

Микро- и наноэлектроника

УДК 681.7.064.49

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97>

## Магнитные и плазмонные композиционные наноструктуры для реализации оптических фильтров в системах контроля и диагностики веществ и материалов

Р. С. Смердов<sup>1</sup>✉, Ю. М. Спивак<sup>2</sup>, В. А. Мошников<sup>2</sup>, А. С. Мустафаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [rostofan@gmail.com](mailto:rostofan@gmail.com)

### Аннотация

**Введение.** Пористый кремний (ПК) и материалы на его основе представляют интерес для применения в наноэлектронике, таргетированной доставке препаратов и перспективных детекторах газов. Разработки в области создания наноструктур на базе ПК актуальны для реализации фильтров в системах волоконно-оптической связи, поскольку современные интерференционные фильтры характеризуются наличием побочных полос в рабочем диапазоне и требуют поддержания высокого вакуума при нанесении покрытий нанометровой толщины.

**Цель работы.** Разработка прототипов полосно-заграждающего фильтра оптического диапазона на основе композиционных магнитных наночастиц и эффекта локализованного поверхностного плазмонного резонанса (ЛППР) в массиве наночастиц серебра на поверхности ПК.

**Материалы и методы.** Разработка и получение наноструктур для создания прототипов фильтров. Применение метода двойного дифференцирования совместно с теорией поглощения Ми для анализа характеристик затухания прототипов.

**Результаты.** Разработаны 2 прототипа; анализ характеристики затухания прототипа на основе функционализированной магнитными наночастицами  $Fe_mO_n$  матрицы  $SiO_2$  позволяет связать параметры обнаруженных полос поглощения с размером наночастиц  $Fe_mO_n$ . Характеристика затухания прототипа на основе ЛППР в массиве наночастиц Ag на поверхности пористого кремния содержит две полосы поглощения. Значение средней длины волны в полосе, обусловленной ЛППР в массиве наночастиц серебра, близких по форме к сферическим, составляет 367.5 нм. Возбуждение ЛППР в квантовых кластерах серебра, сопровождающееся появлением соответствующей полосы, происходит на длине волны 265.5 нм. Изменение параметров синтеза ПК матрицы позволяет управлять подавлением в каждой из обнаруженных полос.

**Заключение.** Несмотря на недостатки, в том числе сравнительно низкую точность задания средней длины волны, а также трудоемкость уменьшения неравномерности в полосе поглощения, полученные прототипы превосходят существующие аналоги и являются перспективными для решения задач разработки компактных систем анализа и диагностики в широком энергетическом диапазоне.

**Ключевые слова:** полосно-заграждающий фильтр, плазмонный резонанс, пористый кремний, массив наночастиц, теория Ми, модель Друде, метод Унно–Имаи

**Для цитирования:** Магнитные и плазмонные композиционные наноструктуры для реализации оптических фильтров в системах контроля и диагностики веществ и материалов / Р. С. Смердов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, А. С. Мустафаев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 81–97. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97

---

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Авторы благодарят доцента кафедры МНЭ СПбГЭТУ к.т.н. К. Г. Гареева за проведение синтеза композиционных наночастиц  $Fe_mO_n-SiO_2$ .

Статья поступила в редакцию 19.03.2021; принята к публикации после рецензирования 22.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021

© Смердов Р. С., Спивак Ю. М., Мошников В. А., Мустафаев А. С., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

## Magnetic and Plasmonic Composite Nanostructures for Creating Optical Filters at Substance and Material Diagnostics Systems

Rostislav S. Smerdov<sup>1✉</sup>, Yulia M. Spivak<sup>2</sup>, Vyacheslav A. Moshnikov<sup>2</sup>, Alexander S. Mustafaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ rostofan@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Porous silicon (PS) and materials on its basis are of interest for application in nanoelectronics, targeted drug delivery and advanced gas sensors. In addition, PS-based nanostructures are promising as filters in fibre-optic communication systems, since conventional thin-film deposition filters possess sidebands in their operating range thus requiring high vacuum for nanometer-thick coatings.

**Aim.** To develop optical band-stop filter prototypes based on composite magnetic nanoparticles and the effect of localized surface plasmon resonance (LSPR) in an array of silver nanoparticles located on the PS surface.

**Materials and methods.** The development and synthesis of nanostructures for the creation of filter prototypes. The double differentiation method in conjunction with Mie absorption theory was used for processing and analyzing the prototypes attenuation characteristics.

**Results.** Two prototypes were developed. An analysis of the attenuation characteristics of a prototype based on SiO<sub>2</sub> matrix functionalized by Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub> indicated that the parameters of the detected absorption bands depend on the size of Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub> nanoparticles. The attenuation characteristics of the LSPR-based prototype contain two absorption bands. The center wavelength value in the band caused by LSPR in the array of silver nanoparticles, close to spherical, is 367.5 nm. Excitation of LSPR in silver quantum clusters, manifested by the appearance of the corresponding band, occurs at a wavelength of 265.5 nm. The suppression in each of the bands can be controlled by changing the parameters of the PS matrix synthesis.

**Conclusion.** Despite the disadvantages, e.g. a relatively low accuracy in setting the center wavelength, as well as certain difficulties concerned with reducing the unevenness in the absorption band, the obtained prototypes surpass existing analogues and are prospective for the development of compact analysis and diagnostics systems in a wide energy range.

**Keywords:** band-stop filter, plasmon resonance, porous silicon, nanoparticle array, Mie theory, Drude model, Unno–Imai method

**For citation:** Smerdov R. S., Spivak Yu. M., Moshnikov V. A., Mustafaev A. S. Magnetic and Plasmonic Composite Nanostructures for Creating Optical Filters at Substance and Material Diagnostics Systems. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 81–97. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-81-97

---

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgments.** The authors are grateful to the associate professor of the MNE Department, ETU, Cand. Sci. (Eng.) K. G. Gareev for the synthesis of composite Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub>–SiO<sub>2</sub> nanoparticles.

Submitted 19.03.2021; accepted 22.04.2021; published online 29.06.2021

---

**Введение.** Стремительное развитие возникшего в конце XX в. направления научно-технических исследований, получившего название "нанотехнологии", позволяет предлагать новые решения ряда комплексных задач контроля и диагностики окружающей среды [1–3], веществ [4, 5] и материалов [6–8], создания приборов нового поко-

ления [9–11] и разработки энергетических систем [12, 13]. Особую актуальность представляют оптические свойства нанообъектов и возможность их использования при реализации инфокоммуникационных систем передачи сигналов с мультиплексированием, демультиплексированием и фильтрацией в соответствующем частотном диапазоне.

В литературе имеются данные по использованию оптических гетероструктур, т. е. систем, представляющих собой совокупность элементов со скачкообразно изменяющимися параметрами [5]. Такие структуры принято разделять на цепи с распределенными (так называемые волновые аналоговые фильтры) и сосредоточенными параметрами. Первый класс приборов характеризуется более высокой стабильностью, технологичностью и надежностью по сравнению с фильтрами из сосредоточенных элементов [5] и находит широкое применение в области создания инфокоммуникационных систем, радиотехнических комплексов, а также электронной и оптической связи.

В качестве волновых аналоговых фильтров для случая сверхвысокочастотных сигналов могут быть использованы отрезки передающих линий на базе волноводов, а в оптическом диапазоне в этом качестве обычно применяют дифракционные решетки, тонкопленочные интерференционные фильтры на основе многослойных покрытий с различными показателями преломления, а также отрезки световодов.

Одними из наиболее перспективных прототипов фильтров электромагнитных сигналов оптического диапазона являются приборы, в основе функционирования которых лежит явление локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве металлических наночастиц.

Практическая реализация таких приборов представляет определенные трудности технологического характера, связанные в первую очередь с отсутствием технологий для промышленного производства подобных материалов. Тем не менее плазмонные наноструктуры [14] обладают целым рядом преимуществ при создании прецизионных фильтров (в том числе заграждающих) оптического диапазона, включая возможность модификации полосы пропускания за счет выбора материала и морфологии самих структур, отсутствие побочных полос в рабочем частотном диапазоне фильтров (в отличие от современных волновых аналоговых фильтров, в том числе радиочастотных и оптических) [5], устойчивость устройств на базе плазмонных наномассивов к агрессивным средам, в том числе биологическим и химическим растворам, не вступающим (в основной массе) в реакцию с золотыми и серебряными наночастицами, сравнительно низкую стоимость подобных устройств в случае использования электрохимической технологии синтеза, а также анизотропию

амплитудно-частотной характеристики фильтров на основе локализованного поверхностного плазмонного резонанса в 2D-массиве наночастиц, которая позволяет использовать этот тип структур в качестве поляризационного фильтра терагерцового и видимого диапазонов [14].

Использование магнитных наночастиц для построения оптических фильтров также представляет интерес, поскольку существует необходимость создания систем, допускающих перестройку как по средней длине волны, так и по ширине полосы. В литературе имеются данные по подобным прототипам, использующим магнитные жидкости на базе  $Fe_3O_4$  [15, 16]. Тем не менее такие системы недостаточно стабильны, поскольку характеризуются высокой склонностью к неконтролируемому образованию агломератов с последующей коагуляцией и седиментацией магнитных частиц.

С целью преодоления приведенных недостатков в ходе описываемой работы авторами были реализованы прототипы заграждающих фильтров ближнего ультрафиолетового и видимого диапазонов двух типов – на базе поглощения Ми и явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса. Исследования характеристик затухания показывают, что, несмотря на имеющиеся недостатки, полученные прототипы превосходят существующие альтернативы с точки зрения диапазона задания средней длины волны.

**Цель работы.** Цель описываемых исследований – создание прототипов заграждающего фильтра оптического диапазона на основе коллоидного раствора композиционных магнитных наночастиц и явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра.

**Материалы и методы.** Композиционные наноструктуры на базе пористого оксида кремния были получены в УНЛ "Наноматериалы" К. Г. Гареевым при реализации золь-гель-процесса и последующем термическом отжиге. На первом этапе был изготовлен золь посредством растворения тетраэтоксисилана в изопропиловом спирте. При синтезе серии в качестве параметра выступала объемная доля TEOS в диапазоне от 20 до 80 %.

На втором этапе добавлением гидрированного аммиака был запущен золь-гель-процесс. Полученный материал был высушен при нормальных условиях, а затем в течение 15 мин подвергся термической обработке при температуре 300 °С для получения структуры ксерогеля.

Функционализация синтезированных материалов магнитными наночастицами и получение растворов композиционных наночастиц  $Fe_mO_n-SiO_2$  проводились непосредственно в водном растворе солей двух- и трехвалентного железа, седиментация данных составов не происходила в течение как минимум 28 дней благодаря наличию пористого гелевого  $SiO_2$ -скелета.

Таким образом, в ходе золь-гель-процесса и реакции соосаждения  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  из солей двух- и трехвалентного железа (реакция Массарта) на поверхность наноразмерного гелевого скелета  $SiO_2$  была синтезирована структура типа ядро-оболочка (core-shell). При этом агломераты  $Fe_mO_n$  образовали на поверхности  $SiO_2$  суперпарамагнитные однодоменные структуры [17, 18]. Более подробно процедура синтеза описана в [18].

Для реализации прототипа фильтра оптического диапазона на основе явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса авторы использовали разработанную ими технологию создания и функционализации поверхности пористого кремния металлическими наночастицами [19]. Необходимость создания на поверхности исходного образца обратного металлического слоя, представляющего собой один из электродов, является основным технологическим недостатком классических систем травления, используемых на сегодняшний день [20]. Данная методика требует удаления этого слоя перед последующим процессом функционализации поверхности пористого материала (например, наночастицами серебра). Используемая в ходе работы система анодирования не требует создания обратного слоя металла. Представленное схематическое изображение ячейки анодного электрохимического травления (рис. 1) иллюстрирует одну из возможных методик реализации такой системы по методу Унно–Имаи [20]. Модифицируемый образец разделяет ячейку на две идентичные части, заполненные фтороводородной кислотой (HF) на протяжении всей реакции анодирования. Электрический ток, генерируемый платиновыми электродами через HF, поступает непосредственно на модифицируемый образец (пластину кремния). Представленная на рисунке конфигурация устройства с соответствующим образом приложенным потенциалом – левый электрод – катод (эмиттер), правый – анод (коллектор) – способствует формированию пористого слоя на прикатодной стороне кремниевой пластины [20].

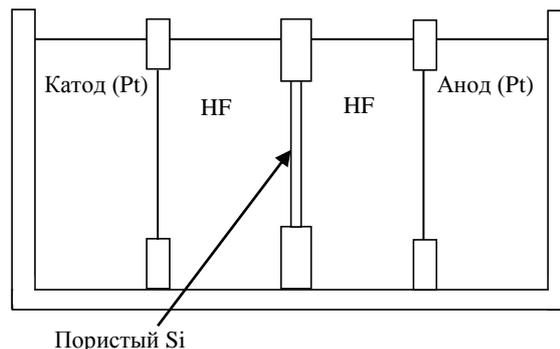


Рис. 1. Схематическое изображение ячейки для анодного электрохимического травления, использующей метод Унно–Имаи

Fig. 1. Schematic representation of a Unno–Imai anodic electrochemical etching cell

В процессе травления на поверхности кремния образуются пустоты, сразу же заполняющиеся фтороводородной кислотой, циркулирующей в обеих секциях ячейки анодирования. Проникновение образующегося на поверхности кремния пористого слоя может составлять до 10 % от толщины образца (при использовании в качестве исходного материала подложек диаметром 3 см).

Поскольку одной из задач работы являлась реализация управляемой технологии синтеза композиционных нанослоев функционализированного пористого кремния с различной структурой поверхности и развитостью, в качестве параметров были выбраны плотность тока анодирования и продолжительность травления. В табл. 1 представлены условия синтеза композиционных структур.

Табл. 1. Параметры синтеза пористого кремния  
 Table 1. Porosilicon matrix synthesis parameters

Подложка	Удельное сопротивление, Ом·см	Кристаллографическая ориентация пластин Si	Время травления, мин	Плотность тока, mA/cm <sup>2</sup>
КЭФ	4.5	(100)	10	15
			40	
КЭФ	4.5	(100)	10	2
				15
				30

В качестве источника ионов металла был использован нитрат серебра ( $AgNO_3$ ). Схематически трехэлектродная ячейка для осаждения представлена на рис. 2.

Поддержание рабочей точки по потенциалу осуществляется с применением потенциостата-гальваностата Elins P-40X.

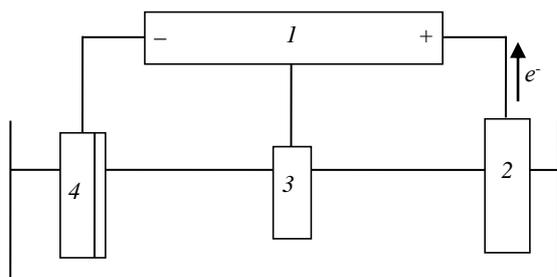


Рис. 2. Схематическое изображение ячейки для функционализации параметра: 1 – потенциостат; 2 – анод (Pt); 3 – электрод сравнения; 4 – рабочий электрод (катод)

Fig. 2. Schematic representation of a functionalization cell: 1 – potentiostat; 2 – anode (Pt); 3 – reference electrode; 4 – executing electrode (cathode)

**Методика измерения и анализа характеристик затухания прототипов разложением на гауссовские составляющие.** Спектры оптического поглощения и пропускания образцов измерялись при нормальных условиях спектрофотометром марки Specord 40, изготовленным фирмой "Analytik Jena". Оптическая плотность исследовалась в интервале 0...2.0 (2.2), а пропускание образцов измерялось с погрешностью 0.01.

Согласно работе Леви [21] при анализе релаксационных спектров оптического поглощения методом электронно-абсорбционной спектроскопии форма полос наведенного поглощения (ПНП) считается гауссовской. Так, согласно [21] можно записать:

$$K(\nu) = K_0 \exp\left[-\frac{4 \ln 2}{U^2}(\nu - \nu_0)^2\right], \quad (1)$$

где  $K_0$  – коэффициент поглощения в максимуме ПНП,  $\text{см}^{-1}$ ;  $U$  – полуширина полосы поглощения, эВ;  $\nu_0$  – положение максимума ПНП, эВ.

Использованная авторами методика разложения спектров оптического поглощения на составляющие заключается в представлении спектра в координатах оптическая плотность – энергия (в электрон-вольтах) с последующим дифференцированием для уточнения положения, полуширины и интенсивности полос поглощения (1).

Дифференциальная спектроскопия использует производные от поглощения первого порядка и выше для качественного и количественного анализа. Идея дифференцирования спектральных данных, представленная в 1950 гг., продемонстрировала множество преимуществ. Данная техника не пользовалась большой популярностью из-за сложности производимых вычислений, однако

с появлением производительных ЭВМ получила широкое распространение.

В случае представления исходной характеристики затухания (спектра) как функции длины волны  $A = f(\lambda)$  (рис. 3, а) соответствующие производные можно записать в виде  $dA/d\lambda = f'(\lambda)$  и  $d^2A/d\lambda^2 = f''(\lambda)$  для первого и второго порядков соответственно. Производная первого порядка, т. е. скорость изменения затухания относительно длины волны входного сигнала, проходит через "0" на длине волны, соответствующей максимуму полосы поглощения ( $\lambda_{\text{max}}$ ) (рис. 3, б). По обе стороны от этой точки располагаются полосы с максимумами и минимумами, соответствующими точкам перегиба характеристики затухания. Биполярная функция такого вида характерна для всех производных нечетных порядков (рис. 3, в).

Общее свойство производных второго порядка заключается в наличии отрицательной полосы с минимумом на длине волны, характерной для максимума полосы поглощения в исходной характеристике затухания (рис. 3, в). Также на графике присутствуют две дополнительные положительные вспомогательные полосы по обе стороны от основной полосы.

В свою очередь график производной четвертого порядка содержит положительную полосу на той же длине волны (рис. 3, д), при этом общее число полос оказывается на единицу выше порядка производной.

Если предположить, что характеристика затухания в полосе подчиняется закону Бугера–Ламберта–Бера, то существует аналогичная линейная связь между концентрацией и амплитудой производных любых порядков, где  $\lambda$  – длина волны;  $A$  – поглощение;  $\varepsilon$  – коэффициент экстинкции;  $b$  – длина оптического пути в образце;  $c$  – концентрация образца. Тогда, для оригинального спектра  $A = \varepsilon bc$ , а  $dA/d\lambda = (d\varepsilon/d\lambda)bc$  и  $d^n A/d\lambda^n = (d^n \varepsilon/d\lambda^n)bc$  для производных второго и  $n$ -го порядков соответственно.

При исследовании дифференциальных спектров выбор соответствующих длин волн для проведения количественных оценок однокомпонентных систем оказывается сложнее, чем при анализе спектров поглощения (нулевого порядка).

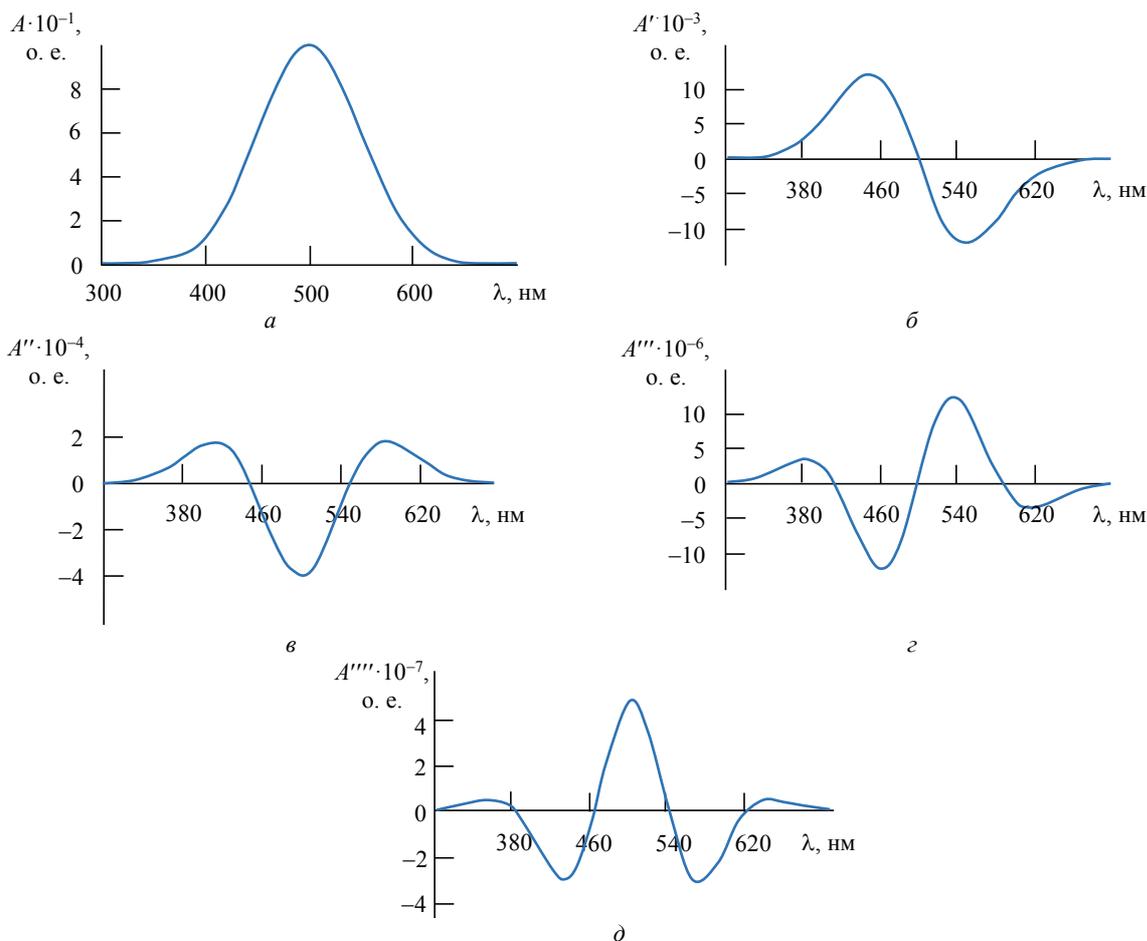


Рис. 3. Описание процедуры обработки характеристики затухания прототипов: *a* – интенсивность затухания; *б* – первая производная интенсивности затухания; *в* – вторая производная интенсивности затухания; *г* – третья производная интенсивности затухания; *д* – четвертая производная интенсивности затухания

Fig. 3. Description of the procedure used for processing the attenuation characteristics of the prototypes: *a* – attenuation intensity; *б* – first derivative of attenuation intensity; *в* – second derivative of attenuation intensity; *г* – third derivative of attenuation intensity; *д* – fourth derivative of attenuation intensity

Действительно, для производных спектров четных порядков на той же длине волны  $\lambda_{\max}$ , что и в спектре поглощения, существует экстремум (максимум или минимум), однако значения производных нечетных порядков на данной длине волны достигают нуля. Теоретически, использование длин волн, характерных для высочайшего максимума и глубочайшего минимума с последующей оценкой разности соответствующих амплитуд, позволяет получить наилучшее возможное соотношение сигнал/шум, однако такой подход может приводить к ошибкам, связанным с влиянием на исследуемый спектр сигналов от других компонентов (например, при работе со смесями, содержащими соединения с налагающимися друг на друга спектрами).

Процедуру дифференцирования характеристики затухания можно осуществить оптическими, электронными и математическими методами.

Оптические и электронные техники в основном использовались на старых моделях спектрофотометров, но в большинстве своем были вытеснены математическими методиками, преимущества которых заключаются в возможности проведения относительно быстрых расчетов дифференциальных спектров с различными параметрами и техниками сглаживания, которые могут быть использованы для улучшения соотношения сигнал/шум.

Необходимо отметить, что хотя использование производных (первого или более высоких порядков) вместо оригинального спектра позволяет получить более полный объем информации, неизбежны потери некоторых данных низкого порядка, таких, как, например, сдвиг по оси ординат. В то же время по сравнению с оригинальным спектром рост количества полос при использовании дифференциальных спектров приводит к улучшению качества количественного анализа, а значит

и качества характеристики и идентификации материала, поскольку практически идентичные в плане оригинальных спектров вещества или структуры могут сильно отличаться по форме дифференциальных спектров. Как показано на рис. 4, *a*, ширина центральной полосы производной спектра четного порядка уменьшается с увеличением порядка. Относительно оригинального спектра ширина полосы уменьшается до 53, 41 и 34 % от исходной при втором, четвертом и шестом дифференцировании соответственно. Данное свойство может быть использовано при проведении количественного анализа для определения наличия в смеси (растворе) двух компонентов, характеризующихся присутствием в спектрах нулевого порядка полос с близкими значениями  $\lambda_{\max}$  и вследствие этого не поддающихся обнаружению при непосредственном анализе оригинального спектра (рис. 4, *b*).

Следует также отметить, что дифференциальная спектроскопия является эффективным методом анализа при необходимости уменьшения влияния эффектов рассеяния на форму спектра, поскольку составляющая рассеяния (эффект Рэля для низкоразмерных частиц либо Тиндаля для более крупных) характеризуется широкой полосой в спектрах поглощения нулевого порядка, а значит, может быть эффективно подавлена за счет последовательного дифференцирования.

Кроме того, проблема количественного анализа не ограничивается лишь одним из рассмотренных эффектов, а представляет собой совокупность нескольких явлений, в том числе рассеяния, сдвига спектра вдоль оси ординат, обусловленного, например, сменой положения кюветы с исследуемым раствором, а также присутствия нежелательных широких полос поглощения в спектре. В качестве примера на рис. 4, *b* представлена слабо различимая в спектре нулевого порядка полоса поглощения на средней длине волны 700 нм, ширина на полувысоте которой составляет  $\approx 47$  нм. Матрица содержит полосу шириной 353 нм со средней длиной волны 250 нм.

Из рис. 4, *b* видно, что анализ спектров нулевого порядка практически не позволяет детектировать слабоинтенсивную полосу, в то время как на спектре второго порядка (рис. 4, *z*) ее присутствие представляется очевидным.

**Результаты исследования. Анализ характеристики затухания прототипа фильтра на основе композиционной структуры  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$ .** На рис. 5 схематически изображена композиционная наноструктура на основе наночастиц  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$  в виде полосно-заграждающего фильтра, характеристики которого были исследованы в процессе измерения спектров оптического поглощения. Характеристики затухания прототипов фильтра

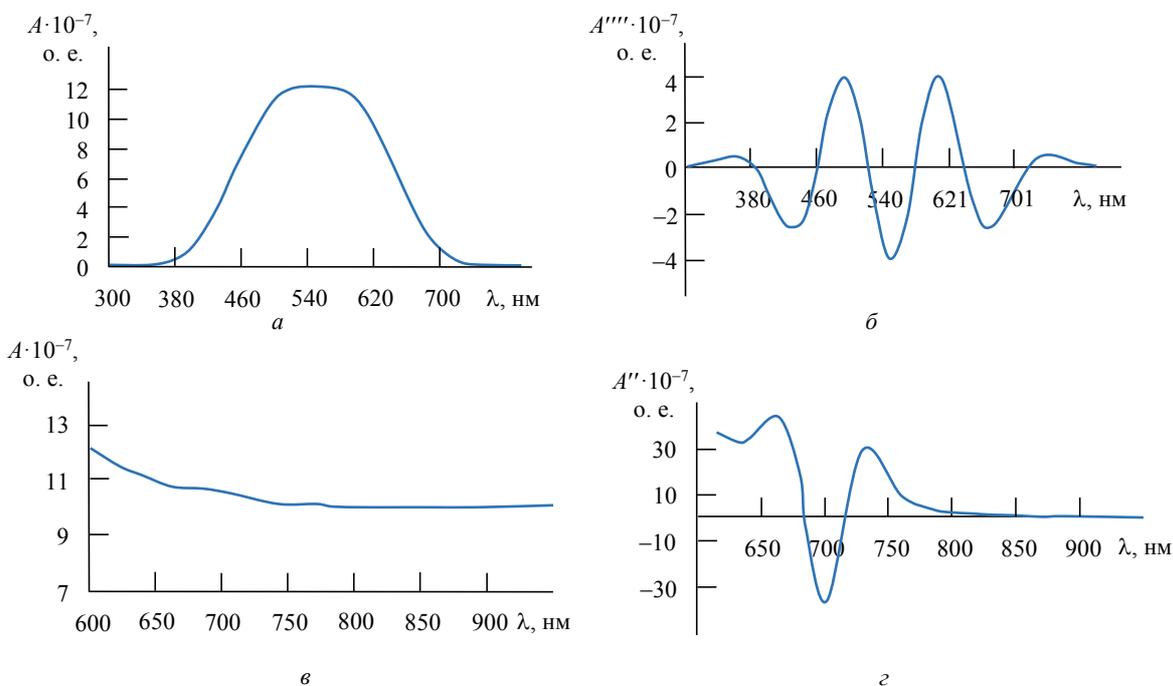


Рис. 4. Пример использования процедуры дифференцирования при обработке характеристик затухания: *a, b* – увеличение разрешающей способности; *v, z* – подавление паразитных эффектов матрицы

Fig. 4. An example of using a differentiation technique when processing the attenuation characteristics: *a, b* – increasing the resolution; *v, z* – suppression of parasitic effects of the matrix

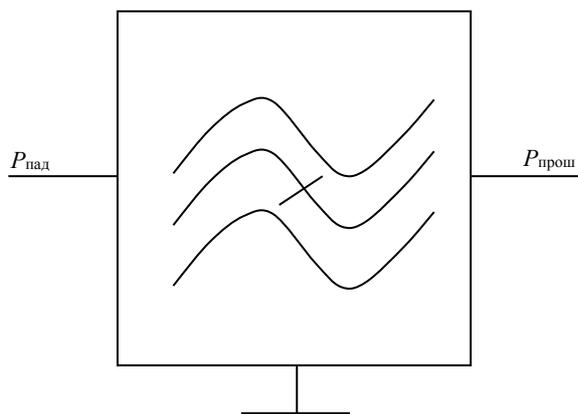


Рис 5. Схема прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе композиционной структуры  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$

Fig. 5 Block diagram of the prototype band-stop filter based on the  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$  composite structure

на основе коллоидного раствора композиционных наночастиц  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$   $A(\lambda) = P_{\text{пад}} / P_{\text{прош}}$ , где  $P_{\text{пад}}$  – интенсивность входного оптического сигнала, поступающего в прототип;  $P_{\text{прош}}$  – интенсивность выходного сигнала, прошедшего через прототип, были измерены методом электронно-абсорбционной спектроскопии.

Применение двойного дифференцирования позволило уточнить положение и параметры полос поглощения в характеристике затухания.

Ранее [18] было установлено, что наибольшая эффективность функционализации, которой соответствует самая высокая концентрация наночастиц  $\text{Fe}_m\text{O}_n$  на поверхности  $\text{SiO}_2$ , может быть достигнута использованием раствора тетраэтоксисилана в изопропиловом спирте с объемной долей TEOS 60 % на стадии золь-гель-процесса.

В результате анализа полученных данных методом дифференциальной спектроскопии по ранее описанной методике были обнаружены 6 характерных полос поглощения (рис. 6) в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах.

Природа обнаруженных полос поглощения связана с образованием на поверхности  $\text{SiO}_2$  матрицы наноструктур различных размеров [19]. Согласно теории Густава Ми постоянная поглощения  $K$  для частицы относительно поглощающей матрицы задается выражением

$$K(\omega) = \frac{2\omega}{c} k_0 + \frac{3\omega}{c} C_v \times \left\{ \begin{array}{l} k_0 \left[ \frac{(\epsilon_1 - a)(\epsilon_1 + 2a) + (\epsilon_1 - b)(\epsilon_1 + 2b)}{(\epsilon_1 + 2a)^2 + (\epsilon_2 + 2b)^2} \right] + \\ \left[ \frac{n_0(\epsilon_2 - b)(\epsilon_1 + 2a) - (\epsilon_1 - a)(\epsilon_2 + 2b)}{(\epsilon_1 + 2a)^2 + (\epsilon_2 + 2b)^2} \right] \end{array} \right\}, \quad (2)$$

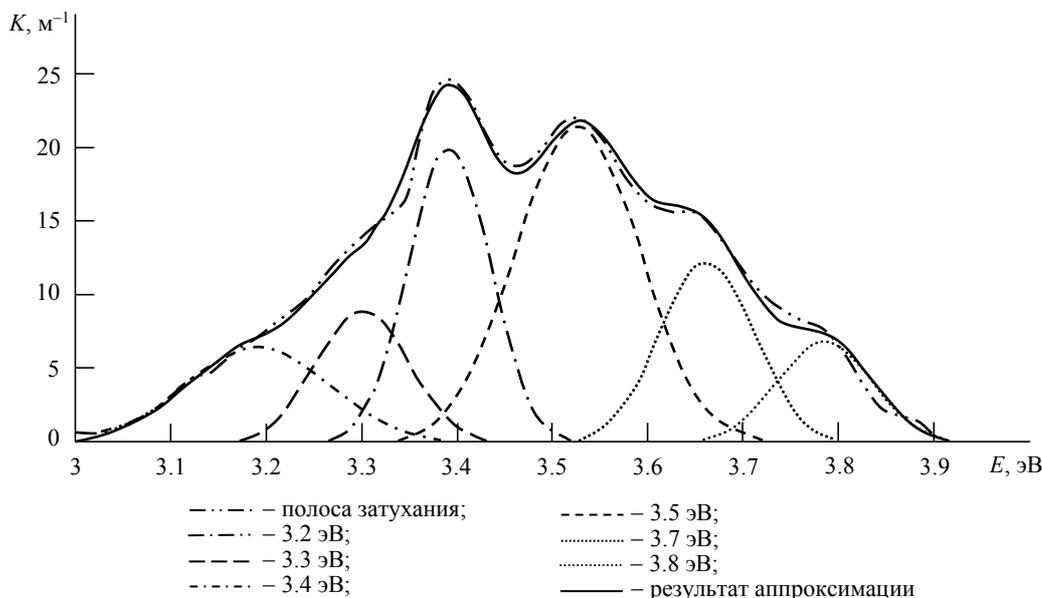


Рис. 6. Результат разложения характеристики затухания прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе композиционной структуры  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$  на гауссовские составляющие

Fig. 6. Decomposition of the prototype band-stop filter based on the  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$  composite structure attenuation characteristic to Gaussian components

$\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – вещественная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = (\varepsilon_1 + i\varepsilon_2)$  материала наночастицы соответственно;  $a$  и  $b$  – вещественная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости матрицы  $\varepsilon_{\text{matrix}} = a + ib = n_{\text{matrix}}^2 = (n_0 + ik_0)^2$ ;  $n_0$  и  $k_0$  – вещественная и мнимая части показателя преломления матрицы  $n_{\text{matrix}}$  соответственно;  $c$  – скорость света в вакууме;  $C_v$  – объемная концентрация наночастиц. Для непоглощающих матриц (2) упрощается до формулы Ми:

$$K(\omega) = \frac{9\pi n_0^3 C_v \omega}{c} \frac{\varepsilon_2}{(\varepsilon_1 + 2n_0^2)^2 + \varepsilon_2^2},$$

$\varepsilon_2(\omega)$  и  $K(\omega)$  сильно зависят от радиуса наночастицы  $R$  [22]. Частота максимума в полосе поглощения  $\omega_{\text{max}}$  задается значением  $\varepsilon_1(\omega_{\text{max}}) = -2n_0^2$  и, таким образом, выполняется

$$K_{\text{max}}(\omega) = \frac{9\pi n_0^3 C_v \omega_{\text{max}}}{c} \frac{1}{\varepsilon_2(\omega_{\text{max}})},$$

при этом значение  $\varepsilon_1(\omega)$  практически не зависит от  $R$ , следовательно, справедливо:

$$K_{\text{max}} \Gamma = AC_v = An \frac{4\pi}{3} R^3. \quad (3)$$

Расчет параметров полученного прототипа, в том числе характерных размеров агрегатов наночастиц магнетита, образованных на поверхности ксерогелевой матрицы (por-SiO<sub>2</sub>), был проведен согласно (3). Полученные значения размеров (радиусов) наночастиц магнетита, осажденных на поверхности матрицы SiO<sub>2</sub>, синтезированной с использованием тетраэтоксисилана в растворе с изопропиловым спиртом на стадии золь-гель-синтеза 60 % представлены в табл. 2.

Ширина полосы поглощения синтезированной наноструктуры, составляющая 61 нм, практически не меняется, что указывает на стабильность композиционного материала при сохранении размеров структур Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub> на поверхности SiO<sub>2</sub>-матрицы.

Уровень подавления в полосе поглощения композиционной структуры составляет около 15 дБ.

Табл. 2. Результаты расчета размеров наночастиц магнетита на основе математической обработки спектров оптического поглощения

Table 2. The results of magnetite nanoparticles size calculations according to the mathematical processing of optical absorption spectra

Положение средней длины волны полосы поглощения, эВ	Положение средней длины волны полосы поглощения, нм	Размер агломератов Fe <sub>m</sub> O <sub>n</sub> , рассчитанный по модели Г. Ми, нм
3.19	388	156
3.30	375	173
3.39	365	226
3.52	351	231
3.66	338	192
3.79	327	159

Данный параметр возможно увеличить посредством осаждения однородного наномассива частиц магнетита с минимальными отклонениями от рассчитанного по теории Ми размера на поверхности SiO<sub>2</sub>-матрицы. При этом максимально достижимыми являются значения подавления около 25...30 дБ, а существующие на сегодняшний день аналоги позволяют достигать значений подавления сигнала 10 дБ [16].

Неравномерность полосы поглощения синтезированного прототипа составляет ~ 1 дБ, что является его основным недостатком. Тем не менее, снижая степень агломерации наночастиц Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub> на этапе реакции соосаждения возможно регулировать данный параметр изменяя концентрации солей двух- и трехвалентного железа (Fe<sup>2+</sup> и Fe<sup>3+</sup>). Кроме того, для достижения указанной цели необходимо обеспечить равенство значений максимумов интенсивности подавления в каждой из отдельных полос, чего можно добиться созданием функционализированной SiO<sub>2</sub>-матрицы с равным количеством осажденных наночастиц Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub>, характеризующихся рассчитанными с использованием теории Ми требуемыми размерами.

Тем не менее из-за достаточно высоких показателей неоднородности пористой структуры матрицы SiO<sub>2</sub> (разброс значений диаметра пор от 5 до 50 нм [23, 24]) сохранится значительное неконтролируемое отклонение радиусов наночастиц Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub>, осаждаемых на поверхности SiO<sub>2</sub>-матрицы. Неоднородность структуры матрицы негативно сказывается на точности позиционирования средней

длины волны полосы поглощения, поскольку диаметр и морфология пор SiO<sub>2</sub> определяют размер и развитость агломератов наночастиц Fe<sub>m</sub>O<sub>n</sub> [19].

**Анализ характеристики затухания прототипа фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра.** Принцип действия предложенного в работе прототипа заграждающего фильтра на основе композиционной структуры ПК-Ag состоит в использовании явления локализованного поверхностного плазмонного резонанса для аттенюации электромагнитных сигналов определенной длины волны. При наличии отрицательных значений вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости на соответствующих частотах и превышении длиной волны поступающего электромагнитного излучения размеров наноструктуры более чем на порядок [25] происходит возбуждение локализованных поверхностных плазмонных мод в проводящих наноструктурах.

Согласно теории Друде для сферически симметричных наночастиц и решению задачи на собственные значения плазмонного резонанса [25] положение длины волны возбуждения плазмонного резонанса определяется характеристиками используемого материала (дисперсионной зависимостью) и геометрическими параметрами (морфологией) наночастиц. Из ряда теоретических исследований (см., например, [25]) известно, что

$$\sigma_{km}(\theta, \phi) = Y_{km}(\theta, \phi) \quad (m = -k, \dots, 0, \dots, k), \quad (4)$$

где  $\sigma_{km}(\theta, \phi)$  – собственные функции поверхностной плотности виртуальных электрических зарядов на границе наночастицы с вакуумом;  $Y_{km}(\theta, \phi)$  – сферические гармоники, удовлетворяющие соответствующему условию ортогональности [25];  $\theta, \phi$  – зенитный и азимутальный углы сферической системы координат соответственно. При этом

$$\lambda_k = 2k + 1, \quad (5)$$

где  $\lambda_k$  – собственные значения;  $k$  – натуральные числа. Из (5) следует, что возбуждение плазмонного резонанса для сферических наночастиц наблюдается при следующих значениях диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_k = -\varepsilon_0 \frac{k+1}{k}. \quad (6)$$

Согласно (5) собственные значения  $\lambda_k$  обладают "геометрической" кратностью  $(2k+1)$ , а следовательно, каждому значению  $\lambda_k$  соответствует  $(2k+1)$  линейно независимых собственных функций  $\sigma_{km}$  (4). Это вырождение обусловлено наличием геометрической симметрии сферических наночастиц и по сути является упрощенным вариантом общего случая, когда геометрическая симметрия наночастиц приводит к существованию множества собственных значений  $\lambda$  и резонансных значений вещественной части диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_k$  (6).

Согласно (5) и (6) для  $k=1$  и  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_0$  имеется 3 линейно независимые плазмонные моды, соответствующие собственным функциям  $\sigma_{1m}(\theta, \phi) = Y_{1m}(\theta, \phi)$ . Для данных плазмонных мод электрические поля однородны и взаимно ортогональны в сферически симметричных наночастицах. Именно эти плазмонные моды, характеризующиеся дипольными моментами, отличными от нуля, возбуждаются на длинах волн  $\approx 360$  нм для серебряных и  $\approx 500$  нм для золотых наночастиц соответственно [25]. Необходимо отметить, что (6) соответствует классической теории процесса поглощения электромагнитного излучения матрицами наночастиц Г. Ми [23].

На рис. 7 схематически изображена композиционная структура на основе локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра на поверхности пористого

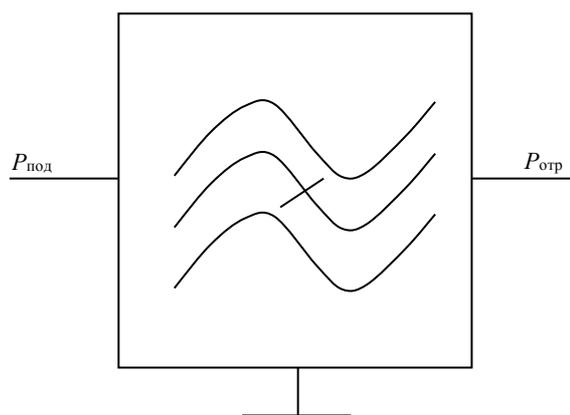


Рис. 7. Модельное представление композиционной структуры на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра в виде отражающего фильтра

Fig. 7. Schematic representation of the acquired composite structure based on plasmonic resonance in an array of silver nanoparticles in the form of a reflective band-stop filter

кремния в виде прототипа полосно-заграждающего фильтра. Спектры оптического поглощения были измерены методом электронно-абсорбционной спектроскопии.

В качестве основного свойства прототипа фильтра была рассмотрена характеристика затухания  $A(\lambda) = P_{\text{пад}} / P_{\text{отр}}$ .

На рис. 8 представлен снимок поверхности композиционной структуры на основе массива фрактальных наночастиц серебра, полученный методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). На снимке присутствуют фрактальные агрегаты наночастиц серебра протяженностью  $\approx 1500$  нм, а также различимы одиночные изолированные наночастицы, расположенные в структуре поверхности матрицы пористого кремния.

Структура поверхности пористого кремния и отвечающее ей распределение поверхностной энергии способствуют формированию разветвленных фрактальных агрегатов серебра в процессе функционализации. Изменение параметров синтеза (плотность тока анодирования, продолжительность анодирования) матрицы пористого кремния приводит к модификации характеристик образующихся пор, в том числе их глубины и разветвленности.

Из представленных на рис. 9 и 10 характеристик затухания прототипов на базе композиционных слоев функционализированного серебром пористого кремния, где в качестве параметра выступает плотность тока (рис. 9) и время (рис. 10) анодирования исходного кремния на этапе синтеза, видно, что наблюдается возбуждение плазмонного резонанса сразу на двух длинах волн – 367.5 и 265.5 нм (3.38 и 4.68 эВ соответственно). Согласно

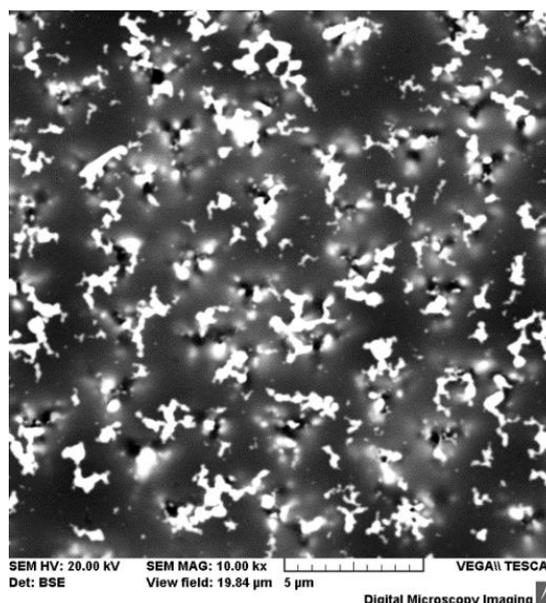


Рис. 8. Снимок РЭМ-композиционной структуры ПК-Ag (ток анодирования  $j = 15$  мА/см<sup>2</sup>, время анодирования  $t = 40$  мин)

Fig. 8. SEM image of the PS-Ag composite structure (anodizing current  $j = 15$  mA/cm<sup>2</sup>, anodizing time  $t = 40$  min)

приведенному в [25] решению задачи на собственные значения с целью получения конкретных значений отрицательной диэлектрической проницаемости для наноструктур соответствующего типа и при использовании дисперсионных соотношений для серебра полоса поглощения, характеризующаяся средней длиной волны  $\lambda_0 = 367.5$  нм (рис. 9 и 10), обусловлена возбуждением локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве сферических наночастиц серебра ( $D \approx 20$  нм). В то же время полоса, характеризующаяся средней длиной волны 265.5 нм (рис. 9 и 10), соответствует плазмонной моде квантовых

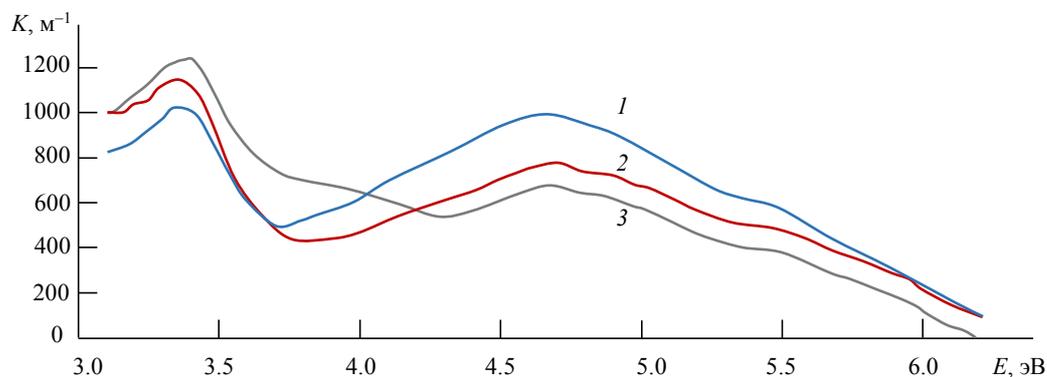


Рис. 9. Характеристики затухания прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра; время анодирования  $t = 10$  мин, плотность тока анодирования выступает в качестве параметра: 1 –  $j = 2$  мА/см<sup>2</sup>; 2 –  $j = 15$  мА/см<sup>2</sup>; 3 –  $j = 30$  мА/см<sup>2</sup>

Fig. 9. Characteristics of attenuation of the prototype band-stop filter based on plasmonic resonance in an array of silver nanoparticles; anodizing time  $t = 10$  min, anodizing current density acts as a parameter:

$$1 - j = 2 \text{ mA/cm}^2; 2 - j = 15 \text{ mA/cm}^2; 3 - j = 30 \text{ mA/cm}^2$$

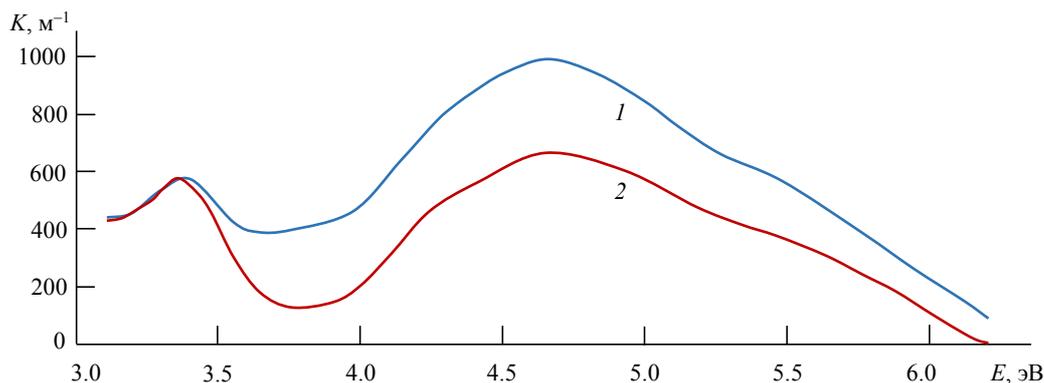


Рис. 10. Характеристики затухания прототипа полосно-заграждающего фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра; плотность тока анодирования  $j = 15 \text{ mA/cm}^2$ , время анодирования выступает в качестве параметра: 1 –  $t = 40$  мин, 2 –  $t = 10$  мин

Fig. 10. Characteristics of attenuation of the prototype band-stop filter based on plasmon resonance in an array of silver nanoparticles; anodizing current density  $j = 15 \text{ mA/cm}^2$ , anodizing time acts as a parameter: 1 –  $t = 40$  min, 2 –  $t = 10$  min

(квантово-размерных) кластеров серебра, т. е. структур, состоящих из небольшого числа атомов и по размеру занимающих промежуточное положение между молекулами и наночастицами [26, 27]. Так, спектры поглощения икосаэдрических кластеров, содержащих 147 атомов Ag, характеризуются наличием расположенного вблизи 4.65 эВ пика, существование которого обусловлено присутствием внутризонных переходов, а также их взаимодействием с локализованным поверхностным плазмонным резонансом [28]. Примерное значение диаметра  $D$  таких частиц, оцененное с использованием сферической модели [29], составляет 0.75 нм. Результат подтверждается проведенными авторами ранее исследованиями спектров комбинационного рассеяния функционализированных серебром слоев пористого кремния [30], в ходе которых также были получены данные о наличии на поверхности матрицы наночастиц Ag соответствующего размера.

При увеличении плотности тока анодирования от 2 до 30  $\text{mA/cm}^2$  подавление в полосе со средней длиной волны 367.5 нм растет, а в полосе с  $\lambda_0 = 265.5$  нм – снижается (на  $\approx 1.48$  дБ) (рис. 9). В свою очередь увеличение продолжительности травления исходной кремниевой матрицы приводит к росту подавления сигнала в полосе с  $\lambda_0 = 265.5$  нм (на  $\approx 1.44$  дБ) (рис. 10). Таким образом, увеличение плотности тока анодирования на этапе создания матрицы из пористого кремния, предположительно, приводит к формированию структуры поверхности пористого кремния, способствующей образованию регулярного массива наночастиц серебра, по форме близких к сферическим, в процессе функционализации.

Рассмотренный механизм позволяет за счет соответствующего изменения условий синтеза управлять интенсивностью поглощения в обеих полосах (367.5 и 265.5 нм) посредством создания плазмонных массивов наночастиц металлов, контролируемых как с точки зрения морфологии наночастиц, так и периода самого массива.

Необходимо отметить, что для целей реализации оптических фильтров достигнутый уровень подавления в полосе (примерно 3 дБ) не может считаться достаточным, однако реализованная технология позволяет синтезировать регулярные плазмонные массивы наночастиц серебра, характеризующиеся сниженным разбросом по размерам отдельных элементов и менее выраженной фрактальностью агрегатов при использовании более высокой плотности тока анодирования исходной кремниевой матрицы. Кроме того, применение разработанной технологии привело к существенному сужению полосы поглощения (до значений ширины на полувысоте  $\Delta\lambda \approx 90$  нм) по сравнению с существующими прототипами плазмонных фильтров электромагнитных сигналов ( $\Delta\lambda \approx 130$  нм) [31].

Модификация условий синтеза матрицы пористого кремния позволяет создавать на ее поверхности характеризующиеся необходимыми параметрами с точки зрения форм, морфологий и используемых материалов плазмонные наномассивы, обеспечивая значительный уровень подавления входного сигнала на длинах волн от 200 до 1600 нм [25], позволяя тем самым регулировать среднюю длину волны в полосе подавления заграждающего фильтра ( $\lambda_0$ ) в широком спектральном диапазоне.

**Заключение.** Разработан прототип полосно-заграждающего фильтра на основе функционализированной магнитными наночастицами  $\text{Fe}_m\text{O}_n$  ксерогелевой матрицы  $\text{SiO}_2$ . Анализ результатов исследования полученного композиционного материала методом спектроскопии оптического поглощения позволяет связать природу обнаруженных в спектре поглощения прототипа полос с образованием на поверхности пористой матрицы  $\text{SiO}_2$  наночастиц  $\text{Fe}_m\text{O}_n$  шести характерных размеров, количественная оценка которых была произведена с использованием теории Г. Ми. Разработанный прототип заграждающего фильтра на основе  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$  обладает рядом недостатков, в том числе недостаточной точностью задания средней длины волны, а также трудоемкостью уменьшения неравномерности в полосе поглощения.

Реализован прототип полосно-заграждающего фильтра на основе локализованного поверхностного плазмонного резонанса в композиционных наноструктурированных слоях ПК-Ag, характеристики затухания которого исследованы методом электронной абсорбционной спектроскопии. Прототип характеризуется наличием двух полос

поглощения, расположенных на средних длинах волн 367.5 и 265.5 нм. Существование полосы на  $\lambda_0 = 367.5$  нм обусловлено эффектом локализованного поверхностного плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра, по форме близких к сферическим. Возбуждение плазмонов в квантовых кластерах серебра приводит к появлению полосы поглощения на  $\lambda_0 = 265.5$  нм. Несмотря на то, что уже на текущий момент разработанный прототип плазмонного фильтра сравним, а по ряду характеристик превосходит как современные интерференционные фильтры (по диапазону допустимых значений средней длины волны), так и аналоги среди существующих плазмонных фильтров (ширина полосы поглощения), необходимы дальнейшие исследования в области совершенствования и создания новых технологий изготовления подложек из пористого кремния и их функционализации. Они позволят синтезировать однородные монодисперсные массивы наночастиц на поверхности, способствуя, таким образом, дальнейшему улучшению характеристик приборов, в том числе снижению неравномерности в полосе поглощения.

#### Авторский вклад

**Смердов Ростислав Сергеевич** – измерения оптических спектров (характеристик затухания), анализ и интерпретация данных.

**Спивак Юлия Михайловна** – методология исследования, синтез прототипов, SEM-измерения.

**Мошников Вячеслав Алексеевич** – постановка научной проблемы, общие указания по математическому обеспечению задачи, обсуждение результатов.

**Мустафаев Александр Сеит-Умерович** – постановка научной проблемы, общие указания, обсуждение результатов.

#### Author's contribution

**Rostislav S. Smerdov**, optical spectra (attenuation characteristics) measurements, data analysis and interpretation.

**Yulia M. Spivak**, methodology of investigation, synthesis of the prototypes, SEM measurements.

**Vyacheslav A. Moshnikov**, statement of a scientific problem, general guidance on the mathematical support of the problem, discussion of the results.

**Alexander S. Mustafaev**, statement of a scientific problem, general guidance, discussion of results.

#### Список литературы

1. Porous Silicon as a Nanomaterial for Disperse Transport Systems of Targeted Drug Delivery to the Inner Ear / Yu. M. Spivak, A. O. Belorus, A. A. Panevin, S. G. Zhuravskii, V. A. Moshnikov, K. Bespalova, P. A. Somov, Yu. M. Zhukov, A. S. Komolov, L. V. Chistyakova, N. Yu. Grigor'eva // *Technical Physics*. 2018. Vol. 63. P. 1352–1360. doi: 10.1134/S1063784218090207

2. The Multisensor Array Based on Grown-On-Chip Zinc Oxide Nanorod Network for Selective Discrimination of Al-

cohol Vapors at Sub-ppm Range / A. Bobkov, A. Varezchnikov, I. Plugin, F. S. Fedorov, V. Trouillet, U. Geckle, M. Sommer, V. Goffman, V. Moshnikov, V. Sysoev // *Sensors*. 2019. Vol. 19, № 19. P. 1–13. doi: 10.3390/s19194265

3. Bobkov A. A., Nalimova S. S., Moshnikov V. A. Fractal structure and electrical properties of percolation sensor layers // *Smart Nanocomposites*. 2016. Vol. 6, iss. 2. P. 264–265.

4. Porous silicon as efficient surface enhanced Raman scattering (SERS) substrate / F. Giorgis, E. Descrovi,

- A. Chiodoni, E. Froner, M. Scarpa, A. Venturello, F. Geobaldo // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 254. P. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029
5. Лапшин Б. А. Оптические гетероструктуры. Новая теория и расчет. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.
6. Chmilenko F., Rastvorova I. Improvement of quality of aluminum ingots at electromagnetic processing // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 1118. P. 1–5. doi: 10.1088/1742-6596/1118/1/012030
7. Denisova O., Rastvorova I. Carbon Materials for Immobilization of Biologically Active Substances // *Engineering Materials*. 2020. Vol. 836. P. 52–57. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.836.52
8. Micromechanics, Nanophysics And Non-Destructive Testing Of The Strength Of Structural Materials / V. Nosov, I. Chaplin, E. Gilyazetdinov, E. Grigoriev, I. Pavlenko // *Mater. Phys. Mech.* 2019. Vol. 42. P. 808–824. doi: 10.18720/MPM.4262019\_13
9. Shpenst V. A. Investigation of the State Of Materials of Power Lines by Multispectral Optical-Electronic Devices // *Iop Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 378. P. 1–5. doi: 10.1088/1755-1315/378/1/012072
10. Shpenst V. A. Complexation of Telecommunications and Electrical Systems in Mines and Underground Facilities // *J. Min. Inst.* 2019. Vol. 235. P. 78–87. doi: 10/31897/PML.2019.1.78
11. Multilevel Model of Time Dependences of Acoustic Emission Parameters as The Basis for Nanodiagnosics of The State of Technical Objects / V. V. Nosov, A. P. Artyushchenko, S. A. Peretyatko, E. D. Khokhlova // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1582. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/1582/1/012067
12. Fabrication of oxide heterostructures for promising solar cells of a new generation / A. A. Bobkov, N. A. Lashkova, A. I. Maximov, V. A. Moshnikov, S. S. Nalimova // *Semiconductors*. 2017. Vol. 51, iss. 1. P. 61–65. doi: 10.1134/S1063782617010031
13. Nano-size effects in graphite/graphene structure exposed to cesium vapor / A. S. Mustafaev, V. I. Yarygin, V. S. Soukhomlinov, A. B. Tsyganov, I. D. Kaganovich // *J. of Applied Physics*. 2018. Vol. 124, iss. 12. P. 1–10. doi: 10.1063/1.5037028
14. Rhombic silver nanoparticles array-based plasmonic filter / Y. Q. Fu, S. L. Zhu, X. L. Zhou, W. Zhao // *Intern. J. of Modern Physics B*. 2011. Vol. 25. P. 2557–2566. doi: 10.1142/S021797921101168
15. A tunable optical filter / J. Philip, T. Jaykumar, P. Kalyanasundaram, B. Raj // *Measurement Science and Technology*. 2003. Vol. 14, iss. 8. P. 1289–1294. doi: 10.1088/0957-0233/14/8/314
16. Tunable magneto-optical wavelength filter of long-period fiber grating with magnetic fluids / T. Liu, X. Chen, Z. Di, J. Zhang, X. Li, J. Chen // *Applied Physics Lett.* 2007. Vol. 91, iss. 12. P. 1–3. doi: 10.1063/1.2787970
17. Gareev K. G., Nepomnyashchaya E. K. Obtaining and Characterizing a Water-Based Magnetic Fluid // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2019. Vol. 83, iss. 7. P. 904–905. doi: 10.3103/S1062873819070177
18. Spectroscopic Properties of  $\gamma$ -irradiated  $\text{Fe}_m\text{O}_n\text{-SiO}_2$  Composite Nanoparticles / R. S. Smerdov, T. V. Bocharova, V. S. Levitskii, E. I. Terukov, K. G. Gareev, V. A. Moshnikov // *Physics of the Solid State*. 2016. Vol. 58, iss. 5. P. 919–923. doi: 10.1134/S1063783416050243
19. UV-Vis Band-Stop Filter Based on Plasmon Resonance for Fluorescent Microscopic Applications / R. Smerdov, V. Loboda, Y. Spivak, V. Moshnikov // *St Petersburg State Polytechnical University J. Computer Science. Telecommunications and Control Systems*. 2016. Vol. 247, iss. 3. P. 13–22. doi: 10.5862/jcstcs.247.2
20. Unno H., Imai K., Muramoto S. Dissolution Reaction Effect on Porous-Silicon Density // *J. of the Electrochemical Society*. 1987. Vol. 243, iss. 24. P. 358–362.
21. Levy P. The Kinetics of Gamma-Ray Induced Coloring of Glass // *J. of the American Ceramic Society*. 2006. Vol. 43, № 8. P. 389–395. doi: 10.1111/j.1151-2916.1960.tb13680.x
22. Kreibig U. Small Silver Particles in Photosensitive Glass: Their Nucleation and Growth // *Appl. Phys.* 1976. Vol. 10, № 3. P. 255–264.
23. Gareev K. G., Luchinin V. V., Moshnikov V. A. Magnetic Nanomaterials Obtained by Chemical Methods // *Biotechnosfera*. 2013. № 5 (29). P. 2–13.
24. Nepomnyashchaya E., Aksenov E., Velichko E. Molecular Dynamics as Studied by Laser Correlation Spectroscopy // *Proc. of 38<sup>th</sup> Progress in Electromagnetics Research Symp., St Petersburg, SPbGU, St Petersburg*, 2017. P. 3556–3562. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262375
25. Mayergoyz I. D. Plasmon Resonances in Nanoparticles. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd., 2013. Vol. 6. 325 p.
26. Bernard S., Kutter J. P., Mogensen K. B. Plasmon enhanced silver quantum cluster fluorescence for biochemical applications // *TechConnect Briefs*. 2014. Vol. 2. P. 443–446.
27. Rabilloud F. Description of plasmon-like band in silver clusters: The importance of the long-range Hartree-Fock exchange in time-dependent density-functional theory simulations // *The J. of Chemical Physics*. 2014. Vol. 141, iss. 14. P. 1–9. doi: 10.1063/1.4897260
28. Weissker H., Lopez-Lozano X. Surface plasmons in quantum-sized noble-metal clusters: TDDFT quantum calculations and the classical picture of charge oscillations // *Phys. Chemistry Chem. Phys.* 2015. Vol. 17, iss. 42. P. 28379–28386. doi: 10.1039/C5CP01177A
29. Mori T., Hegmann T. Determining the composition of gold nanoparticles: a compilation of shapes, sizes, and calculations using geometric considerations // *J. of Nanoparticle Research*. 2016. Vol. 18, iss. 10. P. 1–36. doi: 10.1007/s11051-016-3587-7
30. The characterisation of nanostructured porous silicon/silver layers via Raman spectroscopy / R. S. Smerdov, Y. M. Spivak (Kanageeva), V. S. Levitsky, V. A. Moshnikov // *J. of Physics Conf. Series*. 2018. Vol. 1038. P. 1–4. doi: 10.1088/1742-6596/1038/1/012064
31. Optically tunable plasmonic color filters / Y. J. Liu, G. Y. Si, E. S. P. Leong, B. Wang, A. J. Danner, X. C. Yuan, J. H. Teng // *Applied Physics A*. 2012. Vol. 107, iss. 1. P. 49–54. doi: 10.1007/s00339-011-6736-y

## Информация об авторах

**Смердов Ростислав Сергеевич** – соискатель ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий", Санкт-Петербургский горный университет. Автор более 30 научных работ, в том числе 14 работ, индексируемых в международных базах данных Scopus и WoS (1 в журнале Q2). Сфера научных интересов – наноэлектроника, эмиссия электронов и механизмы взаимодействия света с веществом.

Адрес: Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

E-mail: rostofan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8648-5712>

**Спивак Юлия Михайловна** – к. ф.-м. н. (2009), доцент (2015), доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 170 научных работ. Сфера научных интересов – характеристика наноматериалов, тераностика, тонкопленочные нанотехнологии.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

**Мошников Вячеслав Алексеевич** – д. ф.-м. н. (1997), профессор (1999), зам. заведующего кафедрой микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 450 научных работ. Сфера научных интересов – нанотехнология и диагностика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

**Мустафаев Александр Сеит-Умерович** – д. ф.-м. н. (2004), профессор (2006), заведующий кафедрой общей и технической физики Санкт-Петербургского горного университета, член Американского Физического общества, действительный член Международной АН экологии, безопасности человека и природы. Автор более 160 научных публикаций. Сфера научных интересов – плазменная энергетика и новые разработки по плазменным нанотехнологиям.

Адрес: Санкт-Петербургский горный университет, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия

E-mail: alexmustafaev@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2554-8526>

## References

1. Spivak Yu. M., Belorus A. O., Panevin A. A., Zhuravskii S. G., Moshnikov V. A., Bepalova K., Somov P. A., Zhukov Yu. M., Komolov A. S., Chistyakova L. V., Grigor'eva N. Yu. Porous Silicon as a Nanomaterial for Disperse Transport Systems of Targeted Drug Delivery to the Inner Ear. *Technical Physics*. 2018, vol. 63, pp. 1352–1360. doi: 10.1134/S1063784218090207

2. Bobkov A., Varezhnikov A., Plugin I., Fedorov F. S., Trouillet V., Geckle U., Sommer M., Goffman V., Moshnikov V., Sysoev V. The Multisensor Array Based on Grown-On-Chip Zinc Oxide Nanorod Network for Selective Discrimination of Alcohol Vapors at Sub-ppm Range. *Sensors*. 2019, vol. 19, no. 19, pp. 1–13. doi: 10.3390/s19194265

3. Bobkov A. A., Nalimova S. S., Moshnikov V. A. Fractal structure and electrical properties of percolation sensor layers. *Smart Nanocomposites*. 2016, vol. 6, iss. 2, pp. 264–265.

4. Giorgis F., Descrovi E., Chiodoni A., Froner E., Scarpa M., Venturello A., Geobaldo F. Porous silicon as efficient surface enhanced Raman scattering (SERS) substrate. *Applied Surface Science*. 2008, vol. 254, pp. 7494–7497. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.029

5. Lapshin B. A. *Opticheskie geterostruktury. Novaya teoriya i raschet [Optical heterostructures. New theory and calculation]*. SPb, BKhV-Peterburg, 2012, 480 p. (In Russ.)

6. Chmilenko F., Rastvorova I. Improvement of Quality of Aluminum Ingots At Electromagnetic Processing. *J. Phys. Conf. Ser.* 2018, vol. 1118, pp. 012030-1–012030-5. doi:10.1088/1742-6596/1118/1/012030

7. Denisova O., Rastvorova I. Carbon Materials for Immobilization of Biologically Active Substances. *Key Eng. Mater.* 2020, vol. 836, pp. 52–57. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.836.52

8. Nosov V., Chaplin I., Gilyazetdinov E., Grigoriev E., Pavlenko I. Micromechanics, Nanophysics And Non-Destructive Testing Of The Strength Of Structural Materials. *Mater. Phys. Mech.* 2019, vol. 42, pp. 808–824. doi:10.18720/MPM.4262019\_13
9. Shpenst V. Investigation of The State Of Materials of Power Lines By Multispectral Optical-Electronic Devices. *Iop Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019, vol. 378, pp. 1–5. doi. 10.1088/1755-1315/378/1/012072
10. Shpenst V. Complexation of Telecommunications And Electrical Systems In Mines And Underground Facilities. *J. Min. Inst.* 2019, vol. 235, pp. 78–87. 10/31897/PMI.2019.1.78
11. Nosov V., Artyushchenko A., Peretyatko S., Khokhlova E. Multilevel Model of Time Dependences of Acoustic Emission Parameters As The Basis For Nanodiagnosics of The State Of Technical Objects. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020, vol. 1582. pp. 1–6. doi:10.1088/1742-6596/1582/1/012067
12. Bobkov A. A., Lashkova N. A., Maximov A. I., Moshnikov V. A., Nalimova S. S. Fabrication of oxide heterostructures for promising solar cells of a new generation. *Semiconductors.* 2017, vol. 51, no. 1, pp. 61–65. doi: 10.1134/S1063782617010031
13. Mustafaev A. S., Soukhomlinov V. S., Yarygin V. I., Tsyganov A. B., Kaganovich I. D. Nano-size effects in graphite/graphene structure exposed to cesium vapor. *J. of Applied Physics.* 2018, vol. 124, no. 12, pp. 1–10. doi: 10.1063/1.5037028
14. Fu Y. Q., Zhu S. L., Zhou X. L., Zhao W. Rhombic silver nanoparticles array-based plasmonic filter. *Intern. J. of Modern Physics B.* 2011, vol. 25, pp. 2557–2566. doi: 10.1142/S0217979211101168
15. Philip J., Jaykumar T., Kalyanasundaram P., Raj B. A tunable optical filter. *Measurement Science And Technology.* 2003, vol. 14, pp 1289–1294. doi: 10.1088/0957-0233/14/8/314
16. Liu T., Chen X., Di Z., Zhang J., Li X., Chen J. Tunable magneto-optical wavelength filter of long-period fiber grating with magnetic fluids. *Applied Physics Lett.* 2007, vol. 91, pp. 1–3. doi: 10.1063/1.2787970
17. Gareev K. G., Nepomnyashchaya E. K. Obtaining and Characterizing a Water-Based Magnetic Fluid. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2019, vol. 83, no. 7, pp. 904–905. doi. 10.3103/S1062873819070177
18. Smerdov R. S., Bocharova T. V., Levitskii V. S., Terukov E. I., Gareev K. G., Moshnikov V. A. Spectroscopic Properties of  $\gamma$ -irradiated FemOn–SiO<sub>2</sub> Composite Nanoparticles. *Physics of the Solid State.* 2016, vol. 58, no. 5, pp. 919–923.
19. Smerdov R., Loboda V., Spivak Y., Moshnikov V. UV-Vis Band-Stop Filter Based on Plasmon Resonance for Fluorescent Microscopic Applications. *St Petersburg State Polytechnical University J. Computer Science. Telecommunications and Control Systems.* 2016, vol. 247, no. 3, pp. 13–22. doi: 10.5862/jcstcs.247.2
20. Unno H., Imai K., Muramoto S. Dissolution Reaction Effect on Porous-Silicon Density. *J. of the Electrochemical Society.* 1987, vol. 243, no. 24, pp. 358–362. doi: 10.1149/1.2100524
21. Levy P. The Kinetics of Gamma-Ray Induced Coloring of Glass. *J. of The American Ceramic Society.* 2006, vol. 43, no. 8, pp. 389–395. doi: 10.1111/j.1151-2916.1960.tb13680.x
22. Kreibig U. Small Silver Particles in Photosensitive Glass: Their Nucleation and Growth. *Appl. Phys.* 1976, vol. 10, no. 5, pp. 255–264. doi: 10.1007/BF00897225
23. Gareev K. G., Luchinin V. V., Moshnikov V. A. Magnetic Nanomaterials Obtained by Chemical Methods. *Biotechnosfera [Biotechnosphere].* 2013, no. 5 (29), pp. 2–13. (In Russ.)
24. Nepomnyashchaya E., Aksenov E., Velichko E. Molecular Dynamics as Studied by Laser Correlation Spectroscopy. *Proc. of 38<sup>th</sup> Progress in Electromagnetics Research Symp. St Petersburg, 22–25 May 2017. St Petersburg State University, 2017, pp. 3556–3562. doi: 10.1109/PIERS.2017.8262375*
25. Mayergoyz I. D. Plasmon Resonances in Nanoparticles. Singapore, World Scientific Publishing Co Pte. Ltd., 2013, vol. 6, 325 p.
26. Bernard S., Kutter J. P., Mogensen K. B. Plasmon enhanced silver quantum cluster fluorescence for biochemical applications. *TechConnect Briefs.* 2014, vol. 2, pp. 443–446.
27. Rabilloud F. Description of plasmon-like band in silver clusters: The importance of the long-range Hartree-Fock exchange in time-dependent density-functional theory simulations. *The J. of Chemical Physics.* 2014, vol. 141, pp. 1–9. doi: 10.1063/1.4897260
28. Weissker H., Lopez Lozano X. Surface plasmons in quantum-sized noble-metal clusters: TDDFT quantum calculations and the classical picture of charge oscillations. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015, vol. 17, pp. 28379–28386. doi: 10.1039/C5CP01177A
29. Mori T., Hegmann T. Determining the composition of gold nanoparticles: a compilation of shapes, sizes, and calculations using geometric considerations. *J. of Nanoparticle Research.* 2016, vol. 18, pp. 1–36. doi: 10.1007/s11051-016-3587-7
30. Smerdov R. S., Spivak Y. M., Levitsky V. S., Moshnikov V. A. The characterisation of nanostructured porous silicon/silver layers via Raman spectroscopy. *J. of Physics Conference Series.* 2018, vol. 1038, pp. 1–4. doi: 10.1088/1742-6596/1038/1/012064
31. Liu Y. J., Si G. Y., Leong E. S. P. Optically tunable plasmonic color filters. *Applied Physics A.* 2012, vol. 107, pp. 49–54. doi: 10.1007/s00339-011-6736-y

### Information about the authors

**Rostislav S. Smerdov**, Applicant for the degree of Cand. Sci. (Eng.) in the specialty 05.11.13 Instruments and methods for monitoring the natural environment, substances, materials and products, St. Petersburg Mining University. The author of more than 30 scientific publications including 14 papers indexed in the international databases Scopus and WoS (1 paper in Q2 journal). Area of expertise: nanoelectronics, electron emission and interaction of light with matter.

Address: Saint Petersburg Mining University, 2, 21 Line St., St Petersburg 199106, Russia

E-mail: rostofan@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8648-5712>

**Yulia M. Spivak**, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2009), Assistant professor (2015), assistant professor at the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 170 scientific publications. Area of expertise: characterization of nanomaterials, theranostics, thin-film nanotechnology.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: ymkanageeva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5852-999X>

**Vyacheslav A. Moshnikov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (1997), professor (1999), Deputy Head of the Micro- and Nanoelectronics Department of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 450 scientific publications. Area of expertise: nanotechnology and diagnostics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov St., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

**Alexander S. Mustafaev**, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (2004), Head of the General and Applied Physics Department of Saint Petersburg Mining University, Member of the American Physical Society. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: plasma energy and new developments in plasma nanotechnology.

Address: Saint Petersburg Mining University, 2, 21 Line St., St Petersburg 199106, Russia

E-mail: alexmustafaev@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2554-8526>

---