



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОЛИНЗ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ И УСИЛЕНИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

USE OF MICROLENSES TO IMPROVE THE OPTICAL MICROSCOPY RESOLUTION AND ENHANCE RAMAN SCATTERING

И.В.Яминский^{1, 2, 7, 9, 10}, д.ф.-м.н., проф. физического и химического факультетов МГУ имени М.В.Ломоносова, генеральный директор Центра перспективных технологий, директор Энергоэффективных технологий, вед. науч. сотр. ИНЭОС РАН (ORCID: 0000-0001-8731-3947), О.В.Синицына⁷, науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-3381-6156), А.И.Ахметова^{8, 9, 10}, инженер НИИ ФХБ имени А.Н. Белозерского МГУ, ведущий специалист Центра перспективных технологий и Энергоэффективных технологий (ORCID: 0000-0002-5115-8030), С.А.Сенотрсова¹, студент, (ORCID: 0000-0003-0960-8920), А.А.Пирязев^{2, 3}, науч. сотр. химического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, мл. науч. сотр. ИПХФ РАН, (ORCID: 0000-0002-4782-1661), Е.П.Кожина^{4, 5}, мл. науч. сотр., (ORCID: 0000-0003-4199-5334), С.А.Бедин^{4, 6}, доцент, (ORCID: 0000-0002-7342-124X) / yaminskiy@nanoscopus.ru I.V.Yaminskiy^{1, 2, 7, 9, 10}, *Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof. of Lomonosov Moscow State University, Physical and Chemical departments, Director of Advanced Technologies Center, Leading Sci. of INEOS RAS, O.V.Sinitsyna⁷, Researcher, A.I.Akhmetova^{8, 9, 10}, Engineer of A.N.Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology, Leading Specialist of Advanced Technologies Center and of Energy Efficient Technologies, S.A.Senotrusova¹, student, (ORCID 0000-0003-0960-8920), A.A.Piryazev^{2, 3}, Researcher², Junior Researcher³, E.P.Kozhina^{4, 5}, Junior Researcher, S.A.Bedin^{4, 6}, Docent*

DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.6.382.388

Получено: 11.09.2021 г.

При взаимодействии со светом микросферы формируют узкий луч – фотонную нанострую. Использование этого эффекта позволяет реализовать микроскопию сверхвысокого разрешения, превосходящего дифракционный предел. Другим важным применением фотонной наноструи является усиление сигнала комбинационного рассеяния света (КР). Однако, для усиления крайне слабого КР-сигнала, как правило, используют усиливающие поверхности. В данной работе продемонстрированы эффекты фотонной наноструи, применяемой для усиления КР-сигнала в комбинации с гигантским комбинационным рассеянием активными подложками при взаимодействии с ансамблями серебряных нанопроволок и наночастиц и использовании микросфер из титаната бария.

When interacting with light the microspheres form a narrow beam called a photonic nanojet. The use of this effect allows of implementing a super high-resolution microscopy to exceed the diffraction limit. The second important application of the photonic nanojet is the Raman scattering (RS) signal amplification.

- ¹ Физический факультет, МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия / Physical department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.
- ² Химический факультет, МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия / Physical department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.
- ³ Институт проблем химической физики РАН, Москва, Россия / Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Moscow, Russia.
- ⁴ ФГБОУ ВПО "Московский педагогический государственный университет", Москва, Россия / Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia.
- ⁵ ФГБУН Физический институт спектроскопии имени П.Н.Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, Москва, Троицк, Россия / P.N.Lebedev Physical Institute of RAS, (FIAN) LPI Troitsk Subdivision, Moscow, Troitsk, Russia.
- ⁶ Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника РАН", Москва, Россия / Federal Research Center "Crystallography and Photonics" of RAS.
- ⁷ ФГБУН Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН), Москва, Россия / A.N.Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of RAS (INEOS RAS), Moscow, Russia.
- ⁸ НИИ ФХБ имени А.Н.Белозерского МГУ, Москва, Россия / A.N.Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology, Moscow, Russia.
- ⁹ ООО НПП "Центр перспективных технологий", Москва, Россия / Advanced Technologies Center, Moscow, Russia.
- ¹⁰ ООО "Энергоэффективные технологии", Москва, Россия / Energy Efficient Technologies, Moscow, Russia.



However, to enhance the extremely weak RS-signal, it is necessary, as a rule, to use the multiplicative surfaces. In this work we demonstrate the photonic nanojet effects used for RS-signal enhancement in combination with giant Raman scattering produced by the active substrates with the ensembles of silver nanowires and nanoparticles together with the microspheres made of barium titanate.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие нанотехнологий требует совершенствования методов визуализации и контроля со сверхвысоким разрешением. В 2011 году для получения сверхвысокого разрешения в оптической микроскопии было предложено использовать микросферы [1], что позволило наблюдать элементы с размерами ~ 50 нм. Микросферы помещаются на поверхность образца. Проходя через микросферу диаметром 1-100 мкм, свет фокусируется в узкий луч – фотонную нанострую (ФНС). Для попавшего в ФНС участка образца формируется увеличенное виртуальное изображение, которое можно наблюдать через объектив обычного оптического микроскопа.

Комбинирование оптической микроскопии со спектроскопией комбинационного рассеяния (КР) позволяет идентифицировать химический состав наблюдаемых объектов и изучать особенности строения кристаллической решетки, что существенно повышает информативность исследований. При изучении наночастиц интенсивность КР может быть недостаточной для регистрации спектра.

Использование усиливающих поверхностей и дополнительной фокусировки микросферой лазерного луча дает возможность существенно усилить сигнал КР [2].

Использование наноструктурированных поверхностей при исследовании разнообразных биологических и химических объектов позволяет не только усиливать КР-сигнал, но и проводить измерения при малых мощностях лазера и воздействовать лазерным излучением в течение нескольких секунд. Это применяется для диагностики наноконцентраций веществ, в том числе и живых организмов. Усиление КР-сигнала с использованием усиливающих поверхностей объясняется наличием областей с высокоинтенсивными локальными электрическими полями, так называемыми "горячими точками". Применение микролинз способствует диагностике живых организмов. В основном в качестве объектов использовались пластины кремния. Например, группа ученых из Хорватии изучала геометрические аспекты усиления КР кремниевыми микросферами [3]. Исследование проводилось в три этапа: определение характеристик падающего луча с помощью метода

INTRODUCTION

Intense development of nanotechnologies requires the improvement of visualization methods and super-high resolution control. In 2011, it was proposed to use microspheres [1] to obtain super-high resolution in optical microscopy, which made it possible to observe elements of ~ 50 nm scale. Microspheres are placed on the sample surface. Light, passing through the microsphere dia. 1-100 μm , is focused in a narrow beam and forms a photonic nanojet (PNJ). The enlarged virtual image of the sample area under the PNS illumination can be observed with a common optical microscope.

Combination of the optical microscopy and Raman scattering spectroscopy (RSS) makes it

possible to identify the chemical composition of samples and study the crystal lattice peculiarities to increase a research information capacity. Intensity of RS may be insufficient to register a spectrum in a nanoparticle study. The use of multiplicative surfaces and additional focusing makes it possible to enhance the RS-signal sufficiently [2].

Use of the nanostructured surfaces in a study of various biological and chemical objects allows not only of increasing the RS-signal, but also of conducting measurements at low power of laser emission within a few seconds. It can be applied to diagnose nanoconcentrations of substances, including living organisms. Enhancement of the RS-signal using the multiplicative

surfaces can be explained by areas with high-intensive local electric fields, so-called "hot spots". The microlenses are helpful in the living organism diagnostics. Generally, silicon plates were used as objects. For example, a scientific team from Croatia studied geometric aspects of RS-signal amplification by silicon microspheres [3]. The study was conducted in three stages: characterization of an incident beam using the knife-edge method horizontal and, for the first time, vertical Raman reflection, and ray transfer matrix analysis. A distinct area of RS-signal amplification from a silicon plate generated by the PNJ microsphere was observed. The amplification was the highest when the incident beam size corresponded to the diameter of microsphere, and

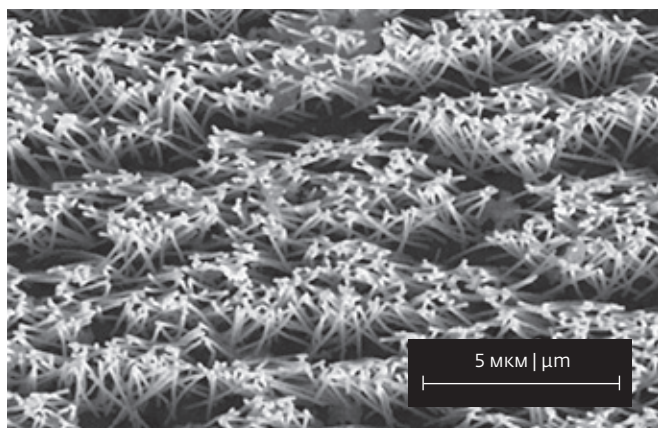


Рис.1. Микрофотография подложки с ансамблем серебряных НП диаметром 100 нм. (Снимок получен с использованием оборудования ЦКП "Структурная диагностика материалов", ФНИЦ "Кристаллография и фотоника РАН")

Fig.1. A microphotograph of the substrate with the ensemble of the silver NWs dia. 100 nm. (The image was obtained using the CCP "Structural Diagnostics of Materials", FNIC "Crystallography and Photonic RAS")

острия, выполнение горизонтального и впервые вертикального рамановского отображения и анализ результатов с использованием матричного анализа переноса луча. Наблюдалась отчетливая область усиления КР от кремниевой пластины, вызванная микросферной ФНС. Значение усиления было самым высоким, когда размер падающего луча соответствовал диаметру микросферы, а фокус луча находился ниже вершины сферы.

the beam focus was below the top of the sphere.

In this work the method of combined microlens microscopy and RSS was applied to study silver nanowires and nanoparticles. These objects are very interesting when preparing substrates intended for the surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) to detect trace quantities of the chemical substance.

RESEARCH METHODS AND MATERIALS Substrates with silver nanowire ensembles

In this work, metal nanowires (NP) were created by template synthesis

method in the pores of polymer track membranes (TM) made of polyethylene terephthalate (prepared in Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, Dubna), by the template synthesis method were created. The pore diameter in the used TM is 100 nm, and the surface density is $9.3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$. Pores in the initial TM were filled with silver by the electrochemical method with the formation of the massive metal substrate made of copper [4, 5]. Silver NP diameter corresponded to the pore diameter of the original template (100 nm), and the length was determined by the time of the template filling and equaled

В настоящей работе мы применили метод объединенной микролинзовой микроскопии и спектроскопии КР для изучения серебряных нанопроволок и наночастиц. Данные объекты представляют значительный интерес при создании подложек для усиленной поверхностью спектроскопии КР для детектирования следовых количеств химических веществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подложки с ансамблями серебряных НП

В данной работе методом шаблонного синтеза были созданы металлические нанопроволоки (НП) в порах полимерных трековых мембран (ТМ) (изготовлены в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова, ОИЯИ, Дубна) из полиэтилентерефталата. Диаметр пор в используемой ТМ составлял 100 нм, а их поверхностная плотность – $9,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Поры в исходных ТМ электрохимически заполняли серебром с формированием массивной металлической подложки из меди [4, 5]. Диаметр НП из серебра соответствовал диаметру пор исходного шаблона (100 нм), а длина определялась временем заполнения шаблона и составляла 10 мкм. После заполнения полимерный шаблон с НП внутри пор отмывали от электролита и растворяли в концентрированном растворе щелочи (6М NaOH) при температуре 60° С. После растворения шаблона металлические подложки из меди с НП из серебра промывали в дистиллированной воде и сушили. При высыхании под действием капиллярных сил образовывались характерные полосы из агломерирующих нанопроволок [6].

10 μm . The polymer template with NW inside was washed from electrolyte and dissolved in a concentrated alkali solution (6M NaOH) at 60 °C. After dissolving the template, copper substrates with silver NW were washed in distilled water and dried. When drying, the characteristic bands of agglomerated NWs were formed under the action of capillary forces. Rhodamine 6G (R6G) was chosen as the studied substance to obtain SERS-spectra on the substrates with silver 100 nm NWs. It is an organic dye with the well-studied spectrum, so it is possible to accurately compare the obtained results with the data

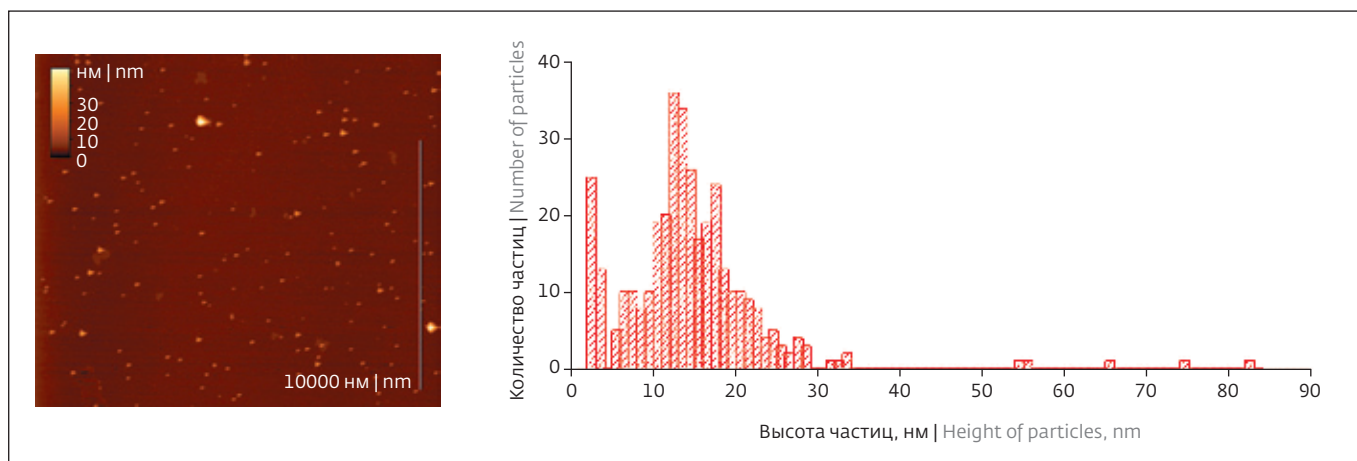


Рис.2. а – АСМ-изображение; б – распределение по высотам частиц коллоидного серебра, построенное по трем АСМ-изображениям, размер кадра $14,2 \times 14,2$ мкм

Fig.2. a – AFM-image; b – distribution of silver colloid particles by height constructed on a base of three AFM-images, the frame size is $14,2 \times 14,2$ μm

Для снятия SERS-спектров на подложках со 100-нм серебряными НП в качестве исследуемого вещества был выбран родамин 6G (R6G). Это органический краситель с хорошо изученным спектром, что позволяет объективно сравнивать полученные результаты с другими исследовательскими группами.

Снятие SERS-спектров молекул родамин 6G с концентрацией 100 мкг/мл, адсорбированных на массиве вертикально стоящих серебряных нанопроволок, проводилось на рамановском спектрометре Horiba LabRam Evolution. Спектры измерялись с использованием лазера с длиной волны 532 нм

при мощности 1 мВт. При измерениях время экспозиции составляло 4 с для двух циклов накопления. Диаметр лазерного пятна засветки составлял 10 мкм при использовании объектива с увеличением 50х. Оптический микроскоп, в который поступает сигнал, оборудован моторизованным столиком с возможностью автоматической фокусировки.

Также спектрометр оборудован двумя дифракционными решетками, высокоэффективным детектором, охлаждаемым элементом Пельтье и комплектом нейтральных серых фильтров для регулировки мощности излучения на образце.

presented by other scientific teams. Collecting of rhodamine 6G SERS-spectra (concentration is 100 $\mu\text{g/ml}$) adsorbed on the placed vertically massive silver NWs was performed with a Horiba LabRam Evolution Raman spectrometer. The spectra were measured using a 532 nm wavelength laser with a power of 1 mW. The exposure time was equal to 4 s for two collecting cycles. The laser spot diameter was 10 μm when using a 50x lens. The optical microscope receiving the signal was equipped with a motorized stand with automated focus adjustment.

Besides, the spectrometer was equipped with two diffraction

gratings, a high-efficient detector, a cooled Peltier element and a set of neutral gray filters to adjust the emission power on the sample. After preparing of the substrates, they were certified by the scanning electron microscopy methods.

Figure 1 presents the micrograph of the substrate with the ensemble of silver NWs.

Preparation of the samples with silver nanoparticles

Studied were the samples of mica with silver nanoparticles prepared by the following method: aqueous solution of silver nanoparticles (50 mg/l) was applied onto the mica

plate in 5 layers with prolongation. Figure 2 demonstrates the image of nanoparticles obtained by atomic force microscopy (AFM) and the distribution of particles by sizes.

To measure parameters of the samples with microlens microscopy and RSS, the surfaces were coated with BaTiO_3 microspheres with a size of 30 to 100 μm and density of 4.22 g/cm^3 , the refraction index 1.9.

The laser beam was passed in the lens for focusing on a sample. The generated signal was collected by a microsphere and further studied with an optical microscope. In this case, a microsphere provides magnification of a local field.

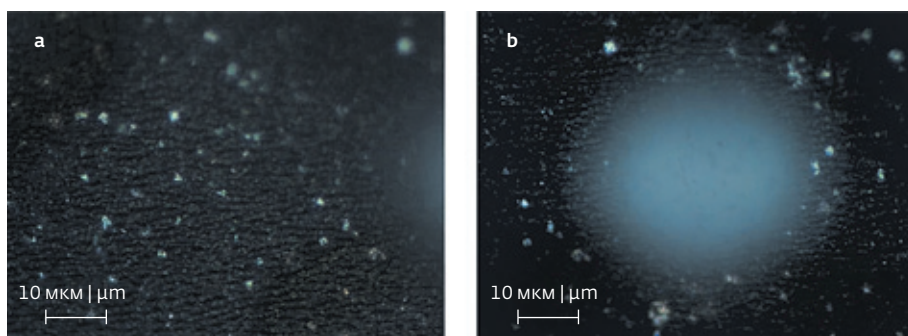


Рис.3. а – оптические изображения нанопроволок; б – изображение нанопроволок с расположенной сверху микросферой

Fig.3. a – the optical image of NWs; b – the NWs image with a microsphere placed above

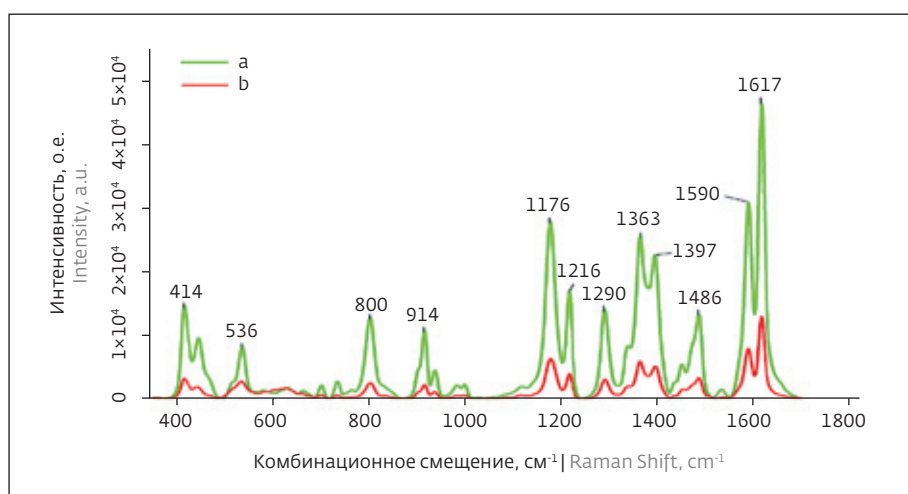


Рис.4. а – SERS-спектры молекул родамина 6G в концентрации 100 мкг/мл, адсорбированного на подложках с вертикально стоящими серебряными нанопроволоками диаметром 100 нм без использования микролинзы; б – с использованием микролинзы

Fig.4. a – SERS-spectra of Rhodamine 6G molecules, concentration 100 μg/l adsorbed on the substrates with vertically placed silver NWs dia. 100 nm without using of microlens; b – using of it

После изготовления проводилась аттестация полученных подложек методами растровой электронной микроскопии. На рис.1 представлена микрофотография подложки с ансамблем серебряных НП.

Приготовление образцов с наночастицами серебра

Исследовались образцы слюды с наночастицами серебра, приготовленные следующим образом: водный раствор наночастиц серебра (50 мг/л) наносился на пластинку из слюды в пять слоев с пролонгацией. На рис.2 показано изображение наночастиц, полученное методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), и распределение частиц по размерам.

Для измерений с помощью микролинзовой микроскопии и спектроскопии КР на поверхность образцов

наносили микросферы BaTiO_3 размером от 30 до 100 мкм и плотностью 4,22 г/см³ с показателем преломления 1,9. Луч лазера направлялся в линзу объектива для фокусировки на образце. Генерируемый сигнал собирался микросферой и далее исследовался с помощью оптического микроскопа. Микросфера обеспечивала, в данном случае, усиление локального поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Серебряные нанопроволоки

На рис.3 показано оптическое изображение поверхности массива серебряных нанопроволок. В центре изображения лежит микросфера с диаметром 35 мкм, ее фокус должен располагаться на расстоянии ~18,4 мкм от нижнего края сферы, согласно [7]. Сквозь нее видно увеличенное изображение, на котором наблюдаются отдельные острия серебряных нанопроволок. По данным электронной микроскопии (рис.1), диаметр проволок составляет 100 нм. Таким образом, микролинза позволяет получить оптическое изображение за пределом дифракционного предела, который ограничивает разрешение обычной оптической микроскопии на уровне 200 нм. Микролинза формирует виртуальное изображение с увеличением ~15, которое затем захватывает объектив микроскопа.

Далее на данных подложках были получены спектры 10 мкг/мл родамина 6G без использования линз и с их использованием (рис.4). На спектре четко видны все пики, характерные для рассматриваемого вещества.

Интенсивность SERS-сигнала от молекул без использования микролинз больше, чем с их использованием. Это объясняется тем, что при использовании микролинзы накапливается спектр меньшей площади, а значит, и от меньшего числа молекул. Плотность нанопроволок на подложке составляет $1,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Таким образом, при регистрации SERS-спектров без использования линз при диаметре

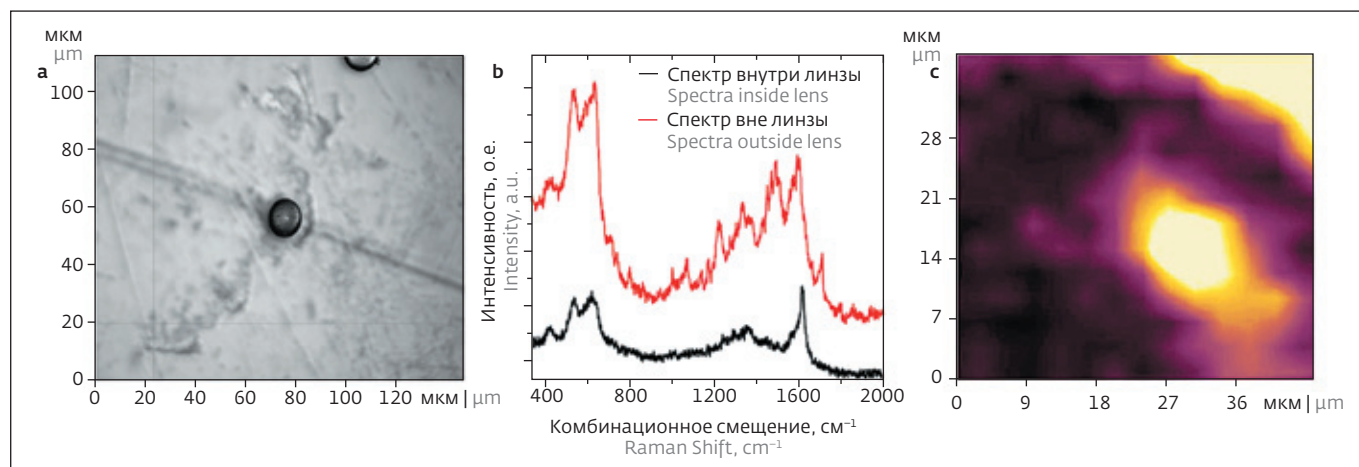


Рис.5. а – оптическое изображение поверхности слюды с наночастицами серебра и микролинзами; б – спектры КР: черная линия внутри линзы, красная – вне линзы; с – карта пространственного распределения интенсивности сигнала КР в диапазоне $210\text{--}270\text{ см}^{-1}$

Fig.5. а – an optical image of a mica surface with silver nanoparticles and microlens; б – RS-spectra: inside the lens (in black), outside the lens (in red); с – Spatial distribution of RS-signal intensity in a range of $210\text{--}270\text{ см}^{-1}$

лазерного пятна засветки 10 мкм количество нанопроволок составляет ~ 942 . С использованием линзы количество нанопроволок составляет ~ 60 . Из этого можно сделать вывод, что использование микролинз позволяет изучать спектры малого количества молекул, что на несколько порядков меньше, чем без использования микролинз.

Серебряные наночастицы

Наночастицы серебра слишком малы для визуализации с помощью микролинзовой микроскопии:

средняя высота частиц по данным АСМ составляет 15 нм (рис.2). Но на их примере продемонстрировано усиление сигнала КР с помощью микролинзы диаметром $13,5\text{ мкм}$ (рис.5). На рис.5а представлены спектры КР, снятые в разных точках поверхности – внутри линзы и снаружи (показаны на рис.5б черной и красной линией соответственно). Пик в области 240 см^{-1} соответствует валентным колебаниям Ag–O на поверхности наночастиц [8]. На рис.5с показано, как сигнал от этого пика возрастает в области центра микролинзы, усиление составляет ~ 3 .

RESULTS AND DISCUSSION

Silver nanowires (NWs)

Figure 3 shows the optical image of the silver NWs array surface. The microspheres dia. 35 мкм placed in the image centre and its focus must be located at a distance of $\sim 18.4\text{ мкм}$ from the bottom sphere edge, according to [7]. The enlarged image can be seen through the microlens, where the separate tips of silver NWs are visible. According to the electron microscopy data, the diameter of NWs is 100 нм .

Therefore, a microlens allows of obtaining the optical image behind the diffraction limit,

which limits the resolution of standard optical microscopy at a level of 200 нм . A microlens forms a virtual image with magnification ~ 15 , which is captured by the microscope lens.

Then, the spectra of 10 мкг/л Rhodamine 6G were obtained on these substrates without lenses and with their use (see Fig.4). The characteristic peaks of this substance are well visible in the image of the spectrum.

The intensity of molecular SERS-signal without microlenses is greater than with their use. It can be explained because during the microlens use the spectrum of

smaller area is collected, hence, a smaller number of molecules took part in this process.

The density of NWs on the substrate is $1.2 \cdot 10^9\text{ см}^{-2}$. It is clear, that at the SERS-spectra registration without lenses, when a laser beam spot is 10 мкм , the NWs number is, approximately, ~ 942 . The number of NWs when using a lens is, approximately, ~ 60 . In conclusion, use of microlenses makes it possible to study the spectra of a small number of molecules, which is several orders of magnitude less than without the use of microlens.

Таким образом, использование микролинз в оптической микроскопии и спектроскопии КР позволяет получить лучшее оптическое разрешение, а также повысить чувствительность спектроскопии КР. Использование микролинзовой микроскопии позволит изучать спектры веществ вплоть до единичных молекул. Дальнейшее развитие микролинзовой микроскопии связано с созданием пленок с микро-сферами, как в работе [9], и систем сканирования микролинзами для увеличения поля зрения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Лондонского Королевского Общества № 21-58-10005 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Измерения методом КР выполнены при финансовой поддержке государственного задания ИПХФ РАН 0074-2019-0014 (номер гос. регистрации АА-19-119101590029-0).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Wang Z., Guo W., Li L., Luk'yanchuk B., Khan A., Liu Z., et al. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope. *Nat Commun.* 2011;2: 218, DOI: 10.1038/ncomms1211.
2. Yi K.J., Wang H., Lu Y.F., Yang Z.Y. Enhanced Raman scattering by self-assembled silica spherical microparticles. *Journal of Applied Physics.* 2007. P. 063528. DOI:10.1063/1.2450671, doi:10.1063/1.2450671
3. Gašparić V., Taccheo S., Gebavi H., Ristić D., Ivanda M. Photonic nanojet mediated Raman enhancement: Vertical Raman mapping and simple ray matrix analysis. *Journal of Raman Spectroscopy.* 2020. PP. 165–175. DOI:10.1002/jrs.5747.
4. Бедин С.А., Рыбалко О.Г., Поляков Н.Б. и др // Перспективные материалы. 2010. № 1. С. 98.
5. Bedin S.A., Rybalko O.G., Polyakov N.B. et al // *Inorganic Materials: Applied Research.* 2010. V. 1. P. 359. DOI: 10.1134/S2075113310040179.
6. Kozhina E.P., Bedin S.A., Nechaeva N.L., Podoynitsyn S.N., Tarakanov V.P., Andreev S.N., Grigoriev Y.V., Naumov A.V. Ag-Nanowire Bundles with Gap Hot Spots Synthesized in Track-Etched Membranes as Effective SERS-Substrates // *Applied Sciences.* 2021. V. 11. No. 4. P. 1375. DOI: 10.3390/app 11041375.
7. Luk'yanchuk B.S., Paniagua-Domínguez R., Minin I., Minin O. and Wang Z. 2017. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow. *Optical Materials Express,* 7(6), pp. 1820–1847. DOI: 10.1364/OME.7.001820.
8. Kora A.J. and Arunachalam J. 2012. Green fabrication of silver nanoparticles by gum tragacanth (*Astragalus gummifer*): a dual functional reductant and stabilizer. *Journal of Nanomaterials,* 2012. DOI: 10.1155/2012/869765.
9. Xing C., Yan Y., Feng C., Xu J., Dong P., Guan W., et al. Flexible Microsphere-Embedded Film for Microsphere-Enhanced Raman Spectroscopy. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2017; 9: 32896–32906. DOI: 10.1021/acsami.7b09884.

Silver nanoparticles

Silver nanoparticles are too small for their visualization with microlens microscopy, because an average particle height, in accordance with AFM, is 15 nm (see Fig.2). But it is an example of RS-signal magnification with microlens dia. 13.5 μm (see Fig.5). Figure 5a shows the RS spectra obtained from the various points on the surface, inside the lens and outside of it (coloured in Fig.5b with black and red lines, correspondingly). The peak in the region of 240 cm^{-1} corresponds to the Ag–O stretching vibrations in the nanoparticle surfaces [8].

Figure 5c demonstrates how the signal from this peak increases in the microlens centre at magnification of ~ 3 . Therefore, the use of microlenses in optical microscopy and RSS allows of obtaining the better optical resolution and increases the RSS sensitivity. Microlens microscopy makes it possible to study the spectra of substances down to the single molecules. The following development of microlens microscopy is connected with manufacturing of the films with microspheres [9] and microlens scanning systems to enlarge a field of view.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was completed with the financial support of the RFBR and the London Royal Society No. 21-58-10005 and Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. The measurements of RS were completed with the financial support of the Institute of Problems of Chemical Physics of RAS state task 0074-2019-0014 (state registration number is AA-19-119101590029-0).

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



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Бобков С.Г., Басаев А.С.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Рецензент: Стенин Владимир Яковлевич – д-р техн. наук, проф. (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

**М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 264 с.
ISBN 978-5-94836-610-4**

Цена 975 руб.

Важнейшей характеристикой микропроцессорных систем является производительность. Производительность микропроцессора линейно зависит от трех характеристик – его частоты, средней частоты на выполнение инструкций и количества инструкций в выделенной области программы. В свою очередь, эти характеристики определяются технологией изготовления, архитектурой микропроцессора, системой команд и технологией компиляции. В представленной книге рассмотрены проблемы улучшения этих характеристик, а также методы и методики проектирования высокопроизводительных вычислительных систем.

Рассмотрены архитектуры микропроцессоров и коммуникационных систем, ориентированных на создание высокопроизводительных вычислительных комплексов вплоть до супер-ЭВМ. Приводится маршрут и методики проектирования микросхем.

Книга предназначена для студентов старших курсов кафедр электроники и автоматики университетов, аспирантов и специалистов указанной области.

Бобков С.Г. (Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)

Басаев А.С. (Научно-производственный комплекс «Технологический центр»)

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphera.ru
sales@technosphera.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphera.ru