

УДК 535.338.32

**Н.М. Белозерова^{1,2}, Д.А. Кислов¹, И.Д. Медведев¹,
И.Н. Крупатин³, И.А. Завидовский¹, А.В. Сюй¹, А.С. Шалин¹,
А.А. Вишневыи¹, А.В. Арсенин¹, А.Д. Большаков¹, С.М. Новиков¹**

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Российская Федерация

²Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Российская Федерация

³Сколковский Институт науки и технологии (Сколтех), ЦКП «Визуализация высокого разрешения», Территория инновационного центра «Сколково», Москва, Российская Федерация

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА ОТ КРЕМНИЕВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ МИ-ВОЙДОВ

Влияние резонансов типа Ми на оптические процессы рассеяния является одним из ключевых аспектов в нанофотонике. Настоящая работа посвящена исследованию комбинационного рассеяния света от кремниевых резонансных Ми-войдов. Экспериментально показано усиление сигнала комбинационного рассеяния, связанное с наличием мультипольных резонансов в этих структурах. Результаты демонстрируют зависимость оптических характеристик от геометрии образцов и подтверждают потенциал применения Ми-войдов в современных нанофотонных устройствах. Результаты численного моделирования, выполненного методом конечных элементов, хорошо согласуются с экспериментальными спектрами отражения, а также помогает понять распределение электромагнитных полей внутри нанополостей. Данное исследование открывает новые возможности для практического использования этих наноструктур в спектроскопии комбинационного рассеяния и разработке высокоточных оптических устройств.

Ключевые слова: Ми-резонансы, метаповерхность, спектры отражения, комбинационное рассеяние света, усиление электромагнитного поля.

**N.M. Belozerova^{1,2}, D.A. Kislov¹, I.D. Medvedev¹, I.N. Krupatin³,
I.A. Zavidovsky¹, A.V. Suy¹, A.S. Shalin¹, A.A. Vishnevyy¹,
A.V. Arsenin¹, A.D. Bolshakov¹, S.M. Novikov¹**

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Russian Federation

²Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (JINR),
Dubna, Russian Federation

³Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), High-Resolution
Visualization Facility, Skolkovo Innovation Center, Moscow, Russian Federation

RAMAN SCATTERING FROM SILICON RESONANT MIE-VOIDS

The influence of Mie resonances on optical scattering processes is one of the key aspects in nanophotonics. This work is devoted to the study of Raman scattering from silicon resonant Mievoids. The enhancement of the Raman scattering signal associated with the presence of multipole resonances in these structures is experimentally shown. The results demonstrate the dependence of the optical characteristics on the geometry of the samples and confirm the potential of using Mievoids in modern nanophotonic devices. The results of numerical simulation performed by the finite element method are in good agreement with the experimental reflectance spectra and help to understand the distribution of electromagnetic fields inside the nanocavities. This study opens up new possibilities for the practical use of these nanostructures in Raman spectroscopy and the development of high-precision optical devices.

Keywords: Mie resonances, metasurface, reflection spectra, Raman scattering, electromagnetic field amplification.

Введение

Возможность манипулирования оптическим откликом на наноразмерном уровне позволяет разработать новые эффективные многофункциональные оптические компоненты. Предыдущие исследования охватили широкий спектр оптических процессов, определяемых взаимосвязью между оптическими и морфологическими свойствами материалов, таких как проявление плазмонных мод в нанокольцах [1], Ми-резонансы в диэлектрических наносферах [2] и анапольные состояния в кремниевых дисках [3]. Экспериментальные исследования выявили фотокаталитические свойства наночастиц Au/TiO₂ [4], структурную зависимость оптического поглощения световодных волокон на основе нанопористых стекол [5], а также показали возможность реализации платформы для оптического секвенирования ДНК на основе чипа с флуоресцентно-активными наноклодами [6]. В последние годы особый интерес вызвали резонансные нанопустоты [7–9], такие как кремниевые Ми-войды [10],

благодаря уникальным оптическим свойствам которых появляется возможность управлять светом на наномасштабах. Кремниевые Ми-войды [10] предоставляют широкие возможности для разработки новых устройств нанофотоники, поскольку они обладают высоким показателем преломления, малым поглощением в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также способностью к поддержанию мультипольных резонансных режимов. Возможные способы применения резонансных Ми-войдов в кремнии охватывают широкий спектр высокотехнологичных направлений, таких как создание сверхкомпактных элементов для сенсоров [11], метаматериалов [12], а также компонентов для интегрированных фотонных схем. Благодаря высокой чувствительности [10, 11] резонансных нановойдов к изменениям внешних условий такие структуры могут быть использованы в сенсорных системах, способных детектировать очень слабые изменения в окружающей среде. Ми-войды, созданные в кремнии или других диэлектриках, могут избирательно отражать или пропускать свет определённых длин волн, формируя яркие и насыщенные цвета, управляя резонансами и их взаимодействием с падающим светом [10]. Каждую структуру можно спроектировать, изменяя радиус, форму или глубину, чтобы поддерживать определённые резонансные частоты, отвечающие за отражение или пропускание света определённого цвета. Важно отметить, что перспективы применения резонансных метаповерхностей выходят за рамки простой цветопередачи и также включают нелинейные эффекты, связанные с взаимодействием излучения с сильными полями. Метаповерхности на основе резонансных Ми-войдов представляют собой интересный объект для спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Ми-войды на подложках высокорелативных материалов могут поддерживать различные мультипольные резонансы, обеспечивая усиление электромагнитного поля внутри нанополости, что может также служить фактором усиления сигнала КР. В данной работе мы исследуем влияние резонансов, реализованных в Ми-войдах, на комбинационное рассеяние света.

Экспериментальная часть

Изготовление и характеристика образцов. Массивы Ми-войдов, с фиксированной глубиной 400 нм и тремя различными радиусами (250, 350 и 450 нм) были изготовлены с использованием двулучевого сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Thermo Scientific Helios G4

PFIB uXe. Подложки с образцами, представляющими собой пластины монокристаллического кремния, были закреплены с помощью, проводящей углеродной двухсторонней клейкой ленты на штатные столики-держатели. Столики-держатели с образцами были помещены в камеру микроскопа под вакуум ($1,5 \times 10^{-3}$ Па). Травление осуществлялось ионами ксенона с использованием стандартных паттернов при токе ионного пучка 10 пА и ускоряющем напряжении 30 кВ. Контроль размеров изготовленных структур был выполнен с помощью электронной колонны двухлучевого электронного микроскопа с током пучка 0,4 нА и ускоряющим напряжением 5 кВ в режиме детектирования вторичных электронов. СЭМ-изображения изготовленных Ми-войдов демонстрируют высокое качество изготовления, сочетающее как однородное пространственное распределение нанополостей, так и низкую дисперсию их размеров (рис. 1).

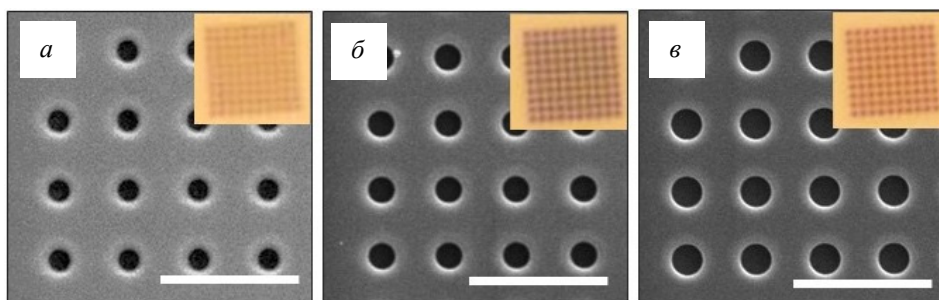


Рис. 1. Изображения Ми-войдов с радиусами (а) 250 нм; (б) 350 нм; (в) 450 нм, полученные на сканирующем электронном микроскопе; величина размерной метки 5 мкм; во вставках представлены оптические изображения соответствующих образцов (объектив $\times 10$)

На вставках представлены оптические изображения Ми-войдов в белом свете, демонстрирующие возможность получения ярких цветов при помощи формирования массивов нанополостей. Данные цвета являются результатом локализованных резонансных мод, возбуждаемых в полостях. Получаемые цветовая гамма зависит от геометрии образца и может существенно варьироваться с изменением глубины и диаметра нанополости [10]. Полученные массивы были охарактеризованы с использованием спектроскопии отражения.

Линейная спектроскопия. Спектры отражения измерялись с помощью оптического микроскопа Soptor RX50M, оснащенного галогенным источником света [13]. Соединение со спектрометром Optosky

осуществлялось с помощью оптического волокна Thorlabs. Пропускаемый свет собирался с использованием объектива "N-Achroplan" $\times 100$ с числовой апертурой 0,9. Экспериментальные спектры отражения, полученные с массивов Ми-войдов различного размера (рис. 2, *a*), демонстрируют широкий резонанс в окрестностях 520 нм. Положение данного резонанса не претерпевает изменений при вариации размеров нанополостей. В то же время, можно отметить, что увеличение радиуса полости приводит к увеличению интенсивности поглощения.

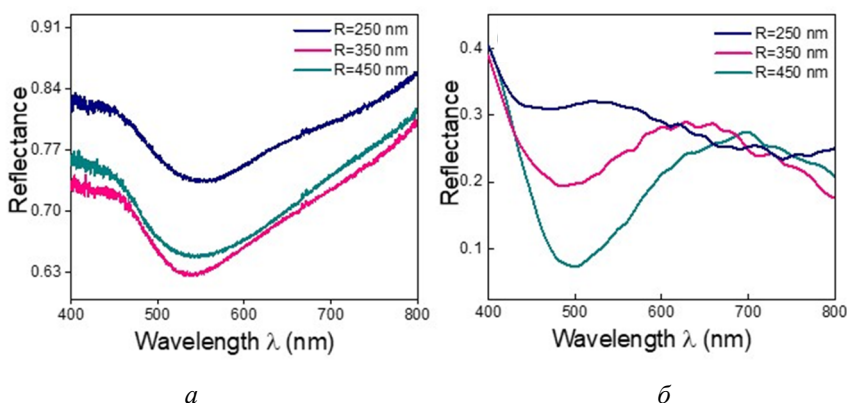


Рис. 2. Экспериментальные (*a*) и расчетные (*б*) спектры отражения от метаповерхности из резонансных Ми-войдов разного радиуса в кремниевой подложке; в расчете глубина для всех образцов была неизменной и равнялась 400 нм; геометрия полостей и диапазон размеров соответствуют экспериментальным данным

Для численного решения задачи рассеяния на метаповерхностях из резонансных Ми-войдов методом конечных элементов был использован программный пакет COMSOL Multiphysics. Нанополости были смоделированы в виде конических углублений в полубесконечной кремниевой подложке, над которой располагалась полубесконечная воздушная среда ($n=1$). Размеры конических углублений соответствовали экспериментальным данным, полученным из анализа СЭМ-изображений изготовленных образцов (см. рис. 1). Дисперсия кремния, используемая при моделировании, была взята из работы Schinke и соавторов [15]. Бесконечность внешней среды и подложки имитировалась при помощи расположения сверху и снизу расчетной области идеально согласованных слоев (PML). Поскольку исследуемые структуры являются периодическими, то в модели в поперечном направлении были применены периодические граничные условия. Для достижения хорошей сходимости численного решения для всех симуляций была построена подробная

сетка в области кремниевой подложки. Также можно отметить, что размер сетки в слоях РМЛ сверху и снизу расчетной области отличается, так как моделируют материалы с различным показателем преломления. Для возбуждения структуры в модели используется периодический порт, расположенный в воздушной области, над полостью. В соответствии с условиями эксперимента возбуждение осуществлялось по нормали, а мощность поля, отраженного от образца, фиксировалась на поверхности порта и нормировалась на падающую мощность. На рис. 2, а представлены полученные в результате моделирования, спектры отражения от метаповерхности из резонансных воздушных Ми-полостей. Сравнение с экспериментальными спектрами дает хорошее согласие. Незначительное отличие теоретического (500 нм) и экспериментального (520 нм) положения резонанса можно объяснить особенностями изготовления образцов. Так, после изготовления образцов при помощи сфокусированного ионного пучка проводилась их аттестация при помощи сканирующей электронной микроскопии. Известно, что воздействие электронного пучка на материал приводит к формированию на поверхности слоя аморфного углерода, что обусловлено кросс-линкингом и полимеризацией органических молекул, сорбированных на поверхности [14]. Формирование на поверхности образца тонкой углеродной пленки приводит к красному смещению резонанса в эксперименте. Наличием слоя аморфного углерода также может быть объяснено различие в уровне сигнала отражения в теории и эксперименте.

Известно, что резонансы Ми, возникающие в высокоиндексных материалах, таких как кремний, существенно влияют на типы рассеяния. Ранее было показано, что резонансные кремниевые наночастицы могут усиливать сигнал комбинационного рассеяния (КР) на несколько порядков [12]. Между наночастицами и Ми-войдами существует важное различие: в случае наночастиц поля локализованы внутри, тогда как в нанополостях резонансное субволновое локализованное ограничение света реализуется в воздухе. Если влияние резонансов Ми на комбинационное рассеяние света наночастиц уже продемонстрировано, то вопрос о влиянии рассеяния Ми-войдов на КР все еще остается недостаточно исследованным.

Спектроскопия комбинационного рассеяния. Для изучения влияния Ми-резонансов в исследуемых образцах на спектроскопию комбинационного рассеяния было проведено картирование спектров комбинационного рассеяния образцов при помощи конфокального

сканирующего микроскопа Horiba LabRAM HR Evolution (HORIBA Ltd., Киото, Япония). Все измерения проводились с использованием линейно-поляризованного возбуждения на длине волны 532 нм, дифракционной решетки 600 линий/мм и объектива $\times 100$ с числовой апертурой 0,9. Площадь пятна составляла $\sim 1,8$ мкм². Спектры комбинационного рассеяния регистрировались при падающей мощности 2,2 мВт и времени интегрирования 1 с в каждой выбранной точке. Максимальный размер карты составлял 20×20 мкм. Спектры регистрировались с шагом 0,5 мкм. Для картирования использовался пик кремния $520,7$ см⁻¹. Сравнение интенсивности спектров с обработанных и необработанных ионным пучком участков кремниевых пластин демонстрирует усиление сигнала в области массивов нанополостей (рис. 3, *a*). Анализ интенсивностей моды кремния ($520,7$ см⁻¹) показывает, что для Ми-войдов с радиусом 250, 350 и 450 нм отношение пиков к сигналу необработанного кремния для данных радиусов составляет 1,3, 2,1 и 1,7 соответственно. Картирование позволяет установить, что усиление локализовано в окрестностях нанополостей.

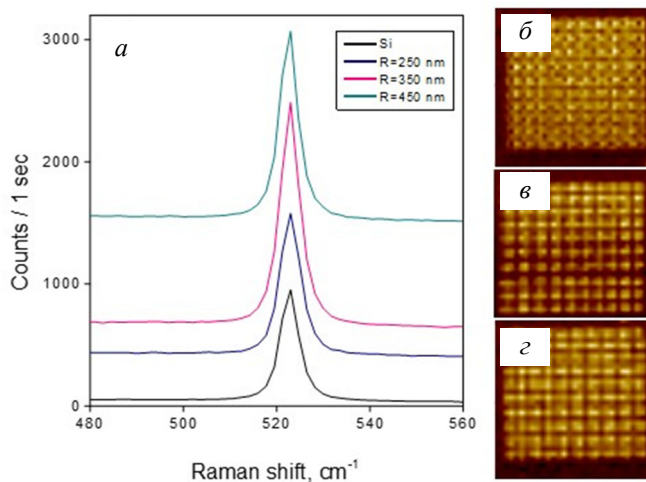


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния (*a*), полученные на необработанной кремниевой пластине и на Ми-войдах с фиксированной глубиной и разным радиусом; КР карты массивов Ми-войдов с радиусом (*б*) 250 нм, (*в*) 350 нм, (*з*) 450 нм соответственно

Моделирование резонансных Ми-войдов. Для объяснения полученных результатов, было проведено моделирование распределения электромагнитных полей в нанополостях, что позволяет получить

представление о собственных модах, которые поддерживаются исследуемыми метаповерхностями. Для моделирования использовался метод конечных элементов, как и для расчета спектров отражения (см. выше).

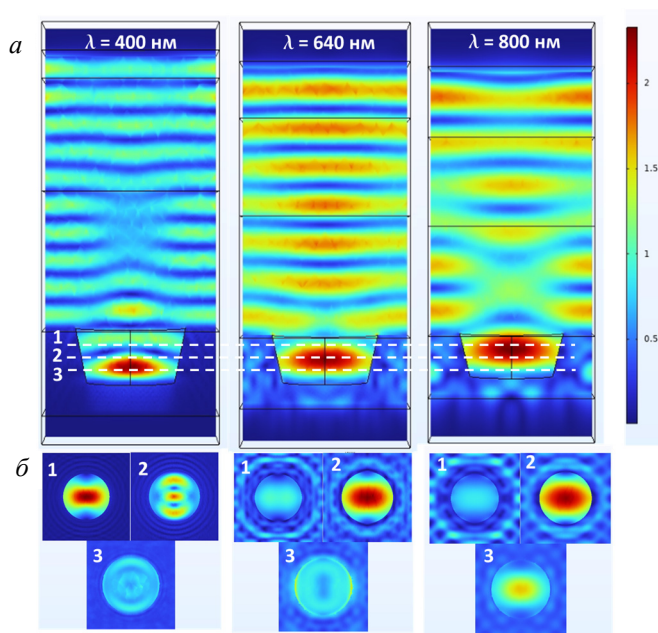


Рис. 4. Пространственное распределение абсолютной величины электрического поля (*а*) в продольном сечении расчетной области; в трех поперечных сечениях внутри нанополости (*б*); результаты расчета приведены для метаповерхности с радиусом войда 450 нм и глубиной 400 нм

На рис. 4 приведены пространственные карты модуля электрического поля для метаповерхности с радиусом нанополости 450 нм и глубиной 400 нм для трех различных длин волн: 400, 640 и 800 нм. Цветовая шкала отнормирована на напряженность падающего поля. Распределение поля демонстрирует одну из поддерживаемых мод, которая трансформируется с изменением длины волны. Так, можно отметить, что внутри нанополости образуется область усиленного поля. В диапазоне коротких длин волн (400 нм) эта область сосредоточена на дне нанополости. С увеличением длины волны область перемещается выше и достигает центра нанополости при длине волны примерно 640 нм, что отражено на приведенных поперечных сечениях внутри нанополости. Дальнейшее увеличение длины волны падающего поля приводит

к тому, что область усиленного поля сосредоточивается в верхней части нанополости. Необходимо отметить, что в диапазоне длин волн 500–550 нм для образцов с большими размерами Ми-войдов ($R=450$ и 350 нм) поле вблизи поверхности Ми-войда сильнее по сравнению с образцом с $R=250$ нм (рис. 5).

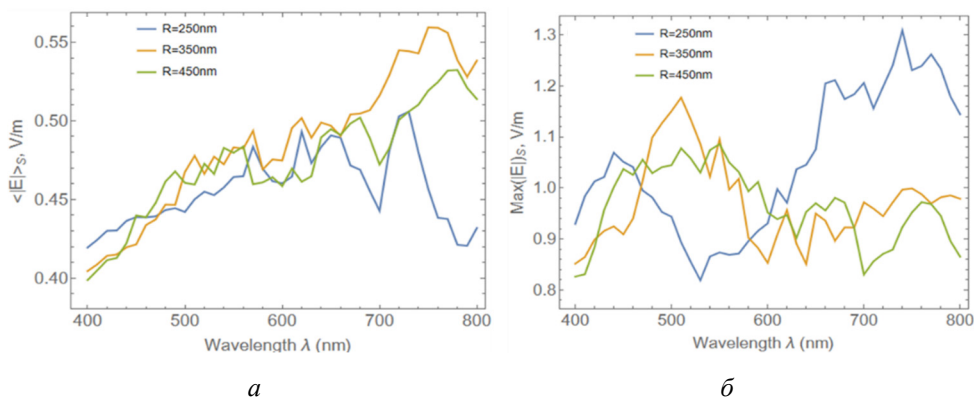


Рис. 5. Зависимость нормы электрического поля от длины волны падающего излучения: *а* – среднее по поверхности Ми-войда; *б* – максимальное значение на поверхности Ми-войда

Заключение

Полученные результаты моделирования, могут объяснять усиление сигнала комбинационного рассеяния на длине волны 532 нм представленного на рис. 3, *а*. Описанный эффект может найти различные применения, начиная от усиления спонтанного излучения различных люминофоров или квантовых точек, расположенных внутри нанополости, до усиления сигнала генерации высших гармоник от нанообъектов размещенных внутри или над нанополостью.

Список литературы

1. Plasmon mode excitation and photoluminescence enhancement on silver nanoring / A.A. Kuchmizhak [et al.] // Optics Communications. – 2015. – Vol. 356. – P. 1–6.
2. Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region / A.B. Evlyukhin [et al.] // Nano Lett. – 2012. – Vol. 12, № 7. – P. 3749–3755.
3. Direct amplitude-phase near-field observation of higher-order anapole states / V.A. Zenin [et al.] // Nano Lett. – 2017. – Vol. 17, № 11. – P. 7152–7159.

4. Photocatalytic properties of nanoscale Au/TiO₂ composite / I.V. Martynov [et al.] // *Appl. Photonics*. – 2023. – Vol. 10, № 8. – P. 5–16.
5. Nanoporous glass as prospective material for fiber optics / E.A. Plastinin [et al.] // *Appl. Photonics*. – 2023. – Vol. 10, № 8. – P. 82–101.
6. Development of the platform for nucleic acid analysis (DNA sequencer) / V. Bessmel'tsev [et al.] // *Appl. Photonics*. – 2016. – № 4. – P. 388–412.
7. Sierra-Martin, B. Particles and nanovoids for plasmonics / B. Sierra-Martin, A. Fernandez-Barbero // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2021. – Vol. 290. – P. 102394.
8. Shalin, A.S. Broadband blooming of a medium modified by an incorporated layer of nanocavities / A.S. Shalin // *JETP Lett.* – 2010. – Vol. 91, № 12. – P. 636–642.
9. Engineering nanoparticles with pure high-order multipole scattering / V.A. Zenin [et al.] // *ACS Photonics*. – 2020. – Vol. 7, № 4. – P. 1067–1075.
10. Dielectric Mie voids: confining light in air / M. Hentschel [et al.] // *Light Sci Appl.* – 2023. – Vol. 12, № 1. – P. 3.
11. Attoliter Mie void sensing / S. Arslan [et al.] // *ArXiv*. – 2024.
12. Broadband antireflective coatings based on two-dimensional arrays of subwavelength nanopores / D.A. Baranov [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2015. – Vol. 106, № 17. – P. 171913.
13. Micro-reflectance and transmittance spectroscopy: a versatile and powerful tool to characterize 2D materials / R. Frisenda [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 50, № 7. – P. 074002.
14. Electron-beam-induced carbon contamination in STEM-in-SEM: quantification and mitigation / M. Hugenschmidt [et al.] // *Microscopy and Microanalysis*. – 2023. – Vol. 29, № 1. – P. 219–234.
15. Uncertainty analysis for the coefficient of band-to-band absorption of crystalline silicon / C. Schinke [et al.] // *AIP Advances*. – 2015. – Vol. 5, № 6. – P. 067168.

References

1. Kuchmizhak A.A. et al. Plasmon mode excitation and photoluminescence enhancement on silver nanoring. *Optics Communications*, 2015, vol. 356, pp. 1-6.
2. Evlyukhin A.B. et al. Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region. *Nano Lett.*, 2012, vol. 12, no. 7, pp. 3749-3755.
3. Zenin V.A. et al. Direct amplitude-phase near-field observation of higher-order anapole states. *Nano Lett.*, 2017, vol. 17, no. 11, pp. 7152-7159.
4. Martynov I.V. et al. Photocatalytic properties of nanoscale Au/TiO₂ composite. *Appl. Photonics*, 2023, vol. 10, no. 8, pp. 5-16.

5. Plastinin E.A. et al. Nanoporous glass as prospective material for fiber optics. *Appl. Photonics*, 2023, vol. 10, no. 8, pp. 82-101.
6. Bessmel'tsev V. et al. Development of the platform for nucleic acid analysis (DNA sequencer). *Appl. Photonics*, 2016, no. 4, pp. 388-412.
7. Sierra-Martin B., Fernandez-Barbero A. Particles and nanovoids for plasmonics. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, vol. 290, p. 102394.
8. Shalin A.S. Broadband blooming of a medium modified by an incorporated layer of nanocavities. *JETP Lett.*, 2010, vol. 91, no. 12, pp. 636-642.
9. Zenin V.A. et al. Engineering nanoparticles with pure high-order multipole scattering. *ACS Photonics*, 2020, vol. 7, no. 4, pp. 1067-1075.
10. Hentschel M. et al. Dielectric Mie voids: confining light in air. *Light Sci Appl*, 2023, vol. 12, no. 1, p. 3.
11. Arslan S. et al. Attoliter Mie void sensing. *ArXiv*, 2024.
12. Baranov D.A. et al. Broadband antireflective coatings based on two-dimensional arrays of subwavelength nanopores. *Applied Physics Letters*, 2015, vol. 106, no. 17, p. 171913.
13. Frisenda R. et al. Micro-reflectance and transmittance spectroscopy: a versatile and powerful tool to characterize 2D materials. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, vol. 50, no. 7, p. 074002.
14. Hugenschmidt M. et al. Electron-beam-induced carbon contamination in STEM-in-SEM: quantification and mitigation. *Microscopy and Microanalysis*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 219-234.
15. Schinke C. et al. Uncertainty analysis for the coefficient of band-to-band absorption of crystalline silicon. *AIP Advances*, 2015, vol. 5, no. 6, p. 067168.

Сведения об авторах

БЕЛОЗЕРОВА Н.М.

e-mail: belozerovalnm@mipt.ru

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории контролируемых оптических наноструктур Центра фотоники и двумерных материалов МФТИ. Научный сотрудник лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ), г. Дубна.

About the authors

N.M. BELOZEROVA

e-mail: belozerovalnm@mipt.ru

Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny. Researcher of the laboratory of Neutron Physics named by I.M. Frank, Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna.

КИСЛОВ Д.А.

e-mail: denis.a.kislov@gmail.com

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории контролируемых оптических наноструктур, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

D.A. KISLOV

e-mail: denis.a.kislov@gmail.com

Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

МЕДВЕДЕВ И.Д.

e-mail: medvedev.id@mipt.ru

Техник, Лаборатория контролируемых оптических наноструктур, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

I.D. MEDVEDEV

e-mail: medvedev.id@mipt.ru

Technician, Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

КРУПАТИН И.Н.

e-mail: I.Krupatin@skoltech.ru

Инженер-исследователь, ЦКП «Визуализация высокого разрешения», Сколковский институт науки и технологии (Сколтех), Территория инновационного центра «Сколково», г. Москва.

I.N. KRUPATIN

e-mail: I.Krupatin@skoltech.ru

Research Engineer, Advanced Imaging Core Facility, Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Skolkovo Innovation Center Territory, Moscow.

ЗАВИДОВСКИЙ И.А.

e-mail: zavidovskii.ia@mipt.ru

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории контролируемых оптических наноструктур, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

I.A. ZAVIDOVSKIY

e-mail: zavidovskii.ia@mipt.ru

Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

СЮЙ А.В.

e-mail: alsyuy271@gmail.com

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории нанооптики и плазмоники, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

A.V. SYUY

e-mail: alsyuy271@gmail.com

D.Sc., Chief Researcher of the Laboratory Nanooptics and Plasmonics, Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

ВИШНЕВЫЙ А.А.

e-mail: vyshnevyi.aa@mipt.ru

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией нанооптики и плазмоники, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

A.A. VYSHNEVYY

e-mail: vyshnevyi.aa@mipt.ru

Dr. leading researcher, head of the Laboratory Nanooptics and Plasmonics of the Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

ШАЛИН А.С.

e-mail: alexandesh@gmail.com

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории контролируемых оптических наноструктур, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

A.S. SHALIN

e-mail: alexandesh@gmail.com

D.Sc., Chief Researcher of the Laboratory of Tunable Optical Nanostructures, Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

БОЛЬШАКОВ А.Д.

e-mail: bolshakov.ad@mipt.ru

Доктор физико-математических наук, директор Центра фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

A.D. BOLSHAKOV

e-mail: bolshakov.ad@mipt.ru

D.Sc., Director of the Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

АРСЕНИН А.В.

e-mail: arsenin.av@mipt.ru

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией контролируемых оптических наноструктур, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

A.V. ARSENIN

e-mail: arsenin.av@mipt.ru

Dr. leading researcher, head of the Laboratory of 2D Materials and Nanodevices, Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

НОВИКОВ С.М.

e-mail: novikov.s@mipt.ru

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией контролируемых оптических наноструктур, Центр фотоники и двумерных материалов Московского физико-технического института, г. Долгопрудный.

S.M. NOVIKOV

e-mail: novikov.s@mipt.ru

Dr. leading researcher, head of the Laboratory of controlled optical nanostructures of the Center for photonics and 2D materials, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny.

Благодарности. Изготовление Ми-войдов и сканирующая электронная микроскопия образцов выполнены на базе ЦКП «Визуализация высокого разрешения», Сколтех.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-19-00478 (эксперимент), 22-79-10312 (теория) и Минобрнауки РФ FSMG-2024-0014.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Получена: 01.10.2024

Одобрена: 04.10.2024

Принята к публикации: 05.10.2024

Financing. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 124-19-00478 (experiment), 22-79-10312 (theory) and Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSMG-2024-0014).

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 01/10/2024

Approved: 04/10/2024

Accepted for publication: 05/10/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Комбинационное рассеяние света от кремниевых резонансных Ми-войдов / Н.М. Белозерова, А.С. Славич, Д.А. Кислов, И.Д. Медведев, И.Н. Крупатин, И.А. Завидовский, А.В. Сюй, А.С. Шалин, А.А. Вишневы, А.В. Арсенин, А.Д. Большаков, С.М. Новиков // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 4. – С. 5–19.

Please cite this article in English as: Belozerova N.M., Kislov D.A., Medvedev I.D., Krupatin I.N., Zavidovsky I.A., Xu A.V., Shalin A.S., Vishnevy A.A., Arsenin A.V., Bolshakov A.D., Novikov S.M. Raman scattering from silicon resonant Mie-voids. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 4, pp. 5-19.