

Синтез и переработка полимеров
и композитов на их основе
Synthesis and processing of polymers
and polymeric composites

УДК 544.77.023.5+620.3+543.424.2

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-90-97>

EDN CLLFHJ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Получение композитного материала на основе трековых мембран и наночастиц серебра различной формы

В.К. Кабарухин^{1,2,✉}, И.Н. Фадейкина^{1,3}, Е.В. Андреев³, А.Н. Нечаев^{1,3}

¹ Государственный университет «Дубна», Дубна, 141980 Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: svkaba3@yandex.ru

Аннотация

Цели. Изучение влияния формы наночастиц на эффект гигантского комбинационного рассеяния света при осаждении их на трековые мембраны. В дальнейшем полученный композитный материал может использоваться в качестве подложки для сенсоров, работа которых основана на эффекте гигантского комбинационного рассеяния света.

Методы. Наночастицы серебра получали методом восстановления ионов серебра в растворе при различных условиях. Наночастицы из полученных коллоидных растворов осаждали на модифицированные полиэтиленгликолем полиэтилентерефталатные трековые мембраны. Для исследования образцов использовали спектроскопию поглощения в ультрафиолетовой и видимой области, растровую и просвечивающую электронные микроскопии, лазерный доплеровский микроэлектрофорез, спектроскопию комбинационного рассеяния.

Результаты. Синтезированы наночастицы серебра сферической, треугольной формы и в форме нанопроволок, определены размеры и дзета-потенциал наночастиц. Полученные наночастицы осажжены на поверхность трековых мембран. Для образцов композитных мембран рассчитаны относительные коэффициенты усиления сигнала комбинационного рассеяния света тестового вещества 4-аминотиофенола по отношению к подложке с известным коэффициентом усиления.

Выводы. Показано, что при переходе от сферической формы наночастиц к различным несферическим усиливается эффект гигантского комбинационного рассеяния света. Наибольшее значение относительного коэффициента усиления составило $4 \cdot 10^7$ на композитной мембране с серебряными нанопроволоками.

Ключевые слова

гигантское комбинационное рассеяние света, наночастицы серебра, трековые мембраны, композитные мембраны

Поступила: 11.09.2024

Доработана: 23.06.2025

Принята в печать: 15.01.2026

Для цитирования

Кабарухин В.К., Фадейкина И.Н., Андреев Е.В., Нечаев А.Н. Получение композитного материала на основе трековых мембран и наночастиц серебра различной формы. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(1):90–97. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-90-97>

RESEARCH ARTICLE

Composite material obtained based on track-etched membranes and silver nanoparticles of different shapes

Vasilii K. Kabarukhin^{1,2,✉}, Irina N. Fadeikina^{1,3}, Evgeny V. Andreev³, Alexander N. Nechaev^{1,3}

¹ Dubna State University, Dubna, 141980 Russia

² ITMO University, Saint Petersburg, 197101 Russia

³ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

✉ Corresponding author; e-mail: svkaba3@yandex.ru

Abstract

Objectives. To study the effect of shape on the intensity of surface-enhanced Raman light scattering when depositing nanoparticles on track membranes. The resulting composite material can be further used as a substrate for sensors. The efficiency of such sensors is determined by the effect of surface-enhanced Raman scattering of light.

Methods. Silver nanoparticles were obtained by reduction of silver ions in solution under various conditions. Nanoparticles from the obtained colloidal solutions were deposited on polyethylenimine-modified polyethylene terephthalate track-etched membranes. The samples were examined using absorption spectroscopy in the ultraviolet and visible region, scanning and transmission electron microscopy, dynamic light scattering, and Raman spectroscopy.

Results. Silver nanoparticles of spherical, triangular, and nanowire shape were synthesized. The sizes and zeta potential of the nanoparticles were determined. The obtained nanoparticles were deposited on the surface of track-etched membranes. For the composite membrane samples, the relative enhancement factors of the Raman light scattering signal of the 4-aminothiophenol test substance were calculated based on the substrate with a known enhancement factor.

Conclusions. The effect of surface-enhanced Raman light scattering was found to be greater when transitioning from spherical to various nonspherical-shaped nanoparticles. The highest value of the relative enhancement factor was $4 \cdot 10^7$ on the composite membrane with silver nanowires.

Keywords

surface-enhanced Raman scattering, silver nanoparticles, track-etched membranes, nanoplasmonics, SERS sensors

Submitted: 11.09.2024

Revised: 23.06.2025

Accepted: 15.01.2026

For citation

Kabarukhin V.K., Fadeikina I.N., Andreev E.V., Nechaev A.N. Composite material obtained based on track-etched membranes and silver nanoparticles of different shapes. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(1):90–97. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-1-90-97>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается метод спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света для качественного и количественного анализа химических соединений и биологических объектов в низких концентрациях. Метод применяется для идентификации антибиотиков [1], красителей [2, 3], фунгицидов [4] и лекарственных препаратов [5] в концентрациях 10^{-9} – 10^{-12} М.

Для создания ГКР-активных структур часто применяются наночастицы серебра (НЧС) и золота [2]. Существуют также исследования по применению меди [6], никеля [7] и смешанных композитов [8] в качестве материалов наночастиц. Однако НЧС

дают наибольшее усиление сигнала комбинационного рассеяния [9].

Основными характеристиками наночастиц металлов, которые влияют на усиление сигнала, являются материал, размер и оболочка-стабилизатор, также значительный вклад вносит форма наночастиц [10, 11]. При переходе от сферической формы наночастиц к различным несферическим, заряд поверхностных атомов локализуется на углах и неровностях, что ведет к увеличению плотности электрического поля между наночастицами более чем на порядок [12, 13], значительно увеличивая сигнал КР света. Таким образом, синтез и осаждение наночастиц различных несферических форм является актуальной темой для исследований.

Получение наночастиц несферической формы возможно при использовании пространственно-ограниченных систем, таких как поры мембран, или при добавлении реагентов, избирательно сорбирующихся на отдельных гранях зародышей наночастиц. Такой способностью обладают поливинилпирролидон [14], цетилтриметиламмоний бромид [15], соли лимонной [14] и аскорбиновой кислот [16]. В этом случае, рост наночастиц возможен в отдельных направлениях, что позволяет получать нанокубы, наностержни, треугольные призмы и другие формы.

Реализация метода спектроскопии ГКР света с использованием наночастиц возможна как в коллоидных растворах, так и на подложках. Использование трековых мембран (ТМ) в качестве подложки позволяет разделять и концентрировать анализируемую пробу, что повышает селективность анализа. ТМ получают при облучении полимерных пленок высокоэнергичными ионами, образующими латентные треки, которые за счет дальнейшего селективного травления преобразуются в поры. Преимуществом ТМ является возможность контролировать плотность пор и их размер. Для закрепления наночастиц на ТМ ее поверхность модифицируют. В случае НЧС, как правило, используют соединения, содержащие карбоксильные, тиольные или аминогруппы. Наиболее подходящим модификатором является полиэтилен-имин (ПЭИ), имеющий NH_x^+ -концевые группы. ПЭИ связывает НЧС с поверхностью ТМ электростатически, а также химически благодаря неподеленной электронной паре на атоме азота [17]. Важным преимуществом ПЭИ перед другими модификаторами является высокая растворимость в воде.

Таким образом, изменение формы НЧС позволит значительно увеличить сигнал КР света, а использование ТМ в качестве подложки повысит селективность анализа методом ГКР света. Целью настоящей работы является синтез НЧС различной формы и их иммобилизация на поверхность ТМ для изучения влияния формы наночастиц на эффект ГКР света.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реактивы и материалы

В работе использовали следующие реагенты и материалы: $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 5.5\text{H}_2\text{O}$ (98%, *PanReac*, Испания); разветвленный полиэтилен-имин ($M_n = 60000$, 50% водный раствор, *Acros Organics*, Бельгия); 4-аминофенол (4-АТФ) (97%, *Sigma-Aldrich*, США); этанол (99.9%, *Merck*, Германия); AgNO_3 (х.ч., *ЛенРеактив*, Россия); NaBH_4 (99%, *Acros Organics*, Бельгия); H_2O_2 (ос.ч., *Химреактивснаб*, Россия); NH_3 (25% водный раствор, *PanReac*, Испания); NaOH (х.ч., *ЛенРеактив*, Россия); цетилтриметиламмоний

бромид (99%, *Sigma-Aldrich*, США); $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (х.ч., *Вектон*, Россия); поливинилпирролидон ($M_w = 55000$, *Sigma-Aldrich*, США); деионизованная вода (*Milli-Q*, *Millipore*, Германия) с удельным сопротивлением 18 МОм·см при 22°C; ТМ из полиэтилентерефталата (толщина 19 мкм, плотность пор $2.7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, диаметр пор 0.4 мкм), полученная в Лаборатории ядерных реакций им. Г.М. Флерова Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия) по методике [18].

Синтез НЧС

Сферические НЧС получали цитратным методом, основываясь на методике [19]. Для этого в 50 мл раствора 10^{-3} М цитрата натрия, нагретого до 95°C, по каплям вносили 12.5 мл 10^{-3} М раствора нитрата серебра. Перед началом синтеза в раствор цитрата натрия добавляли 1 М раствор гидроксида натрия до значения pH 9.8. Полученную смесь выдерживали при постоянном перемешивании и температуре в течение одного часа.

Треугольные нанопластины получали на основе методики [20]. В 4.1 мл воды последовательно вносили 0.5 мл 10^{-2} М нитрата серебра, 2.3 мл 1% раствора цитрата натрия, 0.6 мл 2% раствора поливинилпирролидона, 1.2 мл 3% раствора пероксида водорода и 1 мл $2 \cdot 10^{-2}$ М борогидрида натрия. Перед добавлением борогидрида натрия реакционную смесь нагревали до 55°C. Время синтеза составило 2 мин.

Серебряные нанопроволоки были синтезированы гидротермальным методом основываясь на методике [21]. Для этого 0.17 г нитрата серебра растворяли в 20 мл воды, затем добавляли 1 М водный раствор аммиака до получения аммиаката серебра с концентрацией 10^{-3} М. В автоклав вносили 2.8 мл полученного раствора аммиаката серебра, 1.7 мл $5 \cdot 10^{-3}$ М раствора цетилтриметиламмоний бромида и 5.6 мл 10^{-3} М раствора глюкозы. Реакционную смесь выдерживали при температуре 120°C в течение 8 ч.

Модификация ТМ

Модификацию поверхности ТМ проводили, основываясь на методике из работы [22]: для этого ТМ предварительно отмывали в этиловом спирте и воде, после чего погружали в 0.1% водный раствор ПЭИ и выдерживали на лабораторном шейкере в течение 30 мин. После модификации ТМ промывали в воде в течение 5 мин.

Осаждение НЧС сферической и треугольной формы проводили на модифицированных ПЭИ ТМ, для нанопроволок использовали немодифицированную ТМ. Для этого через ТМ пропускали 20 мл

раствора наночастиц в фильтрационной ячейке Amicon Stirred Cells (*Millipore*, Германия).

Методы исследования

Для оценки стабильности коллоидных растворов НЧС измеряли значение дзета-потенциала методом лазерного доплеровского микроэлектрофореза при помощи анализатора размера частиц Zetasizer Nano ZSP (*Malvern*, Великобритания).

Форму наночастиц серебра определяли методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Talos F200iS/ТЕМ (*Thermo Scientific*, США). В качестве подложки брали медные сетки для ПЭМ с пленкой аморфного углерода Supplies (*SPI*, США). Для нанесения НЧС подложку погружали в коллоидный раствор наночастиц и затем высушивали.

Наличие НЧС на поверхности ТМ определяли по микрофотографиям, полученным методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на сканирующем электронном микроскопе SU 8020 (*Hitachi*, Япония), при этом на образцы напыляли слой сплава платины и палладия толщиной 5 нм.

Размер НЧС определяли при помощи программного обеспечения JMicroVision 1.3.4¹ по полученным микрофотографиям.

Оптические свойства полученных НЧС исследовали при помощи спектроскопии поглощения в ультрафиолетовой (УФ) и видимой областях спектра на двухлучевом спектрофотометре Evolution 600 (*Thermo Scientific*, США) при длине оптического пути 1 см.

Эффект ГКР света на полученных композитах определяли при помощи спектрометров КР Enspectr R532 (*Спектр-М*, Россия) и Enspectr R638 (*Спектр-М*, Россия) с длинами

волн возбуждения 532 нм и 638 нм соответственно. Возбуждение проводили в течение 1 с в десятикратной повторности. В качестве тестового вещества использовали раствор 4-АТФ в этаноле. На ТМ с иммобилизованными НЧС наносили 2 мкл раствора 4-АТФ в концентрации 10^{-5} М и после испарения растворителя получали спектры КР.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтезы, использованные в эксперименте, позволили получить устойчивые коллоидные растворы со сферическими, треугольными НЧС, а также с наночастицами в форме нанопроволок.

Для коллоидных растворов НЧС получены следующие значения дзета-потенциалов: для сферических наночастиц -51 ± 5 мВ, для треугольных -29 ± 6 мВ и для нанопроволок $+8 \pm 1$ мВ. Цитратный и борогидридный методы синтеза наночастиц обеспечивают отрицательный заряд полученных сферических и треугольных наночастиц, в связи с чем данные наночастицы осаждали на модифицированную ПЭИ-мембрану с положительным зарядом поверхности. Серебряные нанопроволоки имели положительное значение дзета-потенциала, поэтому при осаждении наночастиц использовали немодифицированную ТМ, поверхность которой отрицательно заряжена за счет наличия на ней карбоксильных групп.

При помощи спектроскопии поглощения в УФ и видимой областях определили максимумы поверхностного плазмонного резонанса (ППР), характерные для НЧС (рис. 1).

Максимум поглощения ППР НЧС, полученных цитратным методом, находится в области 415 нм, что соответствует наночастицам сферической формы (рис. 1а) [23]. Спектр поглощения наночастиц, полученных борогидридным методом (рис. 1б), имеет

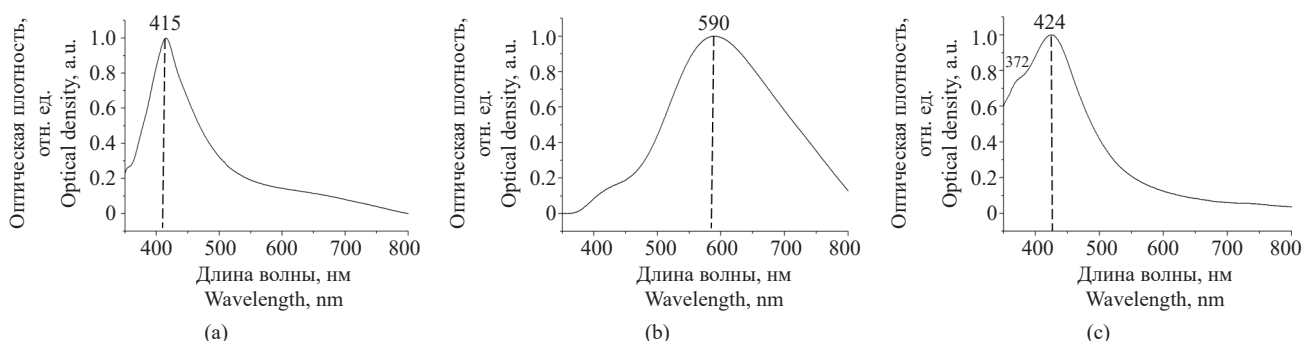


Рис. 1. Спектры поглощения в УФ и видимой областях коллоидных растворов НЧС: (а) сферических; (б) треугольных; (с) нанопроволок

Fig. 1. Absorption spectra in the UV and visible regions of colloidal solutions of silver nanoparticles: (a) spherical; (b) triangular; (c) nanowires

¹ <https://jmicrovision.github.io/download.htm>. Дата обращения 19.11.2025 г. / Accessed November 19, 2025.

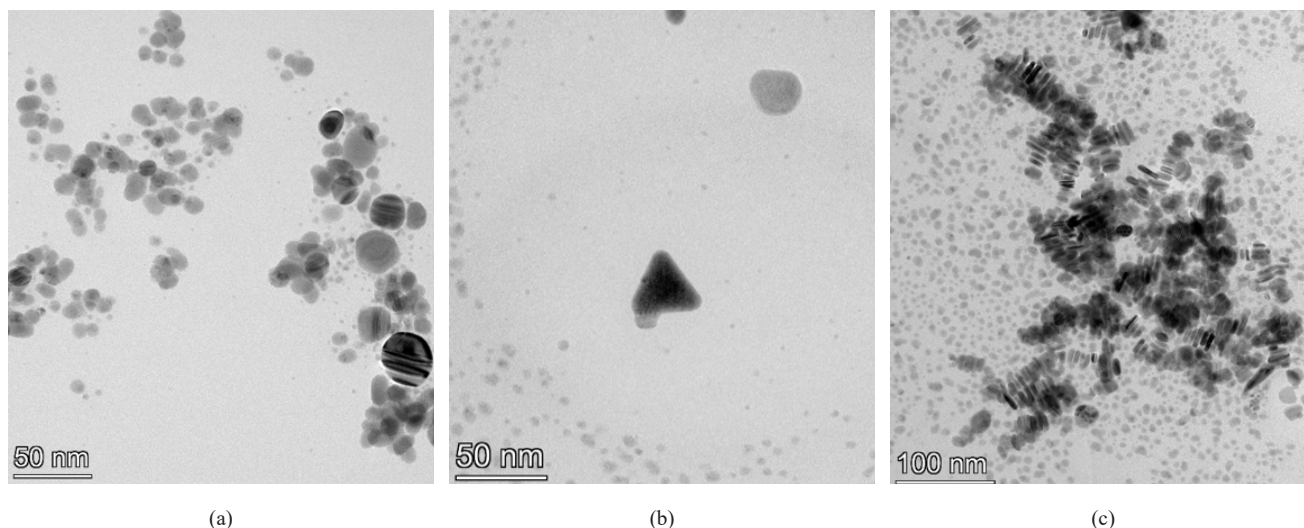


Рис. 2. Микрофотографии НЧС, полученные методом ПЭМ: (а) сферических; (б) треугольных; (с) стопки треугольных наночастиц

Fig. 2. Transmission electron microscopy images: (a) spherical nanoparticles; (b) triangular nanoparticles; (c) stacks of triangular nanoparticles

максимум поглощения в области 590 нм, что подтверждает наличие треугольных НЧС [24]. Спектр поглощения коллоидного раствора серебряных нанопроволок (рис. 1с) имеет максимум в области 424 нм, что соответствует ППР у НЧС в форме проволок [25].

На микрофотографиях, полученных методом ПЭМ (рис. 2), отчетливо видна форма сферических НЧС (рис. 2а), а также треугольных нанопластинок (рис. 2б), которые при высыхании на подложке образуют характерные стопки (рис. 2с).

Для образцов НЧС были определены размеры. Диаметр сферических наночастиц составил 25 ± 5 нм, для треугольных наночастиц ребро равно 38 ± 8 нм, толщина составила 4 ± 1 нм. Определение длины серебряных нанопроволок затруднено, поскольку они многократно переплетаются между собой, толщина составила 26 ± 4 нм.

На микрофотографиях, полученных методом РЭМ (рис. 3), отчетливо видны серебряные наночастицы на поверхности ТМ, все наночастицы распределены равномерно. Можно отметить, что среди треугольных наночастиц наблюдается примесь наночастиц сферической формы. Для серебряных нанопроволок наблюдается примесь наночастиц кубической формы.

КР-спектр исходной ТМ представляет собой спектр полиэтилентерефталата с наиболее интенсивными полосами при 1614 см^{-1} и 1727 см^{-1} , отвечающими колебаниям ν_{CC} и ν_{CO} соответственно [26]. Спектр КР 4-АТФ имеет максимумы при $463 (\delta_{\text{CC}})$, $1085 (\nu_{\text{CS}})$ и $1592 \text{ см}^{-1} (\nu_{\text{CC}})$ [27]. Как видно из рис. 4, при усилении сигнала на сферических и треугольных НЧС сохраняются характеристические максимумы 4-АТФ, соответствующие колебаниям ν_{CS} и ν_{CC} .

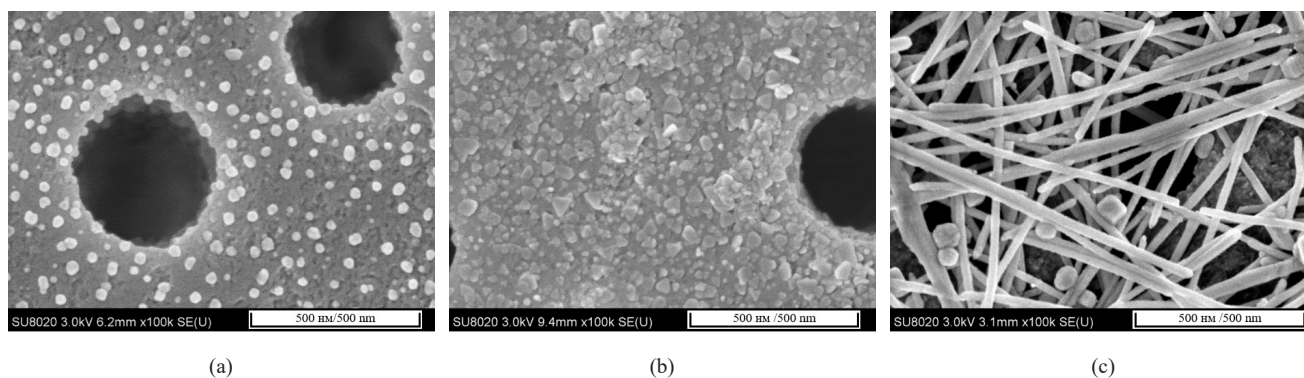


Рис. 3. Микрофотографии НЧС на поверхности ТМ: (а) сферических; (б) треугольных; (с) нанопроволок

Fig. 3. Scanning electron microscopy images silver nanoparticles on the track-etched membrane surface: (a) spherical nanoparticles; (b) triangular nanoplates; (c) silver nanowires

а также появляются максимумы при 1380 и 1427 cm^{-1} , которые могут быть отнесены к колебаниям ν_{NN} [27]. Расхождение значений максимумов между КР-спектром и ГКР-спектрами 4-АТФ на сферических и треугольных НЧС находится в пределах инструментальной ошибки. Существенное отличие спектра 4-АТФ на серебряных нанопроволоках объясняется сорбцией 4-АТФ на серебряных нанопроволоках не только SH-группой, но и NH_2 -группой. Как видно из рис. 3с, серебряные нанопроволоки расположены в несколько слоев и многократно переплетаются, образуя трехмерные полости для сорбции. Максимумы при 1283 и 1351 cm^{-1} можно отнести к колебаниям ν_{CN} и δ_{CH} соответственно [11, 27]. Подобные различия спектров наблюдались в работе [11] при сорбции 4-АТФ между золотой подложкой и золотыми НЧС, образующими сэндвич-структуру.

Для полученных образцов были рассчитаны коэффициенты усиления (КУ) сигнала относительно коммерческой подложки производителя *Спектр-М* (Россия), представляющей собой кристалл кремния с НЧС, сформированными из тонких серебряных пленок, полученных методом термического напыления, с известным КУ по формуле:

$$K_2 = K_1 \frac{N_2}{N_1},$$

где $K_1 = 7 \cdot 10^6$, КУ на известной подложке; K_2 — КУ на ТМ с иммобилизованными НЧС; N_1 — интенсивность полосы КР на коммерческой подложке; N_2 — интенсивность полосы КР на ТМ в области 1465 cm^{-1} . Значения составили $9 \cdot 10^6$ для сферических НЧС, $1 \cdot 10^7$ для НЧС треугольной формы и $4 \cdot 10^7$ для серебряных нанопроволок.

При переходе от сферической формы НЧС к различным анизотропным, значение КУ повышается. Наибольшее значение коэффициента усиления наблюдается для серебряных нанопроволок. Нанопроволоки расположены в несколько слоев на поверхности ТМ. Места контакта возникают не только между нанопроволоками в пределах одного слоя, но и между соседними слоями, что приводит к значительному усилению аналитического сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были синтезированы НЧС различной формы: сферической, треугольной и в форме нанопроволок. Для всех НЧС определена форма и значение дзета-потенциала. Диаметр сферических наночастиц составил 25 ± 5 нм; длина ребра треугольных наночастиц составила 38 ± 8 нм; толщина серебряных нанопроволок составила 26 ± 4 нм. Полученные НЧС

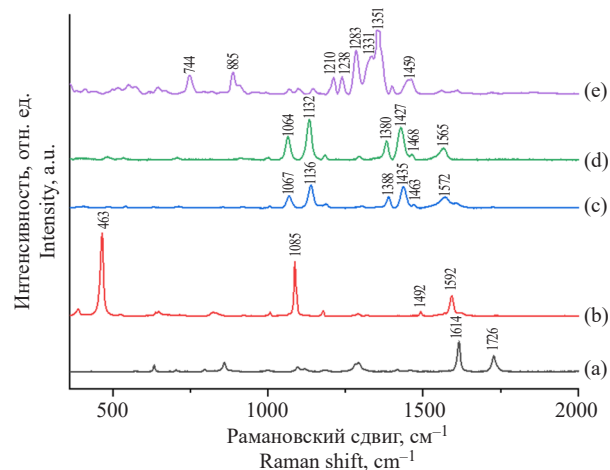


Рис. 4. Спектры КР света исходной ТМ, лазер 532 нм (а); 4-АТФ, лазер 532 нм (б); спектры ГКР 4-АТФ на ТМ с НЧС сферической формы, лазер 532 нм (с); треугольной формы, лазер 638 нм (д) и серебряными нанопроволоками, лазер 638 нм (е)

Fig. 4. Raman spectra of the native track-etched membrane, 4-ATP, laser 532 nm (a); 4-ATP, 532 nm laser (b), and surface-enhanced Raman scattering spectra of 4-ATP on track-etched membrane with silver nanoparticles of spherical, 532 nm laser (c), triangular, 638 nm laser (d) and nanowire, 638 nm laser (e) shapes

были иммобилизованы на поверхность ТМ, после чего на полученных композитах был исследован эффект ГКР света. Установлено, что КУ повышается при переходе от сферической формы НЧС к анизотропным формам. Наибольшее значение КУ составило $4 \cdot 10^7$ на образцах композитных ТМ с серебряными нанопроволоками, что позволяет использовать их в качестве подложек для сенсоров, работающих на эффекте ГКР света.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-65-00015 в рамках проекта Объединенного института ядерных исследований «Радиационное материаловедение, нанотехнологические и биомедицинские исследования с пучками тяжелых ионов» (шифр 07-5-1131-2017). Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н., с.н.с. Института физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна Российской академии наук Кукушкину Владимиру Игоревичу, персоналу ЦПФ Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований: начальнику группы № 2 Ореловичу Олегу Леонидовичу, сотрудникам Лизунову Николаю Евгеньевичу и Мутали Алишеру Касымбекулы за помощь в проведении исследований.

Acknowledgments

This research was supported by grant No. 24-65-00015 from the Russian Science Foundation as part of the Joint Institute for Nuclear Research project “Radiation Materials Science, Nanotechnology, and Biomedical Research with Heavy Ion Beams” (code 07-5-1131-2017). The authors are grateful to Vladimir Igorevich Kukushkin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at the Yu.A. Osipyan Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, and to the staff of the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions at the Center for Applied Physics of the Joint Institute for

Nuclear Research: Oleg Leonidovich Orelovich, Head of Group No. 2, as well as Nikolay Evgenievich Lizunov and Alisher Kasymbekuly Mutali for their assistance in conducting the research.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yang J., Chen S., Pan M., Ding Yu., Wang Sh. Plasmon AgNPs/MoS₂/ZnO nanorods array ternary heterojunctions enabling high-efficiency solar-light energy utilization for photocatalysis and recyclable SERS detection. *Anal. Chim. Acta.* 2024;1309:342668. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342668>
2. Han Sh., Cheng Ch., Chen Ch., Wang J., Zhao X., Wang X., Lv X., Jia Zh., Hou J. Sandwich-like CuNPs@AgNPs@PSB SERS substrates for sensitive detection of R6G and Forchlorfenuron. *Spectrochim. Acta A.* 2024;314:124178. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124178>
3. Li Ch., Man B., Zhang Ch., Yu J., Liu G., Tian M., Li Zh., Zhao X., Wang Zh., Cui W., Wang T., Wang J., Lin X., Xu Sh. Strong plasmon resonance coupling in micro-extraction SERS membrane for *in situ* detection of molecular aqueous solutions. *Sens. Actuators B.: Chem.* 2024;398:134767. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134767>
4. Liu K., Feng W., Li Ya., Han D., Wu T., Li K., Yang Sh. Innovative Synthesis of Adhesive-Assisted and Recyclable Fe₃O₄@PD-Ag Photomagnetic Nanocomposites as SERS probes for Ultrasensitive Thiram Detection on Fruit Peels. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 2024;454:115696. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115696>
5. Zhang F., Wang Yu., Yang B., Liu J., Yuan Yu., Bi Sh. SERS detection of apramycin and kanamycin through silver nanoparticles modified with β -cyclodextrin and α -iron oxide. *Spectrochim. Acta A.* 2024;304:123375. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.123375>
6. Baruah P., Singh A., Rangan L., Sharma A., Khare A. Optimization of copper nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation in distilled water as a viable SERS substrate for karanjin. *Mater. Chem. Phys.* 2018;220:111–117. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.08.064>
7. Vijayakumar S., Venkatakrishnan K., Tan B. SERS active nanobiosensor functionalized by self-assembled 3D nickel nanonetworks for glutathione detection. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017;9(6):5077–5091. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13576>
8. Karn-orachai K., Sanguansap Ya., Pankleaub K., Noppha O., Wiriyakun N., Kanatharana P., Laocharoensuk R. Internal magnetic driven self-assembly of gold-nickel nanowires as SERS substrate for thiram fungicide detection using handheld Raman spectrometer. *Appl. Surf. Sci.* 2020;529:147236. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147236>
9. Ciou Sh., Cao Y., Huang H., Su D., Huang Ch. SERS Enhancement Factors Studies of Silver Nanoprism and Spherical Nanoparticle Colloids in The Presence of Bromide Ions. *J. Phys. Chem. C.* 2009;113(22):9520–9525. <https://doi.org/10.1021/jp809687v>
10. Hoang L., Pham H., Nguyen M. Investigation of the Factors Influencing the Surface-Enhanced Raman Scattering Activity of Silver Nanoparticles. *J. Electron. Mater.* 2020;49:1864–1871. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07870-8>
11. Uetsuki K., Verma P., Yano T., Saito Yu., Ichimura T., Kawata S. Experimental Identification of Chemical Effects in Surface Enhanced Raman Scattering of 4-Aminothiophenol. *J. Phys. Chem. C.* 2010;114(16):7515–7520. <https://doi.org/10.1021/jp9114805>
12. Hao E., Schatz G. Electromagnetic fields around silver nanoparticles and dimers. *J. Chem. Phys.* 2004;120(1):357–366. <https://doi.org/10.1063/1.1629280>
13. Pham N., Tran Qu., Luong H., Nguyen Th., Bui T., Duy L., Dang V., Thi Th., Tran C. SERS behaviors of multi-shape silver nanoparticles on Si substrate—An insight from both experimental and theoretical approaches. *Colloids Surf. A.* 2024;684:133091. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.133091>
14. Wiley B., Sun Yu., Mayers B., Xia Yo. Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanostructures: The Case of Silver. *Chem. Eur. J.* 2005;11(2):454–463. <https://doi.org/10.1002/chem.200400927>
15. Murphy C., Sau T., Gole A., Orendorff Ch., Gao J., Gou L., et al. Anisotropic Metal Nanoparticles: Synthesis, Assembly, and Optical Applications. *J. Phys. Chem. B.* 2005;109(29):13857–13870. <https://doi.org/10.1021/jp0516846>
16. Jana N., Gearheart L., Murphy C. Wet chemical synthesis of silver nanorods and nanowires of controllable aspect ratio. *Chem. Commun.* 2001;(7)617–618. <https://doi.org/10.1039/b100521i>
17. Agnihotri Sh., Mukherji S., Mukherji S. Immobilized silver nanoparticles enhance contact killing and show highest efficacy: elucidation of the mechanism of bactericidal action of silver. *Nanoscale.* 2013;5(16):7328–7340. <https://doi.org/10.1039/C3NR00024A>
18. Apel P. Fabrication of functional micro- and nanoporous materials from polymers modified by swift heavy ions. *Radiat. Phys. Chem.* 2019;159:25–34. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.01.009>
19. Lee P., Meisel D. Adsorption and surface-enhanced Raman of dyes on silver and gold sols. *J. Phys. Chem.* 1982;86(17):3391–3395. <https://doi.org/10.1021/j100214a025>

20. Фурлетов А.А., Апыри В.В., Гаршев А.В., Волков П.А., Толмачева В.В. Дмитриенко С.Г. Сорбция треугольных нанопластинок серебра на пенополиуретане. *Журн. физ. химии*. 2018;92(2):318–322.
[Furletov A.A., Apyari V.V., Garshev A.V., et al. Sorption of Triangular Silver Nanoplates on Polyurethane Foam. *Russ. J. Phys. Chem.* 2018;92:357–360. <https://doi.org/10.1134/S0036024418020061>]
[Original Russian Text: Furletov A.A., Apyari V.V., Garshev A.V., Volkov P.A., Tolmacheva V.V. Dmitrienko S.G. Sorption of Triangular Silver Nanoplates on Polyurethane Foam. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2018;92(2):318–322 (in Russ.).]
21. Chang Yu., Lu I., Chen Ch., Hsieh Y., Wu P. High-yield water-based synthesis of truncated silver nanocubes. *J. Alloys Compd.* 2014;586:507–511. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.047>
22. Криставчук О.В., Никифоров И.В., Кукушкин В.И., Нечаев А.Н., Апель П.Ю. Иммунизация наночастиц серебра, полученных электроискровым методом, на поверхности трековых мембран. *Коллоидный журнал*. 2017;79(5): 596–605. <https://doi.org/10.7868/S0023291217050093>
[Kristavchuk O., Nikiforov I., Kukushkin V., et al. Immobilization of silver nanoparticles obtained by electric discharge method on a track membrane surface. *Colloid J.* 2017;79:637–646. <https://doi.org/10.1134/S1061933X17050088>]
- [Original Russian Text: Kristavchuk O.V., Nikiforov I.V., Kukushkin V.I., Nechaev A.N., Apel' P.Yu. Immobilization of silver nanoparticles obtained by electric discharge method on a track membrane surface. *Kolloidnyi zhurnal*. 2017;79(5): 596–605 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0023291217050093>]
23. Sarina S., Waclaik E., Zhu H. Photocatalysis on supported gold and silver nanoparticles under ultraviolet and visible light irradiation. *Green Chem.* 2013;15(7):1814–1833. <https://doi.org/10.1039/C3GC40450A>
24. Jiang X., Zeng Q., Yu A. Thiol-Frozen Shape Evolution of Triangular Silver Nanoplates. *Langmuir*. 2007;23(4): 2218–2223. <https://doi.org/10.1021/la062797z>
25. Luu Qu., Doorn J., Berry M., Jiang Ch., Lin C., May S. Preparation and optical properties of silver nanowires and silver-nanowire thin films. *J. Colloid Interface Sci.* 2011;356(1): 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.12.077>
26. Bistričić L., Borjanović V., Leskovic M., Mikac L., McGuire G.E., Shenderova O., Nunn N. Raman spectra, thermal and mechanical properties of poly(ethylene terephthalate) carbon-based nanocomposite films. *J. Polym. Res.* 2015;22:39. <https://doi.org/10.1007/s10965-015-0680-z>
27. Ratkajec A., Kendel A. Structural characterization of 4-aminothiophenol in silver and gold colloids using surface-enhanced Raman scattering. *Croat. Chem. Acta.* 2024;97(2):77–85. <https://doi.org/10.5562/cca4107>

Об авторах

Кабарухин Василий Константинович, студент, ФГБОУ ВО Университет «Дубна» (141980, Россия, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19); аспирант, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» (Университет ИТМО) (197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А.) E-mail: svkaba3@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 3306-2376, <https://orcid.org/0009-0003-4134-7019>

Фадеекина Ирина Николаевна, к.т.н., доцент кафедры химии, новых технологий и материалов, ФГБОУ ВО Университет «Дубна» (141980, Россия, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19); научный сотрудник, Центр прикладной физики Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) (141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6). E-mail: i.fadeikina@yandex.ru. Scopus Author ID 57195429022, SPIN-код РИНЦ 1551-0281, <https://orcid.org/0009-0006-5094-6760>

Андреев Евгений Валерьевич, младший научный сотрудник, Центр прикладной физики Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) (141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6). E-mail: evandreev@jinr.ru. Scopus Author ID 57802413100, SPIN-код РИНЦ 8902-4526, <https://orcid.org/0009-0003-6924-2622>

Нечаев Александр Николаевич, к.х.н., доцент кафедры химии, новых технологий и материалов, ФГБОУ ВО «Университет «Дубна»» (141980, Россия, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19); заместитель начальника по научной работе, Центр прикладной физики Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) (141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6). E-mail: nechaeffalexander@yandex.ru. Scopus Author ID 7004823934, SPIN-код РИНЦ 7820-4035, <https://orcid.org/0000-0002-5138-4265>

About the Authors

Vasily K. Kabarukhin, Student, Dubna State University (19, Universitetskaya ul., Dubna, Moscow oblast, 141980, Russia); Postgraduate Student, ITMO University (49-A, Kronverkskii pr., St. Petersburg, 197101, Russia). E-mail: svkaba3@yandex.ru. RSCI SPIN-code 3306-2376, <https://orcid.org/0009-0003-4134-7019>

Irina N. Fadeikina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Chemistry, New Technologies and Materials, Dubna State University (19, Universitetskaya ul., Dubna, Moscow oblast, 141980, Russia); Researcher, Center of Applied Physics, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research (6, Zholio-Kyuri ul., Dubna, Moscow oblast, 141980, Russia). E-mail: i.fadeikina@yandex.ru. Scopus Author ID 57195429022, RSCI SPIN-code 1551-0281, <https://orcid.org/0009-0006-5094-6760>

Evgeny V. Andreev, Junior Researcher, Center of Applied Physics, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research (6, Zholio-Kyuri ul., Dubna, Moscow oblast, 141980, Russia). E-mail: evandreev@jinr.ru. Scopus Author ID 57802413100, RSCI SPIN-code 8902-4526, <https://orcid.org/0009-0003-6924-2622>

Alexander N. Nechaev, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Chemistry, New Technologies and Materials, Dubna State University (19, Universitetskaya ul., Dubna, Moscow oblast, 141980, Russia); Deputy Head of Research, Center of Applied Physics, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research (6, Zholio-Kyuri ul., Dubna, Moscow oblast, 141980, Russia). E-mail: nechaeffalexander@yandex.ru. Scopus Author ID 7004823934, RSCI SPIN-code 7820-4035, <https://orcid.org/0000-0002-5138-4265>