

УДК 535.015

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-67-72

## Синтез массивов углеродных нанотрубок с варьируемой плотностью

Г.С. Бочаров, М.С. Егин, А.В. Елецкий, М.А. Климова, С.И. Нефедкин

Работа направлена на получение разреженного массива углеродных нанотрубок с целью использования в экспериментах по усилению сигнала комбинационного рассеяния света.

Развита процедура синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) методом CVD на подложках Si/SiO<sub>2</sub> и ситалла. Подложки покрыты тонким слоем Ni в магнетронной напылительной установке. Последующий их отжиг в высокотемпературной печи при температуре 800...1000 °C приводил к распаду никелевой пленки на массив никелевых островков, которые служили в качестве катализатора роста УНТ. Синтез УНТ протекал в автоматизированной высокотемпературной печи установки Planar Tech в трубке из кварцевого стекла, помещенной в печь в потоке Ar с примесью CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> и NH<sub>3</sub>. Температура синтеза составляла 900 °C, полная длительность процесса превышала 200 мин. Полностью автоматизированная установка позволила задавать режим синтеза, включая температуру и длительность каждой стадии, а также состав прокачиваемой газовой смеси. Анализ микрофотографий массивов УНТ, выращенных на различных подложках, показал, что в результате синтеза образуются горизонтально ориентированные многослойные УНТ диаметром от 26 до 60 нм, в зависимости как от типа и состояния поверхности подложки, так и режима отжига поверхности. Эти же факторы определяют плотность размещения УНТ на подложке.

Установлены условия синтеза, обеспечивающие образование разреженного массива УНТ, который представляется оптимальным для проведения экспериментов по усилению сигнала комбинационного рассеяния света. Обсуждаются особенности усиления сигнала комбинационного рассеяния света в результате взаимодействия плазмонных колебаний в УНТ в присутствии лазерного излучения с многоатомными молекулами. Отмечена роль экранирования излучения соседними нанотрубками, во избежание которого требуется использование разреженных массивов УНТ.

*Ключевые слова:* нанотрубки, рамановская спектроскопия, поверхностно-усиленная рамановская спектроскопия.

*Для цитирования:* Бочаров Г.С., Егин М.С., Елецкий А.В., Климова М.А., Нефедкин С.И. Синтез массивов углеродных нанотрубок с варьируемой плотностью // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 67—72. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-67-72.

## A Synthesis of Carbon Nanotube Arrays with Variable Density

G.S. Bocharov, M.S. Egin, A.V. Yeletsky, M.A. Klimova, S.I. Nefedkin

The study is aimed at obtaining a sparse carbon nanotube (CNT) array for using it in experiments on amplifying the surface-enhanced Raman scattering (SERS) signal.

A procedure for synthesizing CNTs on Si/SiO<sub>2</sub> and on glass-ceramic (sital) substrates using the CVD method has been developed. The substrates were covered with a thin Ni layer in a magnetron sputtering unit. The subsequent annealing of the substrates in a high-temperature furnace at a temperature of 800–1000 °C resulted in that the Ni film became decomposed into an array of Ni islands that served as CNT growth catalysts. The CNTs were synthesized in the Planar Tech unit's automated high-temperature furnace in a quartz glass tube, which was placed in the furnace and streamlined by flow of Ar with admixture CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub>. The synthesis temperature was equal to 900 °C, and the total synthesis process took more than 200 min. Owing to the system's being fully automated, the synthesis operating parameters could be set up, including the temperature and duration of each stage and composition of gas mixture blown through the quartz tube. The microimages of the CNT arrays grown on different substrates were analyzed, and it has been found from that analysis that the synthesis yielded horizontally oriented multilayer CNTs ranging from 26 to 60 nm in diameter, depending both on the substrate type and condition and the surface annealing conditions. These factors also determine the CNT array density on the substrate.

The synthesis conditions under which a sparse CNT array is obtained, which seems to be the most suitable for carrying out experiments on amplifying the SERS signal, have been established. Peculiarities of the Raman signal enhancement as a result of interaction between plasmon oscillations in CNTs and polyatomic molecules in the presence of laser radiation are discussed. It is pointed out that neighboring nanotubes have a screening effect on the radiation, for avoiding which sparse CNT arrays need to be used.

*Key words:* carbon nanotubes, Raman-scattering spectroscopy, surface-enhanced Raman scattering spectroscopy.

*For citation:* Bocharov G.S., Egin M.S., Yeletsky A.V., Klimova M.A., Nefedkin S.I. A Synthesis of Carbon Nanotube Arrays with Variable Density. Bulletin of MPEI. 2020;1:67—72. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-67-72.

## Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ) обладают широким разнообразием уникальных физико-химических характеристик [1 — 9], которые служат основой для развития многочисленных прикладных направлений. Так, УНТ эффективно используются в нелинейной оптике и лазерной физике в качестве насыщающихся поглотителей [8] и поляризаторов света [9], применяются в качестве присадки к полимерным материалам с целью получения проводящих композитов [7], служат эффективными источниками электронов в холодных полевых эмиттерах [3, 6]. Развитие указанных направлений требует разработки методов получения УНТ с различными наперед заданными характеристиками.

В настоящее время наиболее распространенный подход к синтезу УНТ основан на методе химического осаждения паров (CVD), в соответствии с которым рост УНТ происходит в результате взаимодействия углеродосодержащего газа при повышенных температурах с металлическими наночастицами, играющими роль катализатора. Характеристики синтезируемых УНТ зависят от типа и размера частиц катализатора, состава, давления и скорости прокачивания газа, температуры и длительности синтеза. Хотя процедура синтеза УНТ в различных экспериментах детально описана во многих публикациях, проблема получения массива УНТ с заданными параметрами до конца не решена, что связано с высокой чувствительностью результатов к условиям синтеза и степени очистки используемых газов.

В связи с развитием методов анализа малых молекулярных примесей в целях получения чистых материалов и реализации малоинвазивных подходов к определению молекулярного состава примесей в живых организмах в последние годы получил распространение метод, основанный на усилении сигнала комбинационного рассеяния света (КРС) проводящими наночастицами (SERS) [10 — 13]. Значительный научный и практический интерес привлекает возможность использования в качестве подобных частиц УНТ, которые отличаются миниатюрными размерами в сочетании с достаточно хорошей электронной проводимостью и наличием плазмонных колебаний. Имеются публикации об использовании УНТ в экспериментах SERS в качестве каркаса, несущего металлические наночастицы, способные усиливать сигнал КРС [14, 15]. Углеродные нанотрубки применяли также в качестве емкости для фиксации положения молекул, подлежащих исследованию в экспериментах SERS [16]. Однако есть все основания полагать, что они, подобно металлическим наночастицам, сами способны усиливать сигнал КРС. Это было продемонстрировано недавно в [17]. Нанотрубки выращивали на кремниевой подложке методом химического осаждения паров (CVD). Катализатором роста служили частицы  $\text{MoO}_3$ , для нанесения которых на подложку использовали водную суспензию с различным уровнем содержания частиц.

Каплю суспензии наносили на подложку, которую помещали в центрифугу. Центрифугирование приводило к равномерному покрытию подложки суспензией. В результате просушивания подложка оказывалась покрытой равномерным массивом частиц  $\text{MoO}_3$ , размер и плотность расположения которых определяли концентрацией суспензии. Синтез УНТ проводили в установке Planar Tech в трубке из кварцевого стекла, помещенной в печь.

Измерения [17] показали, что значительное усиление сигнала (до  $10^{12}$ ) наблюдается при условиях, когда плотность массива УНТ на подложке относительно невысока, что связано с эффектом экранирования электромагнитного поля соседними нанотрубками при их слишком плотном расположении [6]. Тем самым становится актуальной задача получения массива УНТ низкой плотности, при которой обеспечивается наиболее значительный эффект усиления интенсивности электромагнитного излучения. В настоящей работе предприняты попытки синтеза массивов УНТ с варьируемой плотностью с целью установления оптимальных условий получения разреженных массивов. При этом в качестве катализатора роста УНТ выбраны частицы Ni, образующиеся в результате отжига никелевой пленки.

## Эксперимент

УНТ выращивали на подложках Si/SiO<sub>2</sub> или ситалла методом химического осаждения паров (CVD). Подложку покрывали пленкой Ni в магнетронной напылительной установке «Краудион-М1-1/2». Пластины Si/SiO<sub>2</sub> толщиной  $500 \pm 10$  мкм с толщиной слоя SiO<sub>2</sub>  $300 \pm 10$  нм и удельным сопротивлением  $0,001 \dots 0,005$  Ом·см получены от китайской компании «Beijing Golden Brother Technology Co., LTD». Пластины ситалла толщиной 0,25 мм отполированы с одной стороны. Шероховатость отполированной поверхности  $R_z$  не ниже 0,032 мкм. Шероховатость не отполированной (шероховатой) поверхности  $R_z$  не ниже 4 мкм. Напыление Ni на подложки проводили в магнетронной напылительной установке при токе 0,2 А и давлении аргона 2 Па. Длительность напыления — 3 с. После напыления пластины разрезали на фрагменты размером  $15 \times 25$  мм<sup>2</sup> и подвергали отжигу с целью преобразования сплошной никелевой пленки в наночастицы Ni, которые использовались в качестве катализатора роста УНТ. Отжиг проходил в потоке Ar в печи установки Planar Tech в трубке из кварцевого стекла, помещенной в печь. Было подготовлено несколько образцов, отличающихся материалом подложки, а также температурой и длительностью отжига. Параметры, характеризующие режим подготовки образцов, приведены в табл. 1.

Синтез УНТ выполнен в установке Planar Tech в трубке из кварцевого стекла, помещенной в печь. Полностью автоматизированная установка позволила задавать режим синтеза, включая температуру и длительность каждой стадии, а также состав прокачиваемой

газовой смеси. Параметры наиболее часто используемого режима синтеза представлены в табл. 2.

Микрофотографии массивов синтезированных УНТ получены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7001F с энергией электронов 30 и 1 кВ.

### Результаты и обсуждение.

На рисунке представлены микрофотографии массивов УНТ, выращенных на различных подложках. Как видно, структура синтезированных УНТ и плотность их расположения в существенной степени зависит как от материала, так и от режима отжига подложки. Наиболее разреженный массив УНТ с оптимальными параметрами для экспериментов по усилению сигнала комбинационного рассеяния света получается при отжиге подложки с напыленной пленкой никеля в потоке  $Ar + H_2$  при температуре 1000 °С в течение 60 мин. Использование подложки из ситалла (рис. 1, д) приводит к получению весьма плотного массива запутанных УНТ, который вряд ли пригоден для подобных экспериментов, однако может рассматриваться как источник УНТ в макроскопических количествах. Диаметр наблюдаемых УНТ расположен в диапазоне от 26 до 60 нм, что указывает на многослойную структуру нанотрубок.

Обращает на себя внимание факт образования УНТ на тыльной поверхности подложки из ситалла. Эта сторона обращена к днищу лодочки, на которой размещена подложка. Можно предположить, что при напылении в магнетронной установке никелевая пленка не-

большой толщины образуется не только на лицевой, но также и на тыльной стороне подложки. При этом, если толщина такой пленки много меньше толщины пленки, образующейся на лицевой стороне пластины, то расстояние между никелевыми частицами, формируемыми в результате отжига, существенно больше, чем на лицевой стороне. Это отражается на степени плотности полученного массива УНТ (рис. 1, д, е), в то время как лицевая сторона ситалловой подложки покрыта плотным перепутанным массивом УНТ. На тыльной стороне наблюдаются изолированные нанотрубки диаметром несколько десятков нанометров. Следует отметить, что в отличие от традиционно наблюдаемых массивов вертикально ориентированных УНТ, в представленных условиях нанотрубки ориентированы преимущественно горизонтально. Это объясняется незначительной ролью заряда нанотрубок, связанного с наличием контактной разности потенциалов между нанотрубкой и частицей никеля [6]. В плотных массивах заряженные нанотрубки испытывают взаимное отталкивание, которое способствует их вертикальной ориентации. В разреженных массивах эффект отталкивания не играет существенной роли, что приводит к горизонтальной ориентации УНТ.

Эффект усиления сигнала КР обусловлен возникновением плазмонного резонанса в нанотрубках с металлической проводимостью. При использовании стандартных подходов к синтезу УНТ доля таких нанотрубок составляет около 1/3 от общего числа. Плазмонный резонанс эффективно возбуждается в трубках, длина которых меньше длины свободного

Таблица 1

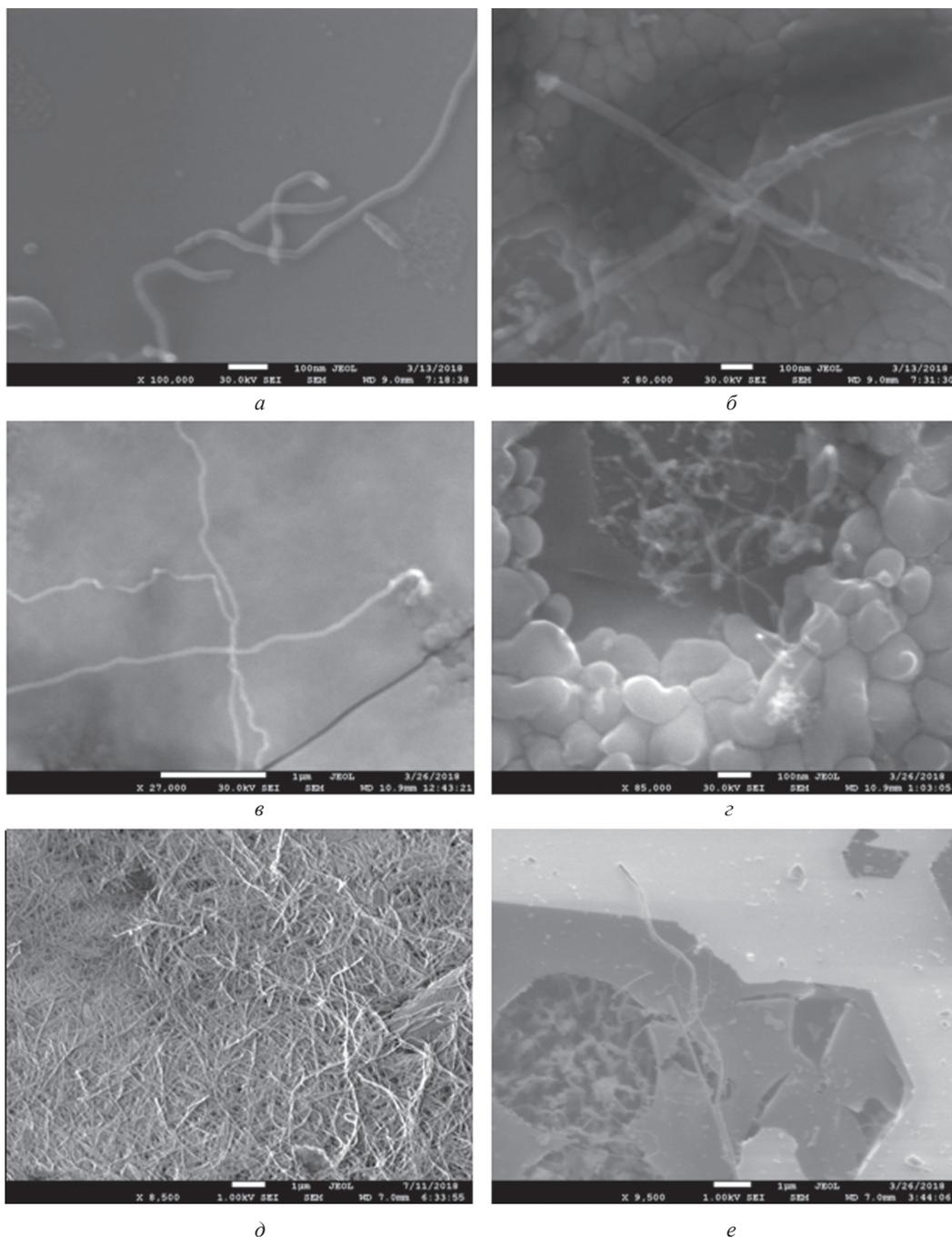
### Параметры режима подготовки подложек

Материал подложки	Длительность, мин		Температура отжига, °С	Давление, Тор	Скорость потока, см <sup>3</sup> /мин	
	нагрев	отжиг			Ar	H <sub>2</sub>
Si/SiO <sub>2</sub>	60	60	1000	5	500	100
Si/SiO <sub>2</sub>	60	10	1000	5	500	—
Si/SiO <sub>2</sub>	60	60	1000	5	500	—
Si/SiO <sub>2</sub>	60	10	800	5	500	—
Ситалл гладкий	60	60	1000	5	500	—
Ситалл шероховатый	60	60	1000	5	500	—

Таблица 2

### Режим синтеза УНТ на установке PlanarTech

Стадия	T, °С	Длительность, мин	Поток Ar, см <sup>3</sup> /мин	Поток H <sub>2</sub> , см <sup>3</sup> /мин	CH <sub>4</sub> , см <sup>3</sup> /мин	Давление, Тор
1	20	5	200	50	50	0
2	900	40	1000	0	0	10
3	900	10	0	100	0	10
4	900	60	0	50	50	10
5	900	60	1000	0	0	10
6	10	30	1000	0	0	10



Микрофотографии массивов УНТ, выращенных на различных подложках:

*a* — образец 1, диаметр нанотрубок оценивается как 26 нм; *б* — образец 2, видны УНТ диаметром 44 и 46 нм; *в* — образец 3 с УНТ диаметром 46 и 60 нм; *г* — образец 4; *д* — образец 5, напыленная сторона; *е* — образец 6, тыльная сторона

пробега электрона [18 — 21]. Величина данного параметра определяется концентрацией структурных дефектов в УНТ и обычно находится в диапазоне 0,5...1 мкм [5]. Присутствие трубок большей длины может эффективно снизить сигнал КР. Электроны движутся по поверхности трубки, при этом электронная волновая функция выходит за границу УНТ на расстояние нескольких размеров элементарной ячейки ( $\approx 0,25$  нм). Точка пересечения двух УНТ является центром рассеяния для электронов проводимости, формирующих

плазмонные колебания, поэтому пересечение нанотрубок снижает эффективную длину пробега электронов. Вероятность  $p_2$  пересечения УНТ длиной  $2a$  с другими трубками определяется на основании элементарной теории вероятностей

$$p_2 = 1 - \exp(-2pa/\pi b),$$

где  $p$  — поверхностная концентрация трубок;  $b$  — диаметр нанотрубки.

Следовательно, среднее число пересечений  $w(a) = p_2/(1 - p_2)^2$  экспоненциально зависит от длины трубки. Если  $w(a) \sim \exp(4pa/\pi b) \gg 1$ , то плазмонный резонанс подавляется, и УНТ с такой длиной не участвуют в усилении поля. Таким образом, при превышении критической концентрации  $p = p_c \sim b/a \ll 1$  суммарные усиления поля и, следовательно, сигнала КР существенно снижаются. Выполненные оценки дают качественное объяснение наблюдаемой в [17] резкой зависимости степени усиления сигнала КР от плотности расположения УНТ на подложке. Этим объясняется необходимость получения разреженных массивов УНТ, в которых минимальное количество нанотрубок испытывает пересечение друг с другом.

### Литература

1. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки // УФН. 1997. Т. 167. № 9. С. 945—972.
2. Елецкий А.В. Эндоедральные структуры // УФН. 2000. Т. 170. № 2. С. 113—142.
3. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 401—438.
4. Елецкий А.В. Механические свойства углеродных наноструктур // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 233—274.
5. Елецкий А.В. Транспортные свойства углеродных нанотрубок // УФН. 2009. Т. 179. № 3. С. 225—242.
6. Елецкий А.В. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 897—930.
7. Елецкий А.В., Книжник А.А., Потапкин Б.В., Kenny J.M. Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки // УФН. 2015. Т. 185. № 3. С. 225—270.
8. Krylov A.A. e. a. Performance Peculiarity of CNT-based thin Film Saturable Absorbers for Er Fiber Laser Mode-locking // J. Optical Soc. America B: Optical Phys. 2016. No. 33 (2). Pp. 134—142.
9. Arutyunyan N.R. e. a. Light Polarizer in Visible and THz Range Based on Single-wall CNTs Embedded Into Poly (Methyl Methacrylate) Film // Laser Phys. Letters. 2016. V. 13. No. 6. Pp. 065901—065905.
10. Blackie E.J., Le Ru E.C., Etchegoin P.G. Single-molecule Surface-enhanced Raman Spectroscopy of Nonresonant Molecules // J. Am. Chem. Soc. 2009. V. 40. No. 131. Pp. 14466—14472.
11. Le Ru E.C., Blackie E., Meyer M., Etchegoin P.G. Surface Enhanced Raman Scattering Enhancement Factors: a Comprehensive Study // J. Phys. Chem. C. 2007. V. 37. No. 111. Pp. 13794—13803.
12. Nie S., Emory S.R. Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering // Science. 1997. V. 5303. No. 275. Pp. 1102—1106.
13. Le Ru E.C., Meyer M., Etchegoin P.G. Proof of Single-molecule Sensitivity in Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) by Means of a Two-analyte Technique // J. Phys. Chem. B. 2006. V. 110. No. 4. Pp. 1944—1948.

### Заключение

Реализована процедура синтеза многослойных УНТ диаметром от 26 до 60 нм методом CVD на подложках из Si/SiO<sub>2</sub> и ситалла с использованием метана в качестве углеродосодержащего газа. Установлено, что плотность синтезируемого массива УНТ в существенной степени зависит как от материала подложки, так и от условий отжига подложки с напыленной пленкой никеля. Разреженный массив УНТ, пригодный для экспериментов по усилению сигнала комбинационного рассеяния света, получается при отжиге Si/SiO<sub>2</sub> пластины с напыленной пленкой Ni в течение 60 мин при температуре 1000 °С в потоке Ar + H<sub>2</sub>.

### References

1. Eletskiy A.V. Uglyerodnye Nanotrubki. UFN. 1997; 167;9:945—972. (in Russian).
2. Eletskiy A.V. Endoedral'nye Struktury. UFN. 2000; 170;2:113—142. (in Russian).
3. Eletskiy A.V. Uglyerodnye Nanotrubki i Ikh Emissionnye Svoystva. UFN. 2002;172;4:401—438. (in Russian).
4. Eletskiy A.V. Mekhanicheskie Svoystva Uglyerodnykh Nanostruktur. UFN. 2007;177;3:233—274. (in Russian).
5. Eletskiy A.V. Transportnye Svoystva Uglyerodnykh Nanotrubok. UFN. 2009;179;3:225—242. (in Russian).
6. Eletskiy A.V. Kholodnye Polevyie Emittery na Osnove Uglyerodnykh Nanotrubok. UFN. 2010;180;9:897—930. (in Russian).
7. Eletskiy A.V., Knizhnik A.A., Potapkin B.V., Kenny J.M. Elektricheskie Kharakteristiki Polimernykh Kompozitov, Soderzhashchikh Uglyerodnye Nanotrubki. UFN. 2015;185;3:225—270. (in Russian).
8. Krylov A.A. e. a. Performance Peculiarity of CNT-based thin Film Saturable Absorbers for Er Fiber Laser Mode-locking. J. Optical Soc. America B: Optical Phys. 2016;33 (2):134—142.
9. Arutyunyan N.R. e. a. Light Polarizer in Visible and THz Range Based on Single-wall CNTs Embedded Into Poly (Methyl Methacrylate) Film. Laser Phys. Letters. 2016;13;6:065901—065905.
10. Blackie E.J., Le Ru E.C., Etchegoin P.G. Single-molecule Surface-enhanced Raman Spectroscopy of Nonresonant Molecules. J. Am. Chem. Soc. 2009;40;131:14466—14472.
11. Le Ru E.C., Blackie E., Meyer M., Etchegoin P.G. Surface Enhanced Raman Scattering Enhancement Factors: a Comprehensive Study. J. Phys. Chem. C. 2007;37;111:13794—13803.
12. Nie S., Emory S.R. Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering. Science. 1997;5303;275:1102—1106.
13. Le Ru E.C., Meyer M., Etchegoin P.G. Proof of Single-molecule Sensitivity in Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) by Means of a Two-analyte Technique. J. Phys. Chem. B. 2006;110;4:1944—1948.

14. **Chen Y.-C., Young R.J., Macpherson J.V, Wilson N.R.** Single-walled Carbon Nanotube Networks Decorated with Silver Nanoparticles: a Novel Graded SERS Substrate // *J. Phys. Chem. C*. 2007. V. 44. No. 111. Pp. 16167—16173.

15. **Lee S. e. a.** Utilizing 3D SERS Active Volumes in Aligned Carbon Nanotube Scaffold Substrates // *Adv. Mater.* 2012. No. 24 (38). Pp. 5261—5266.

16. **Mueller N.S. e. a.** Plasmonic Enhancement of SERS Measured on Molecules in Carbon Nanotubes // *Faraday Discuss.* 2017. No. 205. Pp. 85—103.

17. **Елецкий А.В. и др.** Усиление сигнала комбинационного рассеяния углеродными нанотрубками // *Доклады РАН*. 2018. Т. 483. № 5. С. 502—505.

18. **Brouers F. e. a.** Theory of Giant Raman Scattering from Semicontinuous Films // *Phys. Rev. B*. 1997. V. 55. P. 13234.

19. **Boyarintsev S.O., Sarychev A.K.** Computer Simulation of Surface-enhanced Raman Scattering in Nanostructured Metamaterials // *J. Experimental and Theoretical Phys.* 2012. V. 113. No. 6. P. 1103.

20. **Lagarkov A.N., Sarychev A.K.** Electromagnetic Properties of the Composites Containing Elongated Conducting Inclusions // *Phys. Rev. B*. 1996. V. 53. Pp. 6318—6336.

21. **Vergeles S.S., Sarychev A.K., Tartakovsky G.** All-dielectric Light Concentrator to Subwavelength Volume // *Phys. Rev. B*. 2017. V. 95. P. 085401.

14. **Chen Y.-C., Young R.J., Macpherson J.V, Wilson N.R.** Single-walled Carbon Nanotube Networks Decorated with Silver Nanoparticles: a Novel Graded SERS Substrate. *J. Phys. Chem. C*. 2007;44;111;16167—16173.

15. **Lee S. e. a.** Utilizing 3D SERS Active Volumes in Aligned Carbon Nanotube Scaffold Substrates. *Adv. Mater.* 2012;24 (38);5261—5266.

16. **Mueller N.S. e. a.** Plasmonic Enhancement of SERS Measured on Molecules in Carbon Nanotubes. *Faraday Discuss.* 2017;205:85—103.

17. **Eletskiy A.V. i dr.** Usilenie Signala Kombinationsnogo Rasseyaniya Uglerodnymi Nanotrubbkami. *Doklady RAN*. 2018;483;5:502—505. (in Russian).

18. **Brouers F. e. a.** Theory of Giant Raman Scattering from Semicontinuous Films. *Phys. Rev. B*. 1997;55:13234.

19. **Boyarintsev S.O., Sarychev A.K.** Computer Simulation of Surface-enhanced Raman Scattering in Nanostructured Metamaterials. *J. Experimental and Theoretical Phys.* 2012;113;6:1103.

20. **Lagarkov A.N., Sarychev A.K.** Electromagnetic Properties of the Composites Containing Elongated Conducting Inclusions. *Phys. Rev. B*. 1996;53:6318—6336.

21. **Vergeles S.S., Sarychev A.K., Tartakovsky G.** All-dielectric Light Concentrator to Subwavelength Volume. *Phys. Rev. B*. 2017; 95:085401.

#### Сведения об авторах:

**Бочаров Григорий Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: bocharovgs@mail.ru

**Егин Михаил Сергеевич** — аспирант кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: egin.1992@mail.ru

**Елецкий Александр Валентинович** — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник кафедры общей физики и ядерного синтеза НИУ «МЭИ», e-mail: eletskii@mail.ru

**Климова Мария Андреевна** — аспирант кафедры химии и электрохимической энергетики НИУ «МЭИ», e-mail: klimovama@mail.ru

**Нефедкин Сергей Иванович** — доктор технических наук, профессор кафедры химии и электрохимической энергетики НИУ «МЭИ», e-mail: snfedkin@mail.ru

#### Information about authors:

**Bocharov Grigoriy S.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: bocharovgs@mail.ru

**Egin Mikhail S.** — Ph.D.-student of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: egin.1992@mail.ru

**Yeletsky Aleksandr V.** — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher of General Physics and Nuclear Fusion Dept., NRU MPEI, e-mail: eletskii@mail.ru

**Klimova Mariya A.** — Ph.D.-student of Chemistry and Electric-chemical Energetic Dept., NRU MPEI, e-mail: klimovama@mail.ru

**Nefedkin Sergey I.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Chemistry and Electric-chemical Energetic Dept., NRU MPEI, e-mail: snfedkin@mail.ru

**Работа выполнена в рамках:** Государственных заданий № 3.1414.2017/ПЧ, № 3.7131.2017/БУ

**The work is executed in the framework:** State Assignment № 3.1414.2017/ПЧ, № 3.7131.2017/БУ

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 26.10.2018

**The article received to the editor:** 26.10.2018