in solution method and printed electronic application – A brief review. *Results in Engineering*. 2022;16.
7. V. I. Balykin, P. A. Borisov, V. S. Letokhov, P. N. Melentiev, S. N. Rudnev, A. P. Cherkun, A. P. Akimenko, P. Y. Apel, V. A. Skuratov. Atom “pinhole camera” with nanometer resolution. *JETP Letters*. 2006;84: 466–469.
8. Y. E. Begantsova, R. Zvagelsky, E. V. Baranov, D. A. Chubich, Y. V. Chechet, D. A. Kolymagin, A. V. Pisarenko, A. G. Vitukhnovsky, S. A. Chesnokov. Imidazole-containing photoinitiators for fabrication of sub-micron structures by 3D two-photon polymerization. *European Polymer Journal*. 2021;145.
9. D. A. Chubich, D. A. Kolymagin, I. A. Kazakov, A. G. Vitukhnovsky. Morphology and Structural Parameters of Three-Dimensional Structures Created Using STED Nanolithography. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018;82:1012–1017.
10. J. Fan, L. Qian. Quantum dot patterning by direct photolithography. *Nat Nanotechnol*. 2022;17: 906–907.
11. J. F. Galisteo-Lopez, M. Ibisate, R. Sapienza, L. S. Froufe-Perez, A. Blanco, C. Lopez. Self-assembled photonic structures. *Adv Mater*. 2011;23: 30–69.
12. G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, R. Sobolewski. Picosecond superconducting single-photon optical detector. *Applied Physics Letters*. 2001;79: 705–707.
13. E. Gordon, A. Karabulin, V. Matyushenko, V. Sizov, I. Khodos. Stability and structure of nanowires grown from silver, copper and their alloys by laser ablation into superfluid helium. *Phys Chem Chem Phys*. 2014;16:25229–25233.
14. M. Grzelczak, J. Vermant, E. M. Furst, L. M. Liz-Marzan. Directed self-assembly of nanoparticles. *ACS Nano*. 2010;4:3591–3605.
15. D. Huo, M. J. Kim, Z. Lyu, Y. Shi, B. J. Wiley, Y. Xia. One-Dimensional Metal Nanostructures: From Colloidal Syntheses to Applications. *Chem Rev*. 2019;119:8972–9073.
16. A. Kaur, B. Bajaj, A. Kaushik, A. Saini, D. Sud. A review on template assisted synthesis of multi-functional metal oxide nanostructures: Status and prospects. *Materials Science and Engineering: B*. 2022;286.
17. E. P. Kozhina, S. N. Andreev, V. P. Tarakanov, S. A. Bedin, I. M. Doludenko, A. V. Naumov. Study of Local Fields of Dendrite Nanostructures in Hot Spots Formed on SERS-Active Substrates Produced via Template-Assisted Synthesis. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2021;84:1465–1468.
18. K. A. Magaryan, M. A. Mikhailov, K. R. Karimullin, I. A. Vasilieva, G. V. Klimusheva. Temperature dependence of the luminescence spectra of liquid crystal composites with CdSe quantum dots. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2014;78: 1336–1340.
19. O. M. Marago, P. H. Jones, P. G. Gucciardi, G. Volpe, A. C. Ferrari. Optical trapping and manipulation of nanostructures. *Nat Nanotechnol*. 2013;8: 807–819.
20. F. Porzati, S. Barth, G. C. Gazzadi, S. Frabboni, O. M. Volkov, D. Makarov, M. Huth. Site-Selective Chemical Vapor Deposition on Direct-Write 3D Nanoarchitectures. *ACS Nano*. 2023;17: 4704–4715.
- Egorova Tatiana Vladimirovna – Ph.D. in biological sciences, head of the Youth Laboratory of Biophotonics and Nanoengineering at Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia.
Scopus ID: 56868341400
ORCID: 0000-0002-7554-5246
ResearcherID: P-9982-2017
- Magaryan Konstantin Arutyunovich – Ph.D. in physical and mathematical sciences, Moscow Pedagogical State University (MPGU), Shpolskiy Department of Theoretical Physics, senior researcher at the Laboratory of Physics of Advanced Materials and Nanostructures.
RSCI ID: 723988
ResearcherID: A-4208-2014
ORCID: 0000-0003-4754-4657
- Naumov Andrey Vitalievich – corresponding member of the Russian Academy of Sciences, doctor of physical and mathematical sciences, head of the Troitsk branch of the Lebedev Physical Institute, head of the department of Moscow Pedagogical State University (MPGU), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, associate professor, Moscow, Russia.
RSCI ID: 35867
Scopus ID: 7201349036
ResearcherID: E-8905-2010
ORCID: 0000-0001-7938-9802.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that they have no conflict of interests. All authors took part in preparation of the article and supplemented the manuscript in terms of their scope of work.

CONTRIBUTION OF THE COMPOSITE AUTHORS

The article has been prepared based on the work of all composite authors.

Программа льготного лизинга для МСП

Почти 1,3 млрд рублей будет направлено из федерального бюджета на поддержку механизма льготного лизинга для малого и среднего бизнеса в 2024 году. Такое распоряжение подписал Председатель Правительства Михаил Мишустин. Решение позволит бизнесу сконцентрировать сэкономленные средства на организации самого производства и увеличить выпуск продукции.

Речь идет о программе, позволяющей предпринимателям на выгодных условиях арендовать оборудование для развития своего дела. Так, ставка лизинговых платежей за оборудование российского производства составляет до 6% годовых (вместо рыночных 15%), для иностранного – до 8%.

Выделенные распоряжением Правительства средства поступят в уставный капитал Федеральной корпорации по развитию МСП, которая затем направит средства Лизинговой компании по развитию малого и среднего предпринимательства.

«Такое финансирование позволит расширить число участников программ, которые ведет «МСП Лизинг». Больше компаний смогут оформить соглашения по льготным ставкам, получить необходимую технику и основные средства, а следовательно, улучшить экономику своих проектов и увеличить выпуск продукции», – отметил Михаил Мишустин.

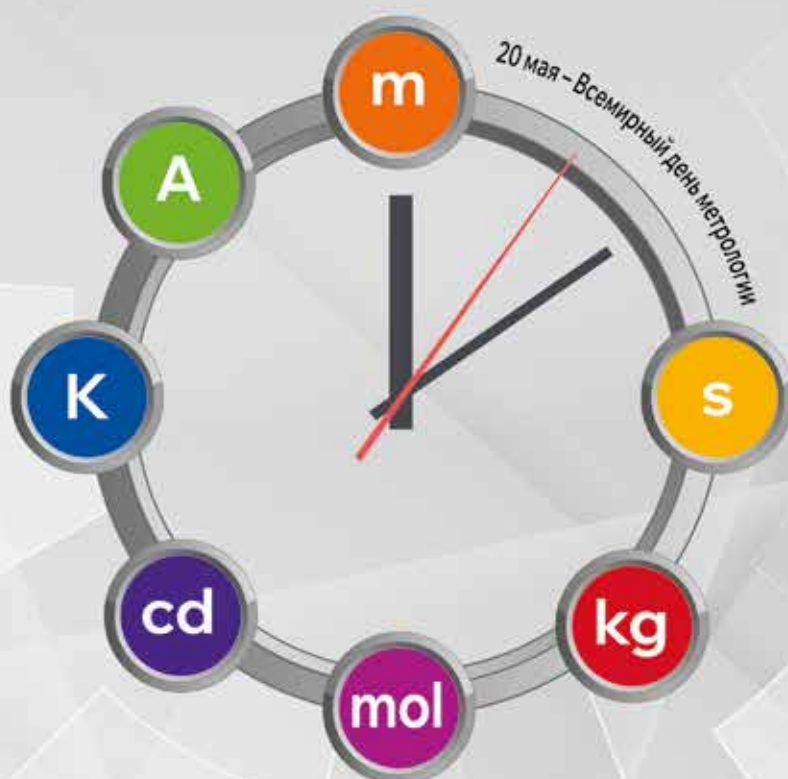
Работа ведется в рамках национального проекта «Малое и среднее предпринимательство и поддержка индивидуальной предпринимательской инициативы».

<http://government.ru/news/50375/>

18-я МОСКОВСКАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

metrol expo '2024

**ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ –
ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ**






ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ В ОБЛАСТИ
МЕТРОЛОГИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

18–20 июня | Москва

ЦВК “ЭКСПОЦЕНТР” | Павильон №5

Метро “Выставочная”,
Краснопресненская набережная, 14

-  metrol.expoprom.ru
-  +7 (495) 937-40-23
-  metrol@expoprom.ru

Получить
бесплатный
пригласительный
билет:





21. C. Tan, J. Chen, X.-J. Wu, H. Zhang. Epitaxial growth of hybrid nanostructures. *Nature Reviews Materials*. 2018;3.
22. X. Wang, X. Dai, H. Wang, J. Wang, Q. Chen, F. Chen, Q. Yi, R. Tang, L. Gao, L. Ma, C. Wang, X. Wang, G. He, Y. Fei, Y. Guan, B. Zhang, Y. Dai, X. Tu, L. Zhang, L. Zhang, G. Zou. All-Water Etching-Free Electron Beam Lithography for On-Chip Nanomaterials. *ACS Nano*. 2023;17: 4933–4941.
23. R. Zvagelsky, D. Chubich, D. Kolymagin, A. Pisarenko, A. Vitukhnovskiy. Fabrication of templates for metallic nanoantennas by STED-DLW lithography. 2019.
24. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov. Application of DNA molecules in nature-inspired technologies: a mini review. *Frontiers in Nanotechnology*. 2023;5.
25. R. V. Reshetnikov, A. V. Stolyarova, A. O. Zalevsky, D. Y. Panteleev, G. V. Pavlova, D. V. Klinov, A. V. Golovin, A. D. Protopopova. A coarse-grained model for DNA origami. *Nucleic Acids Res*. 2018;46: 1102–1112.
26. S. Ramakrishnan, B. Shen, M. A. Kostianen, G. Grundmeier, A. Keller, V. Linko. Real-Time Observation of Superstructure-Dependent DNA Origami Digestion by DNase I Using High-Speed Atomic Force Microscopy. *ChemBiochem*. 2019;20:2818–2823.
27. S. M. Douglas, H. Dietz, T. Liedl, B. Hogberg, F. Graf, W. M. Shih. Self-assembly of DNA into nanoscale three-dimensional shapes. *Nature*. 2009;459: 414–418.
28. A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama. Single-molecule analysis using DNA origami. *Angew Chem Int Ed Engl*. 2012;51: 874–890.
29. N. Li, Y. Shang, R. Xu, Q. Jiang, J. Liu, L. Wang, Z. Cheng, B. Ding. Precise Organization of Metal and Metal Oxide Nanoclusters into Arbitrary Patterns on DNA Origami. *J Am Chem Soc*. 2019;141: 17968–17972.
30. X. C. Bai, T. G. Martin, S. H. Scheres, H. Dietz. Cryo-EM structure of a 3D DNA-origami object. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2012;109:20012–20017.

АВТОРЫ

Максим Евгеньевич Степанов – м. н. с., Московский педагогический государственный университет (МПГУ), каф. теор. физики им. Э. В. Шпольского, м. н. с. лаб. физики перспективных материалов и наноструктур, Москва, Россия.
РИНЦ ID: 334465

Scopus ID: 57195265809
ResearcherID: AAB-6181-2022
ORCID: 0000-0002-0332-1235

Хохрякова Ульяна Александровна – бакалавр по направлению «Фундаментальная физика» МПГУ, лаборант-исследователь молодежной лаборатории биофотоники и наноинженерии.

Егорова Татьяна Владимировна – к. б. н., зав. молодежной лаб. биофотоники и наноинженерии, МПГУ, Москва, Россия.

Scopus ID: 56868341400
ORCID: 0000-0002-7554-5246
ResearcherID: P-9982-2017

Магарян Константин Арутюнович – к. ф.-м. н., МПГУ, каф. теор. физики им. Э. В. Шпольского, с. н. с. лаб. физики перспективных материалов и наноструктур.

РИНЦ ID: 723988
ResearcherID: A-4208-2014
ORCID: 0000-0003-4754-4657

Наумов Андрей Витальевич – член-корр. РАН, д. ф.-м. н., Рук. Троицкого филиала ФИАН им. П. Н. Лебедева, зав. каф., МПГУ, член-корр. РАН, доц., Москва, Россия.

РИНЦ ID: 35867
Scopus ID: 7201349036,
ResearcherID: E-8905-2010
ORCID: 0000-0001-7938-9802

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива.



XXI Международная конференция «ОПТИКА ЛАЗЕРОВ» ICLO 2024

г. Санкт-Петербург, Россия, 01-05 июля 2024 г.

<https://www.laseroptics.org/>

conference@laseroptics.org

Тел.: +7 (812) 323 6348

Факс: +7 (812) 334 0824

Твердотельные лазеры
Высокомощные лазеры
Полупроводниковые лазеры, материалы и устройства
Управление лазерным излучением
Сверхсильные поля и сверхбыстрые процессы
Лазеры и системы для визуализации,
зеленой фотоники и устойчивого развития
Лазеры для космических систем связи,
локации, геодезии и навигации
Нелинейная фотоника
Оптические наноматериалы
Лазеры на свободных электронах
Нелинейная квантовая фотоника
Биофотоника

Выставка

Официальный язык конференции - английский

Гидрометеорологический спутник «Метеор-М» № 2-4 выведен на орбиту

29 февраля 2024 года с космодрома Восточный был успешно запущен и выведен на заданную орбиту космический аппарат «Метеор-М» № 2-4 – часть российской гидрометеорологической группировки «Метеор-3М». Спутник оснащен бортовым радиолокационным комплексом на базе активной фазированной антенной решетки и гелиогеофизическими приборами (измеритель коротковолновой отраженной радиации и радиочастотный масс-спектрометр), что позволит обеспечить всепогодный радиолокационный мониторинг Северного морского пути и расширить номенклатуру контролируемых гелиогеофизических параметров. Часть приборов на его борту создана в ИКИ РАН. Это комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС-2) и звездные датчики БОКЗ-М2, а также элементы многозонального сканирующего устройства МСУ-МР и гелиогеофизического аппаратурного комплекса ГТАК-М.

Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС-2) на борту «Метеора-М» № 2-4

предназначен для многозональной съемки Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения. Ширина полосы сканирования составляет более 1000 км, пространственное разрешение 60 м. Подобные комплексы уже работают на более ранних аппаратах серии «Метеор-М».

Аппаратура КМСС-2 и звездные датчики БОКЗ-М2, обеспечивающие высокоточную ориентацию космических аппаратов серии «Метеор-М», разработаны и созданы в отделе оптико-физических исследований ИКИ РАН.

В создании аппаратуры на борту аппарата также участвовали сотрудники Специального конструкторского бюро космического приборостроения ИКИ РАН в Тарусе (Калужская область). Здесь были изготовлены электромеханический блок управления приводами многоканального сканирующего устройства МСУ-МР и блок накопления данных для гелиогеофизического аппаратурного комплекса ГТАК-М.

Космический аппарат «Метеор-М» № 2-4 создан корпорацией «ВНИИЭМ» (входят в структуру



ГК «Роскосмос»). Он предназначен для решения задач гидрометеорологического обеспечения, мониторинга климата и окружающей среды, изучения природных ресурсов Земли, контроля гелиогеофизической обстановки в околоземном космическом пространстве, получения информации с автоматических измерительных платформ сбора данных и ретрансляции сигналов от аварийных радиобуев международной спутниковой поисково-спасательной системы КОСПАС-САРСАТ.

<https://iki.cosmos.ru/news/pribory>



ITNT – 2024

20–24 мая 2024, Самара, Россия

X Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» посвященная 300-летию Российской академии наук

С 20 по 24 мая 2024 года в Самаре на базе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева и Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской Академии Наук состоится юбилейная X Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2024), посвященная 300-летию Российской академии наук. ИТНТ-2024 будет проходить в очном формате.

Целью проведения Конференции ИТНТ-2024 является предоставление возможности научных дискуссий и обсуждения результатов фундаментальных и прикладных исследований в области информационных технологий и нанотехнологий, привлечение молодежи в сферу передовых научных исследований, обмен опытом научно-образовательной деятельности при подготовке ИТНТ-специалистов.

Одним из приоритетных направлений работы Конференции ИТНТ-2024 является образовательный аспект, заключающийся в предоставлении студентам и молодым ученым возможности ознакомиться с новейшими научными достижениями по тематике Конференции, а также с уникальным научным оборудованием и лабораторной базой Самарского университета, используемой для реализации современных научных проектов. В рамках Конференции проводится Молодежная школа, где молодые ученые и студенты получают возможность повысить свой профессиональный уровень и опубликовать свои научные результаты.

443001, г. Самара, Молодогвардейская, 151

secretary@itnt-conf.org

<http://itnt-conf.org/index.php>



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosfera.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru