



Проливая свет на ДНК-оригами. Применения в фотонике

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

Фотоника и ДНК-нанотехнологии удачно дополняют друг друга благодаря возможности использования ДНК-наноструктур для создания сложных нано-оптических систем. Яркие примеры такого сотрудничества можно найти при применении метода ДНК-оригами к задаче создания элементной базы фотоники: контролируемая манипуляция световыми полями диктует высокие требования к точности размещения элементов (наномасштаб), которым можно удовлетворить, адресно прикрепляя желаемые нанообъекты к свернутой требуемым образом молекуле ДНК. В данном обзоре, завершающим цикл работ по применению ДНК-оригами, мы рассмотрим несколько успешных примеров подобного рода сотрудничества.

Ключевые слова: ДНК-нанотехнологии, ДНК-оригами, наноструктуры, плазмоника, микроскопия сверхвысокого разрешения, наноскопия, люминесценция, эффект Парселла, микрорезонатор, гиперусиленное комбинационное рассеяние света, поверхностно-усиленное КРС (SERS), локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR)

Статья получена: 12.12.2023

Статья принята: 19.01.2024

ВВЕДЕНИЕ

Переход на наноразмерные объекты произвел революцию, вероятно, во всех естественно-научных и технических исследованиях и разработках за последние полвека. При этом своим успехом наночастицы обязаны тому факту, что именно в нанометровом диапазоне размеров даже при комнатных температурах

Shedding Light on DNA Origami: Applications in Photonics

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

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

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

Photonics and DNA nanotechnologies complement each other well in a way that DNA nanostructures can be used to build intricate nano-optical systems. The DNA origami method has been particularly successful in creating the building blocks for photonics. Precise positioning of elements at the nanoscale is crucial for manipulating light fields, and this can be achieved by attaching specific nano-objects to a folded DNA molecule in a controlled manner. This review will highlight successful examples of how DNA origami and photonics can collaborate effectively.

Keywords: DNA nanotechnology, DNA origami, nanostructures, plasmonics, super-resolution microscopy, nanoscopy, luminescence, Purcell effect, microcavity, hyper-enhanced Raman scattering, surface-enhanced Raman scattering (SERS), localized surface plasmon resonance (LSPR)

Статья получена: 12.12.2023

Статья принята: 19.01.2024

INTRODUCTION

Working with nanoobjects has greatly impacted scientific and technological research over the past half of the century. Nanoparticles have become successful because their unique properties reveal themselves at nanoscale (even at room temperatures) due to the influence of quantum laws and increasing contribution of surface effects. In addition, the nanoscale is significant as it aligns with the sizes of many natural objects, such as cells (~10 μm) or their components (protein globule, DNA ~10 nm) and wavelengths of the visible light (~0.5 μm), making nanoparticles valuable in fields like biomedicine and optics. However, the individual behavior of nanoobjects is only the beginning, with a fascinating world waiting to be explored when they interact with each other. Just



начинают проявляться уникальные свойства вещества: вступают в силу квантовые законы, а определяющую роль в условиях уменьшающегося объема начинает играть поверхность. Кроме того, наномасштаб соответствует естественному размеру многих окружающих нас природных объектов и явлений, начиная с живой клетки (~10 мкм) и входящих в ее состав компонент (свернутые в глобулы молекулы белков, ДНК ~10 нм), заканчивая длинами волн света видимого диапазона (~500 нм), что делает наночастицы привлекательными для биомедицины и оптики. Однако это только начало истории: уникальное поведение индивидуальных нанообъектов, являясь лишь вершиной айсберга, скрывает под собой огромный мир, возникающий при рассмотрении взаимодействия нанообъектов друг с другом. При этом во многом подобно тому, как высокая температура маскирует сверхпроводимость металлов, неоптимальная геометрия скрывает и усредняет возможности, лежащие во взаимном влиянии наночастиц друг на друга. В данном обзоре, являющемся продолжением работ [1, 2], мы попробуем проследить на нескольких примерах, как современный метод ДНК-оригами, заключающийся в контролируемой самосборке молекул ДНК произвольной геометрии, подробно рассмотренный в [1, 2], позволяет адресно размещать наночастицы вдоль молекулы ДНК, добиваясь уникальных оптических свойств ансамблей наночастиц в различных областях фотоники.

2. ПРИМЕНЕНИЯ В ФОТОНИКЕ

Многочисленные исследования показывают, что электромагнитные поля могут взаимодействовать с металлами особым образом, возбуждая в них коллективные колебания свободных электронов – плазмоны [3]. В случае, когда пространство для движения электронов ограничено размерами наночастиц, явление принимает отчетливо резонансный характер, зависящий от формы и размера частиц, и называется локализованным поверхностным плазмонным резонансом (localized surface plasmon resonance, LSPR).

Эффект можно усилить, если принять во внимание, что плазмоны, являясь наведенными колебаниями заряда наночастиц, создают собственные поля вблизи их поверхности – эванесцентные волны. Эти волны экспоненциально затухают на расстояниях в десятки нанометров (зависит от длины волны падающего света), но, если вторая частица окажется в эванесцентном поле первой, взаимодействие между ними может приводить к значительной концентрации энергии поля в зазоре между частицами – возникновению так называемых горячих точек (hot spots). Резонансный характер явления при этом сохраняется, а его пара-

as high temperatures can conceal the superconductivity of metals, non-optimal geometries can hide and average out the potential advantages of the interactions between nanoparticles. Through this review, based on our previous work [1, 2], we will explore how the advanced DNA-origami technique allows precise placement of nanoparticles along DNA strands, leading to exceptional optical properties for application in photonics.

2. PHOTONICS APPLICATIONS

Numerous studies show that electromagnetic fields can interact with metals in a special way by exciting collective oscillations of free electrons known as plasmons [3]. In cases where the space for electron movement is limited by the size of the nanoparticles, the phenomenon takes on a distinctively resonant character depending on the shape and size of the particles, and is called localized surface plasmon resonance (LSPR).

This effect can be enhanced by considering that plasmons, being induced charge oscillations of nanoparticles, create their own fields near their surface – evanescent waves. These waves attenuate exponentially on the scale of tens of nanometers (depend on wavelength), but if a second particle is placed in the evanescent field of the first, interaction between them can lead to a significant concentration of field energy in the gap between the particles – the emergence of so-called hot spots. Here the resonant nature of the phenomenon is preserved, but its parameters begin to depend on the geometry of the next level, namely the mutual arrangement of nanoparticles. Plasmonic nanoparticle systems are sometimes referred to as nanoantennae [4].

Significant modification of its optical response (showing a strong dependence on the position) can be achieved if an emitter (organic dye, quantum dot, color center, etc.) is placed at a hot spot location due to increase of local density of optical states (Purcell effect). Thus, the ability to controllably and precisely place nanoobjects often has paramount importance for applications in photonics. In the case of random placement, the behavior of ensembles is averaged over all possible arrangements, masking interesting effects. The DNA origami method allows reproducible achievement of precise and addressable placement of virtually any nano objects, providing the opportunity to observe a range of beautiful optical effects. Below, we will consider several specific examples illustrating possibilities of this method.

An important challenge in photonics is finding efficient ways to transmit light energy on a sub-diffraction scale. In study [5], the use of DNA origami for creating a plasmonic nanowaveguide that transmits energy with low losses over nanometer distances was demonstrated (fig. 1a). Two 40-nanometer spherical gold nanoparticles

метры начинают зависеть от геометрии следующего уровня, а именно – от взаимного расположения наночастиц. Системы плазмонных наночастиц иногда называют наноантеннами [4].

Если разместить в горячей точке какой-либо излучающий центр (органический краситель, квантовую точку, центр окраски и др.), за счёт увеличения локальной плотности оптических состояний, можно добиться значительной модификации его оптического ответа (эффект Парселла), причем ответ унаследует сильную зависимость от расположения. Таким образом, умение контролируемо и точно размещать нанообъекты часто имеет первостепенное значение для применений в фотонике, поскольку в случае случайного размещения поведение ансамблей усредняется по всем возможным расположениям, маскируя интересные эффекты. Метод ДНК-оригами позволяет воспроизводимо достигать точного адресного размещения практически любых нанообъектов, чем обеспечивает возможность наблюдения целого ряда красивых оптических эффектов. Ниже мы рассмотрим несколько отдельных примеров, иллюстрирующих богатые возможности метода.

Поиск эффективных путей передачи энергии света на субдифракционном масштабе является актуальной задачей фотоники. В работе [5] была продемонстрирована возможность использования ДНК-оригами для изготовления плазмонного нановолновода, передающего энергию с малыми потерями на нанометровых расстояниях (рис. 1а). Для этого на прямой размещались две 40-нанометровые сферические золотые наночастицы (Au-Au) на расстоянии 38 нм, слишком большом для их связи через взаимодействие эванесцентных полей, так что частицы рассеивали внешний свет независимо. При добавлении в зазор между золотыми частицами 30-нанометровой серебряной частицы (в тримерах Au-Ag-Au) возникал обмен энергией с малыми потерями, регистрируемый по изменениям в спектре рассеяния. В работе был предложен механизм передачи энергии – через нерезонансное наведение суперпозиции плазмонных мод в промежуточной частице, служившей, таким образом, эффективным плазмонным передатчиком взаимодействия.

Не менее важной задачей фотоники является изготовление усилителей сигналов рассеяния молекул (гигантское комбинационное рассеяние, ГКР, или surface-enhanced Raman scattering, SERS), поскольку это дает возможность получения чувствительных наносенсоров для различных применений [13]. В работе [6] эта задача решается с использованием метода ДНК-оригами (рис. 1б): частицы в форме галстука-бабочки с ребром призм 80 нм и высотой 15 нм адресно разме-

(Au-Au) were placed in a straight line at a distance of 38 nm, too large for their coupling through evanescent field interactions, causing the particles to scatter external light independently. When a 30-nanometer silver nanoparticle (in Au-Ag-Au trimers) was added to the gap between the gold particles, energy exchange with low losses occurred, detected by changes in the scattering spectrum. A mechanism of energy transfer was proposed through non-resonant induction of a superposition of plasmon modes in the intermediate particle, thus serving as an effective plasmonic interaction transmitter.

Equally important in photonics is the fabrication of surface-enhanced Raman scattering (SERS) signal amplifiers, as it allows for sensitive nanosensors for various applications [13]. In study [6], this task is addressed using the DNA origami method (Fig. 1b): bow tie – shaped particles with prism edges of 80 nm and height 15 nm are precisely placed on a DNA origami substrate after modifying their surface with complementary anchor oligonucleotides. Additionally, the authors placed a single Cy-5 dye molecule in a 5 nm gap between the prisms. The assembled configuration showed a stable 2×10^9 -fold signal amplification of the light scattering with single dye molecules.

Fluorescence enhancement (SEF) using plasmonic methods is another promising task for nanosensing. In study [7], fluorescence-enhancing dipole nanoantennae were assembled using DNA origami (Fig. 1c), consisting of two 100-nanometer gold spherical nanoparticles separated by a 12–17 nm gap. It was shown that this configuration could increase the fluorescence signal of the ATTO647N dye molecule fixed in the gap by ~5000 times compared to the same dye without the plasmonic nanoantenna and more than 160 000 times compared to the fluorescence signal obtained from measurements in solution. It was demonstrated that the signal from a single emitter could be distinguished even in a 25 μ M dye solution if the rest of the fluorescence was quenched using NiCl_2 , as the antenna-enhanced luminescence is not sensitive to the molecules' own quantum yield.

DNA origami provides a vast field of opportunities for testing ideas of theoretical optics on the nanoscale. In the elegant work [8] by Chikkaraddy and colleagues, DNA origami was used to precisely position a Cy-5 dye molecule in a narrow (5 nm) gap between a spherical gold nanoparticle (80 nm diameter) and its reflection on a gold mirror (nanoparticle-on-mirror geometry, Fig. 1d). By moving the molecule further away from the symmetry axis in successive experiments, the authors “measured” the local density of optical states and found a monotonic dependence with a maximum on the symmetry axis. This approach has advantages over probe methods, as it introduces only minor perturbations to the measured effect.

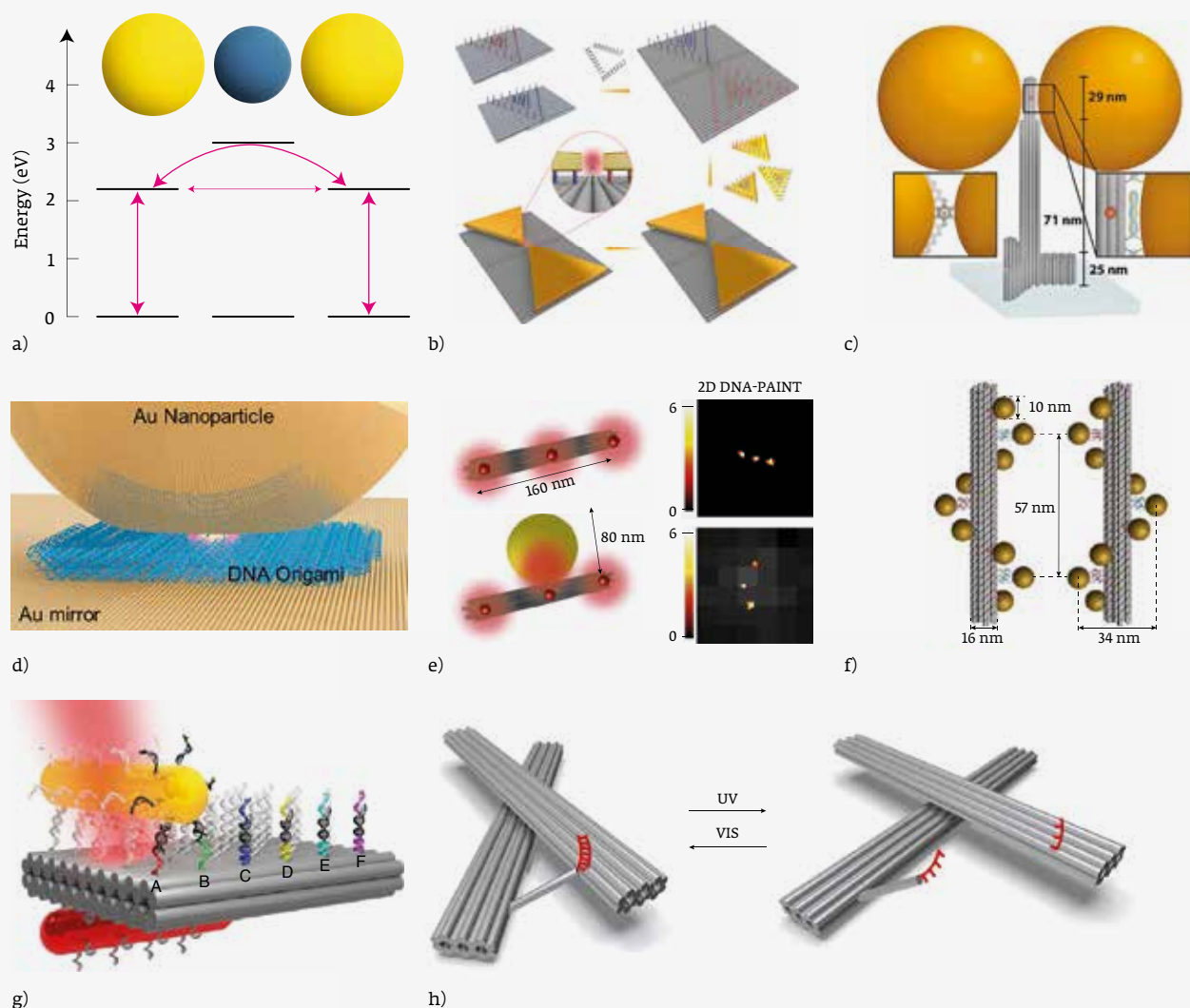


Рис. Примеры использования ДНК-оригами в фотонике: а) нановолновод для малодиссипативной передачи энергии через взаимодействие плазмонов (адаптировано с изменениями из [5]); б) изготовление SERS-наноструктур в виде димеров в форме галстука-бабочки (адаптировано с изменениями из [6]); в) изготовление сферических димеров для усиления флуоресценции (адаптировано с изменениями из [7]); д) геометрия частица-на-зеркале для изучения локальной плотности оптических состояний в горячей точке (адаптировано с изменениями из [8]); е) мираж единичных молекул, наблюдаемый вблизи плазмонных наноструктур (адаптировано с изменениями из [9]); ф) изготовление оптически активных анизотропных плазмонных наноструктур (адаптировано с изменениями из [10]); г) пример динамического ДНК-оригами изменяющего конфигурацию в ответ на изменение состава раствора (адаптировано с изменениями из [11]); х) пример изменения конфигурации ДНК-оригами в ответ на световое воздействие (рисунок адаптирован с изменениями из работы [12])

Fig. 1. Examples of using DNA origami in photonics: a) nanowaveguide for low-dissipative energy transfer through plasmon interaction (adapted with modifications from [5]); b) fabrication of SERS nanostructures in the form of bow-tie-shaped dimers (adapted with modifications from [6]); c) production of spherical dimers to enhance fluorescence (adapted with modifications from [7]); d) particle-on-mirror geometry to study local density with temperature changes in a hot station (adapted with modifications from [8]); e) in the world of single molecules, observed near plasmonic nanostructures (adapted with modifications from [9]); f) creation of optically active anisotropic plasmonic nanostructures (adapted with modifications from [10]); g) an example of dynamic DNA origami changing configuration in response to changes in solution composition (adapted with modifications from [11]); h) an example of a change in the configuration of DNA origami in response to light exposure (the figure is adapted with modifications from [12]).

щаются на подложке из ДНК-оригами после модификации их поверхности комплементарными подложке олигонуклеотидами-якорями. Более того, авторы работы разместили 5-нм в зазоре между призмами единичную молекулу красителя Су-5. Собранный конфигурация показала стабильное $2 \cdot 10^9$ -кратное усиление сигнала комбинационного рассеяния света единичными молекулами красителя.

Усиление флуоресценции с помощью плазмонных методов (surface enhanced fluorescence, SEF) – другая перспективная задача наносенсорики. В работе [7] при помощи ДНК-оригами собирались усиливающие флуоресценцию дипольные наноантенны (рис. 1с), состоящие из двух 100-нанометровых золотых сферических наночастиц, разделенных 12–17 нм зазором. Было показано, что с помощью такой конфигурации можно увеличить сигнал флуоресценции молекулы красителя АТТО647N, зафиксированной в зазоре, в ~5000 раз по сравнению с таким же красителем в отсутствии плазмонной наноантенны и более чем в 160 000 раз по сравнению с сигналом флуоресценции, полученным при измерениях в растворе. Было показано, что сигнал от единичного излучателя можно различить даже в 25 мкМ растворе красителя, если погасить остальную флуоресценцию с помощью NiCl_2 , поскольку усиленная наноантенной люминесценция оказывается не чувствительна к собственному квантовому выходу молекул.

ДНК-оригами предоставляет большое поле возможностей для проверки идей теоретической оптики на наномасштабе. В красивой работе [8] Chikkaraddy и соавторы использовали ДНК-оригами для точного размещения молекулы красителя Су-5 в узком (5 нм) зазоре между сферической золотой наночастицей (диаметр 80 нм) и ее отражением в золотом зеркале (геометрия nanoparticle-on-mirror, рис. 1d). Перемещая молекулу от эксперимента к эксперименту все дальше от оси симметрии задачи, авторы «измерили» локальную плотность оптических состояний по пути к периферии и обнаружили монотонную зависимость с максимумом на оси симметрии. Подход имеет преимущества перед зондовыми методами, поскольку вносит лишь малые возмущения в измеряемый эффект. Также авторы продемонстрировали, что в данной геометрии тушения флуоресценции при размещении излучателя ближе 5 нм от центра горячей точки не происходит – напротив, наблюдается значительное (свыше $\times 1000$) усиление флуоресценции из-за возникающего связывания излучения со специфическими плазмонными модами такой системы.

Точность в позиционировании при использовании ДНК-оригами можно использовать для калибровки и проверки методов световой микроскопии

The authors also demonstrated that in this geometry, fluorescence quenching does not occur when the emitter is placed closer than 5 nm to the center of the hot spot – on the contrary, a significant (over 1000-fold) enhancement of fluorescence is observed due to the coupling of emission to specific plasmonic modes of such a system.

The precision in positioning using DNA origami can be utilized for calibration and validation of super-resolution optical microscopy methods (nanoscopy). For example, in the work [14], a DNA scaffold sized 100×70 nm was selectively labeled with two ATTO655 dye molecules at a predetermined distance of 89.5 nm, deliberately smaller than the diffraction limit. The positions of the molecules were further determined using fluorescence nanoscopy methods, showing that the position of individual molecules could be established with an accuracy of ± 5.9 nm. But is such precision always achievable in practice?

This question was investigated in the study [9], where the use of DNA origami revealed that the task of determining the position of an object by optical methods is complicated if they are in close proximity to plasmonic nanoparticles, due to the emergence of the single emitter mirages effect. In this study, the image offset effect was quantitatively measured as follows: Atto532 dye molecules were selectively placed in a line with an estimated accuracy of ± 3 nm. When gold nanoparticles were added, a deviation of the measured position of the dye molecules from the straight line was demonstrated. At the same time, the position of the nanoparticle that was next to the gold nanoparticle was shifted (Fig. 1e). In addition, as shown in the same study, the apparent position of the glowing object depends on the size of the nanoparticle and its position relative to the emitter and can shift by tens of nanometers from its true position. When conducting super-resolution microscopy of such systems, where plasmonic effects play a noticeable role (e.g., when obtaining images near nanoantennae), the possibility of such phenomena must be considered.

Another challenge in photonics is design of anisotropic optical systems active in the visible range, as chiral molecules are optically active mainly in the UV and IR. In work [10], the possibility of creating optically active plasmonic systems in the visible range was investigated using the DNA-origami method (Fig. 1f). For this purpose, several 10-nanometer gold nanoparticles were placed close together (2 nm apart) along right-handed or left-handed DNA-origami spirals with a spiral pitch of 57 nm. Circular dichroism was then measured in a bulk sample containing such spiral complexes. It was shown that light with right circular polarization is significantly more absorbed by right-handed plasmonic nanostructures, and vice versa, due to the plasmonic nanoparticles arranged along the spiral being interconnected by the interaction of their



сверхвысокого разрешения (наноскопии). Например, в работе [14] ДНК-подложка размером 100×70 нм адресно размечалась двумя молекулами красителя ATTO655 на заданном расстоянии в 89,5 нм, заведомо меньшем дифракционного предела. Положение молекул далее определялось с помощью методов флуоресцентной наноскопии, и было показано, что позиция единичных молекул может быть установлена с точностью $\pm 5,9$ нм. Но всегда ли на практике доступна такая точность?

Этот вопрос изучался в работе [9], где применение ДНК-оригами выявило, что задача определения положения объекта оптическими методами усложняется, если они оказываются вблизи плазмонных наночастиц, из-за возникновения эффекта миражей одиночных излучателей. В этой работе эффект смещения изображения был измерен количественно следующим образом: молекулы красителя Atto532 адресно размещались в линию с точностью, оцененной в ± 3 нм. При добавлении золотых наночастиц демонстрировалось отклонение измеренного положения молекул красителя от прямой линии. При этом отклонялось изображение той из них, что была рядом с золотой наночастицей (рис. 1е). Более того, как показано в той же работе, кажущееся положение светящегося объекта зависит от размера наночастицы и ее положения относительно излучателя и может смещаться на десятки нанометров относительно ее истинного положения. При проведении микроскопии сверхвысокого разрешения таких систем, где заметную роль играют плазмонные эффекты (например при получении изображений вблизи наноантенн), нужно обязательно учитывать возможность подобных явлений.

Другой актуальной задачей фотоники является исследование анизотропных оптических систем в видимом диапазоне (хиральные молекулы оптически активны в основном в УФ и ИК). В работе [10] при помощи метода ДНК-оригами исследовалась возможность создания оптически активных в видимом диапазоне плазмонных систем (рис. 1ф). Для этого несколько 10-нанометровых золотых наночастиц размещались почти вплотную (на расстоянии 2 нм) вдоль правовинтовой или левовинтовой ДНК-оригами спирали с шагом спирали в 57 нм, после чего круговой дихроизм измерялся в объемном образце, содержащем такие спиральные комплексы. Было показано, что свет с правой круговой поляризацией значительно сильнее поглощается правовинтовыми плазмонными наноструктурами и, наоборот, поскольку плазмонные наночастицы, расположенные по спирали, оказываются связаны взаимодействием их ближних полей, в результате чего их оптический ответ приобретает специфичность, параметры которой можно

near fields. This results in their optical response acquiring specificity, the parameters of which can be regulated by changing the geometry of the particles, allowing such environments to be used as levo- or dextro-rotatory.

Furthermore, rational engineering of DNA-origami opens up the possibility of controlled changes in the geometric configuration of the assembly over time in response to external stimuli (dynamic DNA-origami [15]). In the context of plasmonics, this dynamic effect can be used to change the optical properties of plasmonic nanoparticles attached to DNA-origami. In practice, circular dichroism measurement, sensitive to small deviations from symmetry in the arrangement of even small nanoparticles, is commonly used [16]. For example, in work [11] (Fig. 1g), a configuration of two crossed nanowires (length 35 nm, diameter 10 nm) is implemented, one of which can take fixed steps (every 7 nm) along the axis of the other in response to the addition of specific control oligonucleotides to the solution. In work [12], the geometry of nanoobjects changed in response to light exposure (Fig. 7h), leading to reversible cis-trans isomerization of photoactive azobenzene molecules linking two parts of DNA origami, thereby changing the angle between the gold nanowires attached to the origami.

CONCLUSION

DNA origami structures have revolutionized photonics with their versatile applications. By leveraging the unique properties of DNA for precise control, this cutting-edge method enables the creation of nanostructures with predetermined shapes and sizes [17-28]. Meeting the growing demand for innovative solutions in plasmonics and photonics, this technology paves the way for developing nanoscale devices capable of manipulating light fields on a minuscule level. From advanced receivers and light signal enhancers to nanoantennae and optically active media, the possibilities are vast [20-28]. Despite its intricate design process, this technology holds the promise of being easy-scalable as it relies on adaptable “wet” chemical synthesis methods [2].

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out within the state assignment of The Ministry of Education of The Russian Federation “Physics of nanostructured materials and highly sensitive sensors: synthesis, fundamental research and applications in photonics, life sciences, quantum and nanotechnology” (theme No. – 124031100005-5).

AUTHORS

Stepanov Maksim Evgenievich – Senior lecturer, Moscow Pedagogical State University (MPGU), Shpol'skii theor. physics chair, researcher at the assistant at the Youth Laboratory of Biophotonics and Nanoengineering MPGU, Moscow, Russia.



регулировать, меняя геометрию частиц, так что такие среды можно использовать в качестве лево- и правовращающих.

Наконец, рациональная инженерия ДНК-оригами открывает возможность контролируемого изменения геометрической конфигурации сборки во времени в ответ на внешнее воздействие (динамическое ДНК-оригами [15]). Естественно, что в интересах плазмоники этот динамический эффект можно использовать для изменения оптических свойств плазмонных наночастиц, прикрепленных к ДНК-оригами. На практике для демонстрации подобных эффектов наиболее часто используется измерение кругового дихроизма, чувствительного к малым отклонениям от симметрии в расположении даже небольших наночастиц [16]. Например, в работе [11] (рис. 1g) реализована конфигурация двух скрещенных нанопроволок (длина 35 нм, диаметр 10 нм), одна из которых может делать фиксированные шаги (по 7 нм) вдоль оси другой в ответ на добавление в раствор определенных управляющих олигонуклеотидов. В работе [12] геометрия нанобъектов менялась в ответ на световое воздействие (рис. 1h), которое приводило к обратной цис-транс изомеризации фотоактивных молекул азобензола, скреплявших две части ДНК-оригами, в результате чего изменялся угол между золотыми нанопроволоками, закрепленными на оригами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самособирающиеся структуры на основе ДНК оригами находят широкое применение в фотонике. Благодаря своей управляемости, основанной на использовании свойств ДНК, этот метод синтеза наноструктур наряду с традиционными [17-28] может предложить создание наноструктур с прогнозируемой морфологией и размером, что крайне востребовано для решения актуальной задачи по разработке элементной базы плазмоники и фотоники: создания наноразмерных устройств или компонентов (или даже платформ на их основе), способных манипулировать световым полем на наномасштабах, таких как приёмники, усилители светового сигнала, наноантенны, фоторефрактивные элементы, оптически активные наноразмерные среды, наносветоводы, масштабные линейки для наноскопии и многие другие, например, [20-28]. Важно отметить, что рассмотренная технология, достаточно трудоемкая на этапе проектировки, в последующем легко масштабируема, поскольку опирается на «мокрый» химический синтез [2].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства просвещения Российской Федерации

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 MPGU, Moscow, Russia, e-mail: ua_khokhryakova@mpgu.su.

Egorova Tatiana Vladimirovna – Cand. of Sc. (Biology), head of the Youth Laboratory of Biophotonics and Nanoengineering MPGU, Moscow, Russia.

Scopus ID: 56868341400, ResearcherID: P-9982-2017,

ORCID: 0000-0002-7554-5246.

Magaryan Konstantin Arutyunovich – Cand. of Sc. (Phys. & Math.), associate professor Shpol'skii theor. physics chair, MPGU, senior researcher at the Laboratory of Physics of Advanced Materials and Nanostructures MPGU, Moscow, Russia.

RSCI ID: 723988, ResearcherID: A-4208-2014, ORCID: 0000-0003-4754-4657.

Naumov Andrey Vitalievich – corresponding member of the RAS, Dr. of Sc. (Phys. & Math.), head of the Troitsk branch of the Lebedev Physical Institute, head of the Shpol'skii theor. physics chair, MPGU, 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.

АВТОРЫ

Степанов Максим Евгеньевич – м. н. с., Московский педагогический государственный университет (МПГУ), кафедра теоретической физики им. Э. В. Шпольского, м. н. с. лаборатория 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, e-mail: ua_khokhryakova@mpgu.su

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

Scopus ID: 56868341400, ResearcherID: P-9982-2017,

ORCID: 0000-0002-7554-5246.

Магарян Константин Арутюнович – к. ф.-м. н., МПГУ, кафедра теоретической физики им. Э. В. Шпольского, с. н. с. лаборатории 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., Руководитель Троицкого филиала ФИАН им. П. Н. Лебедева, заведующий кафедрой Московского педагогического государственного университета (МПГУ), член-корр. РАН, доцент, 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.



«Физика наноструктурированных материалов и высокочувствительная сенсорика: синтез, фундаментальные исследования и приложения в фотонике, науках о жизни, квантовых и нанотехнологиях» (тема № 124031100005-5).

REFERENCES

1. 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. М. Е. Степанов, У. А. Хохрякова, Т. В. Егорова, К. А. Магарян, А. В. Наумов. Пролитывая свет на ДНК-оригами. *PHOTONICS Russia*. 18 (2024) 72–80. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.8.600.602.
2. M. E. Stepanov, U. A. Khokhryakova, T. V. Egorova, K. A. Magaryan, A. V. Naumov. Shedding light on DNA origami: Practice. *PHOTONICS Russia*. 18 (2024) 166–174. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.166.174. М. Е. Степанов, У. А. Хохрякова, Т. В. Егорова, К. А. Магарян, А. В. Наумов. Пролитывая свет на ДНК-оригами: практика использования. *PHOTONICS Russia*. 18 (2024) 166–174. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.166.174.
3. Klimov V.V. Optical nanoresonators. *Phys. Usp.* 2023;66: 263–287. DOI: 10.3367/UFNe.2022.02.0391535.
4. A. F. Koenderink. Single-Photon Nanoantennas, *ACS Photonics*, 4 (2017) 710–722.
5. E. M. Roller, L. V. Besteiro, C. Pupp, L. K. Khorashad, A. O. Govorov, T. Liedl. Hot spot-mediated non-dissipative and ultrafast plasmon passage, *Nat Phys*, 13 (2017) 761–765.
6. P. Zhan, T. Wen, Z. G. Wang, Y. He, J. Shi, T. Wang, X. Liu, G. Lu, B. Ding. DNA Origami Directed Assembly of Gold Bowtie Nanoantennas for Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Scattering, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 57 (2018) 2846–2850.
7. A. Puchkova, C. Vietz, E. Pibiri, B. Wunsch, M. Sanz Paz, G. P. Acuna, P. Tinnefeld. DNA Origami Nanoantennas with over 5000-fold Fluorescence Enhancement and Single-Molecule Detection at 25 μM , *Nano Lett.*, 15 (2015) 8354–8359.
8. R. Chikkaraddy, V. A. Turek, N. Kongsuwan, F. Benz, C. Carnegie, T. van de Goor, B. de Nijs, A. Demetriadou, O. Hess, U. F. Keyser, J. J. Baumberg. Mapping Nanoscale Hotspots with Single-Molecule Emitters Assembled into Plasmonic Nanocavities Using DNA Origami, *Nano Lett.*, 18 (2018) 405–411.
9. M. Raab, C. Vietz, F. D. Stefani, G. P. Acuna, P. Tinnefeld. Shifting molecular localization by plasmonic coupling in a single-molecule mirage, *Nat Commun*, 8 (2017) 13966.
10. A. Kuzyk, R. Schreiber, Z. Fan, G. Pardatscher, E. M. Roller, A. Hoge, F. C. Simmel, A. O. Govorov, T. Liedl. DNA-based self-assembly of chiral plasmonic nanostructures with tailored optical response, *Nature*, 483 (2012) 311–314.
11. C. Zhou, X. Duan, N. Liu. A plasmonic nanorod that walks on DNA origami, *Nat Commun*, 6 (2015) 8102.
12. A. Kuzyk, Y. Yang, X. Duan, S. Stoll, A. O. Govorov, H. Sugiyama, M. Endo, N. Liu. A light-driven three-dimensional plasmonic nanosystem that translates molecular motion into reversible chiroptical function, *Nat Commun*, 7 (2016) 10591.
13. A. Mostafa, Y. Kanehira, A. Dutta, S. Kogikoski, Jr., I. Bald. Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Scattering Measurements Enabled by Plasmonic DNA Origami Nanoantennas, *J Vis Exp*, (2023).
14. C. Steinhauer, R. Jungmann, T. L. Sobey, F. C. Simmel, P. Tinnefeld. DNA origami as a nanoscopic ruler for super-resolution microscopy, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 48 (2009) 8870–8873.
15. H. Ijas, S. Nummelin, B. Shen, M. A. Kostainen, V. Linko. Dynamic DNA Origami Devices: from Strand-Displacement Reactions to External-Stimuli Responsive Systems, *Int J Mol Sci*, 19 (2018).
16. C. Zhou, X. Duan, N. Liu. DNA-Nanotechnology-Enabled Chiral Plasmonics: From Static to Dynamic, *Acc. Chem. Res.*, 50 (2017) 2906–2914.
17. Potapkin O. D. Projection electron beam lithography for nanotechnology / O. D. Potapkin, B. V. Troshin. *Bulletin of the RAS: Physics*. 2010; 74(7):1015–1019. DOI: 10.3103/S1062873810070270. – EDN MXEPL.
18. Potapkin O. D. Трошин Б. В. Проекционная электронно-лучевая литография для нанотехнологий. *Известия РАН. Серия физическая*. 2010; 74(7):1056–1060. EDN MTJCSJ.
19. Salashchenko N. N. Project for manufacturing a Russian EUV nanolithographer for the fabrication of chips according to technological standards of 22 nm / N. N. Salashchenko, N. I. Chkhalo. *Bulletin of the RAS: Physics*. 2011; 75(1): 44–48. DOI: 10.3103/S1062873811010229. – EDN OHUXRX.
20. Salashchenko N. N. Проект изготовления российского ЭУФ-наноитографа для производства СБИС по технологическим нормам 22 нм / Н. Н. Салашченко, Н. И. Чхало. *Известия РАН. Серия физическая*. 2011; 75(1): 49–53. EDN NDJNKB.
21. Demina P.A., Khaydukov K.V., Rocheva V.V., Akasov R.A., Generalova A.N., Khaydukov E.V. Technology Of Infrared Photopolymerization. *Photonics Russia*. 2022; 16(8): 600–603. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.8.600.602. П. А. Демина, К. В. Хайдуков, В. В. Рочева [и др.]. Технология инфракрасной фотополимеризации. *Фотоника*. 2022; 16(8): 600–603. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.8.600.602. – EDN CDDTVR.
22. Maydykovskiy A.I., Apostolov D.A., Mamonov E.A. et al. Two-Photon Laser Lithography of Functional Microstructures of Integrated Photonics: Waveguides, Microcavities, and Prism Input/Output Adapters of Optical Radiation. *Jetp Lett*. 2023;117: 32–37. <https://doi.org/10.1134/S0021364022602743> Майдыковский, Д. А. Апостолов, Е. А. Мамонов [и др.]. Двухфотонная лазерная печать функциональных микроструктур интегральной фотоники: волноводов, микрорезонаторов и призмных адаптеров ввода/вывода оптического излучения. *Письма в ЖЭТФ*. 2023; 117(1-2(1)):37–42. DOI: 10.31857/S1234567823010044. – EDN NVEROV.
23. Kolymagin, D.A., Chubich, D.A., Shcherbakov, D.A. et al. Waveguide Structures and Photon Splitters Fabricated via Direct (3 + 1)D Laser Printing. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2023; 87: 1779–1784. <https://doi.org/10.1134/S1062873823704051> Д. А. Колымагин, Д. А. Чубич, Д. А. Щербаков [и др.]. Волноводные структуры и фотонные разветвители, созданные методом прямого (3 + 1)D лазерного письма. *Известия РАН. Серия физическая*. 2023; 87(12):1695–1700. DOI: 10.31857/S0367676523702927. – EDN QUWEVR.
24. M. E. Stepanov, S. A. Khorkina, A. I. Arzhanov [et al.]. Near-field effects in nodes of a gold nanonet grown by laser ablation in superfluid helium: crossover between “hot spots” such as “tip” and “gap”. *Jetp Lett*. 2024; 120(3-4):231–237. DOI: 10.31857/S0370274X24080129. – EDN UMWIVR.
25. М. Е. Степанов, С. А. Хоркина, А. И. Аржанов [и др.]. Ближнеполевые эффекты в узлах золотой наносети, выращенной лазерной абляцией в сверхтекучем гелии: кроссовер между “горячими точками” типа “острие” и “зазор”. *Письма в ЖЭТФ*. 2024; 120(3-4):231–237. DOI: 10.31857/S0370274X24080129. – EDN UMWIVR.
26. Bukharov D. N., Osipov A. V., Kucherik A. O. et al. Modeling the Formation of Noble Metal Nanocluster Systems during Deposition from a Colloid Solution. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2023;87:1680–1686. <https://doi.org/10.3103/S1062873823703884> Д. Н. Бухаров, А. В. Осипов, А. О. Кучерик, С. М. Аракелян. Моделирование процессов формирования систем нанокластеров благородных металлов при осаждении из коллоидного раствора. *Известия РАН. Серия физическая*. 2023; 87(11):1619–1625. DOI: 10.31857/S0367676523702800. – EDN FTAUZO.
27. Filippova Y. A., Bizhetskiy A. S., Papugaeva A. V. et al. FeNi Nanowires as a Promising Filler for Magnetic Sensitive Gel. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2023;87: 1483–1487. <https://doi.org/10.3103/S1062873823703537> Ю. А. Филиппова, А. С. Бижецкий, А. В. Папугаева [и др.]. FeNi нанопроволоки как перспективный наполнитель магниточувствительного геля. *Известия РАН. Серия физическая*. 2023; 87(10):1452–1456. DOI: 10.31857/S0367676523702538. – EDN PQEEQH.
28. Yu. V. Filatov, A. S. Kukaev, V. Yu. Venediktov, A. A. Sevryugin, E. V. Shalymov. Microoptical Gyros Based on Whispering Gallery Mode Resonators. *Photonics Russia*. 2023;17(1): 26–44. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.1.26.44. – EDN HOAVAU.
29. Ю. В. Филатов, А. С. Кукаев, В. Ю. Венедиктов, А. А. Севрюгин, Е. В. Шалымов. Микрооптические гироскопы на основе резонаторов мод шепчущей галереи. *Фотоника*. 2023;17(1): 26–44. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.1.26.44. – EDN HOAVAU.
30. A. P. Tarasov, L. A. Zadorozhnaya, V. M. Kanevsky. The nature of optical amplification in small diameter ZnO microarrays with whispering gallery modes. *Jetp Lett*. 2024; 119(11-12): 875–881. DOI: 10.31857/S1234567824120024. – EDN HMXNNM.
31. А. П. Тарасов, Л. А. Задорожная, В. М. Каневский. Природа оптического усиления в микростержнях ZnO малого диаметра с модами шепчущей галереи. *Письма в ЖЭТФ*. 2024; 119(11-12): 875–881. DOI: 10.31857/S1234567824120024. – EDN HMXNNM.
32. V. A. Zheltikov, D. D. Platonov, S. Khydyrova, D. D. Vasilev, K. M. Moiseev. Review of Superconducting Microstrip Single-photon Detectors. *Photonics Russia*. 2022; 16(7):528–537. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.7.528.537. – EDN BYXUYO.
33. В. А. Желтиков, Д. Д. Платонов, С. Хыдырова, Д. Д. Васильев, К. М. Моисеев. Обзор сверхпроводниковых микрополосковых однофотонных детекторов. *Фотоника*. 2022; 16(7):528–537. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.7.528.537. – EDN BYXUYO.
34. M. S. Kovalev, I. M. Podlesnykh, K. E. Pevchikh, S. I. Kudryashov. NearInfrared Planar Photonics Based on Hyperdoped Silicon: Prospects. *Photonics Russia*. 2024;18(2):136–151. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.136.151. – EDN CGUVBX.
35. М. С. Ковалев, И. М. Подлесных, К. Э. Певчих, С. И. Кудряшов. Планарная фотоника ближнего инфракрасного диапазона на основе сверхлегированного кремния: перспективы. *Фотоника*. 2024;18(2):136–151. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.2.136.151. – EDN CGUVBX.